



多尺度随钻方位电磁波测井系统响应特征研究

吴柏志 杨震 郭同政 袁习勇

Response Characteristics of Logging While Drilling System with Multi-Scale Azimuthal Electromagnetic Waves

WU Baizhi, YANG Zhen, GUO Tongzheng, YUAN Xiyong

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022107>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于拟牛顿法的随钻方位电磁波电阻率仪器响应实时反演与现场试验

Real Time Inversion and Field Test of LWD Azimuthal Electromagnetic Waves Based on Quasi-Newton Method

石油钻探技术. 2020, 48(3): 120-126 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020025>

随钻方位电磁波仪器测量精度对电阻率及界面预测影响分析

Impacts of Accuracy of Azimuthal Electromagnetic Logging-while-Drilling on Resistivity and Interface Prediction

石油钻探技术. 2017, 45(4): 115-120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704020>

随钻超深电磁波仪器探测深度及响应特征模拟

Simulation to Determine Depth of Detection and Response Characteristics while Drilling of an Ultra-Deep Electromagnetic Wave Instrument

石油钻探技术. 2020, 48(1): 114-119 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019132>

利用随钻电磁波测井探测直井水力裂缝的正演模拟

Forward Modeling in Hydraulic Fracture Detection by Means of Electromagnetic Wave Logging While Drilling in Vertical Wells

石油钻探技术. 2020, 48(2): 123-129 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019133>

随钻方位电磁波电阻率测井仪分段组合线圈系设计

The Design of the Coil System in LWD Tools Based on Azimuthal Electromagnetic-Wave Resistivity Combined with Sections

石油钻探技术. 2017, 45(2): 115-120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702019>

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>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀远探测技术专题▶

doi:10.11911/syztjs.2022107

引用格式: 吴柏志, 杨震, 郭同政, 等. 多尺度随钻方位电磁波测井系统响应特征研究 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 7-13.

WU Baizhi, YANG Zhen, GUO Tongzheng, et al. Response characteristics of logging While drilling system with multi-scale azimuthal electromagnetic waves [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 7-13.

多尺度随钻方位电磁波测井系统响应特征研究

吴柏志¹, 杨震¹, 郭同政¹, 袁习勇^{1,2}

(1. 中石化经纬有限公司, 山东青岛 266075; 2. 中国石油大学(华东)深层油气重点实验室, 山东青岛 266580)

摘要: 为了及时发现地层构造变化, 规避钻井风险的同时准确评价地层, 要求随钻测井仪器具备尽可能大的探测深度和较高的分辨率, 而单一尺度的测量结果难以同时满足上述要求。为此, 模拟研究了超深随钻方位电磁波和随钻方位电磁波测井系统的探测特性, 分析了该测井系统的探边能力和分辨率, 并探索了其对于钻前地层界面的探测效果; 然后, 采用拟牛顿法, 进行了多尺度随钻方位电磁波测井资料的精确快速反演。研究表明, 通过增大源距、降低频率的方式, 超深随钻方位电磁波测井的探边能力达到数十米; 与小尺度随钻方位电磁波测井联合使用, 通过反演可以实时获取油藏电阻率剖面信息, 从而实现近远井不同范围内的地质预测、地质导向和油藏描述。

关键词: 多尺度; 随钻方位电磁波测井; 探测特性; 地质导向; 反演

中图分类号: P631.8⁺11 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2022)06-0007-07

Response Characteristics of Logging While Drilling System with Multi-Scale Azimuthal Electromagnetic Waves

WU Baizhi¹, YANG Zhen¹, GUO Tongzheng¹, YUAN Xiyong^{1,2}

(1. Sinopec Matrix Corporation, Qingdao, Shandong, 266075, China; 2. Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580, China)

Abstract: In order to detect changes in stratigraphic structures in time, and accurately evaluate formation while avoiding drilling risks, logging while drilling (LWD) instruments are required with adequate depth of detection (DOD) and higher resolution. However, the measurement results of a single scale LWD cannot simultaneously satisfy the stated requirements. Therefore, the detection characteristics of ultra-deep azimuthal electromagnetic wave LWD and a conventional one were simulated and investigated, and the boundary detection ability and resolution of the system were analyzed as well. Meanwhile, the detection effect of undrilled formation interface was also explored. Moreover, the quasi-Newton method was used to perform accurate and fast inversion of data from LWD with multi-scale azimuthal electromagnetic waves. The study results showed that by increasing the coil spacing and reducing the frequency, the LWD with ultra-deep azimuthal electromagnetic waves could have a boundary detection ability of tens of meters. Combined with a small-scale azimuthal electromagnetic wave LWD, the real-time resistivity profile of reservoirs through inversion could be obtained, so as to bring about geological prediction, geosteering, and reservoir characterization in the vicinity of wellbore and farther away.

Key words: multi-scale; LWD with azimuthal electromagnetic waves; detection characteristics; geosteering; inversion

自 20 世纪 80 年代至今, 随钻电磁波电阻率测井仪器由最初的单频、单源距发展成为多频、多源距和多分量, 探测范围也由几十厘米拓展至数十米。近年来, 超深随钻电磁波测井仪器的出现, 更

收稿日期: 2022-07-29; 改回日期: 2022-10-09。

作者简介: 吴柏志 (1970—), 男, 吉林扶余人, 1993 年毕业于大庆石油学院采油工程专业, 2006 年获中国石油大学 (华东) 油气田开发工程专业博士学位, 正高级工程师, 主要从事石油工程技术方面的管理和研究工作。E-mail: wubz@sinopec.com。

基金项目: 中国石化集团公司科研攻关项目“随钻超深方位电磁波前探测仪器关键技术研究” (编号: JP22503)、中国石化“十条龙”科技攻关项目“旋转地质导向核心技术攻关及应用” (编号: P21080) 和中国博士后科学基金项目“随钻瞬变电磁测井前视远探测方法研究” (编号: 2022M713462) 联合资助。

是弥补了常规测井尺度与地震尺度之间的空白,实现了两类资料良好的关联应用^[1-3]。目前,随钻电磁波测井的功能已由最初的地质导向和地层评价,逐步延伸到地质预防、地质导向和随钻油藏描述等领域。根据实时测量多尺度地质信息,可一次性钻入目的层,避免进行昂贵的导眼井和侧钻井作业,并在钻井过程中保证井眼轨迹处于储层最佳位置,从而实现油气产能的最大化。

传统的随钻电磁波测井仪器最初采用单发双收的同轴线圈系结构,由于其探测深度明显大于伽马测井、中子密度测井、声波测井等测井仪器,在油田地质导向钻井中得到广泛应用;但因为缺乏方位信息,该阶段的地质导向属于被动式。随着井壁成像技术的成熟和地质导向钻井对测井仪器探测深度和方位敏感性要求的提高,国内外油服公司引入了倾斜或者水平线圈,推出了随钻方位电磁波测井技术,极大地促进了主动式地质导向的发展^[4-10]。如2014年以来,随着数据采集和反演处理技术的进步,国外油服公司相继推出了超深随钻方位电磁波测井系统与服务,包括斯伦贝谢公司的 GeoSphere、贝克休斯公司的 EDAR 和哈里伯顿公司的 Earth-Star,通过增大源距、提高发射功率、降低工作频率和提高信噪比,显著提高了测井仪器的探测深度,使实时油藏描述成为可能。超深随钻方位电磁波测井仪器主要应用在以下4方面^[11]: 1)地质预防,主要指钻探过程中对危险或异常地层的识别和预测; 2)井眼着陆点/入靶点控制,由于测量尺度达到地震测量级别,可有效避免导眼井钻井作业; 3)水平段地质导向,指导井眼轨迹位于储层最佳位置,避免钻出油藏进入非生产区; 4)地质测绘,通过绘制地层和油气边界来识别错过的产层和流体运动,提高生产潜力,并使油田储量最大化。

随钻电磁波类测井仪器基于发射天线和接收天线的几何关系分辨地层,其探测深度和分辨率是一对矛盾体,超深随钻方位电磁波测井虽然具有数十米的探测能力,但通常分辨率不足。因此,国外油服公司通常将超深随钻方位电磁波测井仪器与随钻方位电磁波电阻率测井仪器联合使用,构成多尺度探测系统,从而实现从近井边界探测到远井地层结

构的成像。基于此,笔者结合前期自研的随钻方位电磁波电阻率测井仪器 AMR,设计了多尺度随钻方位电磁波探测系统的基本天线结构,分别模拟了该系统对井周、钻前地层界面的远探测和前探测响应,并采用拟牛顿法,开展了多尺度测井资料的联合反演。通过该研究,可以为多尺度随钻方位电磁波测井系统的研发应用提供理论依据。

1 多尺度随钻方位电磁波测井系统

多尺度随钻方位电磁波测井系统采用多频、多源距和多分量的测量模式,至少包含随钻(方位)电磁波和超深随钻方位电磁波仪器。对于前者,采用自主研发的随钻方位电磁波电阻率仪器 AMR,其工作频率为 2 MHz 和 400 kHz,可提供 8 条对称补偿的传统电磁波电阻率曲线和 2 条对称补偿的轴向发射水平接收的 zx 分量定向电动势曲线。

关于超深随钻电磁波测井仪器,目前国外油服公司大致采取 2 种技术方案:第一种是贝克休斯公司的 EDAR^[12],利用单发双收同轴线圈系测量超深电阻率,利用水平发射线圈与远端轴向接收线圈组合测量 xz 分量电动势作为超深边界探测信号;第二种是斯伦贝谢公司的 GeoSphere 和哈里伯顿公司的 EarthStar,二者的发射天线和接收天线都采用倾斜线圈^[13],仪器在同一位置的测量信号通过解耦可实现磁场全张量测量,进一步将不同分量进行组合可构成仪器多个探测模式,包括有效的地层评价和地质导向信息。理论模拟和现场测试结果表明,上述 2 种技术方案均能分辨多个地层,探测深度普遍达到数十米,具体性能取决于仪器所选工作频率、源距和地层特性。

综合考虑,多尺度随钻方位电磁波测井系统采用如图 1 所示的基本天线结构:独立的倾斜发射短节 T1(线圈法向与仪器轴的夹角为 45°)与轴向接收天线 R1、R2 组合测量超深电阻率,源距分别为 12 和 17 m;水平发射天线 Tc 与 R2 组合测量超深定向电动势信号,源距为 6 m;该测井系统的工作频率为 20 和 50 kHz。

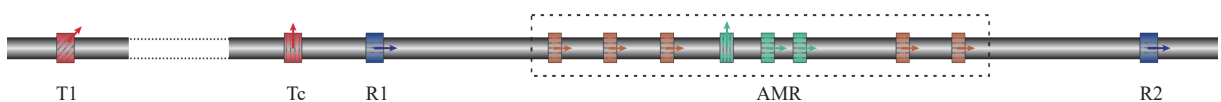


图 1 多尺度随钻方位电磁波测井系统的天线排布

Fig.1 Antenna configuration of LWD system with multi-scale azimuthal electromagnetic waves

2 多尺度测井系统响应特征

2.1 远探测响应特征

超深随钻方位电磁波测井的远探测,一般指对井周地层结构的探测。由于仪器线圈直径远小于源距,可视为磁偶极子,而且仪器具备较大的探测深度,响应计算往往考虑 3 层或多层模型,在不考虑井眼条件下可推导出任意多层水平层状介质的多分量电磁场分布,并开展仪器响应的模拟计算。关于具体推导过程,很多文献已有详细说明^[14-15],在此不再赘述。

建立了双界面地层模型,上下围岩的电阻率为 $1 \Omega \cdot \text{m}$, 中间目的层电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$, 厚度为 5 m , 测井系统以 85° 井斜角自下而上穿过目的层,图 2 所示为该测井系统的响应曲线(其中: A400k 表示工作频率为 400 kHz 时的幅度比电阻率曲线; P2M 表示工作频率为 2 MHz 时的相位差电阻率曲线; $V_{zx}(400\text{k})$ 表示工作频率为 400 kHz 时的定向电动势探边信号; $V_{zx}(20\text{k})$ 表示工作频率为 20 kHz 时(源距为 6 m)的超深定向电动势信号;其他与此类似)。

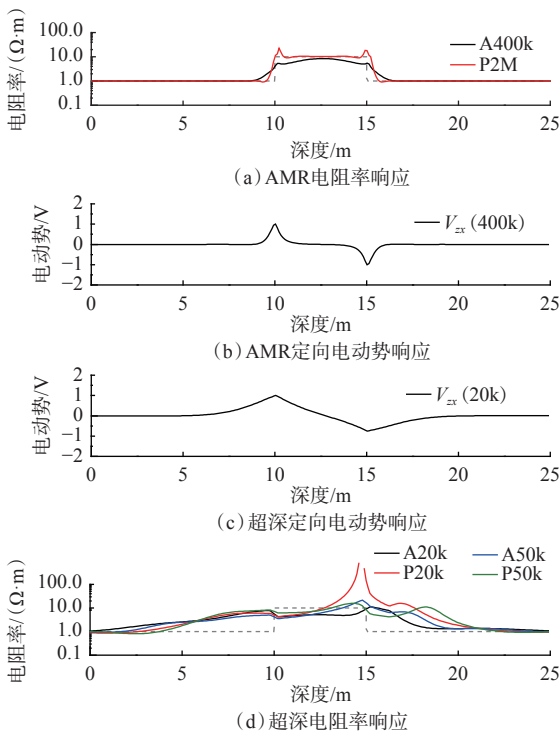


图 2 层状地层多尺度测井系统响应模拟结果

Fig.2 Simulated response results of multi-scale logging system in laminated formation

从图 2(a)可以看出,相位差电阻率能准确反映

地层真实电阻率,而幅度比电阻率探测深度更大,该层厚条件下受低阻围岩影响,响应值略小于地层真实电阻率。

从图 2(b)可以看出,模拟结果能准确显示界面位置,且定向电动势响应尖峰指向导电性地层。

从图 2(c)可以看出,在该地层条件下,超深探测能准确识别出界面位置,其探测深度较常规方位探边信号有了很大提高(为便于比较,二者均作归一化处理),能更及时预测地层界面,对于 5 m 地层来说仪器响应始终会受到上下两个界面的影响。

从图 2(d)可以看出,该工作频率和源距条件下,电阻率响应特征比较复杂,很难直接通过测量值准确评价地层,但从电阻率测量模式可以看出,测井系统在离目的层较远时就已经出现电阻率变化,说明其已经对目的层有所反映,可通过反演提取地层界面和电阻率信息。

相应模型超深探边信号 zx 分量和方位探边信号 zx 分量定向电动势的成像图,分别如图 3(a)和图 3(b)所示。从该成像图可以清楚识别地层界面,且超深成像结果的探测范围明显更广。

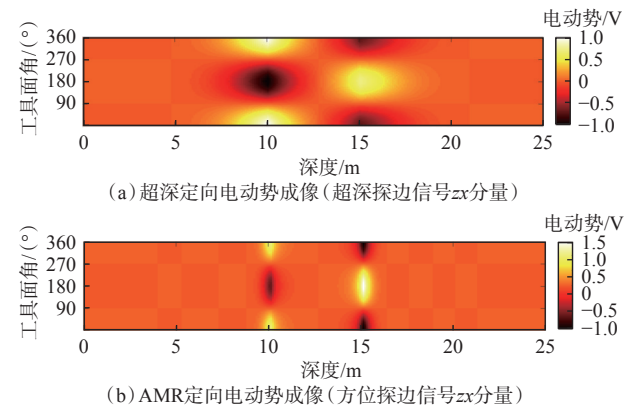


图 3 层状地层边界探测信号成像

Fig.3 Images of boundary detection signals in laminated formation

在确定源距、工作频率、信号有效动态及电阻率(电导率)对比度条件下,以 2 层模型为例,模拟评价超深定向电动势信号探边能力(记为 D_{OD})的 Picasso 图^[16](见图 4,图中 R_1 为所在地层的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; R_2 为邻层的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$)。当工作频率为 20 kHz 、信号有效动态为 70 dB 时,超深定向电动势信号最大探测深度可达 29.2 m ;界面两侧电阻率接近时,探边能力逐渐减小至探测盲区。实际应用中,应当根据区域地层电阻率对比情况,事先对仪器边界探测性能进行评估,以便更准确地进行地质

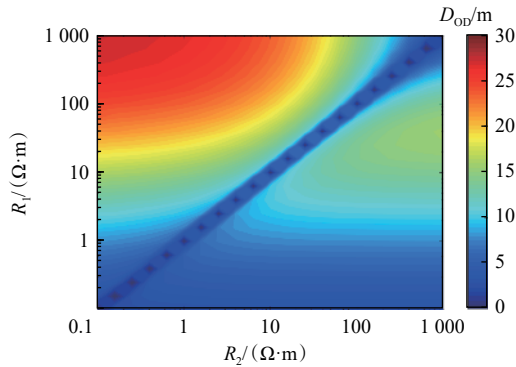


图 4 探边能力与电阻率对比度的关系

Fig.4 Relationship between boundary detection ability and resistivity contrast

导向分析。

一般而言,电磁波测井仪器的探测深度和分辨率是一对矛盾体,较大的探测深度往往导致分辨率明显降低。对此进行了模拟分析,设目的层电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$,围岩电阻率为 $1 \Omega \cdot \text{m}$,超深工作频率为 20 kHz ,传统电阻率工作频率为 2 MHz ,模拟了直井、不同层厚(分别为 $2, 5, 10, 20$ 和 50 m)条件下的电阻率响应特征,结果见图 5。

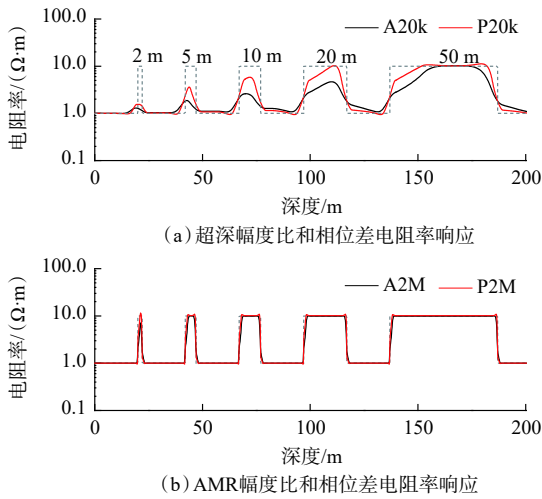


图 5 直井、不同层厚条件下的电阻率响应模拟结果

Fig.5 Simulated response results of resistivity with different layer thicknesses in vertical well

由图 5 可知:超深电阻率几乎分辨不出 2 m 厚目的层,即使层厚达到 10 m ,超深视电阻率仍与地层真实电阻率差别较大,直至 20 m 层厚情况下,相位差电阻率才能基本反映地层的真实电阻率;但层厚较薄时,借助传统电磁波电阻率曲线则可实现电阻率评价功能,例如 AMR 的相位差电阻率可准确评价 2 m 厚的地层。由此可见,随钻地层评价和地

质导向应用中,超深随钻电磁波必须结合随钻(方位)电磁波测井仪器使用。

此外,由于采用倾斜发射短节,轴向接收天线 R1 和 R2 的测量信号包含了方位信息,借助钻铤旋转,接收线圈可测量不同方位的感应电动势,并进一步转换为幅度比地质信号和相位差地质信号:

$$\begin{cases} G_{Att} = -20 \lg \left| \frac{V_{\beta_1}}{V_{\beta_2}} \right| \\ G_{PS} = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(V_{\beta_1})}{\text{Re}(V_{\beta_1})} - \tan^{-1} \frac{\text{Im}(V_{\beta_2})}{\text{Re}(V_{\beta_2})} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $V_{\beta_1} = V_{zz} - V_{xz}$ (2)

$V_{\beta_2} = V_{zz} + V_{xz}$ (3)

式中: G_{Att} 为幅度比地质信号, dB; G_{PS} 为相位差地质信号, ($^\circ$); Im 表示取虚部, Re 表示取实部; β_1, β_2 为测井仪器工具面角,一般取 0° 和 180° ; V_{zz}, V_{xz} 分别为轴向发射轴向接收和水平发射轴向接收测量的感应电动势, V。

双界面地层模型的幅度比和相位差地质信号模拟结果如图 6 所示,其模拟条件与图 2 一致,工作频率分别为 20 和 50 kHz 。

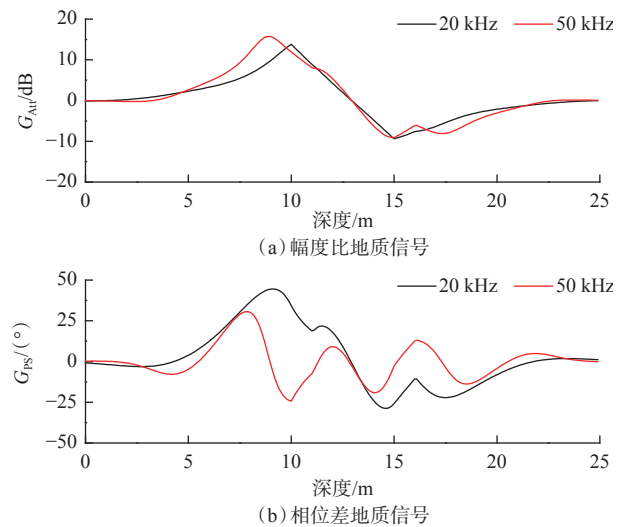


图 6 层状地层超深地质信号响应模拟结果

Fig.6 Simulated response results of ultra-deep geosignals in laminated formation

由图 6 可知:地质信号峰值不一定出现在界面处;随着频率增加,地质信号与界面距离的关系失去单调性;与幅度比信号相比,相位差信号的非线性更强。这种现象将给资料反演处理带来困难。

基于类似原理, T1 倾斜发射 R1、R2 轴向接收

时测量的电阻率实际为方位电阻率, 包含了地层界面的位置信息, 相应的方位电阻率成像结果如图 7 所示。测井仪器从下方低阻泥岩进入目的层后穿出, 成像资料在界面表现出正余弦曲线特征, 0° 工具面角和 180° 工具面角的电阻率存在明显差异, 借此也可判断目的层与井眼轨迹的相对位置关系。

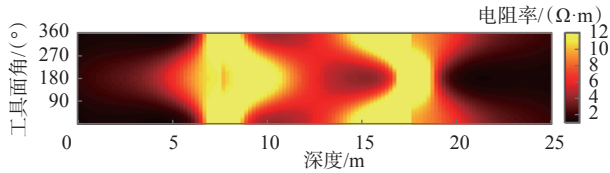


图 7 层状地层方位电阻率成像

Fig.7 Image of azimuthal resistivity in laminated formation

2.2 前探测响应特征

超深随钻方位电磁波测井的远探测能力可达数十米, 而且由于源距增大和频率降低, 可同时探测钻前地层界面。因此, 基于多尺度随钻方位电磁波测井系统倾斜发射轴向双接收的天线结构, 模拟分析了其前探测能力。

钻井过程中常见的测井仪器与地层的相对位置如图 8 所示 (其中, h 为测井仪器中心到界面的距离, m)。

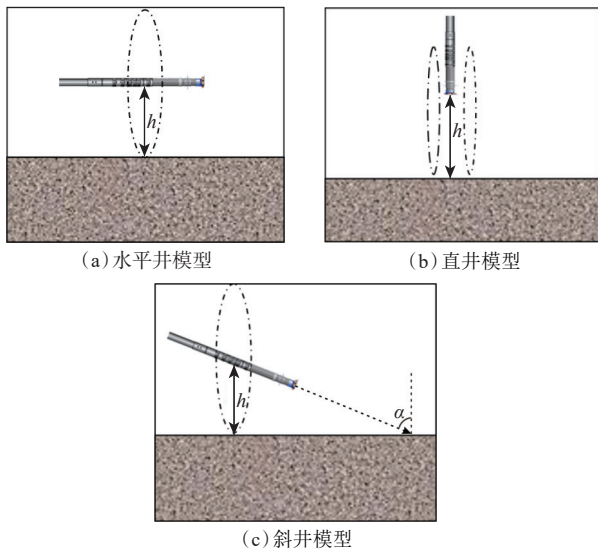


图 8 测井仪器与地层的相对位置关系

Fig.8 Relative position of instrument and formation

图 8(a) 中, 测井仪器与地层界面平行, 此时重点关注测井仪器的远探测能力; 图 8(b) 中, 测井仪器与地层界面垂直, 此时要求测井仪器能够探测钻前地层界面; 图 8(c) 中, 井斜角为 α , 这种情况则同时关注测井仪器的远探测和前探测效果。T1 与

R1、R2 的源距分别为 12 和 17 m, 仪器工作频率为 20 和 50 kHz, 当前层电阻率为 $100 \Omega \cdot m$, 邻层为 $1 \Omega \cdot m$ 。

不同井斜条件下的前探测视电阻率响应曲线如图 9 所示。界面位于零深度点, 前方低阻界面的存在使电阻率曲线发生变化, 此时测井响应包含了已钻地层和未钻地层信息, 可以通过单条曲线的变化和不同曲线之间的分离程度, 进行钻前地层结构的有效识别。另外, 需要说明的是, 实际应用时需要综合利用传统随钻电磁波电阻率、近钻头电阻率等测量仪器确定已钻地层和正钻地层的电阻率, 作为已知先验信息, 通过实时建模和反演确定未钻地层情况^[17]。

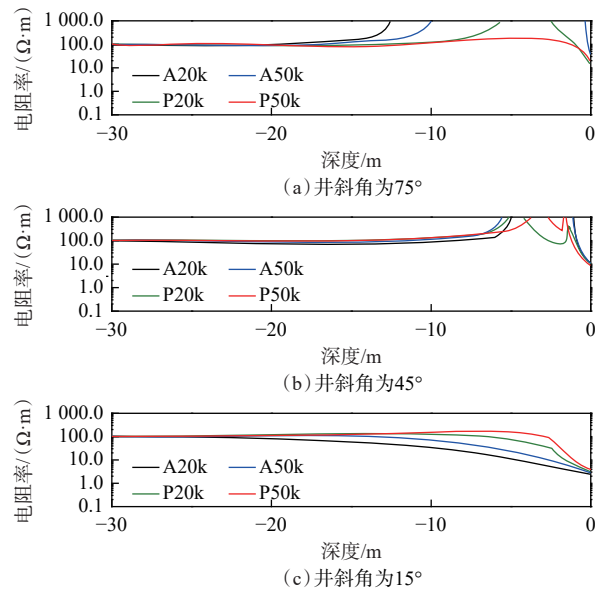


图 9 前探测视电阻率响应模拟结果

Fig.9 Simulated response results of apparent resistivity of undrilled formation

3 多尺度随钻方位电磁波测井实时反演

3.1 拟牛顿法反演理论

随钻电磁波测井资料反演可以转换为求实测数据与模拟响应的最小二乘问题, 通过不断迭代寻求二者的最小拟合差, 拟牛顿法简化了迭代过程中的雅克比矩阵计算环节, 可以提升资料反演效率。将随钻电磁波测井反演的代价函数定义为^[18-19]:

$$C = \|W(d^s(x) - d^m)\|^2 + \lambda \|x - x^{ref}\|^2 \quad (4)$$

式中: 等号后第一项为测井仪器响应模拟结果 d^s 与实测资料 d^{obs} 之差的 L_2 范数, x 为待反演参数向量, W 为权重矩阵; 等号后第二项为模型约束项, λ 为正

则化参数, \mathbf{x}^{ref} 为模型参考向量, 用于压制噪声, 降低反演过程中的矩阵病态问题。

对代价函数进行二阶泰勒展开, 忽略其中的二阶导数项, 可以得到:

$$C(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}) = C(\mathbf{x}) + \left[\mathbf{J}^T(\mathbf{x})(\mathbf{d}^s(\mathbf{x}) - \mathbf{d}^m) + \lambda(\mathbf{x} - \mathbf{x}^{\text{ref}}) \right] \cdot \Delta\mathbf{x} + \frac{1}{2} \Delta\mathbf{x}^T \cdot \left[\mathbf{J}^T(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{J}(\mathbf{x}) + \lambda \mathbf{I} \right] \cdot \Delta\mathbf{x} \quad (5)$$

式中: $\Delta\mathbf{x}$ 为扰动变量; \mathbf{J} 为雅可比矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵; 上标 T 代表转置。

在目标函数极值附近, 对于一个扰动 $\Delta\mathbf{x}$, 目标函数的变化量近似为 0, 即 $\frac{\partial C}{\partial \Delta\mathbf{x}} = 0$, 所以有:

$$\mathbf{J}^T(\mathbf{x})[\mathbf{d}^s(\mathbf{x}) - \mathbf{d}^m] + \lambda(\mathbf{x} - \mathbf{x}^{\text{ref}}) = \left[\mathbf{J}^T(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{J}(\mathbf{x}) + \lambda \mathbf{I} \right] \cdot \Delta\mathbf{x} \quad (6)$$

由此可得到第 k 次迭代步长满足的关系:

$$\Delta\mathbf{x}_k = \frac{\mathbf{J}^T(\mathbf{x}_k)[\mathbf{d}^s(\mathbf{x}_k) - \mathbf{d}^m] + \lambda_k(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_k^{\text{ref}})}{\left[\mathbf{J}^T(\mathbf{x}_k) \cdot \mathbf{J}(\mathbf{x}_k) + \lambda_k \mathbf{I} \right]^{-1}} \quad (7)$$

计算式 (7) 中的雅可比矩阵时需要大量迭代, 通过增加一个布罗依丹改进型一阶矩阵满足拟牛顿条件:

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + \left(\mathbf{d}_k^s - \mathbf{B}_k \Delta\mathbf{x}_k \right) \frac{[\Delta\mathbf{x}_k]^T}{[\Delta\mathbf{x}_k]^T [\Delta\mathbf{x}_k]} \quad (8)$$

令初始矩阵 $\mathbf{B}_0 = \mathbf{J}_0$, 利用式 (8) 通过逐次逼近代替雅可比矩阵。因此, 每次反演只需计算一次雅可比矩阵, 从而大大减少运算量。

3.2 反演结果分析

为了实现对地层电阻率的准确评价和界面的及时预测, 选用 1 条传统随钻电磁波电阻率曲线 (源距分别为 0.8128 和 1.0160 m、频率 400 kHz)、1 条超深电磁波电阻率 (源距分别为 12 和 17 m, 频率 20 kHz) 和 1 条超深定向电动势曲线 (源距 6 m, 频率 20 kHz) 参与多尺度随钻方位电磁波测井资料反演。

假设地层为双界面模型, 上、中、下地层电阻率分别为 1, 20 和 2 $\Omega \cdot \text{m}$, 层厚 20 m, 井斜角为 85°。3 条响应曲线最多只能反演 3 个参数, 所以采用单界面反演算法。为了验证反演算法的稳定性, 分别添加 0%, 10% 和 20% 的高斯白噪声。反演为逐点反演, 采用拟牛顿法反演得到二维窗帘图 (见图 10), 从中可以看出, 仪器在穿过界面时电阻率发生明显变化。

反演后的电阻率和界面与地层模型基本一致, 单界面反演程序只能反演出一个界面, 当测井仪器位于上界面的上方时, 其响应主要受上界面影响,

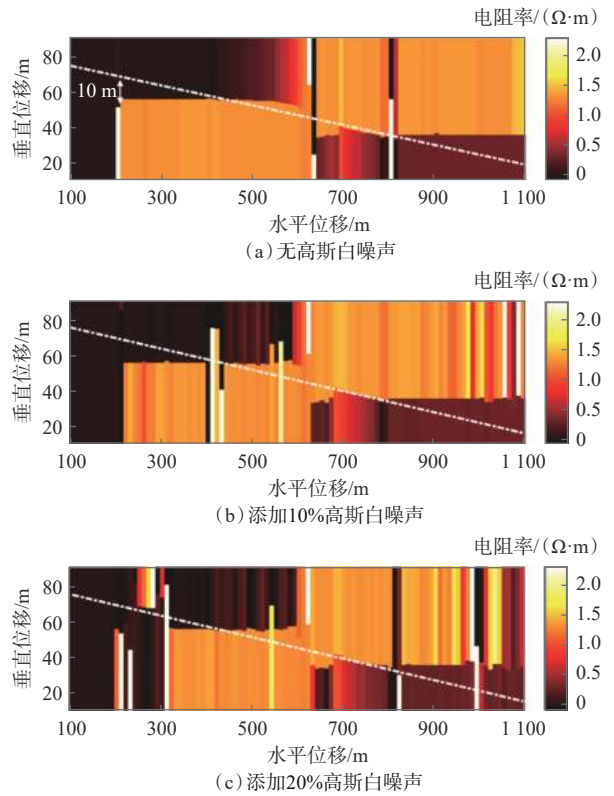


图 10 多尺度测井系统反演结果

Fig.10 Inversion results of multi-scale logging system

在电导性地层中采用多尺度测量结果的反演能够预测 10 m 内的地层界面以及上、中地层的电阻率。当测井仪器进入中间电阻性地层后, 对于超深电阻率和方位电动势响应同时受上、下界面的影响, 单界面反演程序反演界面距离精度下降, 测井仪器离开下界面后, 测井仪器响应主要受下界面影响, 反演得到下界面位置以及中、下地层的电阻率。噪声及测量不准确会造成反演结果波动, 噪声越大则反演结果波动越大, 但基本不影响对地层界面的预测和判断。

4 结 论

1) 超深随钻方位电磁波测井与随钻方位电磁波测井组合形成的多尺度随钻方位电磁波测井系统, 可以满足近远井不同范围内的地质预测、地质导向和油藏描述等功能要求, 最大探测范围接近 30 m。

2) 超深随钻方位电磁波测井对地层电阻率的探测可基于倾斜发射与轴向双接收天线结构, 通过钻铤旋转还可以进行井周 360° 方位电阻率成像; 超深随钻方位电磁波测井对地层边界的远探测主要通过水平发射与远端轴向接收天线来实现, 同时倾斜发

射、轴向接收时提供的地质信号也具备方位探测能力,从而极大地丰富了仪器测量信息。

3)采用倾斜发射与轴向双接收天线可以探测不同井斜角条件下的地层电阻率,通过分析地层电阻率的变化,能够实现对钻前地层界面的有效识别。

4)通过反演可以呈现地层模型与井眼轨迹的相对位置关系,但反演结果受曲线选择及噪声影响,需继续进行多界面反演算法及影响因素研究,提高多尺度探测系统的实际应用能力。

参 考 文 献

References

- [1] SEYDOUX J, LEGENDRE E, MIRTO E, et al. Full 3D deep directional resistivity measurements optimize well placement and provide reservoir-scale imaging while drilling[R]. SPWLA-2014-LLLL, 2014.
- [2] YUAN Xiyong, DENG Shaogui, LI Zhiqiang, et al. Deep-detection of formation boundary using transient multicomponent electromagnetic logging measurements[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(3): 1085–1098.
- [3] WU Zhenguan, FAN Yiren, WANG Jiawei, et al. Application of 2.5-D finite difference method in logging-while-drilling electromagnetic measurements for complex scenarios[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(4): 577–581.
- [4] OMERAGIC D, LI Q, CHOU L, et al. Deep directional electromagnetic measurements for optimal well placement[R]. SPE 97045, 2005.
- [5] BITTAR M, KLEIN J, BESTE R, et al. A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2009, 12(2): 270–279.
- [6] LI Shanjun, CHEN Jiefu, BINFORD T L, Jr, et al. Using new LWD measurements to evaluate formation resistivity anisotropy at any dip angle[R]. SPWLA-2014-EEEE, 2014.
- [7] 杨震, 杨锦舟, 韩来聚, 等. 随钻方位电磁波界面探测性能分析[J]. *石油学报*, 2016, 37(7): 930–938.
YANG Zhen, YANG Jinzhou, HAN Laiju, et al. Interface detection performance analysis of azimuthal electromagnetic while drilling[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(7): 930–938.
- [8] 杨震, 杨锦舟, 韩来聚. 随钻方位电磁波电阻率成像模拟及应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43(6): 2035–2043.
YANG Zhen, YANG Jinzhou, HAN Laiju. Numerical simulation and application of azimuthal propagation resistivity imaging while drilling[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2013, 43(6): 2035–2043.
- [9] 刘乃震, 王忠, 刘策. 随钻电磁波传播方位电阻率仪地质导向关键技术[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(5): 1767–1775.
LIU Naizhen, WANG Zhong, LIU Ce. Theories and key techniques of directional electromagnetic propagation resistivity tool for geosteering applications while drilling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(5): 1767–1775.
- [10] 岳喜洲, 刘天淋, 李国玉, 等. 随钻方位电磁波测井响应快速正演方法与地质导向应用[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(5): 1909–1920.
YUE Xizhou, LIU Tianlin, LI Guoyu, et al. An analytically fast forward method of LWD azimuthal electromagnetic measurement and its geo-steering application[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(5): 1909–1920.
- [11] WU H H, GOLLA C, PARKER T, et al. A new ultra-deep azimuthal electromagnetic LWD sensor for reservoir insight[R]. SPWLA-2018-X, 2018.
- [12] HARTMANN A, VIANNA A, MAURER H M, et al. Verification testing of a new extra-deep azimuthal resistivity measurement[R]. SPWLA-2014-MM, 2014.
- [13] 张盼, 邓少贵, 胡旭飞, 等. 超深随钻方位电磁波测井探测特性及参数敏感性分析[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(6): 2210–2219.
ZHANG Pan, DENG Shaogui, HU Xufei, et al. Detection performance and sensitivity of logging-while-drilling extra-deep azimuthal resistivity measurement[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(6): 2210–2219.
- [14] 肖加奇, 张国艳, 洪德成, 等. 层状各向异性地层中三维感应测井响应快速计算及资料处理[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(2): 696–706.
XIAO Jiaqi, ZHANG Guoyan, HONG Decheng, et al. Fast forward modeling and data processing of 3D induction logging tool in layered anisotropic formation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(2): 696–706.
- [15] 魏宝君, 田坤, 张旭, 等. 定向电磁波传播随钻测量基本理论及其在地层界面预测中的应用[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(10): 2507–2515.
WEI Baojun, TIAN Kun, ZHANG Xu, et al. Physics of directional electromagnetic propagation measurements-while-drilling and its application for forecasting formation boundaries[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(10): 2507–2515.
- [16] 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.
- [17] SEYDOUX J, DENICHOUS J M, AMIR I, et al. Real-time EM look-ahead: A maturing technology to decrease drilling risk in low inclination wells[R]. SPWLA-2019-GGGG, 2019.
- [18] 胡旭飞, 范宜仁, 吴非, 等. 随钻方位电磁波测井多参数快速反演[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(11): 4690–4701.
HU Xufei, FAN Yiren, WU Fei, et al. Fast multiple parameter inversion of azimuthal LWD electromagnetic measurement[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(11): 4690–4701.
- [19] 王磊, 刘英明, 王才志, 等. 水平井随钻电磁波测井实时正反演方法[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(1): 139–147.
WANG Lei, LIU Yingming, WANG Caizhi, et al. Real-time forward modeling and inversion of logging-while-drilling electromagnetic measurements in horizontal wells[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 139–147.