

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104753

# 气泡对电磁流量测量的影响特性研究\*

葛亮<sup>1</sup> 阳彩霞<sup>1</sup> Mark Robinson<sup>2</sup> 甘芳吉<sup>3</sup> 韦国晖<sup>4</sup> 肖小汀<sup>5</sup>

(1.西南石油大学机电工程学院 成都 610500;2.纽卡斯尔大学工程学院 纽卡斯尔 NE1 7RU;3.四川大学机械工程学院 成都 610065;4.西南石油大学理学院 成都 610500;5.西南石油大学电气信息学院 成都 610500)

**摘要:**电磁流量计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。定量分析气泡在电磁流量计测量过程中产生影响的规律对提高电磁流量测量精度和实现气液两相流测量具有重要工程意义。针对上述问题,首先从权重函数角度入手,采用解析法建立了气泡尺寸、气泡偏心以及气泡数量对电磁流量测量影响的理论模型;其次,通过仿真和实验研究了管径为100 mm,圆形点电极半径为5 mm的电磁流量系统受气泡不同状态的影响,并采用输出电压灵敏度分析了气泡不同状态下对电磁流量测量的影响规律。研究表明,随着气泡尺寸增加其影响大小随之增加,气泡尺寸变化过程中影响在0.3%~5%范围内变化,最大为5%;气泡(直径为10 mm)沿电极方向偏心产生的影响在0.25%~0.6%范围内,且随偏心距离的增加而增加;气泡沿垂直电极方向偏心距离增加产生的影响微小,在-0.2%~0.2%范围内波动;同时,在气泡流动过程中,气泡越靠近电极截面影响越大并在电极截面位置产生影响最大值,单气泡最大值分别为0.18%、0.22%、-0.20%,随着气泡数量增加产生的影响逐渐增加,3气泡和6气泡影响最大值分别为0.36%和2.3%。本研究补充和完善了电磁法测量气液两相流权重函数相关理论,得出气液两相流中气泡不同状态对电磁流量测量系统的影响规律,为提高电磁流量测量检测精度和实现气液两相流电磁测量提供技术支持。

**关键词:**气泡影响;权重函数;电磁流量测量;有限元

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

## Study of the influence of bubbles on electromagnetic flow measurement

Ge Liang<sup>1</sup> Yang Caixia<sup>1</sup> Mark Robinson<sup>2</sup> Gan Fangji<sup>3</sup> Wei Guohui<sup>4</sup> Xiao Xiaoting<sup>5</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. School of Engineering, Newcastle University, Newcastle NE1 7RU, UK; 3. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 4. College of Science, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 5. College of Electric and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** The electromagnetic flowmeter plays an important role in the industrial production. However, easily influenced by the bubbles in the fluid, fluctuations often appear in the measurement results, leading to a lower measurement accuracy. Quantitative analysis of the influence of bubbles in the electromagnetic flowmeter measurement process has important engineering significance for improving the accuracy of electromagnetic flow measurement and realizing gas-liquid two-phase flow measurement. In view of this, starting with the weight function, the analytic method is used to establish the theoretical model of bubble size, bubble eccentricity, and the number of bubbles. Then, by simulation and experiments, the influence of different states of bubbles on the electromagnetic flow system with a diameter of 100 mm and circular point electrodes with a 5 mm radius is studied. The output voltage sensitivity is used to analyze the influence of different states of bubbles on electromagnetic flow measurement. According to the research results, with the increasing of the bubble size, its impact on the electromagnetic flow measurement is within the range of 0.3%~5%, the maximum of 5%. The influence of bubbles with a diameter of 10 mm ranges within 0.25%~0.6% along the eccentricity direction of the electrode and increases with the

收稿日期: 2021-09-22 Received Date: 2021-09-22

\*基金项目:国家自然科学基金面上项目(51974273)、成都市国际科技合作项目(2020-GH02-00016-HZ)、南充市与西南石油大学科技战略合作专项项目(SXHZ026/SXHZ038)资助

increasing of the eccentricity distance. The influence of the increasing eccentric distance along the direction perpendicular to the electrode has a tiny impact on the measurement. It fluctuates within  $-0.2\% \sim 0.2\%$ . Meanwhile, with the bubble flow, a shorter distance between the bubbles and the electrode cross-section leads to a larger impact while the impact gets its maximum at the electrode cross-section. The maximum values for a single bubble are  $0.18\%$ ,  $0.22\%$ ,  $-0.20\%$ . The influence is enhanced with the increasing in the number of bubbles. The maximum values in the case of 3 bubbles and 6 bubbles are  $0.36\%$  and  $2.3\%$ . This paper improves the theories related to the weight function of electromagnetic measurement of gas and fluid double-phase flow, obtains the influences of different states of bubbles on the electromagnetic flow measurement system, and provides technical support for the improvement of electromagnetic flow measurement accuracy and realization of gas and fluid double-phase flow.

**Keywords:** influence of bubbles; weight function; electromagnetic flow measurement; finite element

## 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工作压力、温度、黏度以及电导率等物性参数无关,被广泛用于单相流参数测量<sup>[1]</sup>。然而,在化学、食品和核反应堆工程中,流体不可避免地掺杂气体,形成含有气泡的气液两相流,气泡在电磁流量测量中对权重函数产生影响,导致电磁流量计测量结果偏差,从而降低精度<sup>[2,4]</sup>。因此定量研究气泡对电磁流量计流量测量的影响,对掌握电磁技术在气液两相流中的测量规律、优化电磁流量计测量精度具有重要实际工程意义。

为研究气泡等非导电介质对电磁流量测量的影响规律,文献[5-11]分别从权重函数理论求解、电极优化以及气泡对虚电流分布的影响等方面进行了大量前期研究,为气液两相流电磁测量研究指明方向。Cha 等<sup>[12-13]</sup>对电磁流量计测量两相流气泡和段塞流进行研究,结合 CCD 高速摄像机进行实验,获得单相流与双相流输出对应关系,但当导电差异变大时对应关系适用度下降明显。Wang 等<sup>[14]</sup>开发了一种电容式的电磁流量计用于测量油水两相流,但电容式的电磁流量计输出信号微弱,流量信号提取难度大,受外界噪声干扰大,易被测量的流体污染降低测量精度。Wang 等<sup>[15]</sup>建立了基于气液两相流的函数表达来解决重量函数的一般模型,获得电磁流量计的矢量权重函数的表达,从仿真进行研究。Jiang 等<sup>[16]</sup>与 Yang 等<sup>[17]</sup>使用相隔离方法将入口流动改变为均匀、对称的旋流芯环流量,构建了液体流量测量模型。结合图像处理技术测量空隙率,实现高含气率的两相流量测量,并开发了自动图像处理算法。但存在阻流件,易造成堵塞,且对相机参数要求高,成本高,只能测量透明度高的流体。Yang 等<sup>[18]</sup>在相隔离之后,用相隔离诱导的微气泡用作示踪剂,确定其速度。然而,气液两相气泡的形态和运动特征参数重建精度低,且对不透明流体无法有效识别。

目前,针对气液两相流电磁测量中气泡的影响问题,研究学者主要从气泡对虚电流产生的影响入手,并多集中于对单个气泡在某一固定位置的仿真研究,同时未进

行多个气泡及动态流动仿真,并缺乏实验验证。权重函数作为电磁流量测量精度的关键之一,受气泡影响明显,但现有研究关于气泡对权重函数影响的理论研究较少,多集中于单个气泡存在情况下的虚电流密度函数分布理论研究,缺乏多个气泡存在时的权函数分布理论研究,因此本研究从上述角度完善利用电磁法测量气液两相流及气泡对权重函数影响的相关理论。

综上所述,本研究开展气泡对电磁流量测量影响的研究,首先建立气泡尺寸、气泡偏心及气泡数量对权重函数影响的理论模型,其次,进行气泡对权重函数产生影响的仿真研究,最后通过实验对理论模型和仿真研究进行验证。

## 1 气泡对电磁流量测量影响的理论研究

为定量的研究气泡对电磁流量测量产生的影响,从权重函数角度入手,将气泡产生影响的因素细分为气泡尺寸、气泡偏心以及多个气泡同时存在 3 种状态,并分别建立权重函数的理论模型。通过权重函数理论模型的建立,定量分析气液两相流中气泡对电磁流量产生的影响。

### 1.1 权重函数理论基础

由 MAXWELL 方程经过数学推导后可得电磁流量计基本方程。目前大多数研究者广泛应用由 BEVIR<sup>[19]</sup>得出的积分公式,如式(1)所示。

$$U_2 - U_1 = \int_A \vec{W} \cdot \vec{v} dA \quad (1)$$

式中: $U_2 - U_1$  为两电极间的电势差; $A$  为对所有空间进行积分; $\vec{v}$  为流体速度; $\vec{W}$  为矢量权重函数,它是一个只由电磁流量计本身结构决定的量,其表达式如式(2)所示。

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

式中: $\vec{j}$  为虚电流密度矢量,它是一个由电极结构所决定的量, $\vec{B}$  为磁感应强度。

### 1.2 气泡尺寸对权重函数的影响

为研究气泡尺寸对流量计权重函数产生的影响,本

文基于权重函数基础理论,求解电极点电极且磁场均匀的电磁流量计在气泡位于流道中心时的权重函数。当气泡位于流道中心轴线上时(两电极 e1, e2 在 x 轴上),其二维测量模型如图 1 所示。

其中  $a$  为气泡的半径,  $R$  为测量管半径。此时类似环空情况<sup>[20-21]</sup>,在极坐标下虚电势  $G$  的边值问题可表示为式(3)所示。

$$\frac{\partial}{\partial r}(r \frac{\partial G}{\partial r}) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 G}{\partial \theta^2} = 0 \quad (3)$$

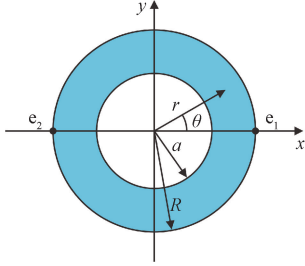


图 1 含单个气泡时的电磁测量系统截面图

Fig. 1 Cross-sectional view of the electromagnetic measurement system with one bubble

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial r} \Big|_{r=a} = 0 \\ \frac{\partial G}{\partial r} \Big|_{r=R} = \begin{cases} \frac{\delta(\theta - \frac{\pi}{2})}{R} \\ -\frac{\delta(\theta + \frac{\pi}{2})}{R} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

满足式(4)的  $G$  通解如式(5)所示:

$$G(r, \theta) = C_0 + D_0 \ln r +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} (C_n r^n + D_n r^{-n}) (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta) \quad (5)$$

把边界条件代入求解得到解如式(6)所示:

$$\begin{cases} G_1 = \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{r}{R}\right)^n + \left(\frac{a}{R}\right)^{2n} \left(\frac{R}{r}\right)^n}{n \left[1 - \left(\frac{a}{R}\right)^{2n}\right]} \cos n\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ G_2 = \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{r}{R}\right)^n + \left(\frac{a}{R}\right)^{2n} \left(\frac{R}{r}\right)^n}{n \left[1 - \left(\frac{a}{R}\right)^{2n}\right]} \cos n\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (6)$$

$G$  为  $G_1$ 、 $G_2$  的和,可表示如式(7)所示:

$$G = G_1 + G_2 = \frac{2}{\pi} \times$$

$$\sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\left(\frac{r}{R}\right)^n + \left(\frac{a}{R}\right)^{2n} \left(\frac{R}{r}\right)^n}{n \left[1 - \left(\frac{a}{R}\right)^{2n}\right]} \cos n\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (7)$$

结合式(2)可得此时权重函数表达式如(8)所示:

$$W(r, \theta) = B_0 \frac{\partial G}{\partial r} \sin \theta + B_0 \frac{\partial G}{r \partial \theta} \cos \theta =$$

$$\frac{2B_0}{\pi R} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{1 - \left(\frac{a}{R}\right)^{2n}} \times \left\{ \left(\frac{r}{R}\right)^{n-1} \sin \left[ (n-1)\theta - n \frac{\pi}{2} \right] + \left(\frac{a}{R}\right)^{2n} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \sin \left[ (n+1)\theta - n \frac{\pi}{2} \right] \right\} \quad (8)$$

为了更直观地观察气泡尺寸对电磁流量计权重函数分布产生的影响,利用计算机根据式(8)绘制出气泡存在于管道中心时不同尺寸的权重函数分布,此处为了便于观察将图中横纵坐标采用  $r/R$  表示,即处理为无量纲常量。分别选取气泡半径为 5 mm 和 11 mm 两种情况进行绘制,获得对应的矢量权重函数分布如图 2 所示。

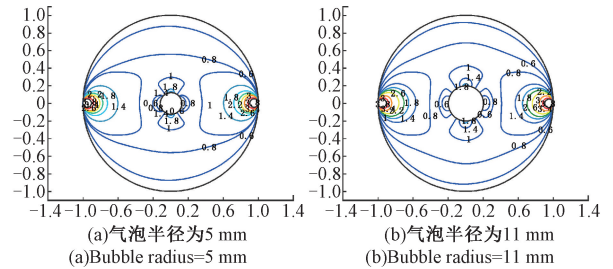


图 2 同心气泡权重函数分布图

Fig. 2 Weight function distribution

从图 2 可以清晰的看到式(8)所示不同气泡尺寸下的权重函数分布情况,气泡尺寸越大对权重函数分布影响越大,且感应电动势对电极附近流体的依赖程度增加。

### 1.3 气泡偏心对权重函数的影响

为全面研究气泡对电磁流量测量的影响,不仅要分析气泡尺寸对权重函数的影响,还需要考虑气泡偏离流道中心轴线对权重函数的影响。本文充分考虑气泡中心与流道中心轴线不重合的复杂偏心边界条件,通过保角变换将偏心气泡映射为同心气泡来对模型进行简化,其映射关系如图 3 所示,其中  $a$  为气泡半径。

设  $m$ 、 $n$  分别为  $z$  平面上关于两圆的对称点,其坐标分别为  $x_1$  和  $x_2$ ,即满足如式(9)所示关系式:

$$x_1 x_2 = R^2, (x_1 - d)(x_2 - d) = a^2 \quad (9)$$

则  $m$ 、 $n$  两点的坐标可表示为式(10):

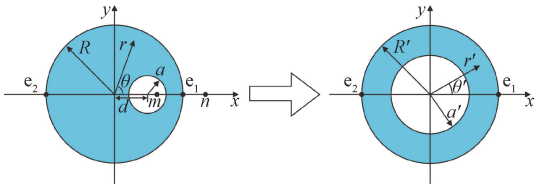


图 3 偏心环域到同心环域的映射

Fig. 3 Mapping from eccentric ring domain to concentric ring domain

$$x_1 = \frac{(d^2 + R^2 - a^2) - \sqrt{(d^2 + R^2 - a^2)^2 - 4R^2d^2}}{2d}$$

$$x_2 = \frac{(d^2 + R^2 - a^2) + \sqrt{(d^2 + R^2 - a^2)^2 - 4R^2d^2}}{2d}$$
(10)

对偏心环区域做分式线性变换可得式(11)：

$$w(z) = (z - x_1)/(z - x_2)$$
(11)

此时  $z$  平面上的  $m, n$  两点分别映射到  $w$  平面的坐标原点和  $\infty$  点, 并将  $z$  平面上半径为  $R$  和  $r$ , 圆心相距为  $d$  的两个偏心圆映射为  $w$  平面半径分别为  $R', r'$  的两个同心圆,  $R', r'$  和  $a'$  表达式如式(12)所示：

$$\left\{ \begin{aligned} R' &= \frac{(d + R)^2 - a^2 - \sqrt{(d^2 - R^2 - a^2)^2 - 4R^2a^2}}{(d + R)^2 - a^2 + \sqrt{(d^2 - R^2 - a^2)^2 - 4R^2a^2}} \\ a' &= \frac{(d + a)^2 - R^2 + \sqrt{(d^2 - R^2 - a^2)^2 - 4R^2a^2}}{(d + a)^2 - R^2 - \sqrt{(d^2 - R^2 - a^2)^2 - 4R^2a^2}} \\ r' &= \sqrt{\frac{r^2 - 2rx_1 \cos\theta + x_1^2}{r^2 - 2rx_2 \cos\theta + x_2^2}} \\ \theta' &= \arctg \frac{(x_1 - x_2) r \sin\theta}{r^2 + R_1^2 - r \cos\theta (x_1 + x_2)} \end{aligned} \right.$$
(12)

对映射后的同心环流区域采用分离变量法进行求解得到式(13)：

$$G(r', \theta') = \sum_{n=1}^{\infty} A'_m \cos m\theta' (r'^m + a'^{2m} r'^{-m})$$
(13)

其中,

$$\left\{ \begin{aligned} m &= 2n - 1 \\ A'_m &= \frac{4 \sin \frac{m\theta'_0}{2}}{m^2 \pi \theta'_0 (R'^m - a'^{2m} R'^{-m})} \end{aligned} \right.$$
(14)

基于式(2)的权重函数理论推导出偏心环流中权重函数计算式如式(15)所示：

$$W(r, \theta) = B_0 \times \left[ \left( \frac{\partial G}{\partial r'} \frac{\partial r'}{\partial r} + \frac{\partial G}{\partial \theta'} \frac{\partial \theta'}{\partial \theta} \right) \cos\theta - \left( \frac{\partial G}{\partial r'} \frac{\partial r'}{\partial \theta} + \frac{\partial G}{\partial \theta'} \frac{\partial \theta'}{\partial r} \right) \frac{\sin\theta}{r} \right]$$
(15)

将式(12)、(13)代入式(15), 进而求得气泡偏心时电磁流量计权重函数表达式, 从其解可知气泡尺寸和气泡偏心对权重函数的影响大小。气泡不同半径表征不同尺寸的气泡, 气泡偏心表征不同位置的气泡, 将其结合可表征流道中随机分布的气泡, 从而建立实际测量当中任意尺寸和随机分布的气泡对电磁流量测量影响的理论模型。

同样地利用计算机绘制气泡偏心时权重函数分布图, 此处为了便于观察将图中横纵坐标采用  $r/R$  表示, 即处理为无量纲常量。其中选取气泡半径为 5 mm, 偏心距离为 10 mm, 偏心方向分别沿电极方向和沿线圈方向分别进行绘制, 获得权重函数分布图如图 4 所示。

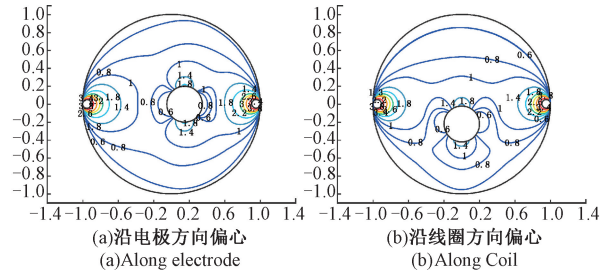


图 4 气泡偏心权重函数分布图

Fig. 4 Weight function distribution

从图 4 所示的权重函数分布可以看出气泡偏心对权重函数的分布具有一定的影响, 且偏心的方向也会导致权重函数分布的不同, 但是具体影响的大小定量分析有待进一步研究。

#### 1.4 多个气泡对权重函数的影响研究

流道中气泡常以多个气泡(气泡群)形式存在, 为更全面的研究气泡对电磁流量测量的影响, 需要建立气泡群对权重函数产生影响的理论模型。采用分离变量法求解式(3), 设一个特解如式(16)所示：

$$G(r, \theta) = R(r) \cdot \Phi(\theta)$$
(16)

令其特征值为  $n^2$ ,  $n$  为自然数, 可得式(17)：

$$\frac{r^2}{R} \left[ \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right] = - \frac{1}{\Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\theta^2} = n^2$$
(17)

化简后可得式(18)：

$$\begin{cases} \Phi'' + n^2 \Phi = 0 \\ R'' r^2 + R' r - n^2 R = 0 \end{cases}$$
(18)

在不考虑气泡时, 对式(18)的第 1 个式子进行求解, 可得式(19)：

$$\Phi(\theta) = c \sin(n\theta) + c' \cos(n\theta)$$
(19)

对式(18)第 2 个式子进行求解, 可得式(20)：

$$R(r) = c_1 r^n + c_1' r^{-n}$$
(20)

式中:  $c_1' r^{-n}$  在  $r$  趋近于 0 时趋于无穷, 因此  $c_1' = 0$ , 求得虚电势  $G$  的特解如式(21)所示：

$$G = \sum_{n=0}^{\infty} r^n (c_n \sin(n\theta) + c_n' \cos(n\theta)) \quad (21)$$

虚电势  $G$  在外边界上电极处为无穷,其余位置为 0。为简化计算,设电极为主线,其对应的张角为  $2\gamma$ ,那么在  $\gamma \rightarrow 0$  条件下,近似为点电极。则  $G$  满足如式(22)所示条件:

$$\frac{\partial G}{\partial n} = \left( \frac{\partial G}{\partial r} \right) \Big|_{r=a} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} na^{n-1} (c_n \sin(n\pi) + c_n' \cos(n\pi)) = \\ \pi/4\gamma, \text{在 } B \text{ 电极处} \\ -\pi/4\gamma, \text{在 } A \text{ 电极处} \end{cases} \quad (23)$$

对式(23)两边同乘以  $\cos m\theta$ ,并对  $\theta$  在  $\theta = -\pi \sim \pi$  范围内求积分,等式左边在  $n = m$  时为  $\pi ma^{m-1} c_m'$ ,等式右侧如式(24)所示,可得  $c_m' = 0$ 。

$$\frac{\pi}{4\gamma} \int_{\frac{\pi}{2}-\gamma}^{\frac{\pi}{2}+\gamma} \cos m\theta d\theta - \frac{\pi}{4\gamma} \int_{-\frac{\pi}{2}-\gamma}^{-\frac{\pi}{2}+\gamma} \cos m\theta d\theta = 0 \quad (24)$$

对式(23)左右同乘以  $\sin m\theta$ ,并对  $\theta$  在  $\theta = -\pi \sim \pi$  范围内求积分,可得式(25):

$$\pi ma^{m-1} c_m = \frac{\pi}{4\gamma} \left( \int_{\frac{\pi}{2}-\gamma}^{\frac{\pi}{2}+\gamma} \sin m\theta d\theta - \int_{-\frac{\pi}{2}-\gamma}^{-\frac{\pi}{2}+\gamma} \sin m\theta d\theta \right) =$$

$$\frac{\pi}{2\gamma} \int_{\frac{\pi}{2}-\gamma}^{\frac{\pi}{2}+\gamma} \sin m\theta d\theta = \frac{\pi}{\gamma m} \sin \frac{m\pi}{2} \sin m\gamma \quad (25)$$

令  $m = 2k - 1, k$  为正整数  $1, 2, 3, \dots$ ,可得  $c_m$  表达式如式(26)所示:

$$c_m = \frac{(-1)^{k-1} \sin m\gamma}{a^{m-1} m^2 \gamma}, (m = 2k - 1) \quad (26)$$

在  $\gamma \rightarrow 0$  条件下,虚电势  $G$  表达式如式(27)所示:

$$G = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1} a \left( \frac{r}{a} \right)^m \sin m\theta}{m}, (m = 2k - 1) \quad (27)$$

通过保角变换到  $z'$  平面后,求解可得式(28):

$$\frac{\partial G'}{\partial r'} \Big|_{r'=a'} = \sum_{n=0}^{\infty} nr'^{n-1} (c_n \sin(n\theta') + c_n' \cos(n\theta')) = 0 \quad (28)$$

此时虚电势  $G'$  的求解转换成两个未知系数的求解,求解得到  $c_n, c_n'$  表达式如式(29)所示:

$$\begin{cases} c_n = \frac{a' \sin n \left( \theta' + \frac{\pi}{2} \right)}{na'^n} \\ c_n' = \frac{a' \cos n \left( \theta' + \frac{\pi}{2} \right)}{na'^n} \end{cases} \quad (29)$$

求得虚电势  $G'$  表达式如式(30)所示:

$$G' = \sum_{n=1}^{\infty} r'^n \left( \frac{a' \sin n \left( \theta' + \frac{\pi}{2} \right)}{na'^n} \sin n\theta + \right.$$

$$\left. \frac{a' \cos n \left( \theta' + \frac{\pi}{2} \right)}{na'^n} \cos n\theta \right), (n = 2N - 1) \quad (30)$$

式中:  $a', r', \theta'$  为变化后  $Z'$  平面上的参数,根据如式(31)所示的变换关系,反变换为  $z$  平面上的表达如式(32)所示,  $G_{Fin}$  表示当含有  $i$  个气泡时的虚电势。

$$\begin{cases} a' = \left| \frac{L - a - x_1}{L - a - x_2} \right| \\ r' = \sqrt{\frac{r^2 - 2rx_1 \cos\theta + x_1^2}{r^2 - 2rx_2 \cos\theta + x_2^2}} \\ \tan\theta' = \frac{r \sin\theta (x_1 - x_2)}{R^2 + r' - (x_1 + x_2) r \sin\theta} \end{cases} \quad (31)$$

$$G_{Fin} = G + G_i \quad (32)$$

获得虚电势  $G$  后按式(33)进行运算可得权重函数  $W$ 。完成多气泡权重函数理论模型求解,实现了多气泡对流量计权重函数产生影响的定量研究。

$$W = \frac{\partial G_{Fin}}{\partial y} \quad (33)$$

## 2 气泡影响的仿真研究与分析

流体的电磁测量本身是一个动态过程,在测量气液两相流体时,动态过程更加复杂,传统解析法求解复杂。为验证理论模型的正确性<sup>[22]</sup>,本文基于有限元分析软件 COMSOL 进行仿真研究。同时,为更真实地模拟气泡随流体流动时对权重函数产生的影响,在仿真求解中引入移动网格技术<sup>[23-24]</sup>。

### 2.1 仿真模型建立

建立含单个气泡的电磁流量测量系统三维仿真模型如图 5 所示。分别研究气泡尺寸和气泡偏心对权重函数的影响。

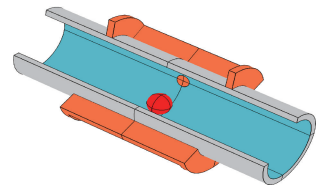


图 5 含单个气泡的电磁流量计三维仿真模型  
Fig. 5 Three-dimensional simulation model of electromagnetic flowmeter with one bubble

为更全面的研究气泡对权重函数的影响,建立含多个气泡的电磁流量测量系统三维仿真模型如图 6 所示。

### 2.2 仿真研究与分析

#### 1) 单气泡尺寸对权重函数影响仿真结果

通过参数化扫描来研究气泡不同尺寸对权重函数分

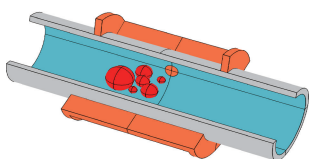
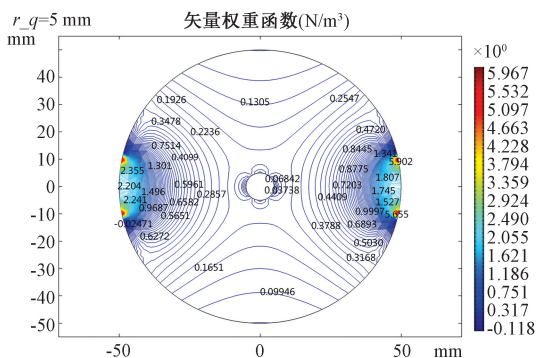


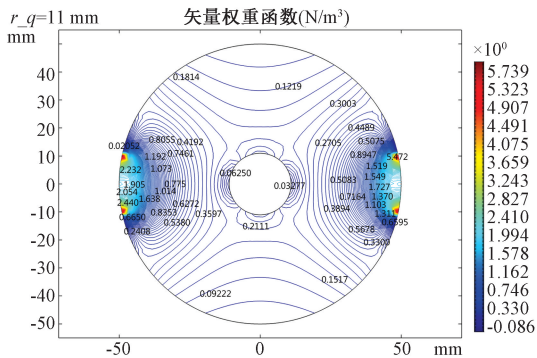
图 6 含 6 个气泡的电磁流量计三维仿真模型

Fig. 6 Three-dimensional simulation model of electromagnetic flowmeter with 6 bubbles

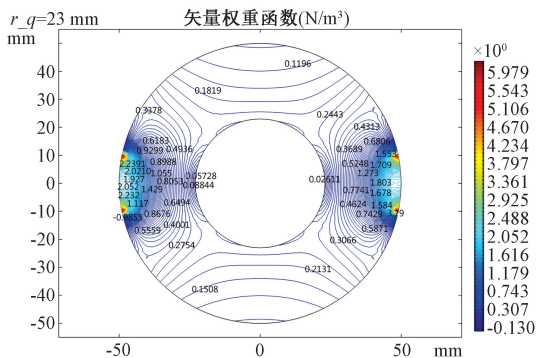
布的影响<sup>[25]</sup>,对气泡半径  $r_g$  进行 5~32 mm 的参数化扫描,扫描步长 3 mm,获得权重函数等值线分布如图 7 所示。



(a) 气泡半径=5 mm  
(a) Bubble radius=5 mm



(b) 气泡半径=11 mm  
(b) Bubble radius=11 mm



(c) 气泡半径=23 mm  
(c) Bubble radius=23 mm

图 7 气泡不同半径时权重函数分布图

Fig. 7 Weight function distribution of different bubble radius

由图 7 可知,随着气泡半径从 5 到 29 mm 增加的过程中,权重函数电极附近的等值线梯度值增加,流体对输出电压的贡献集中程度也增加,使电磁流量计输出电极所拾取的电动势更多的来自于电极附近流体微元的贡献,而越靠近励磁线圈,流体微元对电动势的贡献越小。气泡半径增加,权重函数不均匀度增加,说明对权重函数产生的影响增加。

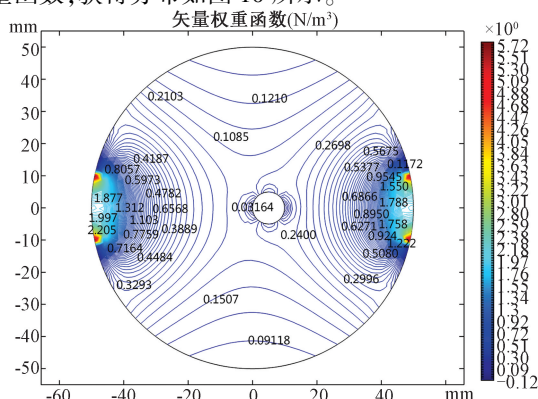
### 2) 单个气泡偏心对权重函数的影响仿真结果

气泡在管道中并非都沿着流道中心轴线流动,而是时常发生偏心现象。因此为了进一步研究单个气泡偏心对权重函数产生的影响,分为电极方向( $X$  方向)偏心和垂直于电极方向( $Y$  方向)偏心两种偏心状态进行仿真研究,计算权重函数分布情况。参数扫描设定气泡半径为 5 mm,气泡圆心相对管道截面圆心偏心距从 0 变化到 40 mm,步长为 5 mm。

如图 8 所示为气泡沿  $X$  方向不同偏心距的权重函数分布,图 9 为气泡沿  $Y$  方向不同偏心距的权重函数分布。从矢量权重函数等值线分布来看,随着气泡沿  $X$  方向偏心距从 5 mm 增大到 40 mm 的过程中,对权重函数所产生的影响逐渐增加,偏心距为 40 mm 时气泡的影响最大;在气泡沿  $Y$  方向偏心距从 5 mm 增大到 40 mm 的过程中,权重函数分布变化不大,说明气泡沿  $Y$  方向偏心对电磁流量测量产生的影响很小。产生上述现象的原因主要在于气泡的非导电性使得气泡位置对感应电动势输出不作贡献,根据权重函数的分布可知,当气泡离电极越近,那么被气泡屏蔽区域为对电极信号贡献更大的区域,产生的影响就更大。 $Y$  方向的权重函数数值远小于  $X$  方向上的数值,且均匀度较高,使得气泡沿  $Y$  方向偏心产生的影响小,且随偏心距的变化不大。

### 3) 多个气泡对权重函数的影响仿真结果

流道中存在的气泡群会对电磁流量测量产生影响,因此进行多个气泡存在时的权重函数影响仿真研究。首先分别研究 3 个气泡共同存在和 3 个气泡单独存在时的权重函数,获得分布如图 10 所示。



(a) 偏心距离=5 mm

(a) Eccentricity=5 mm

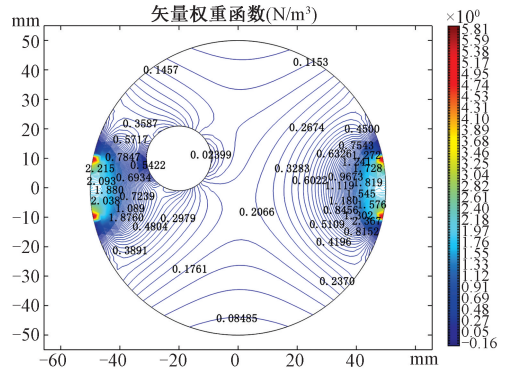
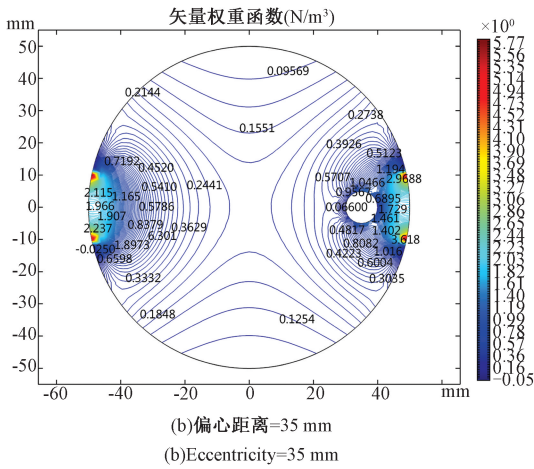
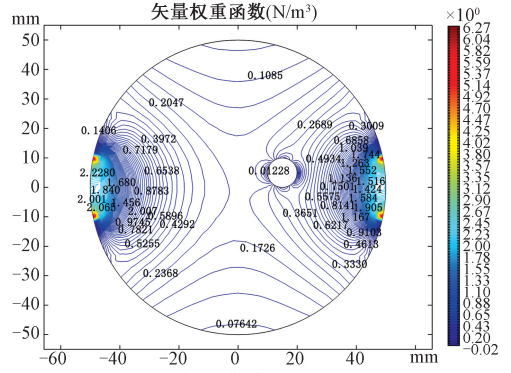
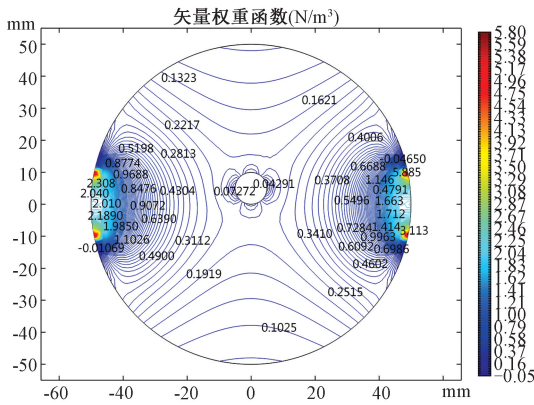


图8 气泡沿 X 方向偏心

Fig. 8 The bubble is eccentric along the X direction



(a) 偏心距离=5 mm  
(a) Eccentricity=5 mm

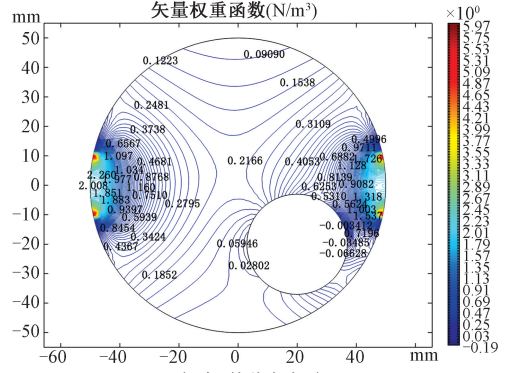
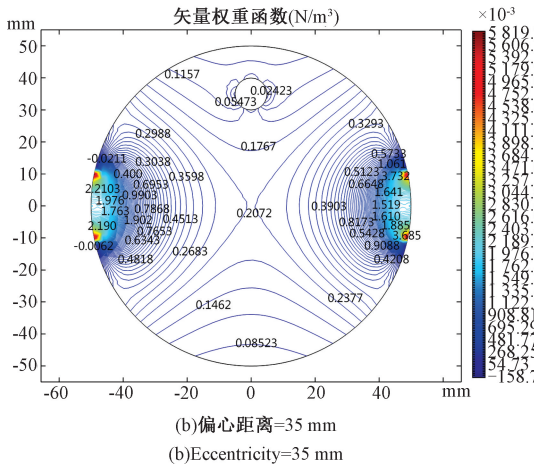


图9 气泡沿 Y 方向偏心

Fig. 9 The bubble is eccentric along the Y direction

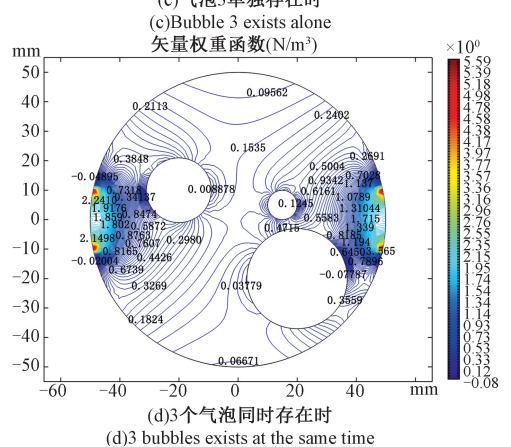


图10 不同气泡情况下电极截面权重函数图分布图

Fig. 10 Distribution diagram of the weight function graph of the electrode cross section

为充分研究两相流中气相在流动过程中对电磁流量测量所产生的影响,引入移动网格技术。仿真研究中气泡群由球心不处于同一平面的6个不同尺寸的气泡组成,并沿轴线方向流动,管道长度0.3 m。气泡群中心处于不同轴向位置时的权重函数等值线分布如图11所示。

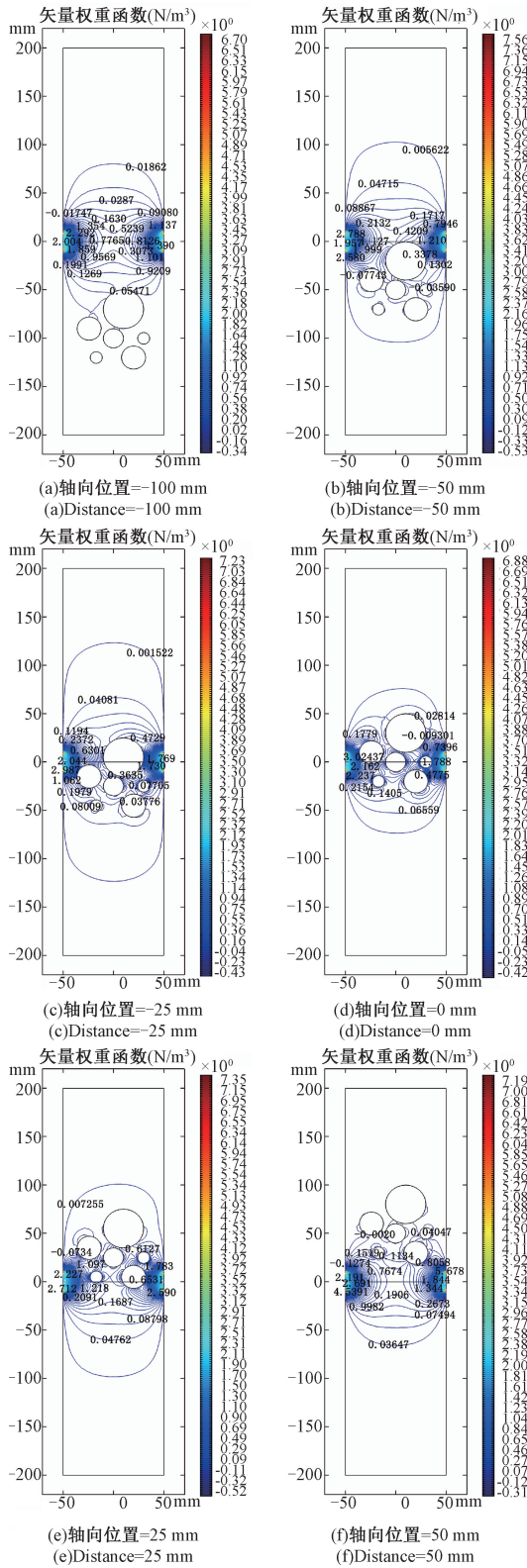


图 11 气泡群中心距电极截面不同位置时轴向权重函数分布图

Fig. 11 The distribution of the axial weight function when the center of the bubble group is at different positions from the electrode section

由图 11 可知,随着气泡逐渐靠近电极截面,气泡对该截面的权重函数影响逐渐增加;反之,在气泡逐渐远离电极截面时,气泡对该截面的权重函数影响逐渐减小。在  $Z=-25$  mm 时影响最大,此时最大的气泡正位于电极截面,而其他气泡也处于高权重函数区域,因此被屏蔽的电极信号最大,影响也最大。与图 10 对比可知,随着气泡数量的增加,权重函数分布受到的干扰增加。

### 2.3 基于输出电压灵敏度的评价和分析

为对流量计输出结果受气泡的影响进行客观评价,提出气泡对电磁流量计产生的扰动特性分析指标,即输出电压灵敏度  $V_c$ 。输出电压灵敏度指的是电磁流量测量系统受气泡影响灵敏程度,旨在用于研究测量系统在不同气泡的情况下的电压输出幅度变化<sup>[26]</sup>。其定义如式(34)所示。其中,  $U_b$  为电磁流量计测量管道中存在气泡时的输出电压,  $U_0$  为电磁流量计测量管道中不存在气泡时的输出电压。

$$V_c = \frac{U_b - U_0}{U_0} \quad (34)$$

输出电压灵敏度  $V_c$  越大说明当前气泡对电磁流量计输出电压产生的影响越大,对流量计的测量精度影响越多;反之,输出电压灵敏度  $V_c$  越小说明当前气泡对电磁流量计输出电压产生的影响越小,对流量计的测量精度影响越少。

使用输出电压灵敏度对仿真数据中不同气泡尺寸所产生的影响进行评价,定量分析气泡尺寸对输出信号产生的影响,获得输出电压灵敏度与气泡尺寸的变化关系如图 12 所示。由图 12 可知,随着气泡半径从 5 mm 到 32 mm 的增加过程中,产生的影响从 0.16% 开始,逐渐增加且变化速度加快,并在气泡半径为 29 mm 时最大为 3.88%。出现上述现象的原因是随着气泡半径增加,气泡半径变化同样大小时气泡体积变化更大,则造成权重函数不均匀度变化更大,使得气泡产生的影响在增加的同时变化率也增加。

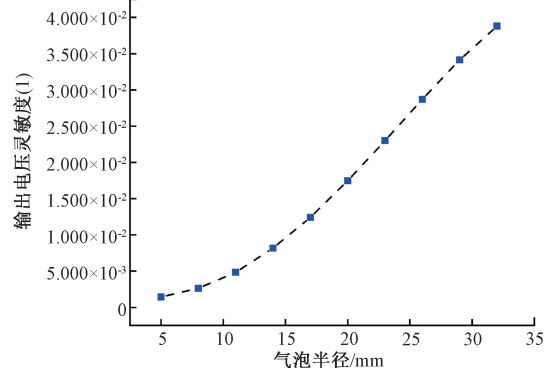


图 12 灵敏度随气泡半径变化趋势图  
Fig. 12 The trend graph of sensitivity changes with bubble radius

接着评价气泡偏心对电磁流量测量产生的影响仿真研究,分别对气泡沿 X 轴、Y 轴方向上偏心情况进行评价,获得输出电压灵敏度随气泡偏心距增加的变化趋势,如图 13 所示。

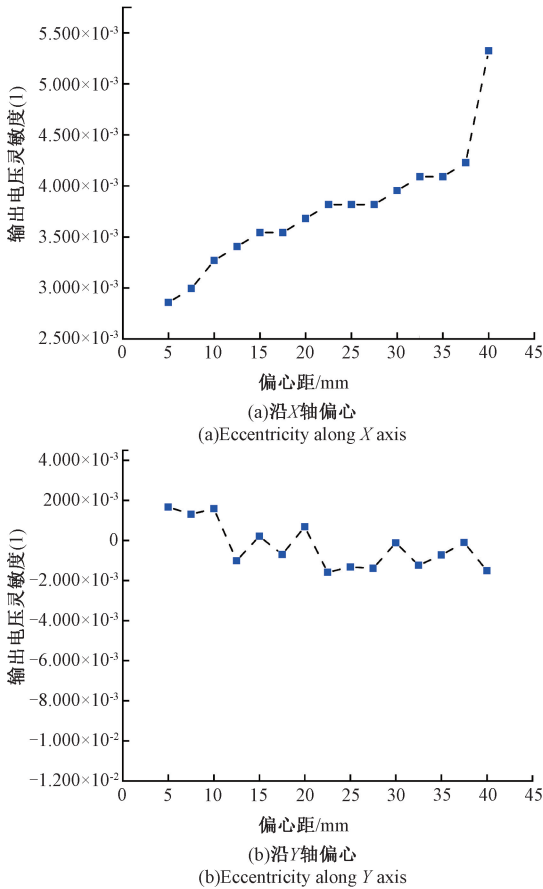


图 13 输出电压灵敏度随气泡偏心距变化的影响  
Fig. 13 The influence of output voltage sensitivity with the change of bubble eccentricity

由图 13 可知,输出电压灵敏度随气泡沿 X 轴方向偏心距从 5 mm 到 40 mm 的过程中不断增加,在偏心距为 40 mm 时取得最大值为 0.53%;气泡沿 Y 轴方向偏心距从 5 mm 到 40 mm 的过程中输出电压灵敏度无明显变化规律,输出电压灵敏度在 0 附近上下波动,保持在 -0.2%~0.2% 范围内。对比气泡沿 X 轴方向偏心产生的影响可知,气泡沿 Y 轴方向偏心时,偏心位置变化时输出电压灵敏度较小且变化幅度小,因此在实验部分着重研究气泡沿 X 方向偏心所产生的影响。

最后对气泡在管道中流动时产生影响的动态仿真进行分析评价,得到输出电压灵敏度随气泡和气泡群位置变化的趋势如图 14 所示。

由图 14 可知,当气泡 1、2、3 单独存在时,随着气泡从轴向位置 -150 mm 移动到 150 mm 的过程中,气泡产生的影响先增大后减小,并在经过电极截面时取得最大

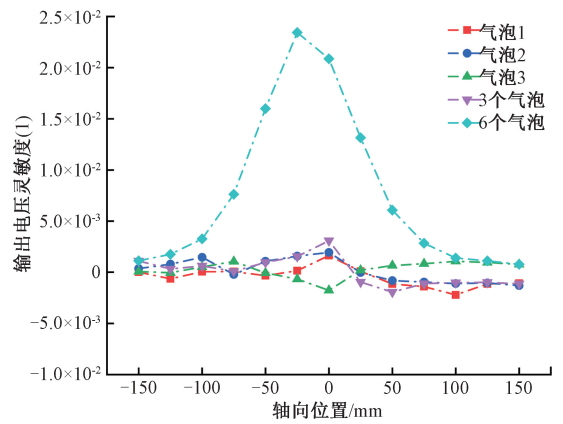


图 14 输出电压灵敏度变化趋势图

Fig. 14 Change trend of the output voltage sensitivity

值,分别为 0.18%、0.22%、-0.20%;当 3 个气泡同时存在且中心在同一平面上时,气泡群产生的影响先增大后减小,并在电极截面时取得最大值为 0.36%;当 6 个气泡同时存在且中心不在同一平面时,气泡群产生的影响依然先增大后减小,此时的曲线尖峰向左侧偏移,并在 -25 mm 时取得影响最大值为 2.3%。其原因是当气泡群中心处于 -25 mm 时,最大的气泡距离电极截面最近,造成权重函数不均匀度最大,使得输出电压灵敏度出现最大值。对比发现随着气泡群组成气泡的数量增加,产生的影响增加。

为研究单气泡与多气泡产生影响的数量关系,通过曲线拟合的方法,将 3 个气泡单独存在时产生的影响通过一定的函数关系拟合。拟合后得到其满足函数关系式如式(35)所示。拟合后曲线与 3 个气泡同时存在时的仿真曲线对比如图 15 所示。图中拟合曲线偏差最大为  $7 \times 10^{-4}$ ,达到预期拟合效果。

$$f(x_1, x_2, x_3) = -74.3x_1^2 + 293.9x_1x_2 - 298x_1x_3 - 506.3x_2^2 - 2032.5x_2x_3 - 1464.5x_3^2 + 0.68x_1 + 2.16x_2 + 2.11x_3 \quad (35)$$

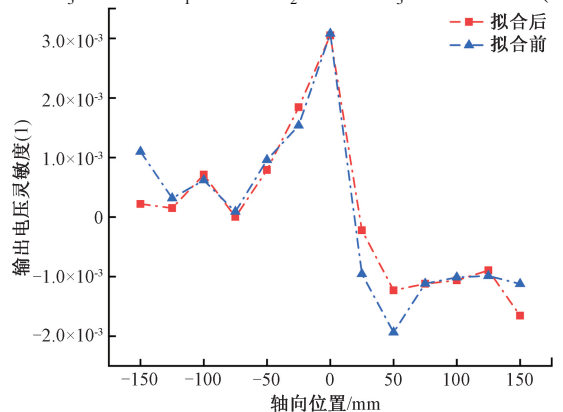


图 15 曲线拟合效果对比

Fig. 15 The curve fitting effect comparison chart

### 3 实验测试与分析

#### 3.1 实验平台搭建

为验证理论模型及仿真研究的可行性,在油气装备教育部重点实验室(西南石油大学)搭建模拟实验平台并完成测试实验。由于流体中气泡的尺寸控制及定位困难,而气泡的影响原因主要为其非导电性,因此本文通过

旋转结构控制不同尺寸的非导电球体以模拟真实气泡,同时结合平动机构实现模拟气泡的定位。

考虑到固体非导电小球在管道当中可能对流速分布产生影响而进一步影响实验测试结果的准确性,对管道当中存在固体非导电球体流动速度场分布进行仿真研究。研究过程中以 2 m/s 的平均流速输入,非导电小球半径为 10 mm,获得管道当中流速分布如图 16 所示。

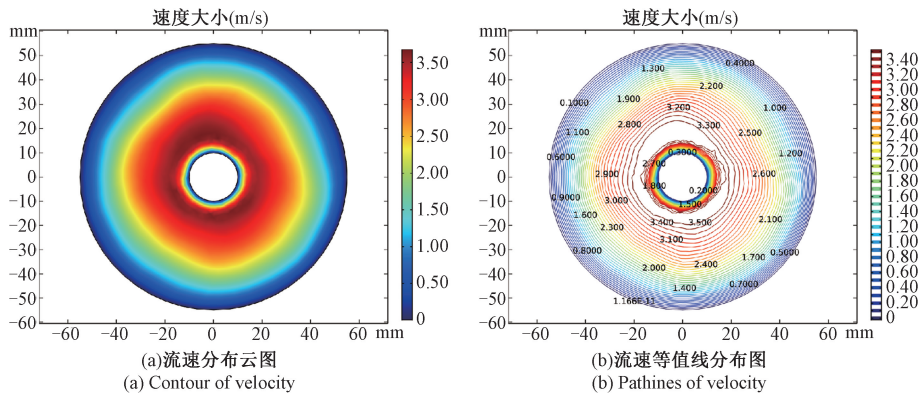


图 16 管道流速分布图

Fig. 16 Pipeline velocity distribution diagram

从图 16 可以看出无论是管道的流速分布云图还是管道流速分布等值线分布图均满足中心轴对称分布,根据电磁流量计流速呈中心轴对称分布时,输出感应电压正比于平均流速的特点,此处采用非导电模拟小球进行实验时的输出电压依旧正比于平均流速,而不会引入由模拟实验装置带来的误差。采用非导电小球搭建模拟实验平台如图 17、18 所示。

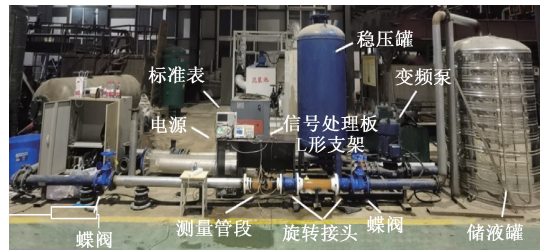


图 18 模拟实验平台系统图

Fig. 18 System diagram of the simulation experiment platform



图 17 气泡模拟装置

Fig. 17 Bubble simulation device

实验平台的工作流程如下:首先将用于模拟的小球通过螺纹固定在支撑杆上,再通过旋转结构和平移运动进行位置调整;设置离心泵工作频率为 13 Hz,标准流速为 1.359 m/s;设置完成后启动离心泵使实验平台进入工作循环并等待其工作平稳;由圆形点状电极接受包含流

量信息的感应信号,使用信号处理模块对信号进行处理,并与标准表进行对比,从而验证气泡对流量计流量测量产生影响的理论模型及仿真研究的正确性。

#### 3.2 单个气泡产生的影响实验

##### 1) 单个气泡尺寸影响实验

首先对气泡尺寸产生的影响进行实验研究,实验过程中控制流速为 1.359 m/s 不变,使用不同半径的小球模拟不同尺寸的气泡,测得其输出电压所对应的流量信号,与标准流速对比,从而定量研究气泡尺寸对电磁流量计流量测量产生的影响,本实验设置的小球半径从 5 到 32 mm,步进 3 mm,测得气泡尺寸对流速的影响如表 1 所示。

表1 气泡尺寸对流速影响对照表

Table 1 Comparison table of the influence of bubble size on flow velocity

测试点	测试半径/ mm	输出电压/ V	流速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	流速偏差/ ( $m \cdot s^{-1}$ )
1	5	-0.192 4	1.360 2	0.001 2
2	8	-0.192 6	1.361 3	0.002 3
3	11	-0.193 1	1.363 2	0.004 2
4	14	-0.193 8	1.366 7	0.007 7
5	17	-0.194 7	1.370 3	0.011 3
6	20	-0.195 6	1.374 5	0.015 5
7	23	-0.196 9	1.380 5	0.021 5
8	36	-0.198 1	1.385 8	0.026 8
9	29	-0.200 1	1.394 6	0.035 6
10	32	-0.201 8	1.402 4	0.043 4

通过实验测得实际输出电压,获得实际输出电压灵敏度随气泡尺寸的变化趋势如图19所示。

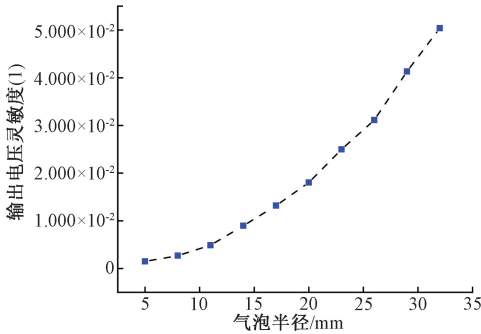


图19 输出电压灵敏度随气泡尺寸变化曲线  
Fig. 19 Variation curve of output voltage sensitivity with bubble size

由图19可知,气泡产生的影响随着气泡尺寸变大逐渐增加,且变化速率上升;对比气泡尺寸仿真研究结果,数据变化趋势完全一致,证明了仿真分析正确性。由于实验过程受环境其他因素影响产生的噪声信号带来微弱的差异,造成影响偏大,但仍在误差容许范围,足以验证气泡尺寸产生影响规律的正确性。

### 2) 单个气泡位置产生的影响实验

为验证理论模型和仿真分析中气泡位置对信号收集的影响,设计了单气泡偏心实验,实验过程中控制流动速度保持1.359 m/s不变,气泡半径保持5 mm不变,以气泡偏心距为单一变量。从仿真研究分析结果可知,气泡沿X方向偏心影响较大,而沿Y方向偏心时产生的影响很小,因此实验主要进行沿X方向偏心实验。获得输出电压灵敏度随气泡偏心位置的变化趋势如图20所示。随着气泡沿X方向偏心距离增加输出电压灵敏度逐渐增加,且变化速率上升。实验测得曲线与仿真研究结果高度一致,由于实验过程受环境影响产生的噪声信号带来

微弱的偏差,使实际测得影响稍大,但足以验证气泡偏心理论模型及仿真研究的正确性。

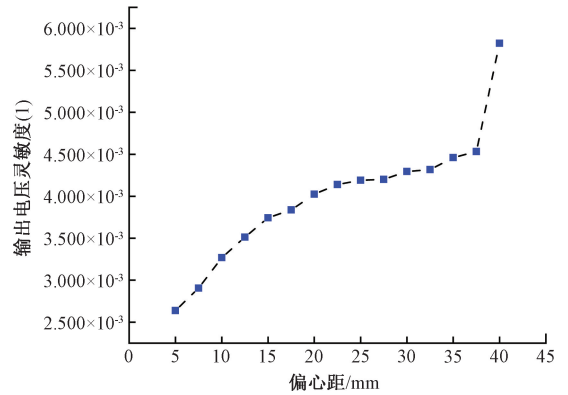


图20 输出电压灵敏度随偏心位置变化曲线  
Fig. 20 Variation curve of output voltage sensitivity with eccentric position

### 3) 单气泡实验评价

为定量分析实验结果与仿真研究之间的差异,本文以相对误差为指标,获得气泡尺寸影响实验、气泡偏心影响实验与仿真数据之间存在的相对误差如图21所示。

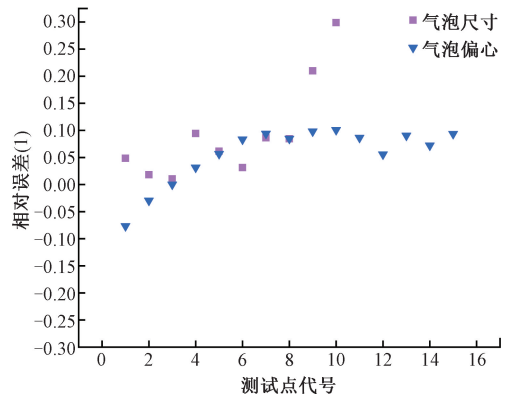


图21 实验相对误差

Fig. 21 Relative error of experiment

由图21可知,气泡尺寸影响实验与仿真之间的相对误差在气泡尺寸小于29 mm范围内均低于10%,气泡尺寸为29、32 mm时相对误差大于10%,其主要原因为气泡尺寸变大,实验过程中模拟小球受流体流动产生的振动增加,造成误差增大;气泡偏心位置影响实验与仿真结果之间的相对误差均处于-10%~10%。实验与仿真之间产生偏差的主要原因是实验环境带来的噪声影响以及由于非导电小球模拟过程中流场扭曲带来的误差分析。虽然实验结果与仿真结果存在一定差异,但在误差容限范围内验证了单个气泡对电磁流量测量影响的理论模型和仿真研究的正确性。

### 3.3 气泡流动验证实验

为验证多气泡权重函数理论模型及三维仿真研究的正确性,进行多气泡模拟实验。在实验过程中将大小不同的小球通过螺柱连接构成气泡群,实现气泡流动状态下的模拟实验,获得输出电压灵敏度随气泡及气泡群轴向位置的变化关系如图 22 所示。

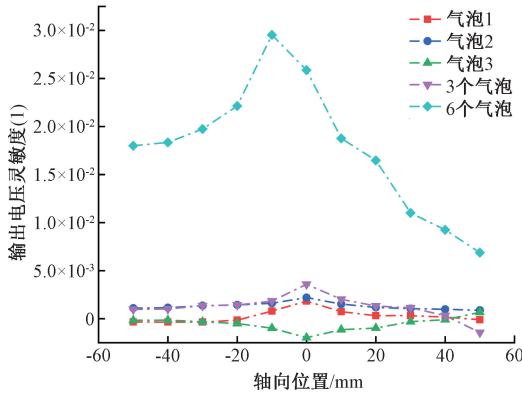


图 22 输出电压灵敏度轴向位置变化曲线

Fig. 22 Variation curve of output voltage sensitivity

由图 22 可知,对于单个气泡以及气泡中心处于同一平面的 3 个气泡所组成的气泡群均在轴向位置为 0 时影响最大,与仿真结果一致;6 个中心不处于同一平面上的气泡组成的气泡群在 -10 mm 处取得最大值为 2.9%。因为气泡群中心在 -10 mm 时最大气泡距离电极截面位置最近,产生影响最大。与仿真结果出现偏差是由于仿真实验梯度设置较大,而实验测试范围主要为仿真结果当中产生影响较大的范围(轴向位置在 -50 ~ 50 mm 之间),实验梯度更小能更准确的获得气泡群影响最大的位置。实验与仿真结果具有一致性,证明多气泡影响仿真分析结果的准确性。

## 4 结论

本文针对电磁流量计实际使用过程中测量气液两相流存在的误差问题,研究了气泡对电磁流量测量的影响特性。通过保角变换求解出气泡不同存在状态下的权重函数解析解,并具有普遍适用意义。利用 COMSOL 建立气泡流动状态仿真,对气泡在管道当中流动的过程中产生的影响规律进行研究,使仿真研究更全面的反映气泡对电磁流量测量的影响。并将仿真分析与实验研究进行对比,验证了本文所述影响规律的正确性。研究补充和完善了电磁法测量气液两相流权重函数相关理论,为提高电磁流量测量检测精度和实现气液两相流电磁测量提供技术支持。本系统完成了理论研究,实现气泡对电磁流量测量系统影响规律定量分析,未来将进一步利用

本文所述影响规律提升电磁流量测量精度。

## 参考文献

- [1] DENG X, LI G, WEI Z, et al. Theoretical study of vertical slug flow measurement by data fusion from electromagnetic flowmeter and electrical re-sistance tomography[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2011, (22): 272-278.
- [2] 李强伟. 基于改进 de Leeuw 关系式的两相流质量流量测量[J]. 高校化学工程学报, 2009, 23(4): 593-598.  
LI Q W. Mass flowrate measurement of two-phase flow based on modified deleeuw correlation [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2009, 23(4): 593-598.
- [3] FANG L, WANG S, LI S, et al. Phase content and flow measurement of bubble flow based on new experimental pipeline[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2020, 13(2): 469-478.
- [4] 吕宇玲, 何利民. 多相流计量技术综述[J]. 天然气与石油, 2004, 22(4): 52-54, 70.  
LYU Y L, HE L M. Summary on multiphase fluid measurement technology[J]. Oil & Gas Transportation & Sponage. 2004, 22(4): 52-54, 70.
- [5] 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.
- [6] WANG Y M, KONG L F. Influence study on electromagnetic flow meter with oil bubble in the fluid. International[J] Physics Procedia, 2011, 22: 627-633.
- [7] LI Y W, KONG L F, LIU L B. Theory analysis for the virtual current distribution in an electromagnetic flowmeter with one bubble [C]. 2nd International Conference on Information Science and Engineering, 2010: 1649-1652.
- [8] DONG F, LI L, ZHANG S. Flow status identification based on multiple slow feature analysis of gas-liquid two-phase flow in horizontal pipes[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(5): 055301.
- [9] 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 Science & Technology, 2015, 29(7): 2889-2895.
- [10] 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 and Instrumentation, 2015, (41): 90-96.
- [11] 卢楠, 李斌. 基于电磁流量计的电极干扰信号仿真研

- 究[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(3): 154-156.
- LU N, LI B. Simulation research on electrode interference signal based on electromagnetic flow meter[J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(3): 154-156.
- [12] CHA J E, AHN Y C, KIM M H. Flow measurement with an electromagnetic flow-meter in two-phase bubbly and slug flow regimes [ J ]. Flow Measurement and Instrumentation, 2002, 12(5): 329-339.
- [13] CHA J E, AHN Y C, SEO K W, et al. The performance of electromagnetic flowmeters in a liquid metal two-phase flow [ J ]. Journal of Nuclear Science & Technology, 2003, 40(10): 744-753.
- [14] WANG J Z, TIAN G Y, LUCAS G P. Relationship between velocity profile and distribution of induced potential for an electromagnetic flow meter [ J ]. Flow Measurement and Instrumentation, 2007, 18 ( 2 ): 99-105.
- [15] WANG B L, FU Y F, HUANG Z Y, et al. Volumetric flow rate measurement with capacitive electromagnetic flowmeter in oil-water two-phase flow [ C ]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2010: 775-778.
- [16] JIANG Y L. Study on weight function distribution of hybrid gas-liquid two-phase flow electromagnetic flowmeter[J]. Sensors, 2020, 20(5): 1431.
- [17] YANG Y, WANG D, NIU P M. Gas-liquid two-phase flow measurements by the electromagnetic flowmeter combined with a phase-isolation method [ J ]. Flow Measurement and Instrumentation, 2018(60): 78-87.
- [18] YANG Y, WANG D, NIU P M. 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.
- [19] NIU P M, WANG D, WEI P K. Liquid flow measurement using phase isolation and an imaging method in horizontal gas-liquid two-phase flow [ J ]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(9): 095303.
- [20] BEVIR M K. The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters [ J ]. Journal of Fluid Mechanics Digital Archive, 1970, 43(3): 577-590.
- [21] 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): 161-174.
- GE L, HUANG 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 ): 161-174.
- [22] PENG M J, XU Z H. Research on nonlinear constitutive relationship of permanent deformation in asphalt pavements [ J ]. Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy, 2006, 49(6): 671-682.
- [23] 王经卓. 电磁流量计权函数的数值仿真与验证 [ J ]. 仪器仪表学报, 2009, 30(1): 132-137.
- WANG J ZH. Numerical simulation and verification of weight function of electromagnetic flow meter [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(1): 132-137.
- [24] 程志远, 李黎, 龙晓鸿, 等. 移动网格技术在计算流体动力学数值仿真中的应用 [ J ]. 重庆大学学报, 2013, 36(2): 96-101.
- CHENG ZH Y, LI L, LONG X H, et al. Research on the application of moving mesh technology in computational fluid dynamics simulation [ J ]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(2): 96-101.
- [25] 潘毅, 倪明玖. 数值模拟磁场作用下气泡在导电液体中运动 [ J ]. 工程热物理学报, 2012, 33(1): 75-78.
- PAN Y, NI M J. Numerical simulation of bubble rising in conductive liquids under magnetic field [ J ]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(1): 75-78.
- [26] 王月明. 油气水多相流流量电磁相关测量方法研究 [ D ]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- WANG Y M. Research on measuring methods with electromagnetic correlation for theelow of oil-gas-water multiphase flow [ D ]. Qinhuangdao: YanShan University, 2013.

### 作者简介



葛亮, 2007年和2010年于西南石油大学分别获得学士学位和硕士学位, 2017年于四川大学获得博士学位, 现为西南石油大学教授, 主要研究方向为仪器仪表技术、电磁检测和信号处理。

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, respectively, and received his Ph. D. degree from Sichuan University in 2017. He is currently a professor at Southwest Petroleum University. His main research interests include instrumentation technology, electromagnetic testing and signal processing.



阳彩霞, 2019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, 主要研究方向为仪器仪表技术和电磁检测。

E-mail: 1455454387@qq.com

**Yang Caixia** received her B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2019. She is now a

M. Sc. candidate in Southwest Petroleum University. Her main research interests include instrumentation technology and electromagnetic detection.



**Mark Robinson**, 分别于 1985 年和 1991 年在拉夫堡理工大学取得硕士学位和博士学位, 2005 年起任纽卡斯尔大学工程学院教授, 2004 年起任纽卡斯尔铁路研究中心 (NewRail) 主任, 2000 年至 2004 年, 担任谢菲尔德大学高级铁路研究中心 (ARRC) 主任, 主要研究方向为轨道车辆轻量化材料及抗撞复合结构的开发与应用。

E-mail: mark.robinson@ncl.ac.uk

**Mark Robinson** obtained a M. Sc. degree and a Ph. D. degree from Loughborough University of Technology in 1985 and 1991, respectively. Professor of Rail Systems Engineering, School of Mechanical and Systems Engineering, Newcastle University since 2005 and Director of Newcastle Centre for Rail Research (NewRail) since 2004. His main research interests include the development and application of lightweight materials for rail vehicles and crashworthy composite structures.

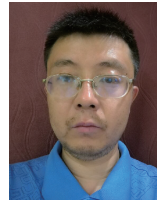


**甘芳吉**, 2011 年和 2016 年于四川大学分别获得学士学位和博士学位, 现为四川大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为超精检测、微纳检测、无损检测等方面的研究。

E-mail: gffj0318@foxmail.com

**Gan Fangji** received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from the University of Sichuan in 2011 and 2016. Now he is an associate professor and master tutor in Sichuan University. His main research interests include ultra

precision testing, micro nano testing, non-destructive testing, etc.



**韦国晖**, 1998 年于西北大学获得学士学位, 2006 年于西安电子科技大学获得硕士学位, 现为西南石油大学讲师, 主要研究方向为电磁测量仪器及天线设计。

E-mail: 361650356@qq.com

**Wei Guohui** received his B. Sc. degree from Northwest Normal University in 1998 and received his M. Sc. degree from Xidian University in 2006. He is currently a lecturer at Southwest Petroleum University. His research interests include electromagnetic measuring instruments and antenna design.



**肖小汀** (通信作者), 2010 年于重庆邮电大学取得学士学位, 2012 年和 2016 年于法国南特理工学院先后获得硕士学位与博士学位, 于 2016~2020 年在中国电子科技大学担任博士后研究员, 现为西南石油大学讲师, 主要研究方向包括电磁探测、成像算法和仪器技术。

E-mail: xt\_xiao@foxmail.com

**Xiao Xiaoting** (Corresponding author) received the B. Sc. degree in Electronic Information Engineering from Chongqing University in 2010, the M. Sc. degree from Polytech' Nantes, France in 2012, and the Ph. D. degree in 2016. She worked as a postdoctoral fellow at the University of Electronic Science and Technology of China in 2016~2020. She is now a lecturer in Southwest Petroleum University. Her main research interests include the electromagnetic detection, imaging algorithms and instrumentation technology.