

随钻电磁波测井仪器结构影响的三维有限元模拟

许巍^{1,2}, 柯式镇^{1,2}, 李安宗³, 陈鹏³, 朱军³, 桑泉³

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学地球物理与信息工程学院, 北京 102249; 3. 中国石油集团测井有限公司随钻测井仪器研究中心, 陕西西安 710061)

摘要:利用三维有限元方法模拟钻铤、线圈衬底、天线槽、天线槽填充物及屏蔽罩等仪器结构对随钻电磁波测井响应的影响。结果表明:实际仪器结构中低阻的钻铤、线圈衬底和屏蔽罩导致电磁信号明显衰减,而高阻的天线槽填充物对仪器信号无明显影响。在兼顾仪器机械强度的条件下,通过减小天线槽深度、增大天线槽长度和占空比可以降低电磁信号衰减。仪器结构影响导致仪器响应随地层电阻率非线性变化,扣除仪器结构影响后,仪器响应恢复了随地层电阻率在较宽范围内线性变化的关系,可以满足仪器线性刻度需要。由于扣除仪器结构影响后线圈中磁通量减小,仪器响应略小于无仪器结构影响时的响应。

关键词:随钻测井; 有限元方法; 仪器结构; 电磁波传播

中图分类号:P 631 **文献标志码:**A

引用格式:许巍,柯式镇,李安宗,等. 随钻电磁波测井仪器结构影响的三维有限元模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 50-56.

XU Wei, KE Shizhen, LI Anzong, et al. Structural effects analysis of an electromagnetic wave propagation resistivity LWD tool by 3D finite element method [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(6): 50-56.

Structural effects analysis of an electromagnetic wave propagation resistivity LWD tool by 3D finite element method

XU Wei^{1,2}, KE Shizhen^{1,2}, LI Anzong³, CHEN Peng³, ZHU Jun³, SANG Quan³

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. College of Geophysics and Information Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. China Petroleum Logging Company Limited, Xi'an 710061, China)

Abstract: The effects of metal mandrel, coil substrate, antenna slot, antenna slot filling material, and shield cover of an electromagnetic wave propagation resistivity logging while drilling (LWD) tool were simulated by a 3D finite element method. The results show that the low resistivity of metal mandrel, coil substrate, and shield cover can lead to significant electromagnetic signal reduction, whereas the effect of the slot filling material with high resistivity is nearly negligible. Under the consideration of mechanical strength, the attenuation of electromagnetic signal can be minimized via increasing the slot length, enlarging the space proportion of slot, and reducing the slot depth. The structural effects may result in nonlinear response changes with the formation resistivity; after eliminating the structural effects, the responses recover to change linearly with the formation resistivity in a broad range, satisfying the requirement of linear calibration. However, due to the decrease of magnetic flux in the coils after eliminating the structural effects, the tool responses may become smaller than those without the structural effects.

Keywords: logging while drilling; finite element method; instrument structure; electromagnetic wave propagation

作为随钻测井技术的重要内容之一,随钻电磁波测井在大斜度井和水平井的地质导向和油气探测中得到了广泛应用^[1-2]。随钻电磁波测井仪器将线圈安装在钻铤表面的凹槽中,并在外部装配金属屏蔽罩以避免随钻测井过程中井壁磨损和钻井液侵蚀。由于采用高频交变电流信号,金属钻铤和屏蔽罩中表面涡流会对电磁信号产生损耗。为减小电磁波信号发射和接收过程中的衰减,金属屏蔽罩上开辟有沿仪器轴向的狭长天线槽^[3]。仪器结构材料的选择和天线槽的设计都将影响仪器响应,在仪器线性刻度前需要将仪器结构影响扣除^[4-5]。在以前的数值模拟研究中,大多数研究者将随钻电磁波测井仪器结构进行了简化^[6-12],针对仪器结构影响的系统分析相对较少^[13-15]。笔者基于实际随钻电磁波测井仪,利用三维有限元方法系统分析钻铤、衬底、填充物、天线槽、屏蔽罩等结构对仪器响应的影响。通过扣除仪器结构影响,使仪器获得较好的线性刻度范围,可为实际随钻电磁波测井仪器设计和刻度提供参考。

1 三维有限元建模

1.1 基本原理

随钻电磁波测井仪器发射线圈通以交变电流,仪器响应遵循时谐麦克斯韦方程:

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E} + \mathbf{J}_s, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H}. \quad (2)$$

式中, $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\mathbf{H}$ 为磁场强度; $\mathbf{J}_s$ 和 ω 分别为外加电流密度和角频率; ϵ 、 μ 和 σ 分别为地层介电常数、磁导率及电导率。将式(2)代入式(1)可得电场 $\mathbf{E}$ 在求解域 V 的波动方程^[16]:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right] - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} = -j\omega\mu_0 \mathbf{J}_s. \quad (3)$$

式中, k_0 为自由空间波数; μ_r 为地层相对磁导率; μ_0 为真空磁导率; ϵ_r 为地层相对介电常数。

在金属钻铤、金属屏蔽罩及有限元地层模型表面的电场边界条件^[17]为

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0. \quad (4)$$

利用变分原理和泛函分析,得到电场 $\mathbf{E}$ 的泛函表达式:

$$F(\mathbf{E}) = \frac{1}{2} \iiint_V \left[\frac{1}{\mu_r} (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \right] dV + j\omega\mu_0 \iiint_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV. \quad (5)$$

为求解泛函 $F(\mathbf{E})$,需要将求解区域离散成若干个子空间。在局部坐标系下,对每个单元分别利

用形状函数导出场量求解表达式,扩展得到总矩阵方程:

$$[\mathbf{K}][\mathbf{X}] = [\mathbf{P}]. \quad (6)$$

式中, $[\mathbf{K}]$ 为总刚度矩阵; $[\mathbf{P}]$ 为施加条件; $[\mathbf{X}]$ 为需要求解的未知变量。通过求解式(6)中大型疏松矩阵,可得到整个求解域电磁场分布。

1.2 算法验证

目前商用的随钻电磁波测井仪器大多数采用2 MHz和400 kHz等频率测量,实际测井过程中记录的幅度衰减 A_u 和相位差 $\Delta\Phi$ 定义^[18]为

$$A_u = 20 \lg \frac{|V_2|}{|V_1|}, \quad (7)$$

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2. \quad (8)$$

式中, Φ_1 和 Φ_2 为远接收线圈电动势 V_1 和近接收线圈电动势 V_2 的相位。幅度衰减 A_u 和相位差 $\Delta\Phi$ 无法反映仪器结构对接收线圈中电磁信号影响程度,本文中采用电动势绝对值对不同仪器结构影响进行评价。假设仪器发射线圈和接收线圈匝数均为1,线圈直径为0.165 m,电流强度为1 A,发射频率为2 MHz,计算了均匀地层中源距 ΔL 分别为0.679和1.022 m时接收线圈电动势绝对值。图1为均匀地层无仪器结构影响时三维有限元模拟结果和解析解对比,两者平均相对误差小于1%,验证了本文中方法的准确性。

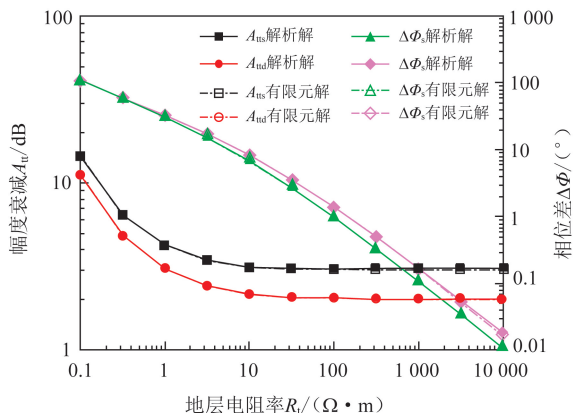


图1 三维有限元解与解析解对比

Fig. 1 Validation of FEM solutions versus analytical solutions

2 数值模拟结果分析

如图2所示,本文中随钻电磁波测井仪器4个发射线圈(T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4)对称放置在接收线圈(R_1 和 R_2)两侧。为了保护线圈在测量过程中不受井眼钻井液侵蚀和井壁磨损,发射和接收线圈装配在金属钻铤中,并在外面安装金属罩。为了保证电

磁信号不完全被金属罩屏蔽,金属罩上还设置了贯通的天线槽。

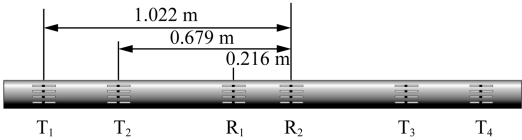


图 2 随钻电磁波测井仪器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of an electromagnetic wave propagation resistivity LWD tool

如图 3 所示,仪器天线槽横截面从内至外依次是水眼、钻铤、衬底、线圈、填充物和金属屏蔽罩。本文中计算仪器结构影响时假设所有线圈匝数均为 1 匝,发射电流强度为 1 A,频率为 2 MHz,接收线圈间距为 0.216 m,深探测和浅探测线圈系发射线圈到最远接收线圈的源距 ΔL 分别为 0.679 和 1.022 m,所有线圈直径均为 0.165 m,天线槽内钻铤直径为 0.127 m,仪器直径为 0.178 m,均匀地层电阻率 R_1 为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。

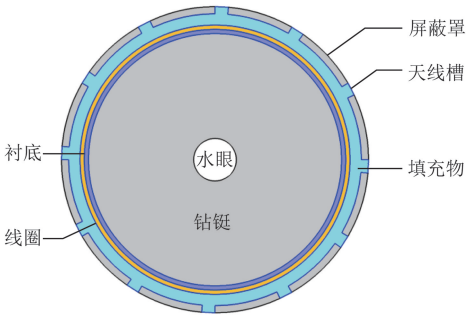
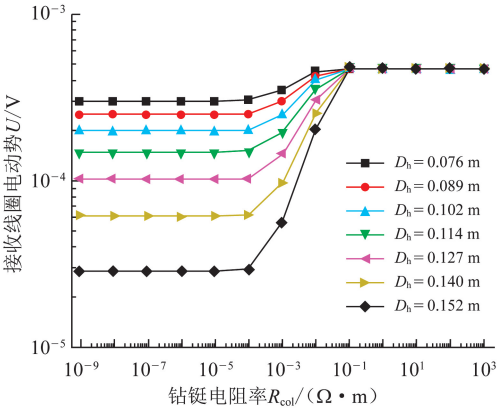


图 3 天线槽横截面

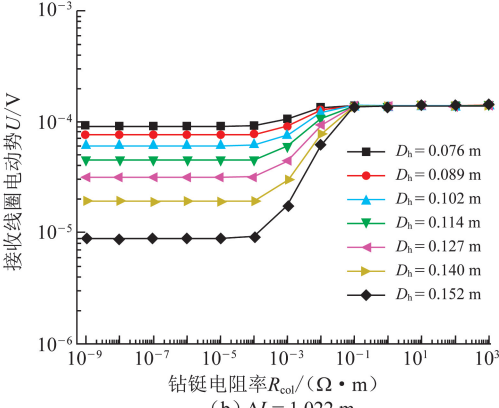
Fig. 3 Cross-section of antenna slot

2.1 钻铤的影响

由于随钻电磁波测井仪器线圈绕在金属钻铤上,在发射交变电磁信号时金属钻铤中会产生感应涡流,钻铤几何尺寸和导电特性会影响仪器电磁信号的发射和接收。令线圈直径固定为 0.165 m,分别计算了均匀地层模型中金属钻铤对源距 ΔL 为 0.679 和 1.022 m 的接收线圈电动势绝对值的影响。如图 4 所示,随着钻铤直径 D_h 变大,接收线圈有效面积减小,从而导致接收线圈电动势绝对值减小;当钻铤直径 D_h 固定时,钻铤电阻率越小,电磁信号在钻铤表面趋肤深度越浅,即钻铤中对电磁信号无贡献的区域越大,从而导致接收线圈电动势绝对值减小。为了兼顾钻铤的机械强度,钻铤常采用电阻率较低的金属材料(多为无磁合金钢材),因此实际仪器结构中钻铤是导致电磁信号衰减的主要原因之一。



(a) $\Delta L = 0.679 \text{ m}$



(b) $\Delta L = 1.022 \text{ m}$

图 4 钻铤对接收线圈电动势的影响

Fig. 4 Effects of metal mandrel on receiving coil electromotive force

2.2 线圈衬底的影响

钻井过程中与井壁的机械摩擦及感应涡流都会使钻铤发热,为避免线圈性能受钻铤中热量和感应涡流的影响,在线圈与钻铤之间有一层衬底材料。选择衬底材料时,需要兼顾导热特性和导电特性,本文中仅讨论衬底材料导电特性影响。

图 5 为接收线圈电动势绝对值随衬底电阻率变

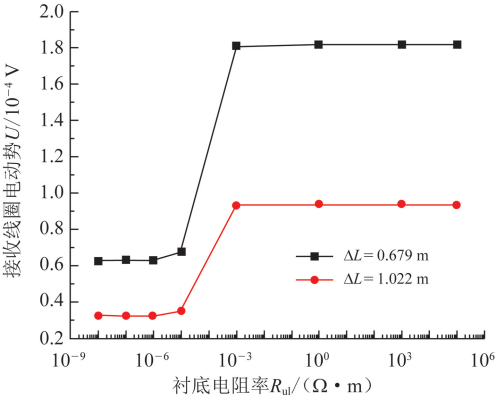


图 5 线圈衬底电阻率对接收线圈电动势的影响

Fig. 5 Effects of coil substrate resistivity on receiving coil electromotive force

化关系曲线。如图所示,当衬底电阻率大于 10^{-3} 或小于 $10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ 时,接收线圈电动势绝对值随线圈衬底电阻率变化不明显;当衬底电阻率在 $10^{-5} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 变化时,接收线圈电动势绝对值随衬底电阻率减小明显衰减,该电阻率区间范围与线圈衬底几何尺寸及发射频率相关。实际仪器结构中衬底材料导电性对仪器电磁信号的影响也是不可忽略的。

2.3 天线槽的影响

作为随钻电磁波测井仪器电磁信号发射和接收的通道,天线槽的设计对仪器响应具有至关重要的影响。图 6 为接收线圈电动势绝对值与天线槽长度 W 及深度 D 的关系曲线。如图 6 所示,当天线槽长度固定时,接收线圈电动势绝对值随着天线槽深度增大而减小;当天线槽深度固定时,接收线圈电动势绝对值随天线槽长度增大而增大;当天线槽长度接近 0.15 m 时,接收线圈电动势绝对值对天线槽长度和宽度变化均不太敏感,表明电磁信号近似全部发射出去。当仪器直径为 0.178 m 时,天线槽长度和深度分别为 0.1 和 0.025 m,既能保证电磁信号的强度,又能兼顾屏蔽罩的机械强度不受损害。

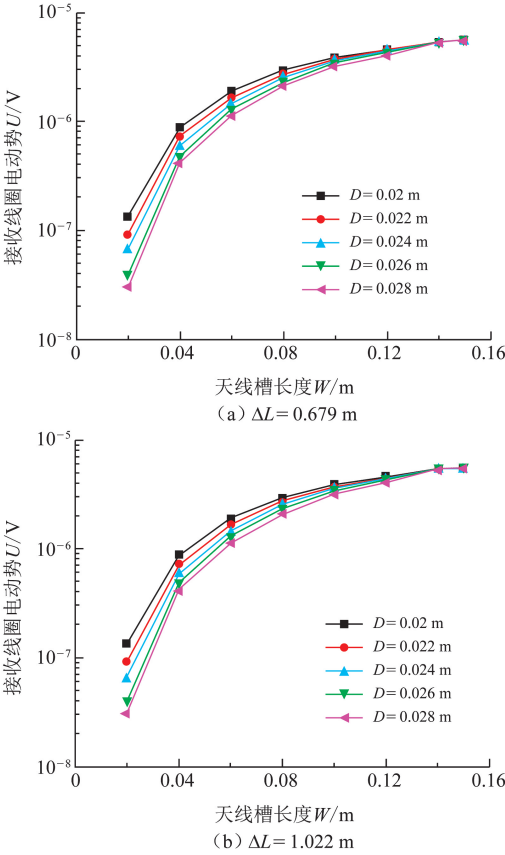


图 6 天线槽长度及深度对接收线圈电动势的影响
Fig.6 Effects of slot width and depth on receiving coil electromotive force

理论上,当天线槽长度一定时,天线槽在金属屏蔽罩表面所占比例(占空比)越大,发射和接收的电磁信号强度越大。为保证屏蔽罩的机械强度,需要对天线槽占空比进行限制。在分析天线槽占空比影响时假设天线槽长度为 0.1 m,天线槽数量为 12。图 7 为接收线圈电动势绝对值与天线槽占空比的关系曲线。如图 7 所示,天线槽占空比越大,发射和接收的电磁信号强度越大,与理论分析结果一致。考虑屏蔽罩机械强度,选择 10% 为实际天线槽占空比可满足仪器设计需要。

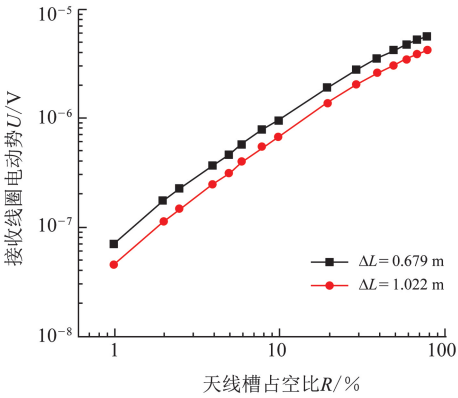


图 7 天线槽占空比对接收线圈电动势的影响
Fig.7 Effects of slot space proportion on receiving coil electromotive force

2.4 天线槽填充物的影响

在衬底层与屏蔽罩之间的填充材料主要作用是隔离钻井液以保护线圈,填充材料自身的导电特性及钻井过程中的磨损和老化等都会对仪器测量信号产生影响。图 8 为接收线圈电动势绝对值与填充材

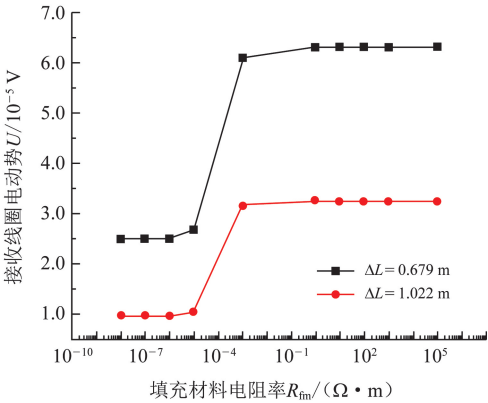


图 8 天线槽填充材料电阻率对接收线圈电动势的影响
Fig.8 Effects of antenna slot filling material resistivity on receiving coil electromotive force

料电阻率的变化关系。如图所示,当填充材料电阻率为 $10^{-5} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 时,接收线圈电动势绝对值随填充材料电阻率减小明显衰减,该电阻率区间范

围与填充材料几何尺寸及发射频率相关;当填充材料电阻率大于 $10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 或小于 $10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ 时,接收线圈电动势绝对值变化不明显。实际工程中填充物常采用绝缘材料,因此填充物对仪器电磁信号的影响可以忽略。

2.5 屏蔽罩的影响

为了保护线圈在测井过程中不受磨损,需要将钻铤切割出凹槽以安装线圈,并在凹槽外部安装有天线槽的屏蔽罩。为保证仪器的机械强度,屏蔽罩常采用金属材料,屏蔽罩上天线槽外的部分对电磁波信号有一定屏蔽作用。在分析屏蔽罩影响时,假设天线槽占空比为 10%,天线槽长度为 0.1 m,天线槽深度为 0.025 m。图 9 为接收线圈电动势绝对值与屏蔽罩电阻率的关系曲线。如图 9 所示,当屏蔽罩电阻率为 $10^{-5} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 时,接收线圈电动势绝对值随屏蔽罩电阻率减小明显衰减,该电阻率区间范围与屏蔽罩几何尺寸及发射频率相关;当屏蔽罩电阻率大于 $10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 或小于 $10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ 时,接收线圈电动势绝对值变化不明显。实际仪器结构中金属屏蔽罩也是导致仪器电磁信号减小的主要原因之一。

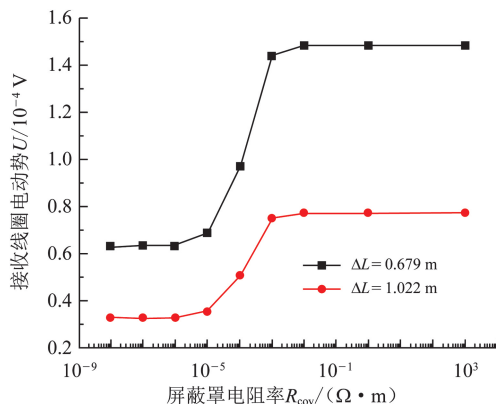


图 9 天线屏蔽罩电阻率对接收线圈电动势的影响

Fig. 9 Effects of shield cover resistivity on receiving coil electromotive force

2.6 仪器结构影响扣除

图 10 为仪器结构对相位差信号和幅度比信号的影响。如图 10 所示,相位差信号受仪器结构影响不明显,无仪器结构影响时相位差信号与有仪器结构影响时相位差信号几乎完全重合;幅度比信号受仪器结构影响十分明显,含有仪器结构时幅度比信号明显大于无仪器结构时幅度比信号。

为扣除仪器结构影响,分别计算了仪器结构对不同源距接收线圈电动势绝对值的影响。

如图 11 所示,仪器结构的影响导致仪器接收线

圈电动势绝对值在地层电阻率高值部分非线性变化。扣除仪器在空气介质中响应值后,仪器接收线圈电动势绝对值恢复了随地层电阻率线性变化的关系,可以满足仪器线性刻度需要。由于扣除钻铤影响后线圈中磁通量减小,仪器响应略小于无仪器结构影响时的仪器响应^[19]。

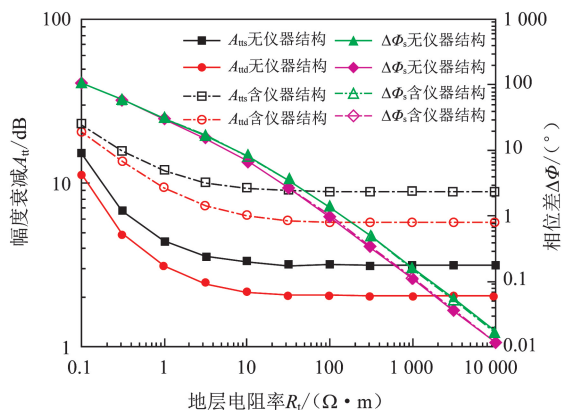


图 10 仪器结构对幅度比及相位差信号影响

Fig. 10 Structural effects on attenuation and phase shift responses

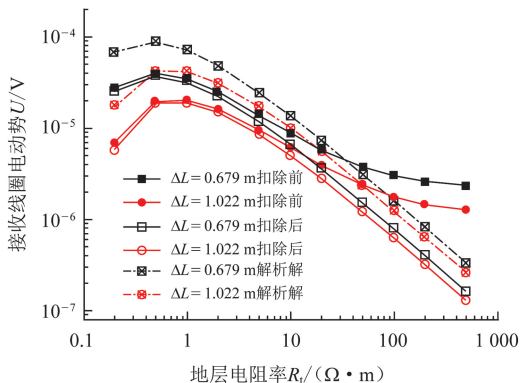


图 11 仪器结构影响扣除前后仪器响应对比

Fig. 11 Responses before and after eliminating of structural effects

3 结论

(1) 低阻的钻铤、衬底和屏蔽罩等仪器结构使仪器接收线圈电动势绝对值明显衰减,而高阻的填充物的影响则可以忽略。

(2) 在分析钻铤、线圈衬底、天线槽填充物及屏蔽罩等仪器结构电阻率对仪器电磁信号影响时,均出现电磁信号明显变化的电阻率区间,该区间的范围与仪器发射频率及仪器结构几何尺寸等因素相关。

(3) 仪器天线槽长度和占空比越大,天线槽深度越浅,天线发射和接收的电磁信号越强,但还需要

兼顾仪器机械强度综合考虑。

(4)通过扣除空气介质中仪器响应,可以较好地消除仪器结构影响,使仪器具有较好的线性刻度范围。扣除仪器结构影响后线圈中磁通量减小,导致仪器信号略小于无仪器结构影响时信号。

参考文献:

- [1] HORSTMANN M, SUN K, BERGER P, et al. Resistivity anisotropy and formation dip evaluation in vertical and low angle wells using lwd directional electromagnetic measurements [R]. SPWLA LLLL, 2015.
- [2] FANG S, MERCHANT A, HART E, et al. Determination of intrinsic dip and azimuth from lwd azimuthal-propagation resistivity measurements in anisotropic formations [R]. SPE 116123, 2010.
- [3] 魏宝君,徐丹,王莎莎. 通讯槽对电磁波传播随钻测量信号的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011,35(1):56-60.
WEI Baojun, XU Dan, WANG Shasha, et al. Influence of communication slots on signal of electromagnetic propagation measurement while drilling [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(1):56-60.
- [4] XU W, KE S, LI A, et al. Responses simulation and theoretical calibration of a dual-induction resistivity LWD tool [J]. Applied Geophysics, 2014,11(1):31-40.
- [5] 许巍,柯式镇,姜明,等. 随钻双感应测井仪刻度响应研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014,38(6):61-66.
XU Wei, KE Shizhen, JIANG Ming, et al. Numerical simulations of calibration of a dual-induction resistivity LWD tool [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(6):61-66.
- [6] ANDERSON B, BONNER S, LULING M G, et al. Response of 2-MHz LWD resistivity and wireline induction tools in dipping beds and laminated formations [J]. The Log Analyst, 1992,33(5):461-475.
- [7] ZHOU Q, HILLIKER D J. MWD resistivity tool response in a layered medium [J]. Geophysics, 1991,56(11):1738-1748.
- [8] 孙向阳,聂在平,赵延文,等. 用矢量有限元方法模拟随钻测井仪在倾斜各向异性地层中的电磁响应[J]. 地球物理学报, 2008,51(5):1600-1607.
SUN Xiangyang, NIE Zaiping, ZHAO Yanwen, et al. The electromagnetic modeling of logging-while-drilling tool in tilted anisotropic formations using vector finite element method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008,51(5):1600-1607.
- [9] DAVYDYCHEVA S, DRUSKIN V, HABASHY T. An efficient finite-difference scheme for electromagnetic logging in 3D anisotropic inhomogeneous media [J]. Geophysics, 2003,68(5):1525-1536.
- [10] DYATLOV G, ONEGOVA E, DASHEVSKY Y. Efficient 2.5D electromagnetic modeling using boundary integral equations [J]. Geophysics, 2015,80(3):E164-E173.
- [11] 范宜仁,胡云云,李虎,等. 随钻电磁波测井仪器偏心条件下响应模拟与分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014,38(2):59-66.
FAN Yiren, HU Yunyun, LI Hu, et al. Numerical modeling and analysis of responses of eccentric electromagnetic logging while drilling tool [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(2):59-66.
- [12] 魏宝君,田坤,张旭,等. 用并矢 Green 函数的矢量本征函数展开式评价偏心对随钻电磁波电阻率测井响应的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010,34(5):57-62.
WEI Baojun, TIAN Kun, ZHANG Xu, et al. Evaluating influence of eccentricity on response of electromagnetic wave resistivity logging-while-drilling by vector eigen function expansion formulae for dyadic Green's functions [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(5):57-62.
- [13] HAGIWARA T, BANNING E, OSTERMEIER R, et al. Effects of mandrel, borehole and invasion for tilt-coil antennas [R]. SPE 84245, 2004.
- [14] WANG T, SIGNORELLI J. Finite-difference modeling of electromagnetic tool response for logging while drilling [J]. Geophysics, 2004,69(1):152-160.
- [15] 宋殿光,段宝良,魏宝君,等. 金属钻铤对随钻电磁波电阻率测井仪测量信号的影响[J]. 测井技术, 2014,38(2):201-205.
SONG Dianguang, DUAN Baoliang, WEI Baojun, et al. The influence of metal mandrel on electromagnetic resistivity logging responses [J]. Well Logging Technology, 2014,38(2):201-205.
- [16] JIN J M. The finite element method in electromagnetics [M]. New York:Wiley-IEEE Press, 2002.
- [17] 刘得军,马中华,苑赫,等. 自适应高阶矢量有限元方法在随钻电阻率测井中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012,36(4):77-92.
LIU Dejun, MA Zhonghua, YUAN He, et al. Application of adaptive higher-order vector finite element method to simulate resistivity logging-while-drilling tool response [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition

- of Natural Science), 2012, 36(4):77-92.
- [18] 高杰,辛秀艳,陈文辉,等. 随钻电磁波电阻率测井之电阻率转化方法与研究[J]. 测井技术, 2008, 32(6): 503-507.
- GAO Jie, XIN Xiuyan, CHEN Wenhui, et al. Resistivity derivation in electromagnetic wave propagation resistivity logging while drilling [J]. Well Logging Technology, 2008, 32(6):503-507.
- [19] 魏宝君. 一种新型随钻电阻率测井仪器的响应和刻度[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2):632-641.
- WEI Baojun. Response and calibration of a new logging-while-drilling resistivity tool [J]. Chinese J Geophysics, 2007, 50(2):632-641.
- (编辑 修荣荣)