

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407502

微小口径涡街流量计设计与测量特性研究

吴奕瑶^{1,2} 谢代梁^{1,2} 刘铁军^{1,2} 徐雅^{1,2} 黄震威^{1,2}

(1 中国计量大学计量测试与仪器学院 杭州 310018; 2. 浙江省流量计量技术研究重点实验室 杭州 310018)

摘要: 涡街流量计是基于流体振荡原理对流量进行测量的流量计,但在低流速下输出的信号很微弱,在实际测量过程中会叠加各种现场产生的噪音。并且目前工业上使用小口径涡街流量计在小流量工况下存在测量局限性,一般最小口径仅到 DN15。针对目前涡街流量计存在的问题对 DN10 及以下的微小口径涡街流量计结构及参数进行研究,以满足工业上的测量新需求。基于模拟仿真计算平台,建立不同尺寸参数的微小口径涡街流量计数值计算模型并进行仿真计算,提出优化的涡街流量计结构尺寸。通过对不同压力监测点的压力波动强度及频率的研究,分析传感器的最佳布置位置。最后以电磁流量计为标准表对所研制的微小口径涡街流量计在微量程段进行了测试,对该被检流量计的误差、精度等参数进行实验,同时对雷诺数与斯特劳哈尔数之间的关系及仪表系数进行分析,结果表明,仿真所获的测量特性与实验测得的特性具有较好的一致性,且该微小口径涡街流量计相对误差优于 0.5%,重复性等指标能够满足微量程段内的测量标准。

关键词: 涡街流量计; 卡门涡街; 流道结构; 数值仿真; Fluent; 微小口径; 取压位置; 频谱分析

中图分类号: TH814; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on design and measurement characteristics of micro-bore vortex flowmeter

Wu Yiyao^{1,2} Xie Dailiang^{1,2} Liu Tiejun^{1,2} Xu Ya^{1,2} Huang Zhenwei^{1,2}

(1. College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Key Lab of Flow Measurement Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Vortex flowmeter is a flowmeter based on the principle of fluid oscillation to measure the flow rate, but the output signal at low flow rate is very weak, in the actual measurement process will superimpose a variety of on-site noise. At present, the small diameter vortex flowmeter used in industry has measurement limitations under small flow conditions, and the minimum diameter is generally only DN15. Aiming at the existing problems of vortex flowmeter, the structure and parameters of small diameter vortex flowmeter DN10 and below are studied, to meet the new measurement requirements in industry. Based on the simulation calculation platform, the numerical calculation model of the micro-diameter vortex flowmeter with different size parameters is established and the simulation calculation is carried out, and the optimized structure size of the vortex flowmeter is proposed. By studying the intensity and frequency of pressure fluctuation at different pressure monitoring points, the best position of sensor is analyzed. Finally, the electromagnetic flowmeter is used as the standard table to test the developed micro diameter vortex flowmeter in the micro range. The error and accuracy of the flowmeter are tested, and the relationship between Re and St and the instrument coefficient are analyzed. The results show that the measurement characteristics obtained by simulation are in good agreement with those measured by experiment. The relative error of the micro diameter vortex flowmeter is better than 0.5%, repeatability and other indicators can meet the measurement standards in the micro-range.

Keywords: vortex flowmeter; Karman vortex street; flow channel structure; numerical simulation; Fluent; small caliber; pressure taking position; spectrum analysis

0 引言

涡街流量计是基于流体在流道内流动过程中产生振荡且振荡频率与流体流速成比例关系的原理对流量进行测量的。文献[1]提出涡街流量计具有低成本、高可靠性、易于操作且测量结果不受被测流体组分、温度、压力等物性参数变化的影响等特点。并且,在特种气体、液体和电解质等特殊介质的流量测量中具有一定的优势,在半导体、光伏产业、新能源电池以及高温液态金属等新兴产业的具有广阔的应用前景^[2]。这些新型产业涉及多种特殊介质的精细化调控与配置,所需流量计口径较小。

其中胡岳等^[3]在 DN25 水流量标准装置上利用频谱分析方法得到涡街脱落频率,在保证良好线性度的基础上有效扩展了测量下限。宋佳忆、黄绍峰等^[4-5]通过对不同流速流体进行测量,最终通过研究总结出发生体结构尺寸对涡街信号的影响,从而确定了发生体的最佳几何参数。Chen^[6]对涡街流量计模型进行了一系列数值模拟实验,从而确定边界条件对涡街流量计中旋涡脱落情况的主要影响。但其所研究的均为较大口径的涡街流量计,并未针对小口径流量计进行研究。对于涡街流量计的流道结构与压力损失,刘铁军等^[7]提出一种具有异径测量管道的流量计设计方案,通过 Fluent 对管道内部流场进行了具体的仿真分析发现,灵敏度相比于传统设计有着极为显著提高,为微小口径涡街流量计的结构设计提供了设计思路。杨攀^[8]以日本 SMC 公司提供的 PF3W 系列涡街流量计作为研究对象,通过系列管路在各个过渡角度的管道总压力损失进行仿真分析。黄云志等^[9]提出了能够减少强周期振动干扰影响的算法,扩展了涡街流量计量程下限且在强周期振动干扰条件下提高测量精度。但目前绝大多数对于涡街流量计测量的研究均为 DN25 及以上口径,对于 DN10 及以下微小口径涡街流量计在微量程段进行准确测量的研究仍然较少。

因此,通过开展微小口径涡街流量计设计与测量特性的相应研究,利用 SolidWorks 建立不同的流体域结构模型,通过计算流体仿真软件 Fluent,利用大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 对微小口径涡街流量传感器流场进行仿真计算。通过改变旋涡发生体的形状以及尺寸,优化旋涡发生体的形状,获取在微小口径下产生涡街信号强度与流道参数、旋涡发生体的结构尺寸参数。并通过在旋涡发生体下游设置不同监测位置,以动态压力信号为仿真特征参数,研究了最佳取压位置。

1 涡街流量计测量原理

涡街流量计是以流体流动过程中产生的振动频率与

流速之间对应关系为依据对被测流体的流量进行测量的。在流体流过的流体域中设置一个钝体,即旋涡发生体,当有流体流过旋涡发生体时,会在发生体的两侧产生交替且有规律的旋涡,形成卡门涡街。文献[10]说明在旋涡发生体下游安装压电传感器,能够将产生的升力转换为电荷信号,其变化频率与旋涡的脱落频率一致。因此,通过检测压电传感器产生的电荷信号的频率,即能够得到旋涡的脱落频率。图1为梯形发生体情况下产生的涡街示意图。

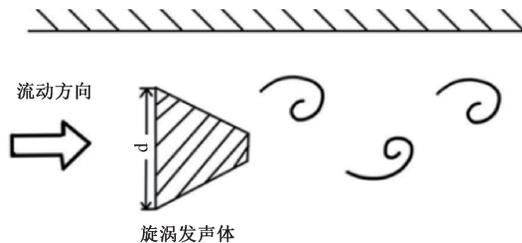


图1 梯形发生体情况下产生的涡街示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vortex street generated in the case of trapezoidal generator

涡街脱落频率 f 与流体流速之间的关系如式(1)所示。

$$f = \frac{St \times u_1}{d} = St \frac{u}{md} \quad (1)$$

其中, f 为涡街频率, Hz; 为测量流道中的流体流速, m/s; d 为旋涡发生体的迎流面宽度, m; u_1 为发生体两侧的流体流速, m/s; u 为流道内的流体平均流速, m/s; St 为斯特劳哈尔数, 对于一定形状发生体, 在一定雷诺数 Re 范围内, St 为常数^[11]; m 为旋涡发生体两侧弓形面积与管道横截面面积之比。

由式(1)可见, 当测出涡街信号频率 f 后, 即可得到流体的流速 u , 进而得到被测流体的流量, 即如式(2)所示。

$$q_v = \frac{\pi D^2 u}{4} = \frac{\pi D^2}{4St} = \frac{f}{K} \quad (2)$$

其中, K 为涡街流量计的仪表系数, $1/m^3$, 从测量原理上及理想情况下分析, 仪表系数 K 不随被测流体的压力、温度、粘度等因素的变化而变化^[12]。

2 涡街流量计的数值模拟及结构优化

涡街流量计是一种振动型流量计, 在实际测量中, 各个方面产生的噪声侵入对测量结果将造成一定程度的影响, 微小口径流量计在进行小流量测量时更为明显。因此, 通过数值仿真结果对涡街流量计流场进行分析, 能够

充分了解流体在小流量测量情况下,微小口径流量计流道中的流动机理,从而能够实现对涡街流量计小口径结构设计和尺寸参数的进一步优化设计。

2.1 数值模拟仿真分析

Fluent 能够采用不同网格种类对二维、三维的流体模型进行仿真计算分析,能够应用于多种范围^[13]:稳态与瞬态流动问题、可压缩与不可压缩问题、对流换热问题、多相流问题等。同时在对湍流模型进行选择时,大涡模拟综合了直接数值模拟和雷诺平均法,因此实验以水 (water-liquid) 为测量介质,入口条件选择速度入口,出口条件选择压力出口,使用大涡模拟为湍流模型进行仿真模拟实验。

将两种流道结构模型进行模拟计算后,在距离流体入口不同位置下设置多个压力监测点用于后续后处理。对涡街流量计测量时产生的速度场进行分析,速度云图及压力云图如图 2、3 所示,其中速度云图中的红色等表示流速较大的流体区域,绿色等区域表示流速相对较小的区域。由云图能够得出当流体在流道中流动时,旋涡在发生体两侧相互交替且有规律的周期性产生,并通过对比旋涡耗散快慢的观察分析旋涡产生的稳定性。

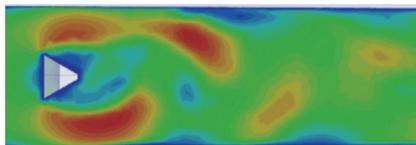


图 2 涡街流量计流道的速度云图

Fig. 2 Velocity cloud diagram of vortex flowmeter flow channel

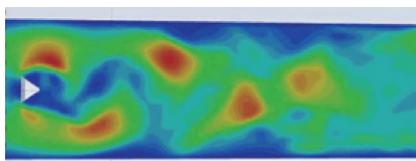


图 3 涡街流量计流道的压力云图

Fig. 3 Pressure cloud diagram of vortex flowmeter flow channel

通过仿真模拟设置,图 4 中给出的为流体在流道中流动时,作用在旋涡发生体上的压力变化曲线。由图可以看出该点所受的压力按照一定的周期性规律变化,因此能够对其进行快速傅里叶变化 (fast Fourier transformation, FFT) 以及频谱分析,如图 4 所示。

对旋涡发生体附近的速度场及压力场分析表明:

1) 流体流过旋涡发生体的两个尖锐边时开始分离,从而产生相互交替的旋涡以及压力波动,从而产生旋涡脱落现象;

2) 涡街流量计的旋涡脱落频率能够通过对比旋涡发生体两侧的压力波动进行频谱分析并计算获得。由图 5 可

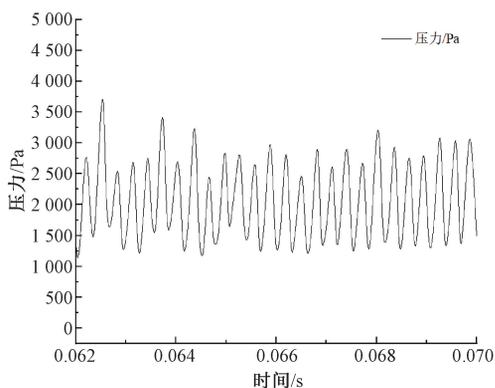


图 4 旋涡发生体上的压力变化曲线

Fig. 4 Pressure change curve on vortex generator

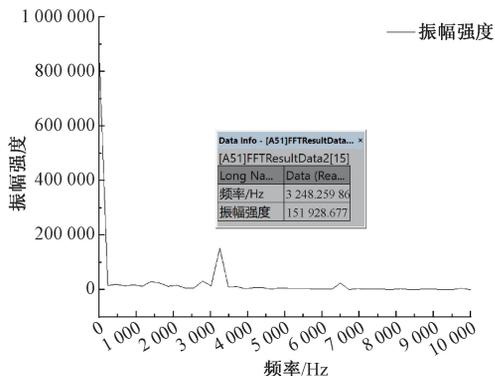


图 5 FFT 变换结果

Fig. 5 FFT transformation results

知,当频率为 3 248.25 Hz 时,对应的振幅强度为 151 928.68,即传感器能够检测到的旋涡信号强度。

2.2 流道截面形状改进设计

当被测流体的介质确定时,升力与流体流速的平方成正比,即能够利用升力代表涡街流量计测量的涡街信号强度。如式(3)所示。

$$L = K\rho dv^2 \tag{3}$$

其中, K 为仪表系数, ρ 是流体密度,单位为 kg/m^3 , v 是流体速度,单位为 m/s 。

由式(3)可知,升力的大小与流体流速的平方和流体的密度成正比。由于引起环量的旋涡是从发生体下游交替且有规律的产生,所以作用于发生体上升力的变化频率与产生的涡街信号频率相同。由二者之间的关系能够得出,当被测的流体介质确定,即密度一定时,升力的大小则正比于流速的平方,即能够通过升力的大小表征涡街信号的强弱。因此,当被测流体在流道内的流速增大时,涡街信号强度会随之增大,则使得传感器更容易对微小口径涡街流量计在微量程段产生的涡街信号进行准确测量。一般采用直接缩小圆形管道口径的方法实现增

大较小口径流道内流速的目的,然而当圆管口径不断减小时,管壁对流经的被检流体产生的约束力也随之增强,导致涡街受到破坏,难以获得准确的振动信号,同样导致其实际的可靠性和精确度均不太理想,因此,改变涡街流量计的流道结构,与前直管段之间过渡形成一段缩径结构将原本并不易于测量出的涡街信号强度增大,一定程度上解决了小流量测量困难的问题。

首先,通过对流道的截面形状进行改变的设计,将工业生产中普遍存在的圆形流道改为扁圆形(其截面示意图如图 6 所示),改进涡街发生体下游旋涡脱落情况,提高产生的旋涡信号强度。在保证流道截面积及其他尺寸条件相同情况下,分别以目前工业测量中普遍使用的圆形、所提出改进的扁圆形流道为仿真模型进行模拟计算,其中测量段流道长度为 80 mm,涡街发生体为等腰梯形,其来流边长为 2.3 mm,与迎流边平行的短边长为 0.25 mm,斜边长为 2.05 mm,角度 60°,发生体位置位于管道测量段中心,且几何中心位于测量管道中轴线处。分析对比不同形状流道的涡街流场特性,仿真结果如图 7、8 所示。

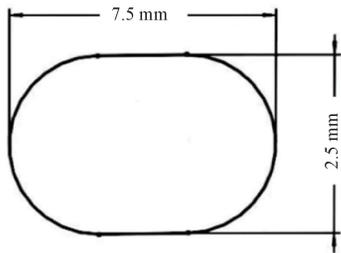


图 6 改进后扁圆形流道截面形状

Fig. 6 Section shape of oblcircular channel

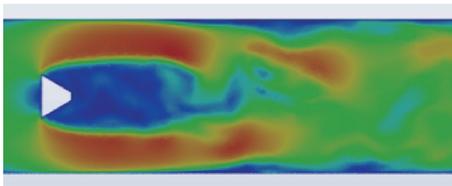


图 7 圆形流道速度云图

Fig. 7 Circular runner velocity cloud

上图的速度云图中亮色(红色、黄色)表示流速大的流体区域,暗色(深蓝色)为流速较小的区域。由图可以看出旋涡在梯形发生体两侧交替产生,通过观察产生的旋涡耗散快慢来判断旋涡脱落的稳定性。旋涡随着流动,其颜色逐渐变淡(红色逐渐变为黄色),即代表旋涡发生耗散。由图 7、8 可以看出相同流速情况下,圆形流道相比于扁圆形流道无法快速且稳定分离出规律交替的旋涡;扁圆形流道则能够更好地产生交替且有规律的旋涡。同时,扁圆形流道的流量计设计、生产及传感器安装

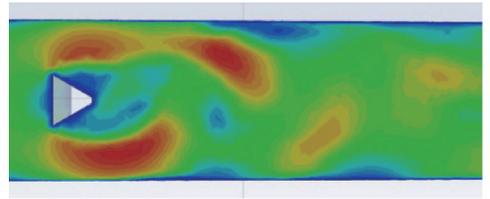


图 8 扁圆形流道速度云图

Fig. 8 Flat circular flow channel velocity cloud

更加简单方便。因此选择扁圆形流道为后续设计使用的涡街流量计结构形状。

2.3 流道结构尺寸改进

基于涡街流量计的测量原理,其无法实现小流量测量的主要原因是产生的噪声信号远大于有用信号,即传感器能够检测到的涡街信号频率较低。因此,在小口径涡街流量计进行测量时,必须使其能够产生极高的旋涡振动检测灵敏度,将测量到的涡街信号强度进行放大。

基于涡街流量计的测量原理,其无法实现低流速测量的主要原因在于检测到的涡街信号频率较低。在低流速测量时必须具有极高的旋涡振动检测灵敏度,将测量到的涡街信号强度进行放大,才能够实现测量。通过对大量文献的阅读及总结,当确定了被测的流体介质时,升力的大小可代表涡街流量计测量的涡街信号强度,即可以将流体流速大小作为影响涡街信号强度和频率大小的主要因素之一。因此,通过改进流道结构的尺寸,使流道内被测流体的流速增大,能够实现微小口径涡街流量计对流体流量的准确测量。修改流道的高度及宽度,改变扁圆形涡街流量计的口径尺寸参数并建立不同模型。将流道的高度分别设置为 8 mm、7 mm、6 mm、5 mm,宽度为 12 mm、10.5 mm、9 mm 以及 7.5 mm,等效直径分别为 5.17 mm、4.48 mm、3.84 mm、3.20 mm。通过减小流道的等效直径,即流道截面积也减小,从而增大相同流量下流过旋涡发生体的流速,增强涡街信号强度。不同截面积流道对应流速如表 1 所示。

表 1 不同截面积流道对应流速

Table 1 Flow rates corresponding to different cross-sectional areas

流量/ (L·min ⁻¹)	速度/(m·L ⁻¹)			
	模型 1 by-5-7.5	模型 2 by-6-9	模型 3 by-7-10.5	模型 4 by-8-12
20	10.37	7.20	5.29	4.25
40	20.75	14.41	10.59	8.49
60	31.12	21.61	15.88	12.74
80	41.49	28.82	21.17	16.99
100	51.86	36.02	26.46	21.23

设置入口流体流量为 20 L/min,在不同结构尺寸模型的涡街发生体下游设置不同的压力监测点,对涡街信

号强度变化趋势进行观察,通过对不同尺寸流道对应的不同监测点动压变化曲线进行分析,发现传感器能够检测到的涡街信号强度随着涡街流量计口径的减小而逐渐增强。因此,当需要进行较小流量测量时,适当减小流道的结构尺寸,能够有效使检测到的涡街信号强度增强。

3 最佳压力监测点的确定

涡街信号强度作为涡街流量传感器在流体的流量测量时的关键因素,文献[14]中提出对于给定的涡街流量计,流过的流体流量与涡街信号产生的频率成正比。在实际对流体介质测量环境当中,涡街流量计是通过放在测量管道中的传感器对流场中的压力变化进行检测,从而得到旋涡脱落频率,即涡街信号的产生强度,并转化为所需要测量的流体流量。因此,文献[15]提出选择最佳的压力监测点位置,即传感器的最佳安装位置,是指涡街信号的产生强度最大、旋涡发展规律最稳定的区域。将传感器安装在最佳的位置,使其在相同小流量情况下产生最强涡街信号,同样能够作为实现微小口径涡街流量计对小流量测量的方法之一。

基于前文对几何模型的仿真设计,对涡街流量计的最佳压力监测位置进行研究,并通过频谱分析得到涡街信号的频率和振幅,振幅强度的大小即为涡街流量计的涡街信号强度大小。在梯形旋涡发生体下游不同位置设置压力监测点,首个压力监测点为距离旋涡发生体迎流面 10 mm 处,每隔 0.5 mm 设置一个点,共设置 13 个压力监测点,如图 9 所示。



图 9 压力监测点设置图

Fig. 9 Pressure monitoring point setup diagram

仿真工作结束后,将仿真过程得到的不同压力监测点对应的压力曲线导出,通过频谱分析得到压力监测点对应的频率-振幅图。分别在 5 L/min、20 L/min、40 L/min、60 L/min、80 L/min、100 L/min 6 种不同的流量下对结构进行仿真实验,并将压力监测点处得到的压力曲线频谱分析转化为涡街信号振幅强度变化趋势,如图 10、11 所示。

通过对不同压力监测点动压变化曲线进行分析,如图所示,发现压力监测点所处的位置不同,动压信号的强度也不同,基本变化规律为随着距旋涡发生体迎流面的

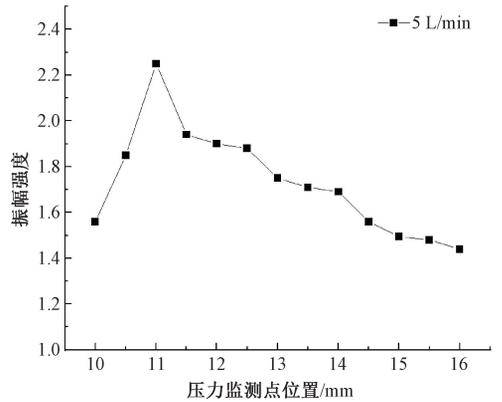


图 10 5 L/min 涡街信号振幅强度变化趋势

Fig. 10 Variation trend of amplitude intensity of 5 L/min vortex signal

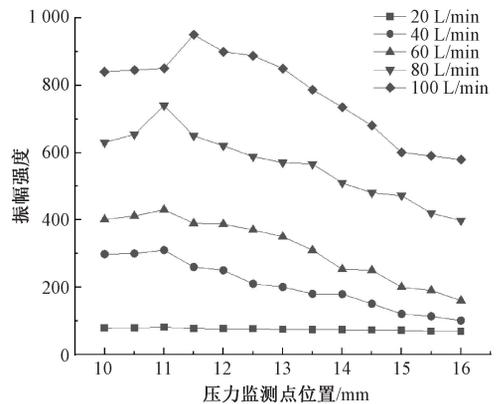


图 11 20~100 L/min 涡街信号振幅强度变化趋势

Fig. 11 20~100 L/min vortex signal amplitude intensity change trend

距离增大,涡街信号强度先增大后减小,发现当位于距离迎流面约 1.5~2.1 h 处(h 为流道等效直径),产生的涡街信号最强,即为传感器的最佳放置位置。

4 过渡段压力损失分析

由伯努利方程可知,由于机械能守恒,动能的增大将造成压能的减小,因此流体在经过过渡段时也必然会产生压力损失。由于小口径涡街流量计由标准的圆形管道改变为扁圆形,因此在实际测量过程中,在连接流量计时会出现过渡段。本节主要对过渡段对小口径涡街流量计的流速分布及压力损失的影响进行分析,并基于 Fluent 及云图进行仿真分析。

建立好流道模型并进行网格划分后,将模型导入 Fluent 中进行仿真分析。保持涡街流量计扁圆管道长度及过渡段圆管长度不变,以 10° 为区间,分别将圆管至扁

圆管过度角度为 20~60°,分不同角度下涡街流量计的压力损失,通过如图 12 所示,得出压力损耗最低的过渡段角度为 20°。

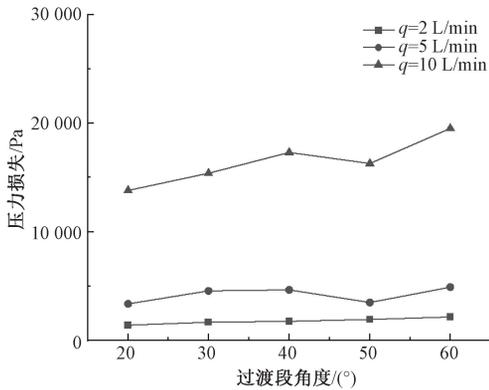


图 12 不同流量下流道的压力损失

Fig. 12 Pressure loss of the flow channel at different flow rates

5 实流实验结果

5.1 流量标准装置

实验装置采用 DN5 和 DN25 口径的电磁流量计作为标准表进行水流量实验,实验装置及实物图如图 13 和 14 所示。在能够为实验提供稳压水源的情况下,实验采用 DN5(流量范围:0.07~0.7 m³/h、精度等级:0.2)及 DN25(流量范围:0.5~10 m³/h、精度等级:0.2)两种口径的电磁流量计作为标准表,在该装置上得到的实验数据可信度较高。同时利用足够长的软管对被检流量计进行连接,并保持前后直管段水平且保证足够长的尺寸,以满足被检测的水介质达到充分发展的条件。

以上构成的水流量标准测量装置为对被检流量计的校准和准确测试提供了一个高精度、高效率的测量平台,能够充分保证流量测量过程的准确性以及测量结果的可靠性。该水流量标准装置的工作原理是:打开开关阀,并通过自动调节球阀来对流入实验管路的流体流量进行调节,使得水池中的水通过上游直管段、标准表、被检流量计、下游直管段,待流量达到实验所需流量并在一段时间后逐渐稳定时,分别记录下标准表(电磁流量计)及被检涡街流量计所显示的流量值。最后,确定流量计的仪表系数、准确度及重复性等技术指标。由于通过水泵为整个标准装置提供水源,能在保证水流量稳定输出的同时有效消除产生的环境干扰,因此在该装置上得到的实验数据能够保证可靠性和可信度。

5.2 涡街流量计试验数据分析

1) 涡街流场模拟的可行性

通过页面直接对入口流量进行调节,并根据入口流量选择相应口径的标准电磁流量计。经过一段时间的流

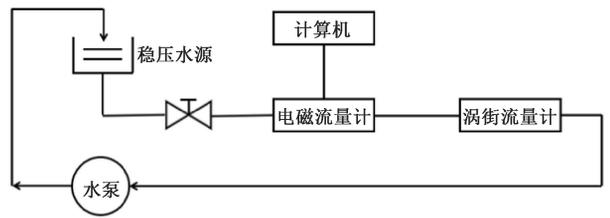


图 13 水流量实验装置结构示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the water flow experimental device



图 14 水流量实验装置实物图

Fig. 14 Physical diagram of the water flow experimental device

动后,流道内的流体达到充分发展,通过页面显示得到此时涡街流量计所显示的流量值。将流速分别控制在 5 个不同流量点进行测量,为了与仿真结果进行比较,实际测量流量点与仿真设置的流量点之间误差不超过 5%,其余条件与仿真基本一致。对实验数据进行分析,实验数据如表 2、图 15 所示。

表 2 实验数据与仿真数据对比

Table 2 Comparison of experimental data and simulation data

流量/ (L·min ⁻¹)	实际流量点/ (L·min ⁻¹)	仿真频率/Hz	实际频率/Hz	误差/%
2	1.91	139.41	135.39	-2.88
5	4.95	327.53	335.37	2.39
10	9.94	685.14	669.72	-2.25
20	20.36	1 376.34	1 342.06	-2.49
25	25.01	1 560.34	1 515.45	-2.88

比较仿真数据与实验数据,得出最大误差不超过 3%(该误差可能是由测试使用的涡街发生体尺寸与仿真设置中存在偏差或是实验中产生的微小振动影响),说明通过 Fluent 对涡街流场进行仿真分析是具有可行性的。

2) 误差与重复性分析

涡街流量计采用误差和重复性两项指标进行评价,误差表示了涡街流量计测量的精度;重复性则代表了涡街流量计的准确度。

误差是指被检流量计每次测量的累计流量的相对误

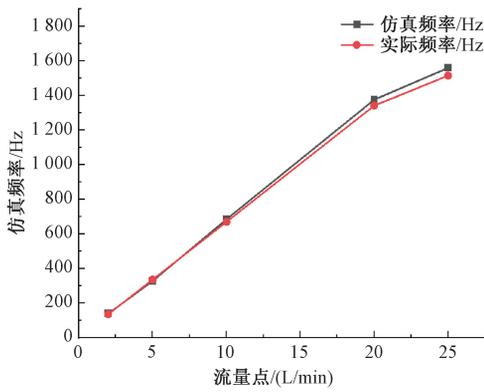


图 15 实验数据与仿真结果对比

Fig. 15 Comparison of experimental data and simulation results

差,计算方式如式(4)所示。

$$E_i = \frac{q_{ij} - (q_s)_{ij}}{(q_s)_{ij}} \quad (4)$$

其中, E_{ij} 是第 i 个流量点第 j 次检定时被检流量计的相对误差; q_{ij} 是第 i 个流量点第 j 次检定时被检涡街流量计显示的瞬时流量值,单位为 m^3/h ; $(q_s)_{ij}$ 是第 i 个检定点第 j 次检定时装置的瞬时流量值,单位为 m^3/h 。

每个流量计进行 n 次重复检定时,该流量点的重复性可按如式(5)、(6)所示。

$$(E_r)_i = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (E_{ij} - E_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$E_i = \frac{\sum_{l=1}^n E_{ij}}{n} \quad (6)$$

式中: $(E_r)_i$ 是流量点的重复性。

文章将实验中选取的 5 个流量点 (Q_{min} 、 $25\%Q_{max}$ 、 $40\%Q_{max}$ 、 $65\%Q_{max}$ 、 Q_{max}) 分别重复进行 3 次测量,并分别对实验数据以及相关参数进行分析。具体得到的实验数据如表 3 所示。

表中为 3 组实验数据的误差,可以看到在水流量测试装置下该涡街流量计测量的相对误差均小于 0.5%,具有较高的精度,其相对误差曲线如图 16 所示,能够符合一般工业管道的流量测量。

为评价所设计的涡街流量计的测量稳定性,对流量计对应的重复性做出了相应实验,对应重复性曲线如图 17 所示。可以看出,在 3 次测量中,重复性结果能够满足小口径涡街流量计的稳定性及精度要求。

3) 涡街流量计 St 与 Re 之间的关系

由式(1)、(2)可知,当流道及旋涡发生体的尺寸参数相同时, d 为常数,则 St 与 Re 成函数关系。根据大量以往实验研究可知,几何参数相同的发生体,无论尺寸大小,只要在相似的流场中(即 Re 相等),则具有相同的斯特劳哈尔数。然而实际测量中,对 St 为常数所对应的 Re

表 3 水流量测试实验数据

Table 3 Experimental data of water flow test

测量点 i	标准流量/ ($L \cdot min^{-1}$)	被检表流量/ ($L \cdot min^{-1}$)	误差/ %	重复性/ %
1 (Q_{min})	2.253	2.259	0.266	
	2.235	2.242	0.313	0.045 4
	2.248	2.253	0.222	
2 ($25\%Q_{max}$)	4.924	4.941	0.345	
	4.931	4.943	0.243	0.051 3
	4.923	4.937	0.284	
3 ($40\%Q_{max}$)	9.973	9.997	0.241	
	9.965	9.987	0.221	0.047 3
	9.963	9.978	0.151	
4 ($65\%Q_{max}$)	18.364	18.398	0.185	
	18.351	18.381	0.164	0.031 8
	18.573	18.615	0.226	
5 (Q_{max})	23.982	24.015	0.138	
	24.028	24.082	0.225	0.043 7
	23.988	24.033	0.188	

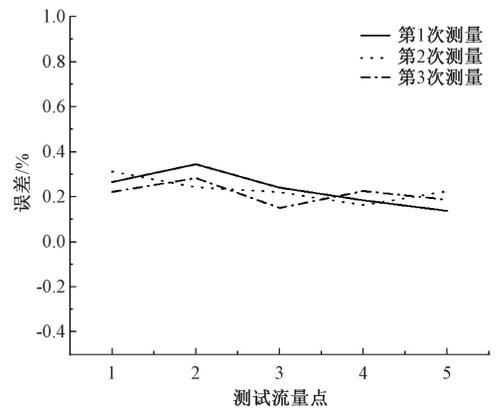


图 16 被检涡街流量计的相对误差曲线

Fig. 16 Relative error curve of the vortex flowmeter under inspection

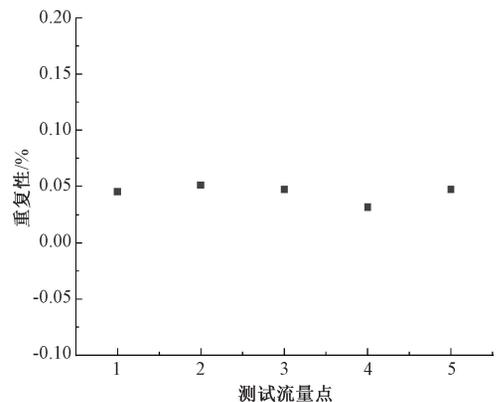


图 17 被检流量计在各流量点的重复性

Fig. 17 Repeatability of the flow meter under test at each flow point

范围有所不同,因此有必要对被检流量计的 St 和 Re 进一步进行分析。被检流量计的 St 和 Re 关系试验如表 4 所示。由图可知,在流量测量范围内, St 基本保持为常值 0.80,因此可认为此范围为正常工作范围。

表 4 被检流量计 Re 与 St 之间的关系

Table 4 Relationship between Re and St

流量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	流速 $v/(m \cdot s^{-1})$	频率 f/Hz	雷诺数 Re	斯特劳哈 尔数 St
2	0.12	135.39	6.3×10^3	0.810 54
5	0.3	335.37	1.6×10^4	0.803 11
10	0.6	669.72	3.2×10^4	0.801 89
20	1.2	1 342.06	6.4×10^4	0.830 34

6 结 论

通过仿真软件 Fluent 中的大涡模拟模型对小口径涡街流量计进行模拟,设计了一种适用于微量程段进行测量的微小口径涡街流量计。在仿真条件下通过对涡街流量计的流道截面形状及尺寸参数优化,并分析振动传感器的最佳布置位置,有效提高了微小口径涡街流量计振动信号的信噪比。在水流量标准装置上进行了流量测量实验,结果表明:仿真设计的结果与实验测试的结果具有良好的一致性;实验测得的微小涡街流量计测量性能较好,最大相对误差小于 0.5%,量程比为 10:1,重复性满足微量程段的测量要求。所设计的微小口径涡街流量计具有良好的测量性能。

参考文献

- [1] 舒张平,徐科军,邵春莉. 基于互相关分析的低雷诺数涡街流量计设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1974-1981.
- SHU ZH P, XU K J, SHAO CH L. Design of cross correlation-based vortex flowmeter for low Reynolds number flow[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12): 1974-1981.
- [2] 李雪菁,姚新红,张进明. 高温液态金属流量在线测量方法与技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 62-72.
- LI X J, YAO X H, ZHANG J M. Review of on-line measurement methods and technologies for high temperature metal flow[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 62-72.
- [3] 胡岳,张涛. 分离涡流场数值仿真的参数影响研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 165-172.
- HU Y, ZHANG T. Research on the effects of numerical simulation parameters of separation vortex flow field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 165-172.
- [4] 宋佳忆,李斌,陈洁,等. 基于 CFD 的涡街流量计取

- 压位置仿真研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(3): 1-4.
- SONG J Y, LI B, CHEN J, et al. Numerical simulation on optimal pressure tapping position of vortex flowmeter based on CFD[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(3): 1-4.
- [5] 黄绍锋,陈洁,宋佳忆,等. 涡街流量计漩涡发生体位置仿真研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 119-122.
- HUANG SH F, CHEN J, SONG J Y, et al. Numerical simulation on vortex generating body position of vortex flowmeter [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(1): 119-122.
- [6] CHEN J L. Frequency characteristics of a vortex flowmeter in various inlet velocity profiles[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(3): 1-6.
- [7] 刘铁军,宫通胜,陈寅佳. 异径管电磁流量传感器励磁系统研究[J]. 传感技术学报, 2014, 27(4): 495-499.
- LIU T J, GONG T SH, CHEN Y J. Study on the magnetic excitation subsystem of electromagnetic transducer with locally shrunk measurement pipe [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(4): 495-499.
- [8] 杨攀. 小口径异形管路涡街流量传感器安装环境及压力损失研究[D]. 天津:天津大学, 2018.
- YANG P. Study on installation environment and pressure loss of small diameter special-shaped pipeline [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [9] 黄云志,翟丽文,吴晨,等. 面向强周期振动干扰的涡街流量计系统研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(8): 105-112.
- HUANG Y ZH, ZHAI L W, WU CH, et al. Development of vortex flowmeter system for strong periodic vibration interference[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(8): 105-112.
- [10] VENUGOPAL A, AGRAWAL A, PRABHU S V. On the linearity, turndown ratio and shape of the bluff body for vortex flowmeter [J]. Measurement, 2019, 137: 477-483.
- [11] LIU Z, HUANG F. Study on the influence of turbulence intensity on vortex signal [C]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1064(1): 012069.
- [12] 康勇,李靖,丁凌,等. 基于介质可压缩性的涡街流量计仪表系数修正[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(2): 96-100, 106.
- KANG Y, LI J, DING L, et al. Modification of meter coefficient of vortex flowmeter based on compressibility of

medium[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2023(2):96-100,106.

- [13] 王力辉,刘通,谢代梁,等. 基于 SVD 的涡街流量计信号处理方法[J]. *传感技术学报*, 2023, 36(5): 731-737.

WANG L H, LIU T, XIE D L, et al. Signal processing method of vortex flowmeter based on SVD[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2023, 36(5): 731-737.

- [14] 王鹏. 不同流体条件下涡街流量计的测量特性研究[J]. *计量与测试技术*, 2020, 47(5): 34-38.

WANG P. Study on the correlation characteristics of vortex flowmeter under different fluid conditions[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2020, 47(5): 34-38.

- [15] 胡捷,黎波,肖志锋. 涡街流量计的压电探头最优距离和新型测量方法研究[J]. *传感技术学报*, 2021, 34(10): 1346-1353.

HU J, LI B, XIAO ZH F. Research on the installation location of the piezoelectric probe and the airflow velocity sensing method of vortex flowmeter[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021,34(10): 1346-1353.

作者简介



吴奕瑶,2017 年就读于河北农业大学机电工程学院获得学士学位,现为中国计量大学研究生,主要研究方向为流量计量技术。

E-mail:p21020854133@cjlu.edu.cn

Wu Yiyao received a B. Sc. degree from School of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University in 2017. Nowshe is a M. Sc. candidate at China Jiliang University. Her main research interest includes flow measurement technology.



徐雅(通信作者),2017 年 6 月于浙江大学获得博士学位,现为中国计量大学计量测试与仪器学院硕士生导师,主要研究方向为流量测量技术及低温工程应用。

E-mail: xuya@cjlu.edu.cn

Xu Ya (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Zhejiang University in June 2017. Now she is a master tutor of the School of Measurement, Testing and Instrumentation of China Jiliang University. Her main research interests include flow measurement technology and low temperature engineering application.