



## 基于微电阻率成像测井的地层各向异性表征方法

胡文亮 张国栋 刘保银 罗健 魏晓晗

### Formation Anisotropy Characterization Method Based on Micro-Resistivity Imaging Logging

HU Wenliang, ZHANG Guodong, LIU Baoyin, LUO Jian, WEI Xiaohan

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023048>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 随钻方位伽马能谱测井影响因素分析及校正研究

Correcting Errors Due to Borehole and Formation Factors during Azimuthal Gamma Spectrum Logging While Drilling

石油钻探技术. 2020, 48(1): 104–113 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019131>

#### 川南深层页岩各向异性特征及对破裂压力的影响

Study on the Anisotropy Characteristics of Deep Shale in the Southern Sichuan Basin and Their Impacts on Fracturing Pressure

石油钻探技术. 2018, 46(3): 78–85 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018022>

#### 济阳坳陷泥灰质纹层页岩脆性各向异性数值模拟研究

Numerical Simulation of the Brittleness Anisotropy of Laminated Argillaceous Limestone Facies Shale in the Jiyang Depression

石油钻探技术. 2021, 49(4): 78–84 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021086>

#### 高精度随钻成像测井关键技术

The Key Technologies of High Precision Imaging Logging while Drilling

石油钻探技术. 2019, 47(3): 148–155 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019060>

#### 基于测井-地震信息的碳酸盐岩储层裂缝预测方法

Fracture Prediction in a Carbonate Reservoir Based on Logging–Seismic Data

石油钻探技术. 2017, 45(5): 118–126 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201705021>

#### 适用于油基钻井液的随钻电阻率成像测井方法

The Resistivity Imaging LWD Method Suitable for Oil-Based Drilling Fluid

石油钻探技术. 2019, 47(1): 112–117 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019009>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2023048

引用格式: 胡文亮, 张国栋, 刘保银, 等. 基于微电阻率成像测井的地层各向异性表征方法 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 125-130.

HU Wenliang, ZHANG Guodong, LIU Baoyin, et al. Formation anisotropy characterization method based on micro-resistivity imaging logging [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 125-130.

## 基于微电阻率成像测井的地层各向异性表征方法

胡文亮<sup>1</sup>, 张国栋<sup>1</sup>, 刘保银<sup>2</sup>, 罗 健<sup>1</sup>, 魏晓晗<sup>1</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335; 2. 杭州迅美科技有限公司, 浙江杭州 310012)

**摘 要:** 各向异性是地层固有的属性, 在大斜度井、水平井中, 可利用随钻电磁波测井曲线的差异信息进行各向异性系数计算; 在井斜角较小的井中, 各向异性对电阻率的影响较小, 利用差异信息来计算地层各向异性系数的方法不再适用。为此, 利用微电阻率成像测井的高分辨率特征和不同方位局部测量特性来划分图像灰度等级, 并建立等效电阻率体积模型, 进一步计算等效水平电阻率和垂直电阻率, 从而获得储层的各向异性系数。与实钻井随钻电阻率计算的各向异性系数对比, 一致性好, 并且微电阻率成像计算的各向异性系数分辨率更高, 能够很好地反映裂缝、孔洞、非均质井段的各向异性特征, 为评价地层的各向异性提供新手段。

**关键词:** 微电阻率成像; 随钻测井; 各向异性; 校正; 灰度等级

**中图分类号:** P631.8<sup>+</sup>11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2023)02-0125-06

## Formation Anisotropy Characterization Method Based on Micro-Resistivity Imaging Logging

HU Wenliang<sup>1</sup>, ZHANG Guodong<sup>1</sup>, LIU Baoyin<sup>2</sup>, LUO Jian<sup>1</sup>, WEI Xiaohan<sup>1</sup>

(1. Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai, 200335, China; 2. Hangzhou Sumay Technology Corporation, Hangzhou, Zhejiang, 310012, China)

**Abstract:** Anisotropy is an inherent property of the formation. In highly deviated wells and horizontal wells, the anisotropy coefficient can be calculated by using the difference information of electromagnetic wave logging curves while drilling. In slightly deviated wells, anisotropy has no obvious influence on resistivity. The traditional method of calculating formation anisotropy coefficients by using difference information is no longer applicable. In this paper, the high-resolution characteristics of micro-resistivity imaging logging and local measurement characteristics in different directions were used to divide the image gray scale, and the equivalent resistivity volume model was established to further calculate the equivalent horizontal resistivity and vertical resistivity, so as to obtain the anisotropy coefficient of the reservoir. The obtained anisotropy coefficient was compared with the anisotropy coefficient calculated with the resistivity while drilling of drilled wells, and the two were in good agreement. In addition, the resolution of the anisotropy coefficient calculated by the micro-resistivity imaging was higher, which could well reflect the anisotropy characteristics of fractures, holes, and heterogeneous well sections, and provide a new method for evaluating the formation anisotropy.

**Key words:** micro-resistivity imaging; logging while drilling; anisotropy; correction; gray scale

各向异性是指地层某种物理参数(如声波速度、电导率、渗透率等)沿不同方向测量的结果不一样<sup>[1-3]</sup>。电阻率的各向异性是指水平方向电阻率

( $R_h$ )与垂直方向电阻率( $R_v$ )的差异, 通常用 $\lambda = \sqrt{R_v/R_h}$ 来表征其大小<sup>[4]</sup>。各向异性是地层的固有属性, 成因复杂, 矿物组成、孔隙分布、颗粒排列, 以及

收稿日期: 2022-10-24; 改回日期: 2023-03-16。

作者简介: 胡文亮(1988—), 男, 湖北孝感人, 2014年毕业于长江大学地球探测与信息技术专业, 工程师, 主要从事测井处理与解释工作。E-mail: huwl5@cnooc.com.cn。

基金项目: 中海石油(中国)有限公司上海分公司七年行动计划科技项目“西湖凹陷西部地区勘探开发关键技术研究”(编号: CNOOC-KJ 135 ZDXM 39 SH01)资助。

裂缝和层理等,均会使地层表现出电各向异性特征<sup>[5]</sup>。

在大斜度井、水平井中,随钻电磁波电阻率的相位差电阻率曲线和幅度比电阻率曲线受地层各向异性影响呈现明显差异,其差异程度与地层各向异性及井眼-地层夹角相关,利用这种差异能进行各向异性系数提取和电阻率反演校正<sup>[6-8]</sup>。近年来,学者们进行电磁测井技术模拟,考察各向异性引起仪器测井响应的变化规律,建立了二维、三维快速反演方法<sup>[9]</sup>,这些方法在大斜度井、水平井中应用效果显著,而对于井斜角小于 $30^\circ$ 的井,各向异性虽对相位电阻率、幅度比电阻率有影响,但电阻率曲线的差异不明显,无法提取地层的各向异性信息。基于此,笔者利用微电阻率成像测井的高分辨率和不同方位电阻率的差异性特征来表征地层的各向异性,

与实钻井随钻电阻率计算的各向异性系数的一致性较好,并且微电阻率成像表征的各向异性具有更高的分辨率<sup>[10-12]</sup>,对薄互层、裂缝性地层和非均质地层引起的各向异性有很好的指示作用。

## 1 各向异性地层随钻电阻率测井响应特征

以斯伦贝谢公司的 ARC675 型随钻电阻率测井仪为例,其采用 5 发 2 收(T-T-T-R-R-T-T)非对称分布的天线,采用混合补偿的井眼补偿方法,除具有对称补偿仪器的优点外,还采用了 2 MHz 和 400 kHz 2 种频率及 5 种源距,可以测得径向上 20 条不同探测深度的电阻率曲线,仪器结构如图 1 所示。

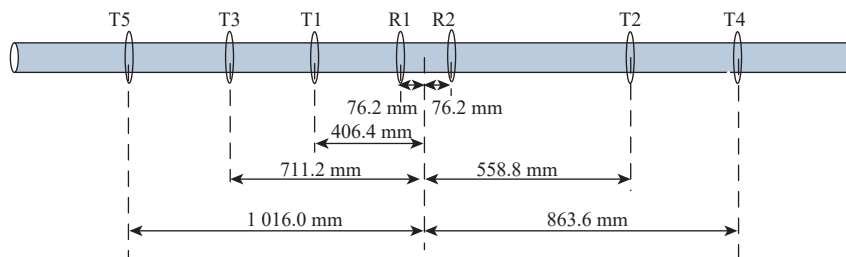


图 1 ARC675 型随钻电阻率测井仪示意

Fig.1 ARC675 instrument for resistivity logging while drilling

基于 ARC675 型随钻电阻率测井仪,利用正演模拟<sup>[13-15]</sup>分析各向异性地层随钻电阻率的测井响应特征。模型参数设置:水平电阻率 $R_h$ 为 $20\ \Omega\cdot m$ ,各向异性系数 $\lambda$ 分别为 2 和 3,在无限厚地层条件下,不考虑钻井液侵入和井眼环境的影响,模拟井眼与地层呈不同夹角时随钻电阻率测井的响应特征,结果如图 2 所示(图 2 中,蓝色、绿色、红色、青色、粉色线分别代表 406.4, 558.8, 711.2, 863.6 和 1 016.0 mm 源距的相位差、幅度比电阻率)。

对比图 2 中仪器的响应特征,可得如下规律性认识:1)井眼与地层的夹角大于 $30^\circ$ 时,相位差电阻率开始大于幅度比电阻率,且相位差电阻率曲线的差异随夹角增大而变大,显现出典型的各向异性特征;2)井眼与地层的夹角不大于 $30^\circ$ 时,相位差、幅度比电阻率曲线的差异均不明显,不能判断地层是否存在各向异性;3)各向异性系数和井眼与地层的夹角越大,相位差、幅度比电阻率曲线的差异越大。

国内外学者通常利用这种差异进行地层各向异性识别和电阻率反演<sup>[16-18]</sup>,以获得地层水平电阻

率。但是,当井眼与地层的夹角不大于 $30^\circ$ 时,地层各向异性虽对相位差电阻率、幅度比电阻率有影响,但影响不大,无法利用曲线的差异特征来表征地层的各向异性信息。

## 2 微电阻率成像各向异性表征方法

相对于随钻电阻率测井,微电阻率成像测井具有更高的分辨率,可进行井周测量,对地层层理、倾角、裂缝、破碎特征等具有很好的指示性。

以斯伦贝谢公司 FMI 电成像工具为例,该工具每个井深点周向上有 $S$  ( $S=192$ )个电阻率测量值,分别记为 $R_{tp1}, R_{tp2}, \dots, R_{tpS}$ ;在一定窗长内有 $M$ 个井深取样点,对应的微电阻率成像有 $M\times S$ 个电阻率测量值。利用微电阻率成像进行各向异性表征时,首先将窗长内 $M\times S$ 个测量值按其测量值代表的物理量(电导率)大小划分为 $N$ 个区间,每个区间用对应的灰度等级值 $a_n$  ( $n=1, \dots, N$ )代替,形成离散型变量,记为 $X$ ,其中:

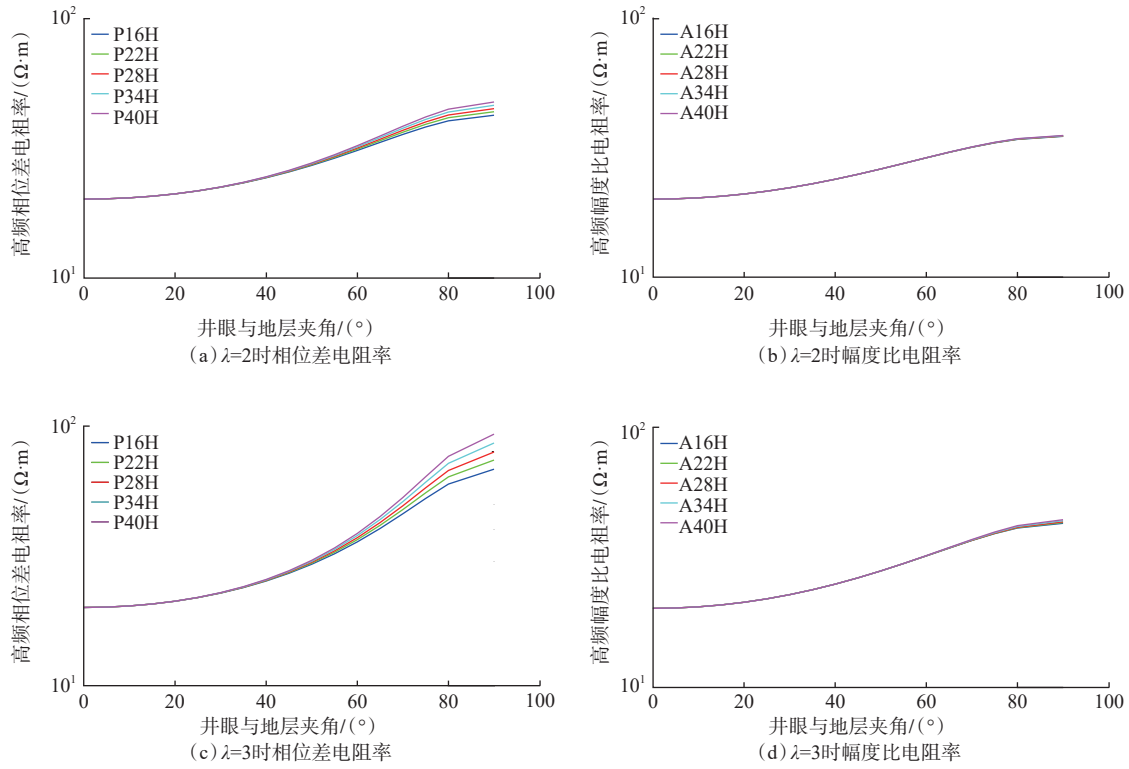


图 2 井眼与地层不同夹角下随钻电阻率测井的响应特征

Fig.2 Response characteristics of resistivity logging while drilling with different included angle between formation and borehole

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{M \times S}\} \quad (i = 1, 2, \dots, M \times S) \quad (1)$$

$x_i$  必然有且仅有一个灰度区间  $a_n$  ( $n$  为  $1 \sim N$  中的某一个值) 与之对应, 设离散型变量  $X$  的分布数列  $P$  可表示为:

$$P\{X = x_i\} |_{i \in [1, 2, \dots, M \times S]} = P\{X = a_n\} = p_n \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

样本是有限的, 结合概率的可列可加性, 其分布函数可表示为:

$$F(x) = P\{X \leq x\} = \sum_{x_i \leq x} P\{X = x_i\} = \sum_{x_i \leq x} p_n \quad (3)$$

利用差分代替微分, 步长为  $h$ , 通过近似公式计算离散变量  $X$  取值在  $x_i$  处的概率密度:

$$q_i = f(x_i) = F'(x_i) \approx \frac{F(x_i + h) - F(x_i - h)}{2h} |_{h \rightarrow 0} \quad (4)$$

将电阻率成像图像转换为灰度图像, 依据灰度等级值  $a_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) 把窗长内  $M \times S$  个测量值划分为  $N$  个区间, 累计落在同一区间的测量点, 计算各区间测点数占总测点数的比例  $l_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ )。

根据测量点的概率密度函数  $q_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ )、区间测点数占总测点数的比例  $l_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ), 对导电介质体积进行加权赋值, 计算导电介质的等效体积, 加权方法为:

$$E = - \sum_{n=1}^N q_n \lg q_n \quad (5)$$

$$a = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \quad (6)$$

$$L_{\text{shale}} = \sum_{n=1}^N (\delta_{\text{shale}} l_n) \quad (7)$$

$$V_{\text{shale}} = \frac{2^{3.7a} - 1}{2^{3.7} - 1} \left( \frac{L_{\text{shale}}}{L_{\text{shale}} + L_{\text{sand}}} E \right)^2 \quad (8)$$

其中

$$\delta_{\text{shale}} = \begin{cases} 1 & a_i \in \{V_m\} \\ 0 & a_i \in \{V_s\} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $q_n$  为图像第  $n$  级灰度值的概率密度;  $N$  为图像的总灰度级;  $E$  为所有灰度等级区域的熵增系数;  $GR$  为测量点的自然伽马值, API;  $GR_{\max}$ ,  $GR_{\min}$  分别为自然伽马的最大值和最小值, API;  $a$  为泥质含量指数;  $\delta_{\text{shale}}$  为泥质识别函数;  $\{V_s\}$ ,  $\{V_m\}$  分别为砂岩测点集合和泥岩测点集合;  $l_n$  为测量值各灰度在总灰度划分区域所占比例;  $L_{\text{shale}}$ ,  $L_{\text{sand}}$  分别为泥岩、砂岩测量值各灰度在总灰度划分区域所占比例;  $M$ ,  $S$  为窗长内测点的行数和列数;  $V_{\text{shale}}$  为泥质含量。

根据加权系数计算结果, 计算每个等级灰度区域的泥质含量, 然后计算水平电阻率和垂直电阻率:

$$\frac{1}{R_h} = \frac{V_{\text{sand}}}{R_{\text{sand}}} + \frac{V_{\text{shale}}}{R_{\text{shale}}} \quad (10)$$



$$R_v = R_{\text{sand}} V_{\text{sand}} + R_{\text{shale}} V_{\text{shale}} \quad (11)$$

$$V_{\text{shale}} = f \left[ \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \left( \frac{L_{\text{shale}}}{L_{\text{shale}} + L_{\text{sand}}} \right)^2 \right] \quad (12)$$

不考虑孔隙度时,等效体积关系满足:

$$V_{\text{shale}} + V_{\text{sand}} = 1 \quad (13)$$

考虑孔隙度时,砂泥岩体积关系满足:

$$V_{\text{shale}} + V_{\text{sand}} = 1 - \phi \quad (14)$$

式中:  $R_{\text{shale}}$ ,  $R_{\text{sand}}$  分别为泥岩、砂岩电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $R_h$ ,  $R_v$  分别为等效水平、垂直电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $V_{\text{shale}}$ ,  $V_{\text{sand}}$  分别为泥岩、砂岩等效体积;  $\phi$  为地层孔隙度。

计算得到  $R_h$  和  $R_v$  后,即可计算出地层的各向异性系数。

### 3 应用效果分析

微电阻率成像各向异性表征处理流程为:1)基于微电阻率成像测井进行对比与分层,分层时根据自然伽马曲线或电阻率曲线,将测井值处于同一测量值附近的连续井段划分为一层,以曲线半幅点位置作为分层界面;2)在层内根据成像数据划分图像灰度等级,并在选定窗长内统计同等级灰度测量区域体积,计算其总体积比例,并建立体积模型;3)计算窗长内测量点灰度等级概率密度,将概率密度与灰度值的积分作为窗长内均质性的权系数,与体积模型结合形成各向异性评价的体积模型;4)根据体积模型中不同灰度区域代表的电阻率,利用体积比例和权系数计算出水平电阻率和垂直电阻率;5)计算地层各向异性系数。

目前该方法在东海累计应用超过30井次。采用微电阻率成像计算的地层各向异性信息对随钻电磁波电阻率进行校正处理,为含水饱和度定量计算提供了技术支持。图3为A井微电阻率成像各向异性表征成果图,其中,第1道为井深,第2道为微电阻率静态图像,第3道为微电阻率动态图像,第4道为各向异性表征方法获取的各向异性系数( $\lambda$ )。

从图3可以看出,非均质性强区域、裂缝区域、薄互层区域的各向异性系数大,其他均质区域的各向异性系数小,微电阻率成像提取的各向异性系数能清晰地表征地层的非均质性。

为进一步检验微电阻率成像提取各向异性系数的准确性和适用性,选择与大斜度井随钻电阻率提取得到的各向异性系数进行对比和统一处理。各向异性统一评价流程为:在大斜度井中分别进行随钻

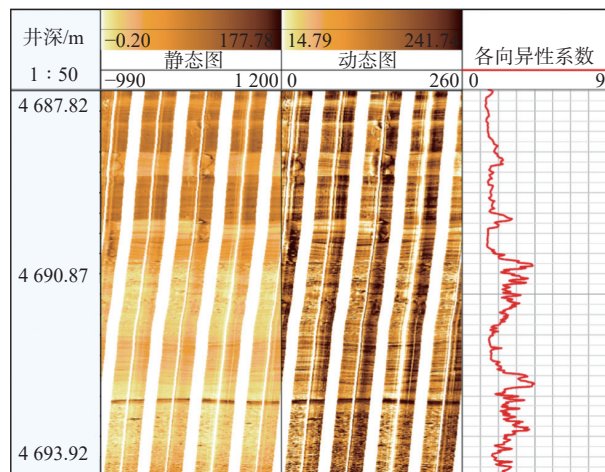


图3 A井微电阻率成像各向异性表征

Fig.3 Anisotropy characterization of micro-resistivity image of Well A

电阻率、微电阻率成像各向异性系数提取和统计,对比同深度井段各向异性系数变化,建立微电阻率成像各向异性系数与随钻电阻率各向异性系数的相关关系。

B井分别利用随钻电阻率、微电阻率成像提取的各向异性系数如图4所示。图4中,第6道、第7道随钻电磁波电阻率测井曲线差异明显,呈现相位差电阻率大于幅度比电阻率、长源距测量值大于短源距测量值的各向异性响应特征,指示地层存在明显的各向异性。微电阻率成像显示,存在薄互层特征。图4中第2道成像各向异性曲线为微电阻率成像提取的各向异性系数,第5道随钻计算各向异性曲线为随钻电阻率提取的各向异性系数。

以随钻电阻率提取的各向异性系数为横轴,以微电阻率成像计算的各向异性系数为纵轴,建立回归方程:

$$y = 0.885x + 0.615 \quad (15)$$

基于上述回归方程进行各向异性一致性评价,结果如图5所示。

由图5可知,随钻电阻率各向异性系数与微电阻率成像各向异性系数具有很好的一致性,微电阻率成像提取的各向异性系数分辨率更高。

从一致性评价结果可知:不同测量工具间受井斜角、仪器探测特性及测量环境等因素的影响,各向异性分辨率存在一定差异;随钻电阻率、微电阻率成像均为电性采集数据,其各向异性系数具有相关性,通过各向异性一致性评价,两者有效互补,能有效提高地层各向异性系数评价的准确性和适用性。

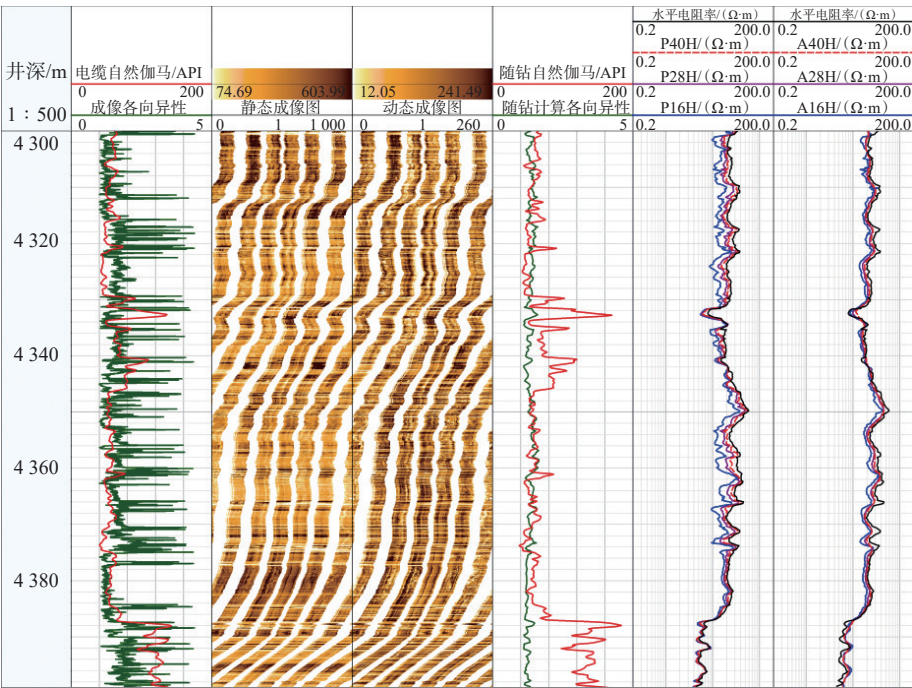


图 4 B 井各向异性系数对比

Fig.4 Anisotropy coefficient comparison of Well B

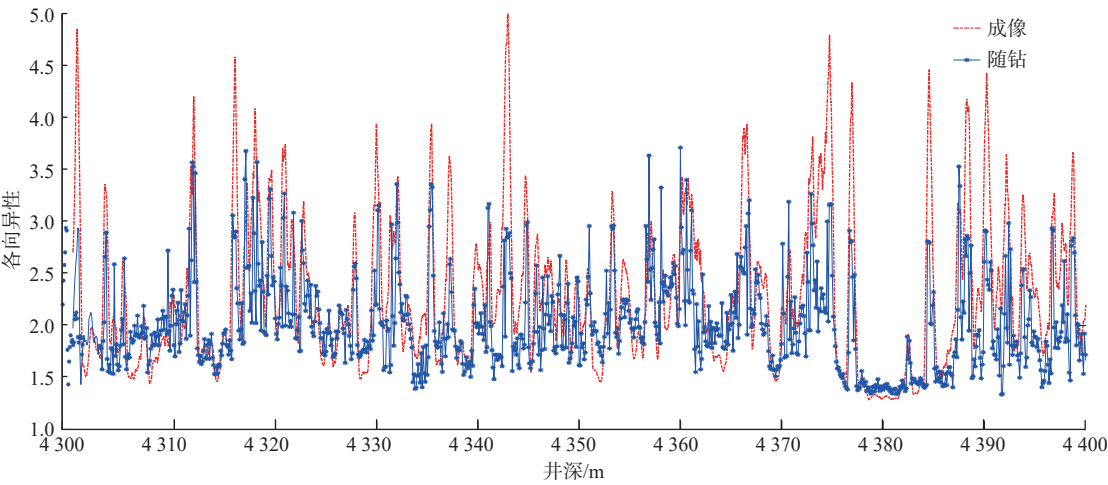


图 5 一致性条件下的各向异性系数对比

Fig.5 Comparison of anisotropic coefficient under consistency condition

4 结 论

1)各向异性地层随钻电磁波电阻率正演模拟显示,当井眼与地层的夹角小于 30°时,不同探测模式测量的视电阻率重合且大于地层的水平电阻率,各向异性对视电阻率的放大效应依然存在,但是基于电阻率曲线差异信息来计算地层各向异性系数的方法不再适用。

2)基于微电阻率成像测井的高分辨率和不同方位电阻率的差异性特征,采用数理统计方法,通过

划分图像灰度等级并建立等效体积模型,根据体积模型中不同灰度区域代表的电阻率,结合泥质含量和加权系数计算地层等效的水平电阻率、垂直电阻率和各向异性系数,解决了井斜角较小井中无法利用曲线差异反演获得各向异性系数的难题。

3)微电阻率成像计算的各向异性系数与随钻电阻率计算的各向异性系数对比结果表明,二者一致性好,且微电阻率成像计算的各向异性系数分辨率更高,能够更好地反映裂缝、孔洞、非均质井段的各向异性特征。

## 参考文献

## References

- [1] SUN Keli, OMERAGIC D, MINH C C, et al. Evaluation of resistivity anisotropy and formation dip from directional electromagnetic tools while drilling[R]. SPWLA-2010-26011, 2010.
- [2] 李潮流, 袁超, 李霞, 等. 致密砂岩电学各向异性测井评价与声电各向异性一致性分析[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 427-434.  
LI Chaoliu, YUAN Chao, LI Xia, et al. Anisotropy interpretation and the coherence research between resistivity and acoustic anisotropy in tight sands[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 427-434.
- [3] 夏宏泉, 刘畅, 李高仁, 等. 基于测井资料的 TIV 地层水平地应力计算方法[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6): 67-72.  
XIA Hongquan, LIU Chang, LI Gaoren, et al. A logging data-based calculation method for the horizontal TIV formation in-situ stress[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(6): 67-72.
- [4] BITTAR M S, HU Guoyu. The effects of rock anisotropy on LWD toroidal resistivity sensors[R]. SPWLA-2004-WW, 2004.
- [5] 刘云鹤, 殷长春, 蔡晶, 等. 电磁勘探中各向异性研究现状和展望[J]. 地球物理学报, 2018, 61(8): 3468-3487.  
LIU Yunhe, YIN Changchun, CAI Jing, et al. Review on research of electrical anisotropy in electromagnetic prospecting[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(8): 3468-3487.
- [6] 王磊, 范宜仁, 黄瑞, 等. 各向异性介质多分量感应测井三维 Born 几何因子理论研究[J]. 物理学报, 2015, 64(23): 239301.  
WANG Lei, FAN Yiren, HUANG Rui, et al. Three dimensional Born geometrical factor of multi-component induction logging in anisotropic media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(23): 239301.
- [7] 岳喜洲, 马明学, 李国玉. 随钻电磁波电阻率测井曲线分离关系研究[J]. 石油管材与仪器, 2016, 2(2): 53-56.  
YUE Xizhou, MA Mingxue, LI Guoyu. Study on relationships of the separated curves in resistivity logging while drilling[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2016, 2(2): 53-56.
- [8] 刘天淋, 岳喜洲, 李国玉, 等. 超深探测随钻电磁波测井地质信号特性研究[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 41-48.  
LIU Tianlin, YUE Xizhou, LI Guoyu, et al. Study over the geo-signal properties of ultra-deep electromagnetic wave logging while drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(6): 41-48.
- [9] YOON D, ZHDANOV M S, MATTSSON J, et al. A hybrid finite-difference and integral-equation method for modeling and inversion of marine controlled-source electromagnetic data[J]. *Geophysics*, 2016, 81(5): E323-E336.
- [10] 翟金海, 聂在平, 孙向阳, 等. 油基泥浆微电阻率扫描测井方法建模及仿真[J]. 电波科学学报, 2011, 26(增刊1): 311-313.  
ZHAI Jinhai, NIE Zaiping, SUN Xiangyang, et al. Modeling and simulation for oil-based mud logging[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(supplement 1): 311-313.
- [11] 路保平, 丁士东, 何龙, 等. 低渗透油气藏高效开发钻完井技术研究主要进展[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(1): 1-7.
- [12] 郭书生, 高永德, 曲长伟, 等. 南海西部乌石凹陷流沙港组二段储层精细表征[J]. 中国海上油气, 2019, 31(2): 39-50.  
GUO Shusheng, GAO Yongde, QU Changwei, et al. Fine characterization of the second member of Liushagang Formation in Wushi Sag, western South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(2): 39-50.
- [13] 胡松, 王晓畅, 孔强夫. 水平井随钻电磁波电阻率数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(14): 59-66.  
HU Song, WANG Xiaochang, KONG Qiangfu. Numerical simulation of LWD resistivity in horizontal wells[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(14): 59-66.
- [14] 李飞虎, 张中庆, 王卓远. 用矢量棱边元素法模拟三维感应测井响应[J]. 复旦学报(自然科学版), 2009, 48(5): 560-566.  
LI Feihu, ZHANG Zhongqing, WANG Zhuoyuan. Application of the vector finite element method to 3-D induction well logging problems[J]. *Journal of Fudan University(Natural Science)*, 2009, 48(5): 560-566.
- [15] 黄明泉, 杨震. 随钻超深电磁波仪器探测深度及响应特征模拟[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 114-119.  
HUANG Mingquan, YANG Zhen. Simulation to determine depth of detection and response characteristics while drilling of an ultra-deep electromagnetic wave instrument[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 114-119.
- [16] 乐友喜, 陈艺都, 吴佳伟, 等. 自适应整形正则化迭代最小二乘谱反演方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(3): 54-61.  
LE Youxi, CHEN Yidu, WU Jiawei, et al. Iterative least squares spectrum inversion based on adaptive shaping regularization[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(3): 54-61.
- [17] 范宜仁, 吴易智, 李潮流, 等. 斜井各向异性地层阵列侧向测井资料快速分级反演方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 65-74.  
FAN Yiren, WU Yizhi, LI Chaoliu, et al. Fast hierarchical inversion for array lateral logging data of anisotropic formation in deviated well[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(3): 65-74.
- [18] 张中庆, 穆林雪, 张雪, 等. 矢量有限元素法在随钻电阻率测井模拟中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(4): 64-71.  
ZHANG Zhongqing, MU Linxue, ZHANG Xue, et al. Application of vector finite element method to simulate logging-while-drilling resistivity tools[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2011, 35(4): 64-71.

[编辑 令文学]