

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413019

基于涡街频率-扰动波频双模检测的湿气流量测量*

李金霞¹, 吴逸蒙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过读问题,提出基于涡街-扰动波频双模检测的过读校正与湿气流量在线测量方法。基于电导法构建了环形液膜参数测量传感器,分别设计了激励模块、采集模块、解调模块和上位机,考虑传感器的灵敏度和线性度对激励频率、电极宽度、电极间距等参数进行了优化设计。在环雾状流实验装置上进行了不同载气工况(气相流量和压力)和液相含量下的实流试验,分析了涡街过读和扰动波频随两相工况的变化。最后,建立了涡街过读与扰动波斯特劳哈儿数和气相韦伯数之间的关联式,结合牛顿迭代算法建立了湿气在线测量模型。预测结果表明,97.5%的流量点湿气测量误差在 $\pm 1.5\%$ 以内,不确定度0.75%。与未进行过读校正的最大误差12.1%相比,湿气测量精度大大提升。模型利用扰动波频信息进行过读校正,无需进行液膜厚度标定,对介质导电性要求低,且标定系数少,因此模型适用性和拓展性可得到有效提升。

关键词: 湿气两相流; 涡街流量计; 扰动波频; 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

Wet gas metering based on dual-modality measurements by using frequencies of vortex shedding and disturbance wave

Li Jinxia¹, Wu Yimeng¹, 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: Aiming at the overreading problem of vortex wet gas metering, a new overreading correction and wet gas flow measurement method based on vortex meter-disturbance wave frequency dual-modality detection system were proposed. The conductance ring sensor was developed to obtain the liquid film flow parameters, the excitation module, acquisition module, demodulation module, and host computer program were designed, respectively. The sensor's sensitivity and linearity were enhanced through the optimization of parameters such as excitation frequency, electrode width, and electrode spacing. The real flow tests were conducted on various carried gas conditions (gas flowrate and pressure) and liquid loading conditions, analyzing how vortex over-reading and disturbance wave frequency change with different two-phase conditions. Finally, the meter overreading equation was established with disturbance wave Strouhal number and gas Weber number, and the wet gas measurement model was developed combined with Newton iteration algorithm. The model gives a prediction error of gas flow within $\pm 1.5\%$ (97.5% confidence interval) with uncertainty of 0.75%. Compared with the error up to 12.1% before overreading correction, the accuracy of wet gas metering is largely improved. The model utilizes the disturbance wave frequency for meter overreading correction without the need for liquid film thickness calibration, due to the low requirement for medium conductivity and fewer calibrated coefficients, thus enhancing the model's applicability and scalability effectively.

Keywords: wet gas two-phase flow; vortex flowmeter; disturbance wave frequency; meter overreading; flow measurement

0 引言

湿气两相流广泛存在于工业过程中,如携带少量液

体的凝析天然气、稠油热采中向油井注入的湿蒸汽等,通常指气相体积含量大于95%或者洛马参数小于0.3的气液两相流^[1],其中环雾状流是最常见的流型。湿气两相流的准确计量对于能源开采与安全生产、运输贸易和能

源保护都至关重要,其主要关注湿气中气相流量的在线准确计量^[2]。

与传统的体积庞大、设备昂贵的相分离方法相比,利用传统单相流量计进行非分离的在线测量方法,受到越来越多的关注,如旋进涡流流量计^[3]、V锥流量计^[4]、超声流量计^[5]等。其中,涡街流量计由于压损小、安装方便、互换性强、运行稳健等优点,被越来越多地应用到湿气两相流测量中。然而,湿气中的少量液相会引起气相测量示值偏高,引起测量过读(overreading, OR)问题。为了提高涡街湿气测量精度,近年来研究者提出了不同的过读校正方法。研究者提出了不同的涡街过读关联式,如Stewart^[6]的OR-洛马参数关联式, Jia等^[7]的OR-体积含液率关联式,李金霞等^[8]的OR-(气相韦伯数、液相质量加载量、斯托克斯数)关联式,尽管形式不同,但均与液相流量有关。要对涡街过读进行校正,必须已知液相含量信息。根据采用涡街过读校正方法不同分为3类。

第1类方法是直接测量液相含量,通过建立涡街过读与液相含量的关联式,进而进行过读校正。然而,受限于成本、测量环境、复杂度等,传统的微波法、射线法、等速采样法等液相测量方法难以推广使用^[9],最重要的是,对于微小液相流量,其测量精度难以保证,极有可能造成校正过度,引起更大的测量误差。

第2类方法是利用涡街流量计的附加信息进行过读校正, Li等^[10]基于压电探头信号的幅值建模结果进行校正,校正精度为 $\pm 1.5\%$,由于信号幅值随液相含量呈饱和趋势,一定程度限制了模型的测量区间。李金霞等^[11]基于三轴加速度探头的幅值建模结果进行校正,校正精度为 $\pm 1.0\%$,由于信号幅值和涡街过读受多个湿气工况参数影响,待标定系数较多。王超等^[12]利用瞬时脊频率的波动信息进行过读校正,其线性度好、建模简单,由于脊频率的提取需要借助时频分析方法(如小波变换、短时傅里叶变换等),对硬件要求较高、实时性难以保证。

第3类方法是利用其他两相流动信息(如液膜厚度、液膜波动频率等)进行过读校正,建模简单且测量可靠性高。Sun等^[13]基于涡街-电导双模测量系统,通过建立液膜平均厚度与气液相参数的关联式,并与过读公式联立求解,间接得到过读因子和液相流量,从而进行过读校正,校正精度达到 $\pm 1.5\%$,但其预测精度依赖于液膜厚度标定结果,对介质电导率要求较高、应用场合受限。与液膜厚度不同,液膜波动信息(液膜扰动波的频率,简称扰动波频)无需标定,对介质电导率要求低,因此可以适应不同介质的湿气流量测量需求。李金霞等^[14]提出了一种结合扰动波频的涡街过读校正与湿气测量方法,可以实现分相流量测量(气、液相测量精度分别为 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 15\%$),其分别建立了涡街过读和扰动波频公式后联立

求解,待标定系数较多,模型可拓展性可能受限。实际上,大部分湿气测量工况主要关注湿气中气相的测量精度,如果直接建立涡街过读和扰动波频的关联公式,模型形式将简化、待定系数减少,这有利于实现湿气流量的在线稳健测量。

本文基于涡街流量计-电导环液膜传感器进行双模测量,综合分析涡街频率和扰动波频信息之间的关联性,建立涡街过读与扰动波斯特劳哈尔数之间的关联式,提出基于牛顿迭代算法的湿气流量测量模型,并详细评估了模型的预测精度。

1 基于涡街-扰动波频的湿气流量测量

双模态传感器系统如图1所示,主要由电导环液膜传感器和涡街流量计组成。在环形雾流中,液相一部分以夹带液滴形式跟随气芯高速流动,一部分以液膜形式在管壁上低速流动。通过在管壁内侧布置两个环形电极,利用液膜的电导特性得到液膜厚度序列 $\delta(t)$ 。在本文实验条件下,液膜表面的波为相干扰动波,其决定气-液界面的动量和质量传递,其波动频率一般称为扰动波频 f_w 。在测量管路中垂直流体流动方向插入一个旋涡发生体,当流体绕过发生体后引起旋涡脱落,在发生体后方的两侧交替产生互相平行的两列旋涡。利用发生体后方的压电探头检测涡街信号 $s(t)$,进而提取涡脱落频率 f_{vs} (涡街频率)。

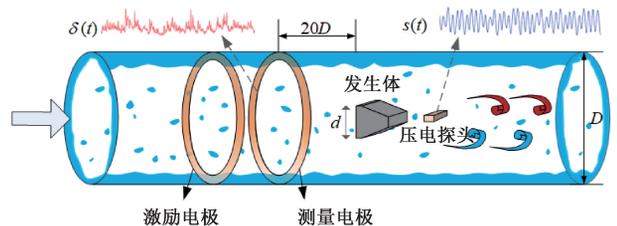


图1 涡街-电导双模测量系统

Fig. 1 Conductance-vortex meter dual-modality system

根据卡门涡街原理,对于干气流动,在一定雷诺数范围内(仪表的线性区间)涡街频率 f_{vs} 与来流平均流速 U 成正比,即无量纲频率斯特劳哈尔数 $St_0 = f_{vs} d/U$ 可视为常数(通常误差在 $\pm 1\%$ 以内),其中, d 为发生体的迎流面宽度。然而,在环雾状湿气两相流中,由于液相的加入两相斯特劳哈尔数 $St = f_{vs} d/U_{sg}$ (下标 sg 为表观气速)大于单相中的斯特劳哈尔数 St_0 ,引起湿气测量中气相体积流量预测偏高,从而导致涡街流量计的“过读”(overreading)问题,过读因子OR如式(1):

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

式中: Q_g 和 $Q_{g,apparent}$ 分别为湿气中气相体积流量实际值和表观示值; $St_{0,mean}$ 代表干气工况下仪表线性雷诺数范围内的平均斯特劳哈尔数。

在湿气两相流中,液相的加载不仅引起气相测量过读问题,还会引起扰动波频率 f_w 的改变,因此,可以利用扰动波频率信息进行涡街过读校正。通过建立不同湿气两相工况下涡街过读 OR 与扰动波频 f_w 之间关系式,就可以建立湿气流量测量模型,结合迭代算法即可求解涡街过读系数 OR,从而实现过读校正和湿气在线测量,如图 2 所示,主要包括:特征提取、分析建模和流量预测 3 个步骤。

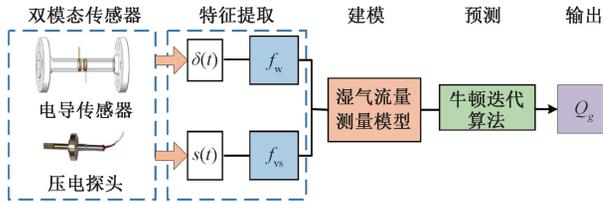


图 2 涡街频率-扰动波频双模湿气测量模型

Fig. 2 Wet gas flow measurement model based on frequencies of vortex street and disturbance wave

2 实验装置与测量技术

为获得液膜流动参数,构建了电导环液膜传感器并进行了优化设计。本节首先介绍液膜传感器的设计,然后介绍两相流测试用的环雾状流实验装置。

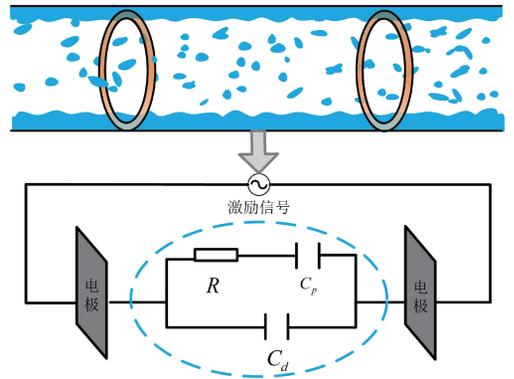
2.1 电导环液膜传感系统

电导法因操作简便、测量简便等优势被广泛应用于液膜参数测量的领域中,其中,嵌入式电极具有非侵入式、对流场干扰小的优势,更适合于薄液膜的测量环境,因此,基于电导法研制了环形液膜传感器,基于 FPGA 设计了激励采集系统,并对电极的激励频率和几何尺寸进行了优化设计。

为避免直流激励引起的极化问题,采用交流方式进行电流激励如图 3 所示。流体阻抗等效电路如图 3(a)所示,由两个电极组成,其中 R 为反映被测流体电导率的电阻, C_d 为反映流体介电常数的电容, C_p 为电极附近极化引起的寄生电容。被测流体在两个电极之间的阻抗 $Z(\omega)$ 可以表示为:

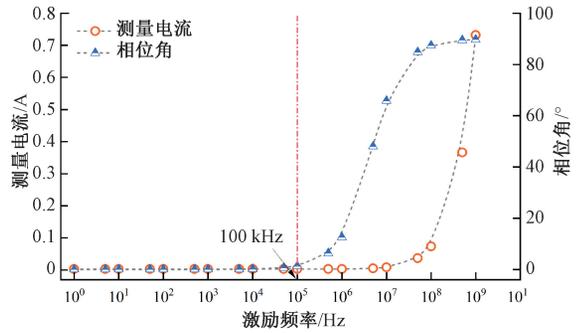
$$Z(\omega) = \left(\frac{1}{R + 1/i\omega C_p} + i\omega C_d \right)^{-1} \quad (2)$$

其中, i 为虚单位, ω 为激励信号的角频率。作为液膜参数传感器,希望利用其电导特性,为了提高液膜测量的线性度,需要减少寄生电容的影响并确保被测量流体呈现电导特性。为了对激励频率进行优化,利用



(a) 流体阻抗测量等效电路

(a) Equivalent circuit for fluid impedance measurement



(b) 不同激励频率下的响应

(b) Response at different excitation frequency

图 3 基于流体阻抗等效的电导激励频率优化

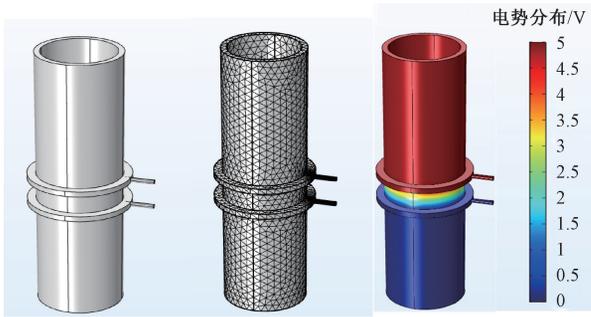
Fig. 3 Optimized excitation frequency based on the fluid impedance equivalent for the conductance ring sensor

COMSOL 软件进行数值仿真,分析测量信号随激励频率的变化,如图 3(b)所示,发现随着激励频率的增大,阻抗特性逐渐从阻性变为容性,当激励频率小 100 kHz 时,流体的容性(C_d 参数)可忽略,流体阻抗可近似为纯电导特性;同时,为消除电极老化引起寄生电容 C_p 的影响,激励频率一般不能太小(一般大于 10 Hz)^[15]。综上,选择激励频率为 100 kHz。

结合上述分析,将电导环进行电路等效后,此时流体电阻为 $R = \sigma_l s / \pi D \delta$,其中, σ_l 为液体电导率, s 为电极间的距离, δ 为液膜厚度。为了测量液膜厚度,在两个电极上输入有效值 I 的交流恒流源激励,可以得到液膜厚度与测量电极之间的电压 V 的关系式,如式(3)所示:

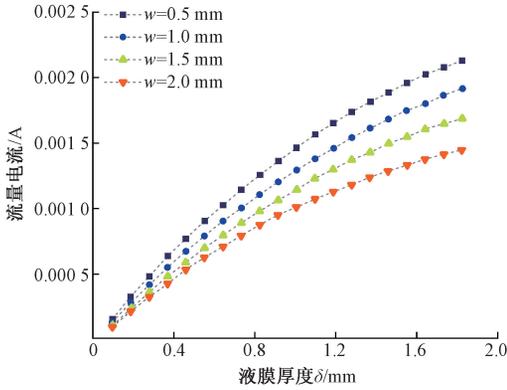
$$\delta = \frac{I}{V \pi D \sigma_l} s \quad (3)$$

为了提高传感器的灵敏度和线性度,在液膜厚度 50~2 000 μm 范围内对电极宽度 w 和电极间距离 s 进行了优化设计,如图 4 所示。由图 4(b),电极宽度越大,则电流越大,液膜测量的线性度越好,对液膜厚度变化更加敏感;但电极宽度 w 越大,空间分辨率变差,对液膜测量的波动不敏感。综合考虑,选取电极宽度 $w = 1 \text{ mm}$ 。由



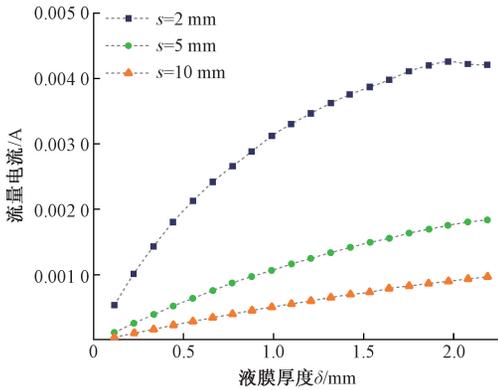
(a) COMSOL 3D模型、网格划分、电势分布

(a) COMSOL 3D model、meshing、potential distribution



(b) 电极宽度 w 的影响

(b) Influence of electrode width w



(c) 电极间距 s 的影响

(c) Influence of electrode spacing s

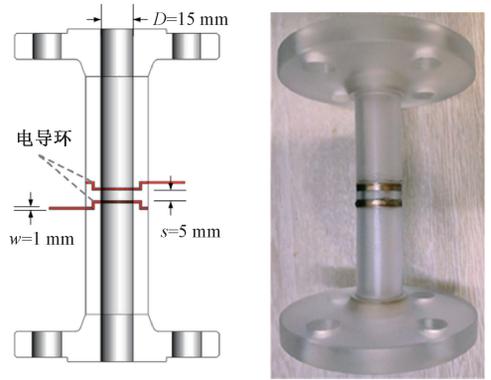
图4 电极参数优化结果图

Fig. 4 Optimization results for electrode parameters

图4(c), 电极间距 s 越大, 测量曲线的线性度越好, 可测饱和液膜厚度越大, 但是测量电流会越小, 信号容易受到干扰难以测量, 综合考虑选取电极间距 $s = 5$ mm。传感器实物图如图5所示。

2.2 环雾状流实验装置

为进行环雾状涡街测量特性实验研究, 设计了基于雾化混合的可调压环雾状流实验装置, 如图6所示, 其主要参数如表1所示, 测试段公称直径 $D = 15$ mm, 介质为压缩空气和水。整个环雾状流装置由6个模块组成,



(a) 示意图

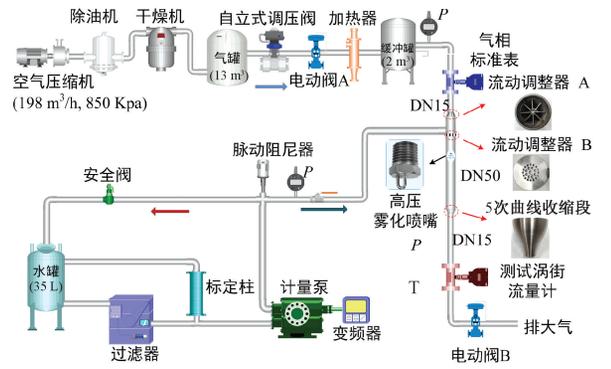
(a) Diagram picture

(b) 实物图

(a) Physical picture

图5 所设计的环形电导传感器

Fig. 5 The designed ring conductance sensor



(a) 原理图

(a) Diagram picture



(b) 实物图

(b) Physical picture

图6 基于雾化混合的可调压湿气环雾状流实验装置

Fig. 6 Pressure-adjustable annular mist flow loop for wet gas metering test based on atomization mixing

分别是气相模块、液相模块、雾化混合段、电导环测量段、两相涡街测量段、PLC 控制系统。

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	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%

在气相模块中,气源由空气压缩机提供,由气相涡街表(精度可达±1%)来进行测量,经缓冲罐可进一步稳压。气体体积流量通过标准表测量,在液相模块中,为提高液滴含量、便于控制液滴直径,将水雾化为微米级小液滴后与气相混合,通过高压冲击针式的喷嘴雾化以形成环雾状流型。采用电导环传感器来测量环雾状流中的液膜流动参数。PLC 控制系统是采用西门子的 S7-200 PLC 来控制工况参数,以压力和气相流量为主控制变量设计了模糊 PID 控制器,其稳态控制误差均在 0.3% 以内,可满足稳态测量要求,详见文献[16]。所有数据均在管压、气相流量和液相压力稳定(波动小于 1%)后进行采集,以保证两相工况的相对稳定。

信号采集流程如图 7 所示。为采集涡信号,在发生体后方 1D 处安装压电探头,经过电荷放大和电压放大后,经过频率范围为 200~2 500 Hz 的带通滤波器,由 NI-USB-6353 采集卡采集,在 Labview 中显示和保存,采样频率为 20 kHz,采样时间为 5 s。对于液膜信号,由可编程逻辑器件 FPGA 产生正弦激励信号,通过高速模拟转数字量 DA 模块作用于电极上。经过放大、解调和数字-模拟量转换 DA 模块后,由 FPGA 以 1 kHz 的采集率进行采集,采样时间 10 s。

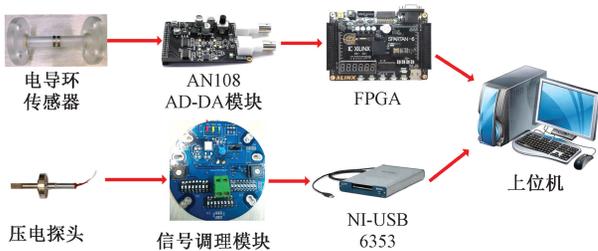


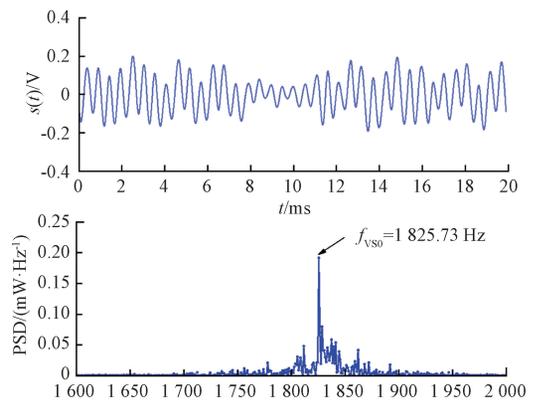
图 7 信号采集流程图

Fig. 7 Flow chart of signal acquisition

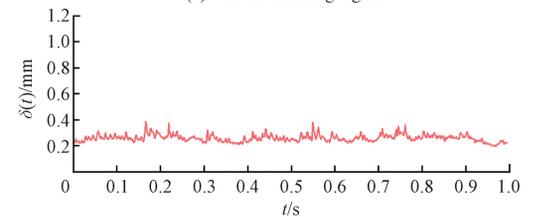
3 湿气测量模型与分析

3.1 涡街过读-扰动波频联合分析

典型湿气工况下涡旋脱落信号的时域和 FFT 频谱如图 8(a)所示,表现出周期性振荡特征,这种周期性的振荡是由于流体绕过旋涡发生体后产生的卡门涡街所引起的,虽然信号质量较单相规则度有所下降,但信号主频仍较为明显。液膜波动信号 $\delta(t)$ 如图 8(b)所示,可以看到液膜厚度在时间轴上有一定的波动,与周期性涡信号不同,扰动波的 FFT 频谱可能会出现多个频率分量,但主频也较为明显,这反映了扰动波的相干特性。



(a) 涡旋脱落信号
(a) Vortex shedding signal



(b) 液膜波动信号
(b) Liquid film fluctuation signal

图 8 涡旋、液膜信号的时域和 FFT 频谱图

($P=250$ kPa, $Q_g=18$ m³/h, $Q_l=1.08$ ml/s)

Fig. 8 Time-domain and FFT plots of vortex signal and liquid film signal ($P=250$ kPa, $Q_g=18$ m³/h, $Q_l=1.08$ ml/s)

利用快速傅里叶变换 FFT 提取了不同载气压力和载气流量下的涡街频率和扰动波频信息,分别见表 2 和表 3。在本文工况下,最大过读因子为 1.121,由过读

表2 不同载气压力下的实验结果 ($Q_g = 18 \text{ m}^3/\text{h}$)Table 2 Experimental results on various gas pressure conditions ($Q_g = 18 \text{ m}^3/\text{h}$)

	P/kPa	$U_{sg}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$Q_l/(\text{ml}\cdot\text{s}^{-1})$	f_w/Hz	f_{VS}/Hz	We_g	$St_{LF}/(\times 10^{-3})$	OR
$P = 150 \text{ kPa}$	149.5	29.15	0.55	2.58	1 795.9	1 560.8	1.33	1.035
	149.8	28.45	1.08	3.17	1 780.2	1 489.4	1.67	1.051
	149.4	28.93	1.54	4.44	1 833.4	1 534.7	2.3	1.065
	149.6	29.17	2.02	5.47	1 860.5	1 560.5	2.81	1.072
	149.8	28.90	2.48	6.05	1 853.7	1 532.4	3.14	1.078
	150.0	29.04	3.01	6.63	1 866.7	1 548.3	3.42	1.080
	150.0	29.21	3.47	7.26	1 879.8	1 564.5	3.73	1.081
	149.8	29.16	3.97	9.02	1 884.5	1 557.0	4.64	1.086
	149.5	29.06	4.50	10.12	1 884.7	1 544.0	5.22	1.089
$P = 200 \text{ kPa}$	203.2	29.35	0.55	2.97	1 787.3	1 992.0	1.52	1.023
	203.9	29.40	1.08	3.60	1 819.0	2 000.8	1.84	1.040
	202.2	29.19	1.54	4.40	1 815.5	1 960.0	2.26	1.045
	198.4	28.99	2.02	5.68	1 821.1	1 905.7	2.94	1.055
	198.6	29.49	2.48	6.50	1 863.2	1 973.0	3.3	1.061
	200.5	29.65	3.01	7.34	1 880.3	2 005.6	3.71	1.065
	202.3	29.62	3.47	8.55	1 889.9	2 013.7	4.33	1.072
	199.6	29.38	3.97	9.59	1 885.3	1 960.4	4.89	1.078
	199.9	28.98	4.50	11.57	1 861.7	1 908.0	5.99	1.079
$P = 250 \text{ kPa}$	252.7	29.48	0.55	3.52	1 788.0	2 364.8	1.69	1.019
	249.2	29.77	1.08	3.86	1 825.7	2 381.1	1.94	1.030
	249.3	29.46	1.54	4.33	1 813.3	2 331.0	2.2	1.034
	247.6	29.17	2.02	5.66	1 820.8	2 273.4	2.91	1.049
	247.9	29.47	2.48	6.50	1 847.4	2 322.1	3.31	1.053
	247.6	29.10	3.01	7.26	1 833.6	2 261.5	3.74	1.059
	247.7	29.91	3.47	9.11	1 893.6	2 388.8	4.57	1.064
	252.7	29.81	3.97	10.79	1 893.9	2 406.7	5.43	1.067
	253.3	29.73	4.50	12.75	1 894.4	2 397.5	6.43	1.070
$P = 300 \text{ kPa}$	302.1	29.80	0.55	3.99	1 798.7	2 737.4	1.91	1.014
	302.9	29.41	1.08	4.15	1 790.3	2 690.1	2.12	1.023
	303.6	29.17	1.54	5.14	1 790.3	2 651.1	2.64	1.031
	301.1	29.99	2.02	6.21	1 845.2	2 786.4	3.11	1.034
	298.5	29.73	2.48	7.34	1 839.6	2 719.3	3.7	1.040
	302.3	29.88	3.01	9.23	1 858.0	2 769.5	4.63	1.045
	300.2	29.95	3.47	10.18	1 870.3	2 767.4	5.1	1.049
	298.5	29.62	3.97	11.61	1 859.7	2 695.3	5.88	1.055
	298.9	29.07	4.50	13.02	1 830.3	2 597.0	6.72	1.058
$P = 350 \text{ kPa}$	352.3	30.66	0.55	4.03	1 847.7	3 277.2	1.97	1.012
	350.8	29.68	1.08	4.61	1 795.2	3 057.9	2.33	1.016
	350.5	29.23	1.54	5.83	1 780.4	2 963.1	2.99	1.023
	351.2	29.50	2.02	6.93	1 803.3	3 019.7	3.52	1.027
	348.3	29.53	2.48	7.31	1 817.4	3 003.9	3.72	1.034
	349.2	29.22	3.01	9.41	1 806.7	2 947.1	4.83	1.039
	351.5	29.52	3.47	10.53	1 830.0	3 021.1	5.35	1.042
	348.8	29.27	3.97	11.89	1 820.4	2 952.7	6.09	1.045
	350.2	29.61	4.50	14.40	1 842.2	3 029.3	7.29	1.045

表 3 不同载气流量下的实验结果 ($P=250$ kPa)Table 3 Experimental results on various gas flow rate conditions ($P=250$ kPa)

	P/kPa	$U_{sg}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$Q_l/(\text{ml}\cdot\text{s}^{-1})$	f_u/Hz	f_{VS}/Hz	We_g	$St_{LF}(\times 10^{-3})$	OR
$Q_g = 12 \text{ m}^3/\text{h}$	249.2	20.47	1.08	3.34	1 288.5	1 121.5	2.45	1.058
	252.2	20.22	1.54	4.00	1 295.3	1 103.7	2.97	1.076
	252.1	20.26	2.02	4.45	1 313.1	1 107.6	3.29	1.089
	249.9	20.35	2.48	5.31	1 322.2	1 109.5	3.91	1.092
	251.3	20.26	3.01	6.46	1 319.3	1 104.0	4.78	1.096
	250.6	20.22	3.47	7.11	1 323.3	1 096.1	5.28	1.110
	249.4	19.84	3.97	9.09	1 304.8	1 052.2	6.87	1.114
	249.1	20.03	4.50	10.05	1 319.9	1 071.8	7.52	1.121
$Q_g = 15 \text{ m}^3/\text{h}$	249.1	24.64	1.08	4.05	1547.9	1 625.6	2.46	1.055
	251.7	24.53	1.54	4.79	1 551.5	1 621.8	2.93	1.063
	250.0	24.44	2.02	4.84	1 562.6	1 601.6	2.97	1.074
	250.0	24.31	2.48	5.94	1 564.3	1 581.8	3.67	1.081
	249.6	24.53	3.01	6.93	1 578.4	1 609.6	4.24	1.081
	250.8	24.28	3.47	8.15	1 567.0	1 581.5	5.03	1.084
	252.1	24.62	3.97	10.36	1 602.1	1 631.3	6.31	1.093
	251.7	24.62	4.50	11.66	1 605.2	1 627.3	7.1	1.095
$Q_g = 21 \text{ m}^3/\text{h}$	250.4	34.82	0.55	4.92	2 104.0	3 275.6	1.71	1.015
	250.0	34.49	1.08	5.93	2 116.9	3 209.8	2.58	1.031
	250.0	34.22	1.54	7.43	2 117.7	3 157.6	3.26	1.040
	250.5	34.54	2.02	8.95	2 150.4	3 217.1	3.89	1.046
	249.6	34.94	2.48	9.52	2 178.7	3 280.5	4.09	1.047
	251.0	34.45	3.01	10.53	2 151.4	3 198.8	4.58	1.049
	249.2	34.43	3.47	11.14	2 163.1	3 175.6	4.86	1.056
	249.1	34.13	3.97	12.89	2 151.4	3 117.6	5.67	1.059
	250.4	34.17	4.50	14.04	2 158.0	3 136.7	6.16	1.061
$P = 250 \text{ kPa}$ $Q_g = 24 \text{ m}^3/\text{h}$	252.5	40.55	0.55	5.62	2 460.5	4 468.9	1.82	1.011
	249.5	40.29	1.08	6.28	2 468.2	4 371.5	2.34	1.021
	251.6	39.03	1.54	7.26	2 394.0	4 123.2	2.79	1.022
	251.8	39.78	2.02	9.56	2 445.8	4 280.9	3.61	1.024
	249.7	39.88	2.48	10.02	2 455.5	4 274.1	3.77	1.026
	251.8	39.96	3.01	11.25	2 463.1	4 311.8	4.22	1.027
	249.9	40.23	3.47	13.07	2 485.0	4 343.4	4.87	1.029
	252.0	40.15	3.97	14.97	2 487.7	4 350.4	5.59	1.032
	252.5	39.57	4.50	16.70	2 453.6	4 229.3	6.33	1.033

引起的气相流量测量误差最大可达到 12.1%，需要对仪表过读进行预测和修正，以提高涡街湿气计量精度。

为分析涡街过读和扰动波频特性，画出不同载气压力下的涡街过读 OR 和无量纲扰动波频随液相流量的变

化，如图 9 所示。由图 9(a) 可知，随着液相流量的增大，涡街过读因子 OR 呈增长趋势，且载气压力越高，曲线增长率越小。由于在实际测量中液相流量难以在线获得，因此，本文利用扰动波频信息进行过读校正，首先考察

无量纲扰动波频 St_{LF} 随液相流量的变化,如图9(b)所示,考虑到本文气相表观速度较高 ($U_{sg} = 20 \sim 40 \text{ ms}^{-1}$)、气液表观速度比大 ($U_{sg}/U_{sl} = 7.84 \times 10^2 \sim 1.33 \times 10^4$),此时气相表观速度对扰动波频率 f_w 的影响较大,故利用气相表观速度 U_{sg} 进行无因次化,如式(4)所示:

$$St_{LF} = \frac{f_w D}{U_{sg}} \quad (4)$$

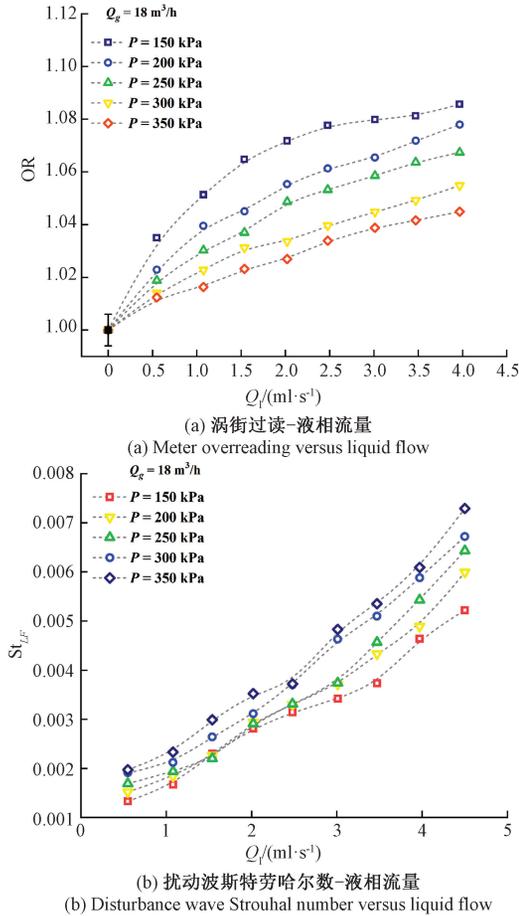


图9 不同载压力下涡街过读和扰动波斯特劳哈尔数随液相流量的变化

Fig. 9 Meter overreading and disturbance wave Strouhal number versus liquid flow rate at various gas pressures

由图9(b),随着液相流量的增大,扰动波斯特劳哈尔数 St_{LF} 呈增长趋势,这一点与涡街过读因子 OR 的规律类似,不同的是,压力越高则曲线增长率越大。根据上述分析,液相流量的影响在涡街过读 OR 和扰动波斯特劳哈尔数 St_{LF} 中均有体现,理论上可以直接以 St_{LF} 为参数建立涡街过读关联式。为了考察不同载气工况(气相流量和压力)下涡街过读 OR 与扰动波 St_{LF} 的关系,做出 OR- St_{LF} 图如图10所示。

由图10(a)和(b)可知,不同载气工况下的仪表过读 OR 均随扰动波斯特劳哈尔数 St_{LF} 的增大而增大,这主要

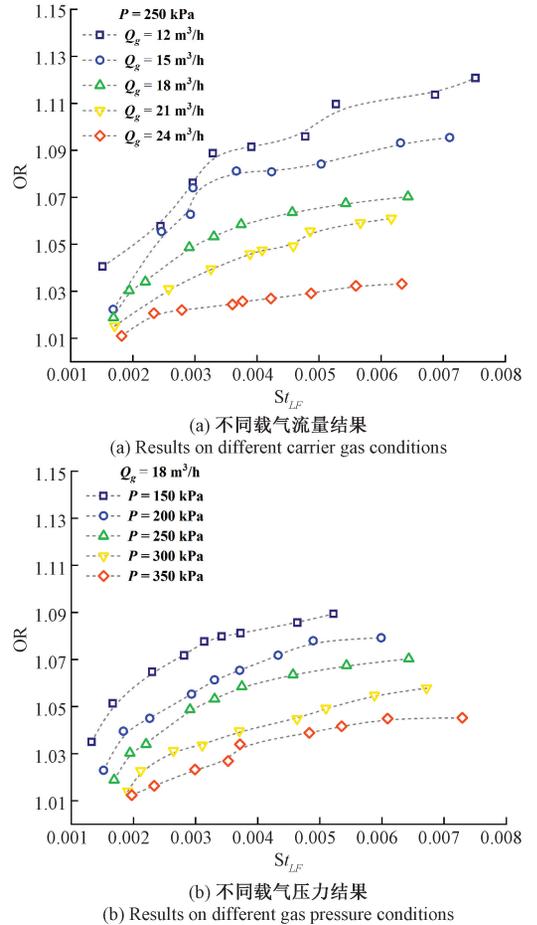


图10 不同载气工况下涡街过读-斯特劳哈尔数
Fig. 10 Meter overreading versus Strouhal number under different carrier gas flow and pressure conditions

反映了液相流量的影响;液相流量越大,则涡脱落和扰动波的非定常周期性运动越强烈,因此,两者呈正相关。对比不同载气工况的曲线增长率,气相流量越大、载气压力越高则 OR 越小,这主要是由于液滴质量加载量(液滴与载气的质量流量之比)减小。根据之前的研究,OR 与液滴加载量呈正相关^[10,17],高气速和高气压均促进了气液相间传质,导致液滴夹带量增大,但同时载气质量流量也增大,最终导致液滴加载量减小。这种气液相界面传质作用与惯性力和表面张力密切相关,两者的比值可以用气相韦伯数来表征,如式(5)所示:

$$We_g = \frac{\rho_g U_{sg}^2 D}{\sigma} \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right)^{1/4} \quad (5)$$

其中, σ 为液相表面张力系数, ρ_l 为液相密度, ρ_g 为气相密度, D 为管道直径。

为验证气相韦伯数参数的合理性,以 We_g 为参数做出涡街过读 OR-扰动波斯特劳哈尔数 St_{LF} 图,如图11所示。涡街过读 OR 随 St_{LF} 呈非线性增长趋势,且气相韦

伯数 We_g 越大,则 $OR-St_{LF}$ 曲线的增长率越小,即:OR 与扰动波斯特劳哈尔数 St_{LF} 呈正相关,与气相韦伯数 We_g 呈负相关。个别与整体规律不一致的情况(如 $We_g = 3\ 000$ 时)可能是由于测量误差导致的(例如,干气测量的斯特劳哈尔数偏低,可能会导致 OR 整体偏高)。

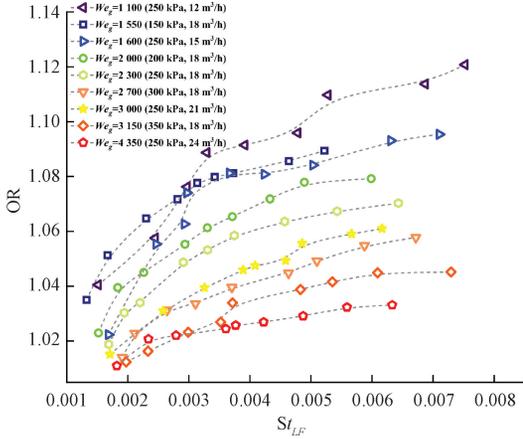


图 11 涡街过读-扰动波斯特劳哈尔数关系
Fig. 11 Meter overread versus disturbance wave Strouhal number

结合上述分析,以 St_{LF} 和 We_g 为参数,利用幂指数形式对涡街过读进行拟合,如式(6)所示:

$$OR = a + bSt_{LF}^{\alpha} We_g^{\beta} \quad (6)$$

其中, a 、 b 为常数系数, α 、 β 为幂指数。利用最小二乘回归得 $a = 0.769$, $b = 2.15$, $\alpha = 0.115$, $\beta = -0.179$, 参数的符号与前述定性分析一致。拟合结果如图 12 所示,预测精度在 $\pm 1.5\%$ 以内,回归决定系数 R^2 可以达到 0.93,相对均方根误差 $rRMSE = 0.68\%$,说明利用式(6)进行涡街过读系数 OR 的回归效果良好。

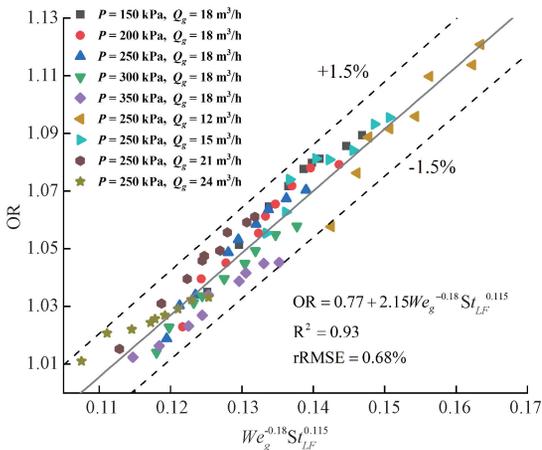


图 12 涡街过读预测结果
Fig. 12 Results of meter overreading prediction

3.2 湿气测量模型与预测结果

式(6)建立了湿气测量模型,其中除了气相流量 Q_g 以及气相表观流速 U_{sg} 为未知量,其他参数均为直接测量参数或者常数。为求解所建立的湿气测量模型,以湿气中实际气相体积流量 Q_g 为参数,导出方程 $f(Q_g) = 0$,如式(7)所示:

$$f(Q_g) = aQ_g + bC_1 C_2 Q_g^{n_1} - Q_{g,apparent} = 0 \quad (7)$$

式中: $n_1 = 1 - \alpha + 2\beta$, $C_1 = (f_w DA_D)^{\alpha}$, $C_2 = (K/A_D^2)^{\beta}$, 管道截面积 $A_D = \pi D^2/4$; 参数 K 是与工况有关的一个无量纲参数, $K = \rho_g D (\rho_l - \rho_g)^{0.25} / \sigma \rho_g^{0.25}$; 气相表观流量 $Q_{g,apparent} = 3\ 600 f_{vs} / K_v$, 其中, K_v 为涡街流量计在单相气体中的仪表系数,根据标定结果,在雷诺数范围 $5.3 \times 10^4 \sim 1.08 \times 10^5$ ($Q_g = 10 \sim 25\ m^3/h$) 内,有 $K_v = 336\ 574.54\ m^{-3}$,标定精度为 $\pm 1\%$,线性度为 0.848%。

为求解方程(7),采用收敛速度快、计算简单的牛顿迭代算法进行求解,牛顿迭代格式为:

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

其中, $f(Q_{g,n}) = aQ_{g,n} + bC_1 C_2 Q_{g,n}^{n_1} - Q_{g,apparent}$, $f'(Q_{g,n}) = a + n_1 C_1 C_2 Q_{g,n}^{(n_1-1)}$ 。

湿气测量算法的具体实现步骤如下:

- 1) 采集工况参数,包括:压力 P 、温度 T 、涡街信号 $s(t)$ 和液膜信号 $\delta(t)$;
- 2) 提取并计算工况参数,包括涡街脱落频率 f_{vs} 、扰动波频率 f_w 、气相密度 ρ_g 、液体密度 ρ_l 、液相表面张力 σ 以及仪表系数 K_v ;
- 3) 根据 $Q_{g,apparent} = 3\ 600 f_{vs} / K_v$ 计算两相中涡街流量计示值 $Q_{g,apparent}$,作为气相体积流量的迭代初值,即 $Q_{g,0} = Q_{g,apparent}$;
- 4) 代入牛顿迭代格式(8)进行求解,得到下一次迭代结果 $Q_{g,n+1}$;
- 5) 当满足收敛条件为 $|Q_{g,n+1} - Q_{g,n}| / Q_{g,n} < 0.1\%$ 时,迭代过程结束。否则,令 $n = n + 1$,继续回到 4),直至迭代收敛。

图 13 绘制了湿气中气体流速相对于液体体积分数 (LVF) 和气液比 ρ_g/ρ_l 的气相流量真实值和预测值的对比,图 14 绘制了湿气中气体流速相对于液体体积分数 (LVF) 的百分比误差 (PE) 分布。97.5% 流量点的气体流量 PE 误差范围在 $\pm 1.5\%$ 以内,不确定为 0.75%,较校正前最大误差 12.1% 测量精度显著提升,基本达到了干气测量的精度水平,校正效果令人满意。图 14 中 $We_g = 3\ 000$ 对应的工况 (250 kPa, 21 m^3/h) 预测误差全部正偏,这与图 11 中建模结果一致。

本文实验介质为空气和水,流动方向:竖直向下,管道公称直径: $D = 15\ mm$,实验工况范围: $Q_g = 12 \sim 24\ m^3/h$,

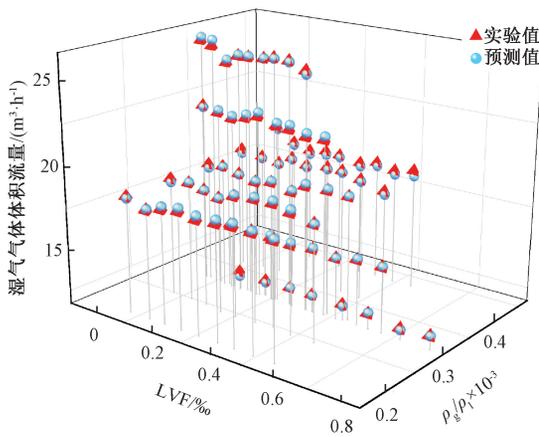


图13 湿气中气相流量预测值-真实值对比

Fig. 13 Comparison of predicted and actual gas flow in wet gas

$Q_l = 0.55 \sim 4.50$ ml/s, $P = 150 \sim 350$ kPa, $LVF = 0.1 \sim 0.75\%$ 。由于两相流动的复杂性,当流动方向、管道直径、工作介质或工况条件与本实验相差较大时,建议重新标定测量模型中的常数参数,以确保模型的测量精度。本文利用扰动波频信息进行过读校正,在测量过程中无

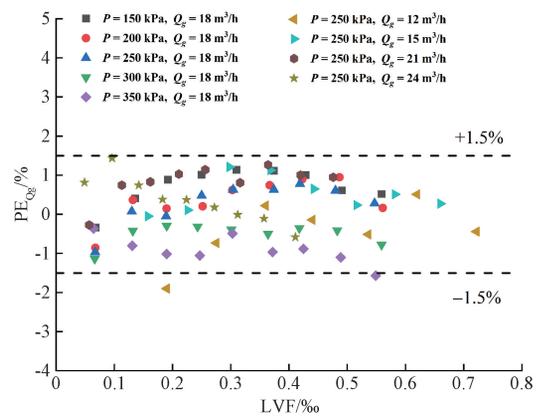


图14 湿气中气相流量预测误差分布

Fig. 14 Error distribution of gas flow prediction in wet gas

需进行液膜厚度标定,对介质导电性要求低;在建模过程中,与分别建立涡街过读和扰动波频关联式后联立求解的思路不同,本文直接建立涡街过读与扰动波频之间的关联式,建模过程简单、待标定系数少,模型的可拓展性和适应性更好。不同的涡街湿气测量模型的预测精度和优缺点对比如表4所示。

表4 不同涡街湿气流量测量方法的对比

Table 4 Comparisons for the vortex wet gas flow measurement model

模型	预测精度		标定系数	优势	缺点
	PE _{Qg} /%	FSPE _{Ql} /%			
Li ^[10]	±1.5	/	8	只需1台涡街流量计(压电探头)	幅值随液相增大呈渐进趋势,测量范围受限
Li ^[11]	±1.0	±10	7	只需1台涡街流量计(三轴加速度探头)	加速度信号较弱,需要相应的信号处理技术
Sun ^[13]	±1.5	±5.0	6	信号处理简单,模型简洁	对介质导电性要求高
Li ^[14]	±1.0	±15	6	对介质导电性要求低	液相流量预测误差较大
本文	±1.5	/	4	系数少,模型简洁,稳健性好	无法测量液相流量

4 结论

为提高涡街湿气测量精度,本文提出了基于涡街-扰动波频双模检测的湿气流量测量模型。设计了环形电导液膜参数传感器及测量系统,并对激励频率和电极尺寸参数进行了优化。分析了涡街过读和扰动波随两相工况的变化规律,并结合扰动波频特性建立了湿气测量模型。主要结论如下:

1) 所设计的环形液膜参数传感器和测量系统,理论上可有效消除电极极化引起的寄生电容效应和流体的电容效应,得到与液膜厚度成正比的电压信号,实现液膜厚度、扰动波频等流动参数;

2) 涡街过读和扰动波斯特劳哈尔数均随液相流量增

大而增大,涡街过读的增长率与气相流量和载气压力成负相关,扰动波斯特劳哈尔数的增长率则与载气压力成正相关;

3) 以扰动波斯特劳哈尔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±1.5%以内,相对均方根为0.68%;

4) 利用扰动波频特性进行涡街过读补偿,可实现湿气中气相流量的准确测量,97.5%流量点的预测误差在±1.5%以内,不确定度0.75%。无需进行液膜厚度标定,对介质导电性要求低,且标定系数少,模型适用性和拓展性强。

参考文献

- [1] 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*, 2023, 35(2):025301.
- [2] SALEHI M, LAO L, XING L, et al. Devices and methods for wet gas flow metering: A comprehensive review [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2023, 96:102518.
- [3] XU Y, ZHANG Y M, YUAN CH, et al. Wet gas two-phase flow measurement of swirl flowmeter based on synchrosqueezed wavelet transform [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72:6505809.
- [4] 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.
- [5] XU Y, YU P N, ZHU Z CH, et al. Over-reading modeling of the ultrasonic flow meter in wet gas measurement[J]. *Measurement*, 2017, 98:17-24.
- [6] STEWART D. The evaluation of dry gas meters in wet gas conditions[J]. *National Engineering Laboratory*, 2002, 33:58.
- [7] JIA Y F, KONG D. A study on measurement uncertainty of a vortex flow meter in discrete liquid phase [C]. *Sustainable Construction Materials and Computer Engineering*, 2012: 585-591.
- [8] 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.
- [9] HALL A, STEVEN R. A discussion on vortex meter technologies with wet gas flows [C]. *7th International South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop*, 2008:10.
- [10] 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.
- [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 J X, DING H B, SUN H J, et al. Measurement of vortex street moisture phase flow based on triaxial acceleration probe [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(7):17-27.
- [12] 王超,李金霞,丁红兵,等. 基于小波脊特征提取的涡街湿气过读补偿与流量测量方法:CN20191046977.4[P]. 2019.
- WANG CH, LI J X, DING H B, et al. A method for vortex street wet-reading compensation and flow measurement based on wavelet ridge feature extraction: CN20191046977.4[P]. 2019.
- [13] 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.
- [14] 李金霞,肖志利. 结合扰动波频特性的涡街频率提取及湿气分相流测量方法:CN202310242114.6[P]. 2023.
- LI J X, XIAO ZH L. Vortex street frequency extraction and moisture phase flow measurement method combined with disturbance wave frequency characteristics: CN202310242114.6[P]. 2023.
- [15] SHI X W, TAN CH, DONG F, et al. Conductance sensors for multiphase flow measurement: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(11):12913-12925.
- [16] SUN H J, ZHANG W Q, DING H B, 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*, 2020:1-6.
- [17] LI J X, WANG CH, DING H B, 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, 67(5):1150-1160.

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, and received her M. Sc. and Ph. D. degree from Tianjin University in 2020. Now she is lecturer in Civil Aviation University of China. Her main research interests include wet gas metering and fluid energy harvesting.



吴逸蒙, 2021 年进入中国民航大学学习, 现为中国民航大学电子信息与自动化学院自动化专业 2021 级本科生。

E-mail: 211541099@cauc.edu.cn

Wu Yimeng entered Civil Aviation University of China in 2021. Now he is an undergraduate majoring in automation in the College of Electronic Information and Automation of Civil Aviation University of China.



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 the B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Tianjin University, Tianjin, China, in 2009, 2011 and 2014, respectively. He is currently an Associate Professor with Tianjin University. His research interests include multiphase flow measurement and numerical simulation, supersonic separation and metrology technology, and AI intelligent 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 in 2000 and 2007 from Tianjin University. Now she is an Associate Professor in Tianjin University. Her main research interests include fluid parameters detection and numerical simulation.