

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210451

气泡影响下的电磁流量测量优化技术研究*

葛亮^{1,2},袁一萍¹,白洋¹,曾文³,阳彩霞¹

(1. 西南石油大学机电工程学院 成都 610500; 2. 西南石油大学石油与天然气装备教育部重点实验室 成都 610500;
3. 重庆大学材料科学与工程学院 重庆 400044)

摘要:电磁流量测量在工业生产过程中扮演着重要角色,但易受流体中气泡的影响导致测量结果出现波动进而影响测量精度,因此通过技术手段实现测量精度的优化十分关键。针对电磁流量测量精度受气泡影响的测量优化问题,本文首先从权重函数角度入手,建立了气泡对电磁流量测量影响的理论模型;其次,通过有限元仿真研究了气泡对权重函数的影响,并根据仿真结果提出了一种基于图像采集与处理技术的优化方法降低气泡对电磁流量测量的影响;最后,为了验证优化方法的可行性,开发了气泡图像处理算法,并搭建气液两相流流体电磁流量测量实验平台进行实验验证。实验结果表明,采用优化方法补偿后的电磁流量测量系统受气泡影响的敏感程度得到有效降低,误差降低幅度均在82.63%以上,最大误差降低幅度可达91%,优化后气泡存在时的测量误差在 $\pm 3.03\%$ 以内。研究有效降低了电磁流量测量受气泡影响产生的误差,为进一步提高气泡影响下的电磁流量测量精度和实现气液两相流电磁测量提供技术支持。

关键词:电磁流量测量;气液两相流;权重函数;测量精度;优化研究

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

Research on optimization technology of electromagnetic flow measurement under the influence of air bubbles

Ge Liang^{1,2}, Yuan Yiping¹, Bai Yang¹, Zeng Wen³, Yang Caixia¹

(1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Key Laboratory of Oil and Gas Equipment, Ministry of Education, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Electromagnetic flow measurement is critical in the industrial manufacturing process. But, it is susceptible to the influence of air bubbles in the fluid, which will impact the measurement accuracy and cause variations in the measurement findings. Enhancing measurement accuracy by using techniques is essential. This study presents a theoretical model of the influence of bubbles on electromagnetic flow measurement from the standpoint of weight function to address the measurement optimization problem of electromagnetic flow measurement accuracy affected by bubbles. Secondly, the influence of bubbles on the weight function is investigated by using finite element simulation. An optimization method based on image acquisition and processing technology is proposed to reduce the influence of bubbles on electromagnetic flow measurement based on the simulation results. Finally, to test the feasibility of the optimization method, a bubble image processing algorithm is created, and an experimental platform for measuring gas-liquid two-phase flow electromagnetic flow is established. Experimental results show that the optimization method effectively reduces the sensitivity of the electromagnetic flow measurement system under the influence of bubbles. The error reduction amplitude is larger than 82.63%, with a maximum error reduction amplitude of 91%. After optimization, the measurement error in the presence of bubbles is within $\pm 3.03\%$. The study effectively reduces the error of electromagnetic flow measurement caused by bubbles and provides technical support for improving the measurement accuracy of electromagnetic flow caused by bubbles and realizing the electromagnetic measurement of gas-liquid two-phase flow.

Keywords: electromagnetic flow measurement; gas-liquid two-phase flow; weight function; measurement accuracy; optimization research

0 引言

电磁流量计是一种基于法拉第电磁感应定律测量导电液体体积流量的仪表,由于其测量结果与被测流体的密度、温度及电导率等物性参数无关,被广泛应用于单相流测量^[1]。然而,在化学工业,食品生产和核反应堆工程中,流体会不可避免地混入气体,形成含有气泡的气液两相流,导致电磁流量计测量结果出现偏差,从而降低测量精度^[2-4]。因此研究气泡对电磁流量测量产生的影响,并进一步提出优化方法提高电磁流量测量精度,对电磁流量计在气液两相流中的应用具有重要的工程意义。

为实现气泡等非导电介质对电磁流量测量影响的优化研究,国内外学者分别从权重函数理论、电极优化以及信号处理方法等方面开展了大量前期探索,为气液两相流电磁测量的优化方法研究奠定了基础^[5-10]。Krafft等^[11]研究了连续相中的非导电相对电磁流量计输出的影响,验证了电磁流量计可以同时测量气泡和连续导电相速度。Cha等^[12]结合高速 CCD 摄像机研究了电磁流量计在测量气泡流和段塞流时的响应特性,比较了气泡流与单相流的信号差异。文献[13-14]提出了流动的电测量理论,使用交替迭代法研究了电磁流量计在气泡不同存在状态下虚电流和权重函数的解析解,为两相流研究提供了理论参考。文献[15-16]通过有限元仿真研究了单个气泡、多个气泡、连续气泡对虚电流分布的影响,分析了电磁流量计受气泡影响时的响应特性。Deng等^[17]提出了一种将电阻层析成像和电磁流量计结合的检测方法,并且建立了基于重建图像的电磁流量计测量模型,从理论上验证了该方法的可行性。Ma等^[18]通过结合电磁层析成像和多电极速度重构两种技术,实现了多相流中的水相体积分数和流速测量。Shi等^[19-20]设计了弧状电极并对其进行优化,进行了气液两相流量测量实验,为电磁流量计在多相流流量测量中的应用奠定了基础。Yang等^[21-22]采用相隔离技术改变气液两相流体的流型从而实现气相和液相的分相计量,但该方法存在阻流件,容易引起堵塞。Jiang等^[23]提出了一种通过格林函数计算气液两相流中电磁流量计权重函数的新方法,并通过仿真和实验验证了该方法的合理性,为电磁流量计测量气液两相流的误差分析提供了理论依据。Li等^[24]通过有限元仿真研究了流体中非导电相的半径和位置变化对电磁流量计权重函数分布的影响,研究结果可为电磁流量计测量两相流提供了参考。Tang等^[25]提出采用多传感器融合的方式来测量油气水多相流,为多相流电磁流量传感器的优化提供了新思路。葛亮等^[26-27]求解了气泡不同存在状态下的权重函数解

析解,并利用有限元仿真研究了气泡在流动过程中对电磁流量计产生的影响规律,通过实验验证了影响规律的正确性。

综上所述,针对气液两相流中电磁测量受气泡影响的优化问题,国内外学者主要从气泡对权重函数分布的影响入手,研究气泡对电磁流量测量的影响特性,未提出修正模型或者补偿方法对气泡存在导致的精度问题进行补偿。基于此,本文首先建立气泡对电磁流量测量影响的理论模型,其次结合有限元仿真分析气泡对权重函数分布的影响,然后基于图像采集与处理技术提出了一种针对电磁流量测量结果受气泡影响的优化方法,最后通过实验验证了优化方法的有效性与正确性。

1 气泡对电磁流量测量影响的理论研究

为提升电磁流量测量受气泡影响后的测量精度,本文首先从权重函数理论基础入手,建立了气泡对权重函数影响的理论模型,定量分析气液两相流中气泡对电磁流量测量产生的影响。

1.1 权重函数理论基础

电磁流量计的基本方程可由 Maxwell 方程经过数学推导后得到。目前大多数研究者使用的是由 Bevir 在 1970 年提出的三维权重向量积分公式^[28],如式(1)所示:

$$\Delta U = \int_A \mathbf{W} \cdot \mathbf{v} dA \quad (1)$$

式中: ΔU 是两电极间的电势差; A 表示对所有测量空间进行积分; \mathbf{v} 是流体速度; \mathbf{W} 为矢量权重函数,其计算表达式如式(2)所示:

$$\mathbf{W} = \mathbf{B} \times \mathbf{j} \quad (2)$$

式中: \mathbf{j} 为虚电流密度矢量, \mathbf{B} 为磁感应强度矢量。

1.2 气泡对权重函数的影响

为研究气泡对电磁流量测量系统权重函数产生的影响,本文基于权重函数基础理论,求解电极为点电极且磁场均匀的电磁流量测量系统在多个气泡存在时的权重函数。假设测量截面半径为 R , 气泡的半径分别为 $R_i (i = 1, 2, 3, \dots, M)$, 以测量系统的圆心为原点作直角坐标, 气泡的位置分别为 $(x_{oi}, y_{oi}) (i = 1, 2, 3, \dots, M)$, 且气泡相互间不重叠。以 3 个气泡为例, 多气泡存在时的电磁流量系统测量截面如图 1 所示。

虚电流势 G 在边界上满足式(3):

$$\begin{cases} \nabla^2 G = 0 \\ \frac{\partial G}{\partial n} = \begin{cases} \frac{\delta(\theta) - \delta(\theta - \pi)}{r}, & r = R \\ 0, & r_i = R_i (i = 1, 2, 3, \dots, M) \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

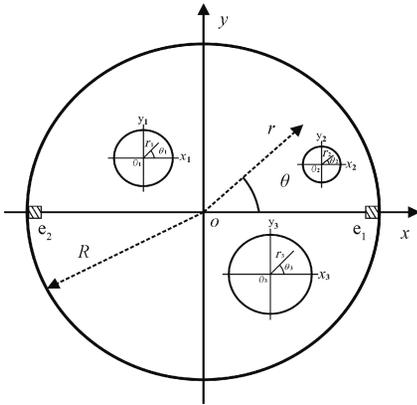


图1 流体中存在多个气泡时测量区域结构图
Fig.1 Structure diagram of measurement area with multiple bubbles in fluid

首先考虑没有气泡时,设势函数的解为 $G(r, \theta) = R(r)\varphi(\theta)$, 采用分离变量法, 在自然边界条件 $\varphi(\theta + 2\pi) = \varphi(\theta)$ 下对式(3)作基本解如式(4)所示:

$$G(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R}\right)^n [A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)] \quad (4)$$

式中: A_n 和 B_n 为求解系数, 定义如式(5)所示:

$$\begin{cases} A_n = \frac{R}{n\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\delta(\theta) - \delta(\theta - \pi)}{R}\right) \cos n\theta d\theta, \\ n = 1, 2, 3, \dots, M \\ B_n = \frac{R}{n\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\delta(\theta) - \delta(\theta - \pi)}{R}\right) \sin n\theta d\theta, \\ n = 1, 2, 3, \dots, M \end{cases} \quad (5)$$

而当气泡存在时电磁流量计的虚电流势为:

$$G_i(r_i, \theta_i) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r_i}{R_i}\right)^{-n} [A_{in} \cos(n\theta_i) + B_{in} \sin(n\theta_i)], \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (6)$$

式中: $A_{in}, B_{in} (i = 1, 2, 3, \dots, M)$ 均为待定系数, 可采用 Schwartz 交替迭代法求解^[29-30]。

则含有 M 个气泡时的电磁流量计虚电势 G_{Fin} 为:

$$G_{Fin} = G(r, \theta) + \sum_{i=1}^M G_i(r_i, \theta_i) \quad (7)$$

式中: G 为不含气泡时电磁流量计的电势分布, 定义域为 $r \leq R$; G_i 为第 i 个气泡引起电磁流量计的电势变化量, 定义域为 $r_i \leq R_i, (i = 1, 2, 3, \dots, M)$ 。

获得虚电势 G_{Fin} 后按式(8)进行运算可得权重函数 W , 实现气泡对电磁流量计权重函数影响的定量研究。

$$W = \frac{\partial G_{Fin}}{\partial y} \quad (8)$$

式(8)即为含有 M 个气泡时电磁流量计截面权重函数 W 的解。

当流体中不存在气泡时, $G_{Fin} = G_0$, 则有:

$$W = \frac{\partial G_{Fin}}{\partial y} = \frac{R^2(R^2 + x^2 - y^2)}{R^4 + 2R^2(x^2 - y^2) + (x^2 + y^2)^2} \quad (9)$$

式中: R 为电磁流量计圆形管道的半径; x, y 为信号电极所在测量截面的二维平面坐标值。

以3个气泡为例, 当电磁流量计流体中存在3个气泡时, $G = G_0 + G_1 + G_2 + G_3$ 。如图2所示为电磁流量计内部不存在气泡和典型的电磁流量计中心存在3个气泡情况下的二维权重函数分布图, 从式(3)和图2(b)中可以发现, 气泡所在位置权重函数值为0, 同时气泡的存在会使得权重函数分布不均匀。同理, 多个不同大小的气泡分布在流体中不同位置时电磁流量计的权重函数分布情况也可以用上述方法计算。

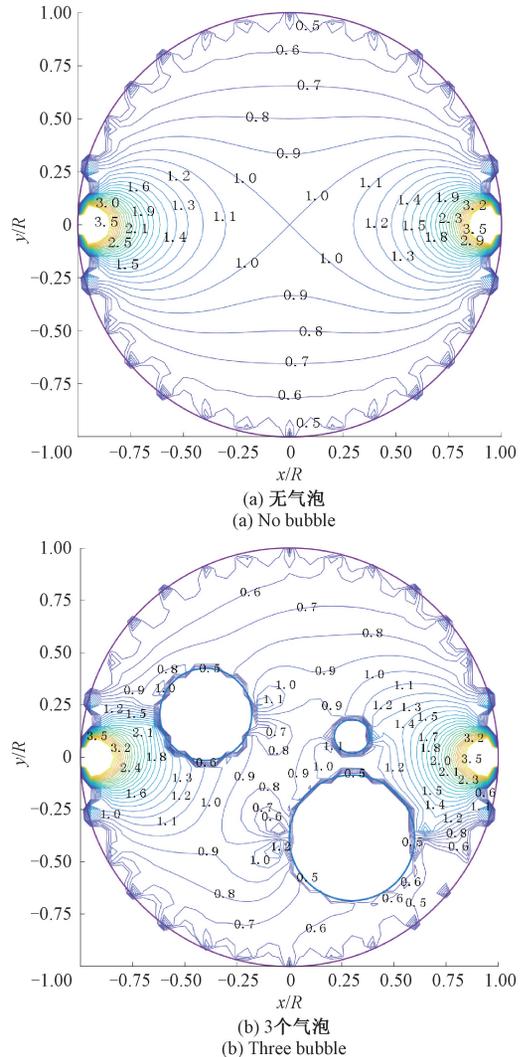


图2 测量截面权重函数分布图

Fig.2 Distribution diagram of weight function of measuring section

2 气泡对电磁流量测量影响的仿真研究与优化方法分析

虽然通过推导获得了气泡存在时的权重函数理论模型,但考虑到理论模型的直观性较低。因此为进一步验证理论模型的正确性,在有限元分析软件 COMSOL 中建立电磁流量测量系统三维模型,研究气泡对电磁流量测量权重函数造成的影响。最终,根据仿真结论提出一种基于图像采集与处理技术的优化方法来降低气泡对电磁流量测量的影响。

2.1 仿真模型建立

在实际的电磁流量测量时,流体中往往含有多个气泡,因此为了更准确、全面的研究气泡对权重函数的影响,建立了如图 3 所示的含多个气泡的电磁流量测量系统三维仿真模型,研究多个气泡随流体流动时权重函数的分布。

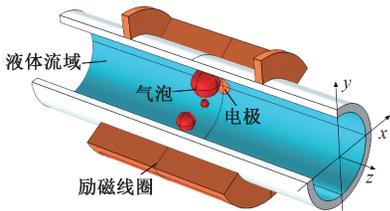


图 3 含多个气泡的电磁流量测量系统三维仿真模型

Fig. 3 Three-dimensional simulation model of electromagnetic flow measurement system with multiple bubbles

为了定量分析气泡对电磁流量测量权重函数分布造成的影响,使用权重函数标准差 W_σ 作为权重函数分布均匀性的度量值^[31]。矢量权重函数标准差定义如式(10)所示。

$$W_\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})^2}{N}} \quad (10)$$

式中: W_i 为测量截面任意位置的权重函数值, \bar{W} 为权重函数的平均值。

2.2 气泡对权重函数的影响仿真研究与分析

为了更准确地研究气泡对权重函数分布造成的影响,首先进行无气泡时的权重函数分布研究,通过有限元仿真获得权重函数分布云图和等值线分布图分别如图 4 和 5 所示。由图 4 和 5 可知,当流道中没有气泡存在时,权重函数分布是轴对称均匀分布,此时电磁流量测量系统的测量精度较高。

当测量截面出现 3 个气泡时,通过有限元仿真获得权重函数分布云图和等值线分布图分别如图 6 和 7 所

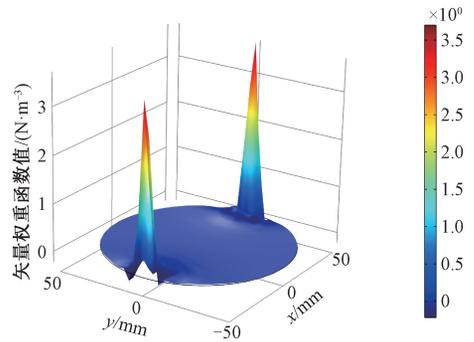


图 4 无气泡时权重函数分布云图

Fig. 4 Cloud image of weight function distribution without bubble

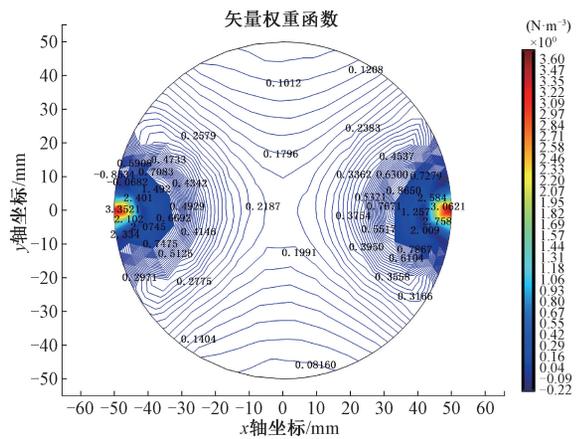


图 5 无气泡时权重函数等值线分布图

Fig. 5 Contour distribution of weight function without bubble

示。由图 6 和 7 可知,气泡会对电磁流量测量系统的权重函数分布产生影响,打破了无气泡时权重函数分布的对称性,导致权重函数分布的不均匀度增加^[14]。

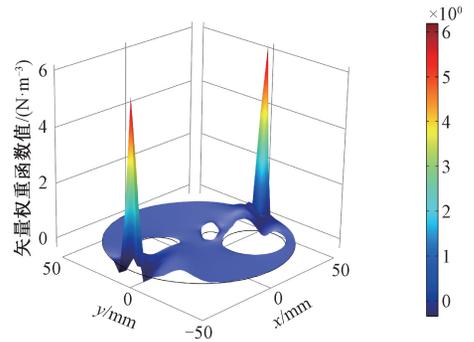


图 6 含有 3 个气泡时权重函数分布云图

Fig. 6 Distribution cloud of weight function with three bubbles

将无气泡时电磁流量测量系统的权重函数分布与含有 3 个气泡时电磁流量测量系统的权重函数分布进行对

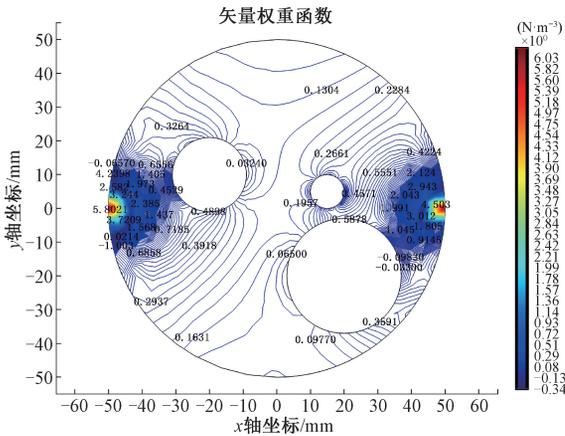


图7 含有3个气泡时权重函数等值线分布图
Fig. 7 Contour distribution of weight function with 3 bubbles

比,对比发现当电磁流量测量系统的测量截面出现气泡将会使得权重函数的分布产生畸变,从而影响电磁流量测量结果。

进一步通过有限元仿真计算得到无气泡时权重函数标准差 W_w 为 1.123 N/m^3 , 含有3个气泡时的权重函数标准差 W_w 为 2.327 N/m^3 。根据式(10)的定义,权重函数标准差越大,则表示接近权重函数平均值的数值越少;权重函数标准差越小,则表示接近权重函数平均值的数值越多,权重函数数值整体分布更均匀。由此可知当测量截面存在气泡时会使得权重函数不均匀度增加,导致电磁流量测量系统的测量精度降低。

2.3 气泡对电磁流量测量的影响优化方法分析

为了降低气泡对电磁流量测量的影响,考虑到基于计算机实现图像采集和处理的技术具有计算速度快,准确度高的优点,能够满足确定流体中气泡参数的需求^[32]。因此,本文提出一种基于图像采集与处理技术的优化方法来降低气泡对电磁流量测量的影响。该方法首先对采集图像进行微元化处理,然后结合气泡对电磁流量测量的影响特性,通过PC机将影响特性与实际采集图像处理结果进行数据融合,最终实现电磁流量测量精度的提高。

根据前文所述的气泡对电磁流量测量影响仿真分析结果可知,气泡在测量截面对权重函数分布的均匀性会造成较大影响,因此利用微元化处理,将电磁流量测量系统的测量截面划分为1个圆形区域和14个圆环区域,共计15个区域。每一个区域内使用半径为0.5 mm的气泡进行填充,并使气泡充满整个区域。通过有限元仿真软件获得每一个区域内的影响系数,其微元化模型如图8所示,白色为划分出来的一个环形区域,深灰色为平铺的气泡微元,浅灰色为测试流体。

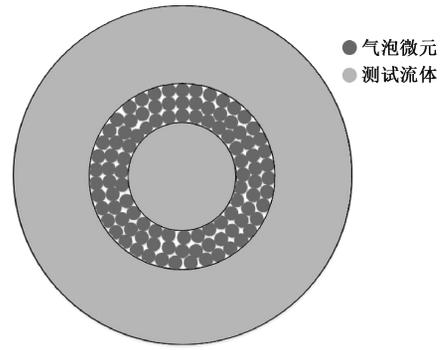


图8 流道气泡环形分布微元化模型

Fig. 8 A micro-model of annular bubble distribution in flow channel

依据微元化处理方法,结合有限元仿真软件对气泡环形分布时测量截面的权重函数分布情况进行研究。取一个圆形区域在环形区域内与其边界相切,并用0.5 mm气泡填充,获得部分偏心圆域气泡存在环形区域内的矢量权重函数分布如图9所示。

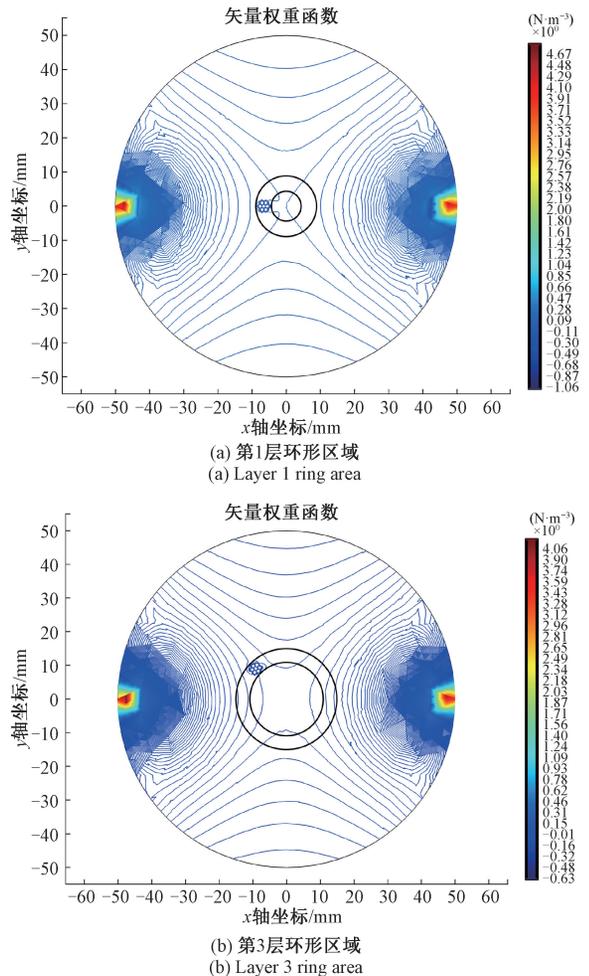


图9 气泡环形分布矢量权重函数等值线图
Fig. 9 Contour map of bubble ring distribution vector weight function

从图9所示的权重函数等值线分布可以看出,随着环形区域逐渐向外扩展,圆域气泡在不同的环形区域随机分布,矢量权重函数分布受气泡影响产生的畸变范围和畸变程度均逐渐增加。

通过有限元仿真得到的影响系数变化趋势如图10所示,其中数据正负表示对测量结果产生的影响方向,正数表示对测量结果产生正向影响,会造成电磁流量测量值偏大;负数表示对测量结果产生负向影响,会导致电磁流量测量值偏小。

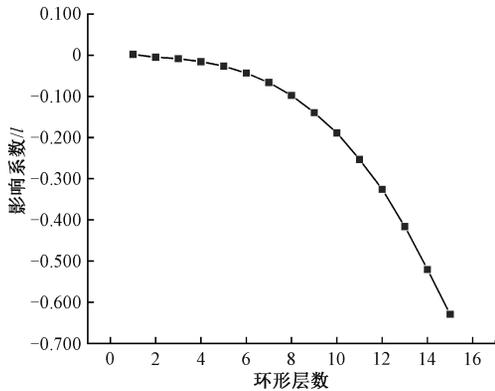


图10 环形区域气泡影响系数变化趋势

Fig. 10 The bubbles in the annular region influence the variation trend of the coefficient

为方便后续的图片处理算法设计,需要进一步将每个环形区域气泡影响系数进行归一化处理。首先将影响系数的总和视作单位数据1,计算出每一个环形区域内的影响系数在整体影响系数当中所占的比例;然后进行加权处理,将影响系数调整在0~1之间,记为影响分量计算系数 k_i ,得到环形区域气泡影响分量计算系数的变化趋势如图11所示。

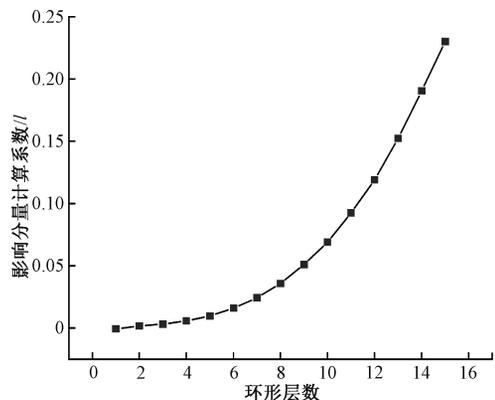


图11 影响分量计算系数变化趋势

Fig. 11 Influence component calculation coefficient variation trend

由图11可知,气泡越靠近测量截面外侧的环形区域,电磁流量测量系统受到的影响越大。因此,为了降低气泡对电磁流量测量结果的影响,将每一个环形区域内的含气率乘以对应环形区域的影响分量计算系数再求和,即可获得流道内所有气泡对电磁流量测量产生影响总和的相反数,并将其定义为补偿流量 $-\Delta_{\text{流量}}$,计算如式(11)所示:

$$-\Delta_{\text{流量}} = \left[\sum_{i=1}^{15} a_i \times k_i \right] \quad (11)$$

式中: i 表示环形层数, a_i 表示第 i 层含气率, k_i 表示第 i 层影响分量计算系数。

通过式(11)计算得到补偿流量后,在实际测试流量的基础上再加上补偿流量,即可实现气泡影响下电磁流量测量系统测量结果偏差的反向补偿。

3 实验测试与分析

3.1 实验平台搭建

为验证本文提出的气泡影响优化方法的有效性和正确性,在西南石油大学石油与天然气装备教育部重点实验室搭建实验平台如图12所示,并完成实验测试。

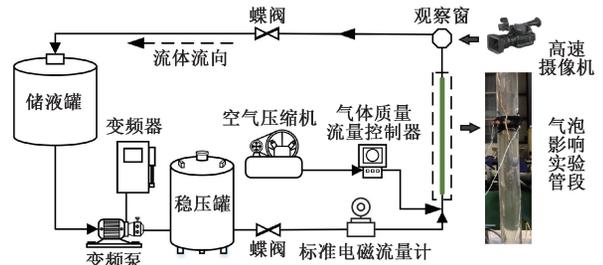


图12 实验平台系统图

Fig. 12 Diagram of the experimental platform system

在实验平台中,通过设置变频器频率的大小调整变频泵的转速,设定变频器最小工作频率为8 Hz,使得流出液体无气泡,同时控制管道内流体的流速;流过稳压罐后的水流压力保持稳定,使得在循环试验中流过标准电磁流量计的流体流速和压力恒定且无气泡。电磁流量测量系统中的气体由空气压缩机产生,通过调节气体质量流量控制器控制气体流速稳定,最终与管道内的液体混合形成不同含气率的两相流流体。为便于观察流道中气泡的分布情况,实验管段选用透明有机玻璃管,并在管道上端设置具有良好聚焦效果的观察窗,用于高速摄像机进行流道内测量截面的图像采集。

3.2 气泡图像处理算法设计

从高速摄像机采集的结果仅为图片状态,因此提取图片中包含的气泡信息至关重要。为了尽可能准确和完

整的提取到图片中气泡的参数信息,本文借助计算机进行图像处理算法设计,使用 MATLAB 软件完成图像的预处理,并对图像中的气泡信息进行提取和计算。

图像质量好坏从一定程度上对气泡信息识别和提取效果具有直接影响,所以在进行图像分析计算之前必须先进行图像预处理。通过对比常见的均值滤波、高斯滤波以及中值滤波方法的优缺点,本文选择既能平滑噪声又能较好保留气泡细节信息的中值滤波方法进行图像预处理^[33]。将如图 13 所示的原始图像进行预处理,获得预处理后的二值化图像如图 14 所示。



图 13 原始图像

Fig. 13 The original image

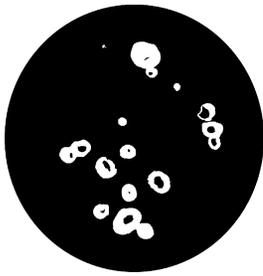


图 14 预处理后二值图像

Fig. 14 Pre-processed binary image

通过上述的图像处理算法可以获得图像中气泡的大小和位置等参数信息,获得图像当中对应区域气泡像素面积及其对应占比,利用气泡像素面积除以总像素面积获得对应环形区域内的气泡所占比例^[34-35]。

3.3 气泡影响特性优化实验与分析

1) 流速标定实验

为研究气泡对电磁流量测量系统影响优化效果,首先在不注入气泡的情况下,进行电磁流量测量系统标定实验。以标准电磁流量计的示值流量为依据,控制变频器工作频率实现循环系统的流量调节,设置数据采集点,分别记录标准电磁流量计的示值流量和本次研究使用的电磁流量测量系统输出电压。获得循环系统流量与电磁流量测量系统输出电压的对应关系如图 15 所示。

将流量测试数据进行进一步的拟合分析,得到电磁流量测量系统输出电压与循环系统流量具有如下的线性

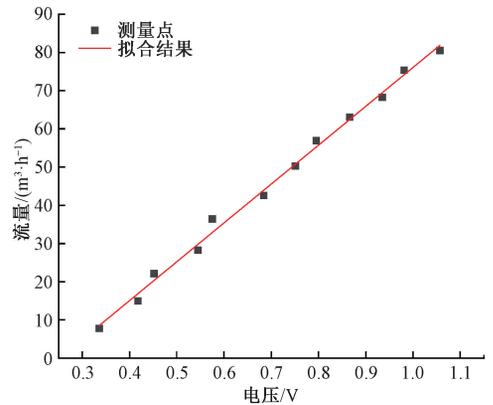


图 15 输出电压与流量对应关系

Fig. 15 Relationship between output voltage and flow

关系:

$$y = 101.7x - 25.6 \quad (12)$$

式中: x, y 分别表示电磁流量测量系统输出电压与循环系统流量大小,拟合可决系数 R^2 达到 0.994 5,这表明测量系统输出电压与循环系统流量具有良好的线性关系。

2) 定流速优化实验与分析

在完成了无气泡情况下的流速标定实验后,考虑到流速对图像采集的影响,需要先进行定流速条件下的气泡影响优化实验。在实验过程中将变频器频率调至 15 Hz,使得流过标准电磁流量计的循环系统流量为 26.86 m³/h。在流速不变的条件下,通过气体流量控制器调节进气流量在标准表显示流量和进气流量总和上的占比,控制流道内流体含气率分别 5%、10%、15%。每种含气率测量 10 组数据,得到电磁流量测量系统在不同含气率条件下的测量流量如图 16 所示。

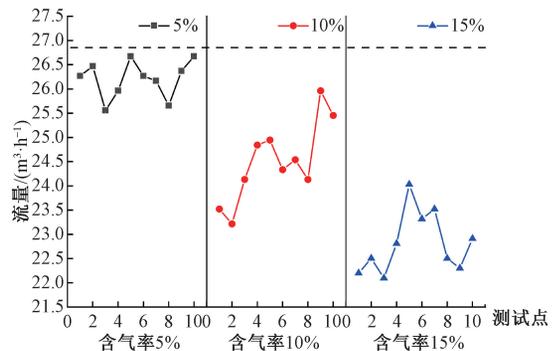


图 16 不同含气率条件下的测量流量

Fig. 16 Measured flow rate under different gas holdup conditions

由图 16 可知,当含气率为 5% 时,系统测试的流量结果与不存在气泡时的测量结果差距较小,测量的 10 组数据组内波动较为微弱,测量流量的最大相对误差为 4.86%;当含气率为 10% 时,测量的 10 组数据组内波动

增强,此时测量流量的最大相对误差为 13.57%,这说明流量受气泡的影响明显增加;当含气率为 15%时,测量的 10 组数据组内波动进一步增强,组内流量最大偏差达到 1.933 m³/h,测量流量的最大相对误差为 17.73%,这表明气泡对电磁流量测量系统的影响进一步增强。综上所述,在流速相同的情况下,含气率越高,气泡对电磁流量测量系统产生的影响越大。

根据本文提出的优化方法对上述实验数据进行补偿,获得补偿后的流量结果如图 17 所示。

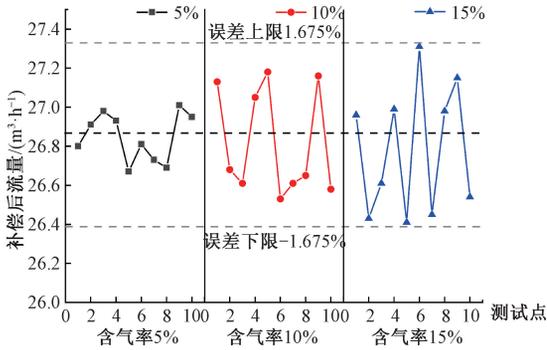


图 17 补偿后流量

Fig. 17 Flow after compensation

由图 17 可知,流道内流体的含气率越低本文所述优化方法的效果越好,随着含气率的增加,优化效果逐渐降低。当含气率为 5%时,补偿后的测量流量最大相对误差为 0.7%;而当流道内含气率增加到 10%时,补偿后的测量流量最大相对误差为 1.22%;当流道内含气率进一步增加到 15%时,补偿后的测量流量最大相对误差为 1.675%。虽然本文所述的优化方法应用后仍然存在一定的误差,但相比于优化前的测量结果已经有了很大的改善。通过应用本文提出的优化方法,测量流量的相对误差最大降低幅度达到 91%。可见,本文所述优化方法有效降低了电磁流量测量系统受流体中气泡影响的敏感程度,证明了本文所述优化研究的可靠性及正确性。

3) 变流速优化实验与分析

仅在定流速的条件下不能全面地验证本文所述优化方法的适用性,因此需要进行变流速条件下的气泡影响优化实验来进一步验证优化方法的普适性。在实验过程中将变频器频率以 3 Hz 的变化梯度从 7 Hz 增加到 40 Hz,分别进行流道内流体不含气、含气率为 5%、含气率为 10% 以及含气率为 15% 4 种情况下的实验测试。在系统输出电压稳定后记录实验数据,获得不同含气率情况下的输出电压变化趋势如图 18 所示。

由图 18 可知,随着测点频率增加,4 种不同含气率情况下的曲线发散程度也随之增加,并且测点频率较低时,气泡存在所带来的系统输出电压绝对误差较小,测点

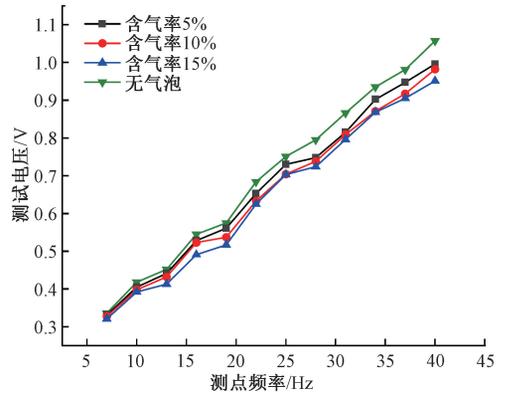


图 18 不同含气率系统输出电压变化趋势

Fig. 18 Variation trend of output voltage of system with different gas holdup

频率增加,气泡存在所带来的系统输出电压绝对误差逐渐增加。纵向对比同一测点频率的不同含气率条件下的系统输出电压可以看出,气泡的存在会导致电磁流量测量系统的输出电压出现偏小的情况,且随着含气率的增加气泡产生的影响逐渐增加。

根据式 (12) 所示的电磁流量测量系统输出电压与流量对应关系获得测试点的测量流量,并计算出在不同含气率条件下测量流量的相对误差。当变频器频率为 28 Hz,含气率为 5%时,测量流量的最大相对误差为 8.65%;当变频器频率为 10 Hz,含气率为 10%时,测量流量的最大相对误差为 12.03%;当变频器频率为 13 Hz,含气率为 15%时,测量流量的最大相对误差为 19.47%。进一步对测量流量通过本文所述优化方法进行补偿并计算其误差,得到电磁流量测量系统经过补偿后的流量误差分布如图 19 所示。

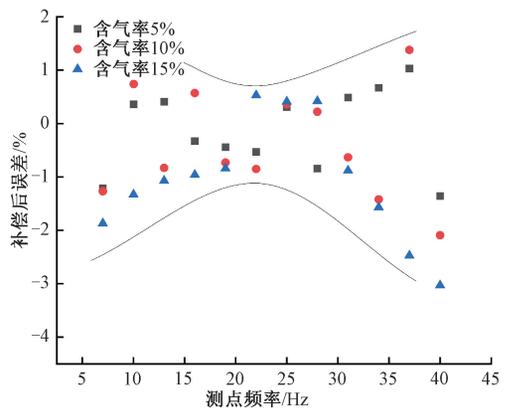


图 19 补偿后流量误差分布

Fig. 19 Flow error distribution after compensation

由图 19 可知,采用本文所述优化方法补偿后的测量流量相对误差明显降低。当含气率为 5%时,测量流量的

最大相对误差从 8.65% 降低到 1.36%, 降低幅度为 84.28%; 当含气率为 10% 时, 测量流量的最大相对误差从 12.03% 降低到 2.09%, 降低幅度为 82.63%; 当含气率为 15% 时, 测量流量的最大相对误差从 19.47% 降低到 3.03%, 降低幅度为 84.44%。同时, 流量补偿后误差分布在一个哑铃形区域内, 这表明在 20~25 Hz 内补偿后流量误差最小, 在低流速和高流速时补偿后流量误差较大。其原因是在低流速测量时电磁流量测量系统具有一定的不稳定性, 导致低流速测量段误差偏大, 补偿后误差也较大; 在高流速时, 由于摄像机帧率限制, 导致采集的图像出现模糊、虚影等情况^[36], 无法准确获得管道中气泡的分布情况, 因此补偿后误差较大。后期可通过提高摄像机参数和优化图像处理等手段改善补偿效果。

由前述分析可得, 本文提出的基于图像采集与处理技术的优化方法能够有效减小气泡对电磁流量测量造成的影响, 在不同含气率情况下对气泡存在产生的误差降低幅度均达 82.5% 以上, 优化后的电磁流量测量误差在 $\pm 3.03\%$ 以内。虽然补偿后的流量数据仍然存在一定的偏差, 但足以验证本研究获得的气泡对电磁测量系统的影响特性以及气泡影响优化方法的有效性和正确性。

4 结 论

本文针对气液两相流中电磁流量测量结果受气泡影响的优化补偿方法进行了研究, 通过理论建模、有限元仿真和实验研究, 验证了本文提出的优化方法的正确性和可行性, 研究为气液两相流中电磁测量受气泡影响的优化问题提供了理论和技术支撑。本研究的主要内容如下:

1) 基于矢量权重函数理论, 建立了气泡对权重函数影响的理论模型, 求得含有 M 个气泡时的电磁流量计虚电势 G_{Fin} , 可定量分析多个不同大小的气泡分布在流体中不同位置时对电磁流量计权重函数分布造成的影响。

2) 通过有限元仿真, 研究了多个气泡随流体流动时权重函数的分布, 通过权重函数标准差 W_{σ} 评价指标, 分析得到测量截面存在气泡时会使得权重函数不均匀度增加, 导致电磁流量测量系统的测量精度降低; 在此基础上, 本文提出一种基于图像采集与处理技术的电磁流量测量受气泡影响的优化方法, 开发了气泡图像处理算法, 实现了流道不同区域内含气率的自动分析。

3) 搭建实验平台进行实验验证, 使用气泡图像处理算法获得图像中气泡的大小和位置等参数信息, 利用气泡像素面积除以总像素面积获得对应环形区域内的气泡所占比例。实验结果表明, 在流量为 26.86 m³/h 时, 本文所提出的优化方法针对气泡存在带来的误差最大降低幅度可达到 91%。并且在不同流速的不同含气率情况下

对因气泡存在产生的测量误差降低幅度均在 82.5% 以上, 优化后的电磁流量测量误差在 $\pm 3.03\%$ 以内。

综上所述, 本文提出的优化方法可以有效降低电磁流量测量受气泡影响产生的误差, 为进一步提高气泡影响下的电磁流量测量精度和实现气液两相流电磁测量提供技术支持。

参考文献

- [1] LONG Z, PAN Z, WANG W, et al. Microplastic abundance, characteristics, and removal in wastewater treatment plants in a coastal city of China [J]. *Water Research*, 2019, 155: 255-265.
- [2] SHERCLIFF J A, The theory of electromagnetic flow measurement [M]. Cambridge University Press, 1962: 22-27.
- [3] KANG D H, AHN Y C, DO OH B, et al. Advanced electromagnetic flowmetry for slug flow: Numerical signal prediction and calibration [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2004, 30(6): 585-614.
- [4] LIU C, YANG S, CAO Z, et al. 3D simulation on influence of insulating contents to contactless electromagnetic induction flowmeter [C]. *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, 2012, 1428(1): 251-257.
- [5] XU L J, LI X M, DONG F, et al. Optimum estimation of the mean flow velocity for the multi-electrode inductance flowmeter [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(8): 1139.
- [6] YU X L, XU K J. In situ calibration of a permanent-magnet sodium flowmeter without a bluff body based on multi-pair electrode signal subtraction [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-10.
- [7] YIN S, LI B. A new approach for solving weight functions of electromagnetic flowmeters using resistive network modeling [J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2013: 3304-3370.
- [8] CAO Z, SONG W, PENG Z, et al. Coil shape optimization of the electromagnetic flowmeter for different flow profiles [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2014, 40: 256-262.
- [9] WIEDERHOLD A, BOECK T, RESAGK C. Detection and characterization of elongated bubbles and drops in two-phase flow using magnetic fields [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(8): 085303.
- [10] ZHOU F, YANG Q F, LIN K. Evaluation index and

- performance structure optimization of magnetic field uniformity of complex multiphase flow electromagnetic flowmeter [J]. *Measurement and Control*, 2022, 55(1-2):62-71.
- [11] KRAFFT R, HEMP J, SANDERSON M L. Investigation into the use of the electromagnetic flowmeter for two-phase flow measurements [C]. *IEE Colloquium on Advances in Sensors for Fluid Flow Measurement*, IET, 1996: 5/1-5/4.
- [12] CHA J E, AHN Y C, KIM M H. Flow measurement with an electromagnetic flowmeter in two-phase bubbly and slug flow regimes [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2002, 12(5-6): 329-339.
- [13] ZHANG X Z, LI Y. Calculation of the virtual current in an electromagnetic flow meter with one bubble using 3D model[J]. *ISA Transactions*, 2004, 43(2): 189-194.
- [14] 张小章. 流动的电磁感应测量理论和方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 17-93.
- ZHANG X ZH. Theory and method of electromagnetic induction measurement of flow[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 17-93.
- [15] LI Y W, KONG L F, LIU L B. Theory analysis for the virtual current distribution in an electromagnetic flowmeter with one bubble [C]. *The 2nd International Conference on Information Science and Engineering*, IEEE, 2010: 1649-1652.
- [16] WANG Y M, KONG L F. The effect of consecutive bubbles on the response characteristics in electromagnetic flow meter [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2012, 8(1): 355-362.
- [17] DENG X, LI G, WEI Z, et al. Theoretical study of vertical slug flow measurement by data fusion from electromagnetic flowmeter and electrical resistance tomography[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2011, 22(4): 272-278.
- [18] MA L, MCCANN D, HUNT A. Combining magnetic induction tomography and electromagnetic velocity tomography for water continuous multiphase flows [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(24): 8271-8281.
- [19] SHI Y Y, WANG M. Analytical investigation of an inductive flow sensor with arc-shaped electrodes for water velocity measurement in two-phase flows [J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2015, 41: 90-96.
- [20] SHI Y Y, WANG M, SHEN M H, et al. Optimization of an electromagnetic flowmeter for dual-parameter measurement of vertical air-water flows [J]. *Journal of Mechanical & Technology*, 2015, 29(7): 2889-2895.
- [21] YANG Y, WANG D, NIU P M, et al. Measurement of vertical gas-liquid two-phase flow by electromagnetic flowmeter and image processing based on the phase-isolation [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 101: 87-100.
- [22] YANG Y, HA W, ZHANG H, et al. A novel horizontal gas-liquid pipe separator for wet gas based on the phase-isolation [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, 178: 315-327.
- [23] JIANG Y L. Study on weight function distribution of hybrid gas-liquid two-phase flow electromagnetic flowmeter [J]. *Sensors*, 2020, 20(5): 1431.
- [24] LI X J, SUN L J. Research on the influence of non-conductor on the weight function of electromagnetic flowmeter [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1952(3): 032081.
- [25] TANG Z, JIN N, YANG Q, et al. Measurement of oil-gas-water flows in vertical pipes using electromagnetic flowmeter and dual-conductance sensors [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-12.
- [26] 葛亮, 阳彩霞, MARK R, 等. 气泡对电磁流量测量的影响特性研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(3): 15-28.
- GE L, YANG C X, MARK R, et al. Study of the influence of bubbles on electromagnetic flow measurement [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(3): 15-28.
- [27] 葛亮, 白洋, 肖小汀, 等. 气侵对井下环空流量电磁测量系统的影响研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(6): 63-75.
- GE L, BAI Y, XIAO X T, et al. Influence of gas penetration on electromagnetic measurement system of downhole annular flow [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(6): 63-75.
- [28] BEVIR M K. The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970, 43(3): 577-590.
- [29] YINGWEI L, LINGFU K, LIBING L. Virtual current characteristics of electromagnetic flow with spherical bubbles [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2011, 7(3): 762-769.
- [30] ZHANG X Z. On finding the virtual current in an

- electromagnetic flow meter containing a number of bubbles by two-dimensional analysis [J]. *Measurement Science and Technology*, 1999, 10(11): 1087.
- [31] 葛亮, 黄凯强, 田贵云, 等. 基于电磁检测机理的井下环空流量测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(12): 161-173.
GE L, HANG K Q, TIAN G Y, et al. Research on the measurement method of downhole annular flow based on the electromagnetic detection mechanism [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(12): 161-173.
- [32] 李华军, 刘光宇, 余善恩. 微小管道两相流流动图像畸变校正研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(4): 239-245.
LI H J, LIU G Y, YU SH EN. Flow image distortion correction for two-phase flow in micro/mini pipes [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(4): 239-245.
- [33] BINDAL N, GHUMAAN R S, SOHI P J S, et al. A systematic review of state-of-the-art noise removal techniques in digital images [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2022: 1-24.
- [34] ALTEAIMI A A M, BEN OTHMAN M T. Robust interactive method for hand gestures recognition using machine learning [J]. *Cmc-Computers Materials & Continua*, 2022, 72(1): 577-595.
- [35] 潘志成, 赵陆海波, 张彪, 等. 多尺度气泡尺寸分布数字图像测量方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(7): 129-137.
PAN ZH CH, ZHAO L H B, ZHANG B, et al. Multi-scale bubble size distribution measurement by digital imaging technique [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7): 129-137.
- [36] 白立春, 孙劲光, 高艳东. 气泡在超声场中绕圈运动的高速摄影及其图像分析 [J]. *物理学报*, 2021, 70(5): 223-229.
BAI L CH, SUN J G, GAO Y D. High speed photography and image analysis of bubbles moving

in circles in ultrasonic field [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(5): 223-229.

作者简介



E-mail: cgroad@163.com

Ge Liang received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Southwest Petroleum University in 2007 and 2010, and received his Ph. D. degree in from Sichuan University in 2017. He is currently a professor at Southwest Petroleum University. His main research direction is detection technology research in complex environment.



袁一萍, 2020 年于西南石油大学获得学士学位, 现为西南石油大学硕士研究生, 主要研究方向为电磁检测。

E-mail: Yuancan9@163.com

Yuan Yiping received her B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2020. She is currently a master student at Southwest Petroleum University. Her main research interest is electromagnetic detection.



E-mail: wenzeng@cqu.edu.cn

Zeng Wen (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2011. He is currently a Ph. D. advisor at Chongqing University and a regular researcher at the State Key Laboratory of Power Transmission and Distribution Equipment and System Safety and New Technology. His main research interests include instrumentation technology, gas sensing and first-principles computing.