

油井多相流动电磁全息方法研究

张阔, 吴锡令*, 闫景富, 蔡家铁

中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, wuxiling@sina.com

收稿日期: 2016-08-01

国家科技重大专项课题(2011ZX05020-006)资助

摘要 鉴于油井生产过程中流体分布的复杂性和流动变化的随机性, 正在兴起的多相流动测量与成像研究遇到严重挑战, 尤其是敏感场构建、多模信息融合和流动图像重建等关键技术亟待突破。电磁全息方法旨在根据探测物理场特性, 基于成像测量理论, 研究建立全新的双模敏感场, 对传感器采集信号的实部和虚部信息进行融合, 探索高效适用的全息成像方法, 并通过模拟流动测量实验检验全息成像可行性和精确度。研究表明, 全息测量数据特征区别明显, 能够充分突出各相流体导电特性与介电特性的差异; 全息测量敏感场相比原有敏感场更加适用于油井多相流动电磁全息方法; 基于双模融合的全息成像方法有益于提高全息成像精度。流动模拟测量检验结果表明, 油井多相流动电磁全息方法是可行的, 具有良好的应用前景。

关键词 油井多相流动; 全息探测物理场; 全息测量敏感场; 全息成像; 流动模拟测量实验

0 引言

多相流是指两种或两种以上相态的流体共同存在的一种流动状态^[1]。在石油生产领域, 多相流体组分通常为油、气、水三相^[2-3]。准确测量各相流体的流动参量, 有助于分析油气井的生产状况和监测油气藏的开发动态, 为油气田的开发、油气产量和采收率的提高提供合理科学依据。

以上实际生产需求同时推动了石油开发测井学科的兴起。流动剖面测井作为石油开发测井的一大重要组成分支, 通过测量井内流体流动参量, 对各储层的产量和相应的产出比例进行求解^[4]。不同于传统线性测量技术, 实际的多相流动必须视为一种复杂的非线性动态系统, 迫切需要新的测量方法和技术来满足现阶段工业生产需求。

电磁波流动成像测井方法正是在这样的背景下孕育起来的。吴锡令教授的研究团队立足于油井多相流

动的特殊需求, 将基于地面流体的电/磁层析成像技术推广到石油开发测井领域, 特别是根据三相流体导电特性和介电特性的差异, 全新提出油井多相流动电磁全息方法, 为上述问题提供了新的理论指导^[5-16]。

1 油井流动成像发展历程

1.1 国外流动成像发展历程

国际上, 英国曼彻斯特理工大学M. S. Beck教授的研究小组首次提出了“流动成像”(Flow Imaging)的概念^[17], 并于1990年在所研制的实验装置上成功开展了油气两相流动成像实验。以此为契机, 大量相关研究涌现, 如清华大学与曼彻斯特理工大学的W. Q. Yang教授展开合作, 从各种角度开发了电容层析成像算法软件, 发表了大量研究论文, 取得了令人振奋的成果。

目前国外应用于测井领域的电/磁流动成像方法

引用格式: 张阔, 吴锡令, 闫景富, 蔡家铁. 油井多相流动电磁全息方法研究. 石油科学通报, 2016, 02: 209-224

ZHANG Kuo, WU Xiling, YAN Jingfu, CAI Jiatic. Study of electromagnetic holographic methods for multiphase flow in oil wells. Petroleum Science Bulletin, 2016, 02: 209-224. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.02.017

较少,主要有Schlumberger公司研制的数码流体成像仪器DEFT(Digital Entry and Fluid Imager Tool)和适用于水平井的Flow Scanner、英国Sondex公司推出的电容阵列多相持率测井仪CAT(Capacitance Array Tool)等^[18-19]。然而,这些仪器大多通过在流动剖面上进行定点取样测量,而不是对流型空间分布进行扫描测量,数据数量和精度远远不足以实现分辨率较高的成像。

1.2 国内电磁波流动成像测井发展历程

1995年至今,吴锡令教授所领导的石油开发测井研究团队开展了电磁波流动成像测井方法研究工作,率先提出了基于电磁波层析成像原理的流动剖面测井方法。主要经历了以下三大重要阶段:

第一阶段:理论和研究方法研究。吴锡令从油、气、水多相混合流体的电学特性和油井内的波导特性出发,对波导模式的特征、工作频率的选取和探头设计的方案进行了初步论述^[5],并在随后的研究论文中对上述工作加以完善^[6]。

第二阶段:数学模拟仿真研究。赵亮等提出聚焦电极的概念,并初步研究了探测物理场空间分布和测量敏感场特征等^[20]。赵彦伟、王晓星等随即对上述问题加以深化^[21-22]。牛虎林等提出了一种图像重建算法^[23]。王晓星等通过优化设计方法,对工作频率的选取和探头设计的参数进行了进一步限定^[24]。

第三阶段:流动模拟实验研究。刘再斌等提出了一种快速的气-水层流判别方法^[25]。别静等提出了一种修正共轭梯度算法,加快了图像重建速度,且增强了图像重建精度^[26]。蔡家铁等通过实验正式确定电磁全息测量阵列传感器的最优化工作频率^[14]。随后,万瑞(北京)科技有限公司开始着力于协助团队研发一套电磁全息测量阵列传感器实验样机。同时,蔡家铁等对束状探测电磁场进行了研究,为传感器实验样机的优化设计提供了具体理论指导^[15]。

贯穿于以上三大阶段,已开发出多代流动成像软件及电磁阵列传感器优化设计方案,并申请了多项专利,为本文的油井多相流动电磁全息方法研究奠定了坚实基础^[27-30]。

2 油井多相流动电磁全息方法体系

油井多相流动电磁测量全息方法,作为电磁波流动成像测井技术发展的高级阶段,是致力于解决并改进原有工作仍存在的三大问题而提出的:

(1) 探测物理场。传统电/磁测量数据量小于成像

区域像素个数,反问题欠定程度严重。因此,致力于采用具有双模信息的幅度/相位测量数据,使得模态和数量均提高一倍,驱使反问题从“欠定”转化为“正定”乃至“超定”。

(2) 测量敏感场。传统电/磁测量方法“软场”效应的影响导致测量中心区域的灵敏度较低,进而导致成像中心区域的清晰度和分辨率较差。前人在抑制“软场”效应方面主要是借助于传感器参数的优化设计^[15,24],而在敏感场构建方面研究较少。

(3) 图像重建(“图像重建”为“成像”的同义语,下文同)。图像重建算法实时性和精确度之间存在着固有的矛盾特性。然而,在解决上述两方面问题后,再结合多模融合成像算法的改进,并伴随着计算机性能的提高,成像精度与效率将不再是一对固有矛盾。

因此,油井多相流动电磁测量全息方法具有重大的现实意义。下文将以上三大方面形成体系,详细展开论述。

2.1 电磁全息探测物理场

电磁全息探测物理场的研究意义在于奠定全息成像研究的物理基础。油井多相流动电磁全息测量阵列传感器的几何结构如图1所示。其中,纵向方向上共设置3层电极,第1层和第3层作为屏蔽电极层,第2层作为主电极层。赵亮等和蔡家铁等通过在屏蔽电极层上施加特定参数的信号,将三维电磁场分布压制在二维剖面上,使得电磁场传播问题得以简化^[8,15]。

在主电极层上包含环向均匀分布的16个电极(如图2所示)。其中,发射电极使用电压源边界,其相邻的两个电极作为聚焦电极,激发与发射电极同等幅度与相位的电位。接收电极测量的也为电位值,其相邻的两个电极作为接地电极。通过周向扫描,一轮测量过程中共可获得 $11 \times 16 \text{组} = 176 \text{个幅度/相位测量对}$,构成一套完整的全息测量数据。

在电磁全息方法中,工作频率的选取既要明显体现不同介质所带来的相位差异,又要使得相位变化控制在一个周期以内,以避免“相位缠卷”现象。蔡家铁等通过理论和实验确立电磁全息测量阵列传感器的最优化工作频率为3 MHz^[14]。此时,复电位标势 φ 满足定解问题。

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\varepsilon^* \cdot \nabla \varphi) = 0 & \varphi \in D \\ \varphi = a \cdot e^{i\theta_1} & \varphi \in \Gamma_1 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} = b \cdot e^{i\theta_2} & \varphi \in \Gamma_2 \\ \varphi = 0 & \varphi \in \Gamma_3 \end{cases} \quad (1)$$

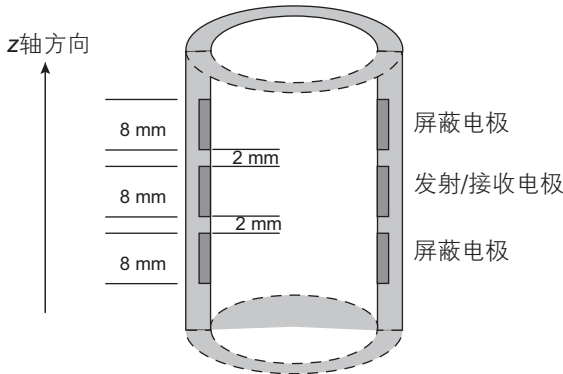


图1 电磁全息测量阵列传感器轴向结构剖面
Fig. 1 The axial structure profile of electromagnetic holographic measurement array sensor

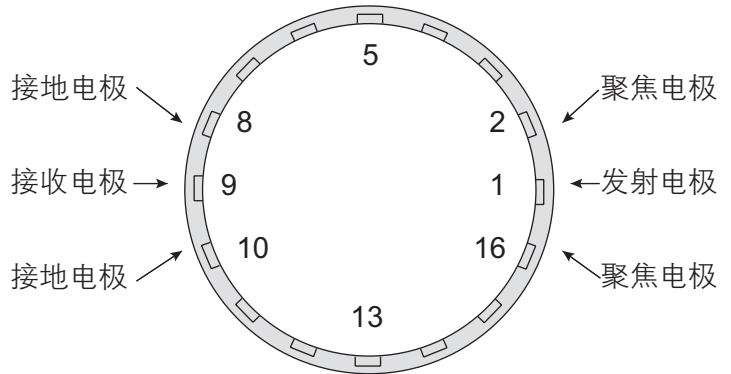


图2 电磁测量阵列传感器电极结构设计
Fig. 2 The structure design of electrodes in electromagnetic holographic measurement array sensor

其中， σ 为介质的电导率，S/m； ε 为介质的介电常数，F/m。 $\varepsilon^* = \varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega}$ ，记为复介电常数。 D 为测量区域(通常为圆域)； Γ_1 为电压源边界； Γ_2 为电流源边界； Γ_3 为接地边界。在不同的测量方法中，边界个数各不相同，边界类型可根据激发方式选择以上的一种或多种，例如，油井多相流动电磁全息方法选用 Γ_1 和 Γ_3 。此外， a 和 b 分别为电压源与电流源的幅度， θ_1 和 θ_2 分别为电压源与电流源的初始相位值，它们的值均取决于实际测量环境与优化设计的激发方式。

式(1)的求解往往需要借助于数值方法。由于有限元方法具有网格划分灵活、收敛性好等优势，是一种求取电磁全息探测物理场的合适方法。其等效积分弱形式为：

$$\iint_D \left(\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega} \right) (\nabla \varphi_r \cdot \nabla \delta \varphi_r - \nabla \varphi_i \cdot \nabla \delta \varphi_i + i \nabla \varphi_r \cdot \nabla \delta \varphi_i + i \nabla \varphi_i \cdot \nabla \delta \varphi_r) dD = 0 \quad (2)$$

其中， δ 代表物理场的试探函数， φ_r 和 φ_i 分别是电位实部和虚部，且式(2)表明 φ_r 和 φ_i 均反映了介质电导率 σ 和介电常数 ε 的影响，这种交叉耦合性质也正是油井多相流动电磁全息方法不同于传统单模测量方法的本质区别。由电位的实部和虚部同样可反推出幅度和相位，从而实现数值仿真与物理测量相互对应。

多相流动介质空间分布与电极位置之间的关系较为复杂。以气-水两相流型下，持水率为50%的层流模拟数据为例，考察表1所示四种典型情形下的电磁全息探测物理场，且这四种情形下发射电极和接收电极的方位差均相同。

图3和图4分别给出了表1中各情形的幅度场和相位场空间分布。主要特征包括：

- (1) 相位场仅在接收电极处或气-水界面处变化明显，主要是受制于波长大小和模型尺度的关系，且表明相位变化主要来源于介质复介电常数的差异。
- (2) 在发射电极和接收电极处于同一介质中时，测量值会受到气-水分界面反射波的影响，故在等值线与气-水分界面的交界处体现为一锐利的角度变化。
- (3) 在发射电极和接收电极处于不同介质中时，气-水分界面会对电磁波从发射电极到接收电极的传播存在阻碍作用。因此，等值线的分布在两相介质中体现出明显的非均匀现象。

图5给出了持水率为50%时气-水层流型下，幅度场和相位场的测量响应曲线。为了便于比较，同时也给出了全空气和全水流型下的测量响应曲线。可以分析得到以下几点认识：

- (1) 总体上，幅度场的仿真值随着持水率的增加而增大，而相位场反之。

表1 持水率为50%的气-水层流典型物理场空间分布计算
Table 1 Classical simulations of gas-water stratified flow of 50% water holdup

情形	发射电极序号	发射电极位置	接收电极序号	接收电极位置
1	3	水	15	水
2	3	水	7	空气
3	7	空气	11	空气
4	7	空气	3	水

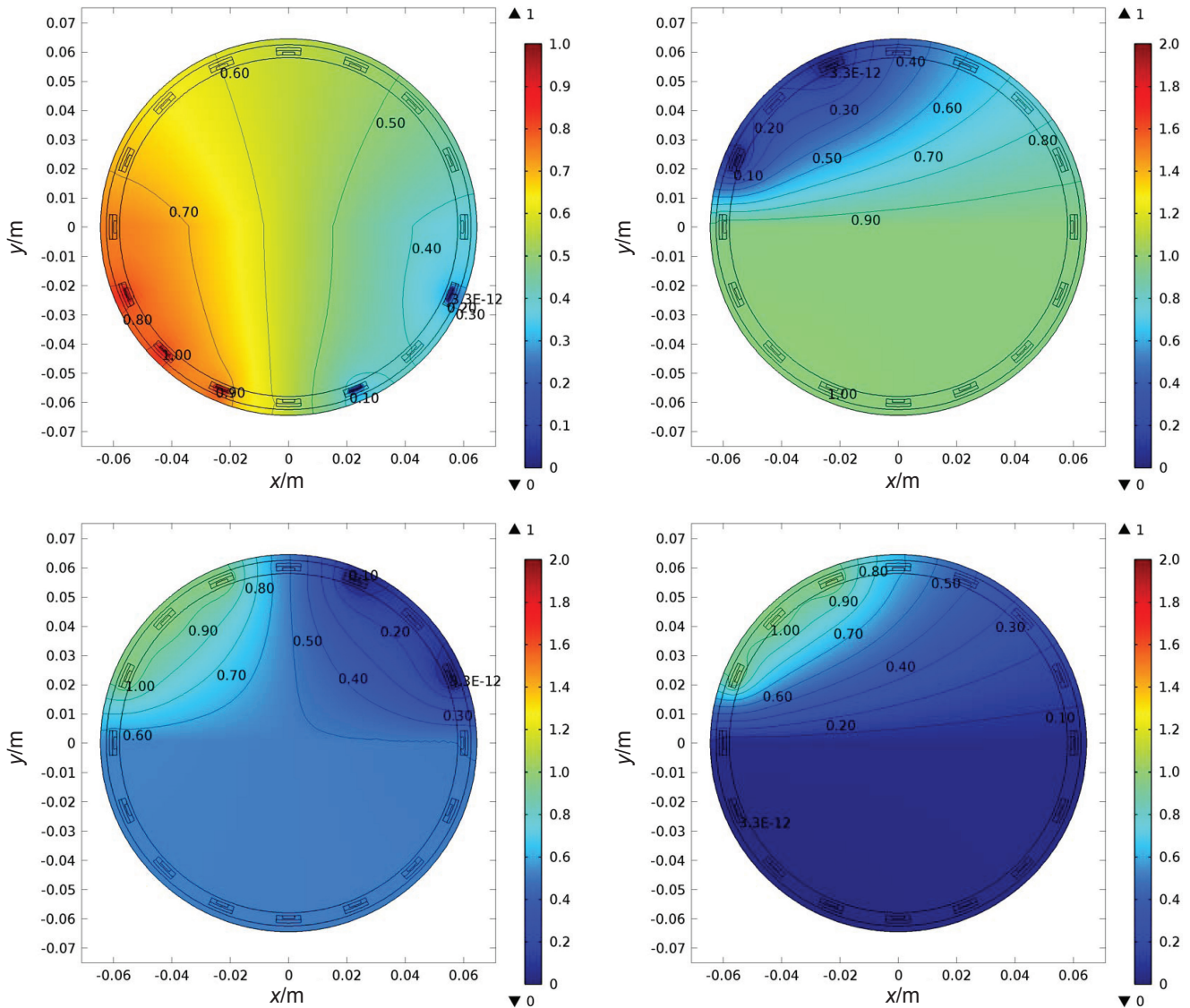


图3 持水率为50%时气—水层流典型幅度场空间分布

Fig. 3 Classical amplitude spatial distribution of gas-water stratified flow of 50% water holdup

(2) 从理论上讲, 全流幅度场中每组数据均呈正“U”字形, 而相位场呈反“U”字形, 且它们的跨度(即某个流型数据最大值与最小值的差, 下同)均不及层流。

(3) 当持水率处于0%~100%之间时, 发射电极处于水中的每组数据的跨度相比处于空气中时跨度更大, 可用于判断接触各介质的电极个数, 从而进一步定性估算持水率。

(4) 根据发射电极和接收电极的位置关系, 对于幅度和相位的仿真值特征, 可分析得到如表2所示的结论。由此可见, 电磁全息探测物理场值的高低主要取决于接收电极一端所接触介质的电学性质, 且幅度场和相位场高低值情况相反。

2.2 电磁全息测量敏感场

油井多相流动电磁全息测量与成像的数学基础与其它电/磁成像方法相同, 都是Radon变换及其反变换^[31]。其中, Radon反变换在成像方法的具体应用中, 主要体现在敏感场构建上的差别。敏感场反映探测物理场在各个空间位置的灵敏程度。目前在各领域广泛使用的敏感场主要可概括为广义测量敏感场、Geselowitz阻抗敏感场和基于物理实验的敏感场三种。

(1) 广义测量敏感场。物理意义是空间各个位置的介质参数变化所导致的物理场的变化, 即:

$$S_{i,j} = \frac{\partial F_{i,j}}{\partial \varepsilon_{i,j}^*} \quad (3)$$

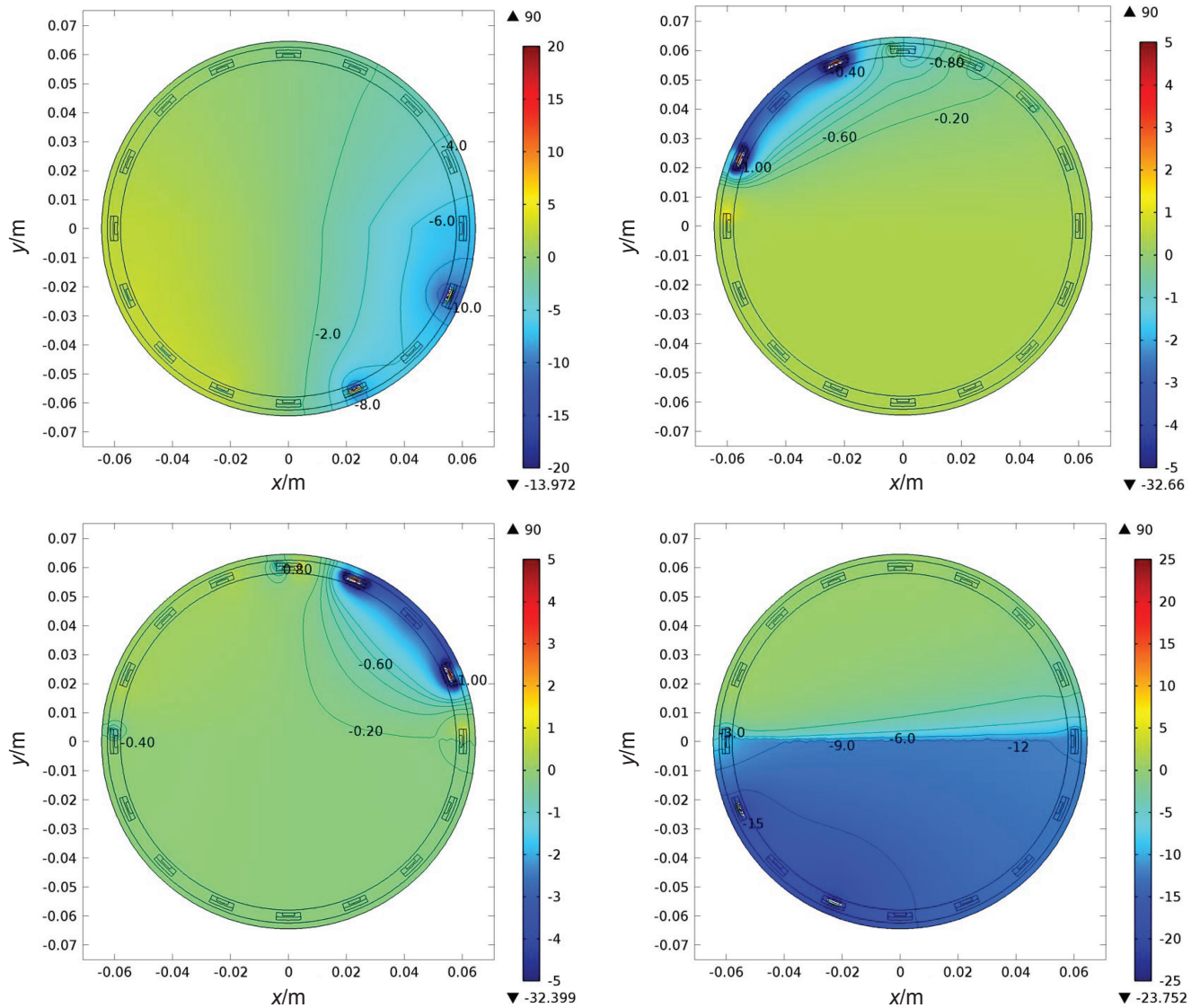


图 4 持水率为 50% 时气—水层流典型相位场空间分布

Fig. 4 Classical phase spatial distribution of gas-water stratified flow of 50% water holdup

该定义对任何激励方式均有效^[10]，其不足在于计算量较大。

(2) Geselowitz 阻抗敏感场。按照 Geselowitz 的思路^[32]，电容层析成像 (ECT) 问题的灵敏度矩阵表达式如下：

$$G_{i,j} = -\iint \frac{\nabla \varphi_i \cdot \nabla \varphi_j}{U_i U_j} dx dy \quad (4)$$

其中， $G_{i,j}$ 为第 i, j 测量电极对的灵敏度， φ_i 和 φ_j 分别为第 i 个电极和第 j 个电极激励电压为 U_i 和 U_j 时的电势空间分布。

(3) 基于物理实验的敏感场。计算思路是使用一根较小的金属棒在实际传感器内部空间进行扫描，记录其在每一个空间位置时的电磁场分布，从而形成灵敏度矩阵^[33]。该方法的测量工序明显过于繁琐，且成本

较高。在实际应用中，通常是通过加强正演模型的考虑因素以及优化实际仪器设计，使得数值模拟和物理实验的测量结果尽可能一致，从而利用仿真得到的敏感场对实际测量数据进行成像。

根据电磁全息探测物理场研究可知，不同于传统的单模电/磁层析成像方法，电磁全息测量重建油井多相流动图像需要幅度和相位相互融合的“双模”敏感场。通过文献^[34]的推导，其表达式为

$$S_{i,j}(k) = \frac{\partial \varphi_{i,j}(k)}{\partial r} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\partial \varphi_{i,j}(k)}{\partial x} + \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\partial \varphi_{i,j}(k)}{\partial y} \quad (5)$$

在测量敏感场仿真及后续即将介绍的全息成像过

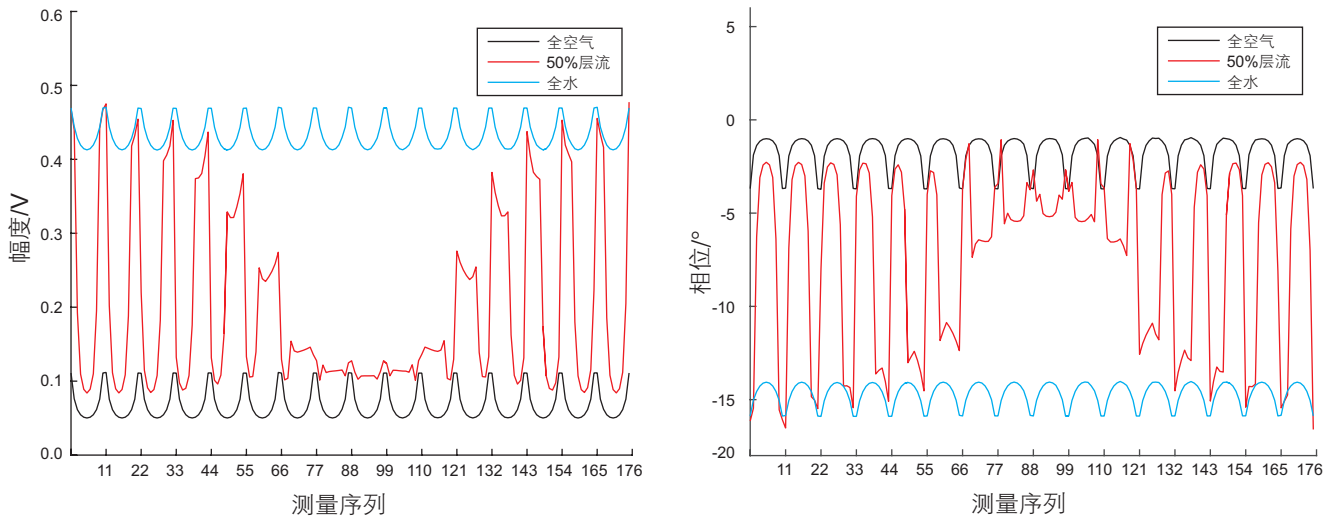


图5 全空气、持水率为50%时气-水层流和全水流型幅度/相位场测量响应

Fig. 5 Amplitude and phase field measurement responses of gas single phase flow, gas-water stratified flow of 50% water holdup and water single phase flow

表2 发射电极和接收电极的位置关系对电磁全息探测物理场值高低的影响

Table 2 Effects of position relationship between transmitting electrode and receiving electrode to values of electromagnetic holographic detection fields

情形	发射电极位置	接收电极位置	幅度场值特征	相位场值特征
1	水	水	高值	低值
2	水	空气	局部低值	局部高值
3	空气	空气	低值	高值
4	空气	水	局部高值	局部低值

程中, 由于待研究的被测区域横截面为圆形管道形状, 为便于计算机实现, 通常使用正四边形网格将圆域进行离散化处理。由于基于电/磁方法的成像分辨率较低(一般只有探测区域的5%左右), 同时考虑到用于重建图像的测量数据数量较为有限, 如果网格划分过于精细, 反问题方程欠定程度会有所加剧, 导致求解精度降低, 反而得不偿失。在全息测量问题中, 176对全息测量数据的实际数据量为352, 综合这一方面的考虑, 本文一致采用 20×20 像素的圆外切正方形对被测截面进行覆盖, 这样落在圆域内的像素个数为316个, 且数据量略大于成像像素个数。

油井多相流动电磁全息方法的电极阵列分布具有特殊的空间对称性, 因此全部的176种测量组合可归结为6种典型的敏感场分布, 即1号电极作为发射电极, 4-9号电极分别作为接收电极的6种情况, 而其它测量组合可通过典型敏感场的旋转变换获取。然而, 离散旋转变换会引入额外误差。由于在仪器设计不改

变的前提下, 敏感场是固定的, 再加上全息测量敏感场计算速度极快, 因此可以提前计算全部176种测量组合, 以待全息成像前再行调用。

图6所示为1号电极发射、9号电极接收情况下的全息测量敏感场分布(其中主发射电极位置均处于坐标(0.0625, 0.125)处, 下同), 可以得到以下四点结论:

(1) 全息测量敏感场对圆域中心的敏感性有了显著提高, 其“马鞍状”更加平滑, 有利于克服“软场效应”。

(2) 主发射电极的敏感性在三个发射电极中最高, 接收电极的敏感性略低于相邻的两个接地电极的敏感性。

(3) 发射电极和接收电极体现出极性相反的敏感性。实部敏感场和虚部敏感场之间也体现出极性相反的敏感性, 即在实部敏感场中, 激发端为正敏感区域, 接收端为负敏感区域, 而在虚部敏感场中反之。

(4) 虚部敏感场的绝对强度大约是实部敏感场的30%，使得相位测量信息的权重具有良好体现。

为了对全息测量敏感场和传统意义上的广义敏感场进行比较，图7给出了1号电极发射，9号电极接收时的幅度敏感场和相位敏感场。不难看出，由于离散误差的存在，敏感场计算精度受到很大限制，即靠近中心区域的敏感性不明显，尤其是相位敏感场仅对接收电极附近的区域较为敏感，将使得灵敏度矩阵过于稀疏，病态程度较大，从而极不利于成像。然而，幅度敏感场的特征与全息测量敏感场相似，且考虑到

幅度、实部、虚部等物理量的量纲一致性，因此该算例也可从一定程度上印证全息测量敏感场的正确性。此外，以上两种模态的敏感场在结合使用后也将发挥一定的优势。

类似地，对全息测量敏感场和传统意义上的Geselowitz敏感场进行比较。图8给出了1号、9号电极互为发射、接收电极的情况下，两种敏感场的模拟结果。不难发现，在经过式(4)的互易内积计算所得到的Geselowitz敏感场中，发射电极和接收电极极性相反的特性被抵消。另外，由于接收电极的敏感性较低，

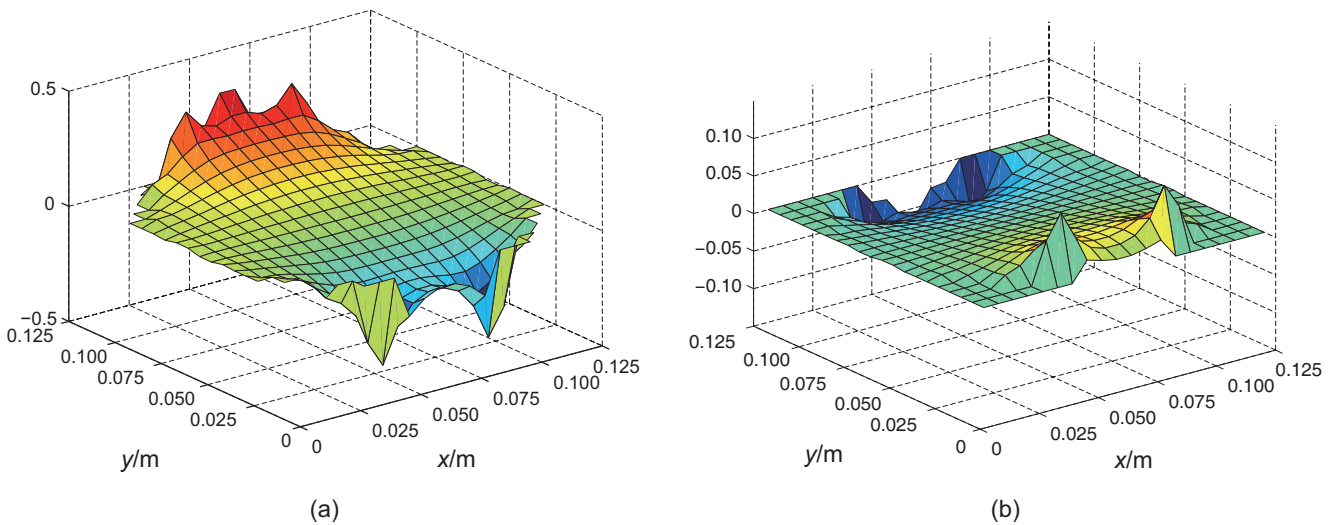


图6 1号电极发射、9号电极接收情况下的全息测量敏感场
 Fig. 6 Holographic measurement sensitivity field when No.1 electrode transmits and No. 9 electrode receives. (a) Real part; (b) Imaginary part

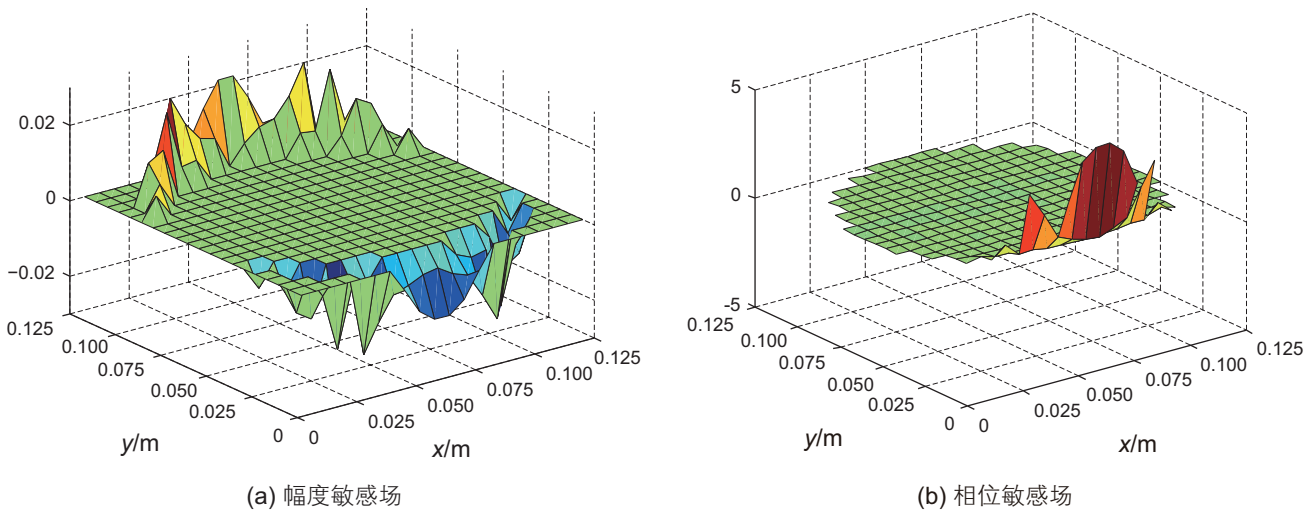
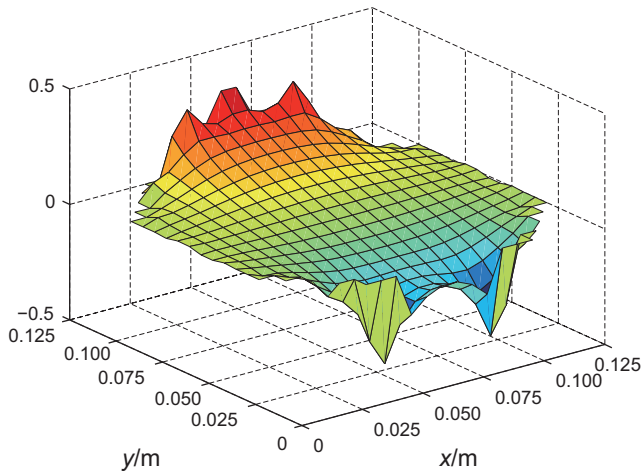
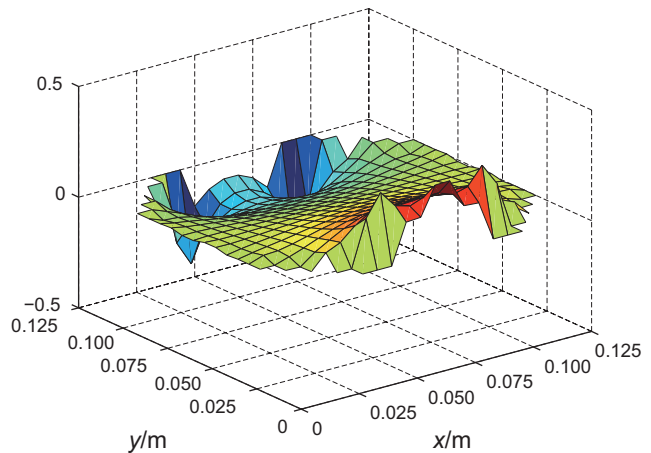


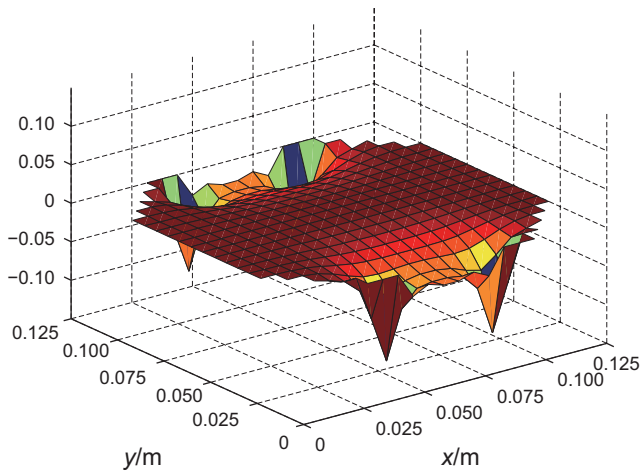
图7 1号电极发射、9号电极接收情况下的广义幅度、相位敏感场
 Fig. 7 A wide concept of sensitivity field for amplitude and phase when No.1 electrode transmits and No. 9 electrode receives



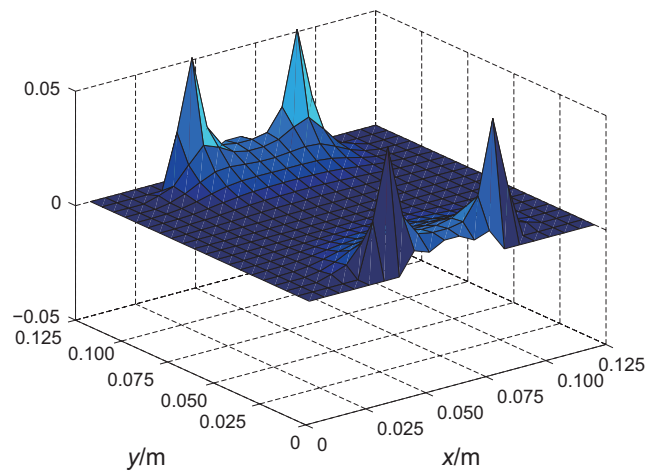
(a) 1号电极发射、9号电极接收情况下全息测量敏感场的实部



(b) 9号电极发射、1号电极接收情况下全息测量敏感场的实部



(c) 1号、9号电极互为发射、接收电极的情况下Geselowitz敏感场的实部



(d) 1号、9号电极互为发射、接收电极的情况下Geselowitz敏感场的虚部

图8 全息测量敏感场与 Geselowitz 敏感场的对比

Fig. 8 The comparisons between holographic measurement sensitivity field and Geselowitz sensitivity field

在互易内积后, Geselowitz敏感场表达式削弱了主发射电极的敏感性, 从而导致敏感场偏离正确特性, 无法推广使用。

2.3 电磁全息成像

所有基于测量敏感场理论的成像方法本质均是求解线性方程组

$$Sx = f \quad (6)$$

的合理近似解。其中, S 为灵敏度矩阵, f 为测量数据, x 为反演所得灰度值, 将其进行相应的空间排列组合即可得到重建图像。

2.3.1 幅度/相位叠合

传统的直接算法和迭代类算法均是基于单模测量数据而设计的, 然而油井多相流动电磁测量数据是

“双模”的。双模测量数据的组合方式有两种: 幅度/相位和实部/虚部。本节主要对幅度/相位叠合方法进行研究。

设 S_A 和 S_ϕ 分别为幅度灵敏度矩阵和相位灵敏度矩阵, f_A 和 f_ϕ 分别为幅度和相位测量数据滤波和归一化处理后所组成的列向量。那么, 全局灵敏度矩阵为:

$$S = \begin{bmatrix} S_A \\ S_\phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

全局数据所组成的列向量为:

$$f = \begin{bmatrix} f_A \\ f_\phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, 灵敏度矩阵 S 的规模为 352×316 , 从而使得式(6)中的方程个数大于未知数个数, 成为一超定矩阵, 其解为:

$$x = (S^T S)^{-1} S^T f = S^* f \quad (9)$$

其中, $S^T S$ 为一良态可逆矩阵, 求解式(9)可直接采用最小二乘算法。

2.3.2 实部/虚部融合

设 S 为全息测量灵敏度矩阵, f_A 和 f_e 分别为幅度和相位测量数据滤波和归一化处理后的列向量, 那么, 全息测量数据列向量还可写为

$$f = f_A \cdot \cos f_e + i \cdot f_A \cdot \sin f_e \quad (10)$$

此时, 式(6)中的 S 和 f 均为复数, 所求得的灰度值 x 也将为复数。

根据全息探测物理场的研究思想, 对电磁波方程

$$\nabla \cdot (\varepsilon^* \cdot \nabla \varphi) = 0 \quad (11)$$

中的参数和变量进行实部/虚部展开, 整理可得

$$\nabla \cdot \left[\left(\varepsilon \cdot \nabla \varphi_r + \frac{\sigma}{\omega} \cdot \nabla \varphi_i \right) + i \cdot \left(\varepsilon \cdot \nabla \varphi_i - \frac{\sigma}{\omega} \cdot \nabla \varphi_r \right) \right] = 0. \quad (12)$$

在 3 MHz 的工作频率下, 大多数被测介质的电性参数满足

$$\varepsilon \ll \frac{\sigma}{\omega} \quad (13)$$

那么, 在舍去权重变化较小量的情况下, 式(11)可简化为近似式

$$\nabla \cdot \left(\frac{\sigma}{\omega} \cdot \nabla \varphi_i \right) \approx 0 \quad (14)$$

上式表明, 在各相介质电导率差异相比介电常数更大的情况下, 虚部分量将更好地代表被测介质的空

间分布状况, 即虚部重建图像对气-水和油-水两相流动具有更佳效果。与此同时, 实部重建图像将主要反映油-气空间分布下的两相流动状况。通过同时观察实部和虚部重建图像, 预计还可对将来的油、气、水三相流动成像提供有效依据。

2.3.3 双模融合全息成像设计实验

幅度/相位叠合方法存在量纲一致性问题, 而实部/虚部融合方法所存在的问题则是方程个数小于未知数个数, 为解决上述问题, 可将两种方法有机结合起来, 其步骤与对应的意义如下:

(1) 通过幅度/相位叠合方法计算迭代初值。由式(9)可知,

$$x(m) = \sum_{n=1}^{352} S^*(m, n) f(n) = \sum_{n=1}^{352} a_{m, n} f(n) \quad (15)$$

其中, $a_{m, n}$ 为幅度/相位全息反问题广义逆矩阵 S^* 的第 m 行元素值。式(15)的物理意义在于: 每个空间像素的灰度值取决于对多于像素总个数的测量数据进行线性叠加的结果。

(2) 以(1)中的计算结果作为初值, 使用共轭梯度算法对实部/虚部融合反演问题进行迭代求解。由于本文研究主要针对气-水两相流动的情况, 因此根据前述分析, 重建图像适合采用最终求得灰度值 x 的虚部分量数据。

为了对几种典型的成像方法进行比较, 图 9 给出了分别代表直接法和迭代法的 Twomey 改进光滑化算法和共轭梯度算法, 对持水率为 70% 的气-水层流

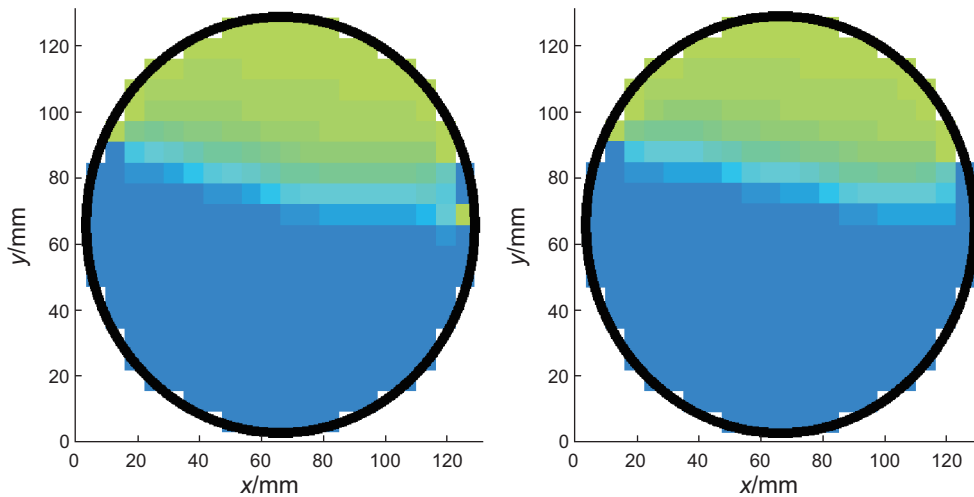


图 9 Twomey 改进光滑化算法 (左) 和共轭梯度迭代算法 (右) 的图像重建结果

Fig. 9 Image reconstruction results of improved Twomey smoothing algorithm (left) and conjugate gradient iterative algorithm (right)

测量数据进行成像的结果。图 10 给出了本文提出的幅度/相位叠合方法和双模融合全息成像方法的相应成像结果。其中, Twomey 改进光滑化算法重建图像效果最为不理想, 主要表现在图像所显示的持水率偏低, 可能受制于正则化因子的选择策略; 共轭梯度算法的初值来源于 Twomey 改进光滑化算法的计算结果, 经多次迭代后, 其图像重建效果有所改善; 幅度/相位叠合方法的成像效果又优于共轭梯度算法, 然而气-水分界面显示不佳, 可能受制于幅度/相位的量纲一致性问题。最后, 在双模融合全息成像方法的情况下, 由于其初值来源于幅度/相位叠合方法的计算结果, 再加上实部/虚部数据量纲具有一致性, 因此经多次迭代后, 全息成像结果将能够合理支配双模测量数据对应于全息图像上的权重分配, 从而使其在四个算例中的重建图像效果最佳。

3 油井多相流动电磁全息方法应用

油井多相流动电磁全息方法的有效性必须通过实际应用得以体现。搭建相应的实验室环境可以实现实际流动过程的模拟。在网络分析仪和控制电路同步测量的状态下, 进行了不同矿化度条件下全空气、全水和不同持水率下的气-水层流实验总计 126 次, 每次实验记录 176 对幅度/相位全息数据。限于篇幅, 仅以地层水矿化度为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 的模拟测量环境中的部分测量数据为例。

3.1 全息成像实验

图 11 给出了持水率为 50% 情况下的气-水层流幅度测量数据特征与成像显示。这组数据受到电极“突变”异常的影响较大。然而, 经过滤波处理^[26]后, 其层流“台阶”特征有所再现。从幅度测量数据的二维/三维成像显示可以看出, 气-水分界面附近存在较多假象, 绝对误差略高于 2%。

类似地, 图 12 为同一测量条件下的相位测量数据特征与成像显示, 其质量要好于幅度的情况, 尤其是一些“毛刺”特征在滤波处理后得以消除, 成像质量更佳。图 13 为全息成像显示, 其质量又高于以上两者。

3.2 流动参量提取

流型空间分布可以直观地通过全息成像结果获得。图像占空比是持水率计算的重要依据之一。除此之外, 在地层水矿化度一定的情况下, 随着持水率的增高, 幅度/相位测量数据的值总体上呈现增大/减小的趋势, 表明持水率是气-水层流空间分布测量数值变化的主要因素。为了考察测量数值随持水率变化的规律, 计算每轮 176 个幅度/相位测量数据的平均值, 并对持水率个位为 0 的百分数据(10%、20%、……、100%)平均值进行三次多项式拟合, 如图 14 所示。其中, 幅度测量数据拟合曲线公式和相关系数分别为

$$A(x) = 0.8711x^3 - 1.755x^2 + 1.389x + 7.980, \quad (16)$$

$$R^2 = 0.9946.$$

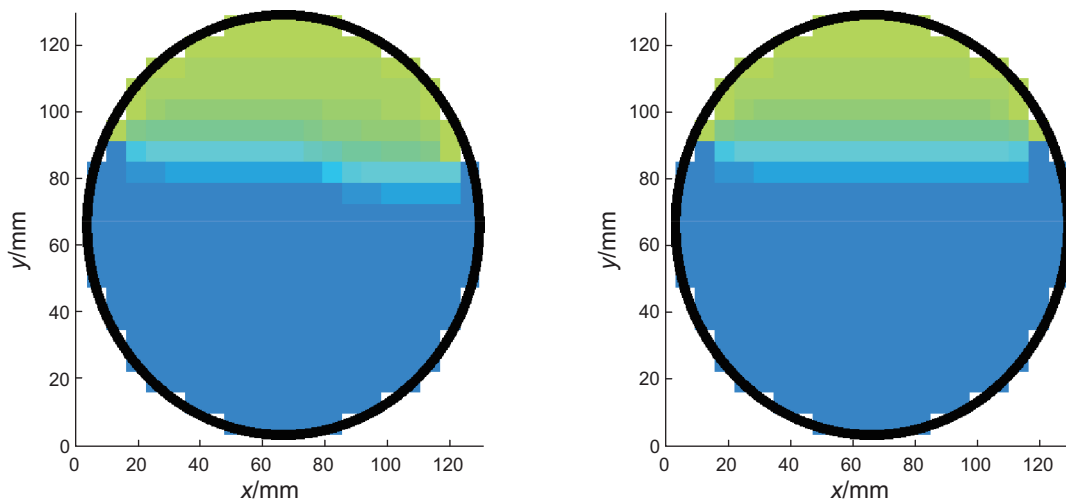


图 10 幅度/相位叠合方法(左)和双模融合全息成像方法(右)的成像结果

Fig. 10 Tomography results of amplitude/phase holographic method (left) and dual-mode mixed holographic method (right)

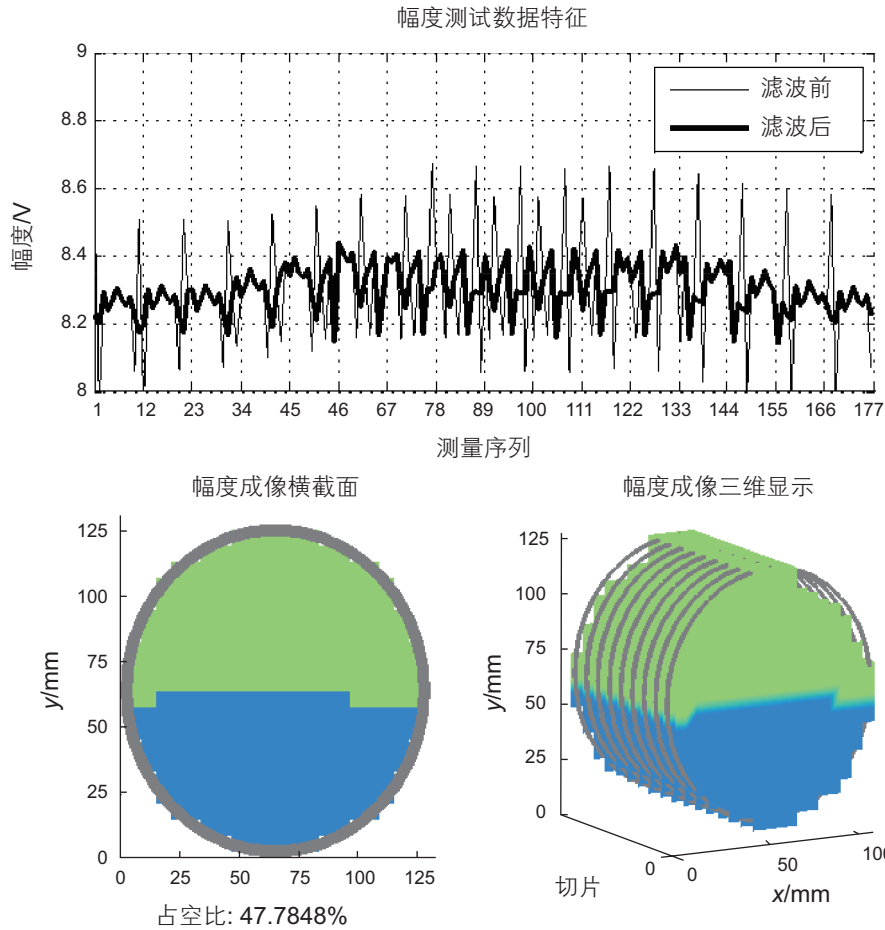


图 11 持水率为 50% 情况下的气—水层流幅度测量数据特征与成像显示

Fig. 11 Amplitude measurement data and imaging display of gas-water stratified flow of 50% water holdup

相位测量数据拟合曲线公式和相关系数分别为

$$\theta(x) = -5.259x^3 + 6.652x^2 - 5.020x + 67.57, \quad (17)$$

$$R^2 = 0.9886.$$

两者相关系数均大于 0.98，表明一致性较好。

3.3 成像精度与效率

主要从以下两方面对成像精度与效率进行衡量：

(1) 全息成像方法

以持水率为 30%、50% 和 80% 的气—水层流重建图像结果为例，结合计算所得的占空比，总结出如表 3 所示的成像误差（绝对误差）与成像时间。其中成像时间为测量数据导入、处理与反问题求解时间之和。可以看出，幅度成像的整体误差偏高，可能是由于部分严重“突变”的测量值没有压制到位，但绝对误差最高不超过 3%。相位成像和全息成像的绝对误差均在 0.5% 以内。幅度/相位单模成像可基本满足 20-

25 fps 的实时性，然而全息成像所耗费的时间大约为单模成像的 1.5 倍，因此各大环节算法的协同运作仍有待继续优化和改进。

(2) 事后误差估计

事后误差估计是假设一部分数据已知，另一部分数据未知的情况下，对一部分数据进行处理，用另一部分数据进行检验的一种误差估计方法。在对持水率个位为 0 的百分数据（10%、20%、……、100%）平均值进行拟合之后，可利用持水率个位为 5 的百分数据（5%、15%、……、95%）平均值进行验证。

由于幅度和相位都是具有量纲的物理量，因此采用相对误差衡量成像精度更为客观。所有幅度/相位测量数据的相对误差如表 4 和表 5 所示，并用深灰/浅灰色背景分别标出单模测量数据的最大/最小相对误差。两套单模测量数据的最大相对误差均不超过 0.5%，说明测量数据具有较高可信度。

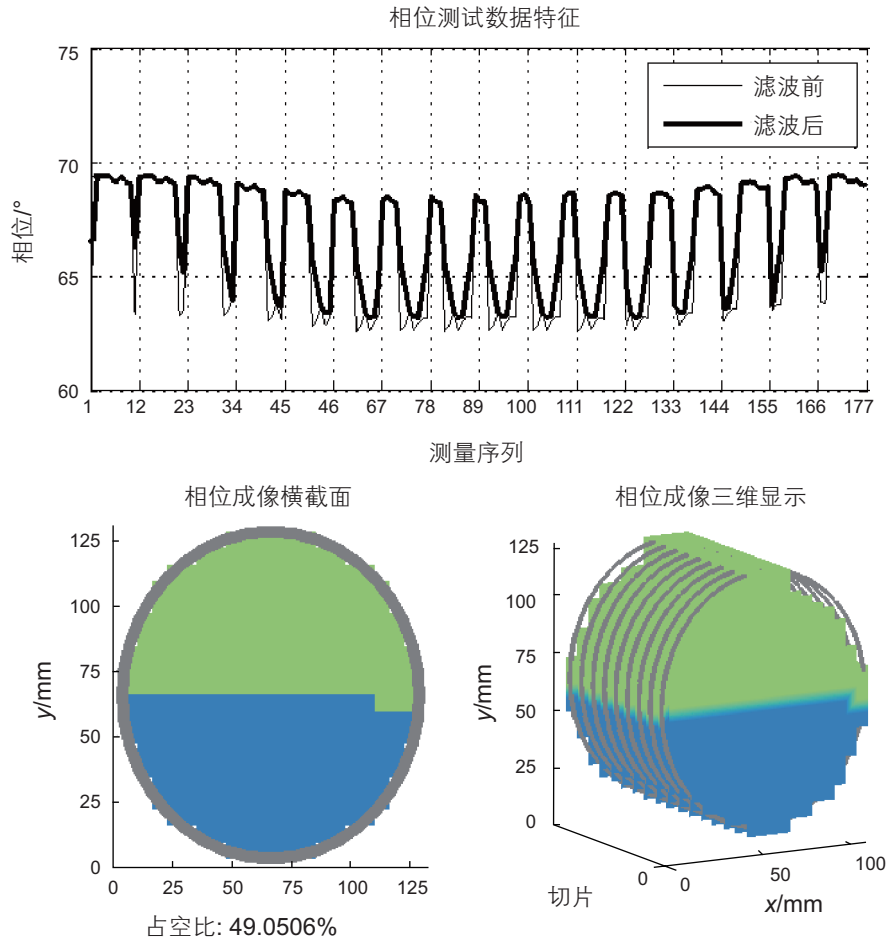


图 12 持水率为 50% 情况下的气—水层流相位测量数据特征与成像显示

Fig. 12 Phase measurement data and imaging display of gas-water stratified flow of 50% water holdup

表 3 不同成像方法的成像绝对误差与成像时间

Table 3 Imaging absolute deviation and time of tomography algorithms

持水率/%	成像绝对误差/成像时间		
	幅度	相位	全息
30	-2.78% / 0.056 s	-0.25% / 0.048 s	0.20% / 0.073 s
50	-2.22% / 0.054 s	-0.95% / 0.041 s	-0.32% / 0.061 s
80	-0.25% / 0.053 s	0.38% / 0.040 s	0.38% / 0.067 s

表 4 幅度测量数据平均值相对误差计算

Table 4 Relative deviation of amplitude measurement data average

持水率/%	幅度平均值/V	拟合平均值/V	相对误差/%	持水率/%	幅度平均值/V	拟合平均值/V	相对误差/%
5	8.016 3	8.045 0	-0.357 9	55	8.358 8	8.357 8	0.011 3
10	8.093 2	8.102 0	-0.109 1	60	8.361 6	8.369 6	-0.096 2
15	8.159 4	8.151 6	0.095 8	65	8.366 3	8.380 4	-0.168 5
20	8.205 1	8.194 4	0.129 9	70	8.393 7	8.391 0	0.032 6
25	8.205 9	8.231 0	-0.306 4	75	8.412 0	8.401 9	0.119 8
30	8.271 4	8.262 1	0.112 1	80	8.418 3	8.413 8	0.052 8
35	8.304 6	8.288 4	0.195 3	85	8.417 5	8.427 4	-0.118 4
40	8.308 3	8.310 4	-0.025 2	90	8.454 4	8.443 4	0.130 6
45	8.307 8	8.328 9	-0.253 7	95	8.473 5	8.462 3	0.132 1
50	8.333 7	8.344 5	-0.129 8	100	8.476 5	8.484 9	-0.098 7

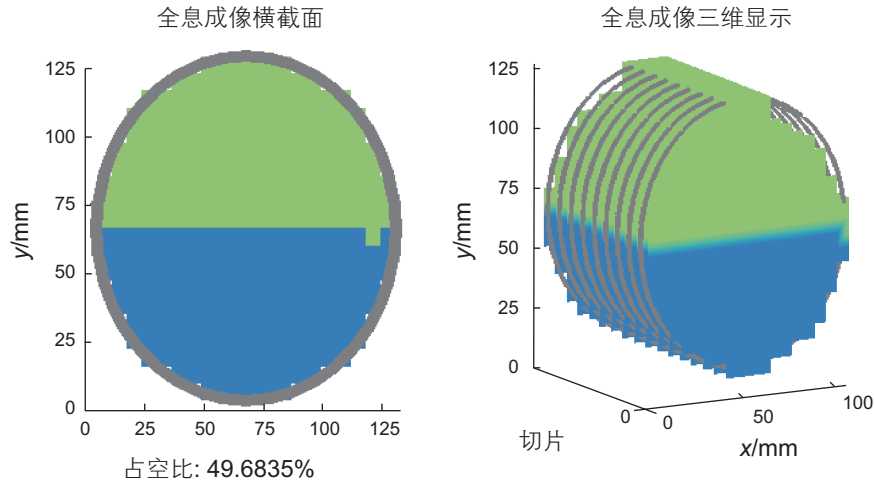


图 13 持水率为 50% 情况下的气—水层流全息成像显示

Fig. 13 Holographic imaging display of gas-water stratified flow of 50% water holdup

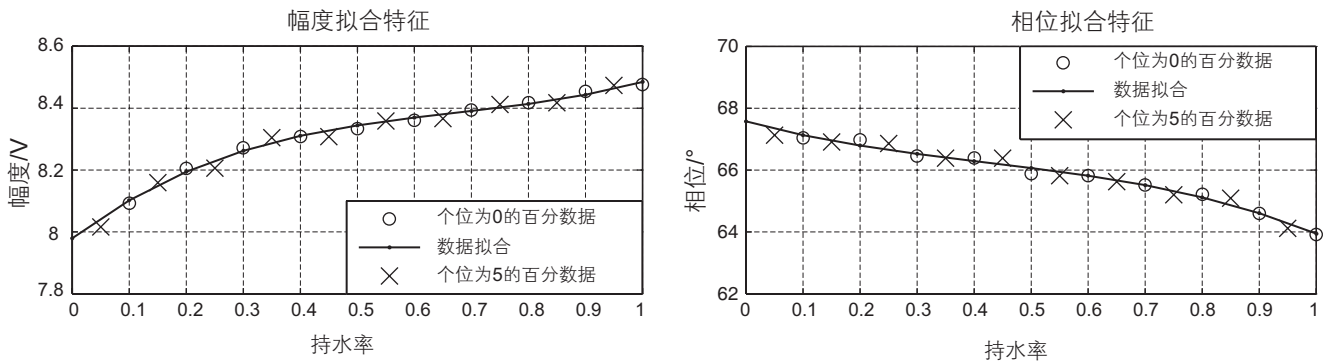


图 14 气—水层流幅度 / 相位测量平均值与持水率拟合曲线图

Fig. 14 Fitting curve of gas-water stratified flow amplitude/phase average and water holdup

表 5 相位测量数据平均值相对误差计算

Table 5 Relative deviation of phase measurement data average

持水率 /%	幅度平均值 /V	拟合平均值 /V	相对误差 /%	持水率 /%	幅度平均值 /V	拟合平均值 /V	相对误差 /%
5	67.130 4	67.337 1	-0.308 0	55	65.818 0	65.948 4	-0.198 1
10	67.035 4	67.131 4	-0.143 2	60	65.826 4	65.818 9	0.011 3
15	66.908 0	66.951 1	-0.064 4	65	65.628 2	65.675 4	-0.071 8
20	66.977 1	66.792 2	0.276 2	70	65.516 9	65.513 8	0.004 7
25	66.858 6	66.650 7	0.310 9	75	65.200 3	65.330 3	-0.199 3
30	66.456 7	66.522 8	-0.099 5	80	65.218 2	65.120 8	0.149 3
35	66.384 0	66.404 5	-0.031 0	85	65.094 2	64.881 5	0.326 6
40	66.386 3	66.291 9	0.142 2	90	64.606 5	64.608 5	-0.003 1
45	66.386 8	66.181 0	0.310 0	95	64.116 7	64.297 6	-0.282 1
50	65.877 5	66.067 8	-0.288 8	100	63.912 2	63.945 1	-0.051 5

4 结束语

本文基于电磁波流动成像测井研究现状,将全息探测物理场、全息测量敏感场和全息成像方法三大方面形成体系开展了研究,并通过流动模拟测量实验进行了验证。主要结论如下:

(1) 电磁全息测量数据响应特征区别明显,能够较好突出各相流体导电特性与介电特性的差异。

(2) 油井多相流动电磁全息测量敏感场是一种双模态的敏感场,通过复敏感特性解决了幅度、相位敏感

场的量纲一致性问题。

(3) 创建了一种基于双模融合的全息成像方法,能够合理支配双模测量数据对应于全息图像上的权重分配,相比以往单模图像重建算法效果更佳。

(4) 从全息成像方法和事后误差估计两方面对全息成像精度与效率进行了评价,验证了定性/定量应用油井多相流动电磁测量全息方法的可行性。

值得指出的是,虽然本文研究内容主要针对油井多相流动问题,但随着大数据技术和实时在线二维/三维成像技术的快速发展,期待本文核心思想在将来能够广泛适用于其它涉及多相流动领域中的过程监控。

参考文献

- [1] 李海青. 两相流参数检测及应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991. [LI H Q. Detection and application of two phase flow parameters [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1991.]
- [2] 吴锡令. 石油开发测井原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. [WU X L. Petroleum production logging principles [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.]
- [3] 顾春来, 董守平. 多相流检测技术在石油工业中的应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 1999, 23(3): 109-116. [GU C L, DONG S P. Measurement techniques for multiphase flow in petroleum industry [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 1999, 23(3): 109-116.]
- [4] HILL A D. Production Logging - Theoretical and Interpretive Elements [M]. Monograph Series of SPE, 1990(14).
- [5] 吴锡令. 波导法测量油井持水率的理论、方法和实验研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(3): 424-430. [WU X L. Using wave guide method to measure water hold-up in oil wells [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1996, 39(3): 424-430.]
- [6] 吴锡令, 景永奇, 吴世旗. 多相管流电磁成像测井方法研究[J]. 地球物理学报, 1999, 42(4): 577-562. [WU X L, JING Y Q, WU S Q. Electromagnetic imaging logging method in multiphase pipe flow [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(4): 577-562.]
- [7] 吴锡令, 赵亮, 刘迪军. 多相流动电磁波成像测井基础研究[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 79-82. [WU X L, ZHAO L, LIU D J. A fundamental study on electromagnetic wave imaging logging in multiphase flow [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2): 79-82.]
- [8] 赵亮, 吴锡令. 多相流动电磁波成像测井测量敏感场计算[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 870-874. [ZHAO L, WU X L. Calculation of sensitivity field for electromagnetic tomography in multiphase flow well logging [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(6): 870-874.]
- [9] 吴锡令, 赵亮, 牛虎林. 流动成像测井新方法及实验研究[J]. 科学中国人, 2004, 12: 44-45. [WU X L, ZHAO L, NIU H L. New method and experimental study of flow imaging logging [J]. Scientific Chinese, 2004, 12: 44-45.]
- [10] 赵彦伟, 吴锡令, 王晓星. 油井多相流电磁成像测量敏感场仿真[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 946-950. [ZHAO Y W, WU X L, WANG X X. Simulation of sensitivity field for electromagnetic tomography in multiphase flow well logging [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(3): 946-950.]
- [11] 王晓星, 吴锡令. 两相流电磁成像测量正问题研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(3): 88-91. [WANG X X, WU X L. Study on the forward simulation of the two-phase flow electromagnetic tomography [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2008, 23(3): 88-91.]
- [12] 刘再斌, 吴锡令. 电磁流动成像测井识别气-水层流的信号处理方法[J]. 科技导报, 2011, 29(5): 28-31. [LIU Z B, WU X L. Gas-water stratified flow identification based on electromagnetic image logging [J]. Science and Technology Review, 2011, 29(5): 28-31.]
- [13] 别静, 吴锡令, 缪志伟. 油井流动图像重建算法研究[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(7): 92-94. [BIE J, WU X L, MIAO Z W. Study on flowing image reconstruction algorithms for oil wells [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(7): 92-94.]
- [14] 蔡家铁, 吴锡令. 电磁阵列传感器的频率特性测量实验研究[J]. 测井技术, 2013, 37(1): 24-27. [CAI J T, WU X L. Experimental study on frequency property with array electromagnetic sensor [J]. Well Logging Technology, 2013, 37(1): 24-27.]
- [15] 蔡家铁, 吴锡令, 张阔. 油井流动成像束状探测电磁场[J]. 地球物理学报, 2015, 58(1): 289-297. [CAI J T, WU X L, ZHANG K. Fascicular electromagnetic field for electromagnetic tomography in multiphase flow well logging [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(1): 289-297.]

- [16] 张阔, 吴锡令, 蔡家铁. 油井流动成像电磁测量相位场特性[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1843-1848. [ZHANG K, WU X L, CAI J T. The phase field characteristics based on the oil well electromagnetic flow imaging measurement [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1843-1848.]
- [17] HUANG S M, PLASKOWSKI A B, XIE C G, et al. Tomography imaging of two-component flow using capacitance sensor[J]. The European Physical Journal, 1989, 22(3): 173-177.
- [18] 王国锋, 吴玲, 刘婷. Flow Scanner新型水平井生产测井仪[J]. 石油仪器, 2007, 21(2): 33-36. [WANG G F, WU L, LIU T. New horizontal well production logging tool flow scanner [J]. Petroleum Instrument, 2007, 21(2): 33-36.]
- [19] 倪国军, 郑雪祥. 在水平井中应用的一种新型多相持率测井仪—电容阵列多相持率测井仪(CAT)[J]. 油气井测试, 2004, 13(4): 86-89. [NI G J, ZHENG X X. Application of a new model multiple phase holdup logging instrument in horizontal well-Capacitance array multiple phase holdup logging instrument (CAT) [J]. Well Testing, 2004, 13(4): 86-89.]
- [20] 赵亮. 电磁波流动成像测井方法研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2002. [ZHAO L. Research of electromagnetic flow imaging logging method [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2002.]
- [21] 赵彦伟. 流动成像电磁测量敏感场和图像重建研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2007. [ZHAO Y W. Research of flow imaging electromagnetic measurement sensitivity field and image reconstruction [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2007.]
- [22] 王晓星. 油井流动成像测量电磁敏感阵列优化设计[D]. 北京: 中国石油大学, 2009. [WANG X X. Oil well flow imaging measurement electromagnetic sensitivity array optimization [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2009.]
- [23] 牛虎林. 电磁波流动成像测井数据处理方法研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2004. [LIN H L. Research of electromagnetic wave flow imaging logging data processing method [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2004.]
- [24] 王晓星, 吴锡令, 王滨涛. 基于正交试验方法的流动成像测井传感器优化设计[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(2): 52-55. [WANG X X, WU X L, WANG B T. Optimization design of flow electromagnetic tomography transducer based on orthogonal test [J]. Journal of China University of Petroleum: Nature Science Edition, 2010, 34(2): 52-55.]
- [25] 刘再斌. 电磁波流动成像测井图像重建及参数提取方法研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2011. [LIU Z B. Research of electromagnetic wave flow imaging logging image reconstruction and parameter obtainment method [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.]
- [26] 别静. 油井流动图像重建算法研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2012. [BIE J. Research of oil well flow image reconstruction algorithm [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2012.]
- [27] LIU Z B, WU X L. Flow pattern identification in oil wells by electromagnetic image logging [J]. Petroleum Science, 2012, 09(3): 303-309.
- [28] WANG X X, WU X L. Gas-water stratified flow patterns from electromagnetic tomography [J]. Petroleum Science, 2009, 06(3): 254-258.
- [29] WU X L, WANG X X, ZHAO Y W, et al. Flow imaging method of electromagnetic measurement in well logging [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(S2): 181-185.
- [30] WU X L, ZHAO Y W. Simulation Experiments in Electromagnetic Tomography Well Logging in Two-phase Flow [J]. Petroleum Science, 2006, 03(3): 41-44.
- [31] RADON J. Berichte über die Verhandlungen der Königlich-Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig [J]. Mathematisch-Physische Klasse, 1917, 69: 262-277.
- [32] GESELOWITZ D B. An application of electrocardiographic lead theory to impedance plethysmography [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1971, BME-18(1): 38-41.
- [33] 尹武良. 低频电磁传感检测技术: 设计、分析、计算与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010. [YIN W L. Low frequency electromagnetic sensor inspecting technique: design, analysis, calculation and application [M]. Beijing: Science Press, 2010.]
- [34] ZHANG K, WU X L, YAN J F, et al. Characteristics of electromagnetic holographic measurement sensitivity field for flow imaging [C]. International Conference on Imaging Systems and Techniques. Macao, IEEE, 2015: 226-221.

Study of electromagnetic holographic methods for multiphase flow in oil wells

ZHANG Kuo, WU Xiling, YAN Jingfu, CAI Jiatie

State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, 102249, China

Abstract In view of the complexity of fluid distribution and the randomness of flow changes in the production process of oil wells, flow imaging measurement encounters serious challenges. In particular, key technologies such as the establishment of sensitivity fields, the fusion of multi-mode data, and flow image reconstruction are all in need of breakthroughs. In this paper, according to the characteristics of the physical detection field, based on the theory of imaging measurement, we focus on the research into a new dual-mode sensitivity field, the fusion of real and imaginary parts of the measurement data from the array sensor and the holographic tomography method with high efficiency and feasibility. Further, we investigate the feasibility and accuracy of holographic tomography through simulated flow measurement experiments. The research results in this paper show that holographic measurement data vary significantly, which highlights the differences in the conductivity and permittivity properties of various phases of fluid. The holographic measurement sensitivity field is more suitable for electromagnetic holographic measurement of multiphase flow in oil wells than previous sensitivity fields and the dual-mode fusion-based holographic tomography method is useful for improving the accuracy of holographic tomography. By carrying out a series of specific procedures in simulated flow measurement experiments, we can finally obtain the typical flow patterns of clearer gas-water interfaces and calculates flow parameter of considerable precision, which shows that the electromagnetic holographic method is feasible and has good prospects for application.

Keywords multiphase flow in oil wells; holographic physical detection field; holographic measurement sensitivity field; holographic tomography; simulated flow measurement experiment

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.02.017

(编辑 付娟娟)