

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209580

气侵对井下环空流量电磁测量系统的影响研究*

葛亮¹,白洋¹,肖小汀²,曾文^{3,4},阳彩霞¹

(1.西南石油大学机电工程学院 成都 610500; 2.西南石油大学电气信息学院 成都 610500; 3.重庆大学材料科学与工程学院 重庆 400044; 4.重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400044)

摘要:井下环空流量电磁测量系统可以实时获取井下环空流量信息,但环空流道侵入的气体会对其测量结果产生影响,导致测量系统无法准确对钻井过程中出现的溢流和井喷问题进行预警。针对环空流量电磁测量系统受气侵影响的问题,研究首先通过建立气侵对环空流量电磁测量系统影响的理论模型,获得了环空流量电磁测量系统虚电流密度函数;其次,采用有限元仿真软件对侵入气体的不同存在状态进行动态模拟,分析环空流量电磁测量系统的虚电流分布规律;最后,搭建模拟实验平台进行不同两相混合流量下的含气率影响实验。实验结果表明,随着环空流道内两相混合流体含气率在0%~5%范围内增加,不同两相混合流量下的环空流量电磁测量系统输出电压均呈现下降趋势,采用二次函数拟合不同两相混合流量下环空流量电磁测量系统输出电压与含气率关系,可决系数 R^2 在0.98以上,拟合残差 e 小于0.011;最终通过归一化的输出电压与含气率关系式校正环空测量流量。研究成果可用于降低气侵对测量结果的影响,提高井下环空流量电磁测量系统的测量精度。

关键词:气侵;环空流量电磁测量;虚电流;有限元;影响特性

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 on the influence of gas invasion on the electromagnetic measurement system of downhole annular flow

Ge Liang¹, Bai Yang¹, Xiao Xiaoting², Zeng Wen^{3,4}, Yang Caixia¹

(1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. School of Electric and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The downhole annular flow electromagnetic measurement system can obtain real-time downhole annular flow information. However, the gas invaded by the annular flow channel affects its measurement results. The measurement system cannot accurately warn the overflow and blowout problems during the drilling process. To address the problem that the annular flow electromagnetic measurement system is affected by gas intrusion, the research firstly obtains the virtual current density function of the annular flow electromagnetic measurement system by formulating the theoretical model of the influence of gas intrusion on the annular flow electromagnetic measurement system. Secondly, the finite element simulation is used. The software dynamically simulates the different existing states of the invading gas, and analyzes the virtual current distribution law of the annular flow electromagnetic measurement system. Experimental results show that as the gas content of the two-phase mixed fluid in the annular flow channel increases in the range of 0%~5%, the output voltage of the annular flow electromagnetic measurement system under different two-phase mixed flow rates shows a downward trend. The relationship between the output voltage and gas content of the annular flow electromagnetic measurement system under different two-phase mixed flow rates is fitted by the quadratic function. The coefficient of determination R^2 is above 0.98, and the fitting residual e is less than 0.011. The relational corrected annulus measures the flow. The research results can be used to reduce the influence of gas intrusion on the measurement results and improve the measurement accuracy of the downhole annular flow electromagnetic measurement system.

Keywords: gas cutting; electromagnetic measurement of annular flow; virtual current; finite element; influence characteristics

收稿日期:2022-04-08 Received Date: 2022-04-08

* 基金项目:国家自然科学基金(51974273)项目资助

0 引言

伴随着油气勘探开发力度的加大,复杂地区的钻井作业日益增多,尤其是在窄安全密度窗口地区钻井时,容易引发溢流、漏失或其他复杂情况。而采用井下微流量控制钻井技术可以解决这些问题,实时获取井下的环空流量信息则是实现井下微流量控制钻井技术的核心部分。电磁流量测量具有不受介质流速分布、压力、密度等流体参数变化的影响等特性,目前已应用于井下环空流量测量中^[1-4]。但在钻井过程中,地层中的气体侵入环空流道会对环空流量电磁测量系统的测量结果产生影响,进而对井下工况产生误判,造成安全事故和人员伤亡。因此,研究井下环空流量电磁测量系统受气侵影响的规律,对提高井下环空流量电磁测量系统精度,并实现在窄安全密度窗口条件下的安全、快速钻井具有重要指导意义。

目前,为研究电磁流量测量受气体影响的问题,国内外学者从权重函数理论、电极优化以及信号处理方法等方面进行了大量研究,为电磁测量受气体影响的研究奠定了基础^[5-10]。Krafft等^[11]验证了电磁流量计可以同时测量气泡和连续导电相速度,研究了非导电相的权重函数分布对电磁流量计输出的影响。文献[12-13]建立了流动的电磁测量理论,使用“交替迭代逼近实际边界”等方法研究了气泡存在时虚电流和权重函数的解。Jiang等^[14]提出了一种计算气液两相流电磁流量计权函数的新方法,通过求解气液两相流的格林函数表达式,得到了权重函数分布规律,研究其均匀性变化。文献[15-16]设计了弧状电极电磁流量测量系统,对电极张角进行优化,实现了流型识别和气液两相流测量,为两相流流体各分相流量和混合流量的测量奠定基础。文献[17-18]采用管内相分隔技术对空气-水两相流体进行测量,使用旋流片将不同含气流型整流成稳定的环状流,在实验室阶段实现高含气率的两相流量在线计量,但该方法存在阻流件,易造成堵塞。文献[19-20]研究了单个气泡、多个气泡、连续气泡对虚电流分布的影响,对电磁流量计的响应特性进行仿真分析,为两相流研究提供了理论参考。Virbalis等^[21]研究了不同电磁性质和形状的介质对电磁流量计虚电流密度、磁通密度的影响,结果可用于多相流量测量。Li等^[22]研究了多相流对电磁流量计权重函数的影响,对电磁流量计中非导电物体的半径和位置参数引起的权重函数分布情况进行仿真分析。

此外,针对环空流量的电磁测量方法,国内外学者也进行了大量研究。邱仁森^[23]推导了环形流道的横向均匀磁场的灵敏度公式。金宁德等^[24]采用有限元软件分析了仪器偏心和流体磁导率对环空流道磁场分布造成的影响,并利用数值计算方法考察了清水与聚合物溶液流

体分布条件下测量仪器的输出特性。张志刚^[25]利用MATLAB对环空流道的权重函数分布情况进行了理论推导和仿真计算,为进一步开展环空流量电磁测量系统的研究奠定了理论基础。Ge等^[26]对环空流道的电磁流量测量方法进行了励磁线圈形状和电极方面的优化研究,提升了环空流量电磁测量系统的测量精度。Wang等^[27]提出了多传感器融合的方式来测量环空流道油气水多相流的新方法,为环空流量电磁测量系统测量多相流提供了新思路。

综上所述,研究学者对电磁法测流量受气体影响的研究主要集中在常规圆柱形流道,且主要进行理论推导和仿真分析;而针对井下环空流量电磁测量系统的研究主要集中在仪器偏心、流体磁导率、励磁线圈和电极结构优化等方面,没有专门考虑气侵对系统测量精度的影响。因此,为研究气侵对井下环空流量电磁测量系统的影响特性,首先建立气侵对井下环空流量电磁测量系统影响的理论模型,得到了气侵影响时环空流量电磁测量系统的虚电流密度函数;其次,通过有限元仿真研究侵入气体的轴向位置及大小对环空流量电磁测量系统虚电流分布造成的影响;最后,搭建模拟实验平台,定量分析不同两相混合流量下环空流量电磁测量系统输出电压与含气率的影响规律。研究成果可以降低气侵对井下环空流量电磁测量系统的影响,提高井下环空流量电磁测量系统测量精度,也可为气泡影响下的常规电磁流量测量提供理论指导。

1 气侵对环空流量电磁测量系统影响的理论模型构建

在钻井过程中,侵入气体的轴向位置和大小不断变化,动态过程复杂,因此在进行气侵对井下环空流量电磁测量系统影响的理论研究时,需要对其理论模型进行简化。假设气体早期侵入时以气泡形式存在,且气泡表面绝缘,励磁线圈产生的感应磁场 \vec{B} 大小均匀,方向平行于y轴,研究主要对单个气泡在不同轴向位置以及多个气泡存在时环空流量电磁测量系统测量截面的虚电流密度函数进行求解。

1.1 侵入气体的轴向位置对环空流量电磁测量影响

为研究侵入气体的轴向位置对环空流量电磁测量系统产生的影响,建立以环空流量电磁测量系统测量截面中心为原点的三维直角坐标系 (x, y, z) 和柱坐标系 (r, θ, z) ,并在气泡球心建立直角坐标系 (x', y', z') 和球坐标系 (r', φ', θ') 。环空流量电磁测量系统轴向位置存在气泡时的三维模型如图1所示,图中 e_1 和 e_2 为环空流量电磁测量系统的点电极。

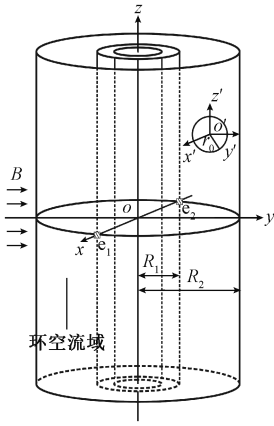


图 1 具有球形气泡的环空流量电磁测量系统三维模型
Fig. 1 Three-dimensional model of annular flow electromagnetic measurement system with spherical bubbles

环空流量电磁测量系统的虚电流势 G 满足式(1)的边界条件,求解过程采用“交替迭代逼近实际边界”的方法。

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial G}{\partial r} \right|_{r=R_1} = \frac{\delta(\theta)\delta(z) - \delta(\theta - \pi)\delta(z)}{R_1} \\ \left. \frac{\partial G}{\partial r} \right|_{r=R_2} = 0 \\ \left. \frac{\partial G}{\partial r'} \right|_{r'=r_0} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

首先考虑不含气泡时,环空流量电磁测量系统虚电流势 G 的 Laplace 方程 $\nabla^2 G = 0$ 在柱坐标系中展开为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial G}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 G}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

其双傅里叶形式的通解为:

$$G_1 = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_{mn}(r) e^{jm\theta} e^{inz} \quad (3)$$

式中: $a_{mn}(r)$ 是 $a_{I(mn)} I_{|m|}(|n|r) + a_{K(mn)} K_{|m|}(|n|r)$; $I_{|m|}(|n|r)$ 是第一类修正柱贝塞尔函数; $K_{|m|}(|n|r)$ 是第二类修正柱贝塞尔函数; $a_{I(mn)}$ 、 $a_{K(mn)}$ 是待定常数^[28]。

不考虑管壁边界条件时,气泡外域在球坐标系下的通解如式(4)所示:

$$G_2 = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{r'}{r_0} \right)^{-m-1} \frac{r_0}{-m-1} \frac{P_m^n(\cos\theta')}{N_m^n} \times [A_{mn} \cos(n\varphi') + B_{mn} \sin(n\varphi')] \quad (4)$$

式中: N_m^n 是 Legendre 函数 $P_m^n(\cos\theta')$ 的模。

设存在形式如式(3)的迭代初值 $G_1^{(1)}$, 满足式(5):

$$\left. \frac{\partial G_2^{(2)}}{\partial r'} \right|_{r'=r_0} = - \left. \frac{\partial G_1^{(1)}}{\partial r'} \right|_{r'=r_0} \quad (5)$$

构造形式如式(4)的 $G_2^{(2)}$, 代入式(1)的下半部分得式(6)。

$$\left. \frac{\partial G_2^{(2)}}{\partial r'} \right|_{r'=r_0} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{r'}{r_0} \right)^{-m-1} \frac{P_m^n(\cos\theta')}{N_m^n} \times [A_{mn} \cos(n\varphi') + B_{mn} \sin(n\varphi')] = - \left. \frac{\partial G_1^{(1)}}{\partial r'} \right|_{r'=r_0} \quad (6)$$

通过三角函数的正交性解式(6)可得 $A_{mn}^{(2)}$ 和 $B_{mn}^{(2)}$, 从而求得 $G_2^{(2)}$ 。再根据式(7)依次进行迭代。

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial G_1^{(2N-1)}}{\partial r} \right|_{r=R_0} = - \left. \frac{\partial G_2^{(2N-2)}}{\partial r} \right|_{r=R_0} \\ \left. \frac{\partial G_2^{(2N)}}{\partial r'} \right|_{r'=r_0} = - \left. \frac{\partial G_1^{(2N-1)}}{\partial r'} \right|_{r'=r_0} \end{cases} \quad N = 2, 3, \dots \quad (7)$$

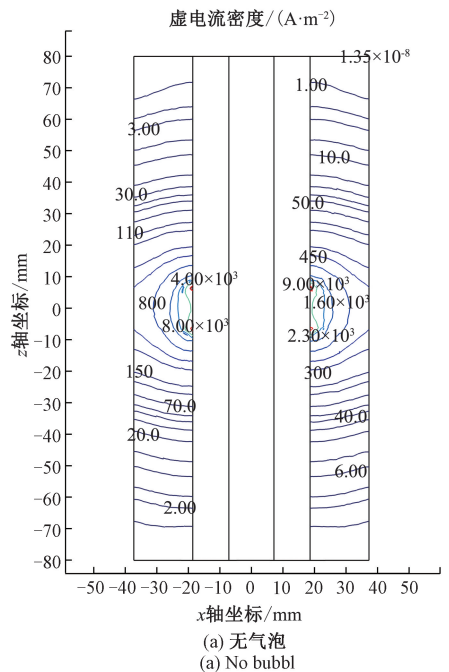
最后将各步所得到的解进行累加,最终虚电流势 G_F 的解为:

$$G_F = \sum_{i=1}^M [G_1^{(2i-1)} + G_2^{(2i)}] \quad (8)$$

对最终的虚电流势 G_F 求梯度可得最终虚电流密度 j_F 表达式如式(9)所示:

$$j_F = -\nabla G_F \quad (9)$$

利用数值分析方法根据上述的计算步骤和公式编写程序,将解析式中各变量的关系利用图形进行形象直观的表现。由于三维坐标系下的等势图不便于观察,所以选取 $X-Z$ 截面来分析虚电流的分布情况,计算得到环空流量电磁测量系统无气泡和含有 1 个气泡时的虚电流分布如图 2 所示。



x轴坐标/mm
(a) 无气泡
(a) No bubble

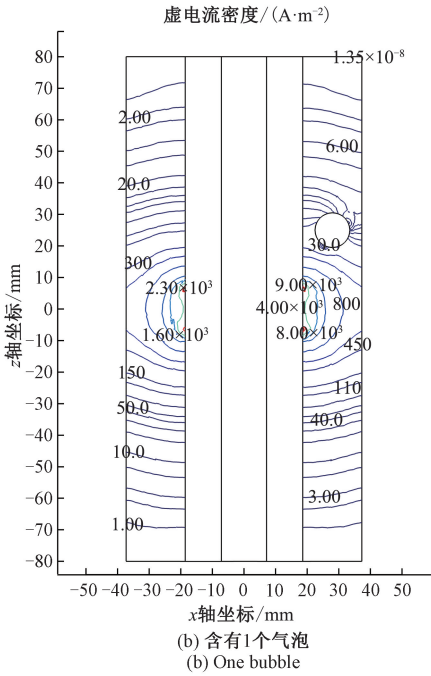


图2 X-Z 截面虚电流密度分布图

Fig.2 X-Z section virtual current density distribution

由图2可以直观看出在环空流道轴向位置上存在气泡会影响测量系统的虚电流分布,使得虚电流分布不均匀。此外,还可以根据式(8)单独计算其他气泡直径、轴向位置的情况。

1.2 侵入气体的大小对环空流量电磁测量影响

当侵入气体的大小发生变化,环空流道的气泡数量也会发生改变,虚电流密度的求解变得更加复杂。为方便研究环空流道中存在多个气泡对环空流量电磁测量系统的影响,设气泡的半径分别为 $R_i (i = 1, 2, 3, \dots, M)$, 位置分别为 $(x_{oi}, y_{oi}) (i = 1, 2, 3, \dots, M)$, 且气泡相互间不重叠。典型的含有3个气泡情况下环空流量电磁测量系统测量截面如图3所示,图中M、N为环空流量电磁测量系统的励磁线圈, e_1 和 e_2 为环空流量电磁测量系统的点电极。

虚电流势 G 在边界上满足式(10):

$$\begin{cases} \nabla^2 G = 0 \\ \frac{\partial G}{\partial n} = \begin{cases} \frac{\delta(\theta - \theta_{e_1}) - \delta(\theta - \theta_{e_2})}{r}, & r = a \\ 0, & r = R \\ 0, & r_i = R_i (i = 1, 2, 3, \dots, M) \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\theta_{e_1} = 0$ 和 $\theta_{e_2} = \pi$ 是点电极 e_1 和 e_2 所在角位置, $\frac{\partial G}{\partial n}$ 为虚电流势在域边界外法线方向上的导数。

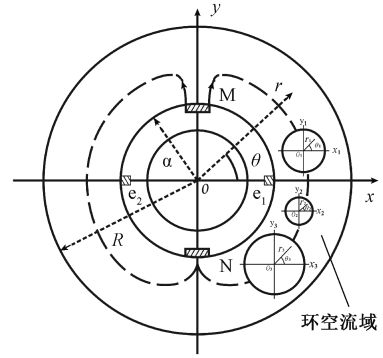


图3 具有3个气泡情况下环空流量电磁测量系统的横截面

Fig.3 Cross-section of annular flow electromagnetic measurement system with three bubbles

采用分离变量法,令 $G(r, \theta) = R(r)\Phi(\theta)$, 作式(10)基本解如下:

$$G(r, \theta) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \cos n\theta \times \frac{(a/R)^n (r/R)^n - (a/r)^n}{n[(a/R)^{2n} + 1]} \quad (11)$$

$$G_i(r_i, \theta_i) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \cos(n\theta_i) \times \frac{(a/R_i)^n (r_i/R_i)^n - (a/r_i)^n}{n[(a/R_i)^{2n} + 1]} \quad (12)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, M$

采用“Schwartz 交替迭代法”求解 G_1, G_2, \dots, G_M [29], 得到横截面含有 M 个气泡时环空流量电磁测量系统的虚电流势 G_F 最终解为:

$$G_F(r, \theta) = G(r, \theta) + \sum_{i=1}^M G_i(r, \theta) \quad (13)$$

式中: G 为不含气泡时环空流量电磁测量系统的电势分布; G_i 为第 i 个气泡引起环空流量电磁测量系统的电势变化量。

同样地,利用数值分析方法对式(13)求梯度并进行编程求解,得到环空流量电磁测量系统测量截面无气泡和含有3个气泡时的虚电流分布情况如图4所示。

从图4所示的虚电流分布可以看出,多个气泡存在对环空流量电磁测量系统虚电流的分布均匀性影响较大,但是具体影响的大小定量分析将在下一步的仿真分析中进行动态研究。

2 气侵对环空流量电磁测量系统影响的仿真与分析

环空流量的电磁测量本身是一个动态过程,在测量两相流体时,动态过程更加复杂,传统解析求解复杂,且结果多为静态,不能动态表现气侵对环空流量电磁测

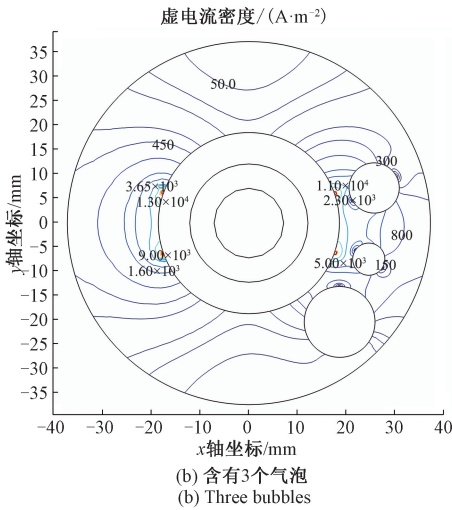
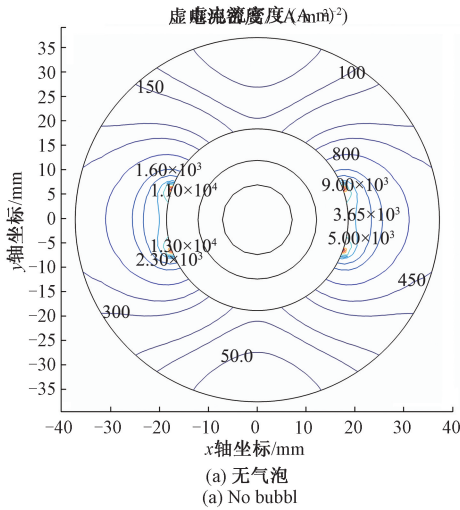


图 4 测量截面虚电流密度分布图

Fig. 4 Measured section virtual current density distribution diagram

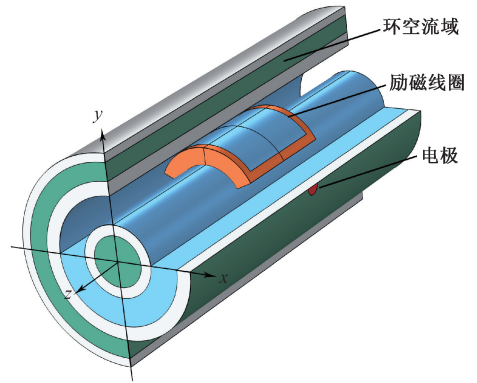


图 5 环空流量电磁测量系统三维模型

Fig. 5 Three-dimensional model of annular flow electromagnetic measurement system

表 1 主要材料的属性参数

Table 1 Attribute parameters of major materials

材料属性	空气	测量管段	环空流体	线圈	铁芯
相对磁导率/1	1	1	1	1	8 000
电导率/ (S·m ⁻¹)	1×10 ⁵	1×10 ⁸	5.5×10 ⁶	5.998×10 ⁷	1.695×10 ³
相对介电常数/1	1	1	81	1	1

虚电流密度 x 分量的范围为 $(-\infty, +\infty)$, 虚电流密度平均值 j_{avg} 定义如式 (14) 所示。

$$j_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |j_{xk}| \quad (14)$$

D_{max} 表示测量截面内虚电流密度值的最大偏差程度, 计算表达式如式 (15) 所示。

$$D_{max} = \max \left(\left| \frac{|j_{xk}| - j_{avg}}{j_{avg}} \right| \right) \quad (15)$$

2.2 侵入气体的轴向位置对环空流量电磁测量影响仿真

为了研究侵入气体在不同轴向位置时对环空流量电磁测量系统的影响, 设定半径为 0.4 mm 的气泡在环空流体中自下而上运动, 从 -75 ~ 75 mm 进行参数化扫描, 扫描步长为 5 mm。如图 6 所示为气泡在不同轴向位置时虚电流密度等值线分布情况。由图 6 可知, 气泡在靠近测量截面时, 测量截面附近的虚电流密度局部不均匀性增大; 当气泡远离测量截面时, 虚电流密度局部不均匀性减小, 其原因是气泡通过测量截面时产生的影响是不对称的, 改变了环空流体原有虚电流分布。

通过有限元仿真, 得到气泡位于不同轴向位置时虚电流密度平均值的变化情况如图 7 所示。由图 7 可知, 随着气泡接近测量截面的过程中, 虚电流密度平均值在距离测量截面 -5 mm 处达到最大值 119.08, 其原因是理想的虚电流密度分布具有对称性, 一旦这种对称性被打

量系统的影响规律。因此, 为验证理论模型的正确性, 本研究利用有限元分析软件 COMSOL 对理论模型进行进一步的动态仿真。针对气体在环空流道中的流动特性, 在仿真中引入移动网格技术更真实地模拟气侵对环空流量电磁测量系统虚电流分布产生的影响。

2.1 环空流量电磁测量系统有限元建模

在仿真过程中, 设定环空流道内径和外径分别为 178 和 220 mm, 长度为 500 mm, 电极直径为 10 mm。用绝缘球体模拟环空流道出现的气泡, 建立环空流量电磁测量系统三维模型如图 5 所示, 定义主要材料的属性参数如表 1 所示。

在研究中, 由于励磁线圈产生的感应磁场方向平行于 y 轴, 所以提出虚电流密度平均值 j_{avg} 、虚电流密度最大偏差 D_{max} 两个评价指标, 对虚电流密度 x 分量 j_x 分布受侵入气体的轴向位置和大小产生的影响进行评价和分析。

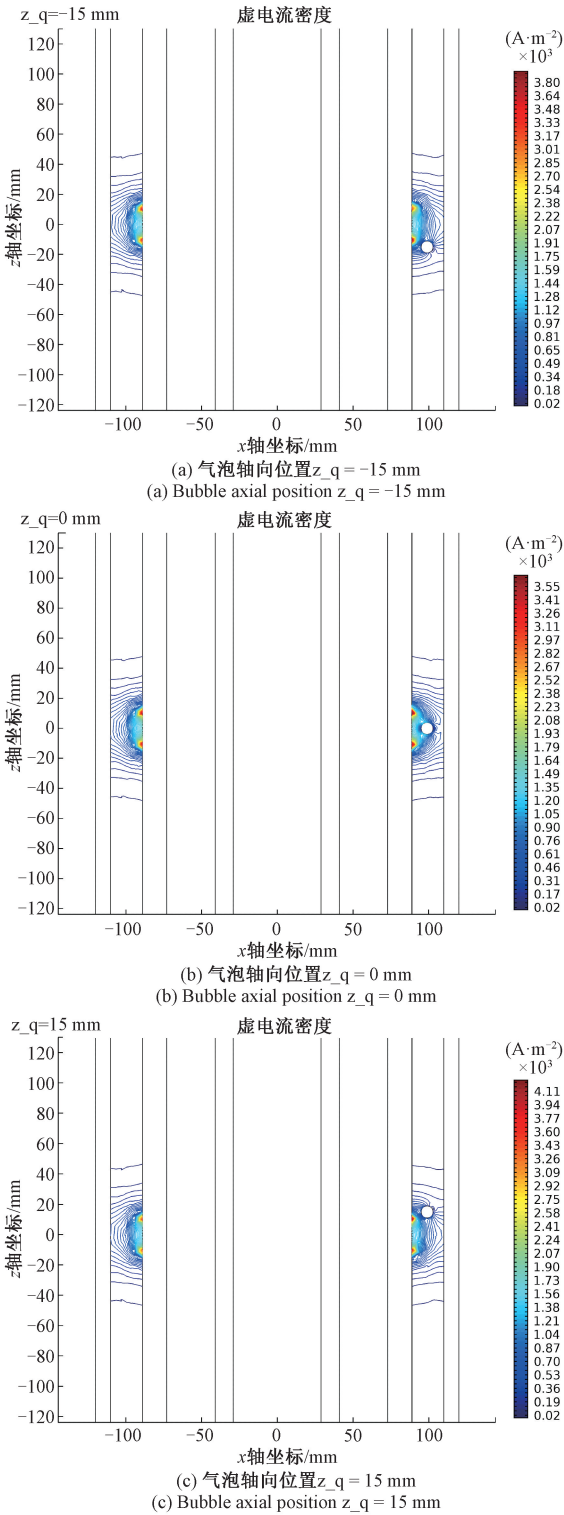


图6 气泡位于不同轴向位置时虚电流密度等值线分布图
Fig. 6 Contour distribution of virtual current density with bubbles located in different coaxial positions

3.16%。随着气泡远离测量截面,虚电流密度平均值趋于稳定,气泡对测量截面造成的影响逐渐减小。如图8所示为气泡位于不同轴向位置时虚电流密度最大偏差的变化情况。由图8可知,气泡在接近测量截面的过程中,虚电流密度最大偏差逐渐增加,且在测量截面达到最大值54.10,较环空流道不存在气泡时增加44.73%。远离测量截面后,虚电流密度最大偏差逐渐减小,这表明气泡在经过测量截面时对环空流量电磁测量系统的影响最大,其原因是气泡在测量截面导致的虚电流分布不均匀程度最大。

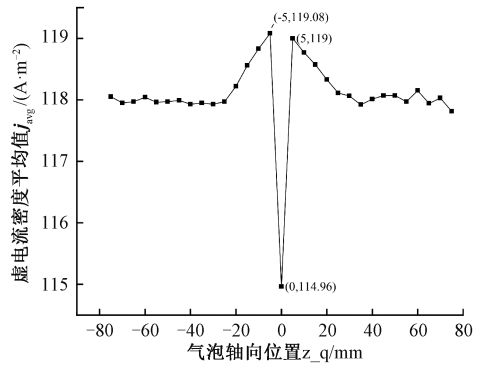


图7 虚电流密度平均值随气泡轴向位置变化趋势
Fig. 7 Trend diagram of average virtual current density with bubble axial position

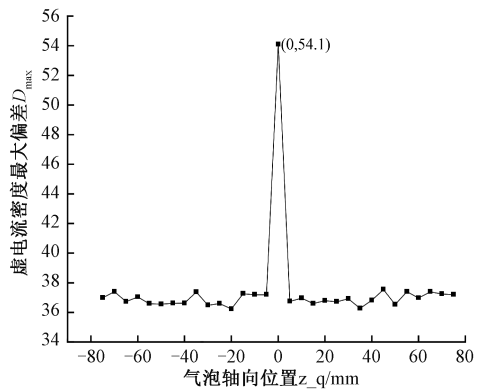


图8 虚电流密度最大偏差随气泡轴向位置变化趋势
Fig. 8 The maximum deviation of virtual current density varies with the axial position of bubble

2.3 侵入气体的大小对环空流量电磁测量影响仿真

为了研究侵入气体的大小对环空流量电磁测量系统的影响,在环空流道设置半径为0.4 mm的不同数量气泡在环空流道的轴线上运动,气泡数量从1~6个逐个进行参数化扫描。基于前面的分析已知气泡在经过测量截面时虚电流分布最为敏感,因此为了直观分析气泡数量对环空流量电磁测量系统的影响,选用气泡经过测量截面时的虚电流分布变化情况分析。图9为气泡数量分别为2、4和6个时测量截面虚电流密度等值分布图。由

破,会使得虚电流密度值发生较大的浮动。当气泡处于测量截面时,由于导电相面积减少,虚电流密度平均值减少至最小值114.96,较环空流道不存在气泡时减小

图 9 可知,随着气泡数量增加,虚电流密度局部不均匀性增加。其原因是随着气泡数量增加,测量截面虚电流分布的对称性越小,测量截面附近虚电流密度的相对变化率增加,对环空流量电磁测量系统产生的影响逐渐增加。

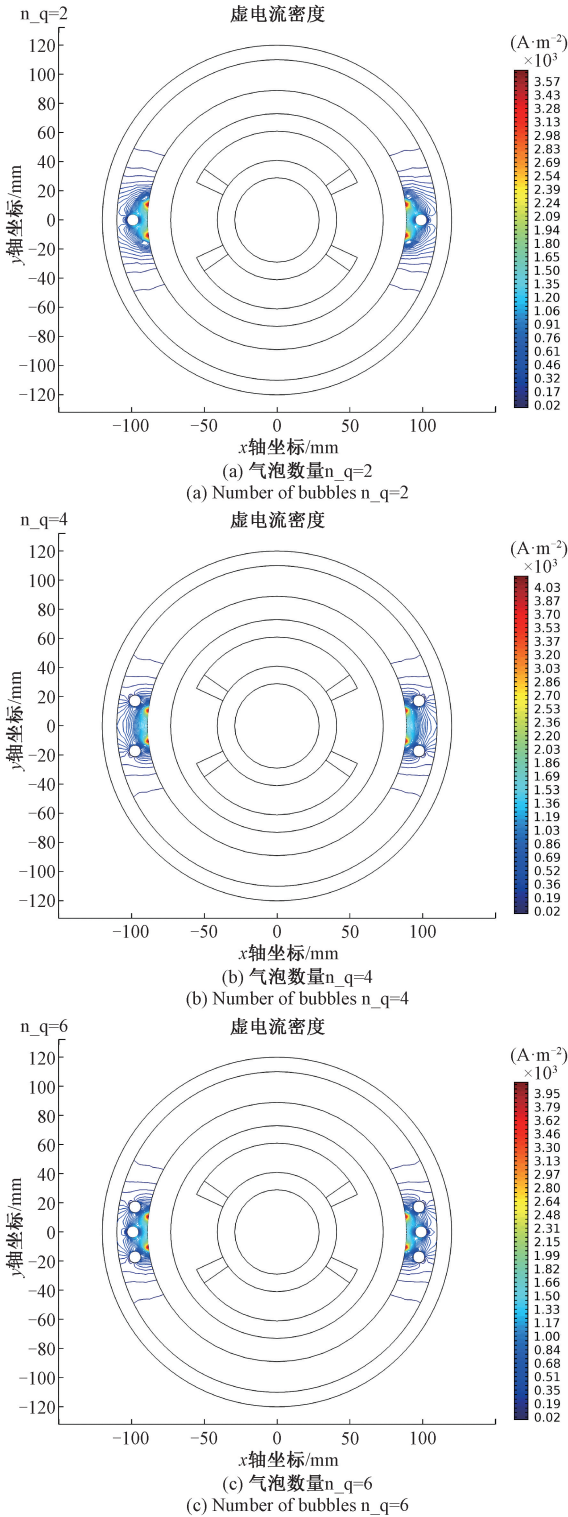


图 9 气泡数量不同时测量截面虚电流密度等值线分布图
Fig. 9 Contour map of virtual current density at different number of bubbles

通过有限元仿真,得到不同气泡数量下虚电流密度平均值的变化情况如图 10 所示。由图 10 可知,随着气泡数量的不断增加,虚电流密度平均值较环空流道不存在气泡时减小 10.79%,但气泡数量为 3、4 个时,虚电流密度平均值减小速率较小,减小 0.44%,其原因是此时气泡距离测量截面的电极位置较远,对虚电流分布造成的影响较小。如图 11 所示为不同气泡数量下虚电流密度最大偏差的变化情况。由图 11 可知,虚电流密度最大偏差随着气泡数量的增加而不断增大,环空流道不存在气泡时虚电流密度最大偏差为 37.38,气泡数量为 6 个时虚电流密度最大偏差为 48.14,增加 28.79%。通过对比发现,随着气泡数量增加,测量截面虚电流分布不均匀性也增大,对环空流量电磁测量系统产生的影响增加,这与理论模型中直接绘制的有气泡影响时虚电流分布均匀性变差的结果一致。

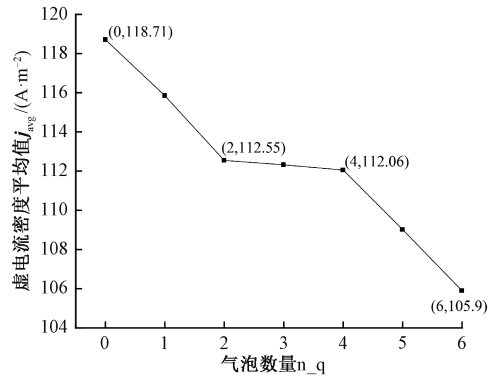


图 10 虚电流密度平均值随气泡数量变化趋势
Fig. 10 Trend diagram of the average virtual current density changing with the number of bubbles

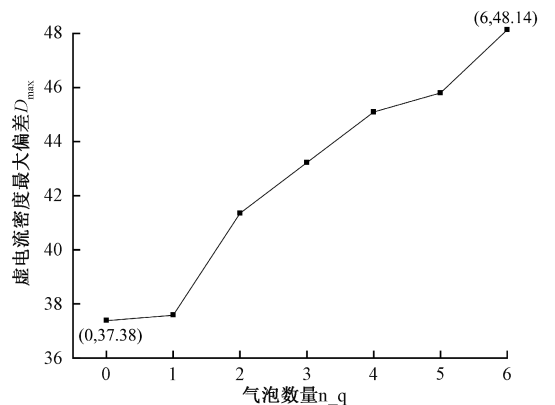


图 11 虚电流密度最大偏差随气泡数量变化趋势
Fig. 11 The maximum deviation of virtual current density varies with the number of bubbles

3 实验测试与分析

3.1 模拟实验平台搭建

从仿真研究结果可知,在侵入气体流动的过程中,气体轴向位置经过测量截面时产生的影响较大,并且侵入气体的大小不同会对环空流量电磁测量系统造成较大影响,因此实验主要进行侵入气体大小对环空流量电磁测量系统测量管段的影响实验。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模拟实验平台如图 12 所示。由于侵入气体在流体中的位置分布具有随机性,在实验过程中不便于控制,因此以环空流道内两相混合流体的体积含气率作为衡量气体侵入量大小的参数。两相混合流体的体积含气率为气相体积流量与两相体积流量之比^[30],用 β 表示,定义如式 (16) 所示。实验通过玻璃转子流量计控制气相体积流量在环空流道内两相混合流体体积流量上的占比实现两相混合流体含气率的控制。

$$\beta = \frac{Q_g}{Q} = \frac{Q_g}{Q_l + Q_g} \quad (16)$$

式中: β 为体积含气率; Q 为两相混合流体总体积流量; Q_g 为气相体积流量; Q_l 为液相体积流量。

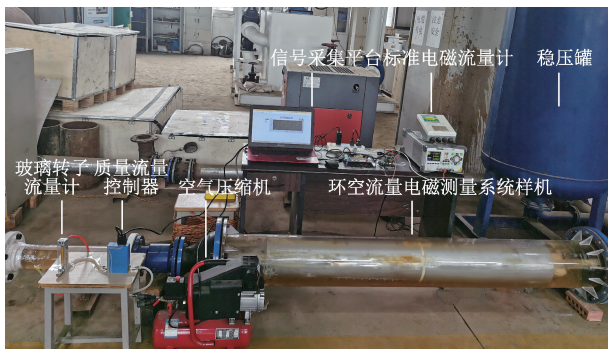


图 12 模拟实验平台

Fig. 12 Simulation experiment platform

3.2 实验与分析

根据搭建的模拟实验平台,开展不同两相混合流量下的含气率影响实验。控制环空流道内两相混合流量分别稳定在 26、49 和 68 m³/h,两相混合流体含气率变化范围为 0%~5%。在不同两相混合流量下,分别测量 12 组不同含气率条件下环空流量电磁测量系统输出电压。

分别选取不同两相混合流量下 4 组含气率不同的环空流量电磁测量系统输出电压数据,统计不同输出电压区间内的信号出现次数并作直方图如图 13 所示。由图 13 可知,随着两相混合流体含气率增加,环空流量电磁测量系统输出电压统计曲线峰值呈现下降趋势。其原因是当环空流道内没有气体侵入时,环空流量电磁测量系

统受到的影响较小,输出电压信号较为稳定,统计曲线峰值较高。当环空流道内两相混合流体含气率逐渐增加,大量微小气泡进入测量管段,环空流量电磁测量系统受到的影响增加,输出电压信号波动较大,导致输出电压统计曲线峰值减小。这表明随着含气率的增加,环空流量电磁测量系统输出电压与有效值的偏差会变大,这与仿真分析中随着气泡数量的增加,环空流量电磁测量系统的虚电流密度最大偏差逐渐增大的变化趋势一致,而虚电流密度偏差变大会导致环空流量电磁测量系统的输出电压偏差增大,验证了仿真结果与实验结果的一致性。

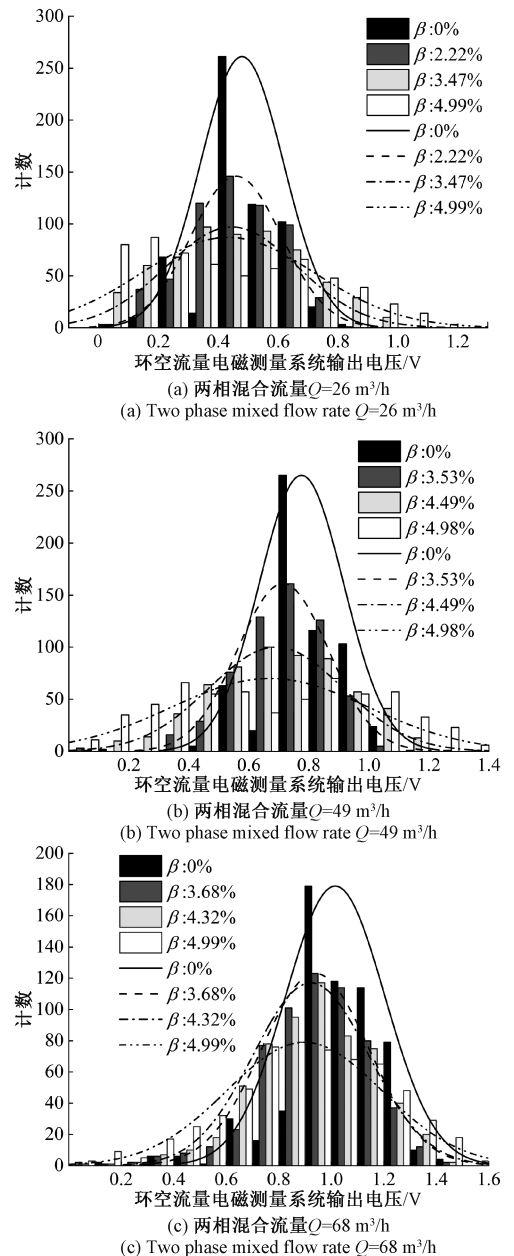


图 13 不同两相混合流体含气率下输出电压区间信号计数
Fig. 13 Signal counting of output voltage range under different gas holdup of two-phase mixed fluid

为了有效获得气侵后环空流量电磁测量系统的输出电压,通过上述基于统计曲线筛选的手段去除干扰信号,

将不同两相混合流量下环空流量电磁测量系统输出电压与含气率测试数据记录如表 2 所示。

表 2 不同两相混合流量下环空流量电磁测量系统内输出电压与含气率测试数据

Table 2 Output voltage and gas holdup test data in annular flow electromagnetic measurement system at different two-phase mixed flow rates

$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
26	$\beta/\%$	0	0.462	0.914	1.417	1.854	2.226	2.739	3.157	3.532	4.066	4.534	4.994
	U/V	0.474	0.473	0.470	0.465	0.463	0.455	0.448	0.444	0.431	0.426	0.417	0.394
49	$\beta/\%$	0	0.512	0.946	1.422	1.862	2.321	2.767	3.182	3.491	3.912	4.497	4.899
	U/V	0.785	0.783	0.777	0.773	0.762	0.759	0.753	0.745	0.729	0.714	0.710	0.684
68	$\beta/\%$	0	0.453	0.855	1.343	1.805	2.359	2.652	3.325	3.530	4.109	4.574	4.987
	U/V	1.043	1.040	1.034	1.031	1.022	1.019	1.002	0.997	0.970	0.963	0.945	0.912

为进一步研究环空流量电磁测量系统受气侵影响后输出电压的变化规律,作环空流道内两相混合流体含气率对环空流量电磁测量系统输出电压产生的影响百分比曲线如图 14 所示。由图 14 可知,随着两相混合流体含气率在 0%~5% 范围内增加,不同两相混合流量下的环空流量电磁测量系统输出电压均呈现下降趋势,而且随着含气率的增加,环空流量电磁测量系统输出电压下降速率增加。当两相混合流量为 $26 m^3/h$,含气率为 4.99% 时,气侵使得环空流量电磁测量系统的输出电压减小 16.88%;当两相混合流量为 $49 m^3/h$,含气率为 4.90% 时,气侵使得环空流量电磁测量系统的输出电压减小 12.87%;当两相混合流量为 $68 m^3/h$,含气率为 4.98% 时,气侵使得环空流量电磁测量系统的输出电压减小 12.56%。上述结果表明环空流道内两相混合流体含气率增加会导致环空流量电磁测量系统输出电压减小。由第 2 节仿真结论可知,侵入气体大小增加会引起环空流量电磁测量系统测量截面的虚电流密度减小,而测量系统的输出电压与虚电流密度密切相关^[16],虚电流密度减小将会导致环空流量电磁测量系统输出电压减小,这与实验中随着含气率的增加,不同两相混合流量下的环空流量电磁测量系统输出电压均呈现下降的趋势一致。这表明仿真结论与实验结果具有一致性,足以验证气侵对环空流量电磁测量系统仿真分析结果的正确性。

为定量描述环空流量电磁测量系统输出电压变化受气侵影响的关系,采用二次函数拟合不同两相混合流量下环空流量电磁测量系统输出电压与含气率关系如图 15 所示,并将拟合曲线对环空流量电磁测量系统输出电压平均值的估计范围表示为置信区间,将拟合曲线对环空流量电磁测量系统输出电压个别值的估计范围表示为预测区间。当环空流道内两相混合流量为 $26 m^3/h$ 时,可决系数 R^2 为 0.987;当环空流道内两相混合流量为

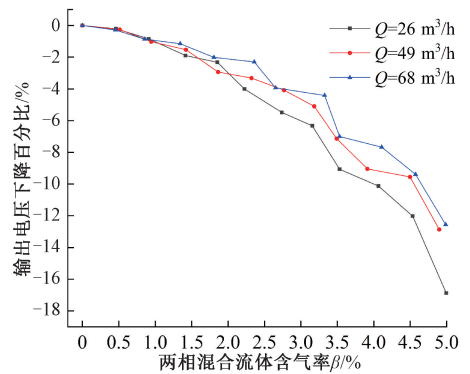


图 14 环空流道内两相混合流体含气率与输出电压变化百分比曲线

Fig. 14 Percentage curve of gas holdup and output voltage change of two-phase mixed fluid in annular passage

$49 m^3/h$ 时,可决系数 R^2 为 0.983;当环空流道内两相混合流量为 $68 m^3/h$ 时,可决系数 R^2 为 0.980。并且由环空流量电磁测量系统输出电压的拟合残差分布图 16 可知,在不同两相混合流量下,环空流量电磁测量系统输出电压拟合残差 e 均小于 0.011,这表明二次函数对环空流量电磁测量系统输出电压随环空流道内两相混合流体含气率变化规律拟合度较好,因此建立环空流量电磁测量系统输出电压与含气率变化关系模型如式(17)所示。

$$U = a[\beta - h]^2 + b \tag{17}$$

式中: U 为环空流量电磁测量系统的输出电压; β 为环空流道内两相混合流体的体积含气率; a 、 b 取决于环空流道两相混合流量以及输出电压强度; h 为待定常数。

通过建立的环空流量电磁测量系统输出电压与含气率变化关系模型,进一步计算得到不同两相混合流量下环空流量电磁测量系统输出电压 U 与含气率 β 关系如式(18)所示。

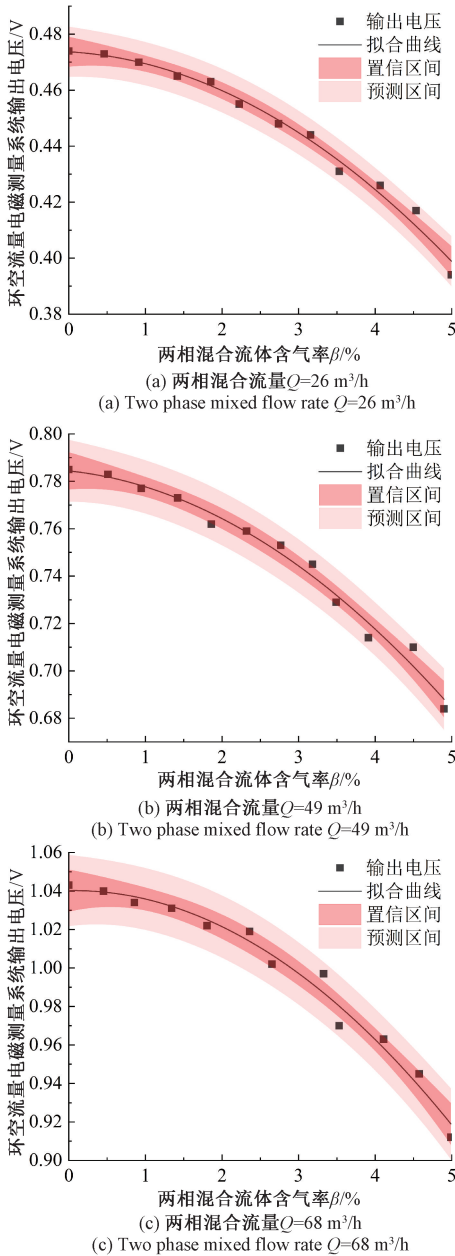


图 15 不同两相混合流量下环空流量电磁测量系统输出电压与含气率拟合曲线

Fig. 15 Fitting curve of output voltage and gas holdup of annular flow electromagnetic measurement system under different two-phase mixed flow

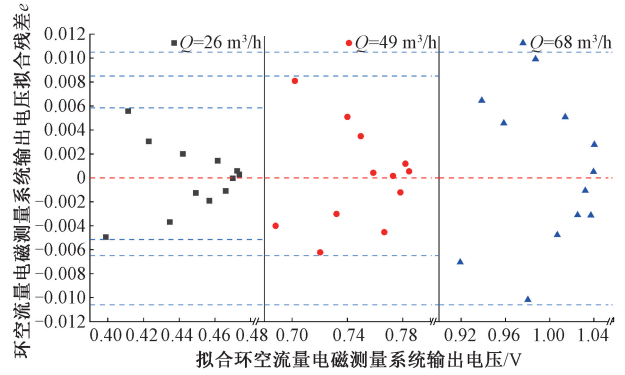


图 16 不同两相混合流量下环空流量电磁测量系统输出电压的拟合残差分布

Fig. 16 Fitting residual distribution of output voltage of annular flow electromagnetic measurement system at different two-phase mixed flow rates

$$\begin{cases} U_1 = 0.47 - 1.58 \times 10^{-3}\beta - 2.68 \times 10^{-3}\beta^2, \\ Q = 26 \text{ m}^3/\text{h} \\ U_2 = 0.78 - 3.46 \times 10^{-3}\beta - 3.31 \times 10^{-3}\beta^2, \\ Q = 49 \text{ m}^3/\text{h} \\ U_3 = 1.04 - 6.52 \times 10^{-4}\beta - 0.5 \times 10^{-2}\beta^2, \\ Q = 68 \text{ m}^3/\text{h} \end{cases} \quad (18)$$

对式(18)进行归一化处理,得到式(19):

$$U = a[\beta - (0.294 \pm 0.229)]^2 + b \quad (19)$$

式中: U 为环空流量电磁测量系统的输出电压; β 为环空流道内两相混合流体的体积含气率; a 、 b 仅与环空流道内两相混合流量、输出电压强度有关。

式(19)可以定量反映环空流量电磁测量系统输出电压与含气率之间的对应关系,即可确定环空流量电磁测量系统与气侵的敏感性关系。后期实际应用时可采用电导、电容等阻抗式传感器获得体积含气率^[31-32],根据式(19)来校正环空流量,提高环空流量电磁测量系统测量精度。

4 结 论

本研究根据电磁检测的基本原理,建立了气侵对环空流量电磁测量系统影响的理论模型,采用解析法求解得到虚电流密度函数;其次,通过有限元仿真软件研究了气侵对井下环空流量电磁测量系统虚电流密度分布的影响规律;最后,搭建模拟实验平台,进行了不同两相混合流量下的含气率影响实验。主要取得了如下成果:

1) 基于环空流量电磁测量系统虚电流密度理论基础,建立了气侵对环空流量电磁测量系统影响的理论模型;针对侵入气体不同轴向位置及大小的情况,采用“交

替代法”对环空流量电磁测量系统的虚电流密度函数进行求解;研究补充了气侵对井下环空流量电磁测量系统的影响理论。

2)利用有限元仿真软件 COMSOL,建立了环空流量电磁测量系统三维模型,对侵入气体的轴向位置和大小对环空流量电磁测量系统造成的影响进行动态仿真,并利用虚电流密度平均值 j_{avg} 和虚电流密度最大偏差 D_{max} 对环空流量电磁测量系统虚电流密度分布受气侵的影响进行评价和分析。获得了侵入气体在不同轴向位置及不同大小时环空流量电磁测量系统虚电流密度等值线分布以及虚电流密度平均值和虚电流密度最大偏差的变化趋势。

3)搭建模拟实验平台,开展不同两相混合流量下的含气率影响实验。首先,通过基于统计曲线筛选的手段去除干扰信号,分析不同两相混合流量下环空流量电磁测量系统输出电压受气侵影响的输出电压变化百分比;其次,采用二次函数拟合不同两相混合流量下环空流量电磁测量系统输出电压与含气率关系,随着两相混合流体含气率在 0%~5% 范围内增加,不同两相混合流量下的环空流量电磁测量系统输出电压均呈现下降趋势。当两相混合流量为 $26 \text{ m}^3/\text{h}$,含气率为 4.99% 时,气侵使得环空流量电磁测量系统的输出电压减小 16.88%,可决系数 R^2 为 0.987;当两相混合流量为 $49 \text{ m}^3/\text{h}$,含气率为 4.90% 时,气侵使得环空流量电磁测量系统的输出电压减小 12.87%,可决系数 R^2 为 0.983;当两相混合流量为 $68 \text{ m}^3/\text{h}$,含气率为 4.98% 时,气侵使得环空流量电磁测量系统的输出电压减小 12.56%,可决系数 R^2 为 0.980;并且环空流量电磁测量系统输出电压拟合残差 e 均小于 0.011。最后,得到归一化的环空流量电磁测量系统输出电压与含气率变化关系式,由此可校正环空流量,提高环空流量电磁测量系统的测量精度。

参考文献

[1] 吕殿龙,魏云飞,韦旺. 电磁流量计及其在聚驱测井中的应用[J]. 石油仪器, 2001, 15(3): 34-36.
LYU D L, WEI Y F, WEI W. Application of the electromagnetic flowmeter to polymer injection profile logging[J]. Petroleum Instruments, 2001, 15(3): 34-36.

[2] 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.

[3] 张文军. 外流式电磁流量计在大庆油田聚驱注入剖面测井中的应用[J]. 国外油田工程, 2004, 20(8): 35-37.
ZHANG W J. Application of external flow electromagnetic flowmeter in polymer flooding injection profile logging in Daqing oilfield[J]. Foreign Oilfield Engineering, 2004, 20(8): 35-37.

[4] GE L, WEI G H, WANG Q, et al. Novel annular flow electromagnetic measurement system for drilling engineering[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(18): 5831-5839.

[5] 徐立军,王亚,乔旭彤,等. 多对电极电磁流量计传感器电极阵列设计[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 335-339.
XU L J, WANG Y, QIAO X T, et al. Design of electrode array of multi-electrode electromagnetic flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(4): 335-339.

[6] 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.

[7] 熊伟,徐科军,于新龙,等. 基于谐波分析的电磁流量计信号处理方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 154-160.
XIONG W, XU K J, YU X L, et al. Signal processing method of electromagnetic flowmeter based on harmonic analysis[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9): 154-160.

[8] DONG F, LI L, ZHANG S. Flow status identification based on multiple slow feature analysis for gas-liquid two-phase flow in horizontal pipe[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(5): 055301.

[9] ZHOU F, YANG Q F, LIN KUN. Evaluation index and performance structure optimization of magnetic field uniformity of complex multiphase flow electromagnetic flowmeter[J]. Measurement and Control, 2022;1-10.

[10] 周念,黄云志,杨双龙. 并行激励的电磁流量计电导率测量系统研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 115-122.
ZHOU N, HUANG Y ZH, YANG SH L. Design of the electromagnetic flowmeter conductivity measurement system with parallel excitation[J]. Journal of Electronic

- Measurement and Instrumentation, 2020, 34 (10): 115-122.
- [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] ZHANG X ZH, ZHAO L R, LIU J. Experiment on water-gas two-phase flow measurement by an electromagnetic flow meter [C]. Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications Ltd, 2013, 401: 1040-1043.
- [13] 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.
ZHANG X ZH. Theory and method of electromagnetic induction measurement of flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [14] JIANG Y L. Study on weight function distribution of hybrid gas-liquid two-phase flow electromagnetic flowmeter [J]. Sensors, 2020, 20(5): 1431.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] NIU P M, WANG D, WEI P K, et al. Liquid flow measurement using phase isolation and imaging method in horizontal gas-liquid two phase flow [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(9): 095303.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] VIRBALIS J A, RAČKIENĖ R, KRIUGLAIT Ė-JARAŠIŪNIENĖ M, et al. The influence of admixtures to the signal of an electromagnetic flow meter [J]. Energies, 2019, 12(5): 772.
- [22] 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, IOP Publishing, 2021, 1952(3): 032081.
- [23] 邱仁森. 关于环形流道电磁流量测量的研究 [J]. 核科学与工程, 1983, 3(1): 23-28.
QIU R S. Research on electromagnetic flow measurement of annular channel [J]. Nuclear Science and Engineering, 1983, 3(1): 23-28.
- [24] 金宁德, 宗艳波, 郑桂波, 等. 注聚井中电磁流量计测量特性分析 [J]. 石油学报, 2009, 30 (2): 308-311.
JIN N D, ZONG Y B, ZHENG G B, et al. Measurement characteristics of electromagnetic flowmeter in polymer injection well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 308-311.
- [25] 张志刚. 外流式电磁流量计权重函数分布的仿真研究 [J]. 石油仪器, 2010, 24(1): 12-14.
ZHANG ZH G. Simulation study on weight function distribution of external flow electromagnetic flowmeter [J]. Petroleum Instruments, 2010, 24 (1): 12-14.
- [26] GE L, LI H L, WANG Q, et al. Design and optimization of annular flow electromagnetic measurement system for drilling engineering [J]. Journal of Sensors, 2018, 2018; 1-12.
- [27] WANG Y J, LI H Y, LIU X B, et al. A new method of measuring the oil-air-water three-phase flow rate [J]. Chemical Engineering Communications, 2020, 207(1): 1-16.
- [28] 葛亮, 韦国晖, 赖欣. 井下环空流量电磁测量理论与技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2020; 53-56.
GE L, WEI G H, LAI X. Theory and technology of electromagnetic measurement of downhole annulus flow [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020;

53-56.

- [29] LI Y W, KONG L F, LIU L B. Virtual current characteristics of electromagnetic flow meter with spherical bubbles [J]. Journal of Computational Information Systems, 2011, 7(3): 762-769.
- [30] 张瀚瑞,董峰,谭超. 液固两相流压降规律及超声法压降测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 46-54. ZHANG H R, DONG F, TAN CH. Liquid-solid two-phase flow pressure drop and ultrasound-based pressure drop measurement method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 46-54.
- [31] 施艳艳,董峰,谭超. 两相流测量中环形电导传感器特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 62-66. SHI Y Y, DONG F, TAN CH. Characteristic of ring-shaped conductance sensor in two-phase flow measurement [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(17): 62-66.
- [32] SHI X W, TAN C, WU H, et al. An electrical and ultrasonic Doppler system for industrial multiphase flow measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-13.

作者简介



葛亮(通信作者),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,主要研究方向为复杂环境下的检测技术研究。

E-mail: cgroad@163.com

Ge Liang (Corresponding author) 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 direction is detection technology research in complex environment.

白洋,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:202022000243@stu.swpu.edu.cn

Bai Yang received his B. Sc. degree from



Southwest Petroleum University in 2020. He is currently a master student at Southwest Petroleum University. His research interest is electromagnetic detection.



肖小汀,2010年于重庆邮电大学获得学士学位,2013年于华南理工大学获得硕士学位,2016年于法国南特大学获得博士学位,现为西南石油大学讲师,主要研究方向为油气相关无损检测技术。

E-mail:xt_xiao@foxmail.com

Xiao Xiaoting received her B. Sc. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2010, received her M. Sc. degree from South China University of Technology in 2013, and received her Ph. D. degree from University of Nantes, FR, in 2016. She is currently a lecturer at Southwest Petroleum University. Her main research direction is non-destructive testing technology related to oil and gas



曾文,2011年于重庆大学获得博士学位,现为重庆大学博士生导师,输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室固定研究员,主要研究方向为仪器仪表技术、气体传感和第一性原理计算。

E-mail:wenzeng@cqu.edu.cn

Zeng Wen received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2011. He is currently a Ph. D. advisor at Chongqing University and a regular researcher of 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.

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,主要研究方向为电磁检测。

E-mail:1455454387@qq.com



Yang Caixia received her B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2019. She is currently a postgraduate student at Southwest Petroleum University. Her research interest is electromagnetic detection.