

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413583

基于全相位频谱分析的电阻率测井电磁响应特性研究^{*}

席 瑜, 寇 科, 杨夏雨, 宋泽伟, 杨映天

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

摘要:为探究电磁波电阻率测井响应的影响因素,对常规电磁波电阻率测井信号进行数值模拟,分析了线圈工作频率、线圈源距和线圈间距对常规电磁波电阻率测井信号幅值比和相位差的影响规律。同时,建立了一个3层水平地层模型,对方位电磁波电阻率测井信号进行数值模拟,推导并计算该地层模型下任意地层中的电磁场分布,分析方位电阻率测井响应与地层边界之间的关系。此外,搭建单发双收线圈结构的电阻率测井电磁响应实验模型,采集了相关信号数据,运用全相位频谱分析方法计算电阻率测井信号的幅值比和相位差数据,分析不同线圈参数与幅值比和相位差的影响规律,并与前期的数值模拟进行对比验证。结果表明:数值模拟与实验计算的响应规律保持一致。具体而言,在地层电阻率保持不变时,幅值比信号随着线圈工作频率、线圈间距的增大而增大,但随着线圈源距的增大而减小;而相位差信号均随着线圈工作频率、线圈源距及线圈间距的增大而增大。通过采用全相位频谱分析方法分析线圈不同因素的影响规律,对电阻率测井中电磁响应特性进行研究,可以获取更真实、准确的地层电阻率和界面信息,更有效地支持测井数据处理和实时地质导向。

关键词:全相位频谱分析;电阻率;电磁响应

中图分类号: TH89 TH763 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 40

Research on electromagnetic response characteristics of resistivity logging based on all-phase spectrum analysis

Xi Yu, Kou Ke, Yang Xiayu, Song Zewei, Yang Yingtian

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To explore the factors influencing the electromagnetic wave resistivity logging response, numerically simulations are performed on conventional electromagnetic wave resistivity logging signals. The effects of coil operating frequency, coil source distance, and coil spacing on the amplitude ratio and phase difference of the resistivity logging signal are analyzed. A three-layer horizontal formation model is established to simulate the azimuth electromagnetic wave resistivity logging signal. The electromagnetic field distribution in any formation under this model is deduced and calculated, and the relationship between the azimuth logging response and formation boundaries is analyzed. Additionally, an experimental model with a single transmitter and dual receivers for resistivity logging electromagnetic response is constructed. Relevant signal data are collected, and the amplitude ratio and phase difference of the resistivity logging signals are computed using the all-phase spectrum analysis method. The influence of different coil parameters on the amplitude ratio and phase difference is analyzed, and the results are compared with the previous numerical simulations for validation. The results show that the numerical simulation aligns well with the experimental response behavior. Specifically, when the formation resistivity remains constant, the amplitude ratio increases with the coil operating frequency and coil spacing, but decreases as the coil source distance increases. Conversely, the phase difference increases with the rise in coil operating frequency, coil source distance, and coil spacing. By applying the all-phase spectrum analysis method, the study provides more realistic and accurate formation resistivity and interface information, which can more effectively support logging data processing and real-time geological steering.

Keywords: all-phase spectrum analysis; resistivity; electromagnetic response

0 引言

我国作为世界上最大的能源消费国之一,对石油资源的需求日益增加,尽管石油产量逐年增加,但受地质条件的限制,油气资源分布散、密度小、地层结构复杂、开采难度大^[1-2],传统的电缆测井已经很难满足需求^[3],因此需要加速发展石油资源勘探技术。测井技术就是利用仪器测量地层岩石物理参数,如地层电阻率、介电常数等,来推断地层结构性质的一种技术^[4]。电磁波电阻率测井技术是石油测井技术中的重要组成部分,相比于传统的测井方法,它能提供更丰富准确的地层信息,具有较高的分辨率,能实时反映地层信息实现地质导向功能,尤其适合复杂地层的探测。

国外各大石油公司如斯伦贝谢、贝克休斯和哈里伯顿^[5-7]等,电磁波电阻率测井技术发展显著,能够更好的识别地层界面及电阻率各向异性等信息,具备更深的探测深度,能精确实现地质导向功能^[8]。从工作频率上,完成了从单频到多频的发展;从线圈结构上,实现了从轴向线圈到倾斜线圈的发展^[9-10]。受技术条件的限制,我国在电磁波电阻率测井技术的研究上开始较晚,不管是基础理论研究,还是仪器研制,与国外的先进技术相比都有着较大差距。直到 20 世纪 90 年代,中国石油集团才从哈里伯顿公司引进我国首套随钻测井仪器^[11]。在学习国外先进技术的基础上,国内东北石油大学、中国石油大学等研究机构对理论研究和仪器研制开展了深入研究。2003 年其木苏荣等^[12-13]给出了倾斜井眼中 TE(transverse electric)、TM(transverse magnetic) 波的分解方法,确定了各介质层中电磁场的解析解;2006 年刘之的^[14]基于麦克斯韦方程,推导了电阻率测井模拟的时域有限差分算法;2007 年魏宝君等^[15]推导了径向层均匀介质中的井矢 Green 函数,从而得到电磁波电阻率测井仪器的磁场分布和响应特征;2010 年范存^[16]递推了各向异性层状介质的井矢 Green 函数,对电磁波电阻率测井响应进行分析,主要分析了各向异性和相对倾角的影响;2012 年胜利钻井院成功开展了随钻多频补偿电磁波电阻率测井仪的自主研制试验^[4];2014 年中油长城钻探公司推出了国内首支自主研发的随钻方位电磁波电阻率测井仪器^[17],这标志着国内电磁波电阻率测井技术取得了显著进展。但与国外相比,我国在仪器性能和测井评价效果仍存在较大差距,故而对电磁波电阻率测井技术开展深入研究极为必要。

本文开展电阻率测井电磁响应特性研究,对常规电磁波电阻率测井信号进行数值模拟,推导了其幅值比和相位差信号的表达式,分析了不同的线圈参数对幅值比和相位差信号的影响规律,如工作频率、源距和间距。同

时,基于 3 层水平地层对方位电磁波电阻率测井信号进行数值模拟,分析方位幅值比响应与地层边界的关系;并搭建电阻率测井电磁响应实验模型,采用全相位频谱分析方法计算其幅值比和相位差数据,分析不同线圈参数影响规律,并与之前的数值模拟进行对比验证。通过对电阻率测井电磁响应特性进行研究,可以快速准确的对测井响应进行提取,帮助识别不同类型的地层特性,判断其储层的性质和分布,获取真实准确的地层信息,实现地质导向功能,优化钻井位置和开发策略,更好的进行地层评价。

1 电阻率测井响应数值模拟

1.1 电阻率测井基本原理

电阻率测井是基于电磁波在介质中的传播效应,通过发射线圈向地层发射一定频率的电磁波,电磁波在穿过地层的传播过程中受到的损耗不同,表现在幅值的衰减和相位的偏移,其大小与作为传播介质的地层特性有关。通过测量两接收线圈处测量信号感应电动势的大小^[17-19],计算其幅值比和相位差,经过进一步转换就可以获得地层电阻率和地层方位信息,达到探测地层特性的目的。

电阻率测井仪器主要由发射线圈、接收线圈和控制单元组成。收发线圈间的距离为线圈源距 L ,接收线圈之间的距离为线圈间距 ΔL ,如图 1 电磁波频率图所示,电阻率测井的工作频率一般在 0.4~10 MHz,在这个频率段内电阻率效应明显,介电效应可以忽略不计。

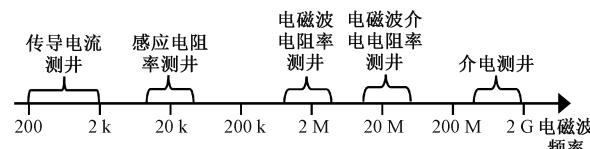


图 1 电磁波频谱

Fig. 1 Electromagnetic wave spectrum

电阻率测井响应特性主要由发射信号频率、线圈源距、线圈间距以及线圈倾斜角决定。通过对电阻率测量信号进行数值模拟可以研究不同线圈参数的影响规律^[20-21],有助于获取更真实准确的地层特性,实现地质导向功能。

1.2 常规电阻率测井数值模拟

常规电阻率测井仪器最基本的结构包括 1 个发射线圈和 2 个接收线圈,线圈均为轴向设置,如图 2 所示。

两接收线圈在均匀介质中的感应电动势如式(1)所示。

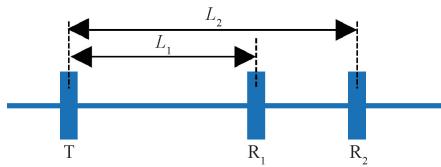


图2 常规电阻率测井仪器基本结构

Fig. 2 Basic structure of the conventional resistivity logging instrument

$$V_j = -iC \frac{e^{-ikL_j}}{L_j^3} (1 + ikL_j), \quad j = 1, 2 \quad (1)$$

式中: $C = \frac{\omega\mu S^2 n_r n_r I}{2\pi}$, 其中 ω 为接收线圈工作频率, μ 为磁导率, S 为线圈的面积, n_r, n_t 分别是收发线圈的匝数, I 为发射电流的大小; L_j 为线圈源距; k 为传播常数, $k = \alpha - i\beta$, 其中 α, β 分别是幅值衰减系数和相位衰减系数, 具体表达式如式(2) 和(3) 所示^[22]。

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{1}{2}\mu \left(\sqrt{\varepsilon^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2}} + \varepsilon \right)} \quad (2)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{1}{2}\mu \left(\sqrt{\varepsilon^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2}} - \varepsilon \right)} \quad (3)$$

进而可以得到两接收线圈测量信号幅值比和相位差的表达式, 如式(4) 和(5) 所示。

$$EATT = 20 \lg \frac{|V_1|}{|V_2|} = 10 \{ \lg [(\alpha L_1)^2 + (1 + \beta L_1)^2] - \lg [(\alpha L_2)^2 + (1 + \beta L_2)^2] \} + 60(\lg L_2 - \lg L_1) + 8.686\beta(L_2 - L_1) \quad (4)$$

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \alpha(L_2 - L_1) + \arctan \frac{1 + \beta L_2}{\alpha L_2} - \arctan \frac{1 + \beta L_1}{\alpha L_1} \quad (5)$$

两接收线圈处的幅值比、相位差信号进行数值模拟, 首先建立两种不同工作频率下地层电阻率与幅值比、相位差之间的响应曲线。根据 1.1 节提到的电磁波电阻率测井的工作频率范围一般为 0.4~10 MHz, 选取 2 个典型频率: 500 kHz 和 2 MHz, 并绘制了 2 个接收线圈感应电动势的幅值比和相位差随地层电阻率变化的响应曲线, 如图 3 所示。其中源距 $L_1 = 0.803$ m, $L_2 = 1.006$ m。

从图 3 可以看出, 幅值比、相位差与地层电阻率呈单调递减趋势; 其次当线圈源距、间距、地层电阻率均相同时, 2 MHz 下的幅值比、相位差信号均大于 500 kHz 下的幅值比、相位差信号, 这表明, 高频电磁波在地层传播时, 其幅值衰减和相位变化更为显著。

接下来将研究线圈源距对均匀介质中普通电磁波电阻率测井信号的影响规律。图 4 描绘了 2 MHz 的固

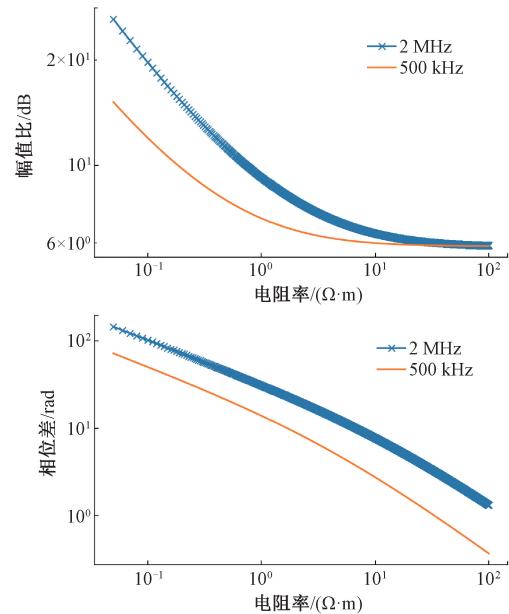


图3 不同频率下地层电阻率与幅值比和相位差的响应曲线

Fig. 3 Response curves of formation resistivity versus amplitude ratio and phase difference at different frequencies

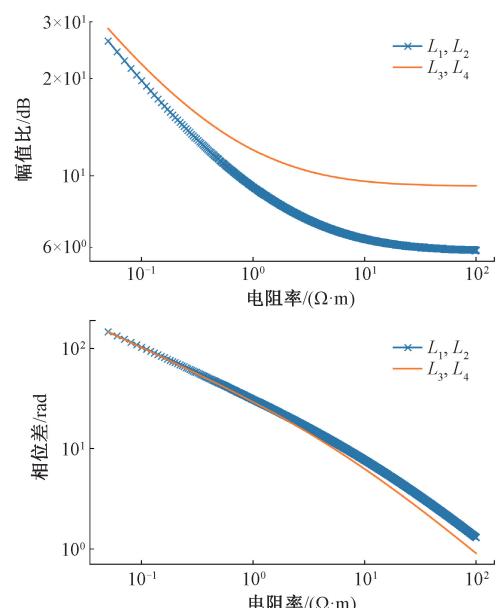


图4 不同源距下地层电阻率与幅值比和相位差的响应曲线

Fig. 4 Response curves of formation resistivity versus amplitude ratio and phase difference at different source distances

定频率下, 不同线圈源距对应的幅值比和相位差随地层电阻率变化的响应曲线。其中源距 $L_1 = 0.803$ m, $L_2 = 1.006$ m, $L_3 = 0.473$ m, $L_4 = 0.676$ m。

从图 4 可以看出, 幅值比、相位差信号均随地层电阻率的增大而减小, 与之前的变化规律相同; 其次当信号频率、地层电阻率、间距相同时, 幅值比随源距的增大而减

小,相位差随源距的增大而增大。

最后,将探讨线圈间距对均匀介质中普通电磁波电阻率测井信号的影响规律。图 5 呈现了 2 MHz 的固定频率下,不同线圈间距对应的幅值比和相位差随地层电阻率变化的响应曲线。其中,线圈源距分别为 $L_1 = 0.473$ m、 $L_2 = 0.778$ m、 $L_3 = 0.524$ m、 $L_4 = 0.727$ m, 线圈间距分别为 $\Delta L_1 = 0.321$ m、 $\Delta L_2 = 0.219$ m。

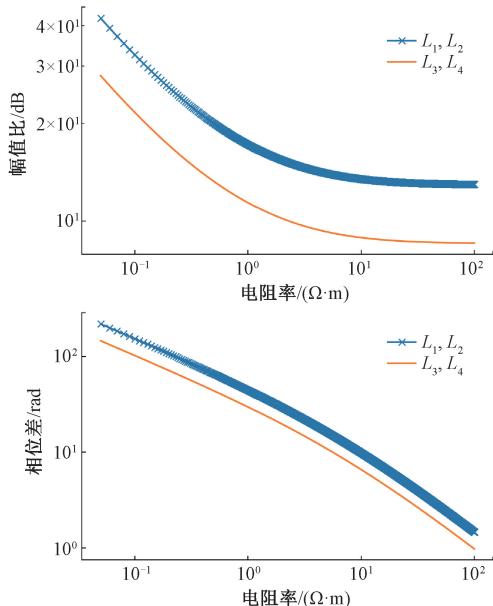


图 5 不同间距下地层电阻率与幅值比和相位差的响应曲线

Fig. 5 Response curves of formation resistivity versus amplitude ratio and phase difference at different coil spacings

从图 5 可以看出,幅值比、相位差信号均随地层电阻率的增大而减小,与之前的变化规律相同;其次当信号频率、地层电阻率、源距相同时,幅值比、相位差信号均随间距的增大而增大。

1.3 方位电阻率测井数值模拟

方位电阻率测井仪器最基本的结构包括 1 个发射线圈和 1 个接收线圈,属于单发单收的双线圈系,与常规电阻率仪器不同的是存在线圈倾斜,如图 6 所示。

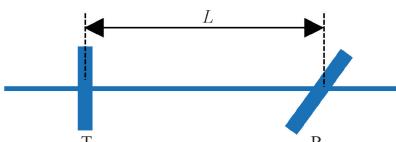


图 6 方位电阻率测井仪器基本结构

Fig. 6 Basic structure of the azimuthal resistivity logging instrument

方位测量信号感应电动势可以用式(6)表示为:

$$V = i\omega\mu H_p NS = a_0 + a_1 \cos \varphi + b_1 \sin \varphi + a_2 \cos(2\varphi) + b_2 \sin(2\varphi) \quad (6)$$

式中: ω 为角频率,与线圈工作频率有关; μ 为磁导率; H_p 为磁场强度; N 为匝数; S 为线圈面积; φ 为方位角。

感应电动势随着方位角时刻变化,因此测量信号具有方位特性。若不存在线圈倾斜,则含有方位角各项的系数均为 0,只存在 a_0 , 测量信号就不具备方位信息^[23]。同时由于一般情况下只存在 1 个线圈倾斜,且只考虑在 xz 方向钻进,感应电动势可进一步简化为式(7):

$$V = a_0 + a_1 \cos \varphi \quad (7)$$

从式(7)可以看出当方位角为 0° 和 180° 时,感应电动势的值差别最大,因此将方位角为 0° 和 180° 定义为可进行方位测量的方位幅值比和方位相位差信号,具体表达式见式(8)和(9)。

$$\text{Att} = -10 \log \times \frac{[\text{Re}(a_0) + \text{Re}(a_1)]^2 + [\text{Im}(a_0) + \text{Im}(a_1)]^2}{[\text{Re}(a_0) - \text{Re}(a_1)]^2 + [\text{Im}(a_0) - \text{Im}(a_1)]^2} \quad (8)$$

$$PS = \tan^{-1} \times$$

$$\frac{\text{Im}(a_0) + \text{Im}(a_1)}{\text{Re}(a_0) + \text{Re}(a_1)} - \tan^{-1} \frac{\text{Im}(a_0) - \text{Im}(a_1)}{\text{Re}(a_0) - \text{Re}(a_1)} \quad (9)$$

建立如图 7 所示的 3 层水平地层模型^[24],包括围岩层和目的层,自上而下地层电阻率分别设置为 $2\Omega\cdot\text{m}$ 、 $20\Omega\cdot\text{m}$ 、 $2\Omega\cdot\text{m}$,地层厚度均设置为 5 m,线圈的工作频率为 2 MHz,以 50° 井斜角穿过目的层,对单发单收的方位电阻率测井响应进行数值模拟,发射线圈位置在接收线圈上方。

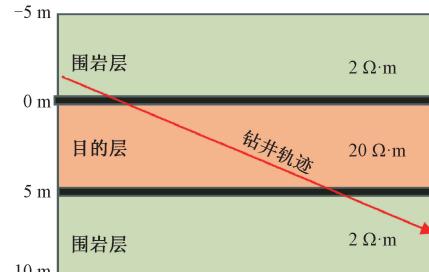


图 7 3 层水平地层模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the three-layer horizontal formation model

在穿过如图 7 所示的 3 层水平地层时,线圈位置存在 5 种情况:初始状态下发射线圈和接收线圈均在第 1 围岩层;接着接收线圈率先进入第 2 目的层,此时发射线圈可能在第 1 和第 2 层;随着继续向下深入,接收线圈进入第 3 围岩层,由于设置的线圈距离小于地层厚度,所以发射线圈只可能在第 2 和第 3 层。只要求得各介质层中的电磁场分布,就可以获得该地层模型下的方位电阻率测井响应。

电阻率测井基于电磁感应原理,而麦克斯韦方程组就是描述电场、磁场与电荷密度、电流密度之间的关系式。柱坐标下的麦克斯韦方程如式(10)~(13)所示。

$$-\frac{\partial E_\varphi}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} = i\omega \mu H_\rho \quad (10)$$

$$\frac{\partial E_\rho}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial \rho} = i\omega \mu H_\varphi \quad (11)$$

$$-\frac{\partial H_\varphi}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} = -i\omega \epsilon^* E_\rho \quad (12)$$

$$\frac{\partial H_\rho}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial \rho} = -i\omega \epsilon^* E_\varphi \quad (13)$$

经过一系列变换,可以得到式(14)、(15),即:

$$\begin{pmatrix} E_\rho \\ E_\varphi \end{pmatrix} = \frac{1}{\lambda^2} \left\{ \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial \varphi \partial z} \\ -\frac{\partial^2}{\partial \rho \partial z} \end{pmatrix} E_z + i\omega \mu \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} \\ -\frac{\partial}{\partial \rho} \end{pmatrix} H_z \right\} \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} H_\rho \\ H_\varphi \end{pmatrix} = \frac{1}{\lambda^2} \left\{ \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial \varphi \partial z} \\ -\frac{\partial^2}{\partial \rho \partial z} \end{pmatrix} H_z - i\omega \epsilon^* \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} \\ -\frac{\partial}{\partial \rho} \end{pmatrix} E_z \right\} \quad (15)$$

其中, $\lambda^2 = \omega^2 \mu \epsilon^* - k_z^2$, ϵ^* 为复介电常数,由此可以得到电磁波场的水平分量表达式,如式(16)~(19)所示。

$$E_\rho = \frac{1}{\lambda^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \rho \partial z} E_z + i\omega \mu \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} H_z \right) \quad (16)$$

$$E_\varphi = \frac{1}{\lambda^2} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial \varphi \partial z} E_z - i\omega \mu \frac{\partial}{\partial \rho} H_z \right) \quad (17)$$

$$H_\rho = \frac{1}{\lambda^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \rho \partial z} H_z - i\omega \epsilon^* \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} E_z \right) \quad (18)$$

$$H_\varphi = \frac{1}{\lambda^2} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial \varphi \partial z} E_z - i\omega \epsilon^* \frac{\partial}{\partial \rho} E_z \right) \quad (19)$$

从中可以看出,只要求得任意介质层中的 TE 波和 TM 波,就可以得到整个电磁波场的分布^[25-26]。

可以将 TE 波和 TM 波写成式(20)和(21),即:

$$H_{nz} = \frac{1}{4\pi} \left(M_x \cos \varphi \frac{d}{dz} |z - z_T| \int_0^\infty \lambda^2 J_1(\rho \lambda) F_{nz}(z) d\lambda + iM_z \int_0^\infty \frac{\lambda^3}{k_{nz}} J_0(\rho \lambda) F_{nz}(z) d\lambda \right) \quad (20)$$

$$E_{nz} = -\frac{\omega \mu}{4\pi} M_x \sin \varphi \frac{d}{dz} |z - z_T| \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{k_{nz}} J_1(\rho \lambda) F_{nz}(z) d\lambda \quad (21)$$

根据之前分析的线圈位置、电磁波反射和透射规律及地层边界条件,可以得到穿过图 7 这 3 层水平地层模型时的传播函数 $F(z)$,如式(22)~(26)所示。

$$F_1(z) = e^{ik_{1z}(z-z_T)} + R_{12} e^{ik_{1z}(2h_1-z-z_T)} \quad (22)$$

$$F_2(z) = \frac{T_{12}}{1 - R_{21} e^{2ik_{2z}(h_2-h_1)}} [e^{ik_{2z}(z-h_1)} + R_{23} e^{ik_{2z}(2h_2-z-h_1)}] \quad (23)$$

$$F_3(z) = \frac{[e^{ik_{2z}(2h_2-h_1-z_T)} + R_{21} e^{ik_{2z}(2h_2-3h_1-z_T)}] [e^{ik_{2z}(z-h_2)} + R_{23} e^{ik_{2z}(h_2-z)}]}{1 - R_{21} R_{23} e^{2ik_{2z}(h_2-h_1)}} \quad (24)$$

$$F_4(z) = \frac{T_{23} e^{ik_{3z}(z-h_2)} [e^{ik_{2z}(2h_2-h_1-z_T)} + R_{21} e^{ik_{2z}(2h_2-3h_1-z_T)}]}{1 - R_{21} R_{23} e^{2ik_{2z}(h_2-h_1)}} \quad (25)$$

$$F_5(z) = e^{ik_{3z}(z-z_T)} + R_{23} e^{ik_{3z}(z-2h_2+z_T)} \quad (26)$$

将传播函数(22)~(26)代入到式(20)和(21),即可得到各介质层中电磁场的垂直分量,接着代入式(16)~(19)可以得到各介质层中的水平分量,进而得到方位电阻率测井响应。如图 8 所示为接收线圈处方位测井的响应曲线。

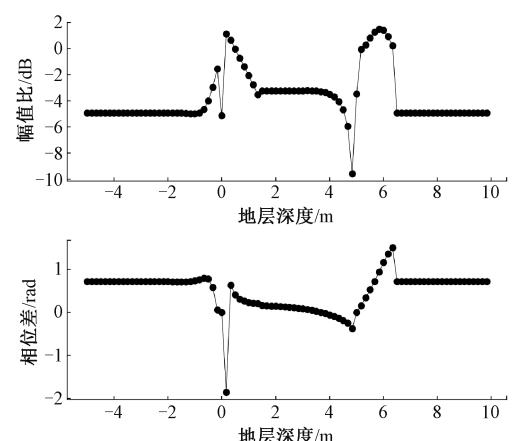


图 8 方位测井的响应曲线

Figure 8 Response curve of azimuthal resistivity logging

从图 8 中可以看出:方位幅值比响应曲线有些杂乱,在改变参数时曲线形状会发生变化,但响应曲线在地层边界处变化最明显的特征保持不变,具有指示地层边界的作用。在远离地层边界处方位幅值比信号变化缓慢,随着越来越靠近地层边界,方位幅值比信号变化逐渐明显,直至在地层边界处其达到了峰值。由此可以更好的反映出地层方位信息,判断地层边界从而实现地质导向功能^[27-28]。

2 电阻率测井电磁响应实验研究

电磁波电阻率测井响应会受到仪器参数的影响。因此有必要分析和总结仪器参数变化对测井响应的影响规律,以便获取更真实和准确的地层信息。

为此搭建了一个基于单发双收线圈结构的电阻率测井电磁响应实验模型^[29-32],如图 9 所示。

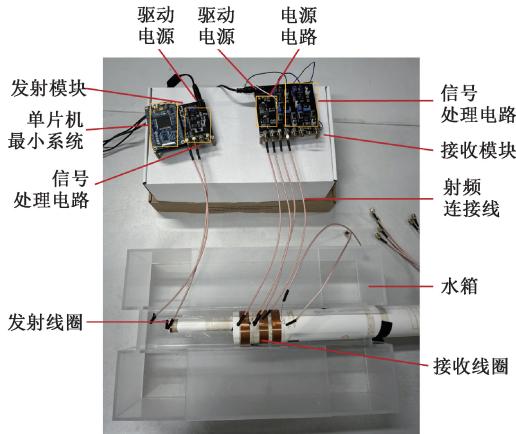
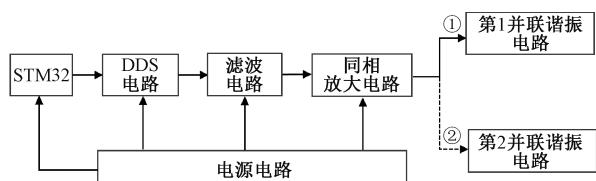


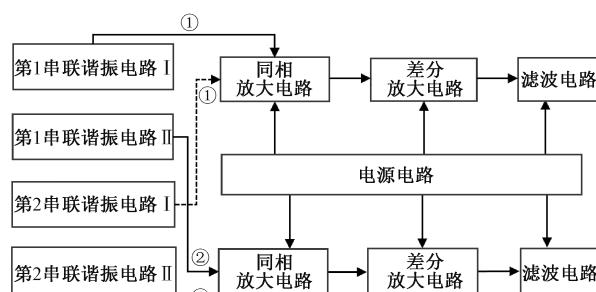
图 9 电阻率测井响应实验模型

Fig. 9 Experimental model of resistivity logging response

电阻率测井电磁响应实验模型主要由发射模块和接收模块组成^[33-36],两模块的基本结构如图 10 所示。



(a) Schematic diagram of the basic structure of the transmitter module



(b) Schematic diagram of the basic structure of the receiving module

图 10 电阻率测井电磁响应系统的结构组成

Fig. 10 Structural composition of the resistivity logging electromagnetic response system

发射模块的主要功能是生成稳定的正弦信号,而接收模块则负责对感应到的微弱电磁波信号进行处理,包

括放大和滤波等操作。在图 10 所示的电阻率测井电磁响应系统的结构中,标记①与②分别对应仪器内部两组独立的频率通道。之后通过射频连接线将线圈接入到电阻率测井电磁响应电路中,采集并计算两接收线圈处测量信号的幅值比、相位差信号,改变线圈的工作频率、源距、间距等因素来研究幅值比和相位差的影响规律。

相较于采用传统的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)谱分析计算信号的幅值和相位,全相位谱分析^[37-39]展现出优越的性能,其频谱泄露极低且能准确反映出信号的初始相位。与 FFT 谱分析相比,全相位谱分析在 FFT 变换之前加入了数据预处理,将原本长度为 $2N-1$ 的数据段变成长度为 N 的数据段。如图 11 所示是全相位快速傅里叶变换(all-phase fast Fourier transform, apFFT)谱分析的流程图^[40]。

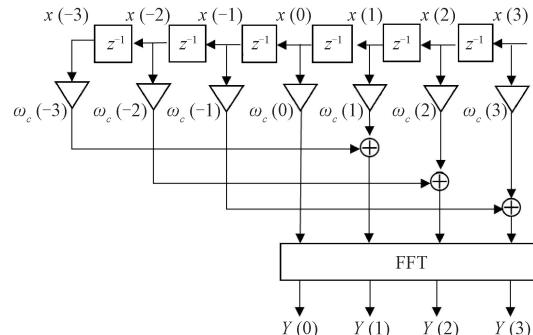


图 11 apFFT 谱分析流程($N=4$)

Fig. 11 Flowchart of the apFFT spectral analysis ($N=4$)

采用全相位时移相位差法计算信号的幅值和相位,其流程如图 12 所示。

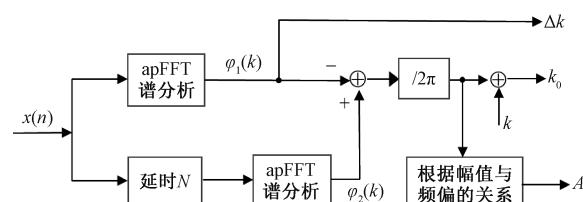


图 12 全相位时移相位差法流程

Fig. 12 Flowchart of the all-phase time-shift phase-difference method

在采样数据中取出两段长度均为 $2N-1$ 且存在延时为 N 的数据段,分别进行全相位谱分析,得到相位值 $\varphi_1(k)$ 和 $\varphi_2(k)$ 。由于 apFFT 计算的相位范围为 $[-\pi, \pi]$,会造成相位模糊,因此需要对其进行校正补偿相位模糊。同时全相位频谱分析方法本身就具有初始相位不变的性质,具有抗干扰的特点。之后再根据幅值校正公式计算幅值。频率偏移量 Δk 和幅值由式(27)、(28)所示。

$$\Delta k = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} [\varphi_2(k) - \varphi_1(k)], & \varphi_1(k) \in [-\pi, \pi] \\ \frac{1}{2\pi} [\varphi_2(k) - \varphi_1(k) - 1], & \varphi_1(k) \in (\pi, 2\pi) \\ \frac{1}{2\pi} [\varphi_2(k) - \varphi_1(k) + 1], & \varphi_1(k) \in (-2\pi, -\pi) \end{cases} \quad (27)$$

$$A = \frac{2Y(k)}{\left[\frac{\sin(\Delta k \pi)}{\sin(\Delta k \pi)/N} \right]^2} \quad (28)$$

利用示波器采集电路系统中2个接收线圈的感应电动势,采用全相位时移相位差法,根据式(27)、(28)计算其幅值比和相位差。接下来,将通过调整线圈参数来探究不同参数对幅值比和相位差的影响规律^[41]。

2.1 工作频率的影响

为了研究工作频率对普通电阻率测井响应的影响,选择了2种工作频率:500 kHz和2 MHz。随后依次计算了10组两接收线圈处的幅值比、相位差数据,如图13所示。

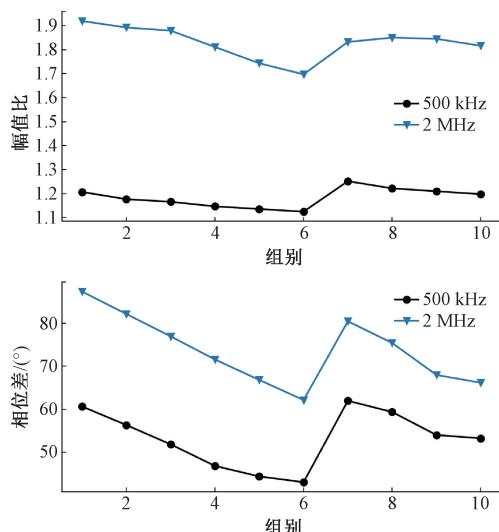


图13 不同频率下的实验结果

Fig. 13 Experimental results at different frequencies

从图13中可以看出,幅值比、相位差信号受到工作频率的影响,频率越大,幅值比、相位差信号越大。

2.2 线圈源距的影响

为了研究源距对普通电阻率测井响应的影响,依次计算了2 MHz时6组不同源距下两接收线圈处测量信号的幅值比、相位差数据,源距分别是7~12 cm,每组源距间隔1 cm,每组状态下间距均设置为4 cm,如图14所示。

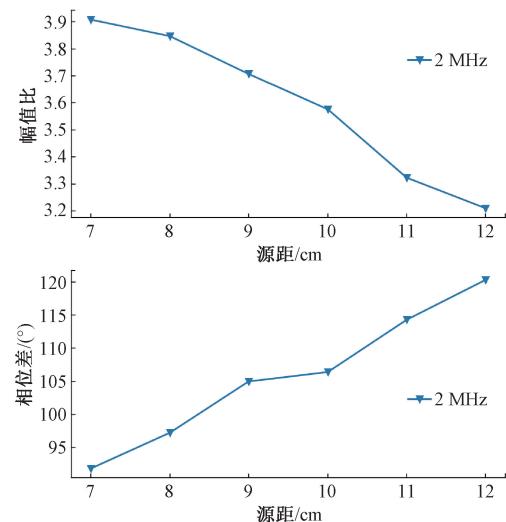


图14 2 MHz不同源距下的实验结果

Fig. 14 Experimental results at different source distances at 2 MHz

从图14中可以看出,在2 MHz时幅值比、相位差受到线圈源距的影响,幅值比与源距基本上呈现单调递减趋势,而相位差与线圈源距基本上呈现单调递增趋势。

同时也依次计算了500 kHz时6组不同源距下两接收线圈处测量信号的幅值比、相位差数据,源距分别是8~10.5 cm,每组源距间隔0.5 cm,每组状态下间距均设置为5 cm,如图15所示。

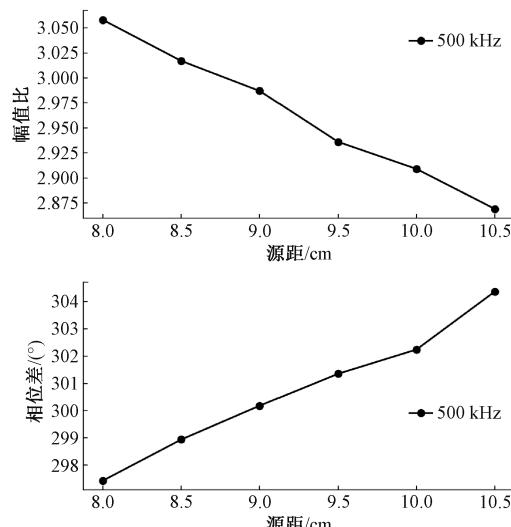


图15 500 kHz不同源距下的实验结果

Fig. 15 Experimental results at different source distances at 500 kHz

从图15中可以看出,在500 kHz工作频率下幅值比、相位差信号同样受到线圈源距的影响,与2 MHz下的影响规律相同。

2.3 线圈间距的影响

为了研究间距对普通电阻率测井响应的影响,依次计算了 2 MHz 时 5 组不同间距下两接收线圈处测量信号的幅值比、相位差数据,间距分别是 4~8 cm,每组间距间隔 1 cm,每组状态下源距均设置为 10 cm,如图 16 所示。

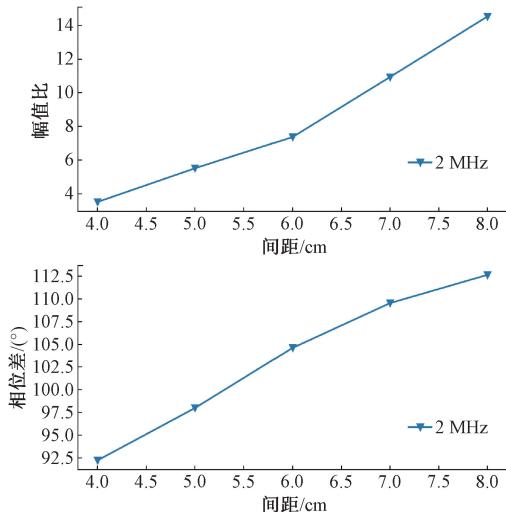


图 16 2 MHz 不同线圈间距的实验结果

Fig. 16 Experimental results at different coil spacings at 2 MHz

从图 16 中可以看出,在 2 MHz 时幅值比、相位差信号受到线圈间距的影响,幅值比、相位差均随着线圈间距的增大而增大。

同时也依次计算了 500 kHz 时 8 组不同间距下两接收线圈处测量信号的幅值比、相位差信号,间距分别是 5~12 cm,每组间距间隔 1 cm,每组状态下源距均设置为 14 cm,如图 17 所示。

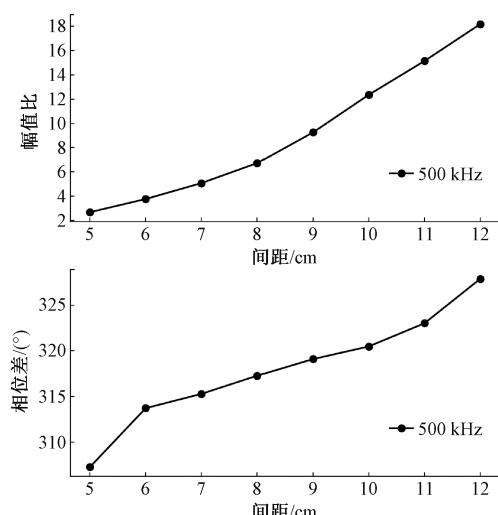


图 17 500 kHz 不同线圈间距的实验结果

Fig. 17 Experimental results at different coil spacings at 500 kHz

从图 17 中可以看出,在 500 kHz 时幅值比、相位差信号受到线圈间距的影响,与 2 MHz 下的影响规律相同。

3 结 论

本研究基于全相位频谱分析对电阻率测井中的电磁响应特性进行研究,首先是对电磁波电阻率测井信号进行数值模拟,探究了电磁波电阻率测井响应的影响因素,然后搭建电阻率测井电磁响应实验模型,在均匀介质下进行实验验证。采用全相位时移相位差法计算两接收线圈处幅值和相位,其本身就具有初始相位不变的性质,具有抗干扰的特点,并且分析了幅值比、相位差信号随线圈工作频率、源距、间距的响应规律。结果表明,数值模拟与实验计算的响应规律相同,线圈工作频率越大,幅值比和相位差信号就越大;线圈源距越大,幅值比越小,而相位差越大;线圈间距越大,幅值比和相位差均越大。综合利用电磁波电阻率测井中线圈因素的影响规律,可以更快速、准确地获取地层和界面信息,从而更有效地支持测井数据的处理和实时地质导向,对于优化电磁波电阻率测井技术在地层评价中的作用具有重要作用。

参考文献

- [1] 孙呈,周轲. 随钻测井技术与电缆测井技术的对比研究[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(4): 37-39, 32.
SUN CH, ZHOU K. Comparative study of logging while drilling technology and cable logging technology [J]. Petro & Chemical Equipment, 2024, 27 (4): 37- 39, 32.
- [2] 王昊. 随钻测井技术在我国石油勘探开发中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(24): 175-177.
WANG H. Application of logging while drilling technology in petroleum exploration and development in China[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022, 42(24): 175-177.
- [3] LI Q M, BORNEMANN T, RASMUS J, et al. Real-time logging-while-drilling image: Techniques and applications[C]. SPWLA 42nd Annual Logging Symposium, 2001: SPWLA-2001-WW.
- [4] 王圣杰. 随钻电磁波电阻率测井仪器研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2016.
WANG SH J. Research on electromagnetic wave resistivity logging instrument while drilling[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2016.
- [5] BITTAR M, HVEDING F, CLEGG N, et al. Maximizing

- reservoir contact in the Oseberg field using a new azimuthal deep reading technology [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2008: 3025-3030.
- [6] SAIKIA K. Real-time modeling-while-drilling for optimized geosteering and enhanced horizontal well placement in thin and complex reservoirs [C]. International Petroleum Technology Conference, 2013: 2313-2320.
- [7] 张卫平, 邓强, 赵国权. PeriScope 随钻边界测量仪渤海油田应用状况 [J]. 石油科技论坛, 2011, 30(5): 30-32, 67.
ZHANG W P, DENG Q, ZHAO G Q. Application status of PeriScope boundary gauge while drilling in Bohai Oilfield [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2011, 30(5): 30-32, 67.
- [8] BITTAR M, KLEIN J, BESTE R, et al. A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2007: 1632-1640.
- [9] 张晓彬. 随钻方位电磁波电阻率测井仪线圈系设计方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2017.
ZHANG X B. Research on design method of coil system of azimuth electromagnetic wave resistivity logging tool while drilling [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2017.
- [10] 万勇, 张晓彬, 倪卫宁, 等. 随钻方位电阻率测井仪线圈系设计方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(1): 99-105.
WAN Y, ZHANG X B, NI W N, et al. Research on design method of coil system of azimuth resistivity logging while drilling [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(1): 99-105.
- [11] 汪昊. 各向异性地层随钻方位电磁波电阻率测井反演方法研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2020.
WANG H. Research on azimuth electromagnetic wave resistivity logging inversion method in anisotropic formation [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2020.
- [12] 其木苏荣, 刘凤敏, 井孝功, 等. 水平层状介质中任意方向磁偶极子的电磁场分布 [J]. 大学物理, 2006, 25(10): 31-36, 40.
QI M S R, LIU F M, JING X G, et al. Electromagnetic field distribution of magnetic dipole in arbitrary direction in horizontal layered medium [J]. University Physics, 2006, 25(10): 31-36, 40.
- [13] 其木苏荣, 孙丙西. 水平层状介质中任意方向磁偶极子的电磁场分布 [J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2004, 19(3): 248-251, 256.
QI M S R, SUN B X. Electromagnetic field distribution of magnetic dipoles in arbitrary direction in horizontal layered media [J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Science Edition), 2004, 19(3): 248-251, 256.
- [14] 刘之的. 随钻测井响应反演方法及应用研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2006.
LIU ZH D. Response inversion method and application of logging while drilling [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2006.
- [15] 魏宝君, LIU Qinghu. 层状单轴各向异性介质并矢 Green 函数的递推算法及精确计算 [J]. 中国科学(E辑:信息科学), 2007, 37(6): 836-850.
WEI B J, LIU Q H. Recursive algorithm and accurate calculation of parallel vector Green function of layered uniaxial anisotropic media [J]. Science in China (Series E: Information Science), 2007, 37(6): 836-850.
- [16] 范存. 随钻电阻率测量技术研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2010.
FAN C. Research on resistivity measurement technology while drilling [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2010.
- [17] 娄研. 随钻方位电磁波电阻率测井信号处理研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2018.
LOU Y. Research on azimuth electromagnetic wave resistivity logging signal processing while drilling [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018.
- [18] 吴冲. 随钻方位电磁波电阻率测井方法研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
WU CH. Research on azimuth electromagnetic wave resistivity logging method while drilling [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.
- [19] 龚智, 王秀娟, 周吉林, 等. 基于随钻电阻率测井的天然气水合物赋存类型的识别方法 [J]. 地质学报, 2024, 98(9): 2709-2722.
GONG ZH, WANG X J, ZHOU J L, et al. Identification method of natural gas hydrate occurrence type based on resistivity logging while drilling [J]. Acta Geological

- Simica, 2024, 98(9): 2709-2722.
- [20] 秦文娟. 模块化随钻电磁波测井方法研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2024.
QIN W J. Research on modular electromagnetic wave logging method while drilling [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024.
- [21] 黄毅. 随钻电阻率测井仪器的水平井测井响应特征研究 [D]. 武汉: 长江大学, 2022.
HUANG Y. Research on the response characteristics of horizontal well logging response characteristics of resistivity logging instrument while drilling [D]. Wuhan: Yangtze University, 2022.
- [22] 许凯. 随钻方位电磁波电阻率仪器信号处理模块研究与实现 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.
XU K. Research and implementation of signal processing module of electromagnetic wave resistivity instrument while drilling [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2024.
- [23] 段哲. 随钻方位电磁波电阻率测井仪的设计与开发 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2018.
DUAN ZH. Design and development of azimuth electromagnetic wave resistivity logging tool while drilling [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2018.
- [24] 陈小磊, 刘保银, 周军, 等. 各向异性地层随钻电磁波电阻率响应模拟及导向反演方法研究 [J]. 地球物理学进展, 2025, 40(1): 188-198.
CHEN X L, LIU B Y, ZHOU J, et al. Research on simulation and guided inversion method of electromagnetic wave resistivity response in anisotropic strata while drilling [J]. Progress in Geophysics, 2025, 40(1): 188-198.
- [25] 于意贤. 随钻方位电磁波电阻率测井的数值模拟与特征分析 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.
YU Y X. Numerical simulation and characteristic analysis of azimuth electromagnetic wave resistivity logging while drilling [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2024.
- [26] 康鹏. 各向异性地层随钻电磁波测井信号处理研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2022.
KANG P. Research on electromagnetic wave logging signal processing of anisotropic formations while drilling [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2022.
- [27] 陈刚, 李泉新, 刘志毅, 等. 基于方位电磁波的煤岩层界面及低阻异常体探测方法(英文) [J]. Applied Geophysics, 2023, 20(2): 157-166, 240-241.
CHEN G, LI Q X, LIU ZH Y, et al. Detection method of coal rock interface and low-resistance anomalies based on azimuth electromagnetic waves [J]. Applied Geophysics, 2023, 20(2): 157-166, 240-241.
- [28] 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 B ZH, YANG ZH, GUO T ZH, et al. Research on the response characteristics of multi-scale azimuth electromagnetic wave logging system while drilling [J]. Petroleum Drilling Technology, 2022, 50(6): 7-13.
- [29] 涂梦雨. 一种电磁波电阻率测井仪的设计与实现 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2017.
TU M Y. Design and implementation of an electromagnetic wave resistivity logging tool [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2017.
- [30] 梁状. 基于 DDS 的高频函数信号发生器设计与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
LIANG ZH. Design and implementation of high-frequency function signal generator based on DDS [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [31] 和丽真, 杨国华, 王珺, 等. 一种随钻方位电磁波测井仪发射电路设计 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(17): 12-16.
HE L ZH, YANG G H, WANG J, et al. Design of transmitting circuit for a logging-while-drilling azimuthal electromagnetic wave tool [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(17): 12-16.
- [32] 贾衡天, 彭浩, 邓乐, 等. 随钻电磁波电阻率测量系统 [J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 123-126.
JIA H T, PENG H, DENG L, et al. Electromagnetic wave resistivity measurement system while drilling [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(6): 123-126.
- [33] 胡俊杰. 随钻测井收发系统的设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
HU J J. Design and implementation of logging while drilling transceiver system [D]. Xi'an: Xidian University, 2023.
- [34] 陈心亮. 电磁波电阻率仪器电子电路系统设计与泥浆侵入响应研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.

- CHEN X L. Design of electronic circuit system of electromagnetic wave resistivity instrument and mud intrusion response [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2024.
- [35] 张海见. 电磁波电阻率测井收发系统关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- ZHANG H J. Research on key technologies of electromagnetic wave resistivity logging transceiver system [D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [36] 程荣勤. 三维全息随钻方位电磁波电阻率测井仪器的电路设计[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023.
- CHENG R Q. Circuit design of three-dimensional holographic azimuthal electromagnetic wave resistivity logging instrument [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2023.
- [37] 杨尉. 全相位离散频谱校正及应用[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- YANG W. All-phase discrete spectrum correction and application [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [38] 黄翔东, 王兆华. 全相位时移相位差频谱校正法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2008, 41(7): 815-820.
- HUANG X D, WANG ZH H. All-phase time-shift phase difference correcting spectrum method [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2008, 41(7): 815-820.
- [39] 李醒飞, 李立, 寇科, 等. 全相位 FFT 时移相位差频谱校正分析及改进[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(12): 1290-1295.
- LI X F, LI L, KOU K, et al. Spectrum correction analysis and improvement of time-shifted phase difference of all-phase FFT [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(12): 1290-1295.
- [40] 樊毓臻, 寇科, 王琨, 等. 线性调频激光自混合干涉双通道微位移测量方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 22-29.
- FAN Y ZH, KOU K, WANG X, et al. Study on the dual-channel displacement measurement method using linearly tuned laser self-mixing interference [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 22-29.
- [41] 陈广识. 螺绕环近钻头电磁波电阻率测井研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2022.
- CHEN G SH. Research on electromagnetic wave resistivity logging with solenoid coils near the drill bit [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2022.

作者简介



席瑜, 2022 年于河南理工大学获得学士学位, 2025 年于西安理工大学获得硕士学位, 主要研究方向为智能仪器与信息处理。
E-mail: 15538955075@163.com



Xi Yu received her B. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2022 and received her M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2025. Her main research interests include intelligent instrumentation and information processing.

寇科(通信作者), 2010 年于天津大学获得学士学位, 2016 年于天津大学获得硕士和博士学位, 现为西安理工大学副教授, 主要研究方向为激光自混合干涉、激光传感与测量和固体激光技术。

E-mail: kouke@xaut.edu.cn

Kou Ke (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tianjin university in 2010, and his M. Sc. and Ph. D. degrees from the same university in 2016. He is currently an associate professor at Xi'an University of Technology. His main research interests include laser self-mixing interferometry, laser sensing and measurement, and solid-state laser technology.