

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205890

# 新型均速管涡街流量传感器的测量特性研究\*

刘月圆<sup>1,2,3</sup> 梁玉娇<sup>1,2,3</sup> 郑盟<sup>1,2,3</sup> 方立德<sup>1,2,3</sup>

(1. 河北大学大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心 保定 071000;  
3. 河北省能源计量与安全检测技术重点实验室 保定 071000)

**摘要:**本文提出了新型均速管涡街流量传感器,实现差压与频率信号的双参数测量,并根据涡街信号的不同采集方式分为压电式和差压式两种类型。对两种一体化流量传感器的结构、原理以及信号采集方式进行了设计和阐述,并对其测量特性进行对比分析。结果表明,采用差压式流量传感器与经验小波变换(EWT)相结合,能将量程比由10:1拓宽至140:1。单相气最大测量误差绝对值由1.46%减小至0.49%,重复性由0.17%降至0.05%,水流量最大测量误差绝对值也实现了从1.00%下降至0.49%,重复性低于0.07%。与压电式流量传感器相比,差压式均速管涡街流量传感器在测量精度及测量范围中具有一定的应用优势,为湿蒸汽测量提供了一种新思路。

**关键词:**均速管;涡街流量计;压电式;差压式;测量特性

**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 the measurement characteristics of a new type of uniform velocity tube vortex flow sensor

Liu Yueyuan<sup>1,2,3</sup> Liang Yujiao<sup>1,2,3</sup> Zheng Meng<sup>1,2,3</sup> Fang Lide<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. National & Local Joint Engineering Research Center of Metrology Instrument and System, Baoding 071000, China;  
3. Hebei Key Laboratory of Energy Measurement and Safety Testing Technology, Baoding 071000, China)

**Abstract:** A new type of flow sensor integrated with uniform velocity tube and vortex is proposed in this paper, which can simultaneously measure the dual-parameter measurement of the differential pressure signal and frequency signal. According to the different extraction methods of the vortex signal, they are divided into piezoelectric type and differential pressure type. The structure, theory, signal acquisition methods of the two flow sensors are mainly designed and expounded in this paper, and the measurement characteristics of them are compared through gas and water. The experimental results show that the combination of the differential pressure flow sensor and the empirical wavelet transform (EWT) can widen the range ratio from 10:1 to 140:1. The absolute value of the maximum measurement error of single-phase gas is reduced from 1.46% to 0.49%, and the repeatability is reduced from 0.17% to 0.05%. The absolute value of the maximum measurement error of water is also reduced from 1.00% to 0.49%, and the repeatability is lower than 0.07%. Compared with the piezoelectric flow sensor, the differential pressure uniform velocity tube vortex flow sensor has certain application advantages in measurement accuracy and measurement range, and provides a new idea for wet steam measurement.

**Keywords:** uniform velocity tube; vortex flowmeter; piezoelectric type; differential pressure type; measurement characteristic

收稿日期: 2022-10-08 Received Date: 2022-10-08

\* 基金项目: 国家自然科学基金(62173122)、河北省自然科学基金重点项目(F2021201031)、京津冀协同创新共同体建设专项(20540301D)项目资助

## 0 引言

在工业领域中应用的蒸汽基本是以湿蒸汽的状态存在的,但其复杂的物理性质给其精确测量带来了很大困难<sup>[1]</sup>。随着全球经济的发展,提升湿蒸汽的测量精度成为当前亟需解决的技术难题,应用现代新技术和测量方法设计量程比更宽、精度更高、抗干扰性更强、维护方便的湿蒸汽流量传感器对于提高生产效率降低能源损耗都具有十分重要的意义。

目前,国内外对蒸汽流量计量的关注点多在双参数测量传感器的研究。研究学者提出了多种多传感器组合测量方法,其中使用最广泛的是差压式流量计和涡街流量计<sup>[2-3]</sup>。然而,文丘里管测量范围小,流体对喉管的冲刷和磨损严重,孔板流量计压损大,长时间使用会使其精度急速下降<sup>[4-5]</sup>。相比之下,均速管流量计自身结构简单、压损小以及长期运行稳定性好的优势使其广泛适用于各种介质<sup>[6-8]</sup>。涡街流量计是目前国内主要流量仪表之一,用于气体、液体和蒸汽的计量、检测和控制。涡街流量计在工业上的广泛应用证明了其在稳定流体计量中的可靠性和精确性<sup>[9]</sup>。

涡街流量计具有介质适应性宽、测量精度高、压力损失小等优点,但在湿蒸汽测量方面仍存在抗干扰性能、测量下限以及准确性等关键性问题。因此,国内外很多学者致力于涡街频率信号检测方法和频率检测传感器的研究。宋开臣等<sup>[10]</sup>和黎翱等<sup>[11]</sup>分析压电式涡街流量计输出的电荷信号幅值极小,受噪声影响大,信噪比很低等影响其测量精度的因素。舒张平等<sup>[12]</sup>为了扩展量程比,研制了测量低雷诺数流量的涡街流量计,测量精度达到1.0级。研究表明压电式对于管道振动十分敏感,不利于降低测量下限,而在一定范围内差压式的输出信号几乎不受管道振动干扰的影响。利用差压式测量方法检测涡街频率信号也越来越成为研究者们研究的热点话题。Li等<sup>[13]</sup>采用差压传感器来检测旋涡发生体上下游之间的压力差,在压力信号中直接测得质量流量。此方法的提出对管道振动和流体湍流等干扰也具有较好的稳定性。Venugopal等<sup>[14]</sup>通过数值模拟确定涡街发生体的形状,并采用管壁压差测量法对涡街流量计进行实验性能研究。差压式检测方法工作可靠,介质流动对引压系统影响很小,灵敏度高,逐渐成为一种改善涡街流量计测量特性的有效办法。

涡街流量计在本质上是流体振动型流量计,在工业现场使用时,管道及各种传感器振动引起的干扰会降低测量精度。为了提高测量精度,国内外学者对涡街频率信号处理相关方法展开了大量研究。李庆勇等<sup>[15]</sup>设计了一种新型移动式高精度涡街流量计,并利用快速

傅里叶变换处理低流速下的涡街频率信号。Jin等<sup>[16]</sup>采用快速傅里叶变换方法用于时域变换,分析涡旋相互作用引起的涡旋脱落频率的来源、原因和衰减。但是,这种方法在更低速时难以进一步提取有用信号,一般用于信号和噪声重叠部分非常小或者完全分开的情况,因此单纯用谱分析来扩展涡街流量计的量程下限存在着很大的局限性。此外,Shao等<sup>[17]</sup>对涡街流量计采集的输出信号进行滤波,并通过概率密度函数和循环差分序列,提取波动特征信号。Li等<sup>[18]</sup>提出了一种基于经验模态分解和谱重心校正法的信号处理新算法,对离散液体对涡街信号和计量的影响进行分析,为涡街信号分析提供了一定的参考。姚凤艳等<sup>[19]</sup>采用集总经验模态分解和Hilbert谱方法对涡街流量计尾迹振荡特征进行研究。自适应陷波方法在检测精度和动态响应之间存在矛盾,互相关方法需要合适的信号点数和周期才能发挥较好的效果,这些方法都取得了一定的效果,但是由于自身存在一些限制,需要进一步地改进和提高才能取得很好的实际测量效果。Istihat采用小波分析对涡流管产生的涡流信号进行测量和分析,得到了压力、温度和频率之间的关系,具有较好的测量效果<sup>[20]</sup>。Xie等<sup>[21]</sup>和王一鹏等<sup>[22]</sup>提出基于小波包分析和多分类支持向量机的方法分析信号波形特征,可以自动、快速地诊断故障。小波分析在故障检测、涡流信号等方面研究发展具有一定的实际应用意义,为涡街特征频率提取提供了研究基础。

随着工业自动化的飞速发展,人们对湿蒸汽流量测量装置以及检测技术要求愈来愈高。基于均速管流量传感器与涡街流量计的应用优势,本文提出了新型均速管涡街一体化流量传感器,主要介绍了两种传感器的结构特点、工作原理以及信号采集方式,并通过实验测试对两种传感器的测量特性进行研究。该新型流量传感器能够同时具备两者的压损小、准确度高、测量范围大以及应用广泛等优势,对于提高产品质量和降低能源损耗具有十分重要的意义。

## 1 新型均速管涡街流量传感器结构及信号测量方式

### 1.1 新型均速管涡街流量传感器的结构设计

基于均速管涡街流量计原理制作的新型一体化流量测量传感器均采用均速管管体作为新型流量测量传感器的检测杆。该检测杆是一个截面呈类等腰梯形的中空柱状体,使阻流体迎流面宽度 $d$ 与管道内径 $D$ 之比为0.28,其迎流面有两对全压孔,背流面有一对静压孔。流体流经该检测杆后,交替产生两列均匀排列漩涡,在其前部和后部分别产生一个高压分布区和低压分布区,如

图 1 所示。两种传感器均速管内部压差检测方式一致,均采用差压变送器测量前后腔体压差。如图 2 位置 a、b 所示。

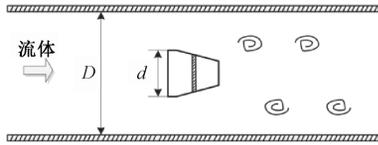


图 1 新型流量传感器原理示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the new type of flow sensor principle

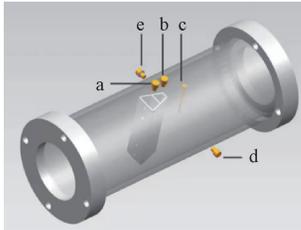


图 2 两种流量传感器的两路信号检测位置示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of the two signal detection positions of the two flow sensors

根据涡街信号的不同采集方式设计了两种结构,一种是在检测杆后方设置一个探针,如图 2 中位置 c 所示,该结构设计采用的是应力检测原理,当装有压电晶体的探针受到漩涡的交变横向力作用时,压电晶体受应力作用而产生交变电荷涡街信号输出,称其为压电式均速管涡街流量传感器。另一种传感器是通过在漩涡发生后取一对呈轴对称取压孔,如图 2 中位置 d、e 所示。该设计利用管壁差压检测原理,有规律的涡旋脱落导致靠近管壁的两个固定点的压差有规律的波动,压差频率与漩涡脱落的频率一一对应。本文对优化设计后的检测杆及前后直管段建立几何模型,并对类等腰梯形结构的检测杆在气流中的阻流过程进行了数值模拟。仿真结果表明该传感器的检测杆及开孔设计不会影响漩涡的脱落,可以实现涡街频率信号和均速管差压两种信号的测量,如图 3 所示。取压孔的位置可以通过监测检测杆下游不同位置处的压力波动确定,如图 4 所示。在位于检测杆下游 26 mm (0.8D) 处,差压波动最大,因此,该传感器将在该位置取一对呈中心对称的取压孔,通过两个取压孔输出的压力差波动信号来提取涡街漩涡脱落频率,该传感器为差压式均速管涡街流量测量传感器。所述两种传感器结构如图 5 所示。

1.2 新型均速管涡街流量传感器的信号测量方式

新型均速管涡街流量传感器能够同时测得差压信号与涡街信号,压电式和差压式传感器对检测杆内部全压

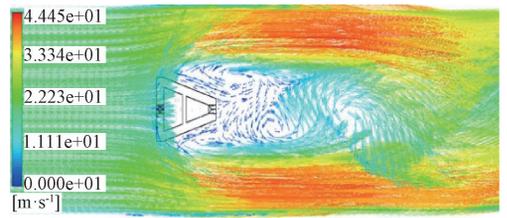


图 3 流场速度矢量图

Fig. 3 Schematic diagram of the velocity vector of the flow field

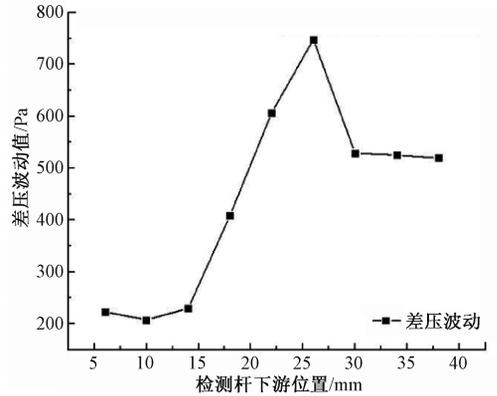


图 4 检测杆下游的差压波动

Fig. 4 Differential pressure fluctuations downstream of the detection rod



(a) 压电式 (a) Piezoelectric  
(b) 差压式 (b) Differential pressure

图 5 压电式与差压式均速管涡街流量传感器实物图  
Fig. 5 Physical map of piezoelectric and differential pressure uniform velocity tube vortex flow sensors

腔和静压腔输出的差压信号测量方式一致,均采用电容式差压变送器进行测量,体积流量与差压信号之间的关系如式(1)所示:

$$q_v = K_1 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_m}} \quad (1)$$

式中:  $q_v$  为被测介质体积流量 ( $m^3/h$ );  $\Delta P$  为全压腔与静压腔的平均差压 (kPa);  $K_1$  为差压信号关于管道截面面积的系数 ( $m^2$ );  $\rho_m$  为介质平均密度 ( $kg/m^3$ )。

### 1) 压电式均速管涡街流量传感器信号测量方式

流体流经传感器内部时,对检测杆发生冲击,在检测杆两侧交替产生有规则的漩涡,伴随漩涡的形成和分离,在检测杆周围流体会同步发生流速、压力变化和下游尾流周期振荡。部分流体动能转化为流体振动,探针能够感受到流体的振动,其振动频率与流速成正比例关系,如式(2)所示。

$$f = St \times \frac{v}{d} \quad (2)$$

式中:  $f$  为漩涡脱落频率(Hz);  $St$  为斯特劳哈尔数(无量纲常数);  $v$  为检测杆侧面的平均流速(m/s);  $d$  为检测杆的迎流面宽度(mm)。

压电式流量传感器通过采用先进的数字信号处理(digital signal processing, DSP)技术,采用数字滤波器代替模拟滤波器,并可以对探针振动频率进行实时监测、调节和处理。具体参数设置如表 1 所示。

表 1 压电式流量传感器参数设置

Table 1 Piezoelectric flow sensor parameter setting

测量传感器特点	具体参数
温度范围	-40 °C ~ 200 °C
模拟/脉冲输出	4~20 mA 模拟输出和脉冲输出
供电电压	24VDC
显示参数	可显示瞬时流量、累积流量、流速
通讯方式	HART/485 输出

### 2) 差压式均速管涡街流量传感器信号测量方式

本传感器采用管壁差压法测量漩涡脱落引起的差压波动信号。当所测气体流经细小管道时,流速增大,频率增至 1 500 Hz 左右时,电容式差压变送器的频率响应已不足以获得可靠的涡街频率信号,因此需要选择一种具有足够高频响应的阻压式差压变送器进行采集。该高频差压变送器具有高稳定性、高可靠性及强抗干扰性等优势,有利于对特征频率的较准确提取。其具体参数如表 2 所示。

表 2 高频差压变送器的具体参数

Table 2 Specific parameters of high frequency differential pressure transmitter

参数设置	高频差压变送器
测量范围	-5~5 kPa
信号输出	4~20 mA
供电方式	24 V
补偿温度范围	10 °C ~ 60 °C
使用温度范围	-25 °C ~ 85 °C

涡街流量计检测流体经过阻流体产生的漩涡脱落频率,其原理公式如式(3)所示。

$$q_v = \frac{f}{K_2} \quad (3)$$

式中:  $K_2$  为体积流量与涡街信号的线性系数( $1/m^3$ )。

## 2 实验传感器及测试

### 2.1 单相气音速喷嘴标准装置

本文采用单相气音速喷嘴标准装置作为实际流量测量的参考,对两种流量传感器进行单相气试验。实验测量管径为 DN32,温度 22 °C,压电式流量传感器实验流量测量范围为 15~140  $m^3/h$ ,差压式流量传感器实验流量测量范围为 1~140  $m^3/h$ 。实验方法采用负压法,空气压缩机启动后,气流从入口依次进入测量管道的前直管段和被测流量传感器,然后进入音速喷嘴计量系统中,流入汇流管,最后排放到大气中。传感器的控制系统提供数据采集与过程控制的功能,并通过控制界面进行显示。音速喷嘴标准气体测量装置工作示意图如图 6 所示。

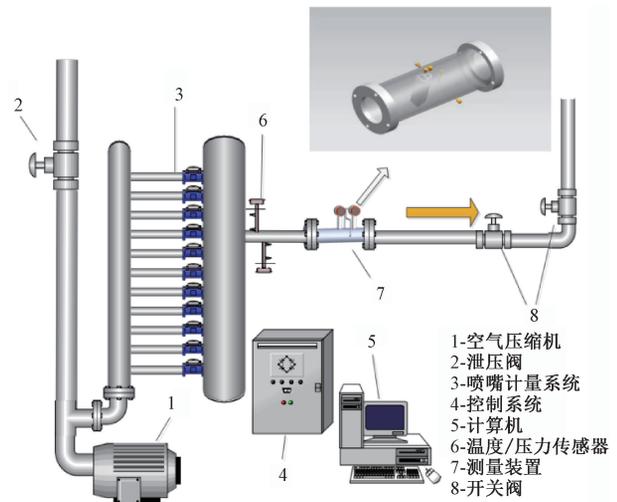


图 6 音速喷嘴标准气体流量装置工作原理

Fig. 6 Schematic diagram of the working principle of the gas flow standard device of the sonic nozzle method

### 2.2 单相水流量标准装置

本文采用水流量标准装置作为实际流量测量的参考,对两种流量传感器进行单相水试验。实验测量管径为 DN32,工作压力为 0.15~0.35 MPa,新型流量传感器实验流量测量范围为 1~18  $m^3/h$ ,水流量标准装置图如图 7 所示。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 单相气工况下的涡街信号分析

本文以音速喷嘴法气体标准装置作为流量参考,设置 1.034~140.678  $m^3/h$  之间的测试流量点对两种流量传感器进行性能测试。压电式流量传感器能检测出的涡

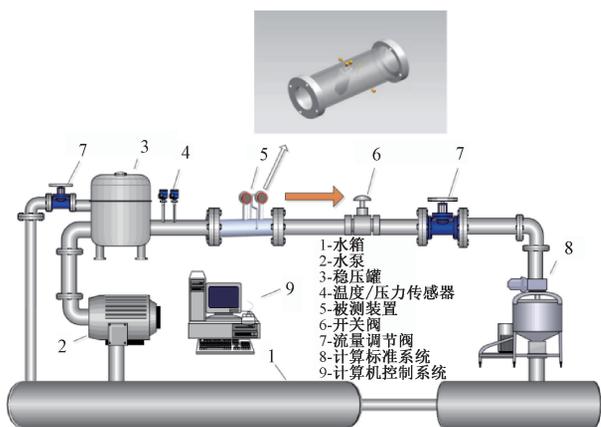


图 7 水流量标准装置工作原理

Fig. 7 Schematic diagram of the water flow standard device

街频率的最小流量点为  $14.849 \text{ m}^3/\text{h}$ , 最大为  $140.678 \text{ m}^3/\text{h}$ 。本文对  $14.849 \sim 140.678 \text{ m}^3/\text{h}$  范围内的 26 个流量点做重复性实验。本文采取了快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT)、经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 和经验小波分析 (empirical wavelet transform, EWT) 3 种非线性信号分析方法对涡街特征频率进行提取和分析。

如图 8 所示, FFT、EMD 以及 EWT 这 3 种非线性信号处理方法对涡街频率信号的有效提取效果截然不同。在流速较低的情况下, 由于漩涡脱落受到管道以及周围设备振动的影响, 使得输出信号不可避免的包含低频、高频随机噪声。经 FFT 和 EMD 处理后, 虽然能够提取有效频率特征信号, 但仍存在比较明显的干扰信号, 而经 EWT 处理后的频率信号的单峰性有效的得到了改善, 如图 8(c) 所示。在噪声与有效信号有重叠部分方面, FFT 谱分析的提取效果具有一定局限性, EMD 方法虽然在故障提取和提高信噪比方面有很大突破, 但是也存在模式混合和端点效应等不足, EWT 融合了 EMD 方法的自适应分解理念和小波变换理论, 为信号处理提供了一种全新的自适应时频分析思路。相比于 EMD, EWT 能够自适应选择频带, 克服了由于信号时频尺度不连续引发的模式混叠问题, 具有快速提取有效信号, 计算复杂度低等优点。

随着流量增大, 漩涡脱落频率逐渐增加, 在  $29.899 \sim 130.61 \text{ m}^3/\text{h}$  的气体流量下的涡街频率提取效果如图 9 所示。

气流量小于  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  时, 输出信号中存在低频分量, 压电式流量传感器不能输出稳定的漩涡脱落频率, 而差压式流量传感器输出的差压波动信号经 EWT 提取分析后仍能获得有效的涡街频率信号, 如图 10 所示。与压电式流量传感器的测量下限相比, 差压式流量传感器将测量下限下降至  $1.034 \text{ m}^3/\text{h}$ , 大大拓宽了涡街频率信号的

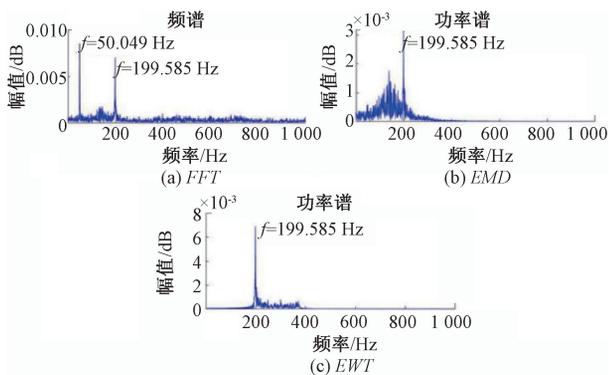


图 8 在  $20.007 \text{ m}^3/\text{h}$  时, FFT、EMD 和 EWT 这 3 种方法对涡街频率提取的对比分析

Fig. 8 Comparative analysis of vortex frequency extraction by FFT, EMD and EWT at  $20.007 \text{ m}^3/\text{h}$

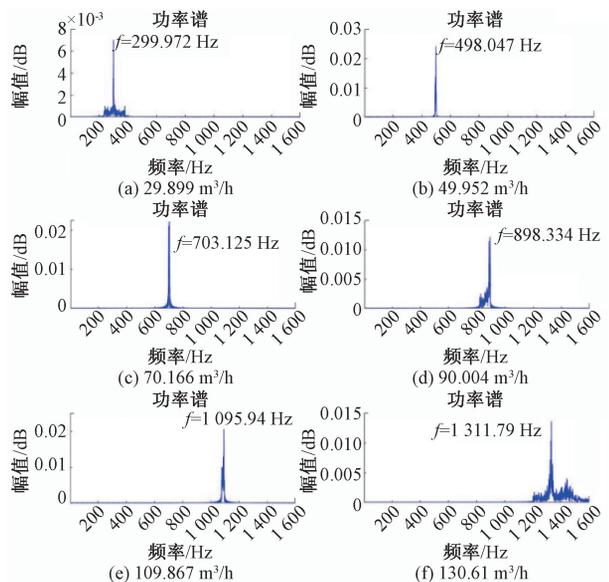


图 9  $29.899 \sim 130.61 \text{ m}^3/\text{h}$  流量下的涡街频率

Fig. 9 Vortex frequency extraction at the flowrate of  $29.899 \sim 130.61 \text{ m}^3/\text{h}$

测量范围。

为了研究两种流量传感器的测量特性, 取 29 个流量点依次进行重复性测量, 如图 11 和 12 所示, 两种传感器的频率信号线性度极佳, 压电式测量传感器的重复性误差均低于  $0.17\%$ , 而差压式测量传感器的重复性误差均处于  $0.05\%$  以内。本文对气体体积流量和差压式测量传感器输出的涡街信号进行线性拟合, 拟合相关系数为  $0.999$ , 拟合公式如式 (4) 所示。

$$f_0 = 10.015 \times q_{v0} \quad (4)$$

式中:  $f_0$  为差压式流量传感器的输出频率;  $q_{v0}$  为测试气体的体积流量。

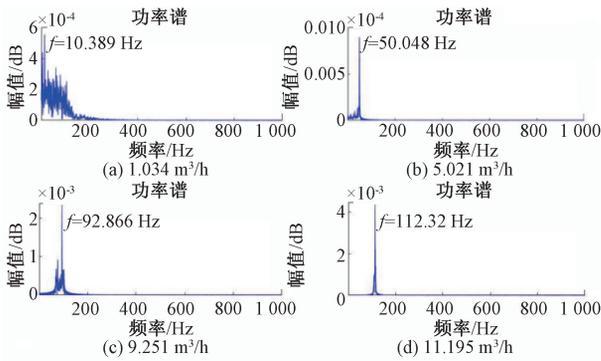


图 10 在 1.034~11.195 m<sup>3</sup>/h 下的涡街频率

Fig. 10 Vortex frequency extraction at the flowrate of 1.034~11.195 m<sup>3</sup>/h

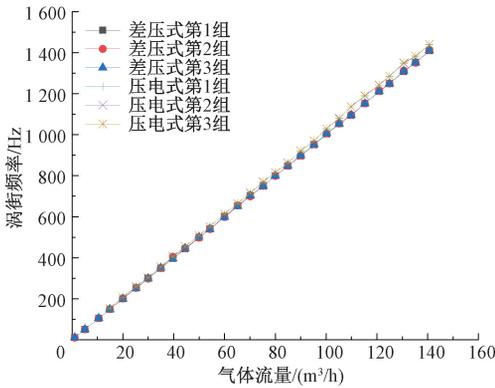


图 11 频率信号重复测量实验结果

Fig. 11 Repeated experimental results of frequency signals

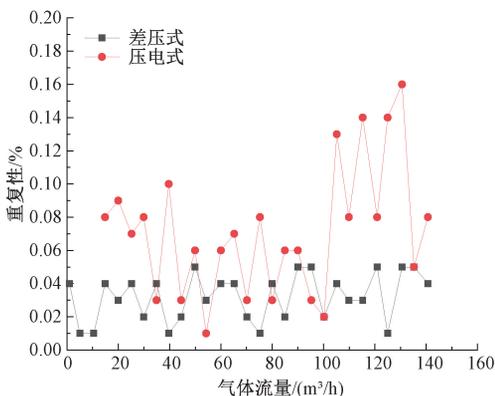


图 12 两种流量传感器频率信号的测量重复性

Fig. 12 Measurement repeatability of frequency signal of two flow sensors

根据拟合结果,对两种传感器的体积流量测量误差进行分析对比,如图 13 所示。在 14.849 m<sup>3</sup>/h 处,压电式测量传感器误差最大,其相对误差为 1.42%,而在气体流量为 50.234 m<sup>3</sup>/h 时,输出频率相对误差绝对值最大为

0.49%,而且差压式流量传感器的测量误差均处于 ±0.50% 范围内,与压电式流量传感器测量误差相比,准确度得到了很大提升。

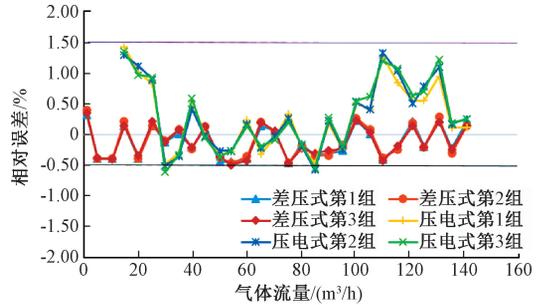


图 13 两种流量传感器频率信号测量误差

Fig. 13 Errors of frequency signal of two flow sensors

### 3.2 单相气工况下的差压信号分析

本文对两种传感器检测杆内腔压差进行测量,两腔输出的全压和静压之差为平均差压信号,该信号由电容式差压变送器检测,其测量重复效果如图 14 所示。

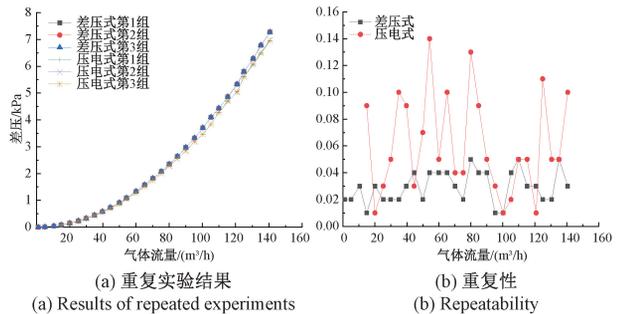


图 14 两种流量传感器差压信号重复测量分析

Fig. 14 Repeated measurement analysis of differential pressure signals of two flow sensors

由图 14 中两种传感器测量差压信号重复性对比分析可知,差压式测量差压信号重复性小于 0.05%,远远低于压电式测量重复性误差。本文对气体体积流量和差压式传感器输出的差压信号进行线性拟合,拟合相关系数为 0.998,拟合公式如式(5)所示。

$$\Delta P_0 = 3.68249 \times 10^{-4} \times q_{v0} \quad (5)$$

式中: $\Delta P_0$  为差压式流量传感器的输出差压。

根据拟合结果,对两种传感器体积流量测量误差进行分析对比。在气体流量为 120.897 m<sup>3</sup>/h 时,误差绝对值最大,为 0.49%,而压电式传感器测量压差信号最大误差绝对值为 1.46%,如图 15 所示。

### 3.3 单相水工况下的涡街与差压信号处理

单相水测量实验选择的测量点为 1.02、1.94、3.03、4.02、4.99、6.01、6.92、8.06、8.97、10.01、11.02、11.97、

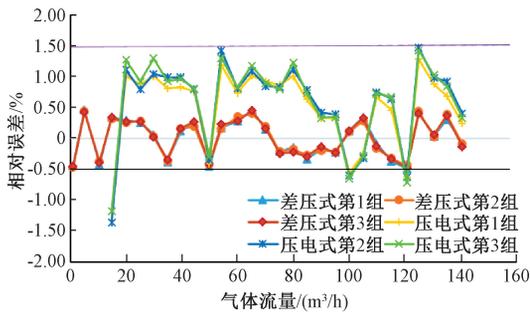


图 15 两种流量传感器差压信号测量误差

Fig. 15 Errors of differential pressure signal of two flow sensors

12.95、13.9、15.05、16.08、17.03 和 17.89 m<sup>3</sup>/h。通过高频差压变送器采集由水流引起的漩涡脱落信号,并采用 EWT 对涡街特征频率进行提取,如图 16 所示。

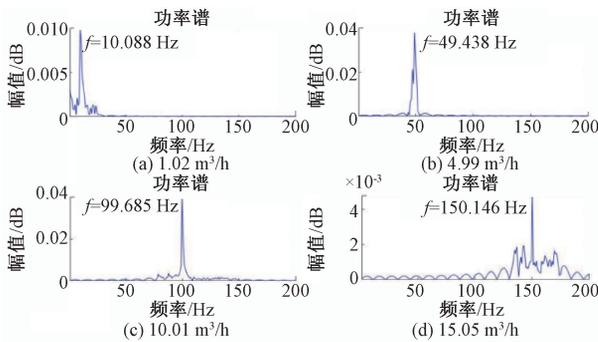


图 16 不同水流量的涡街频率提取效果图

Fig. 16 Effect of vortex frequency extraction for different water flowrates

为了测试两种流量传感器的频率信号和差压信号的测量性能,本文对不同水流量点进行重复性测量和误差分析,如图 17~19 所示。两种传感器差压信号重复性对比分析可知,压电式流量传感器对两路信号的测量重复性在 0.15% 以内,而差压式流量传感器对两路信号的测量重复性小于 0.07%。压电式流量传感器对频率信号和差压信号引起的最大水流量相对误差绝对值分别为 1.00% 和 0.97%,而差压式流量传感器的最大测量误差绝对值降至 0.49% 和 0.48%,具有较高的准确性。

### 4 结论

本文基于均速管与涡街流量计的结构特点以及应用优势,设计了一种新型一体化均速管涡街流量传感器,根据不同的涡街信号提取方式分为压电式和差压式,并对其进行特性研究,得到如下结论:

1) 新型流量传感器融合了均速管和涡街流量计的结

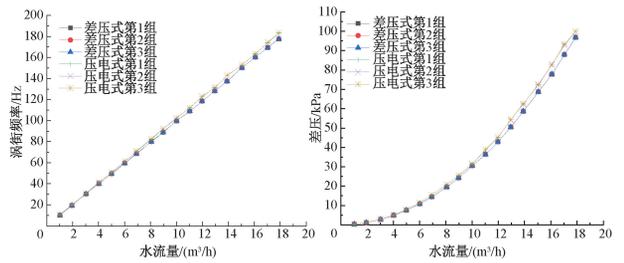


图 17 两种流量传感器重复测量实验结果

Fig. 17 Repeated experimental results of two flow sensors

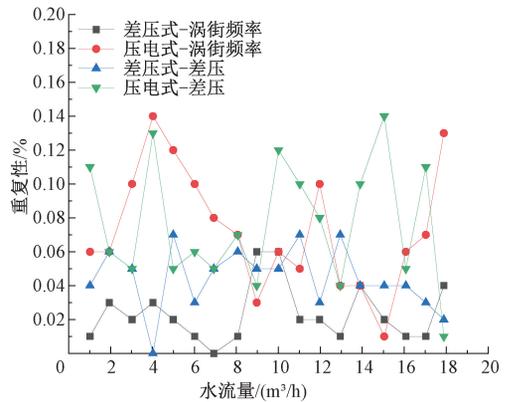


图 18 两种流量传感器的频率和差压信号测量重复性

Fig. 18 Measurement repeatability of frequency and differential pressure signals of two flow sensors

构特点,能同时测得涡街频率信号与差压信号,差压式均速管涡街流量传感器内部无可动部件,具有较强的抗干扰性与测量可靠性。

2) 压电式测量传感器主要通过探针振动频率传输漩涡脱落频率,差压式测量传感器通过检测杆下游管壁取孔采集漩涡产生导致的差压波动信号,并采用 EWT 方法对涡街特征频率进行提取和分析,进而降低涡街信号的测量下限,量程比由 10 : 1 拓宽至 140 : 1。

3) 实验结果表明,压电式传感器对气体和水的测量相对误差分别处于 ±1.46% 和 ±1.00% 以内,重复性误差分别低于 0.17% 和 0.15%。差压式传感器对气体和水的测量相对误差均处于 ±0.49% 以内,最大重复性误差分别降至 0.05% 和 0.07%。由此可见,差压式流量传感器在测量精度、测量重复性以及测量范围方面都有较大优势,为气液两相流测量提供了新的思路。

### 参考文献

[ 1 ] WALKER D, BARHAM S, GIDDINGS D, et al. Wet steam measurement techniques[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2019, 35(5): 627-647.

[ 2 ] SUN Z Q. Mass flow measurement of gas-liquid bubble flow with the combined use of a venturi tube and a vortex

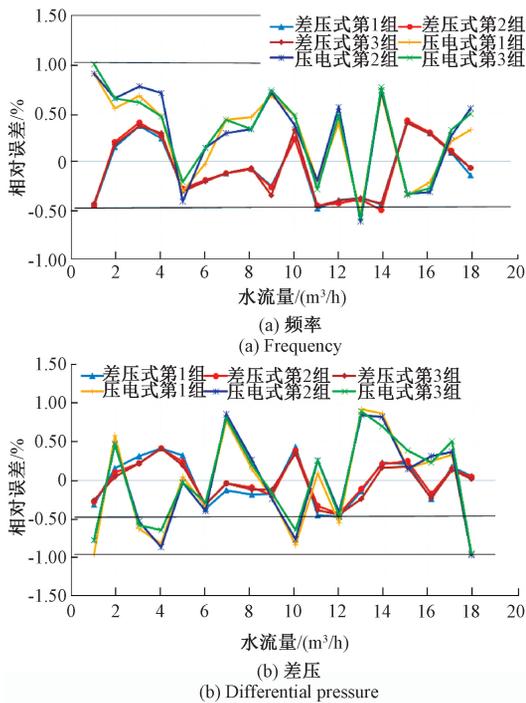


图19 两种流量传感器的水流量测量误差对比

Fig. 19 Comparison of water flow measurement errors of two flow sensors

flowmeter [J]. Measurement Science & Technology, 2010, 21(5): 055403.

- [ 3 ] 曾萍, 张春涛, 于志刚, 等. 孔板与涡街流量计组合测量气液两相流实验[J]. 油气储运, 2019, 38(12): 1408-1413.

ZENG P, ZHANG CH T, YU ZH G, et al. Experiment on the combination of orifice flowmeter and vortex flowmeter to measure gas-liquid two-phase flow [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(12): 1408-1413.

- [ 4 ] 周婉露, 徐立军. 垂直安装文丘里管湿气测量模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(5): 1120-1125.

ZHOU W L, XU L J. Model of wet gas flow in vertically mounted venturimeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(5): 1120-1125.

- [ 5 ] 郝彩哲, 宋晓明, 王东, 等. 对称多孔孔板差压式流量计计量性能试验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 174-180.

HAO C ZH, SONG X M, WANG D, et al. Experimental study on measurement performance of symmetrical multi-hole orifice pressure differential flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 174-180.

- [ 6 ] VINOD V, CHANDRAN T, PADMAKUMAR G, et al.

Calibration of an averaging pitot tube by numerical simulations [J]. Fluid Measurement and Instrumentation, 2012, 24: 26-28.

- [ 7 ] ADEFILA K, YAN Y, SUN L, et al. Calibration of an averaging pitot tube for gaseous CO<sub>2</sub> flowmetering [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2015, 64(5): 1240-1249.

- [ 8 ] 齐利晓, 孙立军, 张涛. 均速管流量传感器二维仿真方法[J]. 天津大学学报, 2011, 44(9): 774-779.

QI L X, SUN L J, ZHANG T. 2D numerical method on averaging pitot tubes [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(9): 774-779.

- [ 9 ] 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.

- [ 10 ] 宋开臣, 曾瑶, 叶凌云. 基于多传感器信息融合的涡街信号处理方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(7): 1307-1312, 1352.

SONG K CH, ZENG Y, YE L Y. Vortex signal processing method based on multi-sensor information fusion [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2016, 50(7): 1307-1312, 1352.

- [ 11 ] 黎翱, 徐科军, 熊伟. 频率方差与幅值相结合的涡街流量计抗振方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 161-169.

LI AO, XU K J, XIONG W. Anti-pipeline vibration method combining frequency variance and amplitude for vortex flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019(9): 161-169.

- [ 12 ] 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.

- [ 13 ] LI Z Y, SUN Z Q. Development of the vortex mass flowmeter with wall pressure measurement [J]. Measurement Science Review, 2013, 13(1): 20-24.

- [ 14 ] VENUGOPAL A, AGRAWAL A, PRABHU S V. Performance evaluation of piezoelectric and differential pressure sensor for vortex flowmeters [J]. Measurement, 2014, 50(1): 10-18.

- [ 15 ] 李庆勇, 王洪君. 基于 MSP430 的移动式高精度涡街流量计的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(6): 47-49, 62.

LI Q Y, WANG H J. Design of mobile high-precision

- vortex flowmeter based on MSP430 [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2020(6): 47-49,62.
- [16] JIN F Y, TAO R, LU Z H, et al. A spatially distributed network for tracking the pulsation signal of flow field based on CFD simulation; method and a case study[J]. *Fractal and Fractional*, 2021, 5(4): 1-17.
- [17] SHAO C L, XU K J, FANG M. Feature patterns extraction-based amplitude/frequency modulation model for vortex flow sensor output signal [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2015, 64(11): 3031-3044.
- [18] LI J X, WANG C, DING H B, et al. EMD and spectrum-centrobaric-correction-based analysis of vortex street characteristics in mist annular flow of wet gas[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(5): 1150-1160.
- [19] 姚凤艳, 周天, 孙志强. 基于 EEMD-Hilbert 谱的涡街流量计尾迹振荡特性[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(2): 395-402.
- YAO F Y, ZHOU T, SUN ZH Q. Wake oscillation characteristics of vortex flowmeter based on EEMD-Hilbert spectrum [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(2): 395-402.
- [20] ISTIHAT Y, WISNOE W. Wavelet transform of acoustic signal from a Ranque-Hilsch vortex tube [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, 88(1): 1757-1766.
- [21] XIE Y X, YAN Y J, LI Z, et al. Scintillation detector fault diagnosis based on wavelet packet analysis and multi-classification support vector machine (Article) [J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, 15(3): T03001.

- [22] 王一鹏, 陈学振, 李连玉. 基于小波包混合特征和支持向量机的机床主轴轴承故障诊断研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(2): 59-64.

WANG Y P, CHEN X ZH, LI L Y. Research on fault diagnosis of machine spindle bearing based on wavelet packet mixing feature and SVM[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(2): 59-64.

## 作者简介



刘月圆, 2019 年于河北大学获得学士学位, 现为河北大学在读硕士研究生, 主要研究方向为流量测量及仪器设计研究。

E-mail: liuyueyuan0815@sina.com

**Liu Yueyuan** received her B. Sc. degree in 2019 from Hebei University. Now she is a M. Sc. candidate in Hebei University. Her main research interests include flow measurement and instrument design.



方立德 (通信作者), 1998 年于中国计量大学获得学士学位, 2005 年于河北工业大学获得硕士学位, 2008 年于天津大学获得博士学位, 现为河北大学教授, 主要研究方向为热工领域智能仪器研究及应用、复杂流体流动测试及特性研究。

E-mail: fanglide@hbu.edu.cn

**Fang Lide** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1998 from China Jiliang University, received his M. Sc. degree in 2005 from Hebei University of Technology, received his Ph. D. degree in 2008 from Tianjin University. Now he is a professor in Hebei University. His main research interests include research and application of intelligent instruments in the field of thermal engineering, complex fluid flow testing and characteristic research.