

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905700

# 基于电磁检测机理的井下环空流量测量方法研究\*

葛亮<sup>1</sup>, 黄凯强<sup>1</sup>, 田贵云<sup>2</sup>, 胡泽<sup>3</sup>, 韦国晖<sup>4</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 37RU;  
4. 西南石油大学电气信息学院 成都 610500; 5. 西南石油大学理学院 成都 610500)

**摘要:**复杂油气藏的开采面临严重的溢流、漏失等钻井事故风险,实时监测近钻头环空流量信息可以在事故早期发现工况异常,有效降低井控风险。对钻井过程中的环空流量电磁测量方法进行了研究,首先对基于法拉第电磁感应定律的井下环空流量电磁测量方法的测量原理进行了研究;其次分析了井下环空流量电磁测量系统设计思路,详细推导了其虚电流密度分布及其机械结构力学模型;然后,通过有限元仿真软件进行励磁线圈结构优化及主体力学分析得到测量系统的最优结构;最后,搭建井下环空流量电磁测量地面原理样机并进行实验测试验证。实验结果表明,电磁测量原理样机测量精度在1%左右且安全系数大于9,可以满足井下环空流量测量的需要。本文完成的井下环空电磁测量方法,对于后续井下环空流量测量方法的实现以达到早期井控的目的,继而降低钻井风险具有指导意义。

**关键词:**电磁测量;环空流量;仿真分析;早期溢流;实时监测

**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 the measurement method of downhole annular flow based on the electromagnetic detection mechanism

Ge Liang<sup>1</sup>, Huang Kaiqiang<sup>1</sup>, Tian Guiyun<sup>2</sup>, Hu Ze<sup>3</sup>, Wei Guohui<sup>4</sup>

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

**Abstract:** The recovery of the complex oil and gas reservoir faces serious overflow, leakage and other drilling accidents. The real time information near bit annular flow information can help to identify the abnormality early, which can reduce the risk of well control effectively. In this paper, a method of electromagnetic measurement system for annular flow in the drilling process is proposed. Firstly, the theory of downhole annular flow electromagnetic measurement system based on Faraday's law is studied. Then, the principle of downhole annular flow electromagnetic measurement system is analyzed. The virtual current density distribution and the mechanical model are deducted in detail. The optimum structure of the measurement system is obtained by the finite simulation software combined with excitation coil structure optimization and main structure mechanics analysis. Finally, the prototype of downhole annular flow electromagnetic measurement is constructed and the evaluation experiment is implemented. Experimental results show that the electromagnetic measurement prototype can reach the accuracy of around 1. Its safety factor is over 9, which satisfies the downhole annular flow measurement. The downhole annular electromagnetic measurement theory has great significance to the following research on downhole annular flow measurement and realization of early well control and secure drilling.

**Keywords:** electromagnetic measurement; annulus flow; simulation analysis; early kick; real-time monitoring

## 0 引言

近年来我国油气资源对外依存度达到历史新高<sup>[1]</sup>,随着内部需求的上升,复杂油气藏的开发迫在眉睫<sup>[2-3]</sup>。致密油气、页岩油气、油砂等非常规油气藏在我国存量巨大<sup>[4-6]</sup>,但复杂油气藏地层构造不均、安全密度窗口窄,易出现压力突变而发生井喷等事故<sup>[3,7]</sup>。溢流作为井喷的前兆,是钻井过程中的重要监测对象。对井下溢流模式的研究以及早期溢流监测是防止井喷、迅速控制地层压力及正确制定压井方案的重要条件。

目前国内还主要依靠进出口流量变化来监测溢流,但在溢流出现的早期阶段,无法在井口检测到流量变化。为了解决进出口流量法在溢流监测中的滞后问题,及早发现溢流,并提高监测精度和准确性,国内外研究人员开始考虑随钻过程中通过井下溢流检测传感器实时高速传输数据实现溢流的监测<sup>[8-11]</sup>。Rohani 等<sup>[12]</sup>基于随钻环空压力测量(annular pressure while drilling, APWD)技术实时测量井底环空压力、环空流体温度、当量循环钻井液密度及当量静态钻井液密度,可用于监测早期井涌,当油气侵入环空流道中时,流体温度升高、压力出现波动,以此监测井下溢流。Mark 等<sup>[13]</sup>在电缆地层测试基础上提出了随钻地层测量技术(formation testing while drilling, FTWD),利用 FTWD 在钻井作业暂停期间测量地层压力,测量环空压力来监测溢流。目前国外 FTWD 技术已经开始投入到商业使用中<sup>[14-15]</sup>,而国内还没有成熟的 FTWD 技术。但上述井下溢流检测技术,都是基于间接参数的测量来实现溢流监测,虽然相对传统的井口溢流监测方式在时效性方面有了很大提高,其监测精度和准确性上却相对具有一定的局限性,因此基于井下流量测量实现溢流监测的技术应运而生。

针对井下环空流量测量,国外研究人员于 2004 年已经开始从事该方向的研究,如 Wei 等<sup>[16]</sup>基于多普勒效应对钻柱内流体流动方向及速度进行了研究;在此基础上,研究人员 Mark 等<sup>[17]</sup>根据测量段间声速传播计算环空内体积流量变化,并由此推测出井底溢流产生的具体位置。国内西南石油大学与电子科技大学团队于 2011 年共同研究了基于多普勒声学效应和时差法的井下超声波环空流量测量方法,并进行了相关地面实验。但声波测量法在实践过程中效果并不理想,其测量精度的提高相对困难,且钻井液属于固液两相混合流体,理论研究难度较大<sup>[18-21]</sup>。考虑到超声波测量法目前的实现难度问题,西南石油大学陈平教授团队基于压差法实现了随钻井下环空流量测量<sup>[22-23]</sup>。压差测量法测量是基于管柱表面结构人为产生上下压力差,从而获得环空流速的测量方法。但管柱表面结构会使循环系统产生额外的压力损失,且

测量系统表面的异形结构致使其容易积存钻井液岩屑、泥饼等污垢,无法保证测量精度,还会造成环空流道阻塞。

而井下环空流量电磁测量系统所有部件均在管柱内部,其内外表面平整光滑,不会影响正常钻井生产,且测量系统无活动部件,在井下强振动环境下,其耐用性相对较好,钻柱内流体流动状态为湍流,对其他类型的测量方式的精度有较大影响,但井下环空流量电磁测量系统理论上灵敏系数不受湍流影响,测量结果不受流体的密度、温度、压力、粘度、雷诺数以及一定范围内的电导率变化的影响,可以用于钻井液这类两相流体测量<sup>[24-28]</sup>。

因此,电磁测量法极其适用于井下环空流量测量。对井下环空流量电磁测量系统的基础理论进行研究,建立井下环空流量电磁测量系统仿真模型,并在地面搭建测量系统样机完成标定及瞬时流量测试,可以为后续井下环空流量电磁测量系统的实现提供指导。该技术的研究对防止溢流和井漏等问题的发生,并实现在深井窄泥浆密度窗口条件下的安全、快速钻井具有重大作用和意义。

## 1 井下环空流量电磁测量系统的测量原理

井下环空流量电磁测量系统是基于法拉第电磁感应定律来测量导电液体体流量的仪表<sup>[29]</sup>。根据法拉第电磁感应定律,若金属导体在磁场中做切割磁力线的运动,则导体两端会产生感应电动势,导电液体也适用该原理。如图 1 所示,测量系统外部的环空流道中的钻井液流体对励磁线圈产生的环空磁场进行切割同样可以产生感应电动势,该原理也是开发环空流量电磁测量方法最根本的理论依据。

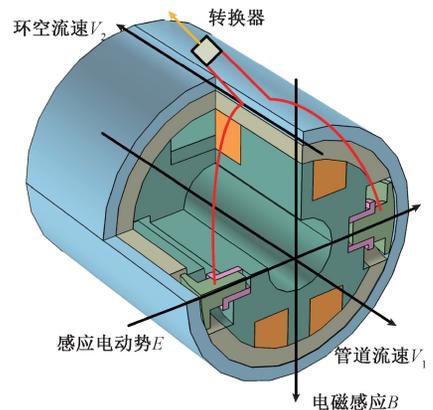


图 1 井下环空流量电磁测量系统原理

Fig.1 Principle of downhole annular flow electromagnetic measurement system

在理想状态下,其感应电动势如式(1)所示。

$$E_i = BD\bar{v} \quad (1)$$

式中: $B$ 为磁感应强度,单位为T; $D$ 为导体长度,单位为m; $\bar{v}$ 为运动速度,单位为m/s。

式(1)说明导体两端产生的感应电动势的大小与磁感应强度 $B$ 、导体长度 $D$ 及导体运动速度 $\bar{v}$ 成正比;若将导体的直径看做流道长度,液体的流动可以看成导体在磁场内切割磁力线。当磁感应强度 $B$ 一定时,电极处测量出的感应电动势只与管道内的平均流速成正比。

但是对于井下环空流量电磁测量系统来说,确保磁感应强度在环空流道内的均匀分布十分困难。测量系统在井下工作时,其环境干扰较大,钻柱的振动、偏心等都可能对井下环空流量电磁测量系统的磁场分布产生影响。且测量系统在工作中时需在管柱内部的狭小空间内承受极大的外部载荷作用,其主体结构分布又会在很大程度上影响力学性能。故本文将从井下环空流量电磁测量系统的磁场及主体结构两方面进行数学建模与仿真分析研究,使井下环空流量电磁测量系统得到更好的优化。

## 2 井下环空流量电磁测量系统理论模型

井下环空流量电磁测量系统结构如图2所示,主要由系统主轴、系统外壳、电极、励磁线圈、外转接头、电子板及电池模块组成<sup>[30]</sup>。为了满足占用空间小的需求,本研究首先自行设计并优化了测量系统的整体结构。

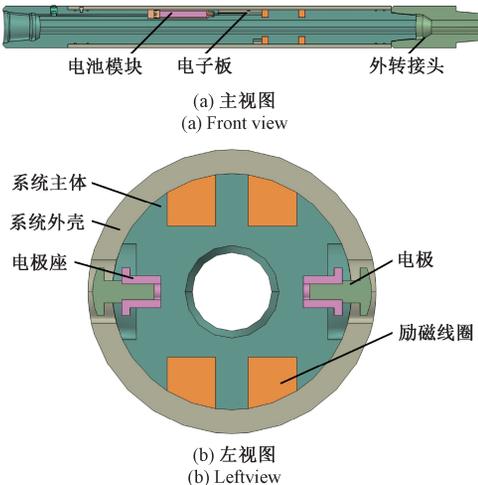


图2 测量系统整体结构

Fig.2 Overall structure of measurement system

测量系统整体长度为1 800 mm(不含接头长度),为保证与公螺纹相连接的侧壁具有足够的强度,测量系统采用NC46接头,外接长度300 mm的NC50转接头。电池组由套筒及密封压帽包裹密封并固定,防止其受到外部挤压和振动。电池组通过导线连接到励磁线圈,励磁

线圈中通入励磁电流使环空流道中产生工作磁场。需要注意的是,测量系统的磁场要从钻柱内部穿过外壳,因此测量系统的外壳只能使用非导磁材料,而且励磁线圈的尺寸和匝数不同会影响磁场的强度,在确保不受挤压的情况下,尽量将线圈填满凹槽空间,可以增强系统的磁感应强度。

当钻井液流过工作磁场时,钻井液中产生与平均流速成正比的电压,其感应电压信号被两个与钻井液直接接触的碳化钨合金电极检测到。电极上部安装密封圈防水及卡簧固定位置,电极下方使用绝缘电极座将其与金属隔离,避免信号逸散。感应电压信号通过导线送至测试系统,测试系统对电压信号进行调理,调理过程具体包括放大和滤波,并将其转换成标准信号;信号传输模块将标准信号传输至地面,地面根据实时传输的流量信号对生产状态进行监控,而电路板及相关电路均需做三防涂覆处理。

### 2.1 环空测量系统的虚电流密度研究

在正常的生产过程中,井下环空流量电磁测量系统工况较为复杂,无法基于传统的理论实现井下环空流量电磁测量系统的优化。1970年,Bevir提出了三维权重向量的概念,环空流量电磁测量系统的输出信号满足如式(2)所示基本方程<sup>[31]</sup>。

$$\phi_{AB} = \int_{\tau} \mathbf{W} \cdot \mathbf{V} d\tau \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{B} \times \mathbf{j} \quad (3)$$

式中: $\phi_{AB}$ 为两信号电极之间电位差; $\mathbf{W}$ 为矢量权重函数; $\mathbf{V}$ 为钻井液液体流速; $\tau$ 为导电溶液所在环形空间。 $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; $\mathbf{j}$ 为虚电流密度矢量。

基于式(3)可知,若将矢量权重函数设为常数,则井下环空流量电磁测量系统的输出电压只与环空流道内的流速的积分有关,与流速的分布没有关系,该推论可以有效提高系统的测量精度。因此,虚电流密度矢量只与测量环域的几何形状和电极形状有关,对于一个几何结构、电极尺寸形状及钻井液性质都确定的对象,虚电流密度矢量是固定的<sup>[23]</sup>。

电磁流量测量系统的基本方程如式(4)所示。

$$\nabla^2 \phi = \nabla \cdot (\bar{\mathbf{v}} \times \bar{\mathbf{B}}) \quad (4)$$

求解时构造一辅助函数 $G$ ,且 $G$ 满足式(5)的拉普拉斯方程。

$$\nabla^2 G = 0 \quad (5)$$

由于理论中出现的量只与 $x, y$ 相关,故将 $G$ 化为极坐标形式后如式(6)所示。

$$\frac{\partial^2 G}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 G}{\partial \phi^2} = 0 \quad (6)$$

将井壁看作绝缘体,设边界条件为式(7)。

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial G}{\partial r} \right|_{r=b} = 0 \\ \left. \frac{\partial G}{\partial r} \right|_{r=a} = \begin{cases} \delta(\phi - \phi_A)/a \\ -\delta(\phi - \phi_B)/a \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\phi_A = 0$  和  $\phi_B = \pi$  是点电极 A 和 B 所在角位置。单对电极的测量系统横截面如图 3 所示。

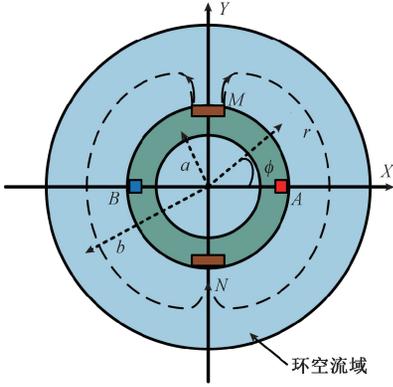


图3 单对电极的测量系统横截面

Fig.3 Sectional view of measurement system for single-pair electrode

采用分离变量法,令  $G(r, \phi) = R(r)\Phi(\phi)$ , 解偏微分方程可得式(8)。

$$G = \sum_{n=1}^{\infty} (C_n r^n + D_n r^{-n}) (A_n \sin n\phi + B_n \cos n\phi) \quad (8)$$

取电极的角位置在  $\phi_A = 0$  和  $\phi_B = \pi$ 。由边界条件  $\partial G / \partial r|_{r=a} = \delta(\phi) / a$  可得式(9)。

$$G_1(r, \phi) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(a/b)^n (r/b)^n - (a/r)^n}{n[(a/b)^{2n} + 1]} \times \cos n\left(\phi - \theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (9)$$

同理,利用边界条件  $\partial G / \partial r|_{r=a} = -\delta(\phi - \pi) / a$  可得式(10)。

$$G_2(r, \phi) = -\frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(a/b)^n (r/b)^n - (a/r)^n}{n[(a/b)^{2n} + 1]} \times \cos n\left(\phi - \theta + \frac{\pi}{2}\right) \quad (10)$$

所以计算  $G$  得式(11)。

$$G = G_1 + G_2 = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{(a/b)^n (r/b)^n - (a/r)^n}{n[(a/b)^{2n} + 1]} \times \cos n\left(\phi - \theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (11)$$

设  $\tau = a/b, R = r/b$ , 则式(11)可写为式(12)。

$$G = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{R^n - R^{-n}}{n[\tau^n + \tau^{-n}]} \cos n\left(\phi - \theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (12)$$

对虚电流势求梯度得到虚电流密度如式(13)和(14)。

$$j_r = -\frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{(a/b)^{n+1} (r/b)^{n-1} + (a/r)^{n+1}}{a[(a/b)^{2n} + 1]} \times \cos n\left(\phi - \theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (13)$$

$$j_\phi = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{R^{n-1} - R^{-n-1}}{[\tau^n + \tau^{-n}]} \sin n\left(\phi - \theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (14)$$

基于式(13)和(14)得到的虚电流密度表达式,理论上若矢量权重函数为常数,则可以通过改变励磁线圈的结构来优化虚电流密度矢量分布。但是对于虚电流密度矢量分布的解析求解非常困难。即便求解出了线圈的形状,在实际生产中还需考虑到测量系统内部空间、线圈缠绕等外在因素。本文将根据理论推导推算出线圈的轮廓形状,再通过力学模型研究对励磁系统进行进一步优化。

## 2.2 环空测量系统力学模型

井下环空流量电磁测量系统为近钻头测量,需要承受相当复杂的载荷条件,验证测量系统在有限空间下的力学性能是保证其正常工作的前提。测量系统的受力模型如图4(a)所示,在工作循环时,测量系统主要受到以下载荷的作用:1)钻柱自重产生的轴向压(拉)应力  $\sigma_c$ ; 2) 钻井液产生的液柱压力  $P_i$  和环空压力  $P_e$ ; 3) 钻柱旋转产生的扭矩  $T$ ; 4) 钻柱横向弯曲产生的弯矩  $M_x$  和  $M_y$ ; 5) 钻柱与钻井液、井壁摩擦产生的摩擦力  $f$ ; 6) 钻头切削及钻柱旋转产生的动载荷  $\sigma_d$ 。

在井下钻进过程中,钻柱的各个部分受力情况有较大差异,本文研究的测量系统设置在近钻头处,属于下部钻柱,其受力情况较为复杂,为便于分析,对测量系统受力模型做如下假设:

- 1) 近钻头处无弯曲,测量系统上不受弯矩影响;
- 2) 测量系统表面光滑,忽略钻井液及井壁摩擦;
- 3) 测量系统运行平稳,忽略测量系统产生的动载荷;
- 4) 忽略温度带来的测量系统形变。

根据上述假设,简化后的测量系统力学模型如图4(b)所示,其主要受力有:1) 整体钻柱自重产生的轴向压(拉)应力  $\sigma_c$ ; 2) 钻柱旋转产生的扭矩  $T$ ; 3) 钻井液产生的液柱压力  $P_i$  和环空压力  $P_e$ 。

井下环空流量电磁测量系统的液柱及环空压力可以看做圆筒受到来自内外的均布载荷,由拉梅公式可得测量系统的各向应力<sup>[32]</sup>。轴向应力如式(15)。

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (15)$$

式中:  $A$  为横截面积,单位为  $\text{mm}^2$ 。

则式(14)可写为式(16):

$$\sigma_c = \frac{F}{\pi(R^2 - r^2)} \quad (16)$$

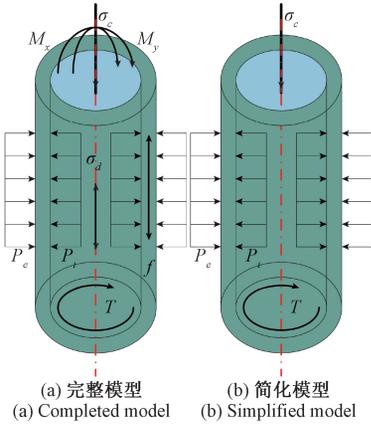


图 4 测量系统力学模型

Fig.4 Mechanical model of measurement system

径向应力如式(17)。

$$\sigma_\rho = -\frac{R^2/\rho^2 - 1}{R^2/r^2 - 1}p_i - \frac{1 - r^2/\rho^2}{1 - r^2/R^2}p_e \quad (17)$$

式(17)整理后可得式(18)。

$$\sigma_\rho = \frac{p_i r^2 - p_e R^2}{R^2 - r^2} + \frac{(p_e - p_i)r^2 R^2}{(R^2 - r^2)\rho^2} \quad (18)$$

式中:  $r$  为内流道半径,单位为 mm;  $R$  为测量系统半径,单位为 mm;  $\rho$  为受力点距圆心的径向距离,单位为 mm。

周向应力如式(19)。

$$\sigma_\phi = \frac{R^2/\rho^2 + 1}{R^2/r^2 - 1}p_i - \frac{1 + r^2/\rho^2}{1 - r^2/R^2}p_e \quad (19)$$

式(19)整理后可得:

$$\sigma_\phi = \frac{p_i r^2 - p_e R^2}{R^2 - r^2} + \frac{(p_i - p_e)r^2 R^2}{(R^2 - r^2)\rho^2} \quad (20)$$

剪应力如式(21)。

$$\tau_\rho = G\rho \frac{d\phi}{dx} \quad (21)$$

式中:  $G$  为剪切模量,单位为 GPa。

钻柱所受扭矩如式(22):

$$T = \int_A \rho \tau_\rho dA \quad (22)$$

将式(21)代入式(22)得:

$$T = \int_A G\rho^2 \frac{d\phi}{dx} dA \quad (23)$$

由式(23)可知,当所求的横截面一定时,  $\frac{d\phi}{dx}$  为常

量。令截面二次极矩为式(24)。

$$I_p = \int_A \rho^2 dA \quad (24)$$

则此时,式(23)可写为:

$$T = \frac{I_p \tau_\rho}{\rho} \quad (25)$$

即

$$\tau_\rho = \frac{T\rho}{I_p} \quad (26)$$

在圆柱体的计算中,使用极坐标较为方便,将式(24)转换为极坐标表达方式。

$$I_p = \int_r^R \rho^3 d\rho \int_0^{2\pi} d\alpha \quad (27)$$

如图 5 所示,对测量系统危险截面做出一定简化将测量系统主体边缘部分忽略。则测量系统主体部分危险截面二次极矩如式(28)所示。

$$I_p = 2\left(\int_r^R \rho^3 d\rho \int_0^{7/25\pi} d\alpha + \int_r^{56/\sin\theta} \rho^3 d\rho \int_{7/25\pi}^{18/25\pi} d\alpha + \int_r^R \rho^3 d\rho \int_{18/25\pi}^\pi d\alpha\right) \quad (28)$$

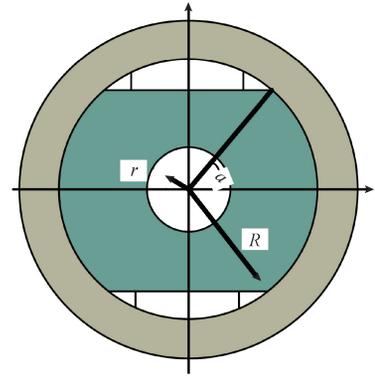


图 5 测量系统危险截面

Fig.5 Dangerous section of measurement system

将式(28)所得的值代入式(26)即可求得剪应力的值。井下环空流量电磁测量系统主要受到三向压应力的作用,则对测量系统采用第四强度理论较为合理,测量系统中某一点处的受力强度如式(29)。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (29)$$

在本研究中,测量系统还要受到扭矩作用,故将式(29)改为式(30)。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_c - \sigma_\rho)^2 + (\sigma_\rho - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_c)^2 + 6\tau]} \quad (30)$$

由于在计算中对测量系统的力学模型进行了适当的简化,为测量系统设置一定的安全系数,以保证测量系统具有足够的强度,本研究中安全系数设定为  $\geq 1.3$ 。测量系统在受到不同的组合载荷作用下,其应力最大的区域均为测量系统边缘,测量系统危险截面内外边缘( $\rho = 29$  mm,  $\rho = 74$  mm)处所受力值分别如表 1 所示。

表1 测量系统内外表面受力情况

Table 1 Internal and external surface force of measurement system

$\rho/\text{mm}$	$F/\text{kN}$	$P_i/\text{MPa}$	$P_e/\text{MPa}$	$T/\text{kN}\cdot\text{m}$	$\sigma_c/\text{MPa}$	$\sigma_p/\text{MPa}$	$\sigma_\phi/\text{MPa}$	$\tau/\text{MPa}$	$\sigma_e/\text{MPa}$	安全系数
74.00	100.00	40.00	30.00	10.00	10.12	30.53	27.09	10.18	25.87	30.35
	200.00	60.00	40.00	20.00	20.23	41.06	34.19	20.35	39.76	19.74
29.00	100.00	40.00	30.00	10.00	10.12	40.00	17.62	10.18	32.18	24.39
	200.00	60.00	40.00	20.00	20.23	60.00	15.25	20.35	55.20	14.22

由表1可知,测量系统内流道截面平均应力大于外截面,在2种不同的工况下测量系统的安全系数均大于10,符合井下环空流量电磁测量系统的强度要求。理论计算的结果可以保证井下环空流量测量系统整体的结构强度符合要求,却无法针对所有的薄弱部位进行详细校核。在多种载荷复合作用的情况下,准确的判断危险截面的位置及受力情况相当困难,为了更真实地反映测量系统的载荷作用情况,本研究将进一步采用有限元软件仿真的方式对测量系统主体进行分析。

### 3 井下环空流量电磁测量系统仿真模型

井下环空流量电磁测量系统的仿真模型建立共包含电磁耦合和固体力学两个部分。电磁耦合部分主要关注矢量权重函数的分布,测量系统的机械结构对适量权重函数影响较小,故采用如图6所示的简化三维模型,图6中位于中层的圆筒为环空流道,矩形部分为线圈。固体力学部分主要保证测量系统的结构合理,所以使用图2所示的完整三维模型进行仿真分析,在研究中,仅忽略测量系统上的螺纹。

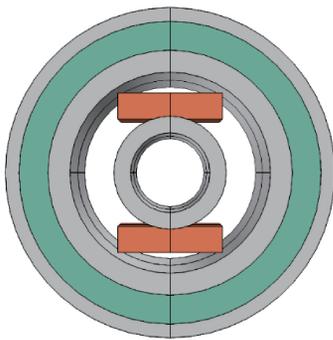


图6 测量系统电磁耦合仿真模型

Fig.6 Electromagnetic coupling simulation model of measurement system

#### 3.1 励磁线圈电磁耦合仿真分析

取励磁线圈的长度为100 mm,电极的半径为

7 mm;将励磁线圈的铁芯高度以及线圈整体宽度作为变量,线圈整体宽度 Coil\_w 设置为 20~80 mm,步进值 20 mm,铁芯突出高度 Coil\_X 设置为 5~35 mm,步进值 5 mm。

图7所示为当线圈宽度80 mm时的矢量权重函数及磁感应强度云图,其中权重函数云图也可转化为电压输出信号。在仿真软件中对变量进行参数化扫描,可得到在对应铁芯高度及线圈宽度下的矢量权重函数,对有限元仿真计算所得的值进行处理;可得到如图8、9所示关于励磁线圈的矢量权重函数标准差  $W_e$  及均匀范围比例  $P_e$  曲线<sup>[33-34]</sup>。

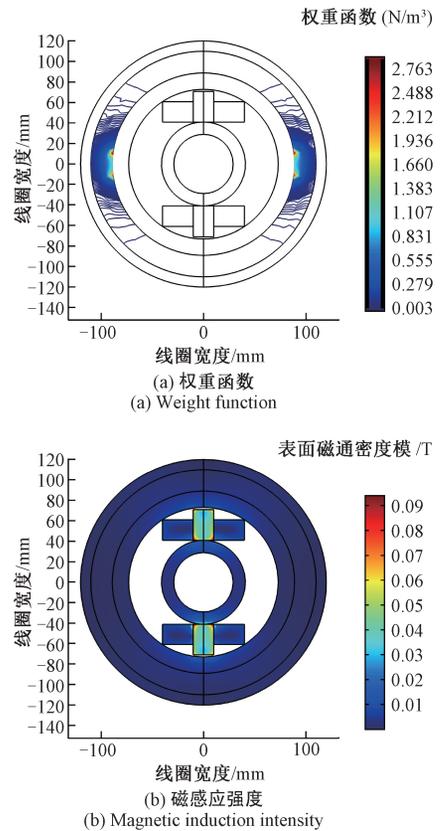


图7 环空流道权重函数和磁感应强度云图

Fig.7 Distribution of weigh function and magnetic induction intensity in annular flow

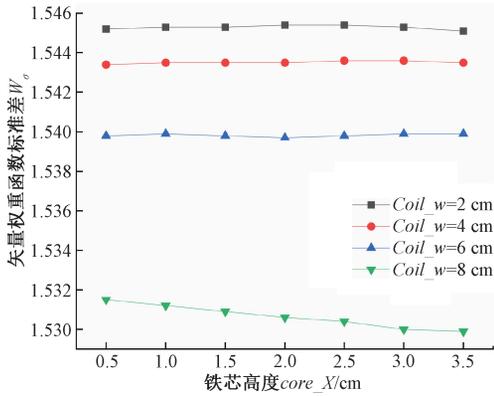


图 8 铁芯高度和线圈宽度不同时的矢量权重函数标准差  
Fig.8 Standard deviation of vector weigh function under different core height and coil width

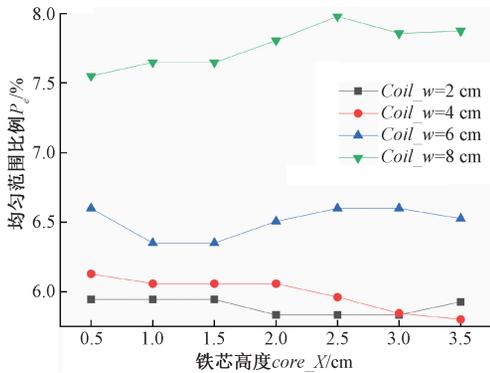


图 9 铁芯高度和线圈宽度不同时的均匀范围比例  
Fig.9 Ratio of uniform range under different core height and coil width

$W_{\sigma}$  为描述矢量权重函数值的平均值分散程度的一种度量,若标准差较大,则表示接近平均矢量权重函数值的数值较少;若标准差较小,则表示接近于平均矢量权重函数值的数值较多,矢量权重函数数值整体分布更均匀;其表达式如式(31)所示。

$$W_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})^2}{N}} \quad (31)$$

$P_e$  为描述矢量权重函数分布均匀比例的度量值,首先定义电极中心截面内任意矢量权重函数值  $W_x$  相对矢量权重函数平均值  $\bar{W}$  的偏差为  $P$ 。本次研究中定义若偏差  $P$  小于 30%,则认为该点为矢量权重函数均匀区域,该指标可用式(32)表示。

$$\frac{|W_{(x,y)} - \bar{W}|}{\bar{W}} \times 100\% \leq P\% \quad (32)$$

设式(31)中所得非均匀区域的点的个数为  $N_1$ ,而均匀区域的点的个数为  $N_2$ ,则均匀范围比例可以定义为如

式(33)所示。

$$P_e = \frac{N_2}{N_1 + N_2} \times 100\% \quad (33)$$

$P_e$  值越大表示矢量权重函数均匀的区域越多。

由图 8 可知随着铁芯高度的升高,矢量权重函数的标准差普遍呈下降趋势,但趋势并不显著,铁芯突出部分的尺寸变化对于矢量权重函数的影响不大;而线圈的整体宽度变化能够显著的影响矢量权重函数的标准差。基于图 8 的数据,线圈宽度为 80 mm,铁芯高度为 35 mm 时矢量权重函数标准差最小,矢量权重函数值分布最均匀。

同理,由图 9 可知,铁芯高度的升高与矢量权重函数均匀范围比例并不完全呈线性相关,且铁芯高度的影响不明显;而随着线圈的整体宽度变大,矢量权重函数的均匀范围比例快速提升。基于图 9 可知,线圈宽度为 80 mm,铁芯高度为 25 mm 时矢量权重函数均匀范围比例最大。

根据指标评价可以看出,线圈宽度为 80 mm,铁芯高度为 25~35 mm 是励磁线圈仿真分析得到的最佳值。但铁芯高度对矢量权重函数的标准差及均匀范围比例的影响都极为有限,在 25~35 mm 范围内其波动不足 1%,而更高的铁芯高度可以为线圈缠绕提供更多空间,从而增加励磁线圈磁感应强度。综合考虑后,在三维模型建立中取线圈宽度为 80 mm,铁芯高度为 35 mm。

### 3.2 环空测量系统力学仿真分析

通过 3.1 节励磁线圈仿真,对三维仿真模型中的励磁结构进行进一步的建模优化。由于测量系统模型均为轴对称结构,在仿真分析中为提高计算效率,取测量系统 1/2 作为分析对象。

仿真模型中的边界条件基于 2.1 节的测量系统力学模型,并以接近测量系统真实载荷作用情况为原则进行设置:

- 1) 测量系统外螺纹端施加固定载荷;
- 2) 测量系统与外螺纹相邻的端面设定轴向的指定位移为 0;
- 3) 测量系统内流道施加 40/60 MPa 载荷,测量系统外部施加 30/40 MPa 载荷;
- 4) 测量系统内螺纹端面施加扭矩载荷 10/20 kN·m;
- 5) 测量系统内螺纹端底部施加 100/200 kN 轴向载荷。

将两种载荷施加情况分别称为工况 1、工况 2。

测量系统的主要设计参数如表 2 所示,测量系统主体材料为 40CrMnMo,弹性模量 207 GPa,泊松比 0.254,屈服强度 785 MPa;外壳材料为 N1310,屈服强度 981 MPa。N1310 作为无磁材料,可以避免对励磁系统发出的磁力线产生干扰。但在固体力学分析中无需考虑磁场因素,可将测量系统设置为力学性能指标相对于

N1310 更低的 40CrMnMo 材料进行计算。

表 2 测量系统参数及设计工作条件

Table 2 Parameter and designed working condition of measurement system

名称	参数	单位
测量系统总长	1 800	mm
测量系统直径	178	mm
测量系统接头扣型	NC46	
测量系统最大钻压	200	kN
测量系统最大扭矩	20	kN·m
测量系统最高工作压力	60	MPa
测量系统设计工作井深	3 000	m

经过仿真分析计算后,可得如图 10、11 所示的井下环空流量测量系统整体受力云图。图 12、13 所示分别为在工况 1 和工况 2 下测量系统内外表面的一条截线沿 Y 轴方向的受力情况。

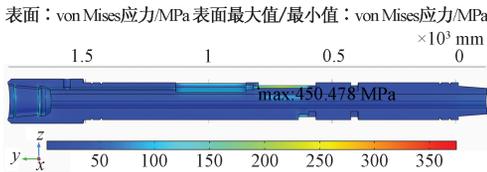


图 10 测量系统工况 1 下应力云图

Fig.10 Stress nephogram of measurement system under working condition 1

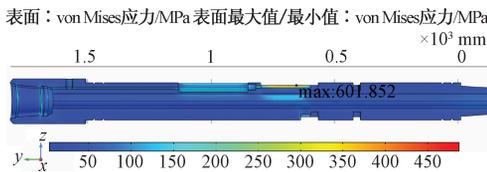


图 11 测量系统工况 2 下应力云图

Fig.11 Stress nephogram of measurement system under working condition 2

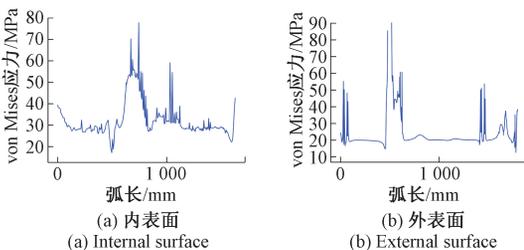


图 12 测量系统工况 1 下内外表面沿 Y 轴应力

Fig.12 Stress of the measurement system's internal and external surface along the Y-axis under working condition 1

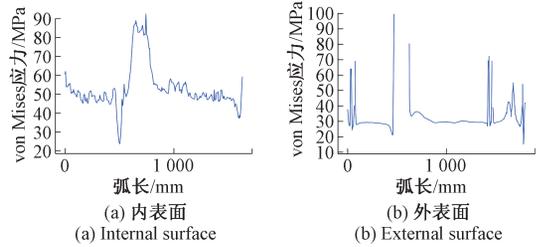


图 13 测量系统工况 2 下内外表面沿 Y 轴应力

Fig.13 Stress of the measurement system's internal and external surface along the Y-axis under working condition 2

由图 10、11 可知,测量系统整体受力较小,应力相对更大的部分主要位于材料去除量较大区域的边缘,其中测量系统在工况 1 下的最大应力为 450.478 MPa,安全系数 1.74,测量系统在工况 2 下的最大应力为 601.852 MPa,安全系数 1.3,均能够符合测量系统井下工作要求。

由图 12、13 可知,测量系统内外表面的应力大小与所在位置的材料去除量呈正相关,但其平均应力与理论计算值相差不大。以工况 2 为例,其内外表面平均受力分别为 55.203 MPa 和 32.184 MPa,仿真分析值分别较理论计算值相差-2.421%和-4.483%。通过仿真分析和理论计算的验证表明,井下环空流量电磁测量系统的整体受力情况良好,其在井下组合载荷作用下能够正常工作。

#### 4 测量系统样机的标定和测试分析

前文分别从理论计算和有限元仿真分析两个方面对测量系统进行了可行性分析及优化。为了测试和判断其基本性能,本研究在地面搭建了测量系统样机平台。

完成测量系统的主体后,本研究首先使用万能力学试验机对其进行了力学性能的测试,对测量系统分别施加 200 kN 的钻压和 20 kN·m 的钻压。最终测量系统测得  $\sigma_{e1} = 46.033$  MPa 和  $\sigma_{e2} = 80.544$  MPa,安全系数分别为 17.053 和 9.746,均能达到实际工况的需求。

之后开始对测量系统样机进行安装试验,先将一个具有高测量精度等级的标准表与测量系统样机串联在循环系统的同一段管道上;然后在管道中通入流体进行循环,并使用两台仪器同时对流量数据进行测量;对比从两台装置中读取的数值,确定其仪表系数及测量数据等,完成测量系统样机的标定<sup>[35-37]</sup>。本文研究的主要需求是针对井下溢流的早期预警,故在本次实验测试中不需要对测量系统样机的累计流量测量性能进行测试,只考虑其与标准表之间的瞬时流量性能对比。

在钻井工况下,为保证钻井液的返出携屑能力,其流

速一般不低于 2 m/s,相应的返出流量一般为 50 ~ 100 m<sup>3</sup>/h。测量系统要求达到测量准确度等级 2.5,重复性小于 1.25。

#### 4.1 测量系统样机的标定

本研究中所使用测量系统样机在进行流量对比测试之前,首先需要进行标定。标定程序按照《JJG1033-2007 电磁流量计检定规程》进行。实验前,通入温度为 20 ℃ 的自来水试循环运行,确保密封状况良好,液体电导率为 0.274 ms/cm。参照检定规程按照先逐渐增加流量然后逐渐减小流量的顺序进行流量设定。

首先启动循环系统,在循环系统的流量和压力开始趋于稳定后,以标准表流量为依据调节电机功率使其流量达到实验指定值附近,待循环系统在该区间平稳运行后,开始读取测量系统样机的输出电压;之后依次调节指定流量值,对 12 个区间流量进行标定测试。将流量数据拟合,得如图 14 所示的曲线,其一次线性方程如式(34)。

$$Y = 64.7825X + 3.4182 \quad (34)$$

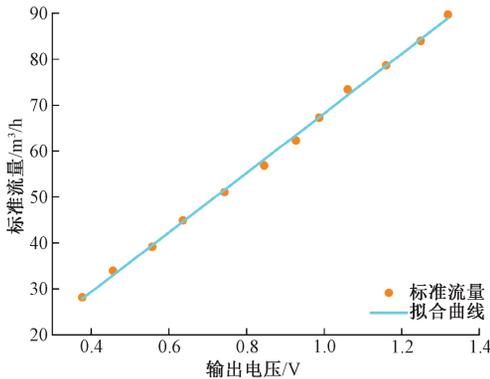


图 14 流量数据拟合曲线

Fig.14 Fitting curve of flow data

由图 14 可知,测量系统样机的输出电压与循环系统的流量变化之间具有较好的线性关系,故定义式(32)中的系数  $a = 64.7825$ ,  $b = 3.4182$  为测量系统样机的仪表系数。

#### 4.2 测量系统样机的输出信号对比分析及瞬时流量测试

测量系统样机接收到的原始输出信号与经过调理放大后的输出信号相差数千倍,在信号放大过程中误差也会被放大,故原始输出电压信号数值的准确性至关重要。利用 3.1 节中建立的井下环空流量电磁测量系统模型,对应 4.1 节所做地面实验中的参数条件进行参数化扫描仿真分析,最终得到如表 3 所示的输出电压数据。

图 15 所示为表 3 中数据经过拟合后所得的输出电压信号对比图。如图 15 所示,测量系统样机传感器输出电压与仿真分析输出电压均接近于线性变化,且其相关性较好。随着流速的增大其相关性有一定程度的下降,

表 3 测量系统样机传感器输出信号与仿真模型输出电压信号数据

Table 3 Data of voltage signal from measurement system prototype sensor and simulation model

流速 / (m·s <sup>-1</sup> )	仿真模型输出/V	样机传感器输出/V	差值/V
1.03	2.35×10 <sup>-5</sup>	2.45×10 <sup>-5</sup>	-9.39×10 <sup>-7</sup>
1.30	2.98×10 <sup>-5</sup>	2.96×10 <sup>-5</sup>	1.71×10 <sup>-7</sup>
1.50	3.44×10 <sup>-5</sup>	3.62×10 <sup>-5</sup>	-1.79×10 <sup>-6</sup>
1.72	3.94×10 <sup>-5</sup>	4.13×10 <sup>-5</sup>	-1.90×10 <sup>-6</sup>
1.96	4.48×10 <sup>-5</sup>	4.83×10 <sup>-5</sup>	-3.43×10 <sup>-6</sup>
2.18	4.99×10 <sup>-5</sup>	5.49×10 <sup>-5</sup>	-4.98×10 <sup>-6</sup>
2.39	5.47×10 <sup>-5</sup>	6.02×10 <sup>-5</sup>	-5.50×10 <sup>-6</sup>
2.59	5.91×10 <sup>-5</sup>	6.41×10 <sup>-5</sup>	-5.01×10 <sup>-6</sup>
2.82	6.44×10 <sup>-5</sup>	6.89×10 <sup>-5</sup>	-4.49×10 <sup>-6</sup>
3.02	6.90×10 <sup>-5</sup>	7.53×10 <sup>-5</sup>	-6.32×10 <sup>-6</sup>
3.23	7.37×10 <sup>-5</sup>	8.11×10 <sup>-5</sup>	-7.39×10 <sup>-6</sup>
3.44	7.87×10 <sup>-5</sup>	8.57×10 <sup>-5</sup>	-6.96×10 <sup>-6</sup>

这是由于在地面测试中流体存在固有的流速分布不均度变化、系统浆液噪声等因素影响。在仿真模型中边界条件设置存在其局限性,无法将这些影响因素完全还原,故仿真模型与测量系统样机输出电压存在一定的差异,图 15 中所展现的少量误差处在正常范围。

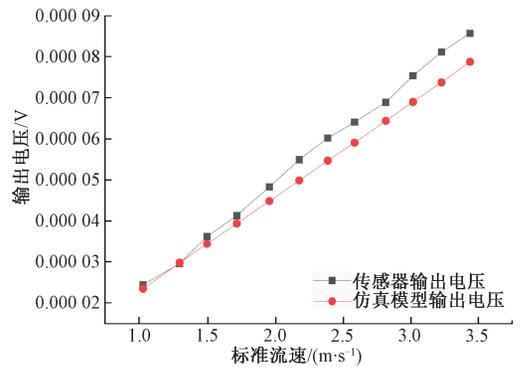


图 15 实验测试和仿真分析的输出信号对比

Fig.15 Comparison of voltage signal between experiment test and simulation analysis

由输出电压信号的对比可得,测量系统样机的输出信号在稳定性和准确性上都能符合要求。将仪表系数输入测量系统样机中,则测量系统样机的标定程序完成。

为模拟真实的钻井工况,首先向储液罐中添加膨润土,使清水中膨润土含量达到 4% 以形成钻井液基浆,此时浆液密度为 1 150 kg/m<sup>3</sup>,稠度系数为 0.15,流性系数为 0.702,电导率为 0.3 s/m。

完成前期安排后,将测量系统样机的输出模式设置为瞬时流量值,开始进行瞬时流量测试实验。流量测试实验首先选取了接近钻井工况的流量范围,并取6个不同的频率作为数据采集点,对每一个采集点进行4次数据提取,各点输出的瞬时流量数据如表4所示。

表4 测量系统样机的瞬时流量测试数据

Table 4 Instantaneous flow test data of measurement system prototype

测试流量点/Hz	样机瞬时流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	标准表瞬时流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	流量差值/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	相对示值误差/%	单个频率点多次测量误差均值/%	重复性/%
14	25.44	25.18	0.26	1.03	0.22	1.38
	25.18	24.97	0.21	0.84		
	24.93	24.72	0.21	0.85		
	24.21	24.67	-0.46	-1.85		
18	38.46	38.15	0.31	0.81	0.54	0.78
	38.40	38.62	-0.22	-0.57		
	37.75	37.50	0.25	0.67		
	38.66	38.18	0.48	1.26		
24	56.41	56.02	0.39	0.70	0.32	0.52
	55.89	55.84	0.05	0.09		
	54.85	55.01	-0.16	-0.29		
	56.47	56.02	0.45	0.80		
28	64.89	65.29	-0.40	-0.61	-0.31	0.62
	67.34	67.01	0.33	0.49		
	66.06	66.69	-0.63	-0.94		
	66.84	66.96	-0.12	-0.18		
32	77.72	77.95	-0.23	-0.30	0.12	0.81
	79.15	78.16	0.99	1.27		
	77.92	77.87	0.05	0.06		
	77.59	78.03	-0.44	-0.56		
36	86.34	87.48	-1.14	-1.30	-0.27	0.92
	87.05	87.55	-0.50	-0.57		
	89.78	88.99	0.79	0.89		
	88.80	88.88	-0.08	-0.09		

为评价该数据的准确性,本研究引入相对示值误差  $E_{ij}$ 、单个频率点多次测量误差均值  $E_i$  及重复性  $(E_r)_i$  3个评价指标。

相对示值误差  $E_{ij}$  是一种表示样机瞬时流量相对于标准表测量值偏差百分比的度量,若相对示值误差越小,则测量系统样机与标准表数据越接近,该指标可用式(35)表示。

$$E_{ij} = \frac{q_{ij} - (q_s)_{ij}}{(q_s)_{ij}} \times 100\% \tag{35}$$

式中:  $q_{ij}$  为测量系统样机在第  $i$  个流量检定点第  $j$  次检定时的瞬时流量,单位为  $m^3/h$ ;  $(q_s)_{ij}$  为标准表在第  $i$  个流量检定点第  $j$  次检定时的瞬时流量,单位为  $m^3/h$ 。

对各个采集点的相对示值误差分别进行平均计算,可得如式(36)所示的单个频率点多次测量误差均值  $E_i$ 。

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{ij} \tag{36}$$

重复性  $(E_r)_i$  是指在给定的条件下,对某一个被测量进行重复测量,测量系统给出相近示值的能力。重复性的值越小则表示测量系统的重复性越好。其表达式如式(37)所示。

$$(E_r)_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (E_{ij} - E_i)^2} \tag{37}$$

对表4中数据进行处理可得图16及17。由表4可知,测量系统样机瞬时流量与标准表瞬时流量的差值处于固定的区间内,绝大部分测试点瞬时流量差值在  $\pm 0.5 m^3/h$  以内,对比作者之前所做的研究<sup>[37]</sup>,本文所测得的瞬时流量差值下降了48.85%。

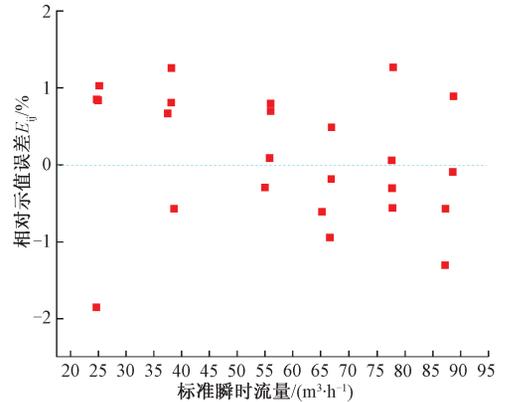


图16 测量系统样机相对示值误差

Fig.16 Relative indication error of measurement system prototype

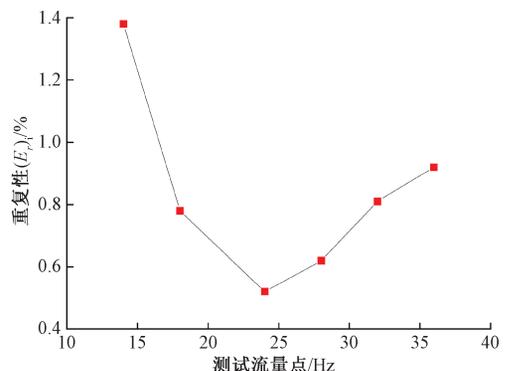


图17 测量系统样机测量流量点的重复性

Fig.17 Repeatability of measurement system prototype's test points

测量系统样机相对示值误差最大值为 $-1.85\%$ ,最小值为 $0.06\%$ 。由图 16 可知,在低流速下相对示值误差相对较大,随着流量的增加,相对示值误差逐渐趋于稳定,在 $0\%$ 位置上下波动。

由图 17 可知,测量系统样机的重复性维持在 1 的范围,而钻井工况要求重复性为 1.25。在低流速下测量系统样机的重复性达到了 1.38,但此时的流速为 $1.1\text{ m/s}$ ,该流速范围无法在实际钻井过程中使用,故其参考意义不大。在中等流速下测量系统表现最好,但在高流速下重复性有所下降,这是由于单次采样时产生的测量误差会随着流速增大而放大。实际应用中测量系统会对单个测量点进行多次采样测量,可以相应修正差值。

综合测量数据及评价指标,本文所设计的测量系统样机在与真实钻井工况相同的钻井介质和钻井流速下进行实验。得到相对示值误差为 $0.54\%$ ,瞬时流量测量精度达到 1 级。通过对励磁系统和样机结构进行优化设计,本研究所完成的新一代测量系统样机相较于上一代样机可重复性提升 $69.18\%$ ,测量数据稳定性大幅提升<sup>[37]</sup>。虽然钻井液添加剂的不同会导致其流变性能的变化,但电磁检测方法对此类变化并不敏感,所以测量系统样机的精度已经能够满足井下随钻环空测量的需要。

## 5 结 论

本文针对基于电磁检测机理的井下环空流量测量方法进行了研究,并通过仿真和实验研究验证了测量方法的励磁系统及制造工艺的可行性,为井下环空流量电磁测量系统实现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求解虚电流密度,结合有限元软件仿真优化,建立在有限井下钻柱环空条件下的矢量权重函数分布模型,使用矢量权重函数标准差 $W_\sigma$ 及均匀范围比例 $P$ 。作为评价指标,得到最优的励磁系统结构尺寸,为测量系统的建模提供指导。

2) 基于强度理论对测量系统的主体结构进行研究,测量系统主体安全系数均大于 10。再对测量系统模型施加极限载荷进行有限元仿真分析,在过载工况下测量系统安全系数符合要求,且测量系统内外表面平均受力与理论值相近,误差值小于 $5\%$ 。对系统样机实体进行力学实验显示其安全系数大于 9,符合实际工况要求。

3) 搭建地面测量系统样机,对样机进行标定和瞬时流量测量。测量系统样机输出电压信号与仿真分析输出电压信号相近,对 6 个流量测试点进行 24 次瞬时流量测量对比,测量系统流量差值绝大部分维持在 $\pm 0.5\text{ m}^3/\text{h}$ 左右,相对示值误差 $0.54\%$ 。

本研究验证了井下环空流量电磁测量方法的正确

性,对于后续井下环空流量测量方法在实际工况中的实现及达到早期井控的目的,继而降低钻井风险具有指导意义。

## 参考文献

- [1] 王彧嫣,景东升,韩志强.2017 年国内外油气资源形势分析[J].中国矿业,2018,27(4):6-10.  
WANG Y Y, JING D SH, HAN ZH Q. Domestic and international oil and gas resources situation analysis in 2017[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(4):6-10.
- [2] 王红军,马锋,童晓光,等.全球非常规油气资源评价[J].石油勘探与开发,2016,43(6):850-862.  
WANG H J, MA F, TONG X G, et al. Global unconventional oil and gas resource evaluation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6):850-862.
- [3] 侯启军,何海清,李建忠,等.中国石油天然气股份有限公司近期油气勘探进展及前景展望[J].中国石油勘探,2018,23(1):1-13.  
HOU Q J, HE H Q, LI J ZH, et al. Recent progress and prospect of oil and gas exploration by PetroChina Company Limited [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1):1-13.
- [4] 张大权,张家强,王玉芳,等.中国非常规油气勘探开发进展与前景[J].资源科学,2015,37(5):1068-1075.  
ZHANG D Q, ZHANG J Q, WANG Y F, et al. China's unconventional oil and gas exploration and development; progress and prospects [J]. Resources Science, 2015, 37(5):1068-1075.
- [5] 郑民,李建忠,吴晓智,等.我国常规与非常规天然气资源潜力、重点领域与勘探方向[J].天然气地球科学,2018,29(10):1383-1397.  
ZHENG M, LI J ZH, WU X ZH, et al. China's conventional and unconventional natural gas resource potential, key exploration fields and direction [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29 (10):1383-1397.
- [6] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.  
JIA CH Z, ZHENG M, ZHANG Y F. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2):129-136.

- [ 7 ] 李茂,朱绍鹏,邹明生,等. 涪西南凹陷复杂断块和隐蔽油气藏滚动勘探开发实践[J]. 中国海上油气, 2015, 27(4): 73-79.  
LI M, ZHU SH P, ZOU M SH, et al. Progressive exploration and development of complex faultblock and subtle reservoirs in Weixinan sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(4): 73-79.
- [ 8 ] JOHNSON A, LEUCHTENBERG C, PETRIE S, et al. Advancing deepwater kick detection[J]. JPT, Journal of Petroleum Technology, 2016, 68(5): 59-60.
- [ 9 ] JACOBS T. Early kick detection: Testing new concepts[J]. Journal of Petroleum Technology, 2015, 67(8): 44-49.
- [ 10 ] 冯其涛,耿艳峰,郑重,等. 基于钻井液的随钻声波数据传输技术[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 106-113.  
FENG Q T, GENG Y F, ZHENG ZH, et al. Acoustic data transmission technology while drilling based on drilling fluid [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 106-113.
- [ 11 ] 贾梦之,耿艳峰,闫宏亮,等. 高速泥浆脉冲数据传输技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 160-170.  
JIA M ZH, GENG Y F, YAN H L, et al. Review of high-speed mud pulse telemetry technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 160-170.
- [ 12 ] ROHANI M R. Managed-pressure drilling; techniques and options for improving operational safety and efficiency[J]. Petroleum & Coal, 2012, 54(1): 24-33.
- [ 13 ] MARK P, JIM F, DAVID W, et al. Formation pressure testing in the dynamic drilling environment[ C ]. SPE/1 ADC 87090, 2004, DOI: 10. 2118/87090-MS.
- [ 14 ] ALKHALDY M D, SAFAR A, KUMAR S, et al. Formation testing while drilling enables successful pressure data acquisition in depleted reservoir zone not previously possible with wireline logging in Kuwait: a success story[ C ]. Spe Middle East Oil & Gas Show & Conference, 2015, DOI: 10. 2118/172747-MS.
- [ 15 ] HASHEM M, MCHARDY A, WYNNE M, et al. Formation pressure while drilling, wireline formation testing, and fluid sampling in a high pressure/ high temperature exploration well using oil based mud: A case history[J]. Petrophysics, 2007, 48(4): 258-270.
- [ 16 ] WEI H, JEAN M, BEIQUE. Acoustic Doppler downhole fluid flow measurement; Patent 6,938,458[P]. 2005-09-06.
- [ 17 ] MARK W, ALBERTY. Annulus mud flow rate measurement while drilling and use thereof to detect well dysfunction; Patent 7, 950, 451B2[P]. 2011-05-31.
- [ 18 ] 王芳芳,曾云,张振凯,等. 大管径超声波测流误差的影响因素及修正分析[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 146-153.  
WANG F F, ZENG Y, ZHANG ZH K, et al. Influencing factors and correction analysis of large diameter ultrasonic flow measurement error[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 146-153.
- [ 19 ] 李冬,孙建亭,杜广生,等. 结构参数对超声波流量计水流特性影响的研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 945-951.  
LI D, SUN J T, DU G SH, et al. Study on the flow characteristics of ultrasonic flowmeter with different structure parameters [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 945-951.
- [ 20 ] 姜伟,蒋世全,付建红,等. 一种超声波测量海底隔水管与钻柱间环空流量的装置: 102174 887B[P]. 2011-01-05.  
JIANG W, JIANG S Q, FU J H, et al. Annular measurement device for subsea riser and drill string; Patent CN102174887B[P]. 2011-01-05.
- [ 21 ] 王兴国,张路鑫,尧亮富,等. 管道内流体流量的超声多普勒测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 96-103.  
WANG X G, ZHANG L X, YAO F L, et al. Measurement of pipeline flow using ultrasonic Doppler method [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 96-103.
- [ 22 ] 石磊,陈平,胡泽,等. 井下流量测量装置在 MPD 系统中的应用研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(6): 89-92, 189-190.  
SHI L, CHEN P, HU Z, et al. The Application of bottomhole flowmeter in the MPD system[J]. Journal of Southwest Petroleum University ( Science & Technology Edition ), 2010, 32(6): 89-92, 189-190.
- [ 23 ] GE L, HU Z, CHEN P, et al. Research on over-flow monitoring mechanism based on downhole microflow

- detection [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014(6):1-6.
- [24] 杨双龙,徐科军,梁利平,等,王刚.基于 DSP 的浆液型电磁流量计的研制[J].*仪器仪表学报*,2011,32(9):2101-2107.  
YANG SH L, XU K J, LIANG L P, et al. Development of DSP based slurry-type electromagnetic flowmeter[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(9):2101-2107.
- [25] WANG Y, LI H, LIU X, et al. Novel downhole electromagnetic flowmeter for oil-water two-phase flow in high-water-cut oil-producing wells[J]. *Sensors (Basel)*, 2016, 16(10):1703-1719
- [26] 王月明,周上,张瑶瑶.电磁相关法测量传感器励磁线圈轴向长度优化设计[J].*电子测量与仪器学报*,2017,31(4):604-609.  
WANG Y M, ZHOU SH, ZHANG Y Y, Optimization design of excitation coil axial length of flow measurement sensor based on electromagnetic correlation method[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(4):604-609.
- [27] 姜玉林,丁文斌.改进的电磁流量计感生电势计算方法[J].*电子测量与仪器学报*,2015,29(12):1883-1889.  
JIANG Y L, DING W B, Improved induced potential calculation method of electromagnetic flowmeter [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(12):1883-1889.
- [28] 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.
- [29] 蔡武昌,马中元,畏国芳,等.电磁流量计[M].北京:中国石化出版社,2004.  
CAI W CH, MA ZH Y, WEI G F, et al. *Electromagnetic Flowmeter* [M]. Beijing: China petrochemical press, 2004.
- [30] CLARENCE W. DE SILVA. A systematic approach for instrumentation of a mechatronic system [J]. *Instrumentation*, 2019, 6(1):116-136.
- [31] BEVIR M K. Theory of induced voltage electromagnetic Flowmeasurement[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1970, MAG-6(2):315-320.
- [32] 徐芝纶.弹性力学(上)[M].北京:高等教育出版社,2006:63-65.  
XU ZH L. *Elasticity (Vol. 1)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:63-65.
- [33] 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.
- [34] 梁利平,葛玉石,徐科军,等.低功耗缩进式电磁流量传感器磁路结构优化设计[J].*电子测量与仪器学报*,2018,32(12):26-33.  
LIANG L P, GE Y S, XU K J, et al. Optimization design of magnetic circuit structure for low-power electromagnetic flow sensor with shrunk measurement tube[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(12):26-33.
- [35] STELIAN C. Calibration of a Lorentz force flowmeter by using numerical modeling [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013, 33 (Complete):36-44.
- [36] DE OLIVEIRA E C, MONTEIRO M I C, PONTES F V M, et al. Impact of the analytical blank in the uncertainty evaluation of the copper content in waters by flame atomic absorption spectrometry [J]. *Journal of AOAC International*, 2012, 95(2):560-566.
- [37] 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.

## 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,现为西南石油大学副教授,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 an associate professor at

Southwest Petroleum University. His main research interests include instrumentation technology, electromagnetic testing and signal processing.



**黄凯强**, 2016 年于成都工业学院获得学士学位, 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流体机械。

E-mail: moyuan1838042@Hotmail.com

**Huang Kaiqiang** received his B. Sc. degree from Chengdu Technological University in 2016. He is currently a M. Sc. Candidate at Southwest Petroleum University. His research interests include instrumentation technology and fluid machinery.



**田贵云** (通信作者), 1985 年和 1988 年于四川大学分别获得学士学位和硕士学位, 1998 年于英国 Derby 大学获得博士学位, 现为英国纽卡斯尔大学传感器技术首席教授, 主要研究方向为电磁传感器、无损检测与评估、结构健康状态检测等。

E-mail: g.y.tian@ncl.ac.uk

**Tian Guiyun** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from the University of Sichuan in 1985 and 1988, respectively, and received his Ph. D. degree from the University of Derby, Derby, U. K. in 1998. Currently, he has been based at Newcastle University, Newcastle upon Tyne, U. K., where he is a chair professor of sensor technologies.

His research interests include the electromagnetic sensor, nondestructive testing and evaluation, structural health monitoring, etc.



**胡泽**, 1987 年和 1992 年于重庆大学分别获得学士学位和硕士学位, 1996 年于西南石油大学获得博士学位, 现为西南石油大学教授, 主要研究方向为电子信息和井下测试。

E-mail: huze@swpu.edu.cn

**Hu Ze** received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from the University of Chongqing in 1987 and 1992, respectively, and received his Ph. D. degree from Southwest Petroleum University in 1996. He is currently a professor at Southwest Petroleum University. His research interests include electronic information and down-hole testing.



**韦国晖**, 1998 年于西北大学获得学士学位, 2006 年与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.