

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2210605

基于三轴加速度探头的涡街湿气分相流量测量^{*}

李金霞¹, 丁红兵², 孙宏军², 王超²

(1. 中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300; 2. 天津大学电气自动化与信息工程学院 天津 300072)

摘要:针对涡街湿气测量过读问题,提出了基于加速度检测的涡街过读校正和分相流量测量方法。设计了高频响三轴加速度探头,分别对敏感元件、探头尺寸和封装进行了优化设计。干气标定结果表明,在 $4.43 \times 10^4 \sim 1.81 \times 10^5$ 雷诺数范围内,测量精度为 $\pm 1.0\%$,线性度为 1.06% 。然后,在不同湿气工况(载气压力和流量、液相流量)下测试了输出频率和加速度幅值特性,以气、液相韦伯数为参数,分别建立了涡街过读和两相加速度幅值模型。最后,联立两方程建立了湿气测量模型,并利用牛顿迭代算法进行求解。预测结果表明,气相测量误差在 $\pm 1.0\%$ 以内,不确定度 0.46% ,液相全量程误差在 $\pm 15\%$ 以内,不确定度 10.04% 。与未过读校正时最大 8% 的测量误差相比,气相测量精度大大提升,同时实现了湿气中分相流的在线测量。

关键词: 湿气两相流; 涡街流量计; 加速度探头; 仪表过读; 流量测量

中图分类号: TH814 TP212.9 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Gas and liquid flow measurement by vortex metering in wet gas based on three-axis acceleration probe

Li Jinxia¹, Ding Hongbing², Sun Hongjun², Wang Chao²

(1. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To address the problem of vortex metering in wet gas, the overreading correction and wet gas flow measurement method are proposed, which is based on acceleration detection. The high-frequency response three-axis acceleration probe is designed, and the sensing element, probe size and its package are optimized. The calibration results in dry gas show that the metering accuracy is $\pm 1.0\%$ and the linearity is 1.06% in the Reynolds number range of $4.43 \times 10^4 \sim 1.81 \times 10^5$. Then, the tests are implemented on various wet gas conditions (carrier gas pressure and flowrate, liquid flowrate), and the output frequency and acceleration amplitude are acquired. The models of meter overreading, and the acceleration amplitude are established with the gas and liquid Weber numbers, respectively. Finally, the wet gas flow measurement model is formulated by the simultaneous equations, and solved by using the Newton iteration algorithm. The test results show that the gas prediction error is within $\pm 1.0\%$ with uncertainty of 0.46% , and full-scale prediction error for liquid flow within $\pm 15\%$ with uncertainty of 10.04% . Compared with the error up to 8% by the traditional method, the accuracy of wet gas metering is largely improved. Both the gas and liquid flows can be tested online.

Keywords: wet gas two-phase flow; vortex flowmeter; acceleration probe; meter overreading; flow measurement

0 引言

湿气两相流广泛存在于工业生产和日常生活,如天然气、石油、化工、供热等,其中环雾状流是最重要的湿气流型。湿气两相流的准确计量对于安全生产和能

源保护至关重要,直接关系到国民经济发展^[1]。以天然气行业为例,无论是凝析天然气的开采、集输和贸易,都需要对湿气的分相流量(气相和液相)进行精确计量,以优化配井和生产、减少运营成本、有效增加经济效益。以往的研究大部分注重气相流量的测量,而忽略了液相的测量。

收稿日期: 2022-10-20 Received Date: 2022-10-20

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(52276159)项目资助

针对湿气两相流测量,目前主要有两类测量方法。传统方法是相分离后再进行分相计量,设备昂贵、体积庞大、无法实现在线测量,而且应用场合受限^[2]。另一种方法是利用传统单相流量仪表的在线测量方法,由于其具有体积小、安装方便、可实现在线测量等优点,越来越多地受到国内外厂家和学者的重视。其中,涡街流量计因运行稳健、压损小、量程比高、无可动部件等优势,被广泛用于湿气两相的在线测量^[3-4]。然而,受气相中少量液相加载的影响,涡街流量计的仪表特性发生改变,导致测得的气相流量偏高,引起过读(over reading, OR)问题^[5]。如不进行必要修正,将严重影响涡街湿气计量精度的提高,最大可引起30%的测量误差^[6]。

针对两相涡街过读问题,研究者提出了不同的过读关联式。Stewart^[7]建立了涡街过读OR与洛马参数的关联式,Jia等^[8]用五阶多项式对OR-体积含液率进行拟合,Li等^[9]和李金霞等^[10]结合两相涡量运输机制,提出了基于液滴参数的涡街过读物理模型。由上述研究可知,涡街过读与液相含量有关。因此,要对涡街过读进行补偿,必须已知液相流量或液滴参数。对于液相流量参数,传统方法是利用微波法、射线法或等速采样法测量^[11]。对于液滴参数测量,主要有光学法、超声法、电导法等。这些液相/液滴测量方法,往往受限于成本、测量环境和复杂度等,难以推广使用。如微波法和射线法具有安全隐患,等速采样法无法实现在线测量,超声法信号处理过程复杂,光学法一般要求管路透明且为低压,且光学元件造价高、成本高。此外,湿气中液相含量较小,液相测量精度难以保证,有可能造成校正过度,引起更大的测量误差。综上,目前仅通过一台涡街仪表还难以实现湿气分相流量准确计量。

对于涡街流量传感器,除了传统的压电探头之外,近年来,超声传感器、压力传感器^[12]、热线/丝传感器、光纤传感器^[13]、MEMS热膜传感器^[14]、感应式传感器^[15]、臂梁位移传感器^[16]等相继出现。然而,受限于噪声干扰、信号处理复杂度以及传感器本身稳健性等问题,难以推广到两相流测量工况。基于加速度测量和MEMS技术的涡街探头也越来越多地应用到涡街流量测量中。Sun等^[17]提出了一种三轴加速度涡街探头,利用3个方向加速度信息的差异性区分涡信号和振动干扰,并分析了探头抗振特性。Sun等^[18]研究了三轴加速度探头在湿气中的信号特征和过读特性。李金霞等^[19]根据加速度幅值特性提出了一种新的湿气测量方法。结果表明,除频率信息外,加速度幅值也是重要参数,包含气液两相流动信息。为同时实现湿气中气相和液相(分相)流量测量,本文提出了结合加速度幅值的涡街过读校正与湿气流量测量方法。

1 基于加速度检测的涡街湿气测量

涡街流量计是基于卡门涡街原理的速度式流量计,如图1所示,在单相流测量中,其一般工作在仪表线性区,即斯特劳哈尔数 $St_0 = f_{vs}d/U$ 近似为常数的雷诺数范围。在环雾状两相流中,由于液相加载的影响,两相斯特劳哈尔数 $St = f_{vs}d/U_{sg}$ 较单相工况偏高,导致在湿气测量中气相体积流量预测偏高,引起过读问题,过读因子OR为:

$$OR = \frac{Q_{g, \text{apparent}}}{Q_g} = \frac{St}{St_{0, \text{mean}}} \quad (1)$$

其中, $Q_{g, \text{apparent}}$ 和 Q_g 分别为湿气中气相体积流量示值和真实值; $Q_{g, \text{apparent}} = 3600f_{vs}/K_v$, K_v 为仪表系数, f_{vs} 为旋涡脱落频率, $St_{0, \text{mean}}$ 表示单相工况仪表线性区斯特劳哈尔数均值, d 为发生体迎流面宽度, U 为来流平均流速,下标sg代表气相表观值。

本文利用三轴加速度传感器进行涡街信号检测,如图1所示,其中,X轴测量流向阻力致振动信号,Y轴测量垂向振动信号,Z轴测量展向升力致振动信号。除涡脱落频率 f_{vs} 之外,加速度幅值A也是重要的输出信息。利用附加的加速度幅值信息,就可以对涡街过读进行校正。分别建立涡街频率过读OR、加速度幅值A与两相条件的函数模型,联立两个方程,即可建立湿气分相测量模型,结合迭代算法预测气相和液相流量,即可实现湿气分相流量测量。

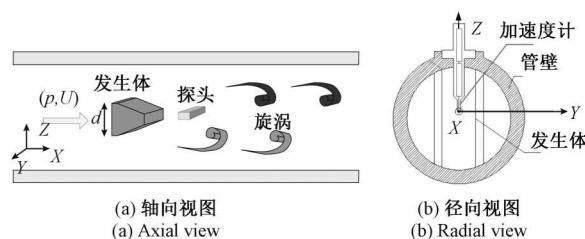


图1 基于加速度检测的涡街流量测量原理

Fig. 1 Acceleration-based vortex metering principle

2 实验装置与测量技术

为分析基于加速度检测的涡街测量可行性,研究湿气中涡街过读和加速度幅值特性,设计了三轴加速度探头,并对探头尺寸进行了优化。本节首先介绍三轴加速度探头优化设计,然后介绍两相测试用的环雾状流实验装置。

2.1 三轴加速度探头设计

为增强信号强度、提升信号质量,首先对探头尺寸进行优化。探头采用末端为扁平体的悬臂梁结构,以减少

对流场的影响,同时提高探头重心、减少管道振动力的影响。探头刚度与厚度的三次方成正比,若探头厚度太大(大于 3 mm),则探头刚度急剧增大,不利于振动信号的测量;若探头厚度太小(小于 1 mm)则探头易断裂,不利于探头长期稳定工作^[20]。由于探头末端需要嵌入加速度芯片(厚度 0.9 mm)。综合考虑上述因素,同时参考现有商用压电探头的扁平体尺寸,选择探头厚度固定为 $a = 2$ mm。探头高度 $h = 7.5$ mm,探头末端位于管道中心位置。为探头宽度进行优化设计,取值范围 $w = 1 \sim 8$ mm,利用 ANSYS CFX 软件进行三维数值仿真。如图 2 所示,采用与实验相同尺寸的三角柱发生体,探头设置在发生体后缘 0.5D 处。对发生体和探头附近网格进行加密,以更好地捕捉速度梯度的变化。选取典型流量 $Q_g = 15$ m³/h,对应来流速度 $U = 23.58$ m/s,雷诺数 $Re_D = 2.29 \times 10^4$,工况压力 $P = 1$ bar,介质为空气。设置边界条件为:速度入口,压力出口。采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,时间步长设置为 $\Delta t = 2 \times 10^{-5}$ s。分别监测探头上 3 个方向的受力系数,定义为:

$$C_D = \frac{F_x}{0.5\rho_g U^2 ah}, C_Y = \frac{F_y}{0.5\rho_g U^2 ah}, C_L = \frac{F_z}{0.5\rho_g U^2 ah} \quad (2)$$

其中, C_D 、 C_Y 、 C_L 分别为阻力系数、垂向力系数、升力系数; F_x 、 F_y 、 F_z 分别为 x 、 y 、 z 轴方向探头受到的流体作用力。

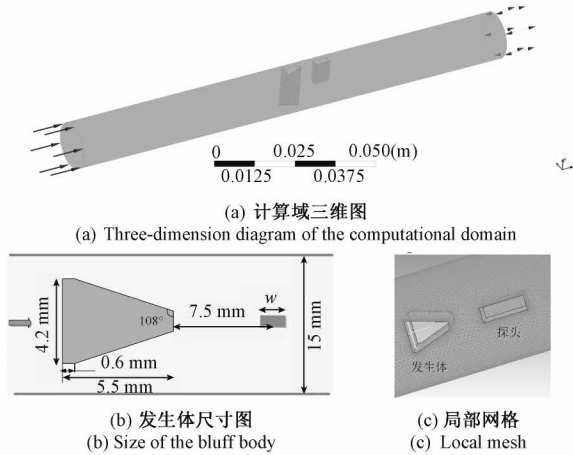


图 2 数值仿真计算域及尺寸设置

Fig. 2 Numerical computational domain and size setup

不同探头宽度下的升力系数 C_L 和阻力系数 C_D 时序图如图 3 所示。可见,当 $w < 3$ mm 时,升力系数 C_L 曲线并不规则,随着探头宽度 w 增大,升力系数 C_L 曲线规则度增加,同时幅值增大。阻力系数 C_D 的变化则恰好相反,随着宽度增大,阻力幅值降低,同时,曲线规则度降低,当 $w \geq 5$ mm,曲线不再是规则的正弦信号。综合考虑升力和阻力系数的变化,确定最佳探头宽度范围为 $w = 4 \sim 5$ mm。

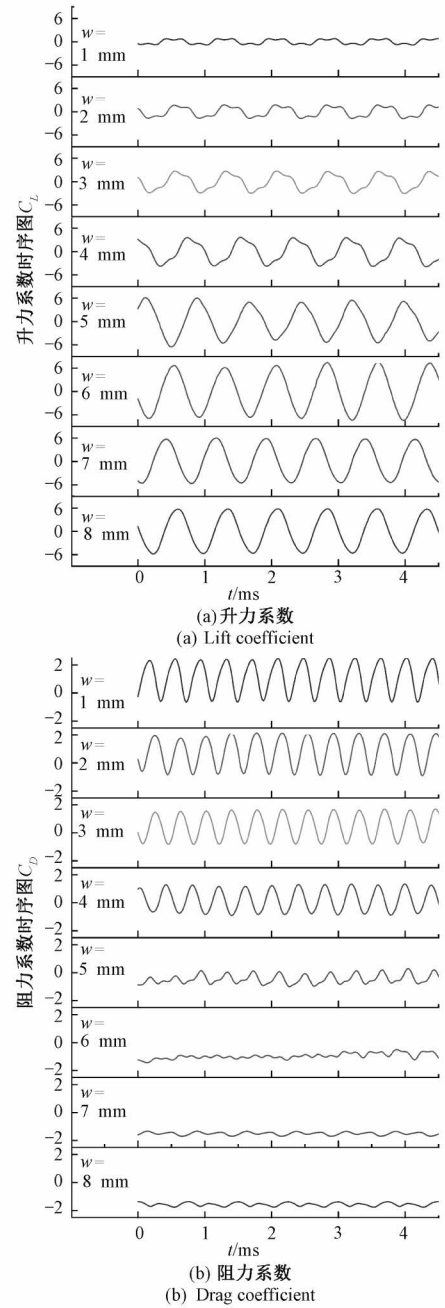


图 3 不同探头宽度下的升阻力系数

Fig. 3 Lift and drag coefficients for different probe width cases

为确定最佳探头宽度,画出流场统计特征值随探头宽度 w 的变化,如图 4 所示,其中 $St_0 = f_{vs} d/U$ 为斯特劳哈尔数,涡频率 f_{vs} 由探头上升力系数 FFT 得到; $C_{D_{rms}}$ 为阻力系数均方根值, $\bar{C}_L$ 为升力系数均值。可见,不同探头宽度 w 下斯特劳哈尔数变化不大,随着宽度 w 增大, $\bar{C}_L$ 一直增大, $C_{D_{rms}}$ 先减小后增大, $\bar{C}_D$ 一直减小,且经历了由正到负的变化过程。作为侵入式探头,本文希望尽量减小探头对流场的影响,因此选择 $|\bar{C}_D|$ 最小的点,即: $w = 4.2$ mm,理论上既可同时满足升力和阻力系数曲线规则的要求,又可减小探头对涡街尾迹的扰流作用。

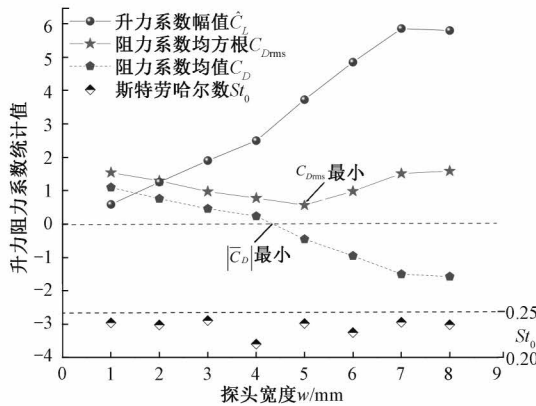
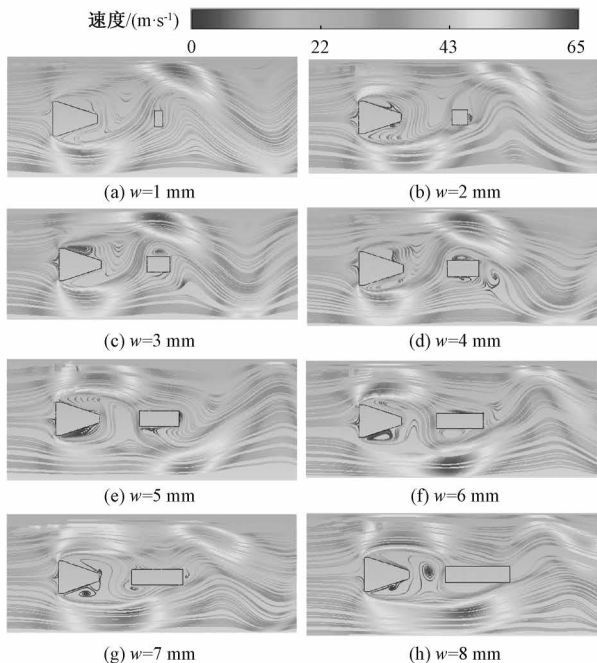


图4 统计特征值随探头宽度的变化

Fig. 4 Statistical characteristic values versus probe width

为定性解释上述现象,做出不同探头宽度下的流线图,如图5所示。探头宽度越大,则探头上下表面越不容易形成旋涡(升力方向,展向),因此,升力系数曲线趋于规则正弦信号,同时,升力方向流体作用面积增大,因此升力幅值增大;随着探头宽度的增大,探头前后表面形成的旋涡尺寸越大(阻力方向,流向),从而使阻力系数规则度降低,同时,长条形结构探头对流体阻力作用减弱,因此,阻力系数均值 $\bar{C}_D$ 减小。当 $w > 5$ mm 时, $\bar{C}_D$ 经历正到负的变化,这可能是由于随着探头宽度增大,探头成为新的阻流体从而产生不规则涡列脱落。而当 $w > 7$ mm 时,升/阻力系数变化趋于稳定,这可能是发生体涡场与探头涡场平衡的结果。

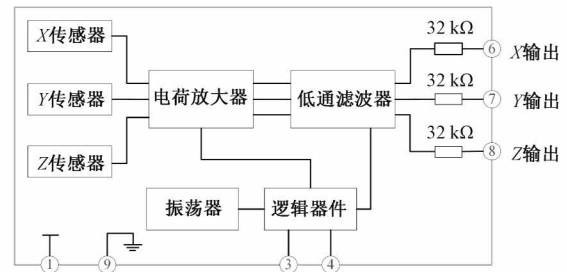
图5 不同探头宽度 w 下的流场流线图Fig. 5 The streamlines on different probe width w conditions

关于传感器选型,考虑到两相涡街信号强度较低,选用尺寸小、灵敏度高、对微弱信号敏感的电容式加速度传感器。如图6(a)所示,采用差分电容式测量,可减少温度和压力变化造成的误差。加速度作用于传感器可移动极板,引起位移 x ,导致总的差分电容变化。电容变化值与加速度值成正比,通过测量电容引起电学量的变化,结合传感器灵敏度,即可得到所测加速度值。



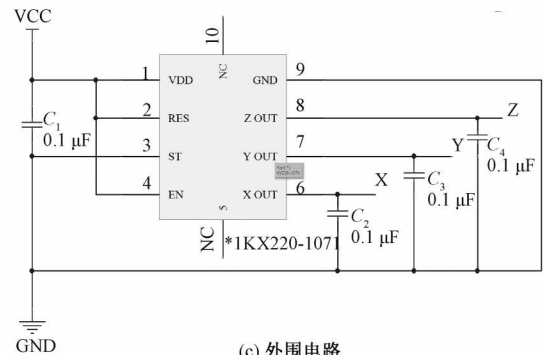
(a) 差分测量原理

(a) Differential measurement principle



(b) 加速度芯片内部电路

(b) Internal circuit of acceleration chip



(c) 外围电路

(c) Peripheral circuit

图6 三轴加速度传感器设计

Fig. 6 Design of the three-axis acceleration sensor

由于测试管路中旋涡脱落频率较高(500~2 000 Hz),为适应高频响应测量要求,同时精简检测系统,本文选用模拟式(micro electro mechanical system, MEMS)微硅加速度传感器 KX 220~1 071。芯片尺寸:3 mm×3 mm×0.9 mm,加速度测量范围:±20 g,分辨率:66 mV/g,最大带宽 X/Y:8 k, Z:5.1 k。传感器内部电路如图6(b)所

示,传感器测得的加速度信号经放大、低通滤波后,经相敏解调转换为电信号输出。传感器输出引脚及外围电路如图 6(c) 所示,三轴加速度输出端分别设置旁路电容 $C_2 \sim C_4$ 用于滤波。优化 PCB 布置和走线,优化后电路板尺寸为 $7.5\text{ mm} \times 3.4\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ 。

最后,根据探头尺寸优化结果及管路安装条件,设计了涡街探头支撑壳体,如图 7 所示,主要包括顶部固定圆盘、支撑圆柱及末端长方体。采用中空柱体结构,以减小探头对流场的影响,加速度采集电路嵌入末端长方体。实验管路为 DN15,设计探头插入管道部分长度为 7.5 mm ,探头末端位于管道中心。最后利用环氧树脂 AB 胶对探头进行封装,成品如图 7 所示。

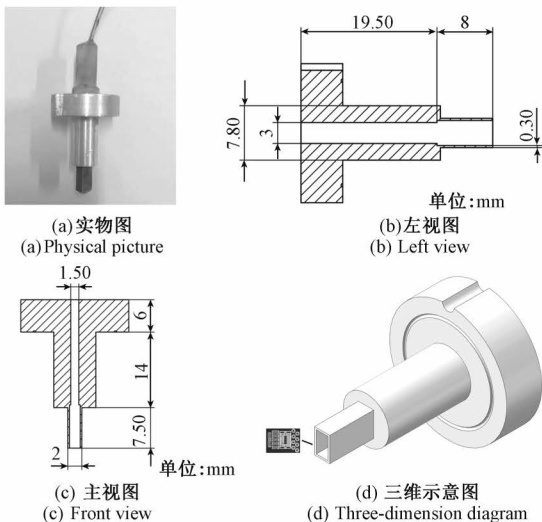


图 7 加速度探头壳体设计及实物图

Fig. 7 Shell and physical figure of the acceleration probe

2.2 环雾状流实验装置

在气液两相环雾状流实验装置上进行测试,介质为空气和水。如图 8 所示,采用雾化混合方式产生环雾状两相流型:高压水经过雾化喷嘴破碎为微米级液滴,喷入气相管路中,测试管路公称直径 $D = 15\text{ mm}$,系统主要参数如表 1 所示。气源由压缩机提供,气相标准表为涡街流量计,水路质量流量由高压隔膜式计量泵控制,输出流量特性是变频器和行程的函数,由标定柱标定得到^[21]。为得到可调、可控的气相压力和流量条件,采用电动阀 A 和 B 进行自动控制。根据阻塞流条件和相对增益分析,本文环雾状流实验工况下,压力和流量无耦合,因此分别设计了 PI 压力和流量控制器^[18]。为提高气流稳定性,设计径向叶片式(A)和多孔板式(B)流动调整器。更多详细介绍请参考文献[5,9]。

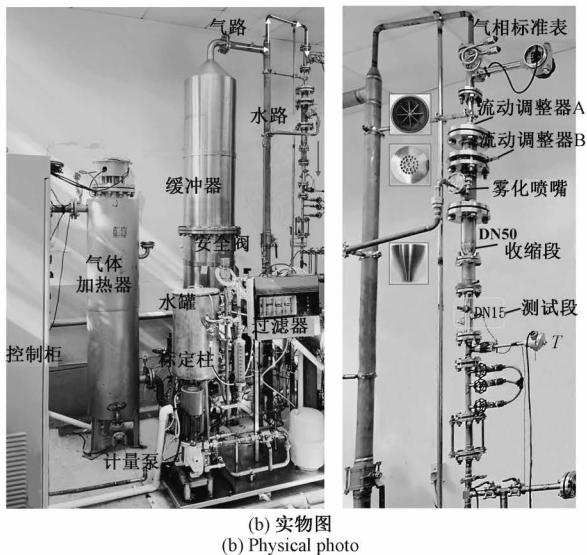
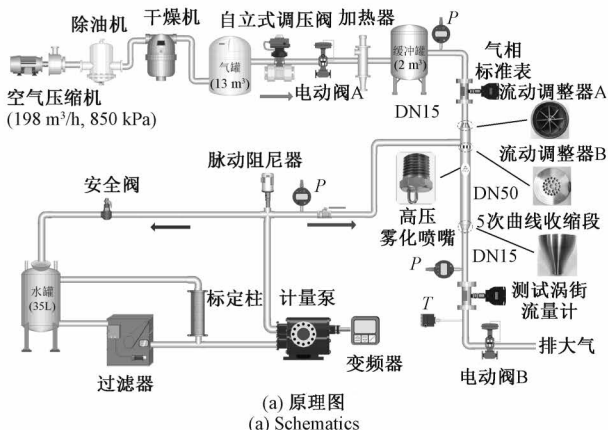


图 8 基于雾化混合的可调压湿气环雾状流实验装置
Fig. 8 Pressure-adjustable annular mist flow loop for wet gas metering test based on atomization mixing

表 1 环雾状流装置主要参数表

Table 1 Main parameters of the annular mist flow loop

参数	范围	测量精度
操作压力	100~700 kPa	0.1%
操作温度	0℃~80℃	0.2℃
气相标准表体积流量	9~25 m³·h ⁻¹	1.0%
计量泵测量液相流量	1.7~17 kg·h ⁻¹	2.0%
雾化喷嘴压力	0~9.5 MPa	1.0%

3 加速度信号分析与幅值建模

首先考察所设计加速度探头的单相测量性能。典型干气工况下三轴加速度信号如图 9 所示,采样率为 20 kHz ,采样时间 7 s 。可见,三轴均测到了较为规则的信号,其中,X 轴阻力和 Y 轴信号的频率值是 Z 轴升力频

率值的两倍,这与理论和仿真一致^[22]。Y轴为辅助测量,对于管路振动信号更加敏感,可同时利用三轴所测得频率分量的差异性,提高涡街探头的抗振性能,相关研究参见文献[17],篇幅所限本文不再展开。本文主要关注湿气分相测量,因此选取信号质量更好、强度更高的Z轴加速度信号进行单相和两相流测量。

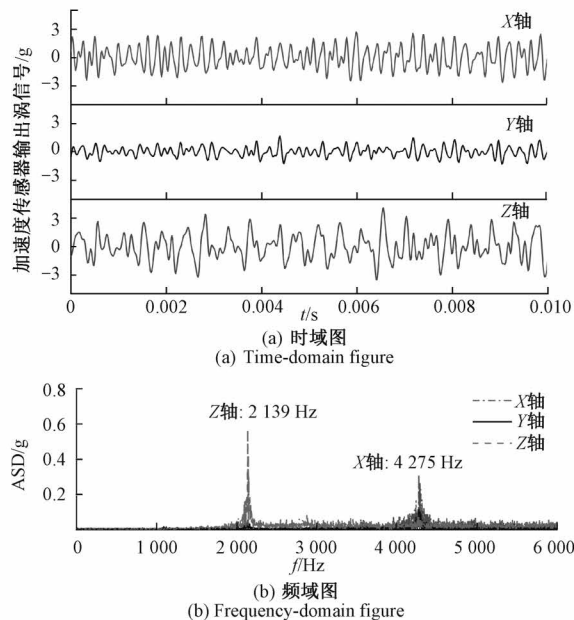


图9 干气工况加速度信号($P=400$ kPa, $Q_g=25.02$ m³·h⁻¹)

Fig. 9 Acceleration signals in dry gas
($P=400$ kPa, $Q_g=25.02$ m³·h⁻¹)

为验证所设计探头的流量测量精度,首先在不同压力和流量的干气条件下进行实验。仪表系数 K_v 随雷诺数 Re_d 的变化如图 10 所示,其中 $K_v = f_{VS}/Q_g = 4St_{0,mean}/\pi D^2 d$ 。可见,在雷诺数 $Re_d = 4.43 \times 10^4 \sim 1.81 \times 10^5$ 范围内,仪表系数近似为常数,均值 $K_{v,mean} = 3.37 \times 10^5$,偏差在 $\pm 1.0\%$ 以内,线性度为 1.06%。

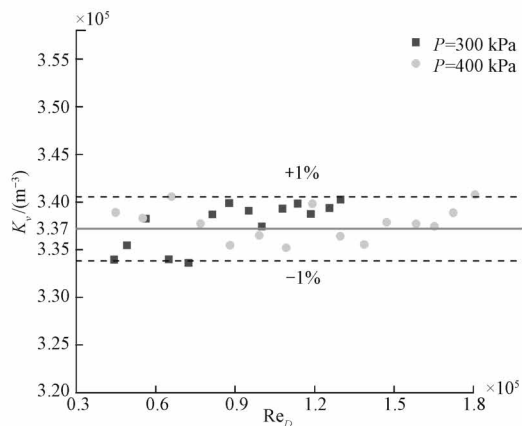


图10 干气工况下涡街仪表系数标定

Fig. 10 Calibration results for vortex meter coefficient in dry gas

为建立加速度幅值函数,首先在干气工况下进行实验,提取不同压力和流速工况下的Z轴信号时均幅值, $A = (\sum_{i=1}^N A_{max}^i - \sum_{i=1}^N A_{min}^i) / 2N$, 如图 11 所示。可见,随着流速增大,加速度幅值非线性增大,利用幂指数函数进行建模,如式(3)所示。

$$\frac{A_0}{g} = a_1 \frac{\rho_g}{\rho_{ref}} \exp\left(\frac{U_g}{U_{ref}}\right) \quad (3)$$

其中, A_0 代表干气工况下的幅值,单位为 g, $g = 9.8$ m/s² 代表重力加速度; ρ_g 为气体密度, $\rho_{ref} = 1.185$ kg/m³ 代表参考密度; U_g 为气体流速; a_1 为常数系数, U_{ref} 代表参考速度,单位为 m/s。对式(3)进行最小二乘拟合,最优拟合参数为: $a_1 = 0.002$, $U_{ref} = 10.46$ m/s, 拟合决定系数 $R^2 = 0.994$, 相对均方根误差 (relative root mean squared error, rRMSE) 为 4.374%。

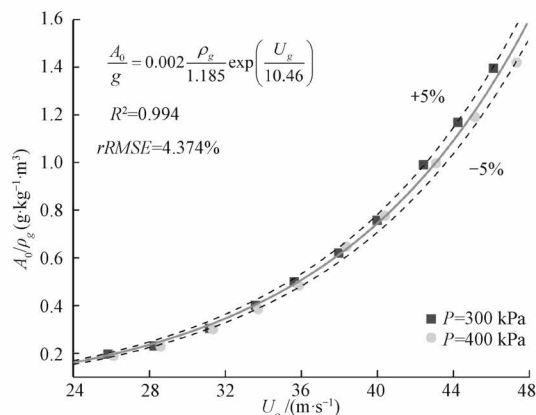
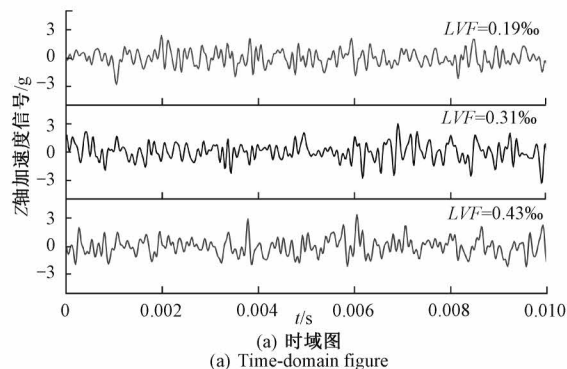


图11 干气工况时均加速度幅值拟合结果

Fig. 11 Fitting results for acceleration amplitude in dry gas

然后,为得到湿气中的探头测量特性,在不同两相工况(压力、气相流量、液相流量)下进行测试。典型载气工况(气相压力和流量固定)下不同液相含量时,Z轴升力方向加速度信号时、频域分析如图 12 所示,可见,随着液相体积含率 (liquid volume fraction, LVF) 增大,加速度幅值减小,同时频率值增大。



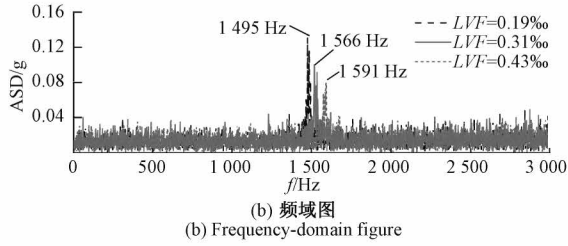


图 12 不同液相含量 Z 轴加速度信号 ($P=400$ kPa, $Q_g=18$ m³·h⁻¹)

Fig. 12 Z-axis acceleration signals on different liquid fraction conditions ($P=400$ kPa, $Q_g=18$ m³·h⁻¹)

为建立湿气工况下加速度幅值模型,提取湿气下的时均幅值 A ,利用式(3)预测相同载气(压力、流量)参数下干气的时均幅值 A_0 ,其中气相速度 U_g 用表观气速 U_{sg} 代替。计算无量纲幅值 $A^* = A/A_0$,不同载气条件下随液相流量的变化如图 13(a)所示。随着载气压力和流量的增大, A^* 均减小,同时,随着液相含量的增大, A^* 呈整体减小趋势,这是由于随着液相含量增大,涡信号幅值减弱、质量变差;除此之外, A^* 存在一定的波动现象,这主要受两相涡信号的非平稳性影响^[23-24]。环雾状两相流中,气液两相界面的形成与传质过程与惯性力和表面张力密切相关,两者的比值可以用韦伯数进行表征。做出无量纲幅值 A^* 随气相韦伯数的变化,如图 13(b)所示,其中,液相韦伯数 $We_l = \rho_l U_{sl}^2 D / \sigma$,气、液相表观流速 $U_{sg} = 4Q_g / \pi D^2$, $U_{sl} = 4Q_l / \pi D^2$, ρ_l 为液相密度, σ 为液相表面张力系数。

可见, A^* 随气相韦伯数 We_g 增大而减小,且近似呈二次曲线趋势; We_l 越大则幅值 A^* 越小。无论是 We_g 还是 We_l 增大,都会导致液相含量提高,这将导致涡街信号

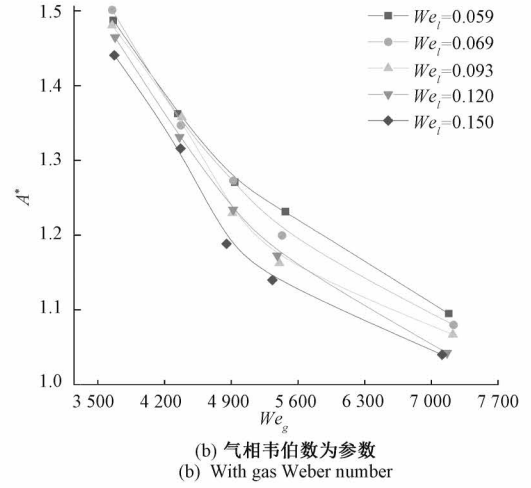
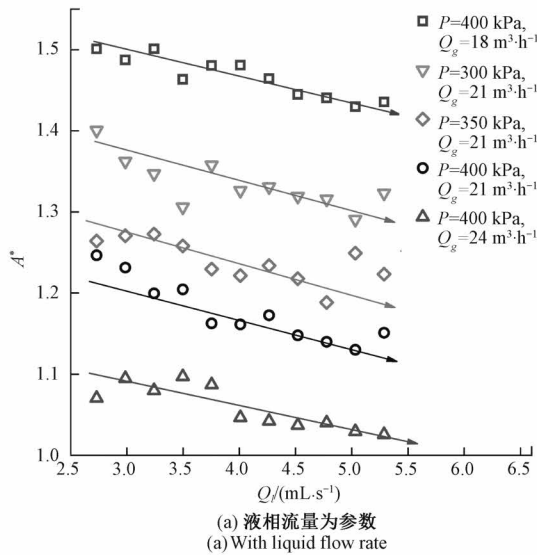


图 13 不同载气工况下无量纲加速度幅值

Fig. 13 Dimensionless mean acceleration amplitude on different carrier gas conditions

减弱,反映在涡致加速度波动信号上则为时均幅值减小。结合上述分析,利用式(4)进行建模:

$$A^* = A/A_0 = b_1 We_g^2 + b_2 We_g + b_3 + b_4 We_l \quad (4)$$

其中, $b_1 \sim b_4$ 为常数系数。利用最小二乘法对式(4)进行参数拟合,得到常数系数 $b_1 = 2.86 \times 10^{-8}$, $b_2 = -4.27 \times 10^{-4}$, $b_3 = 2.71$, $b_4 = -0.55$ 。如图 14 所示,幅值预测决定系数 $R^2 = 0.981$,相对均方根误差 $rRMSE = 1.573\%$,96.4%的点在 $\pm 3.0\%$ 以内,预测效果良好。

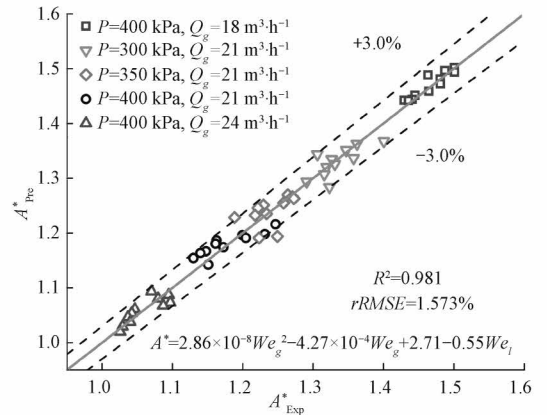


图 14 A^* 拟合值与实验值的对比

Fig. 14 Comparison of the fitting and actual values for A^*

4 基于加速度检测的湿气测量模型

本节将对涡街在湿气中的测量特性进行建模,然后结合已得到的湿气加速度幅值模型,建立湿气分相流量模型,并设计求解算法,预测湿气中气相和液相流量。

4.1 仪表过读建模

首先,根据式(1)计算涡街过读因子 OR ,做出不同载气工况下 OR 随液相韦伯数 We_l 的变化,如图 15 所示。可见,在湿气两相流中均有 $OR > 1$,这将导致湿气中气相流量示值偏高,最大将引起 8% 的测量误差,需要进行必要修正。过读因子 OR 随 We_l 增大而增大,且载气压力越高、气相流量越大,则过读因子越小。利用式(5)建立过读因子预测模型:

$$OR = 1 + cWe_g^\alpha We_l^\beta \quad (5)$$

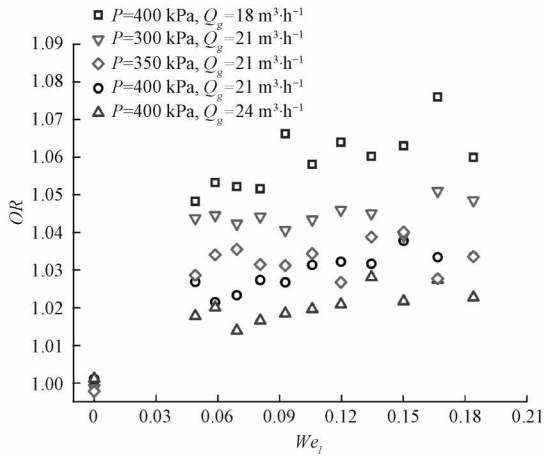


图 15 不同载气工况下涡街过读-液相韦伯数图

Fig. 15 Meter overreading versus liquid Weber number on different carrier gas conditions

根据前述定性分析,有常数系数 $c > 0$,幂指数 $\alpha < 0$, $\beta > 0$ 。利用最小二乘法进行拟合,得到最优拟合参数: $c = 1.131 \times 10^4$, $\alpha = -1.443$, $\beta = 0.1664$ 。拟合效果如图 16 所示,决定系数 $R^2 = 0.911$,相对均方根误差 $rRMSE = 0.432\%$ 。92.9% 的点在 $\pm 1.0\%$ 以内,预测效果良好。最大预测误差为 1.39%,这可能是由于测量不确定度导致的。根据误差传递原则进行估算,涡街过读的相对不确定度约为 $\pm 2.08\%$,液相质量流量测量误差约为 $\pm 2.0\%$ 。

4.2 湿气分相测量模型

为对涡街过读进行校正,同时得到气相和液相流量,联立式(4)和(5),建立以气相体积流量 Q_g 为参数的方程,如式(6)所示。

$$f(Q_g) = A^* - A/A_0 = b_1(We_g)^2 + b_2We_g + b_3 + \frac{A}{a_1\rho_g \exp(a_2U_{sg})} = 0 \quad (6)$$

根据式(5)得液相韦伯数 $We_l = [(OR - 1)/cWe_g^\alpha]^{1/\beta}$,将其连同气相韦伯数 We_g 定义、涡街过读定义式(1)、 $U_{sg} = 4Q_g/\pi D^2$ 代入式(6),整理如式(7)所示。

$$f(Q_g) = b_1K_1^2Q_g^4 + b_2K_1Q_g^2 + b_3 + \frac{b_4\left(\frac{Q_{g,apparent}/Q_g - 1}{c(K_1Q_g^2)^\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} - \frac{A}{a_1\rho_g \exp(a_2K_2Q_g)}}{a_3Q_g^2(k_1Q_g^2)^{b_3}} = 0 \quad (7)$$

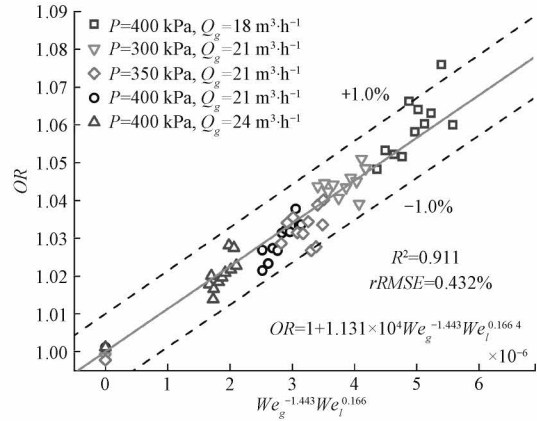


图 16 涡街过读建模结果

Fig. 16 Modelling results for meter overreading

其中, $K_1 = 16\rho_g/\sigma\pi^2D^3(\Delta\rho/\rho_g)^{1/3}$, $K_2 = 4/\pi D^2$ 。

为快速求解式(7)方程,利用牛顿迭代进行求解。构建牛顿迭代格式如式(8)所示。

$$Q_{g,n+1} = Q_{g,n} - \frac{f(Q_{g,n})}{f'(Q_{g,n})} \quad (8)$$

其中:

$$f(Q_{g,n}) = b_1K_1^2Q_{g,n}^4 + b_2K_1Q_{g,n}^2 + b_3 + b_4\left(\frac{Q_{g,apparent}/Q_{g,n} - 1}{c(K_1Q_{g,n}^2)^\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} - \frac{A}{a_1\rho_g \exp(a_2K_2Q_{g,n})} \quad (9)$$

$$f'(Q_{g,n}) = 4a_1k_1^2Q_{g,n}^3 + 2b_1k_1Q_{g,n} + \frac{b_2k_2A}{a_2\rho_g e^{b_2K_2Q_{g,n}}} +$$

$$\frac{d}{c_3}\left(\frac{Q_{g,apparent}(2b_3 + 1) - 2b_3Q_{g,n}}{a_3Q_{g,n}^2(k_1Q_{g,n}^2)^{b_3}}\right)\left(\frac{Q_{g,apparent}/Q_{g,n} - 1}{a_3(k_1Q_{g,n}^2)^{b_3}}\right)^{\frac{1}{\beta}-1} \quad (10)$$

利用式(8)中的牛顿迭代格式,给定合理初值,即可得到湿气中真实的气相体积流量 Q_g ,进而得到过读系数 OR 和气相韦伯数 We_g 。利用式(5)计算得液相韦伯数,如式(11)所示。

$$We_l = \left(\frac{OR - 1}{cWe_g^\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

利用液相韦伯数定义,即可得到液相体积流量 Q_l ,如式(12)所示。

$$Q_l = \frac{\pi D^2 U_{sl}}{4} = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{D^3 We_l \sigma}{\rho_l}} \quad (12)$$

下面详细说明湿气测量和求解过程:

1) 采集工况参数,包括压力 P 、温度 T 和传感器输出的升力方向涡街时序信号 $s(t)$;

2) 提取并计算工况参数,包括气体密度 ρ_g 、液体密度 ρ_l 和液相表面张力 σ 、加速度时均幅值 A 、涡街脱落频率 f_{vs} 以及仪表系数 K_v ;

3) 根据 $Q_{g, \text{apparent}} = 3600f_{\text{VS}}/K_e$ 计算两相中涡街流量计示值 $Q_{g, \text{apparent}}$, 作为气相体积流量的迭代初值, 即 $Q_{g, 0} = Q_{g, \text{apparent}}$;

4) 代入牛顿迭代式(8)进行求解, 判断是否满足收敛条件 $|Q_{g, n} - Q_{g, n-1}|/Q_{g, n-1} < 0.1\%$, 其中 $Q_{g, n}$ 代表本次迭代结果, $Q_{g, n-1}$ 代表上次迭代结果。若满足收敛条件, 则迭代结束; 若不满足收敛条件, 则令 $n = n+1$, 继续代入式(8)求解, 直至收敛为止;

5) 由最近一次的迭代计算结果, 得到最终的湿气中气相体积流量 Q_g , 进而得到气相表观流速 U_{sg} ; 由式(11)计算液相韦伯数, 由式(12)计算液相体积流量 Q_l 。

在本研究中, 由于迭代函数二阶导数 $f''(Q_g) \neq 0$, 且初值位于精确解附近 ($Q_{g0}/Q_g = OR < 1.1$), 符合牛顿迭代的局部收敛条件。一般情况下, 迭代 4~5 次即可收敛, 最大迭代步数为 7。

利用预测误差 (percentage error, PE)、平均预测误差 (mean percentage error, MPE) 和平均绝对预测误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 考察湿气测量模型的预测精度, 如式(13)所示, 其中下标 pre 和 exp 分别代表预测值和实验值。气相预测误差分布如图 17 所示。可见 97.4% 的预测点相对误差 PE 在 $\pm 1.0\%$ 以内, 平均预测误差 $MPE = -0.07\%$, 基本为无偏估计, 平均绝对预测误差 $MAPE = 0.34\%$ 。利用贝塞尔公式估计气相测量不确定度为 0.46%。气相测量误差由校正前的最大 8%, 降低为 $\pm 1.0\%$, 达到了很好的过读校正效果, 大大提到了湿气测量精度。

$$\begin{cases} PE(i) = \frac{X(i)_{\text{pre}} - X(i)_{\text{exp}}}{X(i)_{\text{exp}}} \times 100\% \\ MPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N PE(i) \times 100\% \\ MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [abs(PE(i))] \times 100\% \end{cases} \quad (13)$$

液相预测值与实验值的对比如图 18 所示, 92.7% 的点在 $\pm 20\%$ 以内。本研究中, 由于液相流量较小、量程比较大, 引入满量程预测误差 (full-scale percentage error, FSPE) 对液相预测效果进行评估, 如式(14)所示, FSPE 误差分布如图 19 所示。

$$FSPE(i) = \frac{X(i)_{\text{pre}} - X(i)_{\text{exp}}}{X(i)_{\text{exp}} \text{最大值}} \times 100\% \quad (14)$$

利用本文提出的湿气分相测量模型, 对于满量程预测误差 FSPE, 92.7% 的点在 $\pm 15\%$ 以内, 利用贝塞尔公式估计液相 FSPE 的测量不确定度为 10.04%, 测量精度在工程领域可接受。

本文提出的过读补偿方法适用于环雾状流型, 无需借助其他复杂的液相测量系统和方法, 理论上水平流动、竖直向下和竖直向上流动均可应用。本文实验范围

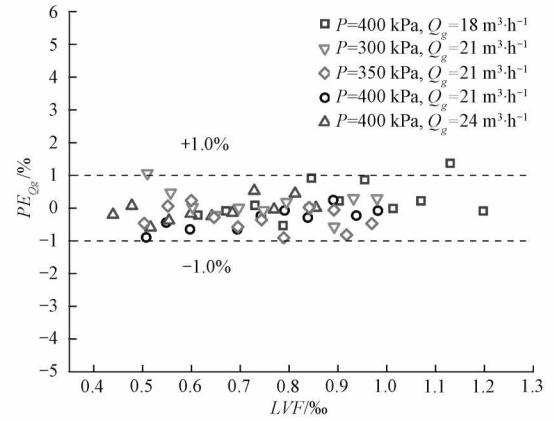


图 17 湿气中气相体积流量预测误差分布

Fig. 17 Predicted error of gas flow rate in wet gas

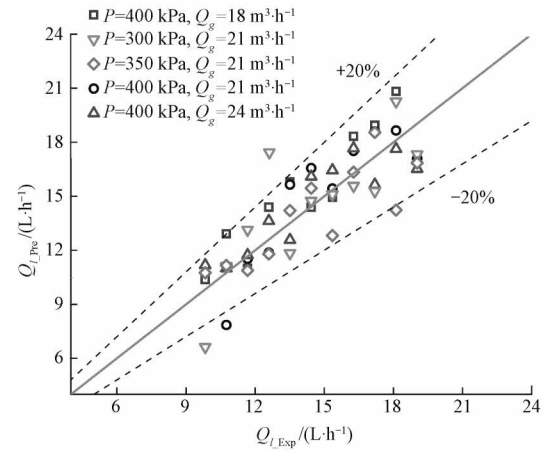


图 18 湿气中液相体积流量预测值与实验值对比
Fig. 18 Comparison of the predicted and actual liquid flow rates in wet gas

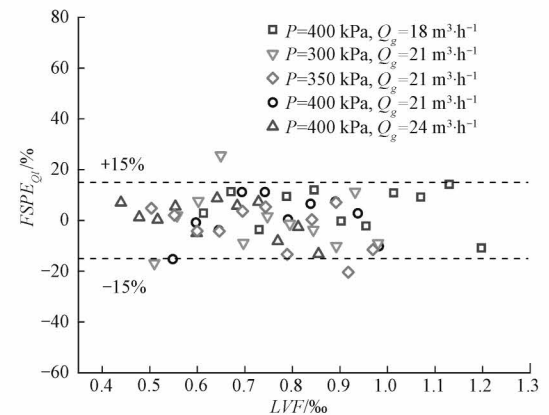


图 19 湿气中液相体积流量全量程误差分布

Fig. 19 Full-scale prediction error of liquid flow rate in wet gas

为: 常温, 压力: 300 ~ 400 kPa, 气相体积流量: $Q_g = 9 \sim 24 \text{ m}^3/\text{h}$, 液相体积含率: 0 ~ 1.2%。由于两相流动的复

杂性,当两相工况与本实验相差较大时,建议重新标定模型中的参数,以保证模型测量精度。

5 结 论

为提高涡街湿气测量精度、拓展仪表测量范围,本文提出了基于三轴加速度探头的涡街湿气流分量流量测量模型。设计了基于 MEMS 技术的抗振型三轴加速度式涡街探头,并对芯片选型、探头尺寸和封装进行了优化。在不同干气和湿气工况下进行测试,分析了加速度时均幅值和涡街过读因子随两相工况的变化规律,并建立了幅值和过读模型。最后,结合加速度幅值特性对涡街过读进行校正,建立了湿气测量模型。主要结论如下:

1) 所设计的三轴加速度式涡街探头,可以用于干气工况和湿气工况下的涡街信号测量,具有稳健、频响高、多方向测量、抗振等优点;

2) 随着液相含量增大,加速度幅值减小,涡街过读增大;随着载气压力和流量的增大,加速度幅值和涡街过读均减小;

3) 以气液相韦伯数为参数建立的加速度幅值和涡街过读模型预测效果良好,幅值相对误差在 $\pm 3.0\%$ 以内,过读相对误差在 $\pm 1.0\%$ 以内;

4) 结合加速度幅值建模结果进行涡街过读补偿,可实现湿气流中气相流量的准确测量,预测误差在 $\pm 1.0\%$ 以内,不确定度 0.46% ,同时可实现液相流量的预测,全量程预测误差在 $\pm 15\%$ 以内,不确定度 10.04% 。

参考文献

- [1] 贺登辉,陈森林,白博峰. 基于 V 锥流量计压损比的湿气流相流量在线检测[J]. 仪器仪表学报,2018, 39(7): 235-244.
HE D H, CHEN S L, BAI B F. Online measurement of liquid flow rate in wet gas based on pressure loss ratio of V-cone flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 235-244.
- [2] 林宗虎. 气液两相流与沸腾传热[M]. 西安:西安交通大学出版社,2004.
LIN Z H. Gas and liquid two-phase flow and boiling heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 2004.
- [3] ISA, Dualstream 2 advanced [C]. Topside, Solartron, 2014.
- [4] AGAR J, FARCHY D. Wet gas metering using dissimilar flow sensors: Theory and field trial results [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2002: 1-6.
- [5] LI J, WANG C, DING H, et al. EMD and spectrum-centrobaric-correction-based analysis of vortex street characteristics in annular mist flow of wet gas[J], IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 37(5): 1150-1160.
- [6] STEVEN R. Wet gas metering[D]. University of Strathclyde, 2001.
- [7] STEWART D. The evaluation of dry gas meters in wet gas conditions [J]. National Engineering Laboratory, London, 2002, 33: 58.
- [8] JIA Y, KONG D. A study on measurement uncertainty of a vortex flow meter in discrete liquid phase [C]. Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2012, 346: 593-599.
- [9] LI J, WANG C, DING H, et al. A new overreading model for wet gas vortex metering based on vorticity transport mechanism [J]. Measurement, 2020, 162: 107884.
- [10] 李金霞,丁红兵,王超,等. 基于液滴参数检测的涡街湿气过读预测模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(4): 815-824.
LI J X, DING H B, WANG CH, et al. A new overreading model for wet gas vortex metering considering entrained droplet flow parameters[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(4): 815-824.
- [11] ASME. Wet gas flowmetering guideline: ASME MFC-19G-2008 [S]. American Society of Mechanical Engineers, USA, 2008.
- [12] WANG C, LI J, DING H, et al. Vortex flowmeter with enhanced turndown ratio based on high-frequency pressure sensors and improved convection velocity estimation[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 69: 101626.
- [13] LYLE J H, PITT C W. Vortex shedding fluid flowmeter using optical fibre sensor[J]. Electronics Letters, 1981, 17 (6): 244-245.
- [14] TU J, MIAU J, WANG Y, et al. Studying three-dimensionality of vortex shedding behind a circular cylinder with MEMS sensors [J]. Journal of Mech, 2007, 23 (2): 107-116.
- [15] BERA S, RAY J, CHATTOPADHYAY S. A modified inductive pick-up type technique of measurement in a vortex flowmeter [J]. Measurement, 2004, 35 (1): 19-24.
- [16] ZYLK P, MODRZYNSKI P, JANUS P. Vortex anemometer using MEMS cantilever sensor[J]. Journal

- of Microelectromechanical Systems, 2010, 19 (6): 1485-1489.
- [17] SUN H, GENG F, YU T, et al. Anti-vibration analysis of vortex probe based on three-axis acceleration measurement [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2017: 21-30.
- [18] SUN H, ZHANG W, DING H, et al. Measurement of vortex flowmeter using tri-axis acceleration probe based on multi-parameter adjustable mist flow loop[C]. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2020: 1-6.
- [19] 李金霞, 肖志利. 基于加速度幅值建模的涡街湿气流量测量方法[P]. CN202210319304.9, 2022.
- LI J X, XIAO ZH L. Wet gas vortex metering method based on acceleration amplitude[P]. CN202210319304.9, 2022.
- [20] 李霄. 基于加速度测量的涡街探头设计与实现[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- LI X. Design and implementation of vortex probe based on measurement of acceleration [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [21] WANG C, ZHANG Z, DING H, et al. Measurement property of vortex flowmeter in wet gas flow using mist flow apparatus[C]. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2018: 1-6.
- [22] LI J, WANG C, DING H. Characteristics of vortex flowmeter in vapor-liquid mist flow [C]. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2018: 1-6.
- [23] LI J, WANG C, DING H, et al. Online measurement of wet gas by modeling frequency and amplitude characteristics of a vortex flowmeter [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(6): 3666-3678.
- [24] LI J, WANG C, DING H, et al. Dynamics of particle-laden wake flow in a karman vortex street considering the droplet-vortex interactions [J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2022, 15(3): 857-872.

作者简介



李金霞, 2012 年于华北电力大学(保定)获得学士学位, 2020 年于天津大学获得硕士和博士学位, 现为中国民航大学讲师, 主要研究方向为湿气两相流测量、流体能源俘获技术。

E-mail: jx_li@cauc.edu.cn

Li Jinxia received her B.Sc. degree from North China Electric Power University (Baoding) in 2012, and received her M.Sc. and Ph.D. degree both from Tianjin University in 2020. She is currently a lecturer at Civil Aviation University of China. Her main research interests include wet gas metering and fluid energy harvesting.



孙宏军(通信作者), 分别于 2000 年和 2007 年于天津大学获得硕士和博士学位, 现为天津大学副教授, 主要研究方向为流体参数检测与数值模拟。

E-mail: sunhongjun@tju.edu.cn

Sun Hongjun (Corresponding author) received her M.Sc. and Ph.D. degrees both from Tianjin University in 2000 and 2007, respectively. She is currently an associate professor at Tianjin University. Her main research interests include fluid parameters detection and numerical simulation.