

流量测量中的相似性问题及新型流量计

明 晓

(南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要: 本文从流体力学的相似性原理出发, 讨论了流量测量中的相似性问题, 流量计标定环境和实际测量环境之间, 由于不能满足流动相似性条件, 必然产生系统误差。目前, 为了消除或减小这种系统误差所采取的措施都不能从根本上解决问题。作者发明的新型流量计, 从内流流动控制出发, 调整来流流场, 使得在任何来流情况下, 流量计内部实现运动相似。经过优化设计的新型流量计, 即槽道流量计, 全面提高了流量测量的精确度和适应能力。该流量计已经取得了中国发明专利和欧洲专利, 并应用到各种实际的流量测量中。

关键词: 流量测量; 流动相似性; 槽道流量计

0 引言

为了准确地进行流量计量, 流量计在流量标准装置上标定的数据应用到实际测量中时, 标准装置的流动与实际测量的流动必须相同或相似, 即满足相似性原则, 否则会产生误差。

由于实际应用环境千变万化, 难以保证流动的相似性, 由此产生的误差难以消除。为此, 流量测量的实践中, 要求在流量计的上下游配置足够长的直管段。在现场条件不允许配置直管段的情况下, 采用了各种五花八门的调整器。由于这些调整器, 都没有考虑流动的相似性, 实践证明, 各种调整器不能解决根本问题。

本文作者, 从管流流动控制出发, 设计节流件—纺锤体, 边界层从新开始, 使得任何来流经过节流件时, 边界层重新开始, 在环形槽道内中部都能得到均匀的流场, 和相同的速度型, 从而满足了运动学相似。

经过优化的纺锤体节流件是良好的流线体, 避免了流动分离, 阻力小, 流动十分稳定。实验室标定结果和实际使用证明, 槽道流量计具有极好的精确度和极强的适应性。

槽道流量计已经在不同的设备校准, 包括在中国国家计量院, 德国联邦物理技术研究院 PTB 和和美国科罗拉多工程试验室 CEESI 的标准装置上进行了标定。在德国 PTB 的校准, 还在流量计上游, 根据 OIML R 137 的要求, 在不同的周向位置, 配置了不同单弯头和双弯头, 模拟实际工业环境中的干扰。校准结果表明, 当雷诺数大于 10^5 后, 流出系数 C 不依赖雷诺数而保持常数。在 PVTt 气体流量原及标准装置中校准, 得到 0.11% 的不确定度, 好于目前的流量值传递的次级标准因为非常稳定的流动和非常刚性的结构。

槽道流量计已经取得了中国专利和欧洲专利, 并开始得到广泛应用。

1 流量测量中的相似性问题

流动相似的前提是控制方程必须相同, 在此基础上要求定解条件成比例。

目前, 全世界对差压式流量计采用的流量计算公式是

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

它是依据伯努利方程推导出来的。伯努利方程应用的对象是定常无旋的理想流体, 它不同于准确描述实际流动的 N-S 方程, 因此从根本上存在着流动相似性问题。

伯努利方程不能用于管道流动，实践中添加了两个修正系数 C 和 ϵ ，分别称为流出系数和可膨胀因子。世界各国的实践证明上述流量计算公式是适用的。只要有可靠的流量标准装置，可以经过标定试验来确定流量计的流出系数和可膨胀因子。但是流出系数 C 和可膨胀因子 ϵ 的物理意义并不清晰。

作者用量纲分析的方法得到的表达式：

$$f_1(\Delta p, \rho_1, p_1, v_1, D, d_s, \mu) = 0$$

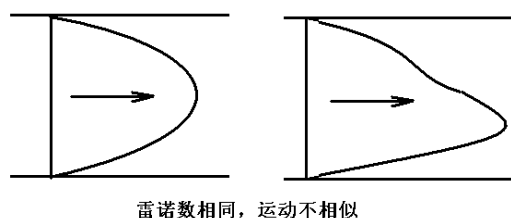
$$q_m = f(\text{Re}, \beta, \gamma M^2) \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2 \rho_1 \Delta p}$$

β 为节流比。 Re 和 M 分别为雷诺数和马赫数，即分别考虑粘性影响和压缩性影响，它们是彼此独立的量。流出系数 C 只与雷诺数有关。可膨胀因子 ϵ 只与马赫数有关。

比较上面两式，流出系数 C 只与雷诺数有关，而可膨胀因子 ϵ 反应了马赫数（压缩性）的影响。标定试验的目的就是要确定流出系数 C 只与雷诺数的关系，同时获得 ϵ 。

流量测量一直存在着标定的数据与现场测量数据之间的偏差，以及不同应用场合之间的偏差。这种偏差是系统误差，很难从根本上消除。这一问题的本质是同一台流量计面临着不同的流动环境（流场），而不同的流动环境之间的运动相似性没有得到保证。如同风洞试验中对试验段流场品质的要求，以及对洞壁干扰和支架干扰的考虑。只有在良好的流场品质，并将洞壁干扰和支架干扰扣除后，才能将风洞的试验数据用于飞行器的设计中。

众所周知，从 $N-S$ 方程得到很多的相似参数。由于管道中的流动是粘性流动，流量测量中必然涉及到动力学相似参数，首先是雷诺数。代表雷诺数影响的是流出系数。流量测量中的雷诺数是以管流的平均流速为参考的。对于相同管径，相同流量（相同平均流速），即使雷诺数相同，管道内的流速分布（速度型）对于不同的应用场合，往往不可能相同，如图所示。这导致了运动相似性得不到满足。因此，在实验室标定的流量计，到现场应用必然产生系统误差。



由于应用场合的复杂性，这种系统误差很难修正。为此世界各国很多公司开发了各种管流的调节器（conditioner），如图 1 所示。很显然这些五花八门的调节器的功能，除了加强混合（加大湍流）外，不可能真正保证运动相似性。

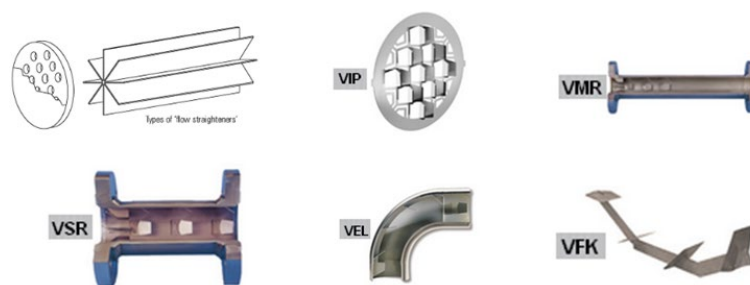


图 1 各种调节器

此外，在气体流量测量中，即使流速很低，压缩性所导致的误差是不能忽略的。在差压

式流量计使用中，压缩性是以可膨胀因子的形式出现的。

2 槽道式流量计结构

图 2 显示了槽道式流量计的结构。1，低压取压点；2，高压取压点；3，测量管；4；温度测量；5，纺锤体节流件；6，前支撑片；7，后支撑片。

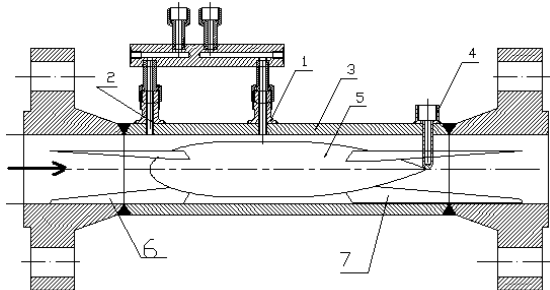


图 2 槽道式流量计结构

槽道流量计的结构非常可靠。支撑片的设计和优化，使他们很可靠地固定在测量管的中心。这种设计可以保护中心纺锤体在气体管道中能经受激波的冲击，在液体管道中能经受水锤的冲击。

流量测量所用的压力差是由一个安装在管道中心的纺锤体节流件产生的。在纺锤体中间部分和壳体之间形成一个环形通道。数值模拟表明，纺锤体节流件将上游不同的流动状态调整成一个环形槽道流。

纺锤体能够调整流量计上游的不同的来流特性，即使在不同的工业应用环境中，也能够得到一个非常稳定的，可重复的环形槽道流动。纺锤体的外形经过遗传算法优化，流动不发生分离，在保持低阻力的情况下，仍然产生很高的差压值。流线型的外形还提供了一种自洁功能。

2 槽道流量计内部流动特性

用计算流体力学（CFD）方法进行的数值模拟结果表明，槽道式流量计具有良好的流动特性。

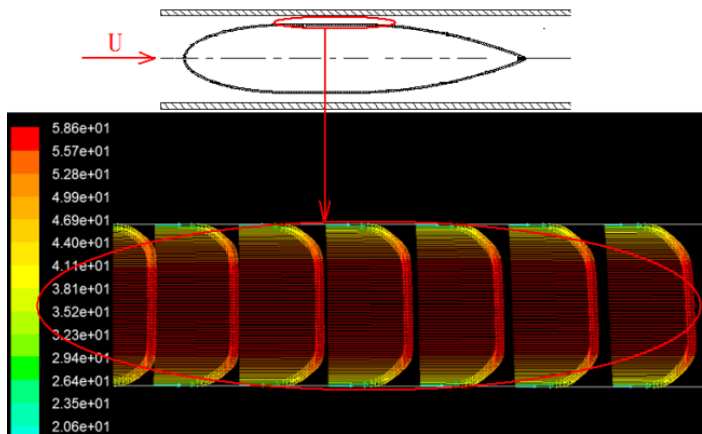


图 3 槽道内的流动特性

数值模拟结果表明来流经过纺锤体时，原来的管流特性已经改变，两侧的边界层重新开始形成。在两侧边界层之间是均匀的流动，如图 3 所示。这一特点极为重要。因为随着雷诺数的增加（流量的增加）边界层厚度将变薄，即粘性的影响变小。因此，可以期望流出系数保持常数。

为研究纺锤体对于流量计上游来流的调节能力，假设了一个任意的速度分布，如图 4 所示。数值模拟结果表明，当任意速度分布接近纺锤体时，速度分布变得规整，最终在中部的环形槽道内，获得了与图 3 相似的均匀流动。

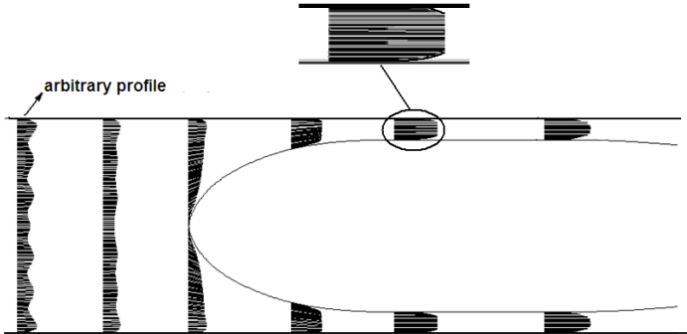


图 4 任意速度分布的来流的演变

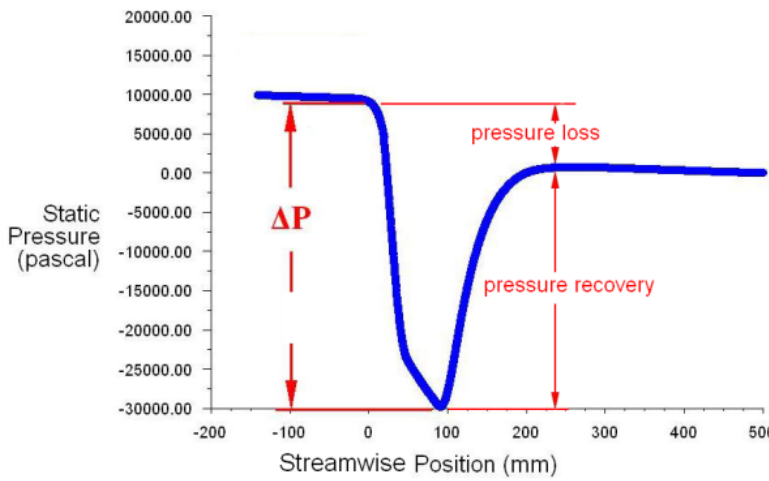


图 5 槽道流量计内部的压力分布

图 5 是数值模拟得到的槽道流量计内部的压力分布。从图 4 可以看出，纺锤体能产生很大的差压，而发生很小的永久性压力损失。这是因为流线型的纺锤体避免了流动分离，流动经过纺锤体后，大部分压力下降得以恢复。

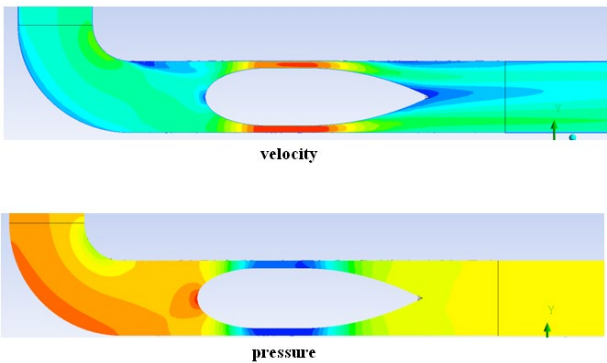


图 6 安装位置对槽道流量计的影响

图 6 表明当槽道流量计直接连接到管道弯头时，弯头所产生的紊乱流动，经过纺锤体时，变得对称而规整。同时，它所产生的尾流很短。这一特性说明，槽道式流量计对于下游的设备产生的影响很小。在有些场合，这一特点是很重要的。

3 槽道流量计的校准

槽道流量计已经在国内外不同校准设备上进行了校准。图 7 是在中国计量科学研究院的水装置上校准的结果。正如所期待的那样，当雷诺数大于 10^5 后，流出系数成为常数。即使在雷诺数小于 10^5 的情况下，流出系数虽然不是常数，但是其重复性任然非常好，优于 0.06%。

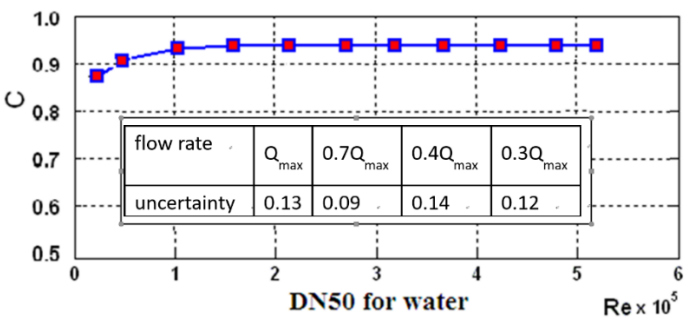


图 7 槽道流量计在水装置上的校准结果

同一个 DN80 的槽道流量计分别在德国的 PTB 的气体流量标准装置上和美国最知名的工程试验室 CEESI 的气体流量标准装置上进行了校准，其结果如图 8 所示。同样可以看出，当雷诺数大于 10^5 后，流出系数成为常数。

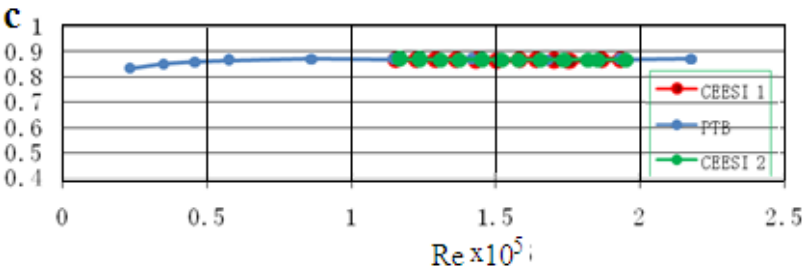


图 8 槽道流量计在 PTB 和 CEESI 气体流量标准装置上的校准结果

尽管在德国 PTB 的校准和在美国 CEESI 的校准是完全独立的，但是可以看出三者之间非常一致。表 1 比较了两者的流出系数和标准差。

表 1： 流出系数的比较 ($Re > 10^5$)

	PTB	CEESI-1atm	CEESI-3atm
C ($Re > 10^5$)	0.8705	0.8679	0.8671
Standard deviation	0.053%	0.025%	0.020%

同一个流量计在江苏气体流量中的原级标准装置 PVTt 上标定的结果表明，其不确定度为 0.11%。因此，槽道流量计有能力作为新的流量量值传递标准。

4 流量计上游干扰的影响

在德国 PTB 的试验中，还对上游各种干扰条件下的流出系数进行了测试。如图 9 所示，试验中在流量计的上游不同的周向方位，安装了各种弯头，包括单弯头和双弯头。

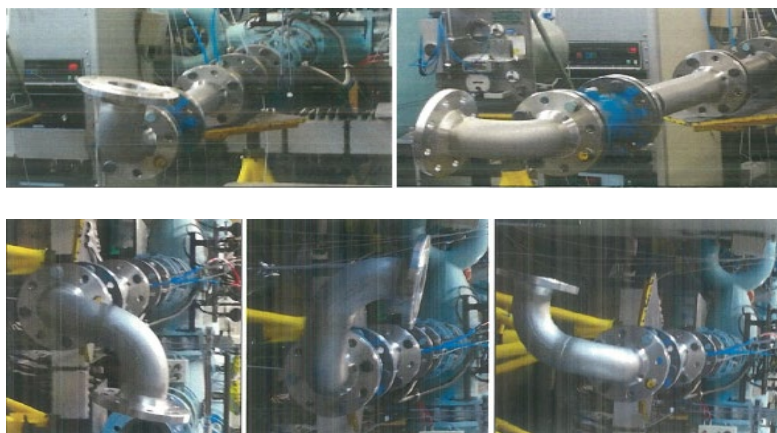


图 9 在 PTB 进行的安装条件对测量的影响试验装置

试验结果如图 10 所示。所有情况下的偏差都在 $\pm 1\%$ 之内。雷诺数大于 10^5 后，误差带大约在 -0.4% 到 0.6% 之间。仔细分析实验数据可以发现，只要适当地调整取压点的周向位置，可以将偏差控制在 $\pm 0.5\%$ 之内。

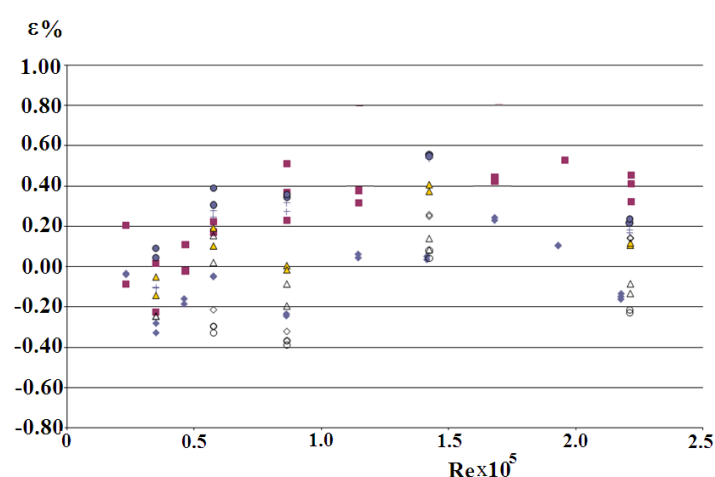


图 10 不同的上游安装条件产生的误差

5 槽道流量计的临界流特性

为了扩大槽道流量计的量程，探讨了槽道流量计的临界流特性。

气体流过槽道流量计的流速（流量）随着上游压力的增加而增加。当槽道流量计入口压力达到一定大小时，在槽道流量计的最小截面积处，流动达到音速。如同临界音速喷嘴（或拉法尔喷管）一样，下游的扰动不能向上游传播，流动达到临界状态，根据一维等熵流的理论，流经流量计的流量只取决于上游总压和总温度。

本文要探讨的问题是，槽道流量计在临界流状态下的特性，与非临界流的特性是否一致。为此进行了数值模拟。图 11 是槽道流量计在临界流状态下的流场。流动在最小截面积处达到音速，达到临界流状态，经过一道弱激波后，变成亚音速。

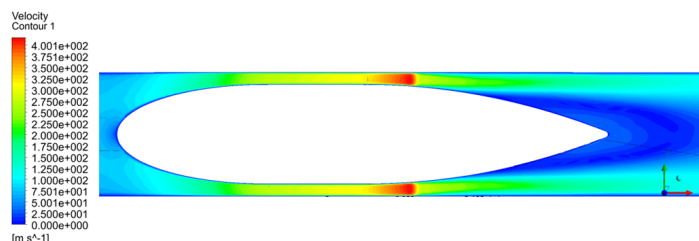


图 11 槽道流量计临界流流场

图 12 是在各种压力比下进行的计算结果，包括了临界流和非临界流，雷诺数涵盖了很大范围。由图可见，流出系数保持为常数。可以期待，继续增加压力比，流出系数仍然为同一常数。

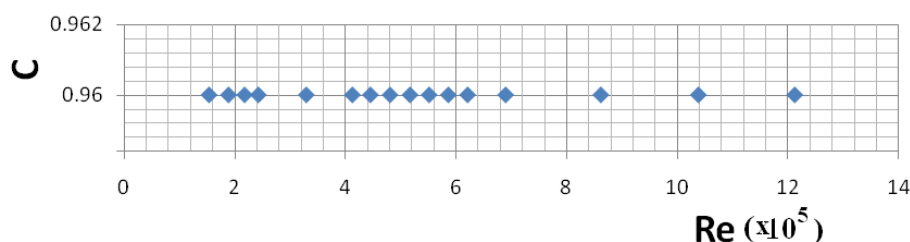


图 12 各种压力比下（临界流和非临界流）的流出系数

为了验证上述计算结果，对 DN80 的槽道流量计在中国计量科学研究院的原级流量标准装置（PVTt）进行了标定，结果如图 13 所示，流出系数在临界流和非临界流情况下保持为常数。

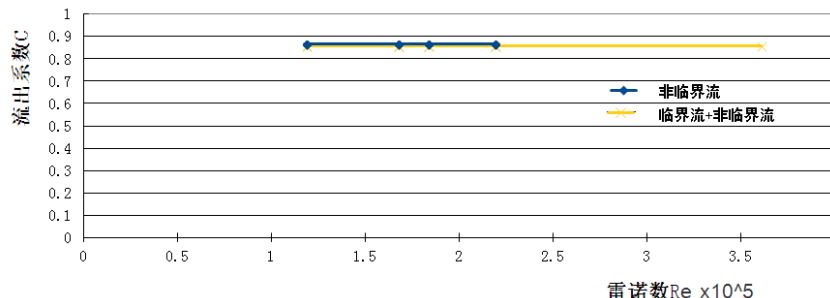


图 13 临界流和非临界流的试验结果（PVTt 法）

6 结论

- ①基于管道流动控制设计的槽道流量计，具有很强的流动调节能力，对不同的复杂来流，在流量计内部实现了运动相似，从而消除了系统误差，提高了准确度。
- ②节流件具有良好的流线型，避免了流动分离，流动十分稳定，从而保证了测量的高精度
- ③节流件尾流短，阻力小（压力损失小）对流量计下游的设备影响很小。
- ④由于槽道流量计既工作在非临界流，也能工作在临界流，原则上，量程是没有限制的。
- ⑤槽道流量计已经取得了中国专利和欧洲专利，并为高端用户提供了高精度的流量测量。

7 参考文献

- 【1】R Baker , Flow Measurement Handbook, Cambridge University Press , 2000
- 【2】钟伟, 明晓, 纺锤体流量计的流场数值模拟[J]. 计量学报, 2007, 28 (3) :262~265.