

双量程差压流量计的成功应用探讨

纪波峰 纪 纲 上海同欣自动化仪表有限公司 (上海 200070)

提 要: 讨论了与双量程差压流量计有关的五个问题。关于标准孔板的不确定度,三十年前只能做到 1%,那时是以计算尺为计算工具,并与查图和查表的方法相配合,实现孔板的计算。当时明知标准孔板的流量系数(流出系数)是变量,但在模拟技术环境中,只能把它当常数来处理,因此,在流量偏离常用流量后,便会产生误差。用这个方法计算的孔板,1%不确定度对应的量程比,只能达到 3 倍。GB/T 2624-1993 及之后的标准,将流出系数 C 当变量来处理,模型精度也有提高,不确定度可达 0.5%。差压装置的量程比也不再是瓶颈。关于流量计精确度的表示方法,有相应的国际标准、国家标准和行业标准来规范。关于低量程差压变送器在长期过范围条件下可能引起的漂移,仪表制造厂有具体指标。样机试验结果,在切换点处引起的流量示值漂移约为 -0.12%MV。如果将原有的高量程差压变送器,用数字通讯的方法将量程缩小,来代替低量程差压变送器,由于引用误差转换到示值误差后,差压测量不确定度增大,这一方法不可行。

关键词: 双量程差压流量计 引用误差 示值误差 量程比 精确度 长期过范围

1. 前言

《双量程差压流量计不确定度和量程比的验证》一文,在《石油化工自动化》杂志 2013 年第六期上登出后,收到中石化宁波工程有限公司严邦明教授和中石化上海工程有限公司邱宣振教授的来信。两位教授提出了与双量程差压流量计有关的五个问题。这五个问题也都是很多朋友关心的问题,而且具有相当的深度,在《验证》一文中^[1],由于篇幅的限制,没有机会将此类问题作深入讨论,今天借《仪表世界》杂志这块宝地,完成这一任务,朋友们如果还有其他问题,欢迎提出。

首先对二位教授对这一问题的关注表示感谢。下面依次对五个问题作讨论。

2. 以前都是说标准孔板不确定度为 1%,现在说是 0.5%了,是怎么回事?

答:标准孔板流量计是仪表工程师们最熟悉的流量计之一。在高等院校仪表与自动化专业的教材中,都包含有这方面的内容。

这种流量计在过程控制和工业计量中,应用得也十分广泛。

这种流量计的核心部件是标准孔板,其不确定度以前都说是 1%,确有其事。不仅如此,能够达到 1%不确定度的流量量程比也只有 3 倍。一直到二十世纪八十年代末,只能达到这个水平^{[2][3]}。例如在国家标准 GB2624-81 中,规范了标准孔板的设计、制造、安装和使用。在这个时代,计算机技术还没有推广到工业仪表,所以标准孔板的设计计算仍采用计算尺加查图查表的方法。标准孔板设计中的关键参数流量系数 α [新标准是用流出系数 C, $\alpha = C / (1 - \beta^4)^{\frac{1}{2}}$, 其中 β 为直径比],是当作常数来处理的。由于 α 实际上并不是一个常数,而且随雷诺数 Re_D 及直径比 β 变化的一个变量,即

$$\alpha = f(Re_D, \beta) \quad (1)$$

或
$$C = f(Re_D, \beta) \quad (2)$$

式中, α —— 流量系数;

Re_D —— 雷诺数;

β —— 直径比;

C —— 流出系数。

图 1 所示是标准孔板流出系数的典型曲线^[4]。

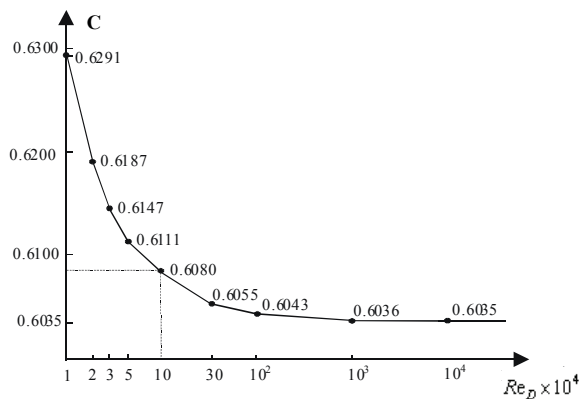


图 1 典型标准孔板流出系数随雷诺数变化曲线 ($\beta = 0.6$)

由于这根曲线是倾斜的，所以，流量 q_m 从小到大变化时， Re_D 也跟着从小到大变化，而 C 是从大到小相应变化。这样，在流量偏离常用流量时，流出系数（或流量系数），也就与设计值不同，从而产生误差，而且，偏离常用流量越远，产生的误差越大。为了使误差不致太大，标准规定，只能在常用流量附近使用，量程比不能大于三倍。这就是老标准中标准孔板 3 倍量程比和 1% 不确定度的来历。

图 2 所示为老标准中求取流量系数 α 的典型用图^[2]。

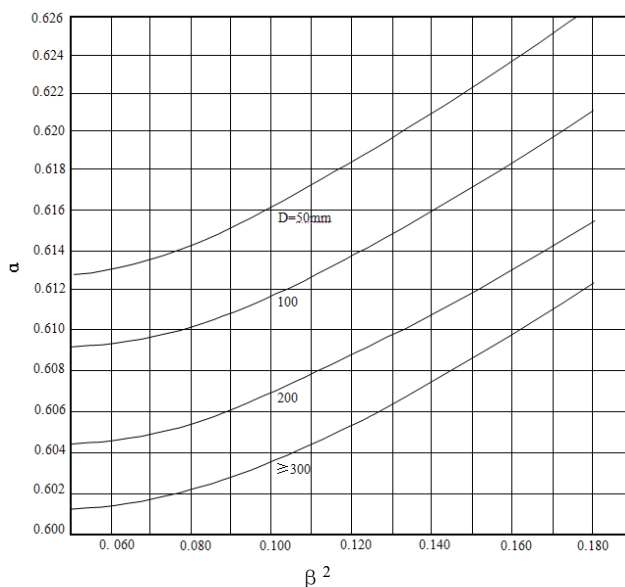


图 2 流量系数 α 与直径比平方 β^2 的关系

俱往矣。自从 CPU 进入工业仪表，情况发生了革命性的变化，因为按照标准所提供的 $C=f(\beta, Re_D)$ 模型，实时计算流出系数已不是一件困难的事情，在 GB/T 2624-93（等同于 ISO5167: 90(E)）中提供的 Stolz ISO5167 模型，经过 10 多年的试验研究，作了进一步改进，在 ISO 5167.2-2003 (E) 中提供的 R/G 公式，精确度有了进一步提高。在这个模型中，

$$C = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521\left(\frac{10^6\beta}{Re_D}\right)^{0.7} + \left[0.0188 + 0.0063\left(\frac{19000\beta}{Re_D}\right)\right]\beta^{3.5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.3} \quad (3)$$

式中：C —— 流出系数；

β —— 直径比；

Re_D —— 与 D 有关的雷诺数。

只要满足下列使用条件就能得到 0.5% 的不确定度^{[5][6]}。

$$50 \leq D \leq 1000 \text{mm}$$

$$d \geq 12.5 \text{mm}$$

$$0.2 \leq \beta \leq 0.6$$

$$Re_D \geq 5000$$

所谓流量量程比就是保证精确度的最大流量 $q_{\max}$ 与最小流量 $q_{\min}$ 之比^[4]。在常用压力和常用温度条件下，雷诺数与流量成正比关系，所以，如果 $q_{\max}$ 与 $q_{\min}$ 之比为 10，就意味着 $Re_{D\max}$ 与 $Re_{D\min}$ 之比为 10，而在上述标准中， $Re_{D\max}$ 与 $Re_{D\min}$ 之比差 10 倍、100 倍甚至更大的倍数，标准中规定的 $C=f(\beta, Re_D)$ 的模型都能达到规定的不确定度。

所以能够做到这一点是因为 GB/T 2624 从 93 版开始，就已经不再将流出系数 C 当常数来处理，而是当变量来处理，因此，这项改进对标准孔板来说，具有里程碑意义。是国际上 10 个最著名的实验室和众多的研究者几十年辛勤劳动的结晶，尤其是英国国家工程实验室（NEL）资深研究员 READER HARRIS 所做的突出贡献，他对全球十个最著名的实验室所提供的 16522 个实验数据点做了分析和回归，得到著名的 R/G 公式。

3. 一台孔板带两台差压变送器，其中的一台低量程差压变送器难免要在过范围的条件下运行。长期处于过范围状态的低量程差压变送器，测量精确度是否有影响？是否稳定？

答：这是一个差压变送器长期过范围影响的问题。关于过范围这个术语，以前的文献上有过载、超限、超负荷等多种叫法，自从机械行业标准 JB/T 9233.10-1999 发布后，统一称过范围（overrange）。关于过范围后能够达到的技术指标，不同的公司不同的产品会有差异。例如横河

指标是：承受 16MPa 过压后，影响值 $\pm 0.03\%$ 量程上限。

由此可见，几乎没有影响。

在横河公司的产品样本中，列有 EJA 型差压变送器的过压试验图，仪表量程 10kPa，在其信号输入端交替施加 14MPa 压力，反复 10 万次，试验后，几乎没有发生变化。过压试验引起的零点漂移曲线如图 3 所示。过压的长期稳定性曲线如图 4 所示。

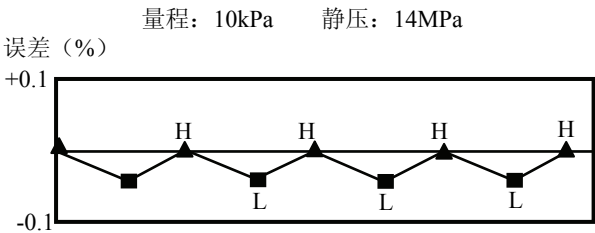


图 3 过压引起的零点漂移

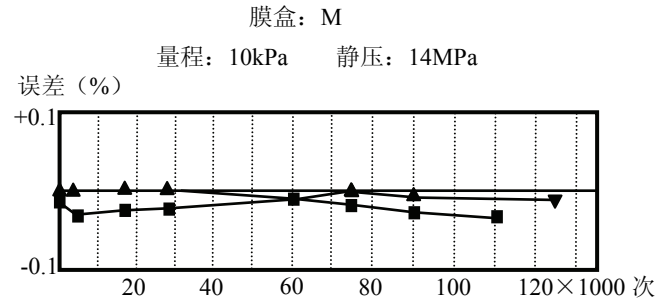


图 4 对于过压的长期稳定性

我们也对一台 EJA 差压变送器做过过范围试验，被试的是一台 0~3kPa EJA110A 低量程差压变送器，在其正压侧施加 100kPa 信号 24 小时后，将过范围信号撤销，然后对样机进行校验，结果如表 1 所示。

表 1 EJA110A 0~3kPa 样机过范围试验结果

输入差压标准值/kPa		0.000	1.000	1.500	2.000	3.000
试验前	应有示值/%	0.00	33.33	50.00	66.67	100.00
	实际示值/%	0.01	33.28	50.05	66.81	100.00
过压 24h	1min 后示值/%	-0.24	33.23	49.87	66.69	99.77
	16h 后示值/%	-0.09	33.35	50.08	66.87	99.94
	9 天后示值/%	-0.01	33.38	50.09	66.87	100.00

从表 1 所列数据可以看出，影响最大值是量程的-0.24%，这一负向漂移最先影响的是低量程上限处的流量示值，大约产生读数的-0.12%的流量示值误差，对于系统精确度为 1.5%的流量计来说，这点误差应是可以接受的。而且随着时间的推移，漂移值的影响还在逐渐减小。

现在计算机应用越来越普遍，很多双量程差压流量计的测量结果都被 SCADA 系统采集。在计算机的瞬时流量趋势图中，也可对低量程差压变送器由过范围状态，回到正常测量状态是否出现显著误差进行判断。如果长期过范围后差压示值漂移较大，在从高量程切换到低量程时，曲线将会出现明显的跳跃，但目前为止，在投入使用的数以千计的双量程差压流量计，从未发生用户趋势图出现跳跃现象。

4. 文中（1~3）%FS 区间的误差为什么不用示值相对误差表示，而用引用误差表示？

答：国家标准和行业标准规定，流量计的精确度，可以用量程的百分数或用示值的百分数表示，也可在测量范围内分段用上述两种方法表示。如果需要用量程的百分数表示，应说明此量程流量^{[7][8][9]}。这是根据流量仪表的特殊性，表述仪表测量精确度的合适方法。例如

- ① 螺翼式冷水表：低区（ $q_{\min} \leq q < q_t$ ） $\pm 5\%$ 读数值
高区（ $q_t \leq q \leq q_{\max}$ ） $\pm 2\%$ 读数值

式中 $q_{\min}$ —— 最小流量；
 q_t —— 分界流量；
 $q_{\max}$ —— 最大流量。

- ② 在超声流量计中，以测量值（Measurement Value）的百分数表示（以 1.0%级为例）

低区（ $q_{\min} < q < q_t$ ） $\pm 2\%MV$
高区（ $q_t < q < q_{\max}$ ） $\pm 1\%MV$

- ③ 科隆电磁流量计（以 0.3%级为例）

低区（ $V < 1m/s$ ） $\pm(0.2\%MV+1m/s)$
高区（ $V \geq 1m/s$ ） $\pm 0.3\%MV$

- ④ 插入式电磁流量计

$V < 1m/s$ $\pm 5\%MV$
 $V \geq 1m/s$ $\pm 2\%MV$

- ⑤ 科氏力质量流量计（以 0.1%级为例）

低区 [(2.5~7%) % $q_{\max}$] $\pm(0.26\%$ 读数值+零点稳定性)
高区 [(7~100%) % $q_{\max}$] $\pm(0.1\%$ 读数值+零点稳定性)

- ⑥ 热式质量流量计（以 1.5%级为例）

$\pm(1\%$ 读数值+0.5%满量程)

在双量程差压流量计中，其基本测量范围是（3~100）% $q_{\max}$ 或称（3~100）%FS，在配用 0.065 级差压变送器时，不确定度能达到 1.5%MV；配用 0.04 级差压变送器时，不确定度能达到 1.0%MV，

如图 5 所示。而在 (1~3) % $q_{\max}$ 区间，不确定度要大一些，但是有的用户也要用，于是就表示为

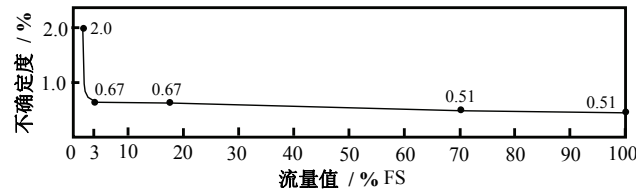


图 5 双量程孔板流量计不确定度曲线

(1~3) % $q_{\max}$ $\pm 1.5\%$ 低量程流量上限

(3~100) % $q_{\max}$ $\pm 1.5\%MV$

这样表示，用户是看得懂的，同样是 1.5%，但在 (1~3) % 区间，与 (3~100) % 区间，允许误差的意义不同。

5. 1.0%MV 表示的误差是否可改为 1.0%被测变量？

答：流量测量仪表的历史有一百多年，在其发展的历程中，流量测量精确度都是衡量其性能的关键指标。精确度在计量专业中称准确度，国外都称 Accuracy。表示引用误差常用满标度的百分数 (%FS) 或量程的百分数表示，旋转式水表和容积式流量计，没有标度和量程的概念，则以最大流量 ($q_{\max}$) 的百分数表示。而示值误差也称相对误差 (relative error) 常以读数值的百分比表示，但是相关标准规定，相对误差是测量绝对误差除以真值 (或约定真值) [11]。由于读数不能代表真值，所以用测量值 MV (measurement Value) 表示更恰当，MV 意即被测量的真值。其实，相对误差这个术语大家用的并不多，容易同引用误差混淆，因为引用误差表示的也不是绝对误差。

关于流量测量的术语和符号，在 GB/T 17611-1998 和 JJF1004-2004 中做了规范 [8] [10]，关于计量的术语和定义，在 JJF1001-2004 中做了规范 [11]。

6. 现代技术的发展，有否可能在一台智能差压变送器中，采用高低量程切换的方法，实现流量的双量程测量？

答：在量程比要求宽广的标准差压式流量计中，在原来已有的一台高量程差压变送器的基础上，增设一台低量程差压变送器，是为了提高低量程段的差压测量精确度。例如原有的一台为 0~100kPa，现增设一台 0~3kPa 的低量程差压变送器，如果两台差压变送器的精确度都是 0.04%，则可将 0~3kPa 段的差压测量精确度提高大约 30 倍。这样，在流量满度的 (3~17.32) % 范围内，低量程差压变送器有效，在流量满度的 (17.32~100) % 范围内，高量程差压变送器有效，高低量程差压变送器覆盖的流量量程比都是 5.77 倍，则两段量程无缝连接后，就能实现 $5.77^2 \approx 33.3$ 倍量程比，而且在流量满度的 3% 处与 17.32% 处，能得到相同的差压测量不确定度，从而完成双量程测量任务。这样设计能合理利用两台变送器的资源，避免苦乐不均现象。

如果将低量程差压变送器取消，只用一台高量程智能差压变送器，在流量进入低量程区间时，用数字通讯的方法将量程切换到 0~3kPa，来完成对流量低段的测量，是否可行？

答案是不可行。因为用数字通讯的方法，即使能改变高量程差压变送器的量程，但该变送器在低量程段，其不确定度是很差的。

按照 GB/T 21446-2008 提供的公式，可以估算一台差压变送器，在测量不同的差压时的测量不确定度 [12]：

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = \frac{2}{3} \xi_{\Delta p} \cdot \frac{\Delta p_K}{\Delta p} \quad (4)$$

式中: $\frac{\delta\Delta p}{\Delta p}$ —— 差压测量不确定度;

$\xi_{\Delta p}$ —— 差压变送器精确度等级;

Δp_K —— 差压变送器上限值, Pa;

Δp —— 预计差压测量值, Pa。

以满量程流量 3%这一点为例, 该点的应有差压值 Δp 仅为 90Pa, 如果用低量程差压变送器测量, 因其 $\Delta p_K=3\text{kPa}$, $\xi_{\Delta p}=0.04\%$, 所以 $\frac{\delta\Delta p}{\Delta p}=0.89\%$ 。而如果改用高量程差压变送器测量, 因其

$\Delta p_K=100\text{kPa}$, 所以 $\frac{\delta\Delta p}{\Delta p}=29.6\%$, 显然后者因不确定度太大而不宜采用。

高量程差压变送器的量程, 从 0~100kPa 切换到 0~3kPa, 在 90Pa 这一点的不确定度为什么不佳呢? 这是因为用数字通讯的方法切换到 0~3kPa, 仅仅是将变送器输出 20mA 所对应的数字量测量结果, 从 100kPa 切换到 3kPa, 而测量结果的不确定度是由数字量测量结果决定的。

不仅如此, 0~100kPa 变送器的环境温度影响也比低量程变送器大得多。其中环境温度对输出零位的影响, 在测量小流量时是至关重要的。

江苏张家港有一电厂, 用 STD924 型差压变送器配标准孔板测量蒸汽流量, 差压上限 $\Delta p_K=60\text{kPa}$, 原为单一量程, 小流量时误差太大, 无法使用, 后来买了一台双量程流量二次表, 并从仓库里又领了一台 STD924, 将差压测量范围设置为 0~2kPa, 组成双量程差压流量计。本以为仪表说明书中阐明精确度为 $\pm 0.075\%$, 差压范围 0~100kPa, 所以这样配置后就可以将小流量测得很准, 但是投入运行后, 从 SCADA 趋势图上, 发现在高低量程切换时, 瞬时流量值出现明显的跳跃。经讨论分析, 认为是将 0~100kPa 测量范围的变送器, 设置成 0~2kPa 测量范围使用, 产生较大误

差。加上高量程差压变送器在切换点 2kPa 处, 不确定度也较大 (按式 (4) 估算 $\frac{\delta\Delta p}{\Delta p}$ 约为 1.5%),

从而引起流量示值差异。后来, 将低量程差压变送器换成一台 EJA110A-DLS5A 0~2kPa, 切换时的流量示值跳跃就完全消除。

外国人也在寻找扩展差压式流量计量程比的方法。下面是一个真实的故事。广东有一家研究院建有四套做安全阀型式试验的试验装置, 两套用于空气试验, 两套用于蒸汽试验。四套装置中, 做安全阀泄放流量测量的仪表均为标准孔板流量计。由于需要在装置上做试验的安全阀, 起跳压力高高低低相差悬殊, 安全阀公称通径大小也相差悬殊, 因此, 对流量计量程比的要求特别高, 高达 125 倍。基建阶段安装的四套标准孔板流量计都是单一量程。仪表投入使用后发现, 在流量高的时候, 测量精确度还可以, 但流量低的时候, 无法使用。其中有一套蒸汽流量计, 在与流量计串联的控制阀全关时, 仍有 2t/h 流量显示。另有一套空气流量计, 在公称通径较小的安全阀起跳后, 流量仍指示 0, 准与不准的问题更是无从谈起。

委托方提供了一条信息, 说是美国有个机构也有相类似的几套装置, 他们采用更换孔板的方法拓宽量程比。每套流量计配六、七块标准孔板, 每一次做试验时, 根据流量范围选取一块孔板, 从而解决量程比和精确度的问题。

在高压管道上更换孔板是一件苦差事, 要两个壮小伙忙半天, 才能换好一副孔板, 所以委托方要求, 拓宽量程比的改进工作, 不采用更换孔板的方法。经讨论研究, 根据委托方的要求和实际使用条件, 我们制定三量程改进方案, 即每套流量计各配用三台 EJA 差压变送器, 其中低量程、

中量程和高量程各一台，三台差压变送器以及用于压力补偿的压力变送器与流量演算器之间，采用 HART 数字通讯的方法传送信号，从而将用 4~20mA 信号传送测量结果而引起的误差全部消除掉。在 125 倍量程比范围之内，保证流量测量精确度。

象这样组成的超宽量程差压流量计，因为用于安全阀型式试验，精确度和稳定性要求都非常高。而且流体从安全阀泄放口排出的时间总共只有一两分钟，所以还要求流量计响应及时。用户担心在“高→中”量程切换和“中→低”量程切换时，会出现阶梯状图形，故利用现场的试验装置做低→中→高和高→中→低的量程切换，试验结果令大家非常满意，曲线非常平滑，从曲线上根本看不出切换是在哪一点发生的。具体趋势图如图 6 所示。其中有尖峰的曲线，是打开补汽阀对空的试验罐充汽的流量；另一根较平坦的曲线，是试验罐内蒸汽压力。

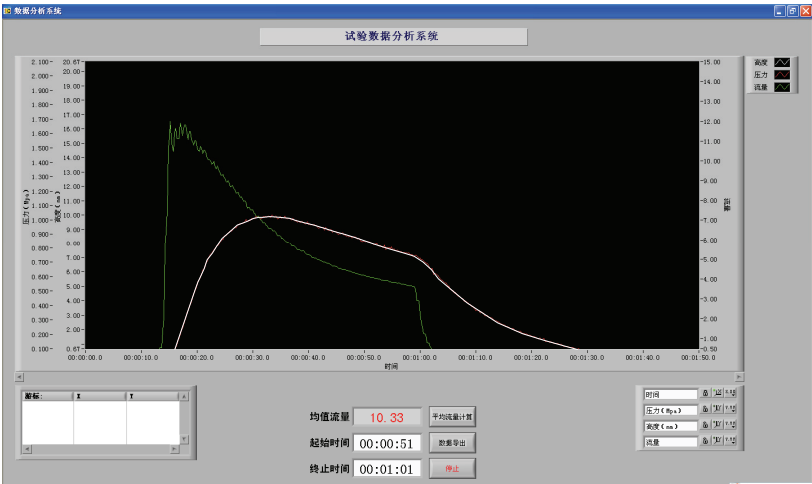


图 6 三量程流量计瞬时流量趋势图

图 7 所示是其中两套流量计的变送器在现场的安装。



图 7 变送器在现场的安装

上面的两个事例对人们有一个启示,即从瞬时流量趋势图中,通过观察高低量程切换点曲线是否平滑,就可知道双量程切换点处工作是否正常。

标准差压流量计不确定度的减小和量程比的扩大,是一项重要的技术进步,方法成熟、可靠。

参考文献

1. 魏峥, 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
2. 国家仪器仪表总局标准化研究院. GB2624-81 流量测量节流装置的设计安装和使用. 1981.12
3. 上海工业自动化仪表研究所. 流量测量节流装置设计手册. 北京: 机械工业出版社. 1966, 172~208
4. 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, 2012:21
5. ISO. ISO 5167-2: 2003 (E) Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full[S]. Switzerland:ISO, 2003.
6. 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.
7. JB 9248-1999 中华人民共和国机械行业标准 电磁流量计
8. GB/T 17611-1998 封闭管道中流体流量的测量 术语和符号
9. ISO 11631 Measurement of fluid flow—Method of specifying flowmeter performance. 1998
10. JJF1004-2004 流量计量各名词术语及定义
11. JJF 1001-1998 通用计量术语及定义
12. GB/T 21446-2008 用标准孔板流量计测量天然气流量.

摘自《仪表世界》2017年6月号