

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615178

湿气伪段塞流流量测量方法研究*

左荣基, 徐英, 袁超, 武满满, 武宇飞

(天津大学电气自动化与信息工程学院 天津 300072)

摘要:相较于其他流型而言,湿气伪段塞流的气液相间界面高度不稳定,时空分布复杂多变,给油气行业实现流量在线不分离测量带来了极大的挑战。为此,本研究提出了一种微波谐振腔-文丘里联合传感器,其中微波谐振腔传感器可以表征管道内含率信息的变化,文丘里传感器输出的差压信号用于反应管道内流体的总流量。基于该传感器开展动态实验研究,并在其上游设计了一套伪段塞流发生装置,以实现伪段塞体的长度及发生时间的自主可控。实验结果表明,传感器输出的微波幅值信号与差压信号呈现出明显的周期性变化特征,且在时域上与伪段塞发生周期高度吻合,伪段塞的来临会引起微波幅值和文丘里差压的突变。此外,还进一步分析了含水率、压力、气相流速等不同工况条件对传感器响应特征和测量结果的影响。为降低建模难度,将伪段塞流划分为“常规湿气”和“伪段塞体”两个阶段,结合高斯过程回归,分别建立体积含水率模型和虚高流量模型。结果表明,在90%置信水平下,在本研究的实验工况范围内,“常规湿气”的体积含水率和气相流量预测的相对误差分别为 $\pm 13.2\%$ 和 $\pm 2.2\%$ ，“伪段塞体”阶段两者分别为 $\pm 14.8\%$ 和 $\pm 9.04\%$ 。研究结果为天然气开采过程中针对湿气伪段塞流的流量在线不分离计量提供了一种有效的技术路径。

关键词: 湿气;伪段塞流;微波谐振腔传感器;文丘里;高斯过程回归

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Research on the measurement of flowrate in wet-gas pseudo-slug flow

Zuo Rongji, Xu Ying, Yuan Chao, Wu Manman, Wu Yufei

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

Abstract: Compared with other flow patterns, wet-gas pseudo-slug flow is characterized by highly unstable gas-liquid interfaces and complex, variable spatiotemporal distributions, posing significant challenges to online, non-separative flow measurement in the oil and gas industry. To address this issue, this study proposes a combined sensor consisting of a microwave resonant cavity and a Venturi tube. The microwave resonant cavity sensor is used to characterize phase holdup, while the differential pressure signal from the Venturi sensor is employed to reflect the total flowrate of the fluid. Dynamic experiments are conducted based on this combined sensor, and a pseudo-slug flow generation device is designed upstream to enable independent control of the pseudo-slug length and occurrence timing. Experimental results show that the microwave amplitude signal and differential pressure signal exhibit pronounced periodic characteristics, which are highly consistent with the pseudo-slug occurrence cycle in the time domain. The arrival of pseudo-slugs induces abrupt changes in both the microwave amplitude and Venturi differential pressure. Furthermore, the effects of different operating conditions, including water cut, pressure, and gas-phase velocity, on sensor response characteristics and measurement performance are systematically analyzed. To reduce modeling complexity, the pseudo-slug flow is divided into two stages, namely “conventional wet gas” and “pseudo-slug body.” Gaussian process regression is then employed to establish separate models for volumetric water holdup and apparent flow rate. The results indicate that, at a 90% confidence level and within the experimental conditions considered in this study, the relative prediction errors of water volume fraction and gas flowrate for the “conventional wet gas” stage are $\pm 13.2\%$ and $\pm 2.2\%$, respectively, while those for the

收稿日期: 2026-04-22 Received Date: 2026-04-22

* 基金项目: 国家自然科学基金(62273252, 62203325)、国家重点研发计划项目(2024YFB3214004)资助

“pseudo-slug body” stage are $\pm 14.8\%$ and $\pm 9.04\%$, respectively. The results provide an effective technical pathway for online, non-separative flow measurement of wet-gas pseudo-slug flow in natural gas production.

Keywords: wet-gas; pseudo-slug flow; microwave resonant cavity sensor; Venturi; Gaussian process regression

0 引 言

伪段塞流是一种常见于天然气生产系统中的气液两相流动现象,管道由于倾角、减压阀以及地形起伏等因素产生积液被认为是诱发伪段塞流的主要原因^[1]。伪段塞流由 Lin 等^[2]发现并定义,最初被认为只存在于分层流向段塞流转变的过渡区域^[3],而近年来的相关研究表明,对于倾斜大管径凝析气管道,伪段塞流会在流型图中占据很大的区域^[4]。由于伪段塞流表现出明显的间歇流动特性,不仅会带来管道振动^[5],加速设备腐蚀^[6]的问题,还会给流量测量带来了极大的挑战。

相含率预测结果的可靠性是保障最终流量测量精度的基础。近年来,微波检测技术由于在多相流相含率的测量中表现出非接触、高灵敏度、抗干扰能力强等优势受到广泛关注。Oon 等^[7]提出了一种频率范围为 5~5.7 GHz 的微波谐振腔传感器,发现传感器谐振频率和信号幅值对于含水率的变化敏感,实现了 0~100% 含水率范围内油水分层流动的测量;Sharma 等^[8]提出了一种单端开放式的谐振腔,基于流体对谐振腔边缘的电磁场产生的微扰,实现在含水率 0~5% 范围内的高精度测量;Bai 等^[9]提出了一种交错双螺旋微波传感器,该结构能够有效克服油水两相流中油滴分布的影响,通过动态实验得到不同矿化度下相位输出与混合速度和含水率的关系,并实现动态持水率的解耦。Wang 等^[10]针对气固两相流,设计了一种两端开口的圆柱形谐振腔传感器,利用仿真正交实验确定了谐振腔的谐振模式及传感器结构,最终实现固体浓度的测量且输出结果不受非均匀分布和湿度变化影响。Ma 等^[11]建立了基于双向长短时记忆网络的流型识别方法,通过射频传感器相位时间序列实现了分层流、波状流、段塞流和环状流的识别,在此基础上建立了用于含气率预测的神经网络模型。Xu 等^[12]提出了一种对流动形态不敏感的微波谐振腔传感器,将起旋器与微波谐振腔传感器相结合,使流型规则化为螺旋环状流,实现气水两相流 0~5% 范围内体积含水率的预测。

将如差压、科氏、涡街^[13]等单相流量计与相含率测量技术结合是解决多相流量测量的常见方案。Shi 等^[14]研究发现电学与超声方法在相含率和速度测量方面具有良好的互补性,因此结合电导传感器,脉冲超声波传感器和超声多普勒传感器,获取水相含率、气液界面位置以及油滴和界面速度,并在此基础上建立动量平衡模型实现各相流量求解;Lin 等^[15]结合微波传感器和文丘里传感

器,提出了一种端到端卷积神经网络,有效提高了测量精度;Zhan 等^[16]通过计算流体力学建模评估了文丘里进口相较于收缩段、扩张段和出口更适用于微波传感器对于相含率的测量,并通过动态实验进行了验证;Jiang 等^[17]采用文丘里和电阻层析成像多模态传感器,利用长短期记忆-卷积神经网络(long short-term memory-convolutional neural network, LSTM-CNN)混合模型对气液两相流流量进行了预测;Suo 等^[18]建立了一种由文丘里和双模态电传感器组成的气液两相流测量系统,利用软计算模型实现了流量测量;Karimi 等^[19]将其提出的双螺旋结构的微波谐振器结合于文丘里喉部,实现了对油水流量的精确测量。然而,现有研究中仍缺少对于伪段塞流的流量测量方法。为此,本课题组首先设计了一套水平伪段塞流可控发生装置,通过高速摄像机和丝网传感器开展可视化研究^[1],发现伪段塞体内存在明显的气液滑移。借助 Fluent 流场数值模拟,探讨了文丘里差压在伪段塞流条件下的波动特性^[5],研制了实验样机,开展了伪段塞流实验,实验与仿真结果表现出良好的一致性。对差压信号开展小波变换分析,提取第四细节分量作为区分伪段塞体的标志,利用差压波动信息建立体积含气率模型,结合伯努利方程实现气液两相流的求解^[20]。为了进一步提高体积含水率预测精度,本研究将由微波谐振传感器与文丘里传感器组成的测量系统应用于伪段塞流流量测量方法研究,通过动态实验,结合视窗中对于流型的观察分析了传感器输出微波衰减和差压信号对于伪段塞流发展不同阶段的周期性响应规律。根据实验结果,将伪段塞流划分为常规湿气流动和伪段塞体两部分,通过高斯过程回归克服了计算模型的非线性问题,最终实现了气相流量和含水率的求解。

1 方法论

1.1 文丘里工作原理

文丘里流量计属于节流式流量计的一种,其结构简单,压力损失小,长期使用过程中稳定性好,能耗成本低,常用于气液两相流量的测量^[21]。本研究中使用标准文丘里结构(管道内径 $D = 50 \text{ mm}$, 节流比 $\beta = 0.55$, 承压 $p = 2.5 \text{ MPa}$), 单相气体流量与差压之间的关系可以通过伯努利方程和连续性方程推导得到:

$$Q_g = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_g}} \quad (1)$$

其中, Q_g 为气相体积流量; ρ_g 为气相密度; ΔP 为干气时流过节流件产生的差压; β 为节流比; d 为文丘里喉部直径; C 为流出系数; ε 为可膨胀系数, 对于不可压缩流体, $\varepsilon = 1$, 而可压缩流体的 $\varepsilon < 1$ 。

对于气液两相流来说, 差压 ΔP 会因为液相流量的存在而升高, 这种现象被称为虚高。 Q_g 可以通过估算虚高 OR 确定^[22]:

$$Q_g = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\sqrt{2\Delta P_i / \rho_g}}{OR} \quad (2)$$

其中, 虚高 OR 取决于文丘里几何结构、流动形态、气液密度比以及洛马参数, 洛马参数是用于描述湿气流中液相比例的无量纲参数:

$$X_{LM} = \frac{\sqrt{\rho_l U_{sl}^2 D^2}}{\sqrt{\rho_g U_{sg}^2 D^2}} = \frac{m_l}{m_g} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} = \frac{1 - x}{x} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} = \frac{1 - \beta_g}{\beta_g} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} = \frac{\beta_w}{1 - \beta_w} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} = \frac{Fr_l}{Fr_g} \quad (3)$$

由上式可知, 洛马参数 X_{LM} 可以由体积含水率和液气密度比计算得到。体积含水率被定义为液相体积流量与两相总流量之比:

$$\beta_l = LVF = \frac{Q_l}{Q} = \frac{Q_l}{Q_g + Q_l} \quad (4)$$

其中, Q 、 Q_l 和 Q_g 分别代表两相总体积流量、液相体积流量和气相体积流量。在得到体积含水率后, 通过建立虚高的预测模型, 即可以由虚高时的差压 ΔP_i 得到气相流量 Q_g 。

1.2 微波谐振腔工作原理

微波谐振腔传感器的设计详见文献[23], 本研究中谐振腔的直径为 140 mm, 长度为 30 mm。由于伪段塞流相含率波动剧烈, 难以通过扫频的方式准确捕捉谐振峰, 因此采用传感器的幅值衰减信号开展研究。微波传播过程中衰减常数可由式(5)得到。

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu_r \varepsilon_r}{2}} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1) \quad (5)$$

其中, μ_r 、 ε_r 和 $\tan \delta$ 分别为介质的相对磁导率、相对介电常数和正切损耗角, 主要取决于截面含水率的变化。因此微波幅值衰减信号可以反映截面含水率的变化。由于气液在如密度等物理性质上的显著差异, 两相间存在明显滑差, 结合气相流量, 可以建立由微波谐振腔传感器检测得到的截面含水率与体积含水率之间的对应关系。

1.3 高斯过程回归

高斯过程回归是一种基于贝叶斯理论的非参数回归方法^[24-25], 其核心思想是将未知函数视为一个随机过程, 通过高斯过程对函数进行概率建模。设训练数据集为:

$$D = \{(\mathbf{x}_i, y_i)\}_{i=1}^n \quad (6)$$

其中, $\mathbf{x}_i$ 为输入变量, y_i 为对应 $\mathbf{x}_i$ 时的输出。假设观测数据满足:

$$y_i = f(\mathbf{x}_i) + \varepsilon_i \quad (7)$$

其中, $f(\mathbf{x})$ 为待推断函数, ε_i 为独立高斯噪声:

$$\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i^2) \quad (8)$$

如果 $f(\mathbf{x})$ 服从高斯过程, 则可以表示为:

$$f(\mathbf{x}) \sim \mathcal{GP}(m(\mathbf{x}), k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')) \quad (9)$$

其中, $m(\mathbf{x})$ 为均值函数, $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ 为核函数, 实际应用过程中通常假设均值函数 $m(\mathbf{x})$ 为零。对于训练输入集合 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n]$, 对应函数值满足:

$$\mathbf{f} \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X})) \quad (10)$$

其中协方差矩阵元素 $[\mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X})]_{ij} = k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 考虑观测噪声后, 训练后输出分布为:

$$\mathbf{y} \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{K} + \sigma_n^2 \mathbf{I}) \quad (11)$$

对于测试时的输入 $\mathbf{x}_*$, 定义:

$$\mathbf{k}_* = \mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{x}_*) \quad (12)$$

$$k_{**} = k(\mathbf{x}_*, \mathbf{x}_*) \quad (13)$$

则有训练样本与测试点函数值的联合分布为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{f}_* \end{bmatrix} \sim \mathcal{N}\left(0, \begin{bmatrix} \mathbf{K} + \sigma_n^2 \mathbf{I} & \mathbf{k}_* \\ \mathbf{k}_*^T & k_{**} \end{bmatrix}\right) \quad (14)$$

根据多元高斯分布的条件性质, 可得到预测分布为:

$$\begin{cases} f_* | \mathbf{y} \sim \mathcal{N}(\mu_*, \sigma_*^2) \\ \mu_* = \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{y} \\ \sigma_*^2 = k_{**} - \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{k}_* \end{cases} \quad (15)$$

其中, μ_* 为预测均值; σ_*^2 表示模型预测的不确定性。

2 实验装置与实验方法

图1给出了本研究提出的湿气伪段塞流测量系统, 它由微波谐振腔传感器、文丘里传感器、采样电路及上位机组成。

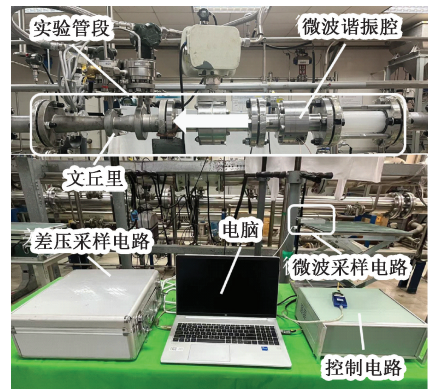


图1 组合传感器系统

Fig. 1 Combined sensor system

其中,微波谐振腔传感器输出表征管道截面含率信息,文丘里传感器输出表征总流量信息,两者相结合最终可以得到伪段塞流的气相流量和体积含水率。图 1 中箭头代表流动方向,微波谐振腔传感器为非侵入式测量,其管径与实验管道一致且管道内不存在阻流件,因此将微波谐振腔传感器串联在文丘里传感器的上游不会影响其测量性能。

伪段塞流动态实验在天津大学中压可调压湿气装置上开展,为实现伪段塞流塞体长度及发生时间的自主可控,在微波谐振腔-文丘里联合传感器上游设计了一套伪段塞流可控发生装置,实验装置如图 2 所示,由 4 个电磁阀、缓冲罐以及控制电路模块组成。

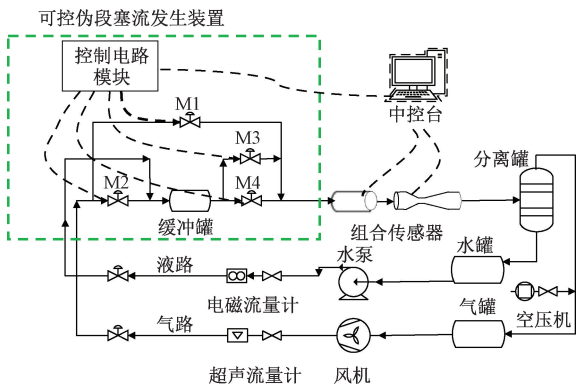


图 2 伪段塞流实验装置

Fig. 2 Pseudo-slug flow experimental setup

其中,电磁阀的动作时间为 20 ms,远小于伪段塞流发生时间,满足实验设计需求。实验采用空气和水作为实验介质,装置的工艺流程,操作方法和技术指标见文献[1]。阀门动作周期需根据不同工况下的液相流量差异进行计算调整,待储存液塞达到目标体积后,打开电磁阀 M2、M4,关闭 M1、M3,气相和液相共同推动液相缓存区里的液塞前行,较高流速的气相可以穿透液塞从而形成伪段塞体,通过微波谐振腔-文丘里联合传感器上游视窗可以观察到伪段塞流发展情况。

实验工况如表 1 所示,压力 P 范围为 0.4~1.2 MPa,气相表观流速 U_{sg} 为 5~15 m/s,含水率 β_w 范围为 1%~5%, Q_g 和 Q_l 分别为气相体积流量和液相体积流量, U_{sl} 为液相表观流速。差压变送器量程 0~100 kPa,微波谐振腔传感器的工作频率设置为 2 750 MHz。为捕捉伪段塞流的动态变化特征,同时兼顾系统实时数据处理能力,将差压及微波信号采样频率设定为 100 Hz,采集时间为 90 s,控制电路将伪段塞体发生时间统一设置为采样开始后第 20 s,以便流型观察和数据分析。

表 1 伪段塞流实验工况表					
Table 1 Pseudo-slug flow experimental condition					
P	Q_g	U_{sg}	Q_l	U_{sl}	β_w
/MPa	/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	/%
0.4	35	5	0.36~1.86	0.05~0.26	1,2,4,5
	49	7	0.50~2.60	0.07~0.37	1,2,4,5
	70	10	0.71~3.72	0.10~0.53	1,2,4,5
	84	12	0.86~4.46	0.12~0.63	1,2,4,5
	106	15	1.07~4.49	0.15~0.63	1,2,4
0.8	35	5	0.36~1.86	0.05~0.26	1,2,4,5
	49	7	0.50~2.60	0.07~0.37	1,2,4,5
	70	10	0.71~3.72	0.10~0.53	1,2,4,5
	84	12	0.86~4.46	0.12~0.63	1,2,4,5
	106	15	1.07~4.49	0.15~0.63	1,2,4
1.2	35	5	0.36~1.86	0.05~0.26	1,2,4,5
	49	7	0.50~2.60	0.07~0.37	1,2,4,5
	70	10	0.71~3.72	0.10~0.53	1,2,4,5
	84	12	0.86~4.46	0.12~0.63	1,2,4,5
	106	15	1.07~4.49	0.15~0.63	1,2,4

3 实验结果

3.1 文丘里差压信号时域周期性响应规律分析

以压力为 0.8 MPa,气相流速为 12 m/s,含水率为 5% 工况下文丘里差压信号为例,如图 3 所示。

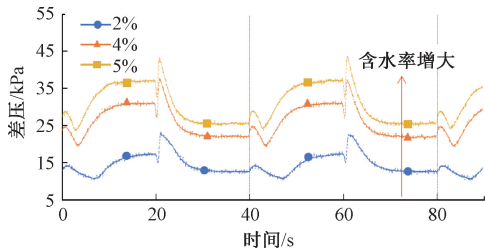


图 3 $P=0.8\text{ MPa}$ 、 $U_{sg}=12\text{ m/s}$,不同含水率下伪段塞流差压信号响应曲线

Fig. 3 Differential pressure signal response curve of pseudo-slug flow under different water cut conditions

($P=0.8\text{ MPa}$ 、 $U_{sg}=12\text{ m/s}$)

结合视窗对流型的观察情况,可以将一个伪段塞流发生周期划分为 4 个阶段。首先,开启电磁阀从 M2、M4 切换到 M1、M3,差压呈现先上升再缓慢下降的趋势。一方面由于切换过程中存在短暂的阀门全开的时间而引起的总压损波动,另一方面,待切换完成后,此时液相来流

储存在液相缓存区,管道内残留液体在气相推动下逐渐减少,因而差压逐渐减小。待缓存区存满后,含水率逐渐增加至当前工况,因此差压也是缓慢增加至稳定。切换导通电磁阀后,在液塞来临前,同样由于管路切换,造成差压减小。随着伪段塞体流经传感器,差压突然增大;随着液塞流过,含水率逐渐减小,差压信号也逐渐减弱至稳定值。

3.2 不同工况条件对文丘里差压信号的影响

1) 含水率对差压信号的影响

图3给出了压力为0.8 MPa,气相表观流速为12 m/s时,不同含水率下的文丘里差压信号。可以看到,在伪段塞流发展的各个阶段,文丘里差压均随着含水率的增加而增大。文丘里差压与流量呈正相关,对于相同气相流速,含水率的升高意味着液相流量和总流量的增大,从而引起差压的增大。

2) 压力对差压信号的影响

图4给出了气相流速为10 m/s,含水率为5%,不同压力下的差压信号。图4中圆形、三角形、方形标记分别代表压力为0.4、0.8和1.2 MPa时的实验数据,由于气体的可压缩性,随着压力的升高,气相密度增大,流体流经文丘里产生的压降也增大。

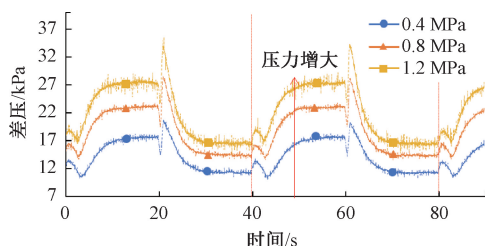


图4 $U_{sg} = 10 \text{ m/s}$, $\beta_w = 5\%$,不同压力下伪段塞流差压信号响应曲线

Fig. 4 Differential pressure signal response curve of pseudo-slug flow under different pressure conditions ($U_{sg} = 10 \text{ m/s}$, $\beta_w = 5\%$)

3) 气相流速对差压信号的影响

图5给出了压力为0.8 MPa,含水率为4%时,气相流速分别为7、10、12和15 m/s的差压信号。显然,无论是伪段塞体区还是伪段塞体来临前和流过后,气相流速的升高都会使文丘里差压信号增大。

3.3 微波谐振腔幅值信号时域周期性响应规律分析

微波信号反映了管道截面上的含水率信息。图6给出了压力为0.8 MPa,气相流速为7 m/s,含水率为4%时由微波谐振腔传感器输出的幅值衰减时域信号变化情况,其中微波的幅值衰减经采样电路处理后转换为电压值,电压越大,代表微波信号的衰减越大。为消除实验过程中的噪声干扰,采用卡尔曼滤波对原始信号进行处理,图6中灰色和黑色曲线分别对应微波信号的原始数据和

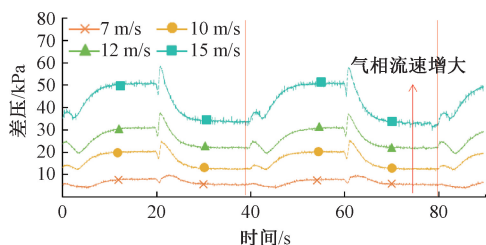


图5 $P = 0.8 \text{ MPa}$, $\beta_w = 4\%$,不同气相流速下伪段塞流差压信号响应曲线

Fig. 5 Differential pressure signal response curve of pseudo-slug flow under different gas velocity conditions ($P = 0.8 \text{ MPa}$, $\beta_w = 4\%$)

经卡尔曼滤波处理后的数据。可以看到,处理后信号在噪声水平显著降低的同时仍能反映含水率的变化情况。因此后续均基于经卡尔曼滤波后的信号进行分析。

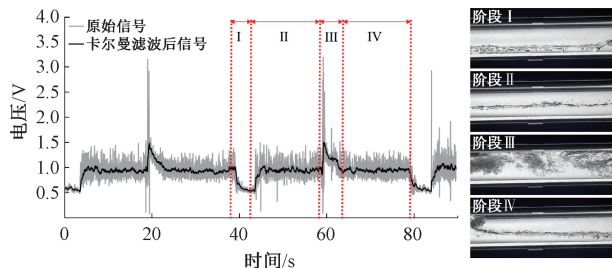


图6 $P = 0.8 \text{ MPa}$, $U_{sg} = 7 \text{ m/s}$, $\beta_w = 4\%$ 下伪段塞流微波信号响应曲线

Fig. 6 Microwave signal response curve of pseudo-plug flow ($P = 0.8 \text{ MPa}$, $U_{sg} = 7 \text{ m/s}$, $\beta_w = 4\%$)

同时对比可见微波信号在时序上表现出的特征与差压信号及视窗观察结果具有良好的一致性。首先,在关闭电磁阀 M2、M4 后到液塞缓存区存满前这段时间,管道中含水率在气相作用下逐渐减小,对应的电压值缓慢降低;从液塞缓存区存满后到伪段塞体到达微波谐振腔传感器所在位置之前,电压值逐渐上升并稳定,反映了管道内的含水率逐渐增大后保持在实验设置工况;在伪段塞体流经传感器过程中,伪段塞体的来临使得电压值突然增大;而在伪段塞体流过传感器后,含水率恢复至实验设置工况,电压值逐渐减小到伪段塞体来临前的水平。

图7给出了不同压力,气相表观流速和体积含水率条件下经卡尔曼滤波后的微波时域信号汇总。可以看到,每组实验结果均呈现与前文类似的周期性变化。在相同的压力和气相表观流速条件下,随着体积含水率的增加,截面含水率相应升高,因此微波电压也会随之增大。进一步比较不同压力下的实验数据可以发现,当压力增大时,微波信号呈现波动性增强的趋势,同时气相流速对截面含水率的影响也变得更加显著。

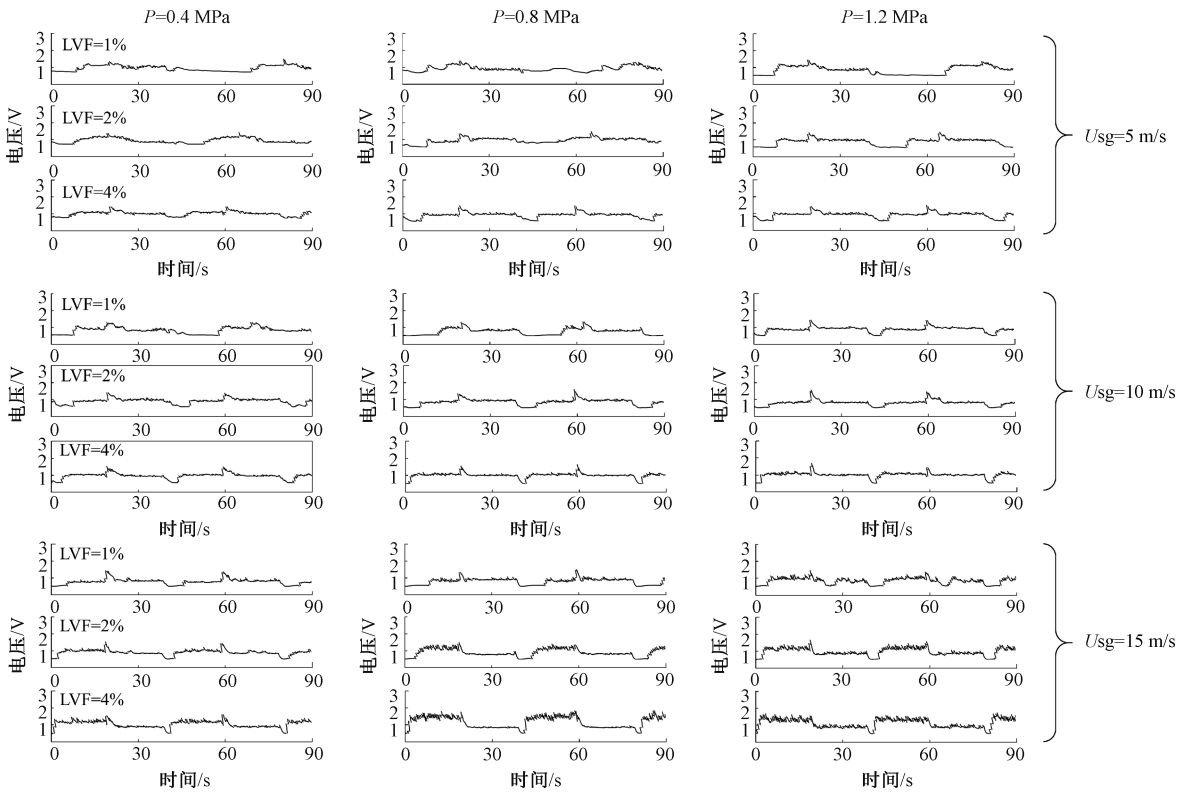


图7 $P=0.8 \text{ MPa}$ 、 $U_{sg}=12 \text{ m/s}$,不同含水率下伪段塞流微波信号响应曲线

Fig. 7 Microwave signal response curves of pseudo-slug flow under different water cut conditions ($P=0.8 \text{ MPa}$ 、 $U_{sg}=12 \text{ m/s}$)

4 结果与讨论

为建立伪段塞流流量预测方法,可以将伪段塞流的一个变化周期划分为常规湿气流动和伪段塞体两部分,其中伪段塞体可以视为在常规湿气流动的基础上一个大液量的叠加进行补偿。基于此思想,开展含水率与气相流量建模研究。

4.1 常规湿气

提出微波幅值衰减无量纲参数,分别提取伪段塞体来临前和流过后微波衰减的平均值 V_1 和 V_2 并做无量纲化处理,表征截面含水率信息,定义如式(16)所示。

$$\begin{cases} \xi_1 = \frac{V_1}{V_g} \\ \xi_2 = \frac{V_2}{V_g} \end{cases} \quad (16)$$

其中, V_g 为干气阶段提取到的电压平均值。现有研究表明^[12],除截面含水率外,体积含水率还会受到气相流速、压力、密度等影响。气相弗劳德数 Fr_g 是用来描述气相惯性力与液相重力相对强弱的无量纲参数,反映了气相流速以及其对液相的夹带能力的影响,定义如下:

$$Fr_g = \frac{4m_g}{\rho_g \pi D^2 \sqrt{gD}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}} = \frac{U_{sg}}{\sqrt{gD}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}} \quad (17)$$

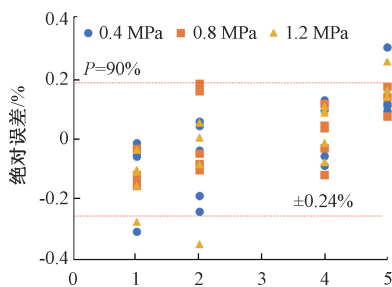
其中, Fr_g 为气相弗劳德数; g 为重力加速度; D 为管道直径; ρ_g 和 ρ_l 分别为气相密度和液相密度; m_g 和 U_{sg} 为气相质量流量和气相表观流速。本研究中基于微波衰减无量纲参数 ξ_1 、 ξ_2 , 气相弗劳德数 Fr_g 和液气密度比 ρ_l/ρ_g , 建立体积含水率预测模型:

$$B_w = f_1 \left(\xi_1, \xi_2, Fr_g, \frac{\rho_l}{\rho_g} \right) \quad (18)$$

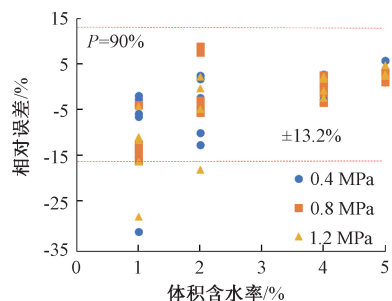
机器学习在捕捉数据间存在的复杂非线性关系上展示出的卓越性能,目前在多相流的流型识别^[26]及流动参数^[27]的预测上已有相关应用。本研究基于高斯过程回归建立体积含水率预测方法。核函数的选择是建模数据点之间相似度的关键,本研究采用指数型核函数,表达式为:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sigma_f^2 \exp \left(- \frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|}{l} \right) \quad (19)$$

其中, σ_f^2 表示信号方差; $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|$ 表示欧氏距离, l 表示长度尺度。模型中超参数采用最大化对数似然估计。通过5次交叉验证划分数据集和测试集,最终得到含水率的预测误差如图8所示,在置信概率为90%时,绝对误差在-0.24%~0.18%范围内,相对误差在-13.2%~9.04%范围内。



(a) 绝对误差
(a) Absolute error



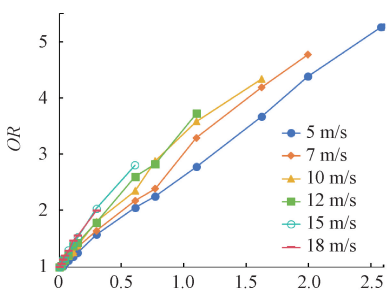
(b) 相对误差
(b) Relative error

图8 常规湿气阶段体积含水率预测误差

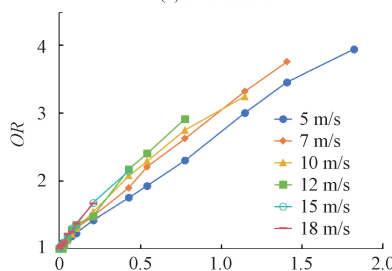
Fig. 8 Error of water volume fraction in the conventional wet gas

在含水率预测的基础上,进一步开展流量虚高模型研究。图9为不同压力下虚高与洛马参数对应关系。

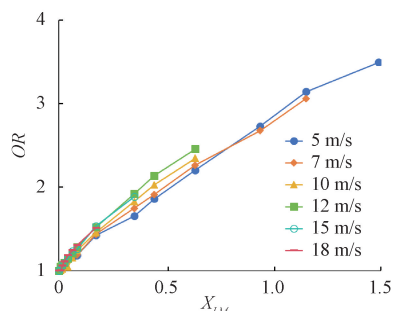
可以发现,在相同的压力和气相流速下,虚高会随着 X_{LM} 的增大而增大,这代表了含水率对于虚高的影响。当



(a) 压力=0.4 MPa
(a) $P=0.4$ MPa



(b) 压力=0.8 MPa
(b) $P=0.8$ MPa



(c) 压力=1.2 MPa
(c) $P=1.2$ MPa

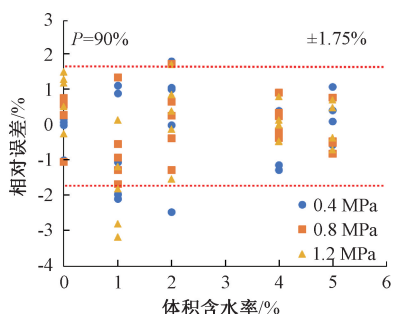
图9 同一压力、不同气相流速下虚高与 X_{LM} 之间的关系
Fig. 9 The relationship between over-reading and X_{LM} under the same pressure and different gas-phase flow rates

压力为0.4 MPa时,对于相同的 X_{LM} ,虚高与气相流速之间存在明显的正相关性,而随着压力的升高,不同气相流速下虚高与 X_{LM} 关系曲线分散性减弱,说明气相流速对虚高的影响会随着压力的升高而降低。

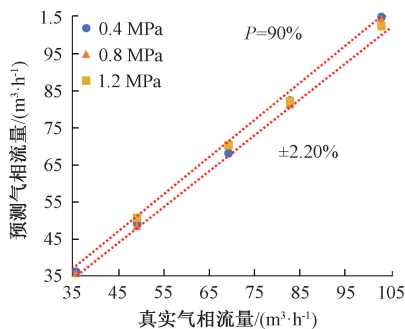
同样采用高斯指数过程回归进行建模,输入为洛马参数、气相弗劳德数和液气密度比:

$$OR = f_2 \left(X_{LM}, Fr_g, \frac{\rho_l}{\rho_g} \right) \quad (20)$$

最终得到虚高以及气相流量的相对误差见图10。



(a) 虚高模型误差
(a) Relative error of over-reading



(b) 气相流量误差
(b) Relative error of gas flowrate

图10 常规湿气阶段虚高模型与气相流量预测相对误差

Fig. 10 Relative error of over-reading and gas flowrate
(conventional wet gas)

结果表明,在 $P=90\%$ 置信概率下,虚高相对误差在 $\pm 1.75\%$ 以内。预测气相流量与标准表流量对比如图 10 (b) 所示,在 $P=90\%$ 置信概率下,其相对误差在 $\pm 2.20\%$ 以内,可见此模型可以较准确地实现气相流量的预测。

4.2 伪段塞体

对于伪段塞体,所需补偿液相流量 Q_c 为液塞缓存区的体积 V_s 和伪段塞体持续时间 T 的比值:

$$Q_c = \frac{V_s}{T} \quad (21)$$

结合此时气相和液相来流的真实流量 Q_g 和 Q_w , 此时真实的体积含水率为:

$$\beta_s = \frac{Q_w + Q_c}{Q_w + Q_c + Q_g} \quad (22)$$

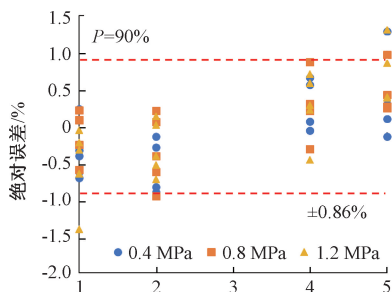
提取伪段塞体阶段微波衰减的电压值的平均值 V_a , 同样通过无量纲处理得到微波幅值衰减因子:

$$\xi_a = \frac{V_a}{V_g} \quad (23)$$

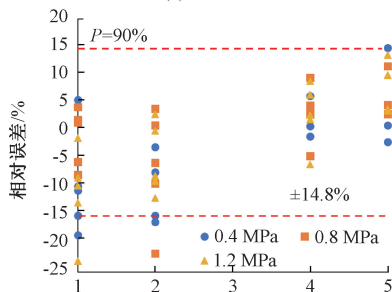
结合气相弗劳德数 Fr_g 和液气密度比 ρ_l/ρ_g , 建立体积含水率预测模型方法与常规湿气流动一致。

$$\beta_{w-s} = f_3(\xi_a, Fr_g, \frac{\rho_l}{\rho_g}) \quad (24)$$

伪段塞体阶段体积含水率预测误差见图 11, 绝对误差在 $-0.83\% \sim 0.86\%$, 相对误差在 $-12.6\% \sim 14.8\%$ 范围内的置信概率为 90% 。说明通过微波信号的平均值评估液塞对于体积含水率的影响是有效的。



(a) 绝对误差
(a) Absolute error

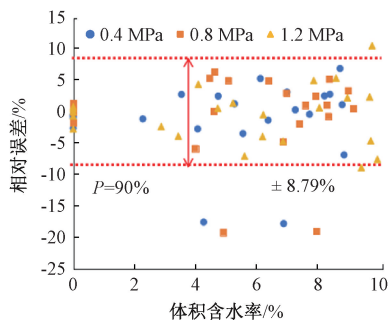


(b) 相对误差
(b) Relative error

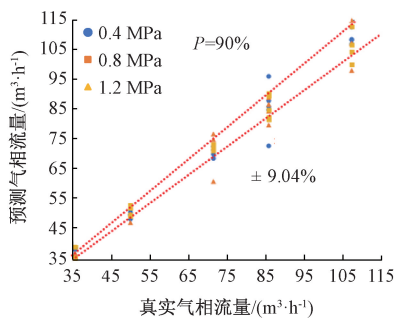
图 11 伪段塞体阶段含水率预测模型误差

Fig. 11 Error of water volume fraction in the pseudo-slug body

与常规湿气阶段相同,对伪段塞体阶段的差压取平均值,基于虚高模型实现气相流量的预测。结果如图 12 所示,在 $P=90\%$ 置信概率下,虚高的相对误差在 $\pm 8.79\%$ 以内,气相流量相对误差为 $\pm 9.04\%$ 以内。由于伪段塞瞬间液量的增加造成的复杂气液分布,相较于常规湿气流动阶段,误差变大,但仍处于可接受范围内。



(a) 虚高模型误差
(a) Relative error of over-reading



(b) 气相流量误差
(b) Relative error of gas flowrate

图 12 伪段塞体阶段虚高模型与气相流量预测相对误差

Fig. 12 Relative error of over-reading and gas flowrate (pseudo-slug body)

5 结 论

本研究提出了一种微波谐振腔-文丘里联合传感器,利用自主设计的伪段塞流发生装置,对传感器的测量能力开展了实验研究,结合高斯过程回归建立了体积含水率和气相流量预测模型,主要结论如下:

1) 微波谐振腔-文丘里联合传感器输出的微波幅值信号与差压信号呈现明显周期性变化,且与伪段塞发生周期在时域上吻合较好,可以反映伪段塞流的间歇流动特征,伪段塞的来临会引起微波幅值和文丘里差压的突变。

2) 差压信号和微波信号可以反映含水率、压力和气相流速等工况信息的变化,证实了传感器对于气水两相流动参数的测量能力。

3) 为简化建模难度,将伪段塞流划分为常规湿气和

伪段塞体两个阶段,采用高斯过程回归分别建立体积含水率和气相流量的预测模型。结果表明,在本研究的实验工况范围内,常规湿气体积含水率和气相流量的相对误差分别为 $\pm 13.2\%$ 和 $\pm 2.20\%$ ($P=90\%$),对于伪段塞体来说,两者分别为 $\pm 14.8\%$ 和 $\pm 9.04\%$ 。

微波谐振腔-文丘里联合传感器为气液两相流,尤其是存在伪段塞流时,流动参数的在线实时测量提供了一种有效的解决方案,在天然气开采过程中具有广阔的应用前景。需要指出的是,本文对伪段塞流的测量研究建立在流动阶段划分的基础上,后续研究考虑将该组合式传感器测量系统与先进算法相结合,进一步扩展实验流动形态和工况范围,以实现伪段塞流的自动识别,提高气液两相流的测量精度,为复杂工业场景下的在线测量提供支持。此外,受现有实验装置设计能力限制,实验压力最高为1.2 MPa,尚未覆盖实际深井或高压天然气管线中可能出现的更高压力工况。随着压力升高,气相密度和黏度等物性参数将发生变化,进而影响气液两相相互作用、流型演变过程以及差压和微波响应特性。因此,在后续研究中,将进一步开展高压条件下的传感器验证及模型修正工作。

参考文献

- [1] WU H T, XU Y, WANG J H, et al. Experimental study on controllable pseudo-slug flow characteristics in horizontal pipe[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 83(3):103546.
- [2] LIN P Y, HANRATTY T J. Effect of pipe diameter on flow patterns for air-water flow in horizontal pipes[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1987, 13(4): 549-563.
- [3] FAN Y L, SOEDARMO A, PEREYRA E. A comprehensive review of pseudo-slug flow[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2022, 217: 110879.
- [4] FAN Y L, PEREYRA E, SARICA C, et al. Analysis of flow pattern transition from segregated to slug flow in upward inclined pipes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 115: 19-39.
- [5] WANG J, XU Y, WU H T, et al. The influence of pseudo-slug flow on the measurement characteristics of Venturi [C]. 2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2021: 1-6.
- [6] KESANS N R. Erosion in multiphase pseudo slug flow with emphasis on sand sampling and pseudo slug characteristics [D]. Tulsa: The University of Tulsa, 2013.
- [7] OON C S, ATEEQ M, SHAW A, et al. Experimental study on a feasibility of using electromagnetic wave cylindrical cavity sensor to monitor the percentage of water fraction in a two phase system [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 245: 140-149.
- [8] SHARMA P, LAO L Y, FALCONE G, et al. A microwave cavity resonator sensor for water-in-oil measurements[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 262: 200-210.
- [9] BAI L D, ZHANG Y, LIU X, et al. Water holdup measurement in oil-water flows with staggered double helix microwave sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(19): 22323-22331.
- [10] WANG D Y, LIU X X, WANG Y T, et al. Measurement of solid concentration in gas-solid flows using a microwave resonant cavity sensor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 73:7501009.
- [11] MA H, XU Y, HUANG H, et al. Intelligent predictions for flow pattern and phase fraction of a horizontal gas-liquid flow[J]. *Energy*, 2024, 303:131944.
- [12] XU Y, ZUO R J, YUAN CH, et al. A Water volume fraction measurement method based on flow regime insensitivity-microwave resonant cavity sensor (FRI-MRCS) [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(18): 21226-21233.
- [13] 李金霞, 吴逸蒙, 丁红兵, 等. 基于涡街频率-扰动波频双模检测的湿气流量测量[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(10): 85-96.
- [13] LI J X, WU Y M, DING H B, et al. Wet gas metering based on dual-modality measurements by using frequencies of vortex shedding and disturbance wave[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(10): 85-96.
- [14] SHI X, TAN C, DONG F, et al. Flow rate measurement of oil-gas-water wavy flow through a combined electrical and ultrasonic sensor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427:131982.
- [15] LIN X G, WANG H Y, CHEN ZH, et al. Measurement of the flow rate of oil and water using microwave and Venturi sensors with end-to-end dual convolutional neural network [J]. *Measurement: Sensors*, 2020, 10-12: 100018.
- [16] ZHAN M K, XIE CH G, SHU J J, et al. Microwave probe sensing location for Venturi-based real-time multiphase flowmeter[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2022, 218: 111027.
- [17] JIANG Y X, LIU Y Y, MAO B J, et al. A Flowrate estimation method for gas-water two-phase flow based on multimodal sensors and hybrid LSTM-CNN model [J].

- IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 2525612.
- [18] SUO P, SUN J T, SHI SH Y, et al. Mass flow rate measurement of gas-liquid two-phase flow using multi-sensor data fusion and soft computing model[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(13): 25314-25323.
- [19] KARIMI M A, ARSALAN M, SHAMIM A. Extended throat Venturi based flow meter for optimization of oil production process[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(16): 17808-17816.
- [20] WU H T, XU Y, WANG J H, et al. Gas-liquid two-phase flowrate measurement in pseudo-slug flow with Venturi[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 78: 101887.
- [21] WANG J, XU Y, WU H, et al. Research on entrainment characteristics and over-reading model for gas-liquid flow in Venturi[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 119: 110190.
- [22] ISO. Measurement of wet gas flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits: ISO/TR 11583:2012[S]. Switzerland: ISO, 2012.
- [23] YANG Y G, XU Y, YUAN CH, et al. Superficial dielectric constant (SDC) model of gas-water flow in resonant cavity sensor (RCS) based on flow regimes[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 88: 103849.
- [24] DANG W, LIAO SH J, YANG B, et al. An encoder-decoder fusion battery life prediction method based on Gaussian process regression and improvement[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 59: 106469.
- [25] 金旭, 张一鸣, 李广, 等. GPR 初值引导自监督 DIC 的旋转结构位移场测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(11): 193-204.
- JIN X, ZHANG Y M, LI G, et al. GPR-initialized self-supervised learning DIC for displacement field measurement of rotating structures[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(11): 193-204.
- [26] MA T X, WANG T Z, WANG L, et al. A hybrid deep learning model towards flow pattern identification of gas-liquid two-phase flows in horizontal pipe[J]. Energy, 2025, 320: 135141.
- [27] ZHOU B, WANG Y, LIU Z, et al. Dual-parameter measurement of oil-water two-phase flow based on multitask learning[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25, 11: 20185-20194.

作者简介



左荣基, 2019 年于华北电力大学获得学士学位, 2023 年于河北大学获得硕士学位, 现为天津大学在读博士生, 主要研究方向为多相流检测及微波传感器设计。

E-mail: zuorongji@tju.edu.cn

Zuo Rongji received his B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2019, his M. Sc. degree from Hebei University in 2023. He is currently pursuing his Ph. D. degree with Tianjin University. His main research interests include multiphase flow measurement and microwave sensor design.



袁超 (通信作者), 分别在 2010 年和 2016 年于天津大学获得学士和博士学位, 现为天津大学副研究员, 主要研究方向为多相流测量以及工业传感器和仪器设备的开发。

E-mail: yuanchao@tju.edu.cn

Yuan Chao (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University respectively in 2010 and 2016, respectively. He is currently an associate researcher at Tianjin University. His main research interests include multiphase flow measurement and the development of industrial sensors and instrumentation.