

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108487

孔口流量计正压测试夹具和可膨胀系数的研究*

宋述古,刘伟光,张强,李忠,张晓妮
(青岛市计量技术研究院 青岛 266101)

摘要:孔口流量计是标准孔板流量计的特殊使用形式,为环境监测领域中常用流量测量元件。孔口流量计在校准时按上游入口压力的不同,其校准方法分为微正压和微负压两种校准工况。两种工况均为国家标准和规范推荐方法,但校准出的流量系数差距达10%。夹具引入的附加差压和仪表流量系数线性度误差是导致两种校准工况流量系数偏差的原因。通过CFD仿真研究,设计对被校准孔口流量计上游压力影响较小的夹具形式和结构参数。在仿真数据的基础上计算得到适用于常用管径和雷诺数范围的孔口流量计的可膨胀修正系数公式。运用上述成果并进行试验验证,正压和负压校准流量系数的差距减小至 $\pm 0.5\%$ 以内。校准流量范围内孔口流量计流量系数线性度也有0.1%左右的提升。

关键词:孔口流量计;流量系数;正压校准;负压校准;可膨胀修正系数公式

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Study on test fixture used in positive pressure condition and expansibility factor of orifice flowmeter

Song Shugu, Liu Weiguang, Zhang Qiang, Li Zhong, Zhang Xiaoni
(Qingdao Institute of Measurement Technology, Qingdao 266101, China)

Abstract: The orifice flowmeter is a kind of flow measurement element which is commonly used in the field of environmental monitoring. According to the difference of upstream inlet pressure of calibrated orifice flowmeter, calibration methods of the orifice flowmeter can be categorized into two kinds of calibration conditions, which are micro positive pressure and micro negative pressure. However, both working conditions are recommended by national standards and specifications, and the deviation of the two calibration conditions is up to 10%. The calibration deviation of the two working conditions is caused by additional differential pressure value introduced by clamping device used in positive pressure condition and linearity error introduced by the lack of available expansibility factor formula. The forms and structural parameters of clamping device which is insensitive to the upstream pressure of the calibrated orifice flowmeter are designed by the computational fluid dynamics simulation method. An available expansibility factor formula for the orifice flowmeter is calculated based on the simulation data. The achieved formula is used to carry out evaluation. The deviation of flow coefficient between the micro positive pressure and micro negative pressure calibration is less than $\pm 0.5\%$. The flow coefficient linearity of the orifice flowmeter within the calibrated flow range is also improved by about 0.1%.

Keywords: orifice flowmeter; flow coefficient; positive pressure calibration; negative pressure calibration; expansibility factor formula

0 引言

孔口流量计是一种差压式流量计,是标准孔板流量计^[1]的特殊使用方式,常作为校准气体采样器的流量参数的计量器具。为保证采样气体总量的准确,气体采样

器,例如总悬浮颗粒物采样器、空气可吸入颗粒物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10})采样器、烟气采样器和烟尘采样器等设备均需按照相应的国标要求^[2-3],要在使用前校准采样流量参数。孔口流量计的性能直接影响环境监测参数的准确性。

基于孔口的使用需求,现行的标准、规范和规程要求,对孔口进行流量的量值溯源时,正压法和负压法均

收稿日期:2021-08-28 Received Date: 2021-08-28

* 基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010419)、国家市场监督管理总局科技计划项目(2020MK121)资助

可^[2-3],而且为了用户使用方便,正压法和负压法校准孔口的流量系数之间的差距应尽量的小。正压法通常是在孔口流量计下游与大气联通,上游施加高于当地大气压的气源;负压法是在孔口的下游利用真空泵或者离心风机提供低于当地大气压的工况。赵宁等^[4]通过研究智能孔口流量计的工作原理,分别建立了基于钟罩标准装置的正压校准法和基于标准流量计的负压校准法实验测量系统和流量不确定度数学模型。

经研究发现正压法和负压法两种工况校准孔口流量计得到的流量系数会存在不一致,有较大差距^[5]。

使用正压法校准使用到相应的夹具因在节流件附近增加节流引入附加差压值^[6],影响孔口差压值的测量,引入不可修正的误差,这是造成正压法和负压法校准所得流量系数差距的原因。

不同现场校准采样设备流量参数时,孔口的工作压力也有一定范围的变化。为保证孔口适用于多种流量和压力工况,就需要提升工况范围内孔口流量系数的线性度。

差压式流量计工作压力引起的流量系数的线性度通过引入可膨胀修正系数公式进行一定的修正,对于一些非标准差压式流量,经常根据经典的方法研究适用的可膨胀修正系数^[7-8]。在流量计设计优化和可膨胀系数研究过程中,流体力学仿真和实验相结合的方式更多的被应用以提升研发效率^[9-13]。

本文研究采用计算流体力学仿真(computational fluid dynamics, CFD)和实验相结合的方法研究正压校准夹具的优化结构和适用于孔口流量计的可膨胀修正系数公式。期望将正压和负压两种工况校准孔口流量系数产生的差距减小至0.5%,便于用户的多场景使用。利用可膨胀修正系数公式,对不同压力和流量条件下孔口的流量系数进行定量的补偿,减小孔口的线性度误差,保证孔口流量计在不同工况下的性能稳定。

1 孔口流量计流量测量原理

孔口通过差压变送器采集与流量相关的差压值,利用流量积算仪计算并显示实时流量。图1为一台孔口流量计及其附件测量流量示意图。

孔口流量计流量方程如式(1)所示。

$$q_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (1)$$

式中: q_v 为体积流量, m^3/min 或 L/min ; C 为流出系数,是实际流量和理论流量之比,无量纲; β 为节流装置直径比, \tilde{Q} ,无量纲; ε 为可膨胀系数,无量纲; d 为设计条件下节流件的孔径, m ; D 为设计条件下上游管道内径, m ; ΔP 为孔口上下游差压值, Pa 。 ρ 为上游流体密度, kg/m^3 。

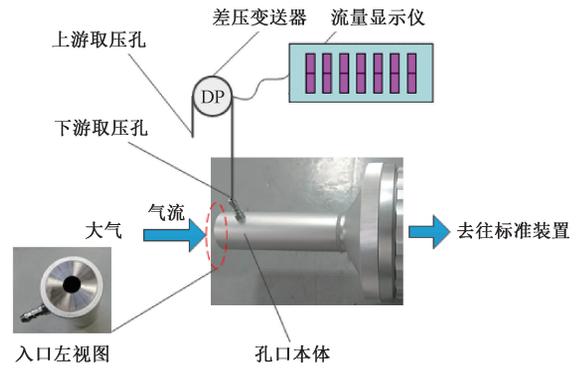


图1 孔口流量计组成

Fig. 1 Diagram of orifice flowmeter composition

由式(1)可知,流量为 $C, \varepsilon, d, \rho, \Delta P, \beta(D)$ 6个参数的函数,此6个参数可分为实测量 $[d, \rho, \Delta P, \beta(D)]$ 和间接测量量 (C, ε) 两类。当孔口流量计制造出厂使用时,实测量通过仪表直接测量可得,间接测量量使用流量装置校准通过式(2)计算得到。环境监测用孔口流量计在校准过程中将 $C\varepsilon$ 统一考虑,定义为流量系数 k 。

$$k = C\varepsilon = q_m \frac{\sqrt{1-\beta^4}}{d^2 \sqrt{2\Delta P\rho}} \frac{4}{\pi} \quad (2)$$

2 不同进气方式孔口流量系数分析

2.1 被测对象和实验装置介绍

被测对象孔口流量计,描述其结构的关键参数如图2所示,本次测试的3块孔口流量计的参与流量计算的几个参量如表1所示。

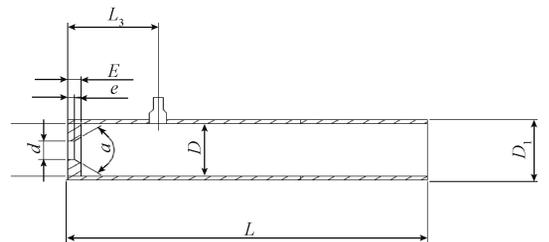


图2 孔口流量计的几何参数

Fig. 2 Geometric parameters of the orifice flowmeter

表1 被测孔口尺寸表

Table 1 Geometric dimensions of the calibrated orifice flow meters

序号	流量范围/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	d/mm	D/mm	D_1/mm
1	40~130	8.996	26.074	31.959
2	40~130	8.996	26.090	32.006
3	40~130	8.998	26.068	31.959

使用宋述古等^[14]研发的可进行正负压两种进气工况测试的标准表法气体流量装置作为实验装置,该装置流量范围为 0.1~260 m³/h,流量范围内装置扩展不确定度为 0.5% ($k=2$)。

2.2 数据分析

以 2.1 节所述气体流量装置对表 1 的孔口进行微正压和微负压两种进气工况的实验,利用如图 3 所示的夹具进行正压测试,本次上游压力在 102.5 kPa 附近。负压测试无夹具,本次负压测试时孔口流量计上游压力在 101.325 kPa 附近。

图 3 所示正压连接管件进气端的变径幅度较大,引的附加差压值较大,所以正压和负压工况下测得的流量系数具有较大的差距,如图 4 所示。

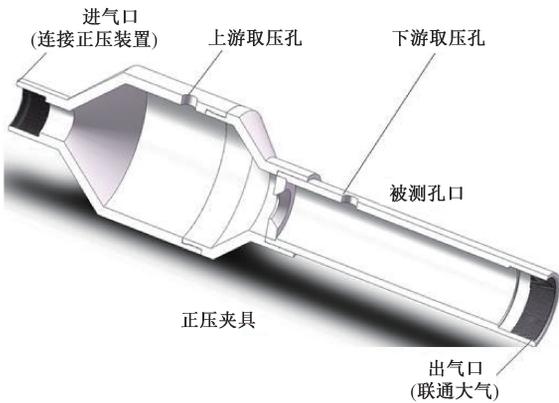


图 3 孔口正压测试时的连接方法

Fig. 3 Connecting method for orifice positive pressure test

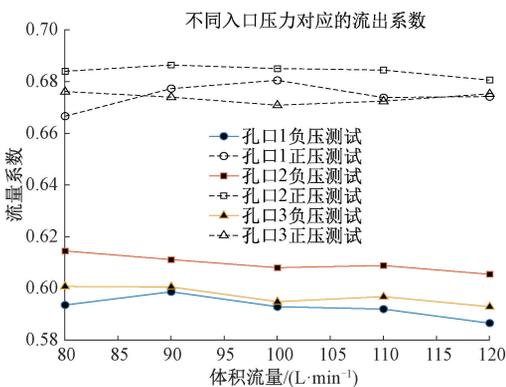


图 4 正压和负压校准的孔口流量计流量系数偏差

Fig. 4 Coefficient deviation calibrated under positive and negative pressure

差压式流量计使用一定流量范围内流量系数线性度作为评价差压元件的性能的依据,线性度计算公式如式(3)所示^[8]。

$$\delta_{kl} = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_{\max} + k_{\min}} \times 100\% \quad (3)$$

式中： δ_{kl} 表示孔口流量系数的线性度,无量纲; k_{\max} 和 k_{\min} 表示测试流量范围内孔口流量计最大和最小的仪表系数。

利用式(3)计算 3 块孔口流量计对应的线性度分别为:1.02% (1.03%), 0.74% (0.43%), 0.66% (0.39%), 括号内为正压测试对应的线性度。

3 正压夹具几何结构研究

3.1 正压夹具几何构造结构特征量

夹具的几何参数符号,如图 5 所示,定义如下两个结构特征量。尺度比,即夹具与孔口的特征尺度比值 D_0/D_2 ;过度特征,即夹具与孔口连接处的过渡方式和直管段 L_1 和 L_2 的尺寸。

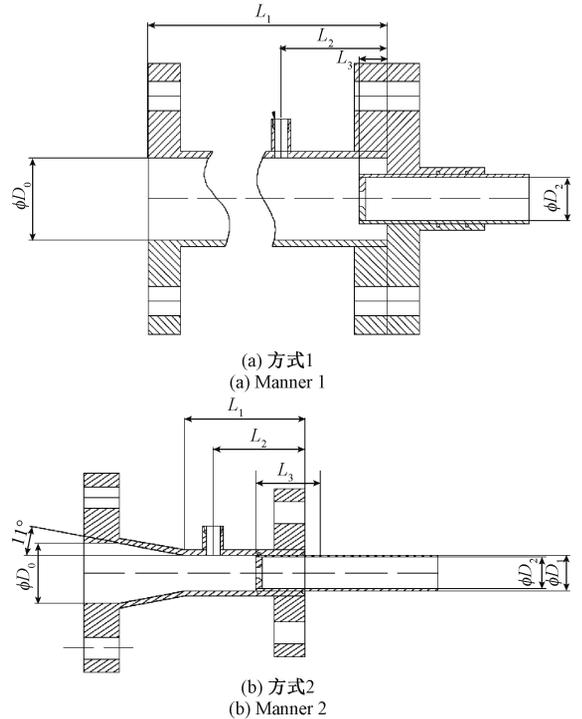


图 5 两种连接方式的几何结构

Fig. 5 Geometrical structures of the two connection modes

尺度比需兼具性能、安装便捷性和装置的普适性,确定研究 2、4 和 6 这三个数值。

过度特征需控制表体长度不宜过长, L_1 取值 $2D_0$, $3D_0$, 和 $4D_0$ 进行研究, L_2 参照标准孔板的上游取压的方式选择为 D_0 ^[1]。

如图 5(a) 和 (b) 所示,夹具与孔口的过度方式可以选择突变式和渐变式两种结构,突变式加工简单,能有效减小夹具的长度,但可能会引入较大的局部压力损失。

渐变式结构能有效避免二次流的产生,可最大程度的减小附加差压值,但是也会增加夹具的长度。两种方式分别命名为方式1和方式2。方式2参照经典文丘里管渐缩段参数,选择推荐收缩角 22° ^[15]。

3.2 CFD 仿真方案

以表1所示孔口为研究对象,设置 D_2 为26 mm,按照6个特征尺寸,每种连接方式可以组合出9种尺寸,如表2所示。

表2 方式1和方式2的不同工况尺寸表
Table 2 Dimensions table for different working conditions of manner 1 and manner 2 mm

方式	工况编号	D_0	D_1	D_2	L_1	L_2	L_3
1	GK ₁	50	-	26	100	50	5.2
	GK ₂	100	-	26	200	100	5.2
	GK ₃	150	-	26	300	150	5.2
	GK ₄	50	-	26	150	50	5.2
	GK ₅	100	-	26	300	100	5.2
	GK ₆	150	-	26	450	150	5.2
	GK ₇	50	-	26	200	50	5.2
	GK ₈	100	-	26	400	100	5.2
	GK ₉	150	-	26	600	150	5.2
2	GK ₁	50	30	26	100	50	5.2
	GK ₂	100	30	26	200	100	5.2
	GK ₃	150	30	26	300	150	5.2
	GK ₄	50	30	26	150	50	5.2
	GK ₅	100	30	26	300	100	5.2
	GK ₆	150	30	26	450	150	5.2
	GK ₇	50	30	26	200	50	5.2
	GK ₈	100	30	26	400	100	5.2
	GK ₉	150	30	26	600	150	5.2

为提升优化的效率,对上述结构的形式进行计算流体力学仿真分析,仿真使用质量入口,分别为40、50、60、70、80、90、100、110、120、130 L/min在标况下空气对应的质量流量。

徐英等^[9]验证过使用SST-*kw*的四方程湍流模型对差压流量计仿真结果较为理想,仿真设置参照该文献的设置。

流体介质为理想气体模型,压力入口和压力出口,正压设置入口压力为102.480 kPa,表2中的9种情况进行仿真。

负压情况设置孔口上游压力为101.325 kPa,以图2

所示的孔口典型工作模式建模仿真,其实验数据可以用来作为正压夹具优化效果的比对数据,为方便描述,将图2的仿真结果命名为方式3。

3.3 连接方式的仿真结果

正压夹具达到以下两个方面要求视为具有较好效果:

- 1) 夹具首先要与无夹具引入时具有较小的偏差;
- 2) 使用该夹具在正压还是负压状态下,引入的偏差足够小,且此偏差随流量值变化或者变化较小。

基于上述评价效果,对方式1、2和3这3种状态进行流体力学仿真,提取差压值利用式(2)计算不同流量对应的孔口流量计流量系数,评价连接方式是否可用需满足:

1) 使用正压夹具的仿真结果与作为对比组的方式3的仿真流量系数差距小;

2) 仿真流量范围内,正压和负压测试的流量系数在测量流量范围具有相似分布规律,且偏差较小。

满足上述两点的连接方式可认为是合适的测试连接方式。选取表2中流量系数较好的工况仿真系数绘制图6,方式2的GK₅符合上述判定条件。

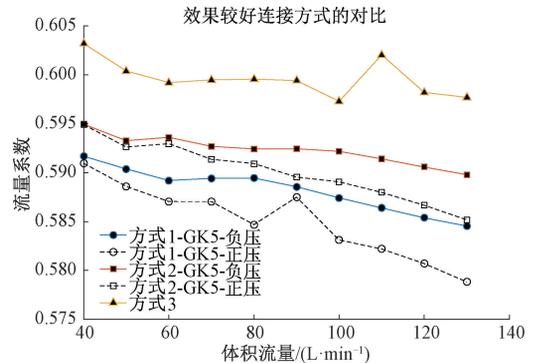


图6 影响较小的连接方式对比

Fig. 6 Less impact of the connection mode contrast

从结构上来说,方式2的GK₅的夹具与孔口的特征尺度比值 D_0/D_2 较大,因夹具产生的附加差压降低;同时具有具有渐缩角度过渡,减小了因接口尺寸突变引起的永久压力损失,从图7所示的测试流量范围内的压力云图特征也可以体现上述特点。

可认为夹具选择方式2的GK₅为现阶段正负压校准流量系数差距最小的模式。

在仿真的流量范围内选取最大、最小和中值流量绘制对应的渐缩段流线图、孔口上、下游局部压力云图,如图7所示。从渐变段的流线图可知,流线在孔口与夹具相接处无明显变形,且无旋涡产生,可见无速度的突变产生。从压力云图判断,被测流量范围内孔口上游压力测量位置并无压力梯度的产生,故 L_2 和 L_3 的位置无需改

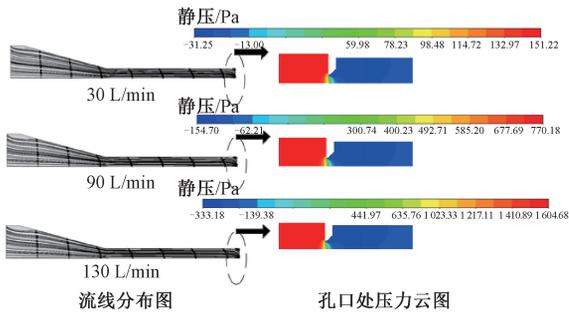


图 7 方式 2 GK₅ 取压处流场特征

Fig. 7 Manner 2 GK₅ flow field characteristics at pressure tapping position

变。如此可以确定方式 2 的 GK₅ 从被测件上下游的压力场和速度场参数满足需求。

4 孔口可膨胀修正系数公式的研究

正压夹具的增加相当于将孔口上游补齐直管段, 可将孔口等价于如图 8 所示的情形进行研究。对于标准孔板流量计, GB/T2624 中规定了可膨胀修正系数公式如式(4)所示^[1], 此公式在内径和适用入口雷诺数范围无法涵盖现阶段常用孔口的使用范围内。

$$\varepsilon = 1 - (0.351 + 0.256\beta^4 + 0.93\beta^8) \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\kappa} \right] \quad (4)$$

式中: p_1 表示孔口上游的压力, Pa; p_2 表示孔口下游的压力, Pa; κ 为等熵指数, 无量纲。

4.1 可膨胀性引入的误差

为方便描述, 定义图 8 的孔口连接方式为方式 4, 建立模型孔口入口压力微正压为正压设置入口压力为 102.480 kPa, 微负压为 101.325 kPa, 流体介质设置为可压缩气体和不可压缩两种模式进行仿真。

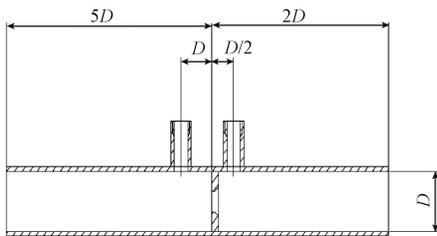


图 8 孔口具备前后直管段示意图

Fig. 8 Schematic diagram of orifice with up and down stream Straight pipe

利用式(2)计算不同流量对应的流量系数 k , 绘制图 9。

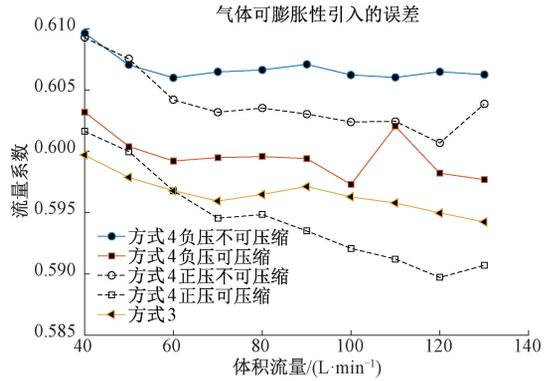


图 9 可膨胀系数对流量系数的影响

Fig. 9 Influence of expandability factor on flow coefficient

在相同的入口压力状态下, 孔口流量系数随着流量的增加出现减小的情况, 此情形为可膨胀修正系数引入的偏差。

4.2 基于 CFD 仿真孔口可膨胀修正系数的研究

对方式 4 建模, 按表 3 条件仿真, 研究可膨胀修正系数计算公式。仿真介质设置为空气, 设置流体介质为空气, 使用可压缩气体的理想气体模型。

表 3 可膨胀修正系数公式仿真方案

Table 3 Simulation scheme of expandability factor

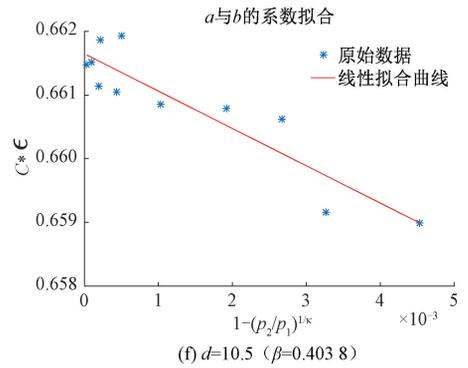
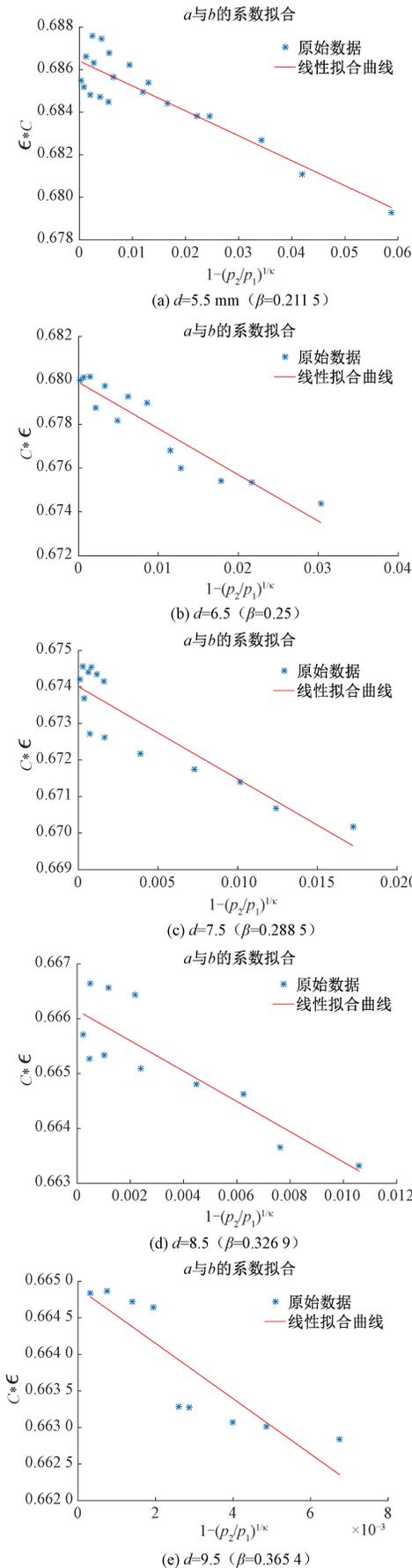
流量值/ (L·min ⁻¹)	入口 雷诺数 范围	入口 压力/ kPa	小孔 直径/ mm	管道 内径/ mm	仿真 介质
40 L/min ~ 130 L/min 之间每隔 10 L/min 取 一个点计算按照 273 k, 101.325 kPa 对 应的质量流量为准	2 360~ 7 670	80 100 150 250 400	8~10 每 隔 0.5 取 1 个 进 行 计 算	26	空气 理想 气体 模型

4.3 可膨胀修正系数公式的拟合

可膨胀修正系数公式是建立 $1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\kappa}$ 为自变量的线性拟合公式, 方便表达, 以 X 代替 $1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\kappa}$, 当孔口的 β 值确定的情况下 k 与 X 呈线性关系, 建立形式为式(5)的线性拟合方程, 利用表 3 中的仿真数据, 根据式(5)线性拟合如图 10 所示。

$$k = C\xi = b + aX \quad (5)$$

摘取图 10 所示 6 个不同 β 值对应的式(5)的系数 a 和 b 的数值列于表 4。

图10 不同 β 值孔口流量系数关系Fig. 10 Relationship between flow coefficient of orifice with different β values表4 不同 β 值孔口流量计的拟合系数值Table 4 Fit coefficient values of orifice flowmeters with different β values

序号	d/mm	a	b
1	5.5	-0.117 2	0.686 4
2	6.5	-0.228 1	0.680 2
3	7.5	-0.252 9	0.674 0
4	8.5	-0.281 7	0.666 1
5	9.5	-0.354 5	0.664 8
6	10.5	-0.561 5	0.661 6

当差压 $\Delta p = 0$ 时, X 即为 0, 可膨胀修正系数等于 1, 此时 $\Delta p = 0$, 此时的截距为 b , 也是孔口的流出系数值 C 。式(5) 两侧同时除以流出系数 C , 可得式(6)。

$$\xi = b + \frac{a}{C}X = 1 + a'X \quad (6)$$

根据分析可知 ε 的表达式中包含等效直径比 β 值, 因此系数 a' 是以 β 值为自变量的函数。

以式(6)的形式对实验数据进行拟合, 综合得到的可膨胀修正系数的公式如式(7)所示。

$$\xi = 1 + (l + n\beta^4 + m\beta^8)X \quad (7)$$

式中: l 、 n 和 m 均为常数, X 为 $1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/\kappa}$ 。

通过对多个 β 值的实验数据求解式(7)的斜率, 利用数据拟合的方式可得到 l 、 n 和 m 这几个常数的值, 最终得到孔口流量计 β 值在 0.211 5 ~ 0.403 8, 雷诺数为 2 360 ~ 7 670 范围内, 对应的可膨胀修正系数公式如式(8) 所示, 拟合曲线如图 11 所示。

$$\xi = 1 - (0.2108 + 15.3682\beta^4 + 299.0597\beta^8) \times \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/\kappa} \right] \quad (8)$$

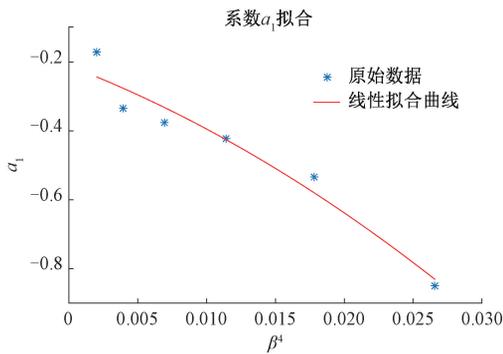


图 11 不同 β 值孔口的 a' 的多项式拟合

Fig. 11 a' value's fitting process of orifice flowmeter with different β Values

利用式(9)计算式(8)的标准不确定度。

$$u_k = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\xi_{pi} - \xi_{si}}{\xi_{si}} \right)^2} \quad (9)$$

式中: ξ_{pi} 为可膨胀修正系数公式的预测值, ξ_{si} 是可膨胀修正系数公式的仿真数据, n 是仿真数据的个数。

计算得公式预测可膨胀修正系数公式的标准不确定度为 0.911 6%。

5 结果的实验验证

5.1 正压夹具的验证

选取 3 块同一厂家、同一生产批次的孔口流量计进行测试,选取的孔口流量计流量范围表 1 中一致,孔口安装管内径为 26 mm, β 值为 0.384 6。

首先进行正负压试验,比较使用正压夹具测试孔口与未使用夹具的实验结果。

图 12 中对应的 3 块孔口流量计的流量系数,负压未使用任何夹具,作为对比组;正压为使用上述优化的夹具进行正压测试的结果。图 12 中的误差限位负压数值的 $\pm 0.5\%$ 。

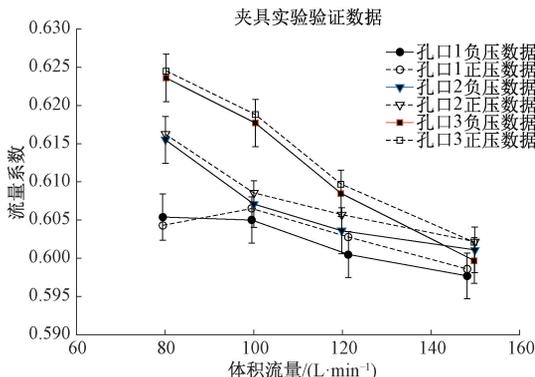


图 12 正压夹具实验结果

Fig. 12 Test results of positive pressure using fixture

使用本次设计的夹具实验后,负压和正压测量数据对应的孔口流量系数差距在 $\pm 0.5\%$ 以内,两种测量工况的差异可以满足测试需求。

5.2 可膨胀修正系数的验证

5.1 节中的孔口的实验结果使用可膨胀修正系数修正前后的实验数据如图 13 所示,可膨胀修正系数修正后的流量系数线性度 δ_{kl} 变化为:孔口 1 由 0.64% 变为 0.61%,孔口 2 均为 1.18%,孔口 3 由 1.95% 变为 1.85%。

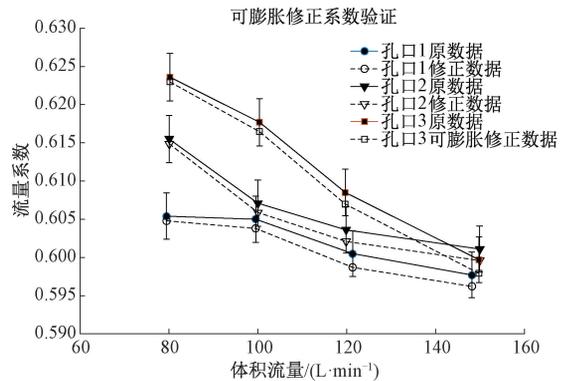


图 13 修正前后试验数据对比

Fig. 13 Comparison of experimental data before and after modification

经可膨胀修正系数公式修正后,孔口流量系数线性度指标有一定的提升效果。

6 结 论

本次使用仿真的方法研究夹具结构和可膨胀修正系数公式,用实验进行验证,加快了研究进度。通过专用正压夹具,微正压和微负压两种校准工况下,孔口流量计的流量系数之间的差距减小至 0.5% 以内。可膨胀修正系数公式的应用,也提升了测量流量范围内孔口流量系数的线性度达 0.1% 以上。流量参数是气态污染物监测仪器的关键共性参数,本文的研究方法如能用到合适的领域,有望迅速有效的解决现有环境监测仪器流量测试过程中一些流量的工程技术难题,进而提升仪器核心部件的技术能力,这也是提升国产环境监测仪器产业的核心竞争力的一种可行方式。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量-第

- 2部分:孔板:GB/T 2624-2-2006 [S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full-Part 2: Orifice plates:GB/T 2624-2-2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 环境保护产品技术要求 标定总悬浮颗粒物采样器用的孔口流量计:HJ/T 368-2007[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2007.
- Ministry of Environmental Protection. Technical requirement and test procedures for special orifice flowmeter for total suspended particulate sampler calibration: HJ/T 368 - 2007 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007.
- [3] 河北省质量技术监督局. 孔口流量计校准规范: JJF(冀) 117-2013[S]. 石家庄:河北省质量技术监督局, 2013.
- Hebei Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. Calibration Specification for Special Orifice Flowmeters: JJF (冀) 117 - 2013 [S]. Shijiazhang: Hebei Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision, 2013.
- [4] 赵宁, 牛立娜, 梁玉娇, 等. 智能孔口流量计校准方法研究 [J]. 河北大学学报 (自然科学版), 2015, 35(5): 546-551.
- ZHAO N, NIU L N, LIANG Y J, et al. On the calibration methods of intelligent orifice flow-meter [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2015, 35(5): 546-551.
- [5] 陈曹浪, 张东飞. 孔口流量计标定方法研究 [J]. 中国计量, 2020(10): 113-116.
- CHEN C L, ZHANG D F. Study on calibration method of orifice flowmeter [J]. China Metrology, 2020 (10): 113-116.
- [6] LIU W G, XU Y, ZHANG T, et al. Experimental optimization for dual support structures cone flow meters based on cone wake flow field characteristics [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2015, 232: 115-131.
- [7] 齐锋锋, 徐英, 张涛, 等. 双支撑锥形流量计蒸汽可膨胀修正系数的研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1): 118-125.
- QI F F, XU Y, ZHANG T, et al. Research on vapor expansibility factor of dual support cone flow meter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(1): 118-125.
- [8] 中国国家标准化管理委员会. 封闭管道中流体流量的测量-V形内锥流量测量节流装置: GB/T 30243-2013[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.
- General Administration of Quality Supervision. Measurement of Fluid Flow in Closed conduits — Specification for V-cone Pressure Differential Flow Measuring device: GB/T 30243 - 2013 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [9] 徐英, 陈吴晓, 张涛, 等. 湍流模型对双支撑型 V 锥流量计的适用性研究 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 459-465.
- XU Y, CHEN W X, ZHANG T, et al. Study on applicability of turbulence model for V-cone flowmeter with double support [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2): 459-465.
- [10] 刘伟光, 张涛, 徐英, 等. 基于黏性比例因子的锥形流量计最优锥角选择 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7): 1497-1505.
- LIU W G, ZHANG T, XU Y, et al. Optimal angle combinations of cone flow meter selection based on viscous stress scale factors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(7): 1497-1505.
- [11] 刘伟光, 张涛, 邢通, 等. 锥形流量计下游支撑及取压位置的试验研究 [J]. 机械工程学报, 2015(10): 193-220.
- LIU W G, ZHANG T, XING T. Experimental research on downstream strut and pressure tapping location of cone DP flow meters [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015(10): 193-220.
- [12] 赵保生, 刘志森, 黄富贵. 基于 CFD 的提高靶式流量计静态特性的方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 85-92.
- ZHAO B SH, LIU ZH S, HUANG F G. Research on

improving static characteristics of target flowmeter based on CFD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 85-92.

- [13] 李坤鹏, 徐雅, 谢代梁, 等. 大口径超声波流量计内部流-声耦合特性仿真分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 8-14.

LI K P, XU Y, XIE D L, et al. Simulation analysis of flow-acoustic coupling characteristics of large diameter ultrasonic flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation. 2020, 34(7): 8-14.

- [14] 宋述古, 刘伟光, 李忠, 等. 撬装现场气体流量标准装置的研究[J]. 计量科学与技术, 2020(9): 66-71.

SONG SH G, LIU W G, LI ZH, et al. Study on movable gas flow standard device [J]. Metrology Science and Technology, 2020(9): 66-71.

- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量. 第4部分: 文丘里管: GB/T 2624-2-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full-Part 4: Venturi Tubes; GB/T 2624-2-2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

作者简介



宋述古, 1987年于沈阳建筑工程学院获得学士学位, 现为青岛市计量技术研究院院长、高级工程师, 主要研究方向流量和容量计量测试技术。

E-mail: songshugu@126.com

Song Shugu received his B.Sc. degree from Shenyang Architectural Engineering Institute in 1987. He is currently a senior engineer and the dean of Qingdao Institute of Measurement Technology. His main research interests include flow and capacity measurement techniques.



刘伟光(通信作者), 2008年于青岛理工大学获得学士学位, 2011年于山东科技大学获得硕士学位, 2015年于天津大学获得博士学位, 现为青岛市计量技术研究院高级工程师, 主要研究方向为流量计量测试、工程流体仿真和实验。

E-mail: lwgtju@tju.edu.cn

Liu Weiguang (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Qingdao Architectural Engineering University in 2008, received his M.Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2011, and received his Ph.D. degree from Tianjin University in 2015. He is currently a senior engineer at Qingdao Institute of Measurement Technology. His main research interests include flow measurement techniques, engineering fluid simulation and experiment.