

引用格式: 陈猛, 谢韦峰, 张煜, 等. 水平井油水两相流阵列电磁波持水率计算方法及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(4): 505-512.  
CHEN Meng, XIE Weifeng, ZHANG Yu, et al. Methods and application for water holdup calculation and flowing image based on array electromagnetic wave instrument in horizontal water-oil wells[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 505-512.  
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.04.012

## 水平井油水两相流阵列电磁波持水率计算方法及应用

陈猛<sup>1</sup>, 谢韦峰<sup>1</sup>, 张煜<sup>2</sup>, 杨国锋<sup>1</sup>, 刘向君<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500;  
2. 中国石油青海油田分公司钻采工艺研究院, 甘肃 敦煌 736202)

**摘要:** 准确求取水平井多相流持水率和反演井筒流体分布是揭示水平井开发动态的关键基础, 以国产阵列电磁波持水率计为切入点开展研究, 在对比分析现有阵列持水率定量计算方法基础上, 提出了一种基于阵列探头径向投影中点切分面积计算持水率方法, 同时对比建立了水平井筒油水两相流高、中、低含水率条件流体介质分布反演方法。研究表明, 新方法计算水平井持水率平均绝对误差为 4.43%, 相对误差为 16.34%, 明显优于目前采用的权系数法和径向等高面积法; 同时, 高、中、低含水条件水平井筒流体分布反演以高斯径向基函数法和多元线性法最为匹配, 研究成果为矿场水平井多相流生产动态评价奠定基础。

**关键词:** 水平井; 油水两相; 阵列电磁波持水率; 阵列持水率计算; 流动成像

中图分类号: TE33

文献标识码: A

### Methods and application for water holdup calculation and flowing image based on array electromagnetic wave instrument in horizontal water-oil wells

CHEN Meng<sup>1</sup>, XIE Weifeng<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>2</sup>, YANG Guofeng<sup>1</sup>, LIU Xiangjun<sup>1</sup>

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Drilling and Production Technology Research Institute of Qinghai Oilfield Company, Dunhuang, Gansu 736202, China)

**Abstract:** The accurate calculation of the water holdup and the inversion of fluid distribution for multi-phase flow play a crucial role in understanding the development performance in horizontal wells. This study builds upon the array electromagnetic wave holdup instrument and proposes a novel method for calculating water holdup. The method is based on the weight of the mid-point tangential area of the probe's radial projection. Additionally, inversion methods for oil-water phase distribution in horizontal wells, considering high, middle, and low water content, were developed by comparing them with existing quantitative calculation methods of the array holdup instrument. The results demonstrated that the new method exhibited an average absolute error of 4.43% and relative errors of 16.34%. These values were significantly better than those obtained using the weight coefficient method and the radial contour area method. For the inversion of fluid distribution in horizontal wells with high, middle, and low water cut conditions, the Gaussian Radial Basis method and multivariate linear method provided the best matches. This research lays a solid foundation for evaluating the production performance of multi-phase flow in horizontal wells.

**Keywords:** horizontal well; water and oil phase; array electromagnetic wave water holdup; array water holdup calculation methods; flowing image

随着非常规油气藏勘探开发的逐步深入, 国内 外非常规油气田多采用水平井方式开发, 在有效提 升油藏动用程度的前提下, 水平井段各开发小层生 产动态信息成为指导油气田开发方案优化及调整的

收稿日期: 2022-01-10。

第一作者简介: 陈猛(1986—), 男, 博士后, 副研究员, 主要从事生产测井与油气藏生产动态评价相关方法、原理和应用研究。地址: 四川省成都市新都区新都大道8号, 邮政编码: 610500。E-mail: chenmengyzu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金“致密油储层孔隙尺度注水吞吐油水两相渗流机理研究”(41804141); 油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金“致密气藏孔隙尺度多因素耦合作用渗吸机理研究”(PLN201933); 中国博士后科学基金“多因素耦合作用的致密油储层孔隙尺度动态渗吸机理研究”(2018M643565)。

关键基础,而持水率是准确求取各产层油气水产量的重要参数之一。

不同于常规直井油气水多相流动,水平井筒内多相流体性质差异使得各相流体之间存在明显的重力分异现象,多相流体流动特征复杂,致使常规直井采用的产出剖面测井仪器并不适用于水平井<sup>[1-3]</sup>。目前,水平井内持水率监测以阵列仪器为主<sup>[4-6]</sup>,国外代表性的有 Schlumberger 公司的流体成像扫描仪 FSI, Sondex 公司的阵列电容持水率仪(CAT)和阵列电阻持水率仪(RAT), Hunter 公司的阵列电阻持水率计(AFR)等,对应的持水率监测原理均采用基于流体介电常数差异的电容法<sup>[7]</sup>、射频法<sup>[8]</sup>或电阻率差异的电阻法<sup>[9-10]</sup>。实际矿场应用表明电容法持水率计多适用于低含水条件<sup>[11-13]</sup>,而电阻法持水率计多适用于中、高含水条件<sup>[14]</sup>,受流速影响明显。相比而言,国产阵列电磁波持水率计利用电磁波在流体介质中的传播特性来确定多相流体的持水率,在高含水率时有较高的分辨率和灵敏度,对于目前我国油田高含水情况有很好的适用性,较好克服了电容法和电导法持水率仪测量范围不足的缺点<sup>[15-20]</sup>,同时能有效克服井下流体矿化度和温度影响<sup>[21]</sup>。

针对水平井多相流生产动态评价,在准确获取阵列探头监测信息的前提下,关键是基于阵列资料的定量处理解释及井筒流体分布特征反演。目前水平井内阵列探头资料计算井筒持水率方法主要有平均值法<sup>[22]</sup>、分层界面法<sup>[23]</sup>、成像插值法<sup>[24]</sup>、权系数法<sup>[25]</sup>、径向等高面积法<sup>[26]</sup>。研究表明,极低流量时分层界面法计算持水率精度最高;低流量时平均值法和分层界面法都有较好效果,平均值法略优于分层界面法<sup>[22,27]</sup>。针对水平井筒多相流特征反演,除对监测仪器的改进升级外<sup>[28]</sup>,最主要的是基于阵列监测资料的反演方法建立<sup>[29]</sup>。戴家才等<sup>[30]</sup>在阵列电容持水率计(CAT)成像中引入反比例插值算法,但未考虑流量、含水、井斜的影响,后引入高斯径向基函数通过在横向和纵向设置不同的系数消除井斜影响,实现基于 CAT 响应的流体分布反演。董勇等<sup>[31-32]</sup>通过考虑仪器旋转引入校正系数改进了高斯权重成像算法并结合最优化方法确定了校正系数,后针对水平井油水两相流动提出了界面附近区域局部插值的成像算法。

研究表明,建立准确的水平井阵列持水率定量计算和流体分布反演方法,是指导水平井生产动态

准确、直观评价的关键基础。在国内外水平井动态监测评价研究的基础上,针对国产阵列电磁波持水率测井仪(EAT,耐温 170 °C,耐压 80 MPa,相移检测精度 0.1°)提出了一种基于阵列探头的径向投影中点切分面积权重计算持水率方法,对比建立了水平井筒油水两相流高、低含水条件流体分布反演方法,为水平井、大斜井阵列电磁波持水率测井资料准确定量评价奠定基础。

## 1 阵列电磁波持水率计算方法

阵列电磁波持水率仪通过仪器测量局部持水率来计算整个井筒横截面的持水率,以 12 个持水率探头的测量值来计算井筒持水率值。针对目前持水率计算 5 种方法<sup>[23,27]</sup>,对比其优缺点及适用条件如表 1 所示。

水平井产出剖面测井过程中,仪器自身旋转会造成不同深度探头相对位置发生变化,探头响应值对平均持水率贡献权重亦发生相应变化。对水平井油水两相流而言,由于水相密度明显高于油相,油水在重力作用下发生分异,层流条件纵向剖面上同一水平高度流体性质相同。图 1 为径向等高面积法探头分布示意图,井筒横截面最高点和最低点权重最小,井筒中部的权重最大。以径向高度进行距离 5 等分,最高点与最低点被赋予的权重过大。最理想情况是根据探头位置将井筒截面进行细化,但径向等高面积法细化后将存在某一区域仪器旋转无探头的情形,出现无效区域。

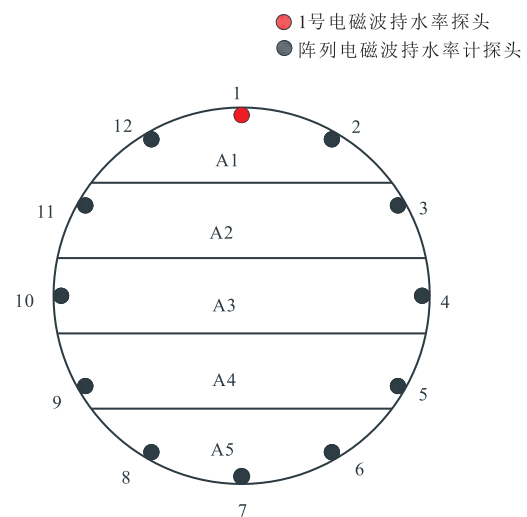


图1 径向等高面积法

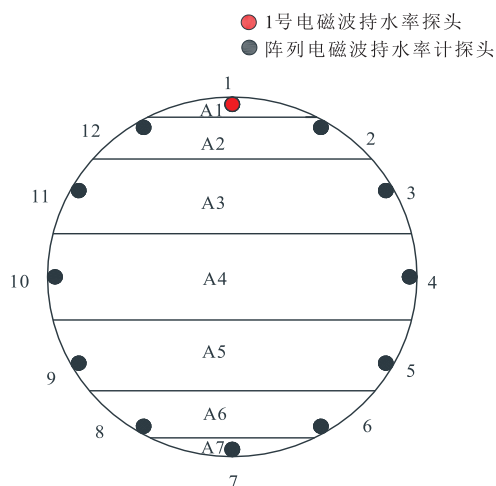
Fig. 1 Radial contour area method

表1 持水率计算方法比较  
Table 1 Comparison of different water holdup calculation methods

计算方法	表达式	优点	适用范围
平均插值法	$Y_w = \sum_{i=1}^{12} Y_{wi} / 12$	简洁,高效,只考虑持水率探头测量值	层流,适用于低流量
分层界面法	$Y_w = \frac{\arccos(1 - n/6) - (1 - n/6)\sqrt{n/3 - n^2/36}}{\pi}$	考虑油水分界面影响,适用于大斜井、水平井	层流,适用于低流量
成像法	式(5)一式(8)	直观反映流体分布状态	精确度与成像算法有关
权系数法	$Y_w = \sum W_i Y_{wi}$	考虑权重与探头距离、顶部距离有关	层流
径向等高面积法	A1:A2:A3:A4:A5=0.142:0.231:0.253:0.231:0.142	准确度与面积细分程度和划分方式有关	层流

注: $Y_w$ 为水平井筒持水率; $Y_{wi}$ 为阵列探头*i*监测得到的持水率; $n$ 为位于全油中传感器的个数; $W_i$ 为探头*i*的权系数; $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ 为井筒横截面切分后各区域面积,单位 $m^2$ 。

研究在面积权重基础上,通过优化提出按两点之间垂直距离中点进行划分的径向投影中点切分面积法(图2),区域A1边界为1号探头与2号探头之间垂直高度的中点,区域A2为A1下边界到2号探头与3号探头垂直高度的中点。以此类推,共将水平管横截面积划分为7个区域,越靠近中点其面积权重也就越大,2种面积法的具体权重比值见表2。当仪器旋转后,重新以探头垂直高度中点划分依旧能保证划分区域的有效性(图3、图4)。仪器旋转一定角度后,原有的以高度平均的面积法存在部分区域没有包含探头,该部分面积将无法计算持水率(图3),而以中点划分的方式(图4),在已知旋转角度后,以相邻点垂直高度中点继续细分面积区域,采用微积分算出各个面积大小,进行比值得到各部分权重。对应权重计算方法见式(1)一式(4),根据图4所示,仪器相对方位角为 $\theta$ ,井筒内半径为*R*,考虑12个探头平均分布



注: $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ 、 $A_6$ 、 $A_7$ 为井筒横截面切分后各区域面积,单位 $m^2$ 。

图2 径向投影中点切分面积法

Fig. 2 Radial projection midpoint tangent area method

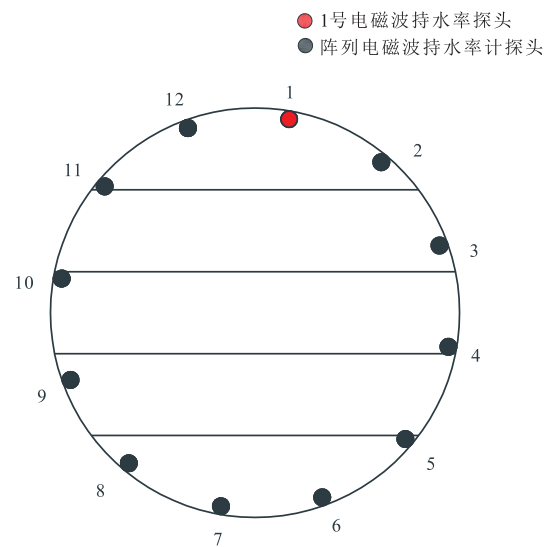
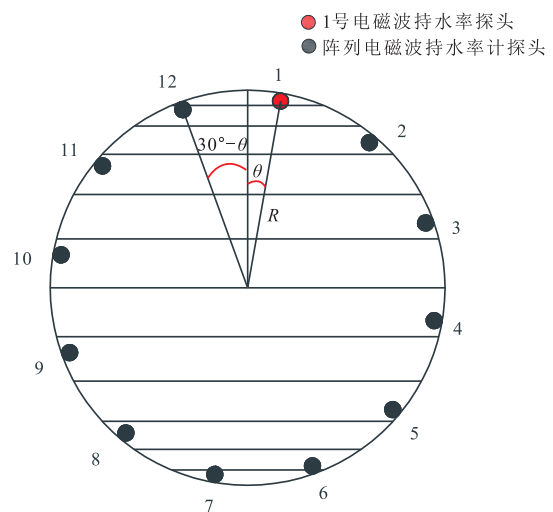


图3 径向等高面积法(仪器旋转后)

Fig. 3 Radial contour area method (after instrument rotation)



注: $R$ 为井筒内半径,单位m; $\theta$ 为仪器相对方位角,单位( $^\circ$ )。

图4 径向投影中点切分面积法(仪器旋转后)

Fig. 4 Radial projection midpoint tangent area method (after instrument rotation)

在井筒内部,探头与探头间应为 30°,仪器旋转后产生  $\theta$  的相对方位角,此时每个探头角度在原有基础上增加  $\theta$ 。此时探头角度:1号:2号:3号:4号:5号:6号:7号:8号:9号:10号:11号:12号= $\theta:(30^\circ+\theta):(60^\circ+\theta):(90^\circ+\theta):(120^\circ+\theta):(150^\circ+\theta):(180^\circ+\theta):(210^\circ+\theta):(240^\circ+\theta):(270^\circ+\theta):(300^\circ+\theta):(330^\circ+\theta)$ 。则有,

1号探头径向投影:

$$r_1=R\cos\theta \quad (1)$$

12号探头径向投影:

$$r_{12}=R\cos(330^\circ+\theta)=R\cos(30^\circ-\theta) \quad (2)$$

1号、12号探头中点:

$$r_{1,12}=(r_1+r_{12})/2 \quad (3)$$

以井筒剖面圆心为圆点,对1号探头所在区域进行面积积分:

$$S_1=\int_R^{r_{1,12}}\left[\left(\sqrt{R^2-y^2}\right)-\left(-\sqrt{R^2-y^2}\right)\right]dy \quad (4)$$

式(1)一式(4)中: $R$ 为井筒内半径,单位m; $\theta$ 为仪器相对方位角,单位( $^\circ$ ); $r_1$ 为1号探头径向投影位置到井筒中心距离,单位m; $r_{12}$ 为12号探头径向投影位置到井筒中心距离,单位m; $r_{1,12}$ 分别为1号、12号探头径向投影位置中点,单位m; $S_1$ 为1号探头所占区域面积,单位 $m^2$ ; $y$ 为积分区域纵轴距离,单位m。

同理得到各个探头径向投影中点所划分的面积,将各部分面积与总面积相比求得各探头权重(表2)。

综合5种持水率算法,基于不同含水率条件测量计算得到12个探头持水率值进行井筒持水率计算(表3)。对比表明,径向投影中点切分面积法和权系数法计算得到的持水率与井筒真实情况较为接近,总体平均相对比误差分别为16.3%,21.2%,在持水率高于70%和低于30%条件下径向投影中点切分面积法要优于权系数法。径向等高面积法整体精确度低于径向投影中点切分面积法;分层界面法计算的持水率在高含水条件已完全偏离了井筒实际情况,不能用于持水率定量计算;平均插值法作为最为简洁的计算方法,因其未考虑探头分布位置影响,计算相对误差整体偏高(图5)。

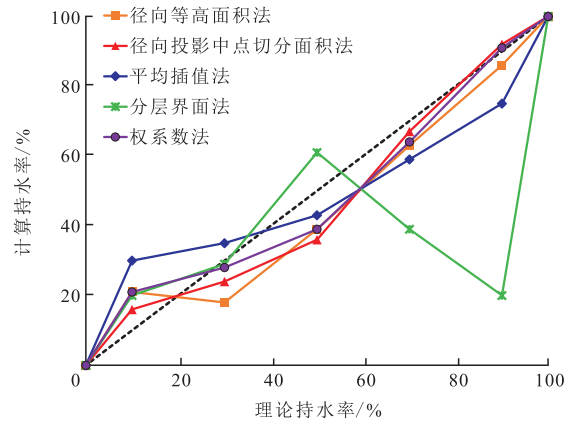


图5 5种持水率计算方法对比

Fig. 5 Comparison of five water holdup calculation methods

表2 2种面积法的权重系数

Table 2 Coefficient for two area methods of water holdup calculation

面积法	权重
径向等高面积法	A1:A2:A3:A4:A5=0.142:0.231:0.253:0.231:0.142
径向投影中点切分面积法	A1:A2:A3:A4:A5:A6:A7=0.011:0.075:0.250:0.327:0.250:0.075:0.011

表3 5种持水率计算方法结果对比

Table 3 Calculation results of five different water holdup calculation methods

理论持水率	径向等高面积法		径向投影中点切分面积法		平均插值法		分层界面法		权系数法	
	计算值	相对误差	计算值	相对误差	计算值	相对误差	计算值	相对误差	计算值	相对误差
100	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0
90	86	4.4	92	2.2	75	16.7	20	77.8	91	1.1
70	63	10.0	67	4.2	59	15.7	39	44.3	64	8.6
50	39	22.0	36	28.0	43	14.0	61	22.0	39	22.0
30	18	40.0	24	20.0	35	16.7	29	3.3	28	6.7
10	21	110.0	16	60.0	30	200.0	20	100.0	21	110.0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
平均		26.6		16.3		37.6		35.3		21.2

## 2 阵列电磁波持水率流动成像方法

水平井筒多相流流动成像反演的实质是基于阵列持水率监测资料的空间插值,基于阵列电磁波持水率计12个探头的持水率响应值,对比分析多元线性插值法、距离反比加权插值法、高斯径向基函数插值法以及克里金插值法进行反演成像。

1) 多元线性法。考虑了横向和纵向的影响,认为持水率为 $x, y$ 方向的线性函数<sup>[24]</sup>。

$$Y(x_i, y_i) = mx_i + ny_i + e \quad (i=1, 2, \dots, 12) \quad (5)$$

式中: $m, n, e$ 为回归系数; $i$ 为探头编号。

2) 距离反比加权法。根据空间自相关性,在空间上点越靠近其值就越接近,距离越近其插值的权重就越大。权系数只与距离有关,并未考虑流体流动特征,结果误差较大。但其算法较为简洁,效率最高,有一定适用性。

$$Y_{wp} = \frac{\sum_{i=1}^{12} r_i^2 Y_{wi}}{\sum_{i=1}^{12} r_i^2} = \frac{r_1^2 Y_{w1} + r_2^2 Y_{w2} + \dots + r_{12}^2 Y_{w12}}{r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_{12}^2} \quad (6)$$

式中: $Y_{wp}$ 为待测 $p$ 点的持水率; $Y_{wi}$ 为第 $i$ 个( $i=1 \sim 12$ )探头测量得到的持水率; $r_i$ 为待测 $p$ 点到已知持水率探头的距离,单位 $m$ 。

3) 高斯径向基函数法。将已知点与待测点的

关系从反比例关系改进为负指数关系,认为已知12个探头响应值与待测点的距离的负指数有关。

$$\lambda_i = e^{-\left[ \left( \frac{x_0 - x_i}{m} \right)^2 - \left( \frac{y_0 - y_i}{n} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

式中: $\lambda_i$ 为第 $i$ 个探头的权重; $x_0, y_0$ 为待插值点的坐标; $m, n$ 为水平垂直方向的控制系数。

4) 克里金法。通过引进以距离为自变量的变差函数来计算权值,其权系数不仅与插值点到测量点的距离有关,还与测量点的测量值有关。

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[ Y(x_i, y_i) - Y(x_{i+h}, y_{i+h}) \right]^2 \quad (8)$$

式中: $\gamma^*(h)$ 为步长为 $h$ 时的实验变差函数; $N(h)$ 为步长为 $h$ 时探头个数; $Y(x_i, y_i)$ 为 $i$ 号探头的持水率; $Y(x_{i+h}, y_{i+h})$ 为距离 $i$ 号探头 $h$ 步长的探头持水率。

各方法优缺点对比如表4所示。

结合4种插值算法对高、中、低含水条件(表5)井筒流体分布进行反演,基于提出的径向投影中点切分面积法计算得到高、中、低条件持水率为0.975、0.309、0.023反演得到3组不同方法条件下成像图(表6)。

各反演方法对比如表7所示,分析表明:阵列电磁波成像结果显示高含水和中含水时多元线性法在水平井中的成像效果优于其余3种;低含水时高斯径向基函数法在水平井中的成像效果优于其余3种;距

表4 4种井筒流体分布反演方法对比

Table 4 Comparing of four different inversion methods for fluid distribution

反演算法	原理	优点
多元线性法	持水率是 $x, y$ 方向的线性函数	高含水、中含水有较好层界面识别效果
距离反比加权法	与距离呈反比例关系	高含水成像均匀,低含水时效果较差
高斯径向基函数法	与距离呈指数关系	低含水时成像效果优于其他3种方法
克里金法	与距离呈变差函数关系	低含水时成像效果略低于高斯径向基函数法

表5 高、中、低含水条件阵列电磁波持水率探头测量的持水率值

Table 5 Water content values measured by electromagnetic wave water holding probes under different water content conditions

探头	高含水	中含水	低含水	探头	高含水	中含水	低含水
1	1.00	0.13	0	7	0.48	0.58	0
2	1.00	0.25	0	8	1.00	0.20	0
3	1.00	0.60	0	9	0.97	0.28	0
4	1.00	0.30	0	10	1.00	0.02	0
5	1.00	0.53	0.25	11	1.00	0.02	0
6	0.22	0.60	0.04	12	1.00	0	0

离反比加权法只考虑了距离对结果的影响,并未考虑流体的流动特征,反演成像对套管中流体分布的反映效果较差;克里金法和高斯径向基函数法成像结果较为相似,但低含水时成像效果比高斯径向基函数法差。

### 3 实例与分析

GP8为店子作业区内一口水平采油井,2012年11月18日投产,目前日产液量为 $7.96\text{ m}^3$ ,日产油量为 $1.89\text{ t}$ ,含水率为 $72.1\%$ ,动液面为 $626\text{ m}$ 。测试未

表6 不同含水条件流体分布反演效果对比  
Table 6 Comparison of fluid inversion results under different water content

反演方法	高含水 ( $C_w \geq 70\%$ )	中含水 ( $30\% \leq C_w < 70\%$ )	低含水 ( $C_w < 30\%$ )
多元线性法			
距离反比加权法			
高斯径向基函数法			
克里金法			

注: $C_w$ 为含水率,单位%;红色代表纯油,蓝色代表纯水。

抽吸,采用 $57\text{ mm}$ 阵列电磁波持水率测井仪器测量其水平段,各电磁波持水率探头刻度值如表8所示。通过对该井进行处理计算得到水平段各探头局部持水率如图6所示(从左至右第5道对应阵列探头持水率),同时反演得到该井水平段油水两相流体分布,图6中从左至右第6至8道为反演得到的井筒水平段流体分布,其中第6道井周流体分布为将井筒流体沿井圆周曲面展开得到油水分布图,第7道半圆周流体分布为将井筒流体沿半圆周曲面并筒展开得到油水分布图,第8道径向流体分布为沿井筒垂直中心位置油水分布图,从成像图中可以看出,GP8井水平段为较为规则油水两相层流,井筒流体呈现油少水多高含水特征。图6中第9道井筒持水率为采用不同方法计算得到的井筒水平段持水率,以全流量层介于 $1\ 800 \sim 1\ 830\text{ m}$ 为例,对比发现,半圆周平均法计算得到的水平段持水率介于 $0.433 \sim 0.457$ ,平均值为 $0.450$ ;采用加权平均和井筒周向平均法计算得到的持水率介于 $0.529 \sim 0.535$ ,平均值为 $0.531$ ;而采用径向投影中点切分面积法计算得到的持水率介于 $0.681 \sim 0.688$ ,平均值为 $0.684$ ,与井口实际生产动态更为匹配。

### 4 结论

针对水平井阵列电磁波持水率仪监测资料的持水率计算及成像研究,得出以下结论:

1) 油水两相性质差异使得水平井内持水率准确监测需借助阵列持水率测井仪,基于阵列持水率测井仪监测资料计算平均持水率需考虑阵列探头空间分布特征,进而建立对应的定量评价方法。

2) 对比提出的径向投影中点切分面积法和现有4种持水率计算方法,研究表明径向投影中点切分面积法精度最高,计算水平井油水两相持水率平均绝对误差为 $4.43\%$ ,平均相对误差为 $16.34\%$ ,满足矿场水平井生产动态评价需求。

表7 高、中、低含水率成像算法对比  
Table 7 Comparing different imaging methods in different water content

成像算法	高含水	中含水	低含水
多元线性法	分层界面较清晰	分层界面较清晰	识别效果不明显
距离反比加权法	出现“牛眼”现象	分布相对均匀	出现“牛眼”现象
高斯径向基函数法	削弱油相分布	层界面波动	油水分层界面明显
克里金法	分层界面弯曲,能反映油相流体	成像结构相对均匀	界面弯曲程度大于高斯径向基法,整体均匀

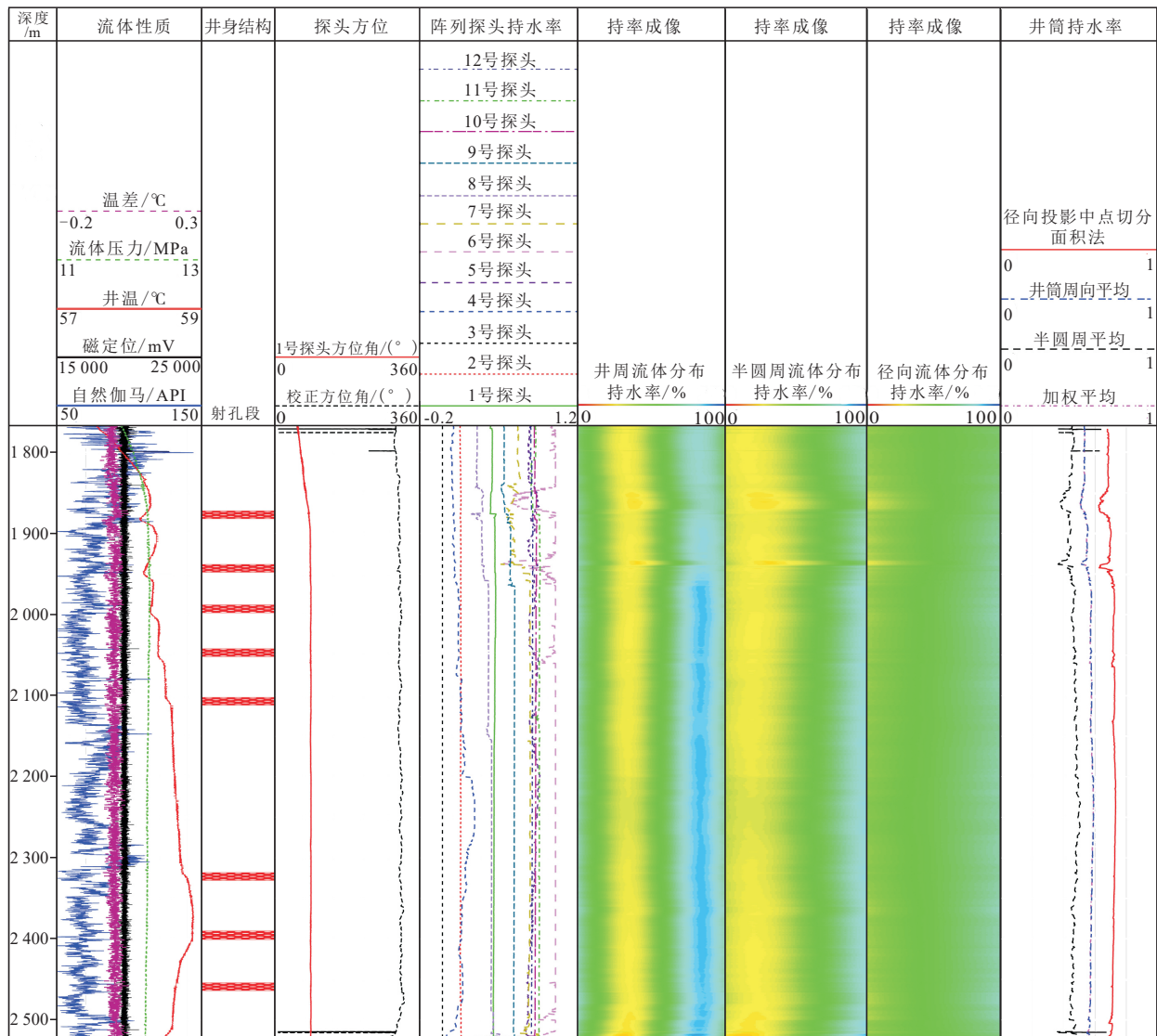


图6 GP8井水平段阵列持水率测井成像

Fig. 6 Flowing image of Well-GP8 in horizontal segment

表8 阵列电磁波持水率探头刻度值

Table 8 Value of the electromagnetic wave water retention probe

介质	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	9号	10号	11号	12号
气	7 793	8 217	7 877	7 952	8 290	8 166	8 094	7 924	7 840	7 956	8 039	7 924
油	9 693	10 117	9 777	9 852	10 190	10 066	9 994	9 824	9 740	9 856	9 939	9 824
水	20 382	19 227	21 247	21 267	19 042	18 270	19 433	21 446	22 593	21 983	19 987	21 227

3) 综合比较4种成像计算方法,中、高含水条件多元线性法的成像效果优于其他3种方法,低含水条件高斯径向法效果最好,可根据井下含水率选择合适的反演方法来表征水平井油水两相流体介质分布特征。

参考文献

[1] 宋红伟,郭海敏,郭帅,等.水平井油水两相分层流分相流量测量方法[J].石油勘探与开发,2020,47(3): 573-582.

SONG Hongwei, GUO Haimin, GUO Shuai, et al. Partial phase flow rate measurements for stratified oil-water flow in horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 573-582.

[2] 邱德家,毛军,张同义,等.涪陵页岩气水平井产出剖面测试技术分析与应用[J].测井技术,2016,40(6): 731-735.

DI Dejia, MAO Jun, ZHANG Tongyi, et al. Production profile testing analysis and its application in Fuling shale gas

- horizontal wells[J]. Well Logging Technology, 2016, 40(6): 731-735.
- [3] 林日亿, 于程浩, 杨恒林, 等. 超深水平井钻井液循环温度场模拟计算与分析[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(3): 91-97.  
LIN Riyi, YU Chenghao, YANG Henglin, et al. Temperature field simulation and analysis of drilling fluid circulation in super deep horizontal wells [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2022, 51(3): 91-97.
- [4] 庞伟, 邸德家, 张同义, 等. 页岩气井产出剖面测井资料分析及应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 700-706.  
PANG Wei, DI Dejia, ZHANG Tongyi, et al. Analysis and application of production logging data in shale gas well[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 700-706.
- [5] TRALLERO J L. Oil-water flow patterns in horizontal pipes[D]. Tulsa: The University of Tulsa, 1995: 112-126.
- [6] TRALLERO J L. A study of oil-water flow patterns in horizontal pipes[J]. SPE Production & Facilities, 1997, 12(3): 165-172.
- [7] WEI Y, YU H Q, CHEN Q, et al. Measurement of water holdup in oil-water two-phase flows using coplanar microstrip transmission lines sensor[J]. IEEE sensors journal, 2019, 19(23): 11289-11300.
- [8] 张振远, 张兴凯, 王文雄, 等. 油水两相螺旋流状态下射频法测量原油含水率的方法[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(1): 101-107.  
ZHANG Zhenyuan, ZHANG Xingkai, WANG Wenxiong, et al. Water content measurement by radio frequency method under the condition of oil-water two-phase spiral flow[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2021, 50(1): 101-107.
- [9] 胡金海, 刘兴斌, 张玉辉, 等. 阻抗式含水率计及其应用[J]. 测井技术, 1999(S1): 511-514.  
HU Jinhai, LIU Xingbin, ZHANG Yuhui. Impedance type moisture content meter and its application[J]. Well Logging Technology, 1999, 23(S1): 511-514.
- [10] 成云丽. 阵列式电阻持水率仪器研究[D]. 荆州: 长江大学, 2017.  
CHENG Yunli. Research of the array water holdup log tool based on resistance[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2017.
- [11] BURRUS B. Determination of oil and water volumes by the capacitance method[C]// Paper SPE-1373-MS presented at the SPE Automation Symposium, Hobbs, New Mexico, April 1966.
- [12] RYAN N D, HAYES D. A new multiphase holdup tool for horizontal wells[C]// Paper SPWLA-2001-V presented at the SPWLA 42nd Annual Logging Symposium, Houston, Texas, June 2001.
- [13] 张海博, 郭海敏, 戴家才, 等. 电容阵列仪在大斜度井中的实验研究[J]. 测井技术, 2008, 32(4): 304-306.  
ZHANG Haibo, GUO Haimin, DAI Jiakai, et al. Experimental study of capacitance array imaging logging tool in high angle wells[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(4): 304-306.
- [14] LIU W X, JIN N D, WANG D Y, et al. A parallel-wire microwave resonant sensor for measurement of water holdup in high water-cut oil-in-water flows[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 74(21): 101760.
- [15] 王进旗, 强锡富, 陈建明, 等. 相位法测量油井含水率的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(2): 245-247.  
WANG Jinqi, QIANG Xifu, CHEN Jianming, et al. Phase measurement of water content in oil well[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(2): 245-247.
- [16] 王进旗, 强锡富, 于英华. 基于相位法原油含水率仪的实验研究[J]. 计量学报, 2004, 25(4): 366-368.  
WANG Jinqi, QIANG Xifu, YU Yinghua. Test study of water cut tool in oil well based on phase method[J]. Acta Metrologica Sinica, 2004, 25(4): 366-368.
- [17] 余厚全, 魏勇, 汤天知, 等. 基于同轴传输线电磁波检测油水介质介电常数的理论分析[J]. 测井技术, 2012, 36(4): 361-364.  
YU Houquan, WEI Yong, TANG Tianzhi, et al. Theoretical analysis of measuring dielectric constant of oil-water mixture based on electromagnetic wave on coaxial line[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(4): 361-364.
- [18] 陈强. 电磁波持水率计的电路设计[D]. 荆州: 长江大学, 2012.  
CHEN Qiang. Circuit design of the electromagnetic wave water holdup meter[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2012.
- [19] 魏勇, 余厚全, 鲁保平, 等. 矿化度对电磁波相移法测量原油持水率的影响与校正研究[J]. 长江大学学报(自然版), 2015, 12(7): 30-33.  
WEI Yong, YU Houquan, LU Baoping, et al. The effect of salinity on electromagnetic wave method to measure water holdup of crude oil and correction research[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(7): 30-33.
- [20] 魏勇, 余厚全, 戴家才, 等. 基于CPW的油水两相流持水率检测研究方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6): 1506-1515.  
WEI Yong, YU Houquan, DAI Jiakai, et al. Water holdup measurement of oil-water two-phase flow based on CPW[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6): 1506-1515.
- [21] 谢韦峰, 陈猛, 刘向君, 等. 温度和矿化度对电磁波持水率计响应的影响与校正[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(2): 229-236.  
XIE Weifeng, CHEN Meng, LIU Xiangjun, et al. Impact analysis and correction of the temperature and salinity for electromagnetic wave water holdup meter[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(2): 229-236.
- [22] 秦昊, 戴家才, 秦民君, 等. 低产水平井油水两相流阵列持水率计实验研究[J]. 测井技术, 2017, 41(6): 637-641.  
QIN Hao, DAI Jiakai, QIN Minjun, et al. Experimental study on oil-water two-phase flow array water holdup tool in horizontal well[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(6): 637-641.
- [23] 史航宇, 宋红伟, 郭海敏, 等. 低产水平井油水两相阵列持水率仪数据处理方法比较[J]. 中国科技论文, 2021, 16(1): 12-19.  
SHI Hangyu, SONG Hongwei, GUO Haimin, et al. Comparative study on data processing methods of oil-water two-phase array water holdup instrument in low-yield horizontal well[J]. China Sciencepaper, 2021, 16(1): 12-19.
- [24] 朱绍武, 杨国峰, 戴家才. 水平井阵列持水率仪测井资料成像算法研究[C]. 成都: 油气田勘探与开发国际会议论文集, 2017: 127-134.  
ZHU Shaowu, YANG Guofeng, DAI Jiakai. Research on

- [10] 王磊.牛庄洼陷官17井区沙四段页岩油自悬浮支撑剂压裂试验[J].油气藏评价与开发, 2022, 12(4): 684-689.  
WANG Lei. Self-suspension proppant fracturing test of shale oil in the fourth member of Shahejie Formation in Guan-17 well area, Niuzhuang Sag[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 684-689.
- [11] 董林芳,陈新阳.自悬浮支撑剂的性能评价与现场应用[J].石油钻探技术, 2018, 46(6): 90-94.  
DONG Linfang, CHEN Xinyang. Performance evaluation and field application of a self-suspending proppant[J]. Petroleum Drilling Technology, 2018, 46(6): 90-94.
- [12] 张敬春,任洪达,俞天喜,等.压裂支撑剂研究与应用进展[J].新疆石油天然气, 2023, 19(1): 27-34.  
ZHANG Jingchun, REN Hongda, YU Tianxi, et al. Research and application progress of fracturing proppants[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2023, 19(1): 27-34.
- [13] 徐辉,宋敏,孙秀芝,等.新型耐特高温抗水解型聚合物驱油性能[J].油气地质与采收率, 2021, 28(4): 101-106.  
XU Hui, SONG Min, SUN Xiuzhi, et al. Study on oil displacement performance of a new type of polymer with ultra-high temperature and hydrolysis resistance[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(4): 101-106.
- [14] 程东.体积压裂液黏土稳定剂的研制与评价[D].大庆:东北石油大学, 2015.  
CHENG Dong. Synthesis and evaluation of clay stabilizer for volume fracturing fluid[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015.
- [15] 胡渤,王芳,高宝玉,等.油田配聚污水水质对聚合物溶液黏度的影响及其机理[J].山东大学学报(工学版), 2016, 46(1): 80-85.  
HU Bo, WANG Fang, GAO Baoyu, et al. Study on the effect and mechanism of oilfield produced water quality on reducing the viscosity of polymer solution[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(1): 80-85.
- [16] 陈彦广,李丹丹,宋华,等.金属阳离子对部分水解聚丙烯酰胺溶液黏度影响的研究进展[J].化学工业与工程技术, 2013, 34(6): 36-41.  
CHEN Yanguang, LI Dandan, SONG Hua, et al. Research progress of the effect of metal cations on the viscosity of polyacrylamide solution[J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2013, 34(6): 36-41.
- [17] 薛俊杰,郭东红,管保山,等.减阻剂在页岩气压裂中的应用研究[J].精细与专用化学品, 2021, 29(5): 14-22.  
XUE Junjie, GUO Donghong, GUAN Baoshan, et al. Research and application of friction reducer for fracturing of shale gas reservoirs[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2021, 29(5): 14-22.
- [18] YANG B, ZHAO J Z, MAO J C, et al. Review of friction reducers used in slickwater fracturing fluids for shale gas reservoirs[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 62: 302-313.

(编辑 常燕)

(上接第512页)

- imaging algorithm for logging data of array holdup instrument in horizontal well[C]. Chengdout: IFEDC, 2017: 127-134.
- [25] FRISCH G, PERKINS T, QUIREIN J. Integrating wellbore flow images with a conventional production log interpretation method [C]// Paper SPE-77782-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, September 2002.
- [26] LIAO L, ZHU D, YOSHIDA N, et al. Interpretation of array production logging measurements in horizontal wells for flow profile[C]// Paper SPE-166502-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA, September 2013.
- [27] 黄志洁,马焕英,郭海敏,等.大斜度井电容阵列测井解释方法实验研究[J].石油天然气学报, 2008, 30(2): 107-110.  
HUANG Zhijie, MA Huanying, GUO Haiming, et al. Experimental study on capacitance array tool (CAT) logging interpretation in highly deviated wells[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(2): 107-110.
- [28] 刘再斌,吴锡令.阵列电磁传感器测量气水层状流持水率实验研究[J].测井技术, 2011, 35(4): 303-307.  
LIU Zaibin, WU Xiling. Experimental study on measuring gas-water stratified flow water holdup with array electromagnetic sensor[J]. Well Logging Technology, 2011, 35(4): 303-307.
- [29] 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 XiLing, ZHAO Liang, LIU Dijun. A fundamental study on electromagnetic wave imaging logging in multiphase flow[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2): 79-82.
- [30] 戴家才,郭海敏,刘恒,等.电容阵列测井资料流动成像算法研究[J].测井技术, 2010, 34(1): 27-30.  
DAI Jiakai, GUO Haimin, LIU Heng, et al. The flow imaging algorithm study on logging data of capacitor array tool[J]. Well Logging Technology, 2010, 34(1): 27-30.
- [31] 董勇,郭海敏,李梦霞.基于改进高斯权重的多相流动成像算法[J].测井技术, 2013, 37(1): 35-38.  
DONG Yong, GUO Haimin, LI Mengxia. An oil-gas-water three-phase flow imaging algorithm based on modified Gaussian weighted interpolation[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(1): 35-38.
- [32] 董勇,郭海敏,李梦霞,等.基于CAT的水平管油水两相流动成像算法改进[J].测井技术, 2014, 38(3): 262-266.  
DONG Yong, GUO Haimin, LI Mengxia, et al. Modification of imaging algorithm for oil-water flow in a horizontal tube based on CAT data[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(3): 262-266.

(编辑 李青)