2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2128-2138
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

田圻,刘军锋,杨荣琦,等.2026.基于阵列流动成像仪的近水平井油气水三相流动成像研究.地球物理学进展,41(5):2128-2138,doi:10.6038/pg2026JJ0449.

TIAN Qi, LIU JunFeng, YANG RongQi, *et al*. 2026. Imaging study on oil-gas-water three-phase flow in near-horizontal wells based on array flow. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2128-2138,doi:10.6038/pg2026JJ0449.

基于阵列流动成像仪的近水平井油气水三相流动成像研究

Imaging study on oil-gas-water three-phase flow in near-horizontal wells based on array flow

田圻[1],刘军锋[1],杨荣琦[2],戴月祥[3],郭海敏[1]

TIAN Qi[1], LIU JunFeng[1], YANG RongQi[2], DAI YueXiang[3], GUO HaiMin[1]

1. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学),武汉 430100
2. 中国石油集团测井有限公司辽河分公司,盘锦 124010
3. 中国石油集团测井有限公司地质研究院,西安 710077

1. *Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technology* (*Yangtze University*), *Ministry of Education*, *Wuhan* 430100, *China*
2. *Liaohe Branch*, *CNPC Logging Company Limited*, *Panjin* 124010, *China*
3. *Geological Research Institute*, *CNPC Logging Company Limited*, *Xi'an* 710077, *China*

摘 要 随着开发的进行,XJ 油田出现近水平井油气水三相流,由于各相流量和流体本身物理性质等参数的差异,导致井筒中三相流动更为复杂,常规手段已不再适用.为此,本文首次尝试采用 FIT(Flow Imaging Tool)阵列流动成像仪在近水平井油气水三相流中开展不同井况下的模拟实验.首先,通过实验数据和理论流型,总结了实验中常见的流型;其次,基于阵列光纤和阵列电阻所得的局部持气率和持水率特征,介绍了用简单距离反比加权插值、高斯径向基函数插值、普通克里金插值的成像过程;然后在 MATLAB 中分别用这三种方法进行了截面成像和平均持率计算;再通过对成像结果的对比与相对误差分析,选用较优方法算出的平均持率并结合高密度截面分割法实现了沿井筒方向的三维持率成像;最后分析了 FIT 仪器在实验井筒中的覆盖范围.研究表明:近水平井油气水三相实验中,采用阵列流动成像仪测得的数据能反映井筒中各相流型流态;在完全水平井中,高斯径向基函数法更适用于水烃界面与持水率的计算,而克里金法对气液界面的估算效果更好;利用它们得到的三维井筒成像,能较直观地反映井内油气水介质的分布和井筒截面上总的持率值,对近水平井油气水三相中的动态监测提供一定的参考.

Abstract With the advancement of development, oil-gas-water three-phase flow has emerged in near-horizontal wells of the XJ Oilfield. Differences in phase flow rates and fluid physical properties have complicated the three-phase flow in the wellbore, rendering conventional methods ineffective. To solve this problem, this paper first conducts simulation experiments under different well conditions in near-horizontal wells with oil-gas-water three-phase flow using the Flow Imaging Tool (FIT) array flow imager. The common flow patterns in the experiments are summarized based on experimental data and theoretical flow patterns. Subsequently, the imaging processes of simple inverse-distance weighting interpolation, Gaussian radial basis function interpolation, and ordinary Kriging interpolation are introduced by utilizing the local gas holdup and water holdup characteristics obtained from array optical fibers and array resistors. These three methods are then implemented in MATLAB for cross-sectional imaging and average holdup calculation. Through the comparison of imaging results and analysis of relative errors, the average holdup calculated by the optimal method is combined with the high-density cross-sectional segmentation method to achieve three-dimensional holdup imaging along the wellbore. Finally, the coverage range of the FIT instrument in the experimental wellbore is analyzed. The research results indicate that the data measured by the array flow imager can reflect the flow patterns and behaviors of each phase in the wellbore during the oil-gas-water three-phase flow experiments in near-horizontal wells. In fully horizontal wells, the Gaussian radial basis function method is more suitable for calculating the water-hydrocarbon interface and water holdup, while the Kriging

收稿日期 2025-12-25; **修回日期** 2026-06-12. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 国家自然科学基金项目"页岩油气多参数组合流动成像测量仪响应特征与流动剖面解释模型研究"(42174163)资助.

第一作者简介 田圻,2003 年生,硕士研究生,从事生产测井资料处理与解释研究工作.E-mail:3045294779@qq.com

关键词　近水平井;油气水三相;阵列流动成像仪;实验流型;插值算法;井筒覆盖率;三维成像

中图分类号　P631

文献标识码　A

doi:10.6038/pg2026JJ0449

CSTR:32085.14.pg2026JJ0449

method has a better effect on estimating the gas-liquid interface. The three-dimensional wellbore imaging obtained by these methods can intuitively reflect the distribution of oil, gas, and water media in the well and the total holdup value on the wellbore cross-section, providing a certain reference for dynamic monitoring in the oil-gas-water three-phase flow of near-horizontal wells.

Keywords　Near-horizontal wells; Oil-gas-water three phases; Array flow imager; Experimental flow pattern; Interpolation algorithm; Wellbore coverage rate; Three-dimensional imaging

0　引　言

XJ 油田非常规油气开发区块中,主要采用"水平井 + 体积压裂"的开发模式,井筒主要为近水平状,井筒内流体存在油气水三相流(李维轩等,2021;李磊等,2024;张津瑞等,2023;苏皓等,2018).受重力分异、井筒倾角等因素的影响,水平井中油气水三相流的持率和流速的分布规律较为复杂(刘文红等,2006),因此油气水三相的流动与气液两相流有很大区别.油水两相的不相溶导致油气水三相流的流动形态形成机制较气液两相流更为复杂,其相互作用过程与分散特性会显著改变体系内的流动特征,由此衍生出多种新型流态(章龙江,1998).目前,三相流流型的划分主要基于两种方法:一种是借鉴气液两相流型的划分方法,如国外学者 Stapelberg 认为在水平管中可以直接用气液两相的流型图来描述三相流型(Stapelberg and Mewes,1994).另一种是既考虑油水两相流动形态的多样性,又融合气液两相流的关键特征,形成三相流特有的流型体系,如中国石油大学齐建波学者通过物理实验与数值模拟认为根据相界面特征可将水平管内三相流流型分为油包水型和水包油型两大类(齐建波,2007);国外的 Keskin 和长江大学刘军锋学者分别在水平小管径与大管径中进行实验,提出了以分层流与间歇流为主导的 8 种三相流型(Keskin *et al*., 2007; 刘军锋等, 2010);国外的 Deendarlianto 学者甚至量化了分层流和段塞流之间过渡区域的不同结构(Deendarlianto *et al*.,2019).

目前的测井工具,如阵列电阻持率仪(Cui *et al*., 2021;秦昊等,2017;郭海敏和吴玉燕,2025)、阵列电容持率仪(倪国军和郑雪祥, 2004; 刘军锋等, 2018)、阵列电磁波持率仪(陈猛等,2023),以及由阵列电阻和阵列电容组合的 MAPS 仪器(尚家琦等, 2026;孟鑫,2019;王成荣等,2021),在识别水平井油气水三相流中均有适应性不足的问题,如在水平井中由于流体分层,井筒垂向上的分布状况更能反映整体的情况,而 MAPS 却只能测得井筒四周的流体分布情况,再如高含水条件下,阵列电容会出现过度敏感而导致数据失真的情况.当前由于缺乏阵列流动成像测井仪在油气水三相水平井中适用情况的认识,一定程度上影响了水平井油气水三相测井数据的采集和解释.为了实现水平井的高效开发和生产优化,需要新的组合技术,来精确测量和可视化水平井油气水三相的持率分布.

因此,本文首次尝试利用 FIT(Flow Imaging Tool)阵列流动成像仪在近水平井油气水三相流中开展模拟实验,该仪器为三角臂结构,且同时具有阵列光纤探针和阵列电阻探针,可以实现井筒径向上持率的测量(杨荣琦等,2025).本研究基于对采集数据及录像的分析,总结了常见的实验流型,并在 MATLAB 中用简单距离反比加权插值、高斯径向基函数插值、普通克里金插值进行了截面成像,通过对成像结果的比较选择较好的插值结果用面积加权平均法计算了平均持率,最后利用高密度分割算法实现了沿井筒方向的三维持率成像,将多相流中各相流体的空间分布以直观形象的方式呈现出来,该研究在一定程度上为后续的近水平井三相流产出剖面动态监测奠定了基础.

1　实验仪器及装置

1.1　测量仪器

如图 1 所示,FIT 阵列流动成像仪为三角臂结构,在测量时一般将仪器臂张开至井筒内径大小,以实现全井筒测量.仪器的一侧有 5 个电阻探针和 5 个光纤探针,底部的仪器主体上分布着电阻探针、光纤探针各一个.电阻探针基于水和烃类的电导率的差异测量持水率,光纤探针基于光的全反射原理测量持气率.

1.2　实验装置

实验采用大尺寸透明有机玻璃井筒模拟实际生产井筒条件,其内径为 124 mm,总长度达到 16 m,透明井筒设计便于直接观察流动状态.实验在常温



图 1 FIT 仪器实物图及结构示意图
Fig. 1 Physical diagram and structural schematic of the FIT instrument

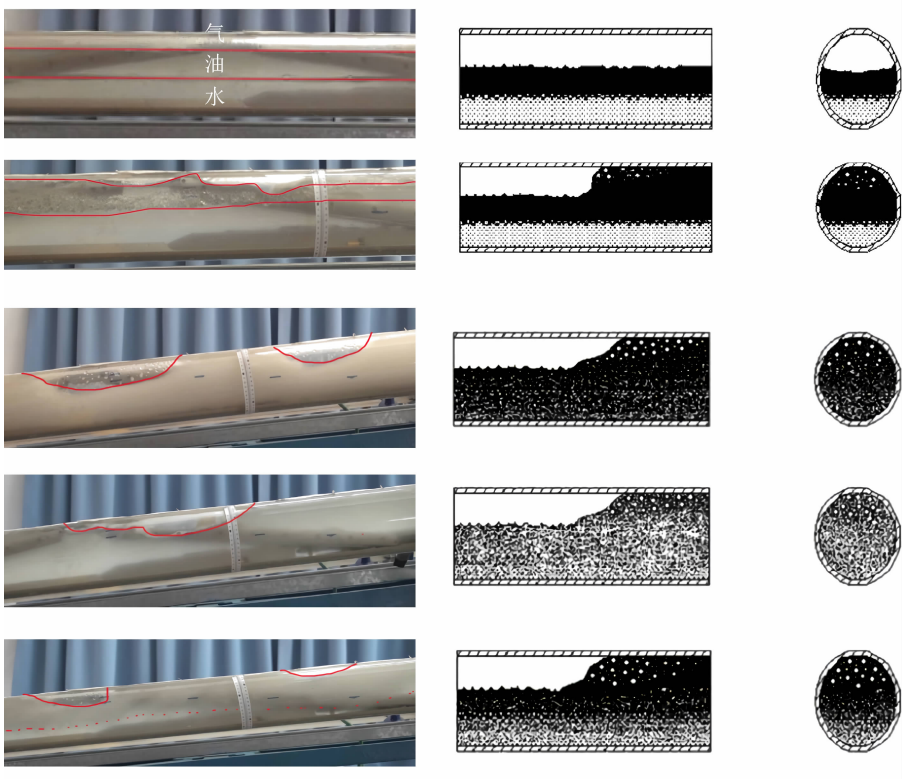


图 2 实验流型与理论流型图
Fig. 2 Diagram of experimental flow patterns and theoretical flow patterns

常压条件下进行(室温 20±2 ℃,1 个标准大气压),其中流体介质分别为白油(密度 0.886 g/m^3,黏度 9.367 mm^2/s)、自来水(密度 0.988 g/m^3,黏度 1.0067 mm^2/s)、空气. 仪器在纯水、纯油和纯气中标定后,在不同井斜、不同流量、不同含水率和不同测速条件下进行的油气水三相测量,实验方案设计如表 1 所示,本研究用点测数据进行持率分析.

表 1 油气水三相点测实验方案

Table 1 Experimental scheme for oil-gas-water three-phase point measurement

井斜 PD/(°)	气流量 G /(m^3/d)	液流量 L /(m^3/d)	含水率 CW/%
83,85,88,90	50,100,150	20,40,60	10,20,30,40,50,60,70,80,90

2 流型分析

由于流型受到井斜、相流量、流体密度、黏度和管径等不同参数的共同影响,导致流型复杂多样,其中井斜和相流量是其重要的影响因素(崔帅飞,2022). 而实际水平井筒是波动的,因此多相流体在井筒内的流动过程非常复杂(Wang *et al.*, 2020). Keskin 等人将大管径水平管三相流流型划分为 8 种,分别为分层-分层流、分层-油连续流、分层-双连续流、分层-水连续流、间歇-分层流、间歇-油连续流、间歇-双连续流和间歇-水连续流(Keskin *et al.*, 2007;刘军锋等,2010).

通过上述实验,对 4 种井斜发现了 5 种流型. 如图 2 所示为五种流型及所对应的理论流型,在倾斜

角度83°、85°和88°时,气以气泡的形式在井筒顶部流过,导致气液界面以间歇流为主,而井斜角度和油水各相流量的变化,又导致油水界面因液面波动出现双连续流、水连续流、油连续流和分层流.在水平90°时,油气水三相流分层流动,气在井筒顶部,油在井筒中部,水在井筒底部,流型为分层-分层流,流动状态最为稳定.

3　插值算法

在持率测量时,仪器通常只能获取有限测点的持率数据,为了获得完整的井筒截面持率分布,需要通过算法对已知测量值进行插值计算(胡海峰等,2022).通过对插值算法的调研分析,结合电阻探针和光纤探针响应数据具有的测点空间分布有限且需兼顾局部变异性与整体平滑性的特点,本文选择了在截面持率成像中具有代表性且适用性较好的三种算法:一是简单距离反比加权插值算法,该算法计算高效,适用于空间相关性随距离平滑衰减的情形(Lu and Wong,2008);二是普通克里金插值算法,该算法能够基于数据空间结构进行无偏最优估计,适用于具有一定空间自相关的数据(李海涛和邵泽东,2019);三是高斯径向基函数插值算法,该算法对连续变化物理场具有良好拟合能力,适用于平滑分布重构.借助这三种插值算法对FIT仪器响应数据进行重构,生成井筒截面二维成像,可视化近水平井内油气水三相的流动状态与界面特性,并在插值的基础上获得平均持率.

3.1　简单距离反比加权插值算法

距离反比加权插值(Inverse Distance Weighting,IDW)算法核心原理是根据已知点的测量值,通过距离加权的方式估算未知点的值.其基本思想是:距离已知点越近的位置,受该点的影响越大;距离越远,影响越小.通过这种距离关系可以推算出截面上未测点的值.但该算法对距离太过敏感,而在斜井、水平井中流型又是复杂多变的,因此这种插值方法在表现井斜、流量和含率的变化对流型的影响方面稍有欠缺(宋红伟和郭海敏,2016;戴家才等,2010).

图3是实现基于IDW的持率二维成像的流程,图中,D_{ij}是第i个探头测点到截面上非探头测点的距离,mm;x_i、y_i、x_j、y_j分别为探头测点和非探头测点的横纵坐标;Y_j、Y_i分别为非探头处的持率预测值和探头处的持率测量值.

3.2　普通克里金插值算法

克里金(Kriging)插值算法又称空间局部插值法,其核心思想是通过变异函数(Variogram)量化空间自相关性,利用加权平均估计未知点的值,其权重由空间结构决定.且该算法中的权系数不仅与已知测点到待测点的距离有关,还与已知点的持率值有

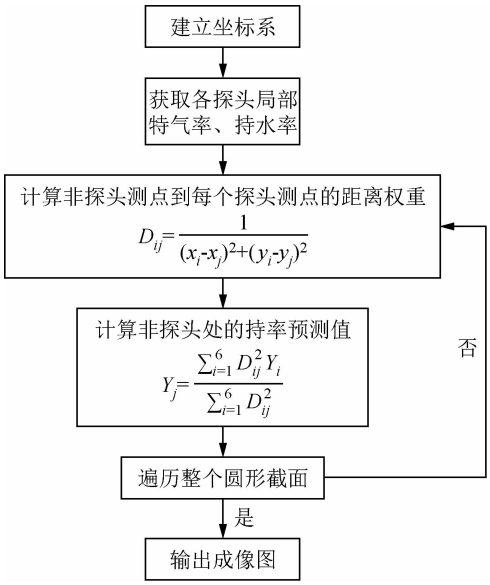


图3　IDW成像流程图

Fig. 3　Flowchart of IDW imaging

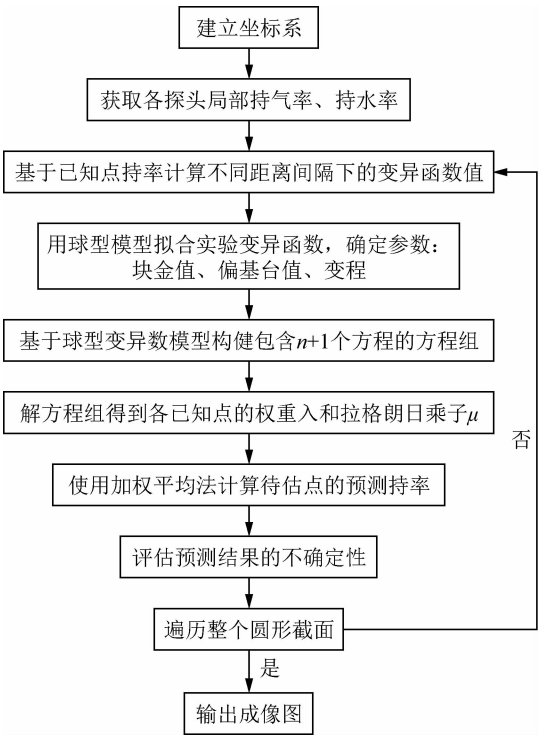


图4　Kriging成像流程图

Fig. 4　Flowchart of Kriging imaging

关,通过距离和测量值的双重关联,能更好的体现井中流体流动规律.可按照以下流程实现基于 Kriging 的持率二维成像.

3.3 高斯径向基函数插值算法

高斯径向基函数(Gaussian Radial Basis Function,RBF)插值是一种基于距离权重的空间插值方法.其核心思想是通过核函数将离散的样本点数据转换为连续的曲面或场.径向基函数的值依赖于点与原点的距离变化.距离越远,径向基函数的数值越小;距离越近,数值越大.该算法通过引入形状参数 σ_{ij} 来增强插值矩阵对井斜和流量等条件的适应性.对于井筒截面上待预测点 x,其预测值 $Y(x)$ 由所有已知测点 $\{x_i, Y(x_i)\}_{i=1}^{6}$ 的加权组合决定,因此可按照以下流程实现基于 RBF 的二维持率成像(图 5),图 5 中,$\varphi(r)$ 是探头测点与非探头测点之间的径向基函数;r 为探头测点与非探头测点之间的距离,单位为 mm;$Y(x)$ 是是非探头处的持率预测值;ω_i 为权重系数.

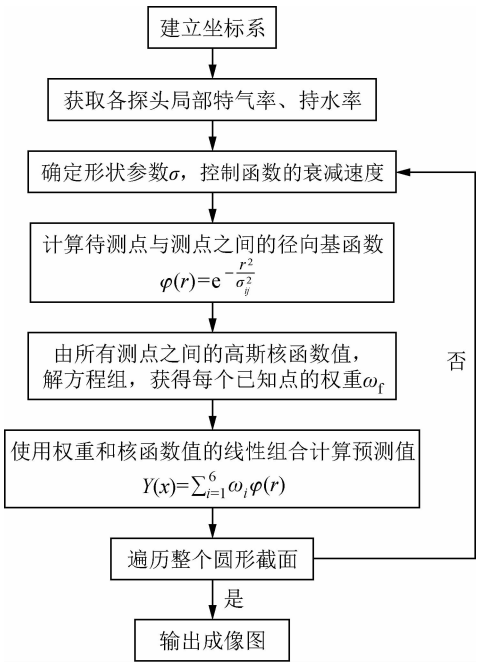


图 5 RBF 成像流程图

Fig. 5 Flowchart of RBF imaging

4 应用结果

在完全水平的井斜条件下,油气水混合流体会在井筒内由于重力的分异作用出现界面光滑的分层-分层流,此时井筒截面的流体分布应如图 6a 所示,井筒内流体分布应该较为均匀,即认为其流体性质在井筒内的横向上一致,仅在垂向上发生性质变化.针对单一算法的局限性,本研究提出“分相组合插值”策略,将油气水三相分别看作水烃两相和气液两相来处理,为了便于区分,对两种分类做了不同颜色处理.针对 FIT 仪器的特点,用阵列电阻测量的水信号区分水和烃,用阵列光纤测量的气信号区分气和液.用三种算法分别做持水率成像和持气率成像,并算出相应的井筒截面平均持率,与实验的真实持率进行对比.

4.1 持水率成像

图 7 展示了 FIT 仪器在模拟井筒中的井斜 90°、相同流量和不同含水率条件下的持水率成像结果,图中蓝色代表水,红色代表烃,蓝红渐变为界面,持水率从 0 到 1 增大.G150L20 表示实验中气流量 150 m^3/d,液流量 20 m^3/d.

从插值成像处理结果与试验时流管侧面照片对比来看(图 8,表 2),井斜 90°实验中,由于烃和水密度差异大,分界面较为平滑和清晰,烃占据井筒的上部,水分布在下部.低含水率条件下,井筒内的流型依然保持为典型的分层-分层流,油气水三相清晰分层,分界面较为平直.在中、高含水率条件下,随着水相的增多,井筒内的流型从分层-分层流转变为间歇-分层流,水烃界面会出现油包水的现象,油水乳化导致的过渡带使得水相持率分布在截面垂直方向上是平滑渐变的,且局部可能受混合影响.高斯径向基函数插值通过调整形状参数,能够较好地拟合这种平缓的梯度变化,而不会在有限的探头位置之间引入非实际的突变,因此能较为精确地计算了烃与水之间的界面,更能体现分层-分层流的特征,且计算的持水率数值更接近实验真实值.克里金插值在面对这种过渡带时,其依赖的“平稳性”假设会因界面模糊而弱化,插值效果对变异函数模型的选取变

表 2 配比流量为 G150L60(m^3/d)时不同插值算法计算的持水率与实验值对比

Table 2 Comparison between calculated water holdup by different interpolation algorithms and experimental values when the proportioned flow rate is G150L60(m^3/d)

含水率/%	IDW	Kriging	RBF	实验值
20	0.3812	0.4643	0.3919	0.4061
40	0.4915	0.5631	0.5079	0.5000
60	0.5349	0.6043	0.5536	0.5925
80	0.6647	0.6797	0.6872	0.6822

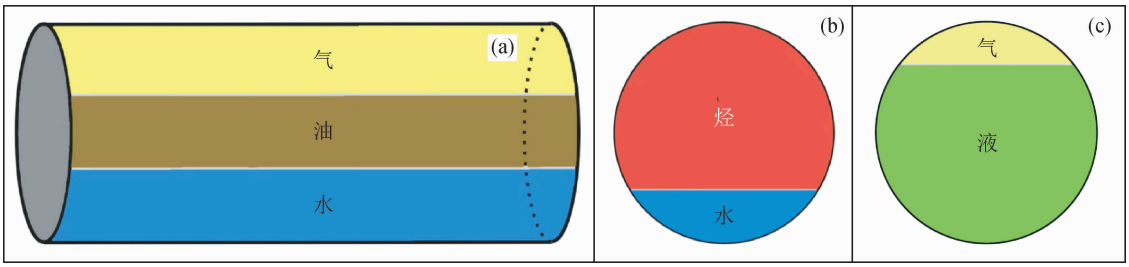


图 6　井筒中流体分布示意图

(a)分层-分层流流体分布示意图;(b)井筒中水烃两相分布示意图;(c)井筒中气液两相分布示意图.

Fig. 6　Schematic diagram of fluid distribution in the wellbore

(a) Schematic diagram of fluid distribution in stratified-stratified flow; (b) Schematic diagram of water-hydrocarbon two-phase distribution in the wellbore; (c) Schematic diagram of gas-liquid two-phase distribution in the wellbore.

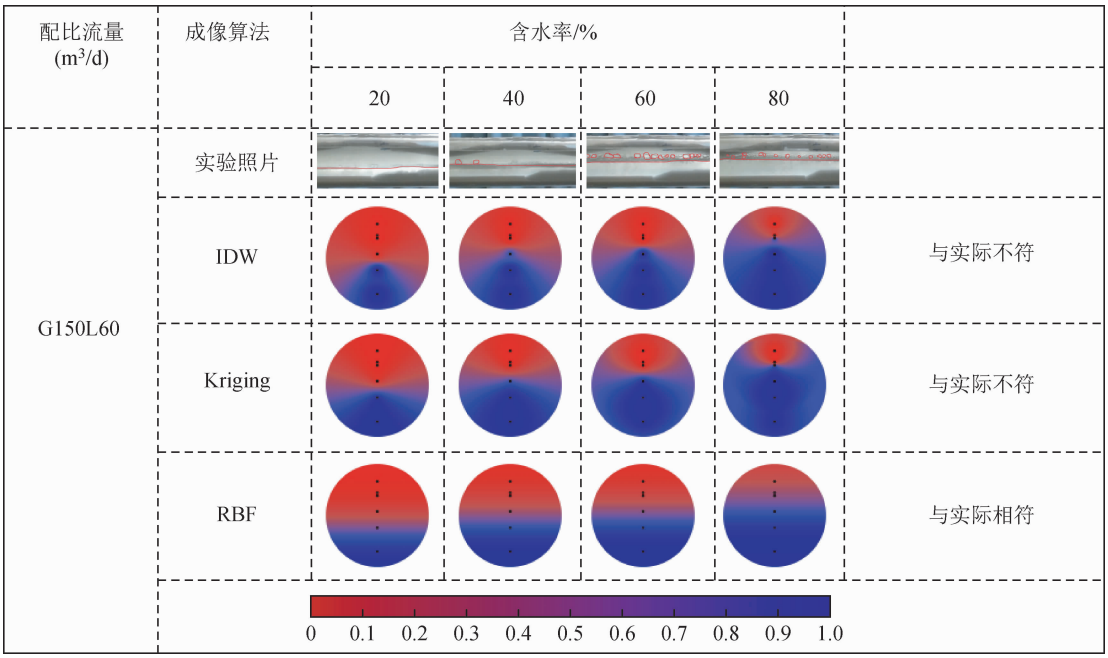


图 7　井斜 90°三种插值算法的持水率成像图

Fig. 7　Water holdup imaging diagrams of three interpolation algorithms at a well deviation of 90°

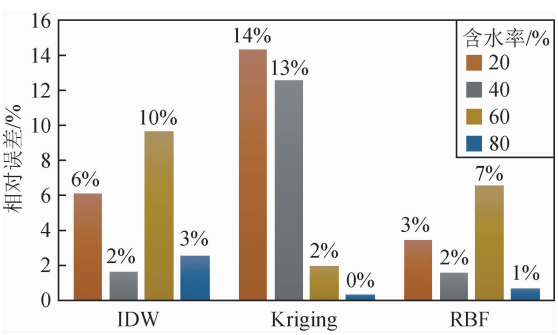


图 8　配比流量为 G150L60(m³/d)时不同插值算法计算的持水率相对误差对比

Fig. 8　Comparison of relative errors of water holdup calculated by different interpolation algorithms when the proportioned flow rate is G150L60(m³/d)

得敏感,而简单距离反比插值单凭一个函数关系无法处理这种过渡,所以克里金插值和简单距离反比插值在水相界面向井筒横截面中心弯曲的幅度较大,导致在反映实际水烃分层的特征方面有所欠缺.

4.2　持气率成像

图 9 展示了 FIT 仪器在模拟井筒中的井斜 90°、含水率 40%、不同流量条件下的持气率成像结果,图中绿色代表液相,黄色代表气相,持气率从 0 到 1 增加.

井斜 90°实验中,由于气液密度差最大,重力分异作用最强,气相迅速上浮并聚集在井筒顶部,形成具有强烈空间趋势的分层结构. 从实验照片上也可

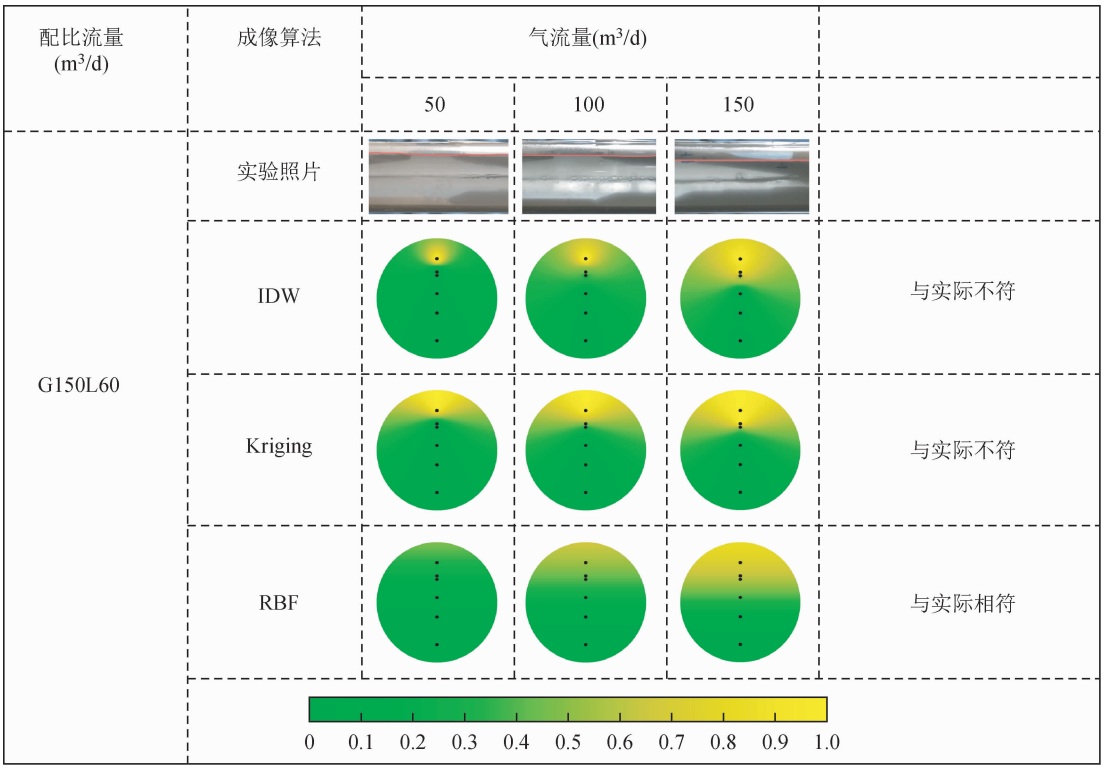


图 9 井斜 90°三种插值算法的持气率成像图

Fig. 9 Gas holdup imaging diagrams of three interpolation algorithms at a well deviation of 90°

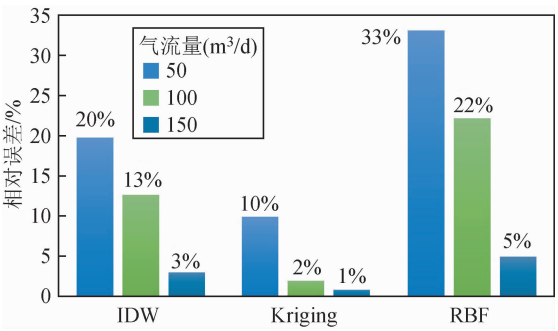


图 10 液流量为 60 m^3/d、含水率 40% 时不同插值算法计算的持气率相对误差对比

Fig. 10 Comparison of relative errors of gas holdup calculated by different interpolation algorithms when the liquid flow rate is 60 m^3/d and water cut is 40%

看出气液分界面较为平直和清晰(表 3,图 10),气相占据井筒的上部,液相分布在下部. 克里金插值通过变异函数能够准确地捕捉到垂直方向上相距较近的点具有相似的持气率这一空间结构性规律. 因此克里金插值在计算气液界面时较准确,在成像色彩方面优于另外两种算法,且持气率值与实际最为接近. 简单距离反比插值由于距离的影响在探头附近收敛太快而形成与实际流动形态不相符的气体原点,在本研究中不适用. 高斯径向基函数插值计算出的界面平直,但因其固有的平滑性而轻微模糊了这个本应很清晰的界面,导致其成像色差代表的持气率明显没有简单距离反比插值和克里金插值计算结果好,且计算出的持气率偏小.

表 3 液流量为 60 m^3/d、含水率 40% 时不同插值算法计算的持气率与实验值对比

Table 3 Comparison between calculated gas holdup by different interpolation algorithms and experimental values when the liquid flow rate is 60 m^3/d and water cut is 40%

气流量(m^3/d)	IDW	Kriging	RBF	实验值
50	0.1494	0.2045	0.1247	0.1861
100	0.2240	0.2619	0.2000	0.2566
150	0.2987	0.2922	0.2752	0.2898

4.3 井筒覆盖率

如图 11 所示,仪器探针数量的有限性导致测量范围的局限性. 在仪器无偏转的情况下,水平井筒同

一高度上的流体类型基本一致,由于相邻探针之间的流体分布可由插值得出,此时只需关注最顶部与最底部两个位置的探针.以本研究为例,可由以下公式换算:

$$井筒垂向覆盖率=\frac{h_6-h_1+2d}{D}\times 100\%\ ,\quad (1)$$

式中,D 为实验管径,单位为 mm;h_1 为最底部探针高度,单位为 mm;h_6 为最顶部探针高度,单位为 mm;d 为探针的直径,单位为 mm.

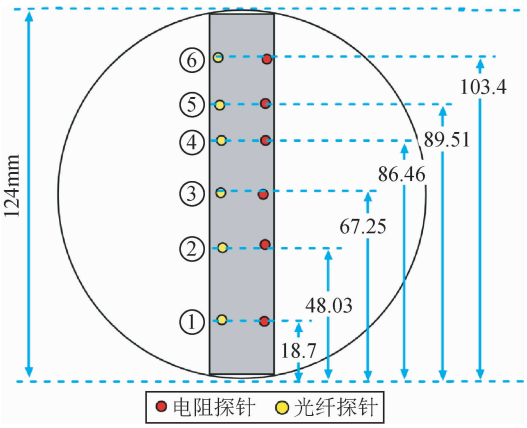


图 11　探针位置示意图

Fig. 11　Schematic diagram of the probe position

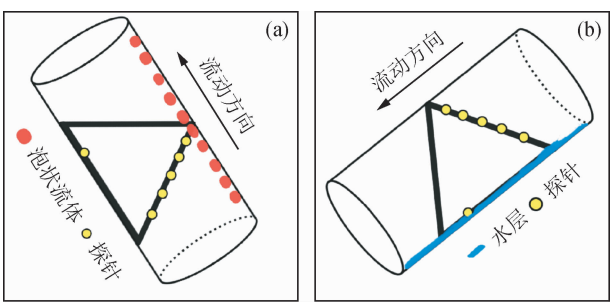


图 12　流体在井斜小于 83°与井斜大于 90°时流动形态示意图

(a)　井斜 <83°(上坡);(b)井斜 >90°(下坡).

Fig. 12　Schematic diagram of flow patterns of fluid at hole deviation less than 83°and greater than 90°

(a) Hole deviation <83°(uphole);(b) Hole deviation >90°(downhole).

在本实验中,基于仪器的张开角度,经过换算,发现仪器在井筒中的覆盖率约为 81%.此外,本实验的井斜只在 83°到 90°之间变化,井斜 83°以下(上坡段)和井斜 90°以上(下坡段)的流体流动情况未知.理论上来说,上坡段井筒顶部会存在薄薄的一层泡状流(如图 12a 所示),下坡段井筒底部会形成薄薄的水层(如图 12b 所示).这表明,当气流量和水流量较低时,位于井筒顶部的一层气相无法被光纤探针识别到,位于井筒底部的一层水相无法被电阻探针识别到,致使实验测量存在盲区,成像效果与实际会有偏差.在实际井中,井筒内径会因套管损坏、结垢等原因而发生变化,这迫使仪器的张开角度会发生变化,此时 FIT 仪器在井下的井筒覆盖率也会随之改变.

针对上述问题,在处理过程中,只要当最顶部探针位于气液界面时,程序就自动将其归为气的特征;只要当底部探针位于水烃界面时,程序自动就将其归为水的特征,这也就导致各相持率的实验值与计算值总会有误差存在.

4.4　三维持率成像

由于二维成像只能反映单一深度点的流体分布状态,无法反映整个井筒深度上的运动过程,因此在井筒截面上添加深度这一维度,可以更好的反映在某一连续深度段内各个单点的油气水分布状态.

首先,通过对三种插值算法的截面成像结果的比较,挑选相适应的插值结果结合面积加权平均法计算出不同井斜、不同流量和不同含水率条件下的平均持水率和平均持气率.其次,在 MATLAN 中用井筒高密度分割,通过密集离散化将连续相态分布转化为离散几何表达,将圆形井筒截面等分为 100 个扇形区域,动态计算每个扇形顶点坐标,采用极坐标到笛卡尔坐标转换,实现环形截面建模.然后,沿测量深度方向按 0.025 m 的步长分层,每层对应一个持率数据点,形成三维堆叠结构,使单点圆形截面在空间中紧密连接.在颜色映射方面,根据属性值将井筒截面段由下而上映射为蓝-褐-黄三色,其中蓝色代表水,褐色代表油,黄色代表气.最后,加入井斜数据能更好的观察到不同井斜角度下的流体流动状态.该方法选择与实际采样间隔一致的空间步长,可以确保成像结果与实际数据之间的紧密连接;融入井斜数据后可以直观地表征流体在不同井况条件下的分布特征,进而提升对井下油气水流动规律解析的精度.

如图 13 所示为不同井斜(PD)、相同气流量(G)150 m^3/d、液流量(L)60 m^3/d、含水率(CW)90% 情况下的部分井段三维持率成像图和对应的实验录像,从图中看出井斜 83°、85°、88°条件下多为间歇流,井斜 90°情况下为分层流,成像结果与实际基本符合.

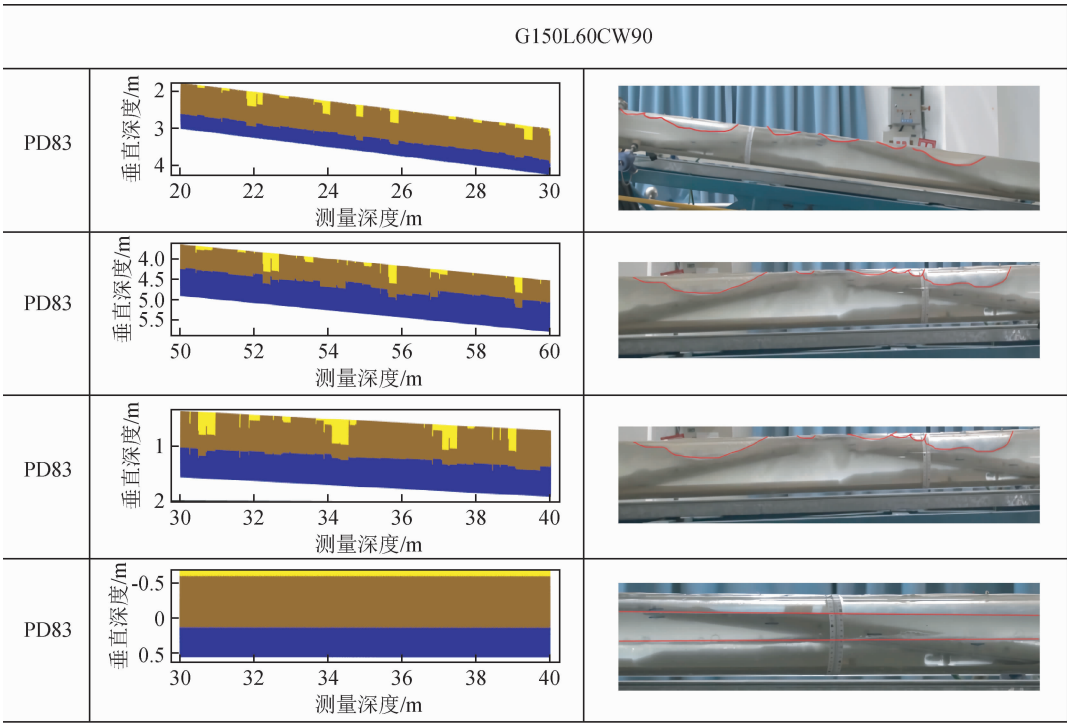


图 13 不同实验条件下成像图与实验图

Fig. 13 Imaging diagrams and experimental diagrams under different experimental conditions

5 结 论

(1)FIT 阵列流动成像采用多个阵列电阻和阵列光纤探头测量井筒截面上垂直方向的持率,克服了常规单个探头测量值代表井筒截面持率总体效应的缺陷,对于水平及近水平井中由于重力影响造成的油气水三相分布出现各向异性有较好的应用效果.

(2)分别用三种插值算法重建井筒过流截面油气水分布图像,重建结果表明:在完全水平井中,高斯径向基函数插值在计算持水率时更为准确,克里金插值算法计算出的持气率更接近真实值.

(3)阵列仪器虽然能用于测量全井筒的各相分布情况,但是受仪器本身尺寸的影响,各个探针的井筒覆盖率未能达到百分百,基于此,本研究用高密度截面分割法实现了水平井油气水三相的三维持率成像,并发现其能反映井筒中的流体分布状态.

(4)建议后续结合机器学习自动识别流型,并进一步结合数据特征探索由机器学习驱动的非参数插值方法,以提升插值精度与稳健性,提高对井筒中流体的可视化精度.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Chen M, Xie W F, Zhang Y, *et al*. 2023. Methods and application for water holdup calculation and flowing image based on array electromagnetic wave instrument in horizontal water-oil wells. Petroleum Reservoir Evaluation and Development (in Chinese), 13(4): 505-512, 518, doi: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.04.012.

Cui S F, Liu J F, Li K, *et al*. 2021. Data analysis of two-phase flow simulation experiment of array optical fiber and array resistance probe. Coatings, 11(11): 1420, doi: 10.3390/coatings11111420.

Cui S F. 2022. Research on simulation experiment and interpretation method of horizontal well array flow imager[Master's thesis] (in Chinese). Jingzhou: Yangtze University, doi: 10.26981/d.cnki.gjhsc.2022.000082.

Dai J C, Guo H M, Liu H, *et al*. 2010. The flow imaging algorithm study on logging data of capacitor array tool. Well Logging Technology (in Chinese), 34(1): 27-30, doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2010.01.001.

Deendarlianto, Hudaya A Z, Indarto, *et al*. 2019. Wetted wall fraction of gas-liquid stratified co-current two-phase flow in a horizontal pipe with low liquid loading. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 70: 102967, doi: 10.1016/j.jngse.2019.102967.

Guo H M, Wu Y Y. 2025. Application of gas array tool and inverse distance weighting algorithm in evaluation and imaging of gas holdup in gas-water two-phase flow in horizontal well. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 60(4): 958-965, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.20240350.

Hu H F, Liu J F, Fu R, *et al*. 2022. Data analysis and model establishment of oil-water two-phase in vertical well based on array probe combination instrument. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(4): 1732-1741, doi: 10.6038/pg2022GG0114.

Keskin C, Zhang H Q, Sarica C. 2007. Identification and classification of new three-phase gas/oil/water flow patterns. //SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Anaheim, California, USA: Society of Petroleum Engineers.

Li H T, Shao Z D. 2019. Review of spatial interpolation analysis algorithm. Computer Systems & Applications (in Chinese), 28(7): 1-8, doi: 10.15888/j.cnki.csa.006988.

Li L, Ma C X, Zhang C L, *et al*. 2024. Research on production transformation technology for deep tight sandstone gas reservoirs in Xinjiang Oilfield. China Energy and Environmental Protection (in Chinese), 46(7): 150-155, doi: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2024.07.023.

Li W X, Song L, Xi C M, *et al*. 2021. Drilling and completion technology for horizontal well with ultra-long horizontal section in tight conglomerate reservoir of Xinjiang Mahu oilfield. Xinjiang Oil & Gas (in Chinese), 17(4): 86-91.

Liu J F, Guo H M, Wang J Y, *et al*. 2010. Experimental study on flow patterns of oil-gas-water three-phase flow in large-diameter horizontal tubing. Journal of Oil and Gas Technology (in Chinese), 32(4): 87-91.

Liu J F, Xu Y Z, Wu Q X. 2018. Holdup flow imaging analysis for capacitance and resistance ring array probes. Progress in Geophysics (in Chinese), 33(5): 2141-2147, doi: 10.6038/pg2018BB0431.

Liu W H, Guo L J, Cheng K H, *et al*. 2006. Characteristics of oil-gas-water three-phase flow pattern in horizontal and slightly inclined pipes. Acta Petrolei Sinica (in Chinese), 27(3): 120-125.

Lu G Y, Wong D W. 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. Computers & Geosciences (in Chinese), 34(9): 1044-1055.

Meng X. 2019. Imaging of oil-water two-phase flow in horizontal wells based on MAPS [Master's thesis] (in Chinese). Jingzhou: Yangtze University, 1-72, 74-83.

Ni G J, Zheng X X. 2004. Application of a new model multiple phase holdup logging instrument in horizontal well——Capacitance array multiple phase holdup logging instrument (CAT). Well Testing (in Chinese), 13(4): 86-89, 109-110.

Qi J B. 2007. Numerical and experimental investigation on oil-gas-water three phase flow in horizontal straight tubes [Master's thesis] (in Chinese). Qingdao: China University of Petroleum (East China).

Qin H, Dai J C, Qin M J, *et al*. 2017. Experimental study on oil-water two-phase flow array water holdup tool in horizontal well. Well Logging Technology (in Chinese), 41(6): 637-641, 647, doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2017.06.002.

Shang J Q, Song H W, Qin T, *et al*. 2026. Research on the characteristics of gas-water two-phase flow in high temperature and high pressure horizontal wells and the interpretation method of production profile. Progress in Geophysics (in Chinese) 1-17, https://link.cnki.net/urlid/11.2982.p.20260708.1709.030.

Song H W, Guo H M. 2016. Analysis on imaging interpolation algorithm for logging data of water holdup array tool in horizontal wells. Journal of Oil and Gas Technology (in Chinese), 38(1): 24-32.

Stapelberg H H, Mewes D. 1994. The pressure loss and slug frequency of liquid-liquid-gas slug flow in horizontal pipes. International Journal of Multiphase Flow, 20(2): 285-303.

Su H, Lei Z D, Zhang D Q, *et al*. 2018. Volume fracturing parameters optimization of horizontal well in tight reservoir. Lithologic Reservoirs (in Chinese), 30(4): 140-148.

Wang C R, Liu C H, Song Y, *et al*. 2021. Gas production profile logging technology of horizontal well with MAPS array imaging and its application in Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area. Natural Gas Industry (in Chinese), 41(S1): 94-99, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.S1.013.

Wang W X, Jin Y, Sun T, *et al*. 2020. Numerical simulation of characteristics of oil-gas-water three-phase flow in different dip angle fluctuating tubes. //The 30th International Ocean and Polar Engineering Conference. Virtual.

Yang R Q, Liu J F, Li M, *et al*. 2025. Simulation experiment and interpretation research of gas-water two-phase horizontal well array imaging instrument. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(3): 1163-1174, doi: 10.6038/pg2025II0397.

Zhang J R, Zhong Z, Yang K. 2023. Safe and efficient casing running technology for tight conglomerate oil horizontal well in an oilfield in Xinjiang. Yunnan Chemical Technology (in Chinese), 50(2): 145-149, doi: 10.3969/j.issn.1004-275X.2023.02.37.

Zhang L J. 1998. Recent advances in research on oil-gas-water three-phase flow regimes overseas. Oil-Gas Field Surface Engineering (in Chinese), (4): 6-8, 16.

附中文参考文献

陈猛, 谢韦峰, 张煜, 等. 2023. 水平井油水两相流阵列电磁波持水率计算方法及应用. 油气藏评价与开发, 13(4): 505-512, 518, doi: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.04.012.

崔帅飞. 2022. 水平井阵列流动成像仪模拟实验及解释方法研究[硕士论文]. 荆州: 长江大学, doi: 10.26981/d.cnki.gjhsc.2022.000082.

戴家才, 郭海敏, 刘恒, 等. 2010. 电容阵列仪测井资料流动成像算法研究. 测井技术, 34(1): 27-30, doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2010.01.001.

郭海敏, 吴玉燕. 2025. 阵列式持气率计和反距离加权算法在水平井气—水两相流持气率评价与成像中的应用. 石油地球物理勘探, 60(4): 958-965, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.20240350.

胡海峰, 刘军锋, 付瑞, 等. 2022. 基于阵列探针组合仪的垂直井油水两相数据分析与模型建立. 地球物理学进展, 37(4): 1732-1741, doi: 10.6038/pg2022GG0114.

李海涛, 邵泽东. 2019. 空间插值分析算法综述. 计算机系统应用, 28(7): 1-8, doi: 10.15888/j.cnki.csa.006988.

李磊, 马春祥, 张传亮, 等. 2024. 新疆油田深层致密砂岩气藏增产改造工艺技术研究. 能源与环保, 46(7): 150-155, doi: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2024.07.023.

李维轩, 宋琳, 席传明, 等. 2021. 新疆玛湖油田致密砾岩超长水平段水平井钻完井技术. 新疆石油天然气, 17(4): 86-91.

刘军锋, 郭海敏, 王界益, 等. 2010. 大管径水平管油气水三相流流型试验研究. 石油天然气学报, 32(4): 87-91.

刘军锋, 许亚重, 吴沁轩. 2018. 电容和电阻环形阵列探头的持率流动成像分析. 地球物理学进展, 33(5): 2141-2147, doi: 10.6038/pg2018BB0431.

刘文红, 郭烈锦, 程开河, 等. 2006. 水平及微倾斜管内油气水三相流流型特性. 石油学报, 27(3): 120-125.

孟鑫. 2019. 基于 MAPS 的水平井油水两相流成像研究[硕士论文]. 荆州: 长江大学, 1-72, 74-83.

倪国军, 郑雪祥. 2004. 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). 油气井测试, 13(4): 86-89, 109-110.

齐建波. 2007. 水平管油气水三相流动特性模拟和实验研究[硕士论文]. 青岛: 中国石油大学(华东).

秦昊, 戴家才, 秦民君, 等. 2017. 低产水平井油水两相流阵列持水率计实验研究. 测井技术, 41(6): 637-641, 647, doi: 10.

16489/j.issn.1004-1338.2017.06.002.

尚家琦, 宋红伟, 秦通, 等. 2026. 高温高压水平井气水两相流动特征及产出剖面解释方法研究. 地球物理学进展, 1-17, https://link.cnki.net/urlid/11.2982.p.20260708.1709.030.

宋红伟, 郭海敏. 2016. 水平井阵列持水率测井资料成像插值算法分析. 石油天然气学报, 38(1): 24-32.

苏皓, 雷征东, 张荻萩, 等. 2018. 致密油藏体积压裂水平井参数优化研究. 岩性油气藏, 30(4): 140-148.

王成荣, 刘春辉, 宋煜, 等. 2021. MAPS 阵列成像水平井产气剖面测井技术及其应用——以昭通国家级页岩气示范区为例. 天然气工业, 41(S1): 94-99, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.S1.013.

杨荣琦, 刘军锋, 黎明, 等. 2025. 气水两相水平井阵列成像仪模拟实验及解释研究. 地球物理学进展, 40(3): 1163-1174, doi: 10.6038/pg2025II0397.

张津瑞, 钟震, 杨凯. 2023. 新疆某油田致密砾岩油水平井安全高效下套管技术. 云南化工, 50(2): 145-149, doi: 10.3969/j.issn.1004-275X.2023.02.37.

章龙江. 1998. 国外油气水三相流流动形态研究的最新进展. 油气田地面工程, (4): 6-8, 16.