

随钻电磁波测量仪器信号解耦及其在 钻头前向探测中的应用

魏宝君¹, 吴康康¹, 林楠², 党峰³, 任臣¹

(1. 中国石油大学(华东)理学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田钻井工艺研究院, 山东东营 257017;
3. 中国石油集团测井有限公司, 陕西西安 710077)

摘要:采用水平层状各向异性介质中的并矢 Green 函数计算随钻电磁波测量仪器在地层中的响应。根据发射天线与接收天线的交叉排列方式和顺序排列方式提出将来自钻头前方地层的信号与来自仪器周围地层的信号进行最大程度解耦的方法。针对各向异性地层,还提出在这两种信号中将地层垂直电导率信息与水平电导率信息进行最大程度解耦的方法。结果表明:接收天线中来自仪器周围地层的感应电动势只受最低位置与最高位置天线之间地层电导率的影响,对钻头前方地层的存在并不敏感,可以利用该电动势精确获得地层的电导率参数;接收天线中来自钻头前方地层的感应电动势只受层界面的影响,利用该信号可以进行钻头前向探测从而指示出地层交界面的存在;来自钻头前方地层的信号与来自仪器周围地层的信号解耦程度与地层相对于仪器轴向的倾角有关,倾角越大,两种信号的解耦程度越低。

关键词:钻头前向探测; 并矢 Green 函数; 随钻测量; 解耦

中图分类号: P 631.9 **文献标志码:** A

引用格式:魏宝君,吴康康,林楠,等. 随钻电磁波测量仪器信号的解耦及其在钻头前向探测中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019,43(1):33-41.

WEI Baojun, WU Kangkang, LIN Nan, et al. Decoupling of electromagnetic MWD tool's signals and its application for ahead-of-bit detection [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019,43(1):33-41.

Decoupling of electromagnetic MWD tool's signals and its application for ahead-of-bit detection

WEI Baojun¹, WU Kangkang¹, LIN Nan², DANG Feng³, REN Chen¹

(1. College of Science in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. Drilling Technology Research Institute of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257017, China;
3. China Petroleum Logging Company Limited, Xi'an 710077, China)

Abstract: The response of the electromagnetic MWD tool was computed via the dyadic Green's functions in horizontally stratified anisotropic media. A method of decoupling anomalous formation signals ahead of the bit from formation signals around the tool to a maximum extent has been obtained for both alternating arrangement and serial arrangement of transmitter and receiver antennas. A method to maximize decoupling of horizontal conductivity from vertical conductivity in the two sets of signals above has also been obtained for anisotropic formations. The results show that the induced electromotive force from around-the-tool formations is only affected by the formation resistivity in between the lowest and highest antennas, and is not sensitive to the presence of layers ahead of the bit, therefore the formation conductivity can be accurately obtained. The induced electromotive force from ahead-of-bit formations is only affected by the layers suggesting that it can be used for ahead-of-bit detection to accurately detect the presence of the layer. The decoupling extent of the ahead-of-bit signal from the a-

收稿日期:2018-03-17

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05019-006);中央高校基本科研业务费专项(15CX05047A)

作者简介:魏宝君(1969-),男,教授,博士,教育部“新世纪优秀人才支持计划”入选者,研究方向为电磁测井理论及应用。E-mail: weibj@upc.edu.cn.

round-the-tool signal is related to the dip angle of the formation with respect to the tool's axis, and large dipping angle leads to significant degradation in the decoupling effect.

Keywords: ahead-of-bit detection; dyadic Green's functions; measurements-while-drilling (MWD); decouple

在石油钻井领域中,随钻电磁波测量(MWD)技术因其在地层导向和实时地层对比评价中具有重要价值而得到广泛开发和应用。目前国内外已成功开展了针对传统随钻电磁波测量技术^[1-5]、定向随钻电磁波测量技术^[6-12]和随钻感应测井技术的研究^[13-17]。但上述随钻电磁波技术的测量信号不只受仪器所在地层电阻率的影响,还受到仪器前方未钻地层界面的影响,即仪器接收的是来自仪器周围地层与钻头前方异常地层耦合在一起的总信息。在利用这种信息进行数据处理和地层评价过程中存在诸多问题和困难,如每一个待反演的参数与其他参数相互依赖、反演过程不稳定、易受噪声影响、耗费机时长等。传统电磁波测量技术由于前向探测深度浅,可能会在钻井过程中导致井喷等危险情况出现。通过优化随钻电磁波测量仪器天线阵列的排列方式和信号接发方式,可以使接收天线中来自钻头前方异常地层的信号与来自仪器周围地层的信号最大程度地解耦。当接收天线在接收来自钻头前方异常地层产生的信号时,来自仪器周围地层产生的信号和直耦信号在该接收天线处能够最大程度地抵消。当接收天线在接收来自仪器周围地层产生的信号时,来自钻头前方异常地层产生的信号在该接收天线处能够最大程度地抵消。这样可以对来自钻头前方异常地层的信号和来自仪器周围地层的信号分开进行处理解释。这种解耦的测量与解释方式可以使每个待反演的参数较少地依赖其他待反演参数,使反演过程更加稳定,较少地受噪声影响,所耗费机时也大大缩短。另外由于在来自钻头前方异常地层的信号中直耦信号已经抵消,所获得的均为有用信号,可增加前向探测深度并能较早地指示出地层交界面的存在。笔者采用水平层状各向异性介质中的并矢 Green 函数^[18-20]对随钻电磁波测量仪器在地层中的响应进行模拟,并根据发射与接收天线的交叉和顺序排列方式给出将接收天线中来自钻头前方地层的信号与来自仪器周围地层的信号进行最大程度解耦的方法。

1 基本理论

将随钻电磁波测量仪器的发射和接收天线均视为磁偶极子,则可采用水平层状各向异性介质中的

磁流源并矢 Green 函数计算仪器在地层中的响应。以坐标 x, y, z 表示地层直角坐标系且 z 轴为地层界面法向(图1),则水平层状各向异性地层中的磁流源并矢 Green 函数 $\mathbf{G}^{\text{HM}}$ 可表示为

$$\mathbf{G}^{\text{HM}} = \begin{pmatrix} G_{xx}^{\text{HM}} & G_{xy}^{\text{HM}} & G_{xz}^{\text{HM}} \\ G_{yx}^{\text{HM}} & G_{yy}^{\text{HM}} & G_{yz}^{\text{HM}} \\ G_{zx}^{\text{HM}} & G_{zy}^{\text{HM}} & G_{zz}^{\text{HM}} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

式中,如 G_{xy}^{HM} 表示沿 y 方向单位磁偶极子源产生的磁场强度的 x 分量。 $\mathbf{G}^{\text{HM}}$ 各元素的具体表达式见文献[19]。

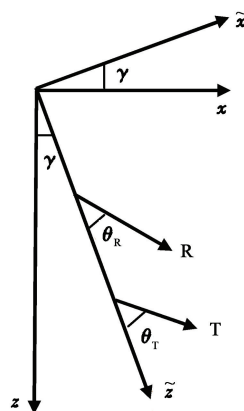


图1 仪器坐标系与地层坐标系之间的关系

Fig. 1 Configuration of relationship between tool and formation coordinate systems

以坐标 $\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$ 表示仪器直角坐标系,设仪器坐标系的 $\tilde{y}$ 轴与地层坐标系的 y 轴重合,仪器轴向坐标 $\tilde{z}$ 在 xz 平面内相对于地层法向的倾角为 γ (图1),则经坐标转换可将地层坐标系中的 $\mathbf{G}^{\text{HM}}$ 转换为仪器坐标系中的 $\tilde{\mathbf{G}}^{\text{HM}}$ ^[21],即

$$\tilde{\mathbf{G}}^{\text{HM}} = \mathbf{R}_y^T \mathbf{G}^{\text{HM}} \mathbf{R}_y. \quad (2)$$

式中, $\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}$ 为坐标系间的转换矩阵。

假设发射和接收天线的磁矩方向与仪器轴向 $\tilde{z}$ 之间的夹角分别为 θ_T 和 θ_R ,发射线圈的磁矩为 M_T ,则由 $\tilde{\mathbf{G}}^{\text{HM}}$ 的各分量可得到发射天线在接收天线处产生的磁场强度为

$$H_R = M_T (\tilde{G}_{xx}^{\text{HM}} \sin \theta_T \sin \theta_R + \tilde{G}_{xz}^{\text{HM}} \cos \theta_T \sin \theta_R + \tilde{G}_{zx}^{\text{HM}} \sin \theta_T \cos \theta_R + \tilde{G}_{zz}^{\text{HM}} \cos \theta_T \cos \theta_R). \quad (3)$$

假设发射源随时间的变化关系为 $\exp(i\omega t)$, 其中 ω 为角频率, 则接收天线的感应电动势可表示为

$$V = -i\omega\mu H_R N_R A_R \quad (4)$$

式中, N_R 为接收天线的匝数; A_R 为接收天线的面积, m^2 ; μ 为地层磁导率, $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ 。在本文数值模拟中假设发射和接收天线的磁矩均为 1。

2 各向同性地层中信号的解耦

2.1 各向同性地层中信号的解耦方法

利用式(4)可以得到发射和接收天线在不同的组合排列方式下 MWD 仪器的响应, 并根据不同的天线组合方式得到将接收天线中来自钻头前方的信号与来自仪器周围的信号最大程度解耦的方法。假设所有发射和接收天线的磁矩方向与仪器轴向之间的夹角相同, 即 $\theta_T = \theta_R = \theta$, 考虑天线的如下两种基本排列方式: 一种是发射与接收天线的交叉排列方式; 另一种是发射与接收天线的顺序排列方式(图2)。在图2(a)的交叉排列方式中, 假设相邻天线的间距(d)相等, 将来自钻头前方地层的信号 V_{AoB} 和来自仪器周围地层的信号 V_{AiT} 定义为

$$V_{AoB} = V_{T_1 R_1} - V_{T_2 R_2}, \quad (5)$$

$$V_{AiT} = V_{T_2 R_1} - V_{T_1 R_2}. \quad (6)$$

式中, $V_{T_i R_j}$ 表示第 i 个发射天线在第 j 个接收天线中产生的感应电动势。由式(5)可以看出, 若仪器前方无地层交界面且两组天线对的周围环境相同, 则 $V_{T_1 R_1} = V_{T_2 R_2}$, 即 $V_{AoB} = 0$ 。若仪器前方有地层交界面, 则 $V_{T_1 R_1} \neq V_{T_2 R_2}$, 即 $V_{AoB} \neq 0$ 。可见在 V_{AoB} 中来自仪器周围地层产生的信号和来自发射天线-接收天线之间的直耦信号均被抵消, 通过 V_{AoB} 是否为 0 可以判断仪器前方是否存在地层界面。另外, 由于在 V_{AoB} 信号中直耦信号已经抵消, 其所包含的数据均为反映地层界面存在的有用信息, 在数据解释处理过程中与传统的处理耦合在一起的总信息相比解释结果将更加准确, 也可增加前向探测深度并能较早地指示出地层交界面的存在。在实际测量中, 仪器两组天线对的周围环境不一定完全相同, 即使仪器前方无地层交界面, V_{AoB} 也不一定为 0。但由于仪器的两组天线对相距不远, 仍可以近似认为仪器周围环境相同, V_{AoB} 虽不为 0 但应为很小数值, 远小于层界面前方地层产生的信号。由式(6)可以看出, 若仪器前方有地层交界面, 设地层交界面距 T_1 的距离为 h , 则由 T_2 发出的信号经界面反射后到达 R_1 所经过的距离为 $2h+3d$, 由 T_1 发出的信号经界面反射后到达 R_2 所经过的距离也为 $2h+3d$, 二者相等, 两个接

收天线处界面反射信号相互抵消。因此 V_{AiT} 包含的主要是直耦信号和井眼周围地层信息, 受钻头前方地层交界面的影响很小。由于直耦信号包含在 V_{AiT} 的虚分量中, 故可用 V_{AiT} 的实分量表示井眼周围地层的信号。在数据解释处理过程中与传统的处理耦合在一起的总信息相比, 利用 V_{AiT} 数据可以快速精确地获得仪器所在地层的电导率分布。若仪器与地层界面严格垂直, 则 V_{AoB} 与 V_{AiT} 可完全解耦, 但随着倾角 γ 增加, V_{AiT} 受钻头前方异常地层的影响逐渐增大, 两种信号的解耦程度逐渐降低。由于地层电参数信息主要包含在感应电动势的实部信号中, 在下面数值模拟中只给出 V_{AoB} 和 V_{AiT} 的实分量, 即 $\text{Re}(V_{AoB})$ 和 $\text{Re}(V_{AiT})$ 。

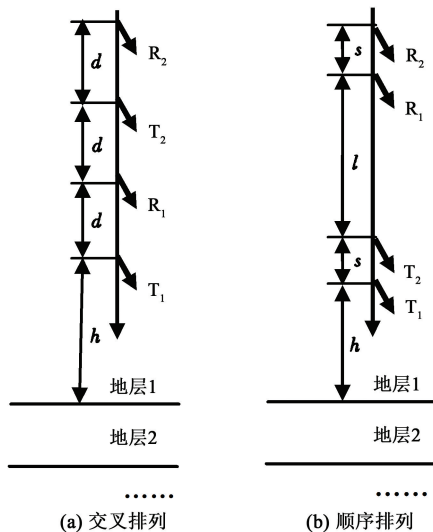


图2 MWD 仪器发射和接收天线排列方式示意图

Fig. 2 Embodiment of arrangements of transmitters and receivers of MWD tools

在图2(b)的顺序排列方式中, 假设相邻发射天线(T_1 、 T_2)和相邻接收天线(R_1 、 R_2)的间距(s)相等, 相邻发射天线(T_2)与接收天线(R_1)之间的间隔为 l , 仍可以采用式(5)、(6)来定义来自钻头前方的信号 V_{AoB} 和来自仪器周围的信号 V_{AiT} 。若仪器前方无地层交界面, V_{AoB} 仍为 0。若仪器前方有地层交界面, 则由 T_2 发出的信号经界面反射后到达 R_1 所经过的距离为 $2h+2s+l$, 由 T_1 发出的信号经界面反射后到达 R_2 所经过的距离也为 $2h+2s+l$, 两个接收天线处界面反射信号仍相互抵消, 因此该排列方式的 V_{AiT} 受钻头前方地层交界面的影响仍很小。

2.2 各向同性地层中天线交叉排列时 MWD 仪器的响应

取发射频率 $f = 10 \text{ kHz}$, 交叉排列的相邻天线的

间距 $d=0.8\text{ m}$ 。模型 1 为 2 层各向同性地层模型, 地层 1 为低电导率地层, 其电导率为 $\sigma_1=0.05\text{ S/m}$, 地层 2 为相对高电导率地层, 其电导率为 $\sigma_2=1.0\text{ S/m}$, 地层交界面垂向坐标为 $z_1=0\text{ m}$ 。图 3 为 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=45^\circ$ 两种情况下当倾角 γ 取不同值时 V_{AoB} 和 V_{AiT} 的实部信号随发射天线 T_1 在地层坐标系中的垂向坐标 z_{T_1} 的变化关系。

由图 3 可以看出, $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 的值只受层界面的影响, 当 z_{T_1} 距离层界面较远时 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 为 0, 当 z_{T_1} 逐渐接近并跨过地层交界面时 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 的强度快速增大并在达到极值后快速减小; 当仪器远离界面时, 无论仪器周围地层的电导率多大 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 均快速衰减至 0。 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 在层界面附近的幅度值及具体变化趋势均与仪器倾角 γ 和天线角度 θ 有关。当 $\theta=0^\circ$ 时, γ 越大, $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 的幅度值越小。若 γ 较小, $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 的幅度减小的并不明显, 但当 γ 达到 60° 时 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 的幅度快速降低。 $\theta=45^\circ$ 与 $\theta=0^\circ$ 的曲线相比, 在层界面附近 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 幅度的形状有突

变, 且 γ 越大突变越剧烈。这些改变说明随着仪器倾角 γ 的增加, $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 受仪器周围地层电导率的影响逐渐增大, 信号的解耦程度越来越低。由图 3 可以看出, $\text{Re}(V_{\text{AiT}})$ 只受仪器最低与最高位置天线之间地层电导率的影响, 对钻头前方地层的存在并不敏感, 即使仪器比较靠近层界面仍可以利用 $\text{Re}(V_{\text{AiT}})$ 精确获得地层的电导率参数。仪器最低位置天线 T_1 与最高位置天线 R_2 之间的距离为 2.4 m , $\text{Re}(V_{\text{AiT}})$ 信号在层界面附近的剧变范围也约为 2.4 m 。随着仪器倾角 γ 的增加, $\text{Re}(V_{\text{AiT}})$ 受钻头前方地层电导率的影响逐渐增大, 信号的解耦程度也越来越低, $\text{Re}(V_{\text{AiT}})$ 信号在层界面附近变化更加缓慢。但只要层界面不在仪器最低与最高位置天线之间, 不同倾角情况下的 $\text{Re}(V_{\text{AiT}})$ 受界面另一侧地层的影响均很小, 利用 $\text{Re}(V_{\text{AiT}})$ 均能获得地层的电导率参数。另外, 对比图 3(a) 和图 3(b) 可以发现, 相同倾角 γ 情况下 $\theta=45^\circ$ 时 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 的最大幅度和 $\text{Re}(V_{\text{AiT}})$ 在地层中的数值均小于 $\theta=0^\circ$ 时的对应数值。

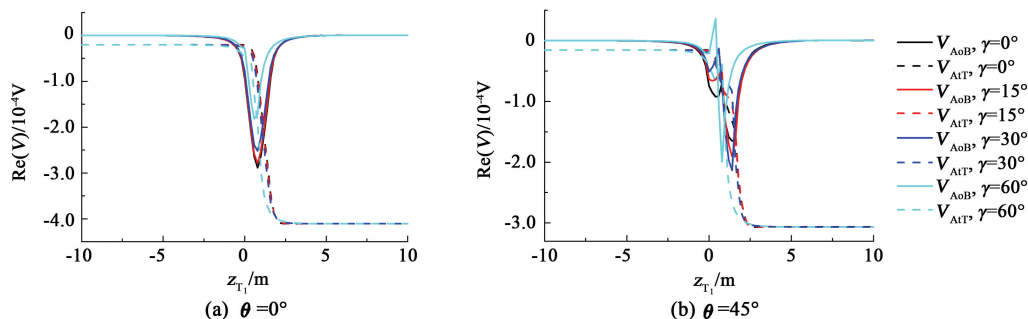


图 3 地层模型 1 的响应

Fig. 3 Responses of formation model 1

模型 2 也为 2 层各向同性地层模型, 但地层电参数与模型 1 有差别, 两个地层的电导率对比度加大。地层 1 的电导率为 $\sigma_1=0.01\text{ S/m}$, 地层 2 的电导率为 $\sigma_2=10.0\text{ S/m}$ 。图 4 为该模型在 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=45^\circ$ 两种情况下当倾角 γ 取不同值时 V_{AoB} 和 V_{AiT} 的实部信号随发射天线 T_1 垂向坐标 z_{T_1} 的变化关系。由图 4 可得到与图 3 相似的结论。由于模型 2 界面两侧地层电导率对比度大, 图 4 中 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 在层界面附近的幅值更大。可见 V_{AoB} 信号在层界面附近的强度与界面两侧地层电导率对比度和地层倾角直接相关。另外, 地层 1 中 $\text{Re}(V_{\text{AiT}})$ 的信号强度变得更小、地层 2 中 $\text{Re}(V_{\text{AiT}})$ 的信号强度变得更大, 与实际地层电导率变化趋势一致。

模型 3 也为 2 层各向同性地层模型, 但与前两个模型不同的是地层 1 为高电导率地层, 其电导率为 $\sigma_1=5.0\text{ S/m}$, 地层 2 为低电导率地层, 其电导率

为 $\sigma_2=0.01\text{ S/m}$ 。图 5 给出了模型在 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=45^\circ$ 两种情况下当倾角 γ 取不同值时 V_{AoB} 和 V_{AiT} 的实部信号随发射天线 T_1 垂向坐标 z_{T_1} 的变化关系。由图 5 可以看出, 由于仪器是从高层进入低导层, 模型 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 在界面处的符号为正, 与前两个模型 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 的符号正好相反。在经过地层界面后, $\text{Re}(V_{\text{AiT}})$ 的信号强度则从较大值变为较小值, 与实际地层电导率变化趋势一致, 其余可得到与前两个模型相似的结论。

模型 4 地层参数与模型 1 相同, 但相邻天线的间距 ($d=1.2\text{ m}$) 与模型 1 不同。图 6 为模型在 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=45^\circ$ 两种情况下当倾角 γ 取不同值时 V_{AoB} 和 V_{AiT} 的实部信号随发射天线 T_1 垂向坐标 z_{T_1} 的变化关系。对比图 6 和图 3 可以发现, 两个不同模型曲线的变化规律一致。但由于模型 4 线圈距增大, $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 和 $\text{Re}(V_{\text{AiT}})$ 在层界面附近的剧变范围均增大。在本例

中,仪器最低位置天线 T_1 与最高位置天线 R_2 之间的距离为 3.6 m, $\text{Re}(V_{\text{AIT}})$ 信号在层界面附近的剧变范

围也约为 3.6 m。另外,由于线圈距不同,模型 4 中 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 和 $\text{Re}(V_{\text{AIT}})$ 与模型 1 也不同。

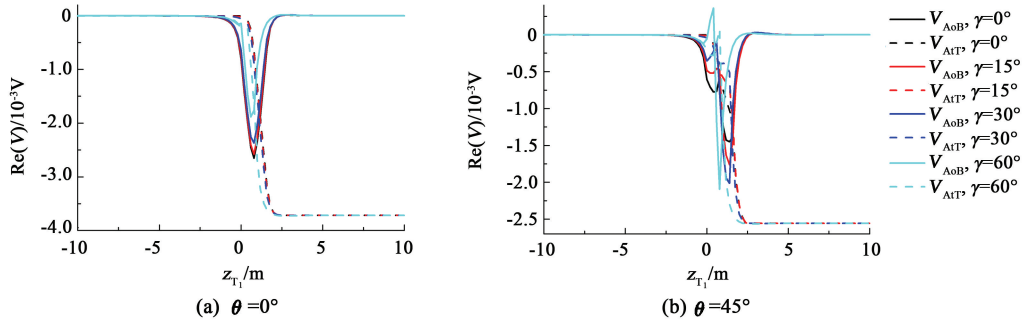


图 4 地层模型 2 的响应
Fig. 4 Responses of formation model 2

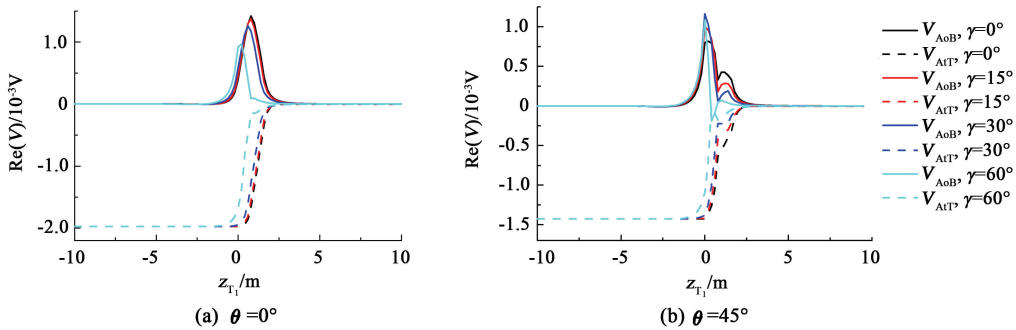


图 5 地层模型 3 的响应
Fig. 5 Responses of formation model 3

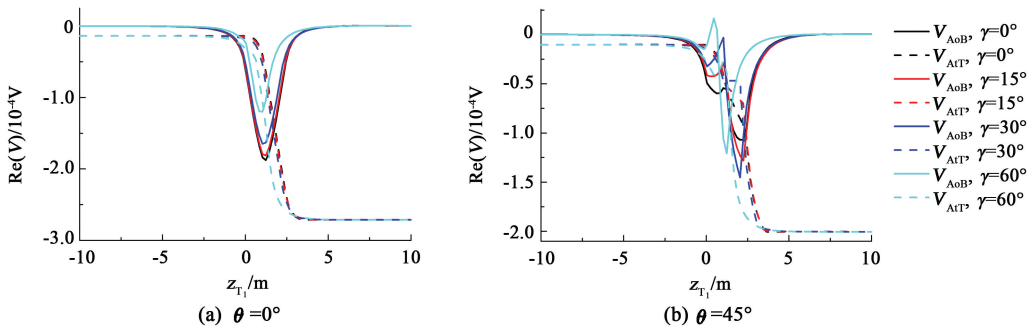


图 6 地层模型 4 的响应
Fig. 6 Responses of formation model 4

模型 5 为多层各向同性地层模型,地层数为 5,地层参数见图 7(a)。图 7(b)、(c) 分别为模型在 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=45^\circ$ 两种情况下当倾角 γ 取不同值时 V_{AoB} 和 V_{AIT} 的实部信号随发射天线 T_1 垂向坐标 z_{T_1} 的变化关系。模型的响应可以看作是前面几个模型响应的综合体现,由图中平坦区域的 $\text{Re}(V_{\text{AIT}})$ 可以很容易地获得每层地层的电参数,由图中 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 幅度的极大值可以确定层界面的近似位置。由图 7(b)、(c) 可以看出,层界面两侧电导率对比度越大, $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 和 $\text{Re}(V_{\text{AIT}})$ 在层界面附近的变化越明显。

2.3 各向同性地层中天线顺序排列时 MWD 仪器的响应

仍取发射频率 $f=10\text{ kHz}$, 顺序排列的天线参数为 $l=2.0\text{ m}$ 、 $s=0.4\text{ m}$ 。根据前面讨论,由于仪器倾角 γ 为 0 时 V_{AoB} 和 V_{AIT} 信号可以完全解耦,故在模拟时只考虑并眼倾角 $\gamma=0^\circ$ 的情况。图 8 为当 $\gamma=0^\circ$ 时模型 1、模型 3、模型 5 在 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=45^\circ$ 两种情况下 V_{AoB} 和 V_{AIT} 的实部信号随 z_{T_1} 的变化关系。由图 8 可以看出,天线采用顺序排列的方式也可以根据平坦区域的 $\text{Re}(V_{\text{AIT}})$ 精确获得每层地层的电参数。由于线圈距不同,两种不同排列方式所对应的 V_{AIT} 的响应值也不同。顺序排列天线的 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 在仪器远离界面时也

快速衰减至0,但在界面附近的形状与交叉排列天线存在较大差别。顺序排列天线的 $\text{Re}(V_{\text{AoB}})$ 在界面附近

近的幅度相对较小且在界面附近变化平缓,总体而言其边界相应效果较交叉排列方式要差。

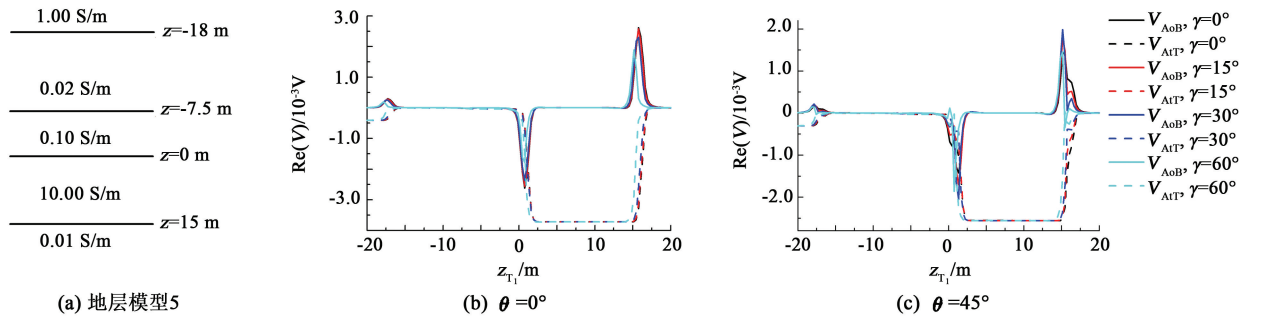


图7 地层模型5的响应
Fig.7 Responses of formation model 5

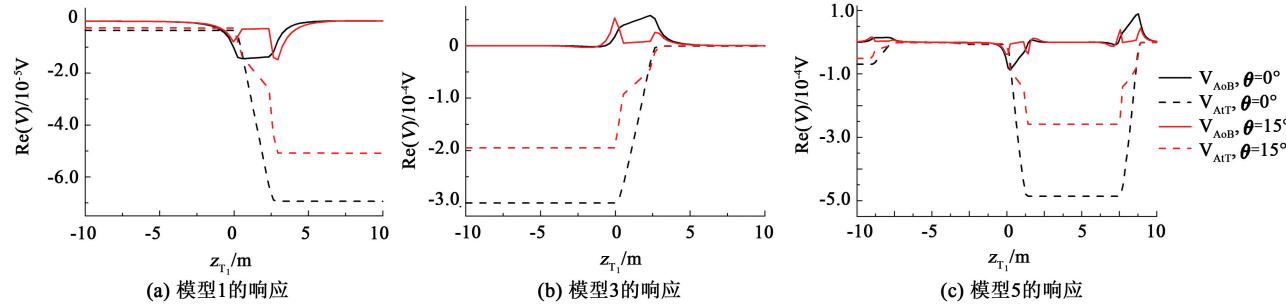


图8 天线顺序排列时3种不同地层模型的响应
Fig.8 Responses of three different formation models with serial arrangement of antennas

3 各向异性地层中信号的解耦

3.1 各向异性地层中信号的解耦方法

当地层为各向异性时,由于每一层地层的垂直电导率与水平电导率不同,因此接收天线中无论来自钻头前方异常地层的信号还是来自仪器周围地层的信号均含有垂直和水平电导率信息。通过进一步优化 MWD 仪器天线排列方式和信号接发方式,可以将各向异性地层中的 V_{AoB} 和 V_{AiT} 信号再次进行最大程度地解耦,分别分解为垂直电导率信号和水平电导率信号,从而方便各向异性地层的数据处理解释。为了使各向异性地层的垂直和水平电导率最大程度地解耦,可在 MWD 仪器中采用倾斜天线对,即每一组发射或接收天线均由一对共面的倾斜天线组成(图9),这对天线的磁矩方向与仪器轴向的夹角为 $(\pm\theta)$ 。在图9(a)所示的交叉排列方式中,仍假设相邻天线的间距为 d ,将来自钻头前方的水平信号 $V_{\text{AoB,h}}$ 、垂直信号 $V_{\text{AoB,v}}$ 和来自仪器周围的水平信号 $V_{\text{AiT,h}}$ 、垂直信号 $V_{\text{AiT,v}}$ 定义为如下表达式:

$$\begin{aligned} V_{\text{AoB,h}} &= V_{\text{T}_1\text{R}_1} + V_{\text{T}_1\text{R}_3} + V_{\text{T}_3\text{R}_1} + V_{\text{T}_3\text{R}_3} - V_{\text{T}_2\text{R}_2} - V_{\text{T}_2\text{R}_4} - \\ &V_{\text{R}_4\text{R}_2} - V_{\text{T}_4\text{R}_4}, \\ V_{\text{AoB,v}} &= V_{\text{T}_1\text{R}_1} - V_{\text{T}_1\text{R}_3} - V_{\text{T}_3\text{R}_1} + V_{\text{T}_3\text{R}_3} - V_{\text{T}_2\text{R}_2} + V_{\text{T}_2\text{R}_4} + \end{aligned} \tag{7}$$

$$V_{\text{R}_4\text{R}_2} - V_{\text{T}_4\text{R}_4}, \tag{8}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{AiT,h}} &= V_{\text{T}_1\text{R}_2} + V_{\text{T}_1\text{R}_4} + V_{\text{T}_3\text{R}_2} + V_{\text{T}_3\text{R}_4} - V_{\text{T}_2\text{R}_1} - V_{\text{T}_2\text{R}_3} - \\ &V_{\text{T}_4\text{R}_1} - V_{\text{T}_4\text{R}_3}, \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{AiT,v}} &= V_{\text{T}_1\text{R}_2} - V_{\text{T}_1\text{R}_4} - V_{\text{T}_3\text{R}_2} + V_{\text{T}_3\text{R}_4} - V_{\text{T}_2\text{R}_1} + V_{\text{T}_2\text{R}_3} + \\ &V_{\text{T}_4\text{R}_1} - V_{\text{T}_4\text{R}_3}. \end{aligned} \tag{10}$$

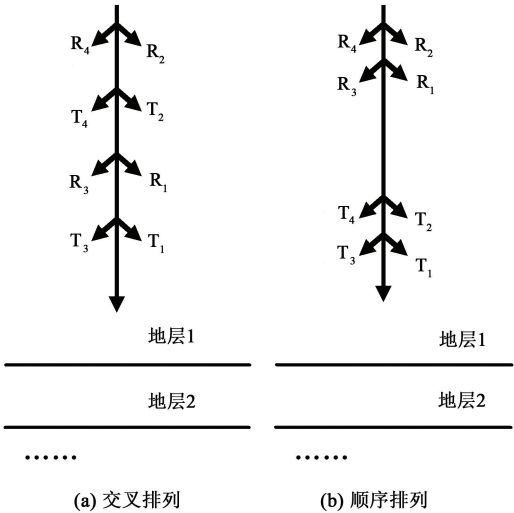


图9 MWD 仪器发射天线对和接收天线对排列方式示意图
Fig.9 Embodiment of arrangements of transmitter pairs and receiver pairs of MWD tools

通过分析可以发现,式(7)等号右侧前4项组

合 $V_{T_1R_1}+V_{T_1R_3}+V_{T_3R_1}+V_{T_3R_3}$ 相当于垂直磁偶极子产生的磁场的垂直分量的贡献,在仪器与地层界面垂直即 $\gamma=0^\circ$ 的情况下只与地层水平电导率有关^[19],后 4 项组合含义相同,因此 $V_{AoB,h}$ 包含的是水平电导率信息。随着地层倾角 γ 的增加, $V_{AoB,h}$ 将包含越来越多的垂直电导率信息。式(8)等号右侧前 4 项组合 $V_{T_1R_1}-V_{T_1R_3}-V_{T_3R_1}+V_{T_3R_3}$ 相当于水平磁偶极子产生的磁场的水平分量的贡献,在仪器与地层界面垂直即 $\gamma=0^\circ$ 的情况下主要与地层垂直电导率有关,但同时也与地层水平电导率有关^[19],后 4 项组合含义相同。因此 $V_{AoB,v}$ 既包含了地层垂直电导率信息,也包含了地层水平电导率信息,但主要包含的是垂直电导率信息。随着地层倾角 γ 的增加, $V_{AoB,v}$ 将包含越来越多的水平电导率信号。同样的方法可以分析出 $V_{AtT,h}$ 和 $V_{AtT,v}$

的含义。对于图 9(b) 所示的顺序排列方式,根据针对图 2(b) 和图 9(a) 的分析,仍采用式(7)~(10) 的定义,也可以实现 V_{AoB} 和 V_{AtT} 信号中垂直电导率信号和水平电导率信号最大程度的解耦。各向异性地层中这些信号的解耦可以方便对地层的对比评价。

3.2 各向异性地层中天线交叉排列时 MWD 仪器的响应

图 10(a) 给出了地层模型 6 的地层参数,该模型为一个三层各向异性地层模型(其中中间第二层是各向同性地层)。针对图 9(a) 所示的天线交叉排列方式,取 $f=10\text{ kHz}$ 、 $d=0.8\text{ m}$ 、 $\theta=45^\circ$,图 10(b)~(d) 分别给出了当倾角 γ 取 0° 、 30° 和 60° 时 $V_{AoB,h}$ 、 $V_{AoB,v}$ 、 $V_{AtT,h}$ 和 $V_{AtT,v}$ 的实部信号随发射天线 T_1 在地层坐标系中的垂向坐标 z_{T_1} 的变化关系。

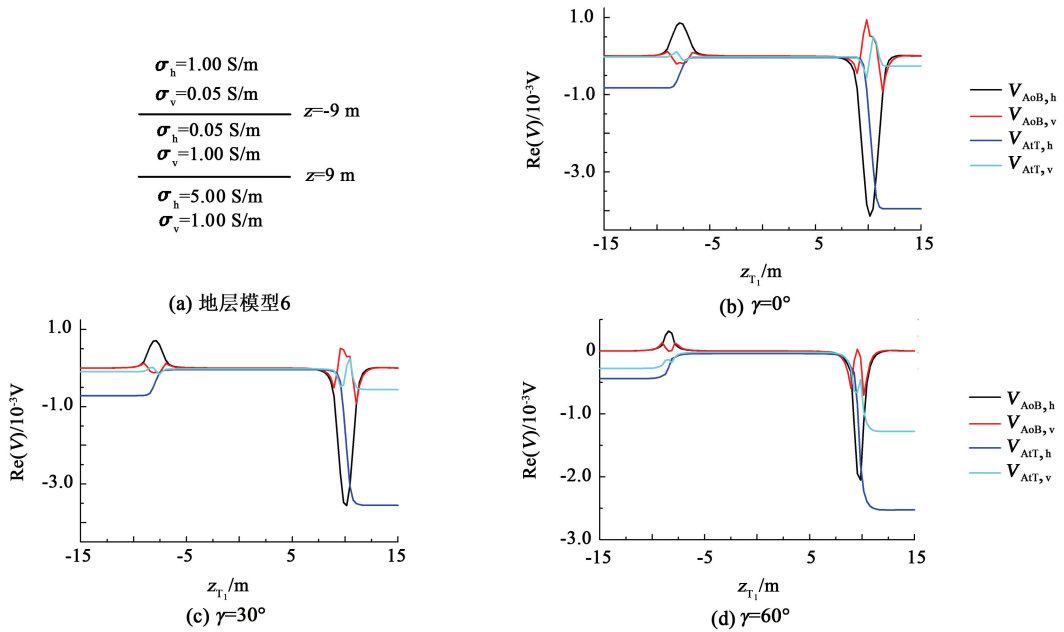


图 10 天线交叉排列时地层模型 6 的响应

Fig. 10 Responses of formation model 6 with alternate arrangement of antennas

由图 10 可以看出, $\text{Re}(V_{AoB,h})$ 和 $\text{Re}(V_{AoB,v})$ 均具有界面响应特征,只受层界面存在的影响。但在层界面附近 $\text{Re}(V_{AoB,h})$ 的幅度值较 $\text{Re}(V_{AoB,v})$ 的幅度值要大且变化关系简单,能够更明显地指示出层界面的存在。另外, $\text{Re}(V_{AoB,h})$ 和 $\text{Re}(V_{AoB,v})$ 在层界面附近的幅度值均随仪器倾角 γ 的增大而减小。在各向异性地层中 $\text{Re}(V_{AtT,h})$ 与仪器周围地层的水平电导率高度相关且随着倾角 γ 的增加相关性降低,而 $\text{Re}(V_{AtT,v})$ 则与仪器周围地层的垂直电导率高度相关且随着倾角 γ 的增加相关性降低。当倾角 γ 为 0° 时, $\text{Re}(V_{AtT,h})$ 仅取决于最低与最高位置天线之间仪器周围地层的水平电导率,由 $\text{Re}(V_{AtT,h})$ 可以直

接精确获得地层的水平电导率。但 $\text{Re}(V_{AtT,v})$ 并不只由仪器周围地层的垂直电导率决定,而是由地层的垂直和水平电导率共同决定,由 $\text{Re}(V_{AtT,v})$ 并不能直接获得地层的垂直电导率,需先由 $\text{Re}(V_{AtT,h})$ 获得地层的水平电导率,然后再由 $\text{Re}(V_{AtT,v})$ 获得地层的垂直电导率。当倾角 γ 较大时, $\text{Re}(V_{AtT,h})$ 与 $\text{Re}(V_{AtT,v})$ 逐渐接近,两种信号的耦合程度增大。但只要倾角 γ 不是太大,水平电导率信息在 $\text{Re}(V_{AtT,h})$ 的比例较大,仍可利用 $\text{Re}(V_{AtT,h})$ 估算出仪器周围地层的水平电导率,并根据倾角 γ 进行修正,最后再由修正后的水平电导率和 $\text{Re}(V_{AtT,v})$ 获得地层的垂直电导率。对于模型中间的各向同性地层

$\text{Re}(V_{\text{AIT},h})$ 与 $\text{Re}(V_{\text{AIT},v})$ 保持重合且不随倾角 γ 的增加而改变。无论倾角 γ 如何变化, $\text{Re}(V_{\text{AIT},h})$ 和 $\text{Re}(V_{\text{AIT},v})$ 均只由最低与最高位置天线之间地层电导率决定, 且不受钻头前方地层的影响, 但当地层界面位于最低与最高位置天线之间时, $\text{Re}(V_{\text{AIT},v})$ 的变化规律较 $\text{Re}(V_{\text{AIT},h})$ 复杂。

3.3 各向异性地层中天线顺序排列时 MWD 仪器的响应

针对图 9(b) 所示的天线顺序排列方式计算地

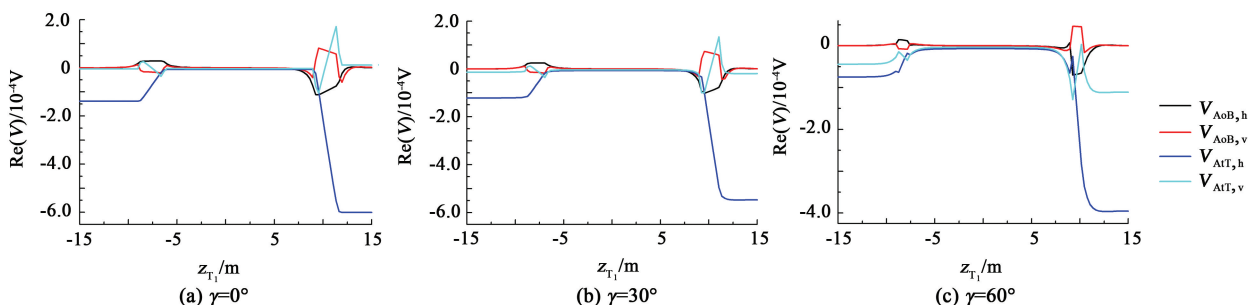


图 11 天线顺序排列时地层模型 6 的响应

Fig. 11 Responses of formation model 6 with serial arrangement of antennas

4 结 论

(1) 通过优化随钻电磁波测量仪器天线阵列的排列方式和信号接发方式, 无论发射与接收天线之间是交叉还是顺序排列, 均可以将来自钻头前方地层的信号 V_{AoB} 与来自仪器周围地层的信号 V_{AIT} 最大程度地解耦。 V_{AoB} 与 V_{AIT} 的解耦程度与地层相对于仪器轴向的倾角有关, 倾角越大两种信号的解耦程度越低。

(2) 将仪器发射与接收天线采用倾斜天线对的方式, 并对信号进行科学定义, 可以将各向异性地层中来自钻头前方地层的信号与来自仪器周围地层的信号继续进行分解, 在这两种信号中实现地层垂直电导率信息与水平电导率信息最大程度的解耦。

(3) 解耦后的 V_{AIT} 只受最低位置与最高位置天线之间仪器周围地层电导率的影响, 对钻头前方地层的电导率并不敏感, 可以利用 V_{AIT} 准确获得仪器所在地层的电导率参数。

(4) 解耦后的 V_{AoB} 只受层界面的影响, 当仪器远离界面时无论仪器周围地层的电导率多大, V_{AoB} 均快速衰减至 0, 利用 V_{AoB} 可以精确地指示出地层交界面的存在。 V_{AoB} 在界面附近的响应特性受界面两侧地层电导率对比度和地层倾角的影响较大。

参考文献:

[1] COOPE D, SHEN L C, HUANG F S C. The theory of 2

层模型 6 的响应, 取 $f=10 \text{ kHz}$, $l=2.0 \text{ m}$, $s=0.4 \text{ m}$, $\theta=45^\circ$, 图 11(a) ~ (c) 分别给出了当倾角 γ 取 0° 、 30° 和 60° 时 $V_{\text{AoB},h}$ 、 $V_{\text{AoB},v}$ 、 $V_{\text{AIT},h}$ 和 $V_{\text{AIT},v}$ 的实部信号随 z_T 的变化关系。由图 11 可以得到与图 10 类似的结论, 但在界面附近 $\text{Re}(V_{\text{AoB},h})$ 、 $\text{Re}(V_{\text{AoB},v})$ 的形状与天线交叉排列方式的模拟结果仍存在较大差别, 其边界响应效果较天线交叉排列方式要差, 与各向同性地层结论相同。

MHz resistivity tool and its application to measurement-while-drilling [J]. The Log Analyst, 1984, 25(3): 1-11.

[2] SHEN L C. Theory of a coil-type resistivity sensor for MWD application [J]. The Log Analyst, 1991, 32(5): 603-611.

[3] BITTAR M S, RODNEY P F, MACK S G, et al. A multiple-depth-of-investigation electromagnetic wave resistivity sensor: theory, experiment, and field test results [J]. SPE Formation Evaluation, 1993, 8(3): 171-176.

[4] MEYER W H. New two frequency propagation resistivity tools [C/CD]. SPWLA 36th Annual Logging Symposium, Paper XX, June 1995, Paris, France.

[5] BITTAR M S, RODNEY P E. The effects of rock anisotropy on MWD electromagnetic wave resistivity sensors [J]. The Log Analyst, 1996, 37(1): 20-30.

[6] BITTAR M S. Electromagnetic wave resistivity tool having a tilted antenna for determining the horizontal and vertical resistivities and relative dip angle in anisotropic earth formations: 6163155[P]. 2000-12-19.

[7] BITTAR M S. Electromagnetic wave resistivity tool having a tilted antenna for geosteering within a desired payzone: 6476609[P]. 2002-11-05.

[8] BITTAR M S. Fixed depth of investigation log for LWD resistivity tool [R]. SPE 84098, 2003.

[9] IVERSON M. Geo-steering using ultra-deep resistivity on the Grane field Norwegian North Sea [C/CD]. SPWLA 44th Annual Logging Symposium, Paper J, June 2003, Galveston, Texas, USA.

- [10] LI Q, OMERAGIC D, CHOU L, et al. New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling [C/CD]. SPWLA 46th Annual Logging Symposium, Paper UU, June 2005, New Orleans, Louisiana, USA.
- [11] BITTAR M S, KLEIN J, BESTE R, et al. A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation[R]. SPE 109971, 2007.
- [12] SINCLAIR P. Method and apparatus for directional measurement of subsurface electrical properties: 6100696[P]. 2000-08-08.
- [13] ALLAN V, SINCLAIR P, PRAIN K, et al. Design, development and field introduction of a unique low-frequency (20kHz) induction resistivity logging-while-drilling tool [C/CD]. SPWLA 45th Annual Logging Symposium, Paper XX, June 2004, Noordwijk, Netherlands.
- [14] 魏宝君,王成园,党峰,等.用柱状成层各向异性介质的并矢 Green 函数模拟多分量感应测井仪器的响应[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(2):59-69.
- WEI Baojun, WANG Chengyuan, DANG Feng, et al. Simulating responses of multi-component induction logging tools by dyadic Green's functions in cylindrically stratified anisotropic media[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(2):59-69.
- [15] 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.
- [16] 魏宝君,曹景强,任广强,等.用柱状成层各向异性介质的并矢 Green 函数模拟偏心对多分量感应测井响应的影响[J].地球物理学报,2017,60(3):1234-1247.
- WEI Baojun, CAO Jingqiang, REN Guangqiang, et al. Simulating effect of tool eccentricity on responses of multi-component induction logging tools by dyadic Green's functions in cylindrically stratified anisotropic media [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017,60(3):1234-1247.
- [17] 巫振观,范宜仁,王磊,等.随钻方位电磁波测井仪器偏心响应模拟及分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(5):69-76.
- WU Zhenguan, FAN Yiren, WANG Lei, et al. Numerical modeling and analysis of eccentricity effect on borehole response of azimuthal electromagnetic logging while drilling tool[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(5):69-76.
- [18] WEI Baojun, ZHANG Gengji, LIU Qinghuo. Recursive algorithm and accurate computation of dyadic Green's functions for stratified uniaxial anisotropic media [J]. Science in China (ser F), 2008,51(1):63-80.
- [19] 魏宝君,王甜甜,王颖.用磁流源并矢 Green 函数的递推矩阵方法计算层状各向异性地层中多分量感应测井响应[J].地球物理学报,2009,52(11):2920-2928.
- WEI Baojun, WANG Tiantian, WANG Ying. Computing the response of multi-component induction logging in layered anisotropic formation by the recursive matrix method for magnetic-current-source dyadic Green's function [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009,52(11):2920-2928.
- [20] 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.
- [21] 汪宏年,陶宏根,姚敬金,等.用模式匹配算法研究层状各向异性倾斜地层中多分量感应测井响应[J].地球物理学报,2008,51(5):1591-1599.
- WANG Hongnian, TAO Honggen, YAO Jingjin, et al. Study on the response of a multicomponent induction logging tool in deviated and layered anisotropic formations by using numerical mode matching method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008,51(5):1591-1599.

(编辑 徐会永)