

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615104

基于涡街-扰动波高双模检测的湿气流量测量*

李金霞¹, 俞英豪¹, 丁红兵², 孙宏军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:针对两相涡街湿气测量中出现的过读问题,提出了一种基于涡街-扰动波高双模检测的过读校正与湿气流相流量在线测量方法。首先,基于电导法构建了环形液膜参数测量传感器,并完成了等效优化设计与标定。随后,在基于雾化混合的可调压湿气环雾状流实验装置上展开了实流试验,为确保低含量液相下流型的稳定演化,混合段顶部同轴安装了撞针式 PJ10 高压雾化水喷嘴。试验覆盖了多种载气工况和液相流量。通过对液膜厚度信号应用双阈值法区分扰动波与纹波,提取出扰动波高并进行了交叉验证。选取气相韦伯数和液相雷诺数作为表征气相高速剪切与液膜黏性耗散的无量纲参数,分别建立了扰动波高和涡街过读因子的参数关联式。最后,提出了一种基于迭代方法求解的湿气流相流量测量模型,并设定迭代收敛阈值为 0.1%,本算法在数次迭代内即可迅速实现收敛。结果表明,经校正后气相体积流量的最大误差由 12.1% 降至 $\pm 1.0\%$ 以内,预测不确定度为 0.61%;对于液相体积流量,全量程百分比误差 96.2% 的测试点控制在 $\pm 15\%$ 以内,预测不确定度为 6.52%。本模型深入利用环雾状流的内部流动信息(扰动波高)进行过读校正,克服了传统方法的局限性,具有建模简单、在线监测实时性好的优点。

关键词: 湿气; 涡街流量计; 仪表过读; 扰动波高; 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

Wet gas flow measurement based on vortex-street and disturbance wave height dual-mode detection

Li Jinxia¹, Yu Yinghao¹, Ding Hongbing², Sun Hongjun²

(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 severe overreading issue in two-phase vortex-street wet gas measurement, this paper proposes an overreading correction and online phase flow measurement method for wet gas based on the dual-mode detection of vortex shedding and disturbance wave height. First, a ring-shaped liquid film parameter sensor was constructed based on the conductance method, followed by an equivalent optimization design and calibration. Subsequently, full-scale flow experiments were conducted on an adjustable-pressure wet gas annular-mist flow test rig based on atomization mixing. To ensure the stable evolution of the flow pattern under extremely low liquid hold-up conditions, an impingement-type PJ10 high-pressure atomizing nozzle was coaxially installed at the top of the mixing section. The experiments covered a wide range of carrier gas conditions and liquid flow rates. By applying a dual-threshold method to the liquid film thickness signals to distinguish disturbance waves from ripples, the disturbance wave height was accurately extracted and cross-validated. The gas-phase Weber number and liquid-phase Reynolds number were selected as the dimensionless parameters characterizing the high-speed gas shear and the viscous dissipation of the liquid film, respectively, to establish correlation equations for the disturbance wave height and the vortex overreading factor. Finally, a wet gas phase flow measurement model based on an iterative solution approach was proposed, with the iteration convergence threshold set to 0.1%. This algorithm achieves rapid and stable convergence within only a few iterations. The results demonstrate that, after correction, the maximum error of the gas-phase volume flow rate is reduced from 12.1% to within $\pm 1.0\%$, with a prediction uncertainty of 0.61%. For the liquid-phase volume flow rate, 96.2% of the test points are

收稿日期: 2026-04-03 Received Date: 2026-04-03

* 基金项目: 国家自然科学基金(62373270)、国家自然科学基金(52276159)、中央高校基本科研业务费(3122025062)项目资助

controlled within a full scale percentage error of $\pm 15\%$, with a prediction uncertainty of 6.52%. By deeply utilizing the internal flow information (disturbance wave height) of the annular-mist flow for overreading correction, the proposed model overcomes the limitations of traditional methods and offers the significant advantages of simple modeling and excellent real-time performance for online monitoring.

Keywords: wet gas; vortex flowmeter; instrument overreading; disturbance wave height; flow measurement

0 引言

工业领域中广泛存在气液两相流动工况。当气相占据绝对主导地位,即气相体积分数(gas volume fraction, GVF)高于95%,且洛马参数处于较低区间(小于0.3)时,通常将此类流动称为湿气。典型应用场景包括油气田开发过程中的凝析气井以及热力系统中的湿蒸汽循环^[1]。湿气两相流参数的准确测量在能源领域具有重要的理论意义和工程价值^[2]。在油气田开发过程中,该类测量结果直接关系到油藏动态分析的可靠性以及生产优化策略的制定;在长距离管道输送中,精确计量是实现贸易交接公平性的关键;同时,对气液两相流参数的实时监测对于保障流动安全、预防事故也具有重要作用。

在湿气计量技术的发展过程中,早期主要依赖分离式测量装置,但由于其体积庞大、运行维护成本高,逐渐难以满足工程应用需求。随着测量技术的不断进步,非分离式在线测量方法因结构紧凑、响应迅速等优势,逐渐成为研究与应用的焦点。目前,旋进旋涡流量计^[3]、V锥流量计^[4]以及超声流量计^[5]等均已在工程实践中取得一定进展。涡街流量计因具有良好的稳定性和通用互换性,且可通过优化结构设计进一步提升测量特性^[6],在湿气测量领域展现出较大应用潜力。然而,在两相流条件下,气液界面的剧烈波动会改变流体绕流发生体所产生的流体诱导振动特性^[7],且夹带液滴会对旋涡脱落过程产生干扰,使得气相流量测量结果普遍高于真实值,这一现象通常称为“过读”(overreading)。因此,提高涡街流量计在湿气工况下的测量精度,关键在于对过读误差进行有效修正与补偿。根据补偿思路的不同,现有过读修正方法大致可分为3类。

第1类是将涡街流量计与其他流量计结合,如涡街+V锥流量计^[8]、涡街+孔板流量计^[9]等,然而,由于使用两种不同的流量计导致模型十分复杂,且存在成本高、结构不紧凑的问题。

第2类方法是利用涡街流量计的附加信息进行过读校正,如涡街幅值^[10-11],但该方法存在两方面技术挑战,一方面涡街附加信息受多相流工况参数(如含水率、含气率等)影响,导致系统需进行多参数校准,另一方面,涡街附加信息的特征提取复杂,如需借助时频分析方法^[12],对硬件性能要求苛刻,难以满足实时性的测量需求。

第3类方法是将涡街流量计与相含量(或液相流量)测量方法相结合。在环雾状两相流中,由于液相流量非常小,直接测量液相流量存在显著的测量不确定性,其反馈的数据常会导致过度校准,反而会放大系统的整体误差,而且传统的高端探测技术(如射线、微波等)受限于其实施成本与架构复杂性,在工程实际中缺乏在线监测的普适性^[13]。

在环雾状两相流中,液相以离散液滴和管壁液膜的形式存在。近年来,基于电学层析成像与多界面传感融合技术在两相流界面检测与流型辨识中得到了广泛应用^[14-15],表明液膜信息便于在线准确获取;同时,多传感器信息融合技术在多相流分相流量测量中也展现出了显著优势^[16]。

因此,使用液膜的流动特性修正过读误差,不仅能显著简化数学模型的构建过程,还能确保测量系统的高鲁棒性。Sun等^[17]开发了一种基于涡街与电导检测的双模态系统,其核心逻辑在于构建液膜平均厚度与气液两相特性间的函数关系。通过将该关系式与过读预测模型耦合,可实现对过读因子及液相流量的解耦计算,该方案的修正精度可达 $\pm 1.5\%$ 。Li等^[18]将涡街流量计与扰动波频率相结合,提出了一种新的分段快速傅里叶变换-连续小波变换(fast Fourier transform-continuous wavelet transform, FFT-CWT)涡街频率提取方法,并利用扰动波频信息对涡街过读进行修正,但扰动波具有随机性,其频率提取的不确定度较高。除扰动波频外,扰动波的高度也是重要的液膜界面波动信息。

本文基于涡街-电导液膜传感器双模测量,提出基于涡街-扰动波高的湿気分相流量测量方法,分析涡街频率和扰动波高与两相流动参数之间的规律,分别建立扰动波高与涡街过读的关联式,利用迭代算法开发了一套湿气流量测量模型,最后评估并分析本模型的预测精度。

1 基于涡街-扰动波高的湿气流量测量

图1展示了所设计的双模态传感系统,该装置通过集成电导环液膜传感模块与涡街流量测量模块,实现了对两相流参数的同步获取。环雾状流中液相分为夹带液滴与管壁液膜两部分,通过内壁双电极获取液膜厚度信号 $\delta(t)$ 。液膜表面的扰动波主导界面传递过程。垂直流向布置的旋涡发生体诱导卡门涡街效应,压电传感器采集涡街信号 $s(t)$ 并提取涡脱落频率 f_{vs} 。

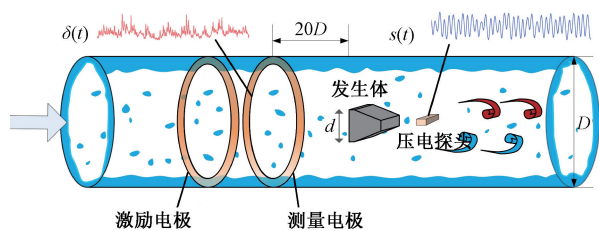


图1 涡街-电导双模测量系统

Fig. 1 Vortex-conductance dual-mode measurement system

根据卡门涡街原理,在单相干气流动条件下,若雷诺数处于仪表的线性响应区间,则 f_{vs} 与介质平均流速 U 满足线性正相关规律。但是在环雾状湿气两相流的状态下,由于液相的存在,在对湿气进行测量时,气相体积分量的预测数值会出现偏高的状况,这进而使得涡街流量计产生“过读”问题,而过读因子 OR 可以通过式(1)表示:

$$OR = \frac{Q_{g,apparent}}{Q_g} \quad (1)$$

式中: Q_g 为气相体积流量; $Q_{g,apparent}$ 为气相体积流量表观示值。

湿气两相流中液相的介入导致气相测量产生过读误差并使扰动波高发生变化。本文确立了一种基于界面扰动波形态特征的误差补偿方法,核心逻辑在于表征过读系数与扰动波高的函数关系,并使用迭代算法完成气相流量与液相流量的在线测量。该技术路线涵盖了特征提取、建模与预测3个环节,如图2所示。

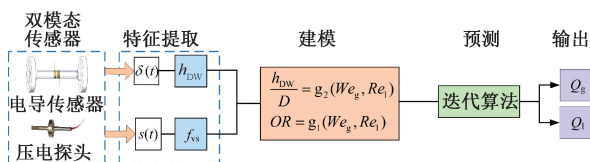


图2 涡街频率-扰动波高双模湿气测量模型

Fig. 2 Dual-mode wet gas measurement model based on vortex frequency and disturbance wave height

2 实验装置与测量技术

针对液膜流动信息的提取需求,本文构建了电导环式液膜传感器。本章论述逻辑为:首先详述传感器的结构设计方案,其次介绍环雾状流测试平台的硬件组成,最后对原始信号的采集机制与特征提取算法进行讨论。

2.1 电导环液膜传感系统

在液膜特性表征领域,电导探测技术凭借其流程精简与工程易实施性而得到广泛应用。采用平齐嵌入布局的电极结构,能有效维持流场的原始形态并最小化对流场的扰动,在薄液膜量测工况下展现出优异的兼容性。

因此,本研究开发了电导环液膜传感器,并构建了基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)的激励与信号捕获系统。

为抑制因直流电场诱导而产生的界面极化干扰,本系统采用交流激励模式执行数据采集任务。参考图3(a)所示的阻抗等效拓扑架构,测点间的阻抗 $Z(w)$ 表现为被测流体电导率相关的电阻 R 、反映流体介电常数的电容 C_d 以及因电极表面极化现象产生的寄生电容 C_p 的复合函数,如式(2)所示。

$$Z(\omega) = \left(\frac{1}{R + 1/i\omega C_p} + i\omega C_d \right)^{-1} \quad (2)$$

式中: ω 为激励信号的角频率。作为液膜参数传感器,需要利用其电导特性。为确保被测流体呈现出稳定的电导属性并改善液膜监测的线性响应,本研究依托COMSOL仿真平台,针对传感器的几何尺寸及激励频率参数执行了优化设计,得到最优结构为:电极间距 $s=5$ mm,电极宽度 $w=1$ mm,详见文献[17]。此时流体电阻 $R = \kappa s / \pi D \delta$,其中, κ 为液体电导率, s 为电极间的距离, δ 为液膜厚度。电导传感器实物图如图3(b)所示。

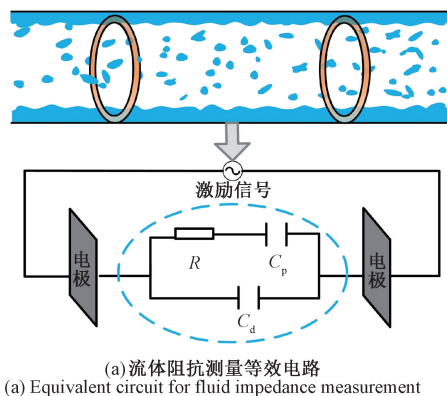
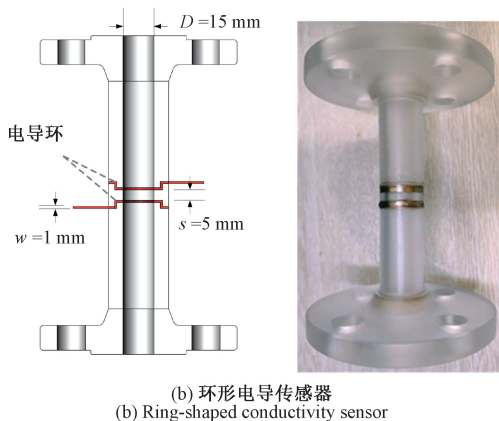
(a) 流体阻抗测量等效电路
(a) Equivalent circuit for fluid impedance measurement(b) 环形电导传感器
(b) Ring-shaped conductivity sensor

图3 环形电导传感器及其等效电路

Fig. 3 Ring-shaped conductance sensor and equivalent Circuit

液膜参数测量系统的构成如图4所示,主要由FPGA、信号处理电路、电极连接装置及电导环构成。该

测量系统的核心控制器件为 FPGA,其工作原理如下:系统依托高速数模转换(digital-to-analog, DA)单元与调理电路,将 500 kHz 的正弦电压施加于激励端。在高频激励下,电极间的液膜容抗被显著削弱,测量回路整体呈现

受电阻主导的特性。负载感应出的电流信号经 IV 放大及模数转换后进入 FPGA。最终利用解调算法从数字序列中提取关键波形信息,并将表征液膜波动的特征参量上传至上位机以执行可视化实时监测。

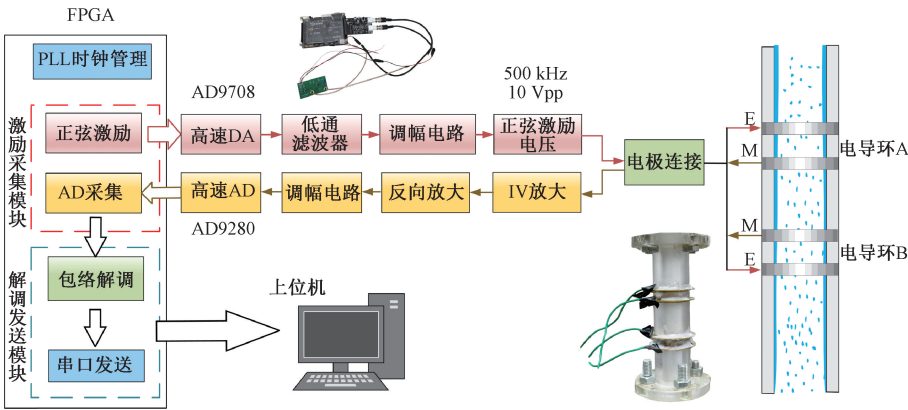


图 4 液膜参数测量系统

Fig. 4 Liquid film parameter measurement system

标定装置实物图如图 5(a) 所示,结果如图 5(b) 所示。本次电导传感器的标定实验在恒温环境(25℃)下完成。标定所用标准液体的电导率为 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$,动力粘度为 $0.89\times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。标定结果表明,液膜厚度与标定

数据呈显著线性正相关,且决定系数 $R^2=0.9912$ 拟合效果较好,数据点高度贴近拟合直线,标定误差为 $\pm 3\%$,误差指标较小,反映出测量系统对标定液膜厚度具有较高的准确性与可靠性。在实际工业应用中,由于地层水含盐量、杂质及温度的波动。如果水的含盐量或杂质与本文的标定液体差异较大,需要对传感器进行重新标定。

2.2 环雾状流实验装置

为满足对环雾状流的涡街测量特性研究,本研究研制了一套可调节压力的实验平台(其物理架构与关键参数分别见表 1 与图 6)。该装置采用内径 $D=15 \text{ mm}$ 的测试管路,以水和压缩空气为流动介质。在系统构成上,其通过 6 个协同工作的单元来实现实验功能:气相与液相模块分别承担介质的稳定输送与供给,气液两相的均匀混合则由专门的雾化段完成。电导环测量段与两相涡街测量段分别承担关键测量功能,可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)控制系统则对装置运行进行自动化调控。

表 1 环雾状流装置主要参数表			
Table 1 Main parameters of the annular mist flow experimental setup			
参数	范围	单位	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	m^3/h	1.0%
计量泵测量液相流量	1.7~17	kg/h	2.0%
雾化喷嘴压力	0~9.5	MPa	1.0%

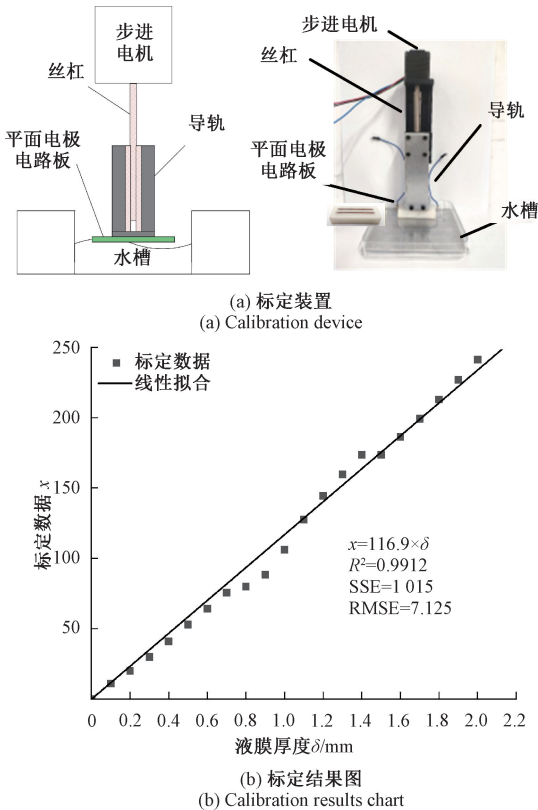


图 5 所设计的标定装置及标定结果

Fig. 5 The designed calibration setup and calibration results

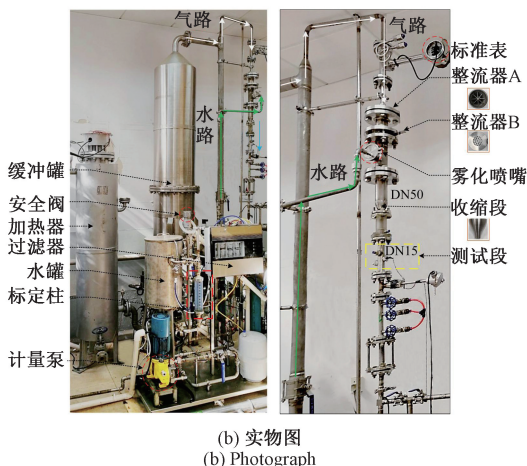
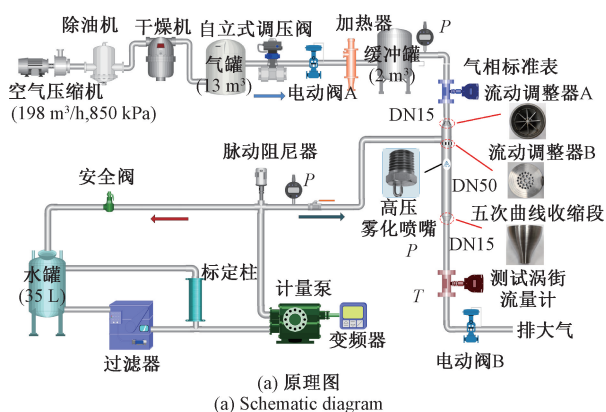


图6 基于雾化混合的可调压湿气环雾状流实验装置

Fig. 6 Adjustable-pressure wet gas annular-mist flow experimental setup based on atomization mixing

气相模块采用空气压缩机供气,配置 $\pm 1\%$ 精度涡街流量计用于气相流量计量,结合缓冲罐稳压及标准表标定。为确保低液相含量下环雾状流的稳定,本实验装置的气液混合段配备了撞针式PJ10高压雾化水喷嘴,该型号喷嘴的喷嘴孔径为0.254 mm,能够喷出微米级粒径的液滴,喷射角度为 90° ,将其安装于气液混合段的气流入口端,液膜特征参量则通过电导环探头进行非侵入式测量。为优化压力与气相流量的动态响应,系统采用西门子S7-200 PLC作为底层硬件,并嵌入了模糊比例积分微分控制器,从而显著提升了实验过程的自动化调节精度,稳态误差优于0.3%。实验数据采集要求管压、气液流量波动 $\leq 1\%$,确保两相流动稳定性。

2.3 信号采集与特征提取

在典型湿气流动工况下,图7给出了涡旋脱落信号在时域内的波动特征及其对应的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)功率谱分布。

针对液膜波动中扰动波特征参数的提取,本文采用了Berto提出的双阈值判别方法^[19],用于识别扰动波并提取扰动波高 h_{DW} 。该方法通过设置两个相互独立的判

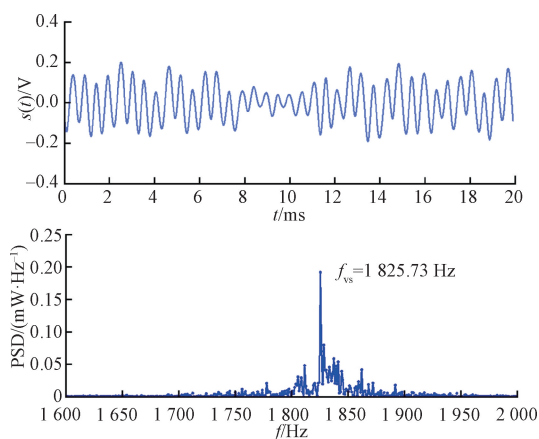


图7 涡旋脱落信号时域和频域分析

Fig. 7 Time-domain and frequency-domain analysis of vortex shedding signals

据,实现对抗扰动波与纹波的有效区分,从而减小纹波对抗扰动波识别结果的干扰。扰动波需同时满足以下条件:相邻波峰间距大于最小峰距离(minimum peak distance, MPD),且波高超过最小峰高度(minimum peak height, MPH)。在实际数据处理中,通过多次对比与调整参数,当相邻两个波峰的时间间隔小于0.162个采样周期时,将其视为同一扰动波并进行合并处理。

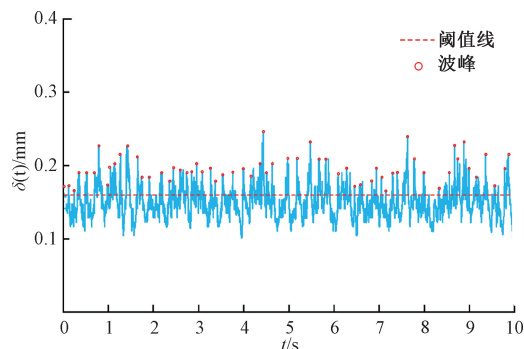
MPH阈值 h_{MPH} 则通过式(3)计算。

$$h_{MPH} = \delta_{\text{mean}} + o \quad (3)$$

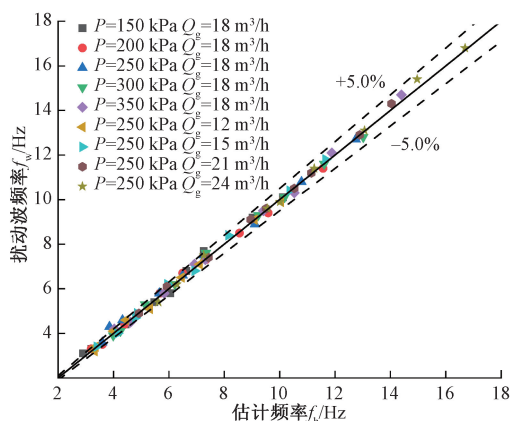
式中: δ_{mean} 为液膜的平均厚度; o 为液膜厚度时间轨迹的标准方差。

图8(a)给出了双阈值方法对液膜波动信号进行处理后的波峰识别结果。其中,虚线表示当前工况对应的MPH阈值,圆圈则为识别得到的特征波峰,可以较直观地反映扰动波峰的分布情况。

为验证阈值选取的合理性,采用特征波峰统计方法计算扰动波频率 f_n ,并与基于FFT得到的频域结果 f_w 进行对比,结果如图8(b)所示。统计分析表明,95.1%的数据点相对误差控制在 $\pm 5.0\%$ 以内,说明该方法能够较



(a) 标注扰动波峰的液膜波动
(a) Highlighting liquid film fluctuation of disturbance wave crests



(b) 扰动波频率与估计频率结果对比
(b) Comparison between disturbance wave frequency and estimated frequency

图8 扰动波高识别及验证

Fig. 8 Disturbance wave height identification and validation

为可靠地表征扰动波特征,并保证后续扰动波高提取的准确性。

3 湿气测量模型与分析

3.1 扰动波高建模

尺度参数的选取主要是基于扰动波的形成机制。在环雾状流中,扰动波的形成是由于高速气相剪切力使壁面与气液界面之间液膜内部存在强速度梯度,液膜自身也会因粘性剪切失稳^[20]。气相韦伯数 We_g 表征气相惯性力与液相表面张力之比,液相雷诺数表征液相惯性力与黏性力之比,这两个参数可以一定程度下反映扰动波的形成过程。

为研究扰动波高的变化规律,绘制在不同载气压力 P 与 Q_g 条件下, h_{DW} 随 Re_1 变化的关系曲线,其中 $Re_1 = \rho_l U_{sl} D / \mu_l$, U_{sl} 为液相表观流速, ρ_l 为液体密度, μ_l 为液体动力粘度。如图9所示,随着 Re_1 的增大, h_{DW} 呈增长趋势; h_{DW} 随着载气压力与气相体积流量的增大而减小,引入 $We_g = \rho_g U_{sg}^2 D [(\rho_l - \rho_g) / \rho_g]^{0.25} / \sigma$, 其中 U_{sg} 为气相表观流速, ρ_g 为气体密度, σ 为液相表面张力,可见 h_{DW} 随着 We_g 的增大而减小。因此, h_{DW} 与 Re_1 呈正相关,与 We_g 呈负相关。

将 Re_1 与 We_g 作为自变量,采用幂函数形式对涡街过读进行回归拟合,其表达式见式(4):

$$\frac{h_{DW}}{D} = k_1 We_g^{n_1} Re_1^{n_2} \quad (4)$$

式中: k_1 为常数项; n_1 和 n_2 为幂指数参数。采用最小二乘法对数据进行回归分析,得到 $k_1 = 0.105$, $n_1 = -0.53$, $n_2 = 0.58$,其符号特征与前述定性判断相符。拟合结果

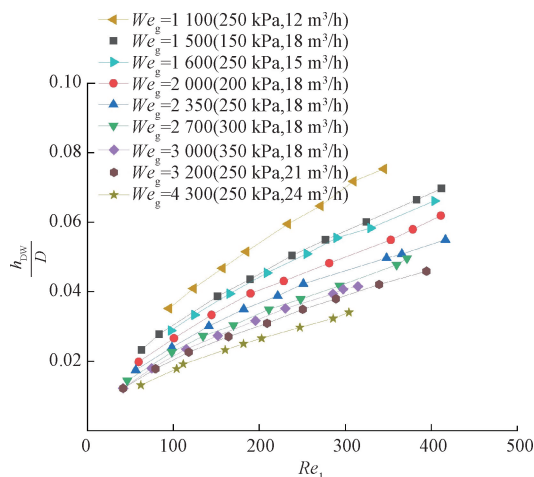


图9 扰动波高-液相雷诺数

Fig. 9 Disturbance wave height liquid-phase Reynolds number

如图10所示,预测偏差基本控制在 $\pm 10\%$ 以内。根据式(5)计算,相对均方根误差 rRMSE 为 6.65%, 决定系数 R^2 达到 0.975,说明基于式(4)建立的 h_{DW} 关联式具有较好的准确性和可靠性。

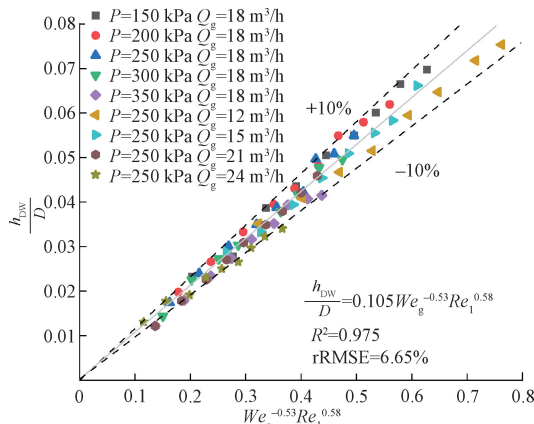


图10 扰动波高预测结果

Fig. 10 Disturbance wave height prediction results

$$rRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n-1}} \bigg/ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (5)$$

式中: y_i 代表拟合值; x_i 代表真实值。

3.2 过读因子建模

为研究涡街流量计的过读特性,在不同 P 和 Q_g 条件下,绘制 OR 随 Re_1 的变化关系,如图11所示。结果表明,随着 Re_1 的增加, OR 整体呈上升趋势;而当 P 和 Q_g 增大时, OR 则有所减小。基于此,引入 We_g ,可以发现 OR 随 We_g 的增大而逐渐降低。分析可知, OR 与 Re_1 呈正相关关系,而与 We_g 呈负相关。

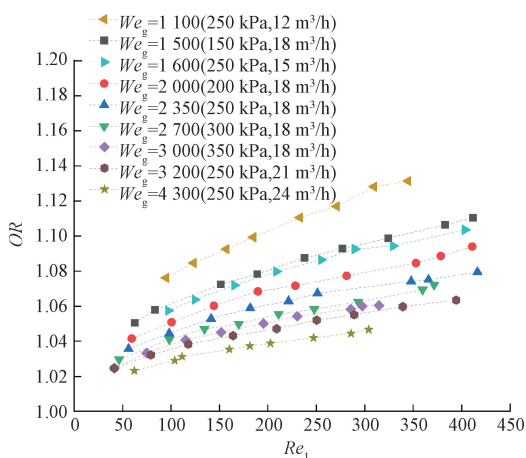


图 11 涡街过读-液相雷诺数

Fig. 11 Vortex street overreading versus liquid-phase Reynolds number

将 Re_l 与 We_g 作为自变量,采用幂函数形式对扰动波高进行回归拟合,其表达式见式(6):

$$OR = 1 + k_2 We_g^{n_3} Re_l^{n_4} \quad (6)$$

式中: k_2 为常数项; n_3 、 n_4 为幂指数参数。通过最小二乘法回归分析得到 $k_2 = 1.94$, $n_3 = -0.65$, $n_4 = 0.36$, 其符号特征与前文的定性分析结果相吻合。拟合结果如图 12 所示,预测误差控制在 $\pm 1\%$ 范围内;依据式(5)计算可得相对均方根误差 $rRMSE = 0.54\%$, 决定系数 $R^2 = 0.952$, 表明式(6)对 OR 的拟合具有较好的准确性与可靠性。

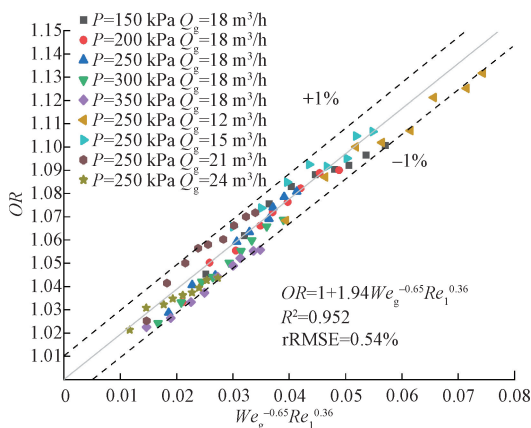


图 12 涡街过读预测结果

Fig. 12 Vortex street overreading prediction results

3.3 湿气测量模型与预测结果

基于所建立的涡街过读与扰动波高关联模型,采用迭代求解方法对湿气中气相与液相流量进行预测,其测量算法的具体实现流程为:

1) 采集 P 、载气温度 T 、 $\delta(t)$ 和 $s(t)$, 并计算 ρ_g 、 ρ_l 、 σ 和 μ_l , 提取 f_{vs} 和 h_{DW} ;

2) 计算 $Q_{g, \text{apparent}} = 3600 f_{vs} / K_v$, K_v 为涡街流量计在单相气体中的仪表系数 ($K_v = 336\ 574.54\ m^{-3}$), 将其作为气相流量的迭代初值, 即 $Q_g = Q_{g, \text{apparent}}$;

3) 根据 Q_g 计算对应的 U_{sg} , 再计算 We_g , 代入式(4)计算 Re_l , 代入式(6)计算新的 We_g , 再次代入式(4)进行迭代计算;

4) 当满足收敛条件为 $|Q_{g, n} - Q_{g, n-1}| / Q_{g, n-1} < 0.1\%$ 且迭代次数达到上限 20 次, 则迭代结束; 否则, 则跳到步骤 3), 重复进行步骤 3)~4) 的迭代计算, 直至迭代收敛;

5) 令最后一次迭代结果为气相流量预测值, 重新计算出 U_{sg} 与 We_g , 最后利用式(4)计算 Re_l , 求得液相体积流量 $Q_l = \pi D Re_l \mu_l / 4 \rho_l$ 。

为了评估迭代算法在线测量的实时性, 本文提取了不同液相含量的数据, 即液相体积分数 (liquid volume fraction, LVF) 范围为 $0.1\% \sim 1.1\%$, 分析了其中 5 组典型工况下的算法收敛过程, 相对残差随迭代次数的变化曲线如图 13 所示, 仅需 2~3 次迭代即可达到收敛阈值。在实际中, 由于管道剧烈振动等原因, 可能会产生异常信号, 设定 20 次迭代限制, 可以防止本模型因异常初值导致进入死循环。

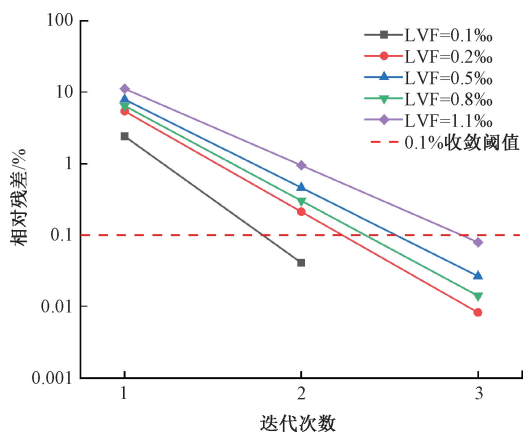


图 13 不同液相含量下相对残差随迭代次数的变化

Fig. 13 Variation of relative residual with iteration number under different liquid volume fractions

图 14 对比了气相流量真实值与预测值的偏差, 并探讨了气相体积流量受 LVF 及气液密度比 ρ_g / ρ_l 的规律。

图 15 和 16 分别绘制了湿气中气相体积分数的百分比误差 (percentage error, PE) 和液相体积分数的全量程百分比误差 (full scale percentage error, FSPE) 分布, 误差计算如式(7)所示, 其中 pre 表示预测值, exp 表示真实值。预测不确定度计算如式(8)所示, 对于气相体积分数的预测, 92.4% 的测试点在 $\pm 1.0\%$ 以内, 预测不确定度为 0.61%, 基本达到了干气测量的精度水平。对于液相体积分数的预测, 全量程百分比误差 96.2% 的测试点在 $\pm 15\%$

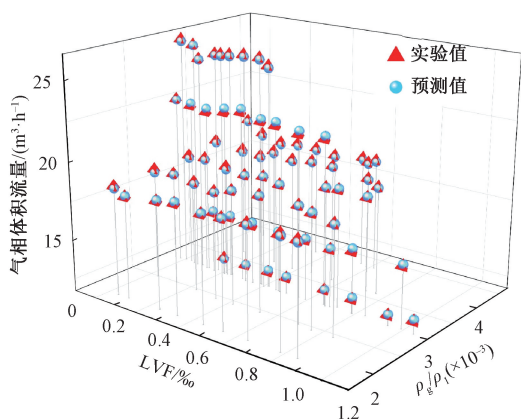


图14 气相流量实验值与预测值的对比关系

Fig. 14 Comparison between measured and predicted gas phase flow rates

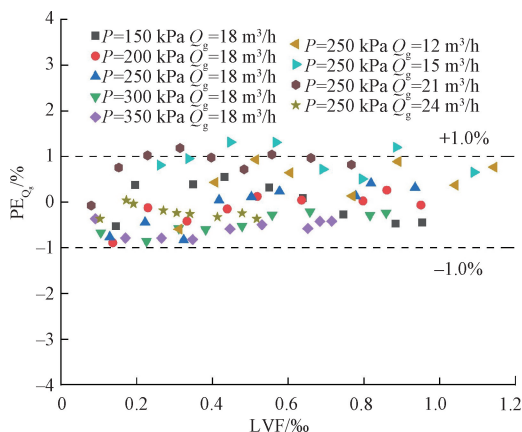


图15 气相流量预测误差分布

Fig. 15 Gas-phase flow rate prediction error distribution

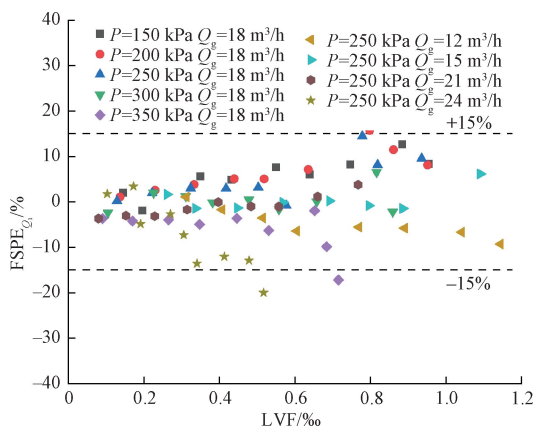


图16 液相流量预测误差分布

Fig. 16 Liquid-phase flow rate prediction error distribution

次,液滴和液膜在流动过程中进行动量交换。

$$\begin{cases} PE_{Q_g} = \frac{Q_g(i)_{pre} - Q_g(i)_{exp}}{Q_g(i)_{exp}} \times 100\% \\ FSPE_{Q_l} = \frac{Q_l(i)_{pre} - Q_l(i)_{exp}}{\max[Q_l(i)_{exp}]} \times 100\% \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Uncertainty_{Q_g} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (PE_{Q_g})^2} \\ Uncertainty_{Q_l} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (FSPE_{Q_l})^2} \end{cases} \quad (8)$$

本模型主要针对气相占据绝对主导地位的环雾状流工况。当GVF逐渐降低,到达流型转变区时,液膜厚度增加,扰动波形态复杂,扰动波高不稳定,会导致扰动波高的提取结果不稳定,对模型的预测结果有影响。

4 结 论

针对两相涡街湿气测量中的过读问题,本文构建了一种融合涡街信号与扰动波高特征的双模态检测模型。主要研究结论包括:

1) 涡街过读和扰动波高均随液相雷诺数增大而增大,随气相韦伯数增大而减小;

2) 以液相雷诺数和气相韦伯数为参数建立的涡街过读模型预测效果良好,预测误差在 $\pm 1\%$ 以内,相对均方根为0.54%;扰动波高模型预测误差在 $\pm 10\%$ 以内,相对均方根为6.65%;

3) 利用扰动波高特征对涡街过读现象进行修正,能够实现湿气中气相流量的高精度测量,气相预测误差92.4%的测试点在 $\pm 1.0\%$ 以内,预测不确定度0.61%;液相全量程百分比误差96.2%的测试点在 $\pm 15\%$ 以内,预测不确定度为6.52%。

参考文献

- [1] Ding H B, Chai X T, Song X Y, et al. Asym-metrical morphological evolution and energy conversion of droplets impacting on the moving film[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(2): 022025.
- [2] Salehi S M, Lao L Y, Xing L C, et al. Devices and methods for wet gas flow metering: A comprehensive review[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2024, 96: 102518.
- [3] Xu Y, Zhang Y M, Yuan C, et al. Wet gas two-phase flow measurement of swirl flowmeter based on synchrosqueezed wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72:

以内,预测不确定度为6.52%。液相预测不确定度相对较高主要是由于液相含量较低,易受流场扰动干扰。其

- 6505809.
- [4] 贺登辉, 陈森林, 白博峰. 基于 V 锥流量计压损比的湿气液相流量在线检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 235-244.
- He Denghui, Chen Senlin, Bai Bofeng. 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.
- [5] Xu Y, Yu P N, Zhu Z C, et al. Over-reading modeling of the ultrasonic flow meter in wet gas measurement[J]. Measurement, 2017, 98: 17-24.
- [6] 吴奕瑶, 谢代梁, 刘铁军, 等. 微小口径涡街流量计设计与测量特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(9): 244-252.
- Wu Yiyao, Xie Dailiang, Liu Tiejun, et al. Research on design and measurement characteristics of micro-bore vortex flowmeter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(9): 244-252.
- [7] Cioncolini A, Nabawy M R A, Li Hao, et al. Axial-flow-induced vibration studies on cantilever rods for nuclear reactor applications: A summary of recent research[J]. Instrumentation, 2025, 12(4): 78-86.
- [8] Sanford E, Igarashi K, Steven R. A hybrid wet gas meter design for marginal fields[C]//18th International Flow Measurement Conference: FLOMEKO 2019, 2020: 496-505.
- [9] Zhang J J, Li J. A novel method for wet gas flow measurements based on an over-reading principle[J]. Fluid Dynamics and Materials Processing, 2022, 19(2): 303-313.
- [10] Li J X, Wang C, Ding H B, 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.
- [11] 李金霞, 丁红兵, 孙宏军, 等. 基于三轴加速度探头的涡街湿气分相流量测量[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 17-27.
- Li Jinxia, Ding Hongbing, Sun Hongjun, et al. Gas and liquid flow measurement by vortex metering in wet gas based on three-axis acceleration probe [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 17-27.
- [12] Li J X, Yu Y H, Sun H J, et al. Wet gas flow measurement based on the instantaneous frequency stability of vortex meter using CWT ridge method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2026, 75: 1-10.
- [13] Hall A, Steven R. A discussion on vortex meter technologies with wet gas flows[C]// Proceedings of 7th South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop, 2008: 1-20.
- [14] 宋震, 吕忠蕾, 麦洋. 基于平面电容的油水多界面检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 178-187.
- Song Zhen, Lyu Zhonglei, Mai Yang. Study on detection method of oil-water multi-interface based on planar capacitance[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 178-187.
- [15] 马敏, 李继伟, 曾田. 基于双通道混合网络融合支持向量机的电容层析成像流型辨识[J]. 电子测量技术, 2022, 45(4): 153-159.
- Ma Min, Li Jiwei, Zeng Tian. Flow pattern identification of electrical capacitance tomography based on dual-channel hybrid network fusion support vector machine [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(4): 153-159.
- [16] 赵宁, 温佳祺, 李金硕, 等. 段塞流分相流量的多传感器信息融合测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(9): 176-183.
- Zhao Ning, Wen Jiaqi, Li Jinshuo, et al. Flowrate measurement model for plug flow based on multi-sensor information fusion[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(9): 176-183.
- [17] Sun H J, Yang T Y, Ding H B, et al. Online measurement of gas and liquid flow rates in wet gas using vortex flowmeter coupled with conductance ring sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 7500414.
- [18] Li J X, Ding H B, Sun H J, et al. Wet gas flow metering by combining a vortex flowmeter with disturbance wave frequency[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(2): 025301.
- [19] Berto A, Lavieille P, Azzolin M, et al. Liquid film thickness and heat transfer measurements during downflow condensation inside a small diameter tube[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2021, 140: 103649.

[20] Azzopardi B J. Drops in annular two-phase flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1997, 23(7): 1-53.

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 in 2012, received her M. Sc. and Ph. D. degree 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.



俞英豪, 2024 年于中国民航大学获得学士学位, 现为中国民航大学电子信息与自动化学院控制科学与工程专业硕士生。主要研究方向为两相流检测与测量。

E-mail: 2024021059@cauc.edu.cn

Yu Yinghao received his B. Sc. degree from Civil Aviation University of China in 2024. He is currently pursuing his M. Sc. degree in control science and engineering at the College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China. His main research interests include two-phase flow detection and measurement.



丁红兵, 分别于 2009 年、2011 年和 2014 年获得了天津大学学士、硕士和博士学位, 现为天津大学副教授。主要研究方向包括多相流测量与数值模拟、超音速分离与计量技术和 AI 智能环控大数据分析。

E-mail: hbding@tju.edu.cn

Ding Hongbing received his B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from Tianjin University in 2009, 2011, and 2014, respectively. He is currently an associate professor with Tianjin University. His main research interests include multiphase flow measurement and numerical simulation, supersonic separation and metrology technology, and AI-based environmental control big data analysis.



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. degree from Tianjin University in 2000 and 2007, now she is an associate professor at Tianjin University. Her main research interests include fluid parameters detection and numerical simulation.