

随钻方位电磁波仪器补偿测量方法研究

杨震¹, 杨锦舟², 杨涛³

(1. 中国石化胜利油田博士后科研工作站, 山东东营 257017; 2. 中国石化胜利石油工程公司钻井工艺研究院, 山东东营 257017; 3. 中国石化胜利测井公司, 山东东营 257017)

摘要:基于层状各向异性电磁场的解析解,对带有横向天线的方位电磁波仪器进行快速响应数值模拟。以胜利钻井工艺研究院的多频方位电阻率(AMR)仪器和贝克休斯方位电磁波电阻率(APR)仪器为例,对采用轴向发射、横向接收的测量单元分别进行单发单收、单发双收、双发单收以及双发双收的测量组合响应模拟,根据模拟结果对补偿测量的效果进行评价分析。模拟结果表明,单发单收测量单元能实现基本的方位电磁波的测量功能,但易受到地层环境的影响,使其应用受到一定限制。通过发射或接收补偿可以不同程度地消除仪器偏心、相对倾斜角以及电阻率各向异性的影响,使方位电磁波测量资料更好地应用于地质导向中。

关键词:横向天线;方位电磁波;补偿测量;各向异性;地质导向

中图分类号:P 631.9 **文献标志码:**A

引用格式:杨震,杨锦舟,杨涛.随钻方位电磁波仪器补偿测量方法研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(3):62-69.

YANG Zhen, YANG Jinzhou, YANG Tao. Research on azimuthal electromagnetic tool while drilling measuring method of compensation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 62-69.

Research on azimuthal electromagnetic tool while drilling measuring method of compensation

YANG Zhen¹, YANG Jinzhou², YANG Tao²

(1. Post Doctoral Working Station of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257017, China;

2. Drilling Technology Research Institute, Shengli Oilfield Service Corporation, SINOPEC, Dongying 257017, China;

3. Shengli Well Logging Company, SINOPEC, Dongying 257017, China)

Abstract: Based on analytical solutions of the electromagnetic field in layered anisotropic formations, the fast responses of azimuthal electromagnetic tools with transverse antenna were simulated. Taking azimuthal multiple resistivity (AMR) tool of Shengli Drilling Technology Research Institute and azimuthal propagation resistivity (APR) tool of Baker Hughes as examples, the responses of different axial transmitter (T) and transverse receiver (R) couplings, such as single T-R, T-R-R, T-R-T, T-R-R-T, were numerically simulated, and were used to analyze the effects of compensation measurements. The simulation results show that the single axial transmitter and transverse receiver coupling can simulate the basic function of the azimuthal electromagnetic measurement, but the measured results can be biased by the surrounding formation conditions, which limits the use of the azimuthal electromagnetic measurements. The transmitter or receiver compensation can correct the influence from tool eccentricity, relative angle deviation and resistivity anisotropy to make the better use of the azimuthal electromagnetic measurements in geosteering.

Keywords: transverse antenna; azimuthal electromagnetic; compensation measurement; anisotropy; geosteering

传统的感应电阻率和随钻电磁波电阻率仪器采用轴向天线,即天线磁矩与仪器轴重合。这种天线

指向方式造成仪器测量结果不具备方位特性,在地质导向应用中存在很大的不确定性。新一代的随钻电磁波电阻率仪器在传统电磁波电阻率的基础上安装了倾斜或横向天线,测量结果具备方位特性,能更好地预测和判断界面的走向方位^[1-3]。以仪器轴作为 z 轴,传统的电磁波电阻率仪器只测量电磁场的 zz 分量,安装倾斜或横向天线后,增加了对电磁场 zx 和 zy 分量的测量,而 zx 和 zy 分量具备方位特性,周期为 2π 。地质导向应用的主要目的是要预测界面的距离以及走向方位,因此仪器响应要突出地层界面的影响,但在实际随钻测量过程中不可避免地受到井眼、地层各向异性等地层因素的影响,同时仪器的电气影响也不可忽略。补偿测量在一定程度上能消除或减小某些因素的影响,不同的补偿测量方式的目的和效果不同。作为仪器的设计者或使用者必须通过数值模拟分析各种补偿测量的目的和效果,才能更好地设计和使用随钻方位电磁波仪器。在计算层状介质电磁场分布时包含 Sommerfeld 无穷积分,该积分核为高振荡函数,直接计算效率比较低,而且积分结果不准确。肖加奇等^[4-5]用快速 Hankel 变换技术进行计算;魏宝君等^[6-10]开发了水平层状各向异性介质中的磁流源并矢 Green 函数,可以高效计算电磁场在地层介质中的分布。采用高斯求积和连分式展开计算电磁函数积分^[11],积分采样点少,自动选择积分步长,具备较高的效率和精度。笔者以中石化胜利钻井工艺研究院研发的多频方位电阻率 (azimuthal multiple resistivity, AMR) 仪器和贝克休斯方位电磁波电阻率 (azimuthal propagation resistivity, APR) 仪器模型为例^[12],在采用轴向发射天线、横向接收天线的情况下,分别对单发单收、单发双收、双发单收以及双发双收测量方式的响应进行模拟,并对模拟结果进行分析。

1 仪器物理模型及模拟方法

胜利钻井工艺研究院研发的 AMR 随钻多频电阻率仪器与贝克休斯 APR 仪器线圈排布及线圈距分别如图 1、2 所示。两种仪器的轴向发射天线与横向接收天线彼此垂直,以测量 zx 或 zy 分量,但两种仪器的补偿测量方式不同。AMR 仪器工作频率为 2 MHz 和 400 kHz,发射天线 T1 和 T2、T3 和 T4 分别关于轴向接收天线 R1 和 R2 对称,可以提供 8 条对称补偿的电磁波电阻率曲线;发射天线 T5 和 T2 关于横向接收天线 Rc 对称,可以提供 2 条对称补偿的定向电动势曲线。贝克休斯 APR 仪器工作频率为 2

MHz 和 400 kHz,提供 8 条对称补偿的电阻率曲线和 1 条对称补偿的定向电动势曲线。当发射天线通正弦交流电时,旋转状态下随钻方位电磁波仪器可以至少同时测量 3 个磁场分量,根据磁场互换原理,共可以得到 H_{zz} 、 H_{zx} 、 H_{zy} 、 H_{xz} 、 H_{yz} 5 个磁场分量。

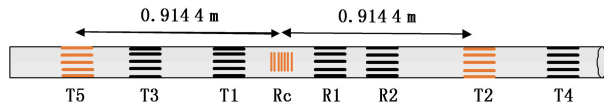


图1 胜利钻井院 AMR 仪器结构示意图

Fig. 1 Sketch map of AMR tool of Shengli Drilling Technology Institute

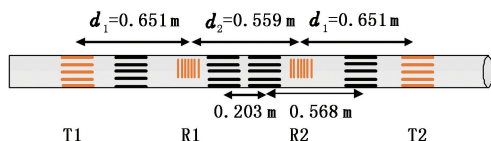


图2 贝克休斯 APR 仪器结构示意图

Fig. 2 Sketch map of APR tool of Baker Hughes

对于层状各向异性地层模型,随钻方位电磁波仪器天线可以简化为磁偶极子。通常包含井眼的 3 维随钻方位电磁波仪器响应没有解析解,往往只能用有限元或有限差分等数学方法求解^[13-16],计算量巨大,在仪器实时响应正反演模拟中受到很大限制。考虑到仪器测量的磁场 zx 、 zy 分量的响应特点,当井眼规则、仪器居中时,也就是仪器具备旋转对称性的情况下, zx 、 zy 分量为零,即 zx 、 zy 分量不受井眼的影响。对于忽略井眼环境的层状各向异性地层,可以应用并矢格林函数得出任意方向磁偶极子的磁场 z 分量,进而推导出地层的电磁场分布^[15]。

$$E_z = -\frac{i\omega\mu M_h}{4\pi} \sin\varphi \frac{d}{dz} |z-z'| \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{k_{zv}} J_1(\lambda\rho) e^{ik_{zv}|z-z'|} d\lambda. \quad (1)$$

$$H_z = \frac{i}{4\pi} \left[M_v \int_0^\infty \frac{\lambda^3}{k_{zh}} J_0(\lambda\rho) e^{ik_{zh}|z-z'|} d\lambda - M_h \cos\varphi \frac{d}{dz} |z-z'| \int_0^\infty \lambda^2 J_1(\lambda\rho) e^{ik_{zh}|z-z'|} d\lambda \right]. \quad (2)$$

其中

$$k_{zv} = \sqrt{i\omega\mu\sigma_v - \lambda^2},$$

$$k_{zh} = \sqrt{i\omega\mu\sigma_h - \lambda^2}.$$

式中, μ 为磁导率, $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$; ω 为工作频率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; M_h 、 M_v 分别为水平磁矩和垂直磁矩, $\text{A} \cdot \text{m}^2$; φ 为方位角, rad ; $J_n(\cdot)$ 为 n 阶 Bessel 函数; λ 为积分变量; k_{zv} 、 k_{zh} 分别为纵向波数和径向波数; σ_v 、 σ_h 分别为垂直电导率和水平电导率, $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

在建模过程中,如果仪器轴线与地层界面法线

存在一定夹角,则需要进行坐标转换。假设地层坐标系为 xyz , 仪器轴相对于大地坐标系 z 轴夹角为 α , 仪器轴方位角为 β (相对于 x 轴), 仪器轴绕自身旋转的方位角为 γ 。仪器的参考坐标系为 $x'y'z'$, 地层

坐标系与仪器坐标系之间的磁矩存在如下转换关系^[18]:

$$M = RM' \tag{3}$$

其中

$$R = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \cos \beta \sin \gamma - \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \end{pmatrix} \tag{4}$$

2 随钻方位电磁波仪器信号特点分析

图3为2层地层模拟交叉耦合电动势信号响应模拟结果,地层电阻率分别为1和20 $\Omega \cdot m$, 仪器包含轴向发射天线和横向接收天线,线圈距为0.914 4 m,以接近水平姿态穿过地层界面(4 m 位置处)。黑色曲线和红色曲线分别为虚部信号和实部信号大小随界面距离变化情况。在图3中虚线表示模拟信号值为负值。

还是400 kHz,信号响应具备相似特征,即仪器位于界面位置时信号幅度最大,并且信号幅度随着界面距离的增大而降低。在一定距离范围内,信号大小与界面距离存在对数线性关系,信号幅度随界面距离呈现振荡性,实部信号比虚部信号振荡性更强,而虚部信号比实部信号与界面距离的关系更加简单直观,因此在地质导向中用虚部电动势信号作为定向信号更加方便。在本文模拟结果中,如不特别说明,电动势信号均指虚部电动势信号。

由模拟结果可以发现,工作频率无论为2 MHz

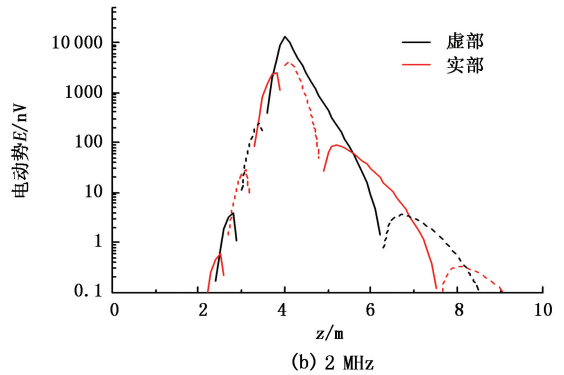
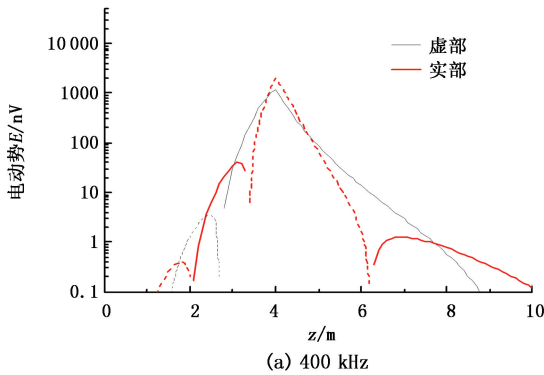


图3 交叉耦合电动势信号响应模拟

Fig.3 Simulation of cross coupling voltage signals

图4为仪器距离界面0.5 m处时,交叉耦合电

层界面方位。

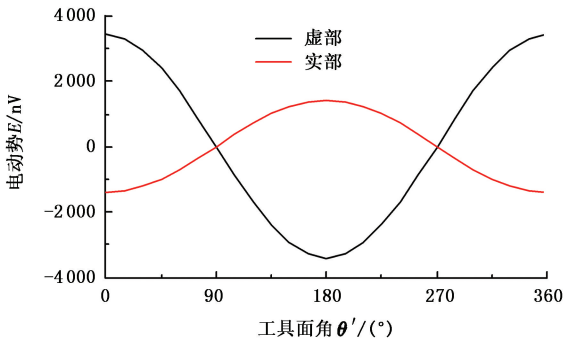


图4 定向电动势信号随仪器工具面角变化关系

Fig.4 Relationship between directional voltage signals and tool face angle

动势信号随仪器工具面角的变化情况。可以看出,电动势信号随工具面角的变化呈现周期性变化,周期为 2π , 响应信号的这一方位特征可以用于确定地

3 补偿测量方式及响应特征模拟分析

根据轴向发射天线与横向接收天线的组合方式不同,定向电动势测量方式具体可以简化为单发单收测量、双发单收测量、单发双收测量以及双发双收测量等。分别对不同测量方式在各向同性以及各向异性地层条件下进行响应特征模拟分析。

图5所示为不同线圈组合示意图。图6为单发单收仪器响应模拟结果,工作频率为2 MHz。胜利钻井工艺研究院AMR仪器与贝克休斯APR仪器都可进行该模式测量。其中图6(a)、(b)为模拟电阻率各向同性3层地层模型,地层电阻率分别为1、20和1 $\Omega \cdot m$,线圈距为0.914 4 m。模拟仪器与地层界面法线夹角分别为 90° 、 80° 、 70° 、 60° 时的响应,横

向接收天线分别位于发射天线的井口和井底方向。由响应模拟结果可以看出,即使地层电阻率参数分布对称,除了井眼相对倾角为 90° 的情况外,单发单收的定向电动势信号也不会反向对称。信号幅度在界面处达到极值,随着与界面距离增大逐渐降为零。

图 6(c)、(d) 为中间目的层为各向异性时响应模拟结果,水平电阻率和垂直电阻率分别为 5 和 $20 \Omega \cdot m$ 。其响应特征与各向同性地层类似,只是在各向异性地层中即使仪器远离界面后,由于各向异性的影响,定向电动势信号也不为零,这是因为在电阻率均匀各向异性地层中,横向接收天线的磁场信号可以表示为

$$H_{zx} = \frac{M_h}{4\pi L^3} \left[\frac{\cos \theta}{\sin \theta} i k_h L (e^{i k_h L} - e^{-i k_h L}) \right], \quad (5)$$

$$\beta = \sqrt{\cos^2 \theta + (R_h/R_v) \sin^2 \theta}. \quad (6)$$

式中, L 为线圈距, m ; k_h 为水平波数; θ 为地层法线

与仪器轴相对夹角, rad ; R_h 为水平电阻率, $\Omega \cdot m$; R_v 为垂直电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

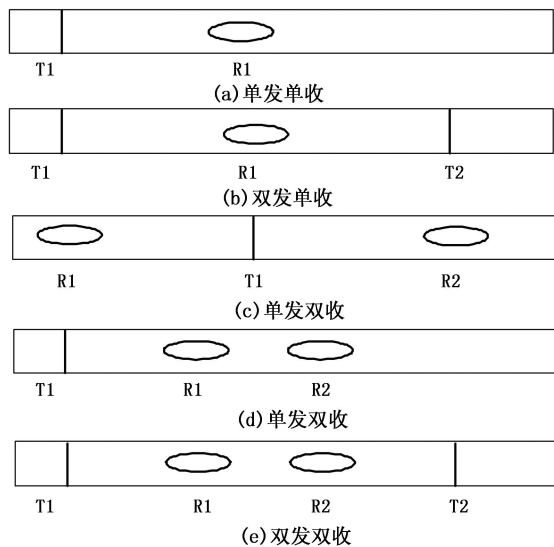


图 5 不同线圈组合示意图

Fig. 5 Schematic drawing of different antenna couplings

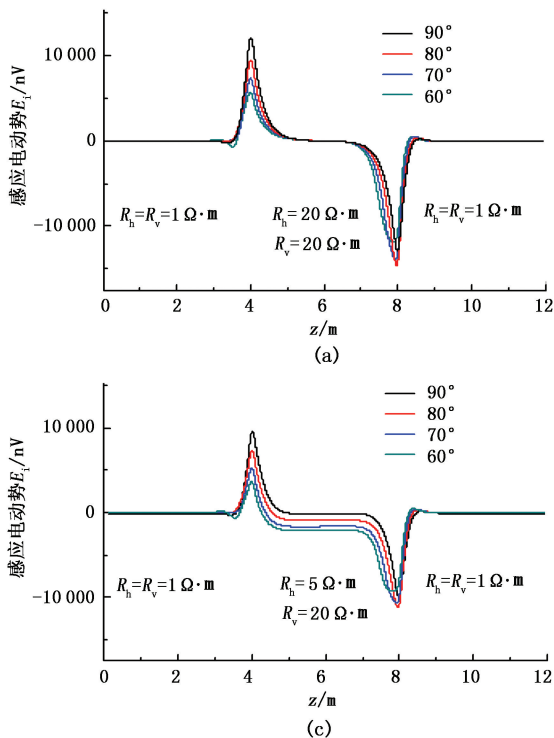
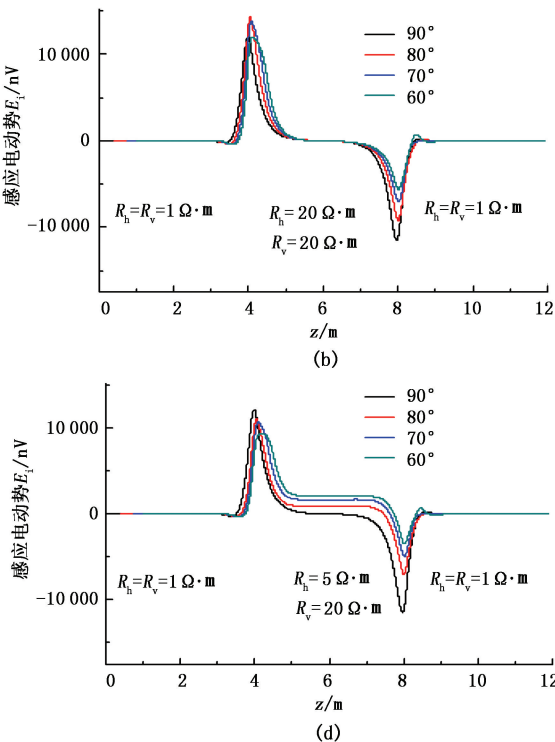


图 6 单发单收测量响应模拟

Fig. 6 Response simulation of single transmitter-receiver pair

从式(5)可以看出,当 $\theta \neq 90^\circ$ 时, $H_{zx} \neq 0$, 定向电动势受各向异性的影响即使远离界面也不为零,在不确定地层模型电阻率各向异性的情况下,会给界面位置预测带来不利影响。在地质导向应用中为了预测和判断界面位置,需要消除电阻率各向异性的影响。由图 6(c)、(d) 发现,当发射天线分别位于



接收天线的井口和井底方向时,各向异性对仪器响应的影响大小相等,符号相反,因此可以通过对称发射补偿来消除各向异性的影响。

图 7 分别为胜利钻井工艺研究院 AMR 仪器采用对称发射补偿后的仪器响应模拟结果,工作频率为 2 MHz 。其中,图 7(a) 中间目的层为各向同性,

图7(b)中间目的层为各向异性。

400 kHz 工作频率下仪器响应与 2 MHz 工作频率下响应相似,只是同样发射电流情况下,400 kHz 工作频率下仪器定向信号更小。经过对称发射补偿后,消除了电阻率各向异性对定向电动势信号的影响,利用定向电动势信号的正负可以方便地判断井眼与地层的相对位置关系,从而使井眼尽可能地停留在目的层内。在目的层内经对称发射补偿,仪器

离开界面一段距离后,信号幅度与界面垂直距离的关系与井眼相对倾斜角无关。由数值模拟得到信号幅度与地层真实垂深关系后,通过对比测量深度与信号幅度的关系,可以计算井眼的相对倾角^[19]。经过发射天线对称补偿后,当相对井斜角变小时,界面附近的极值出现偏移,可结合单发单收定向电动势信号准确判断界面位置。

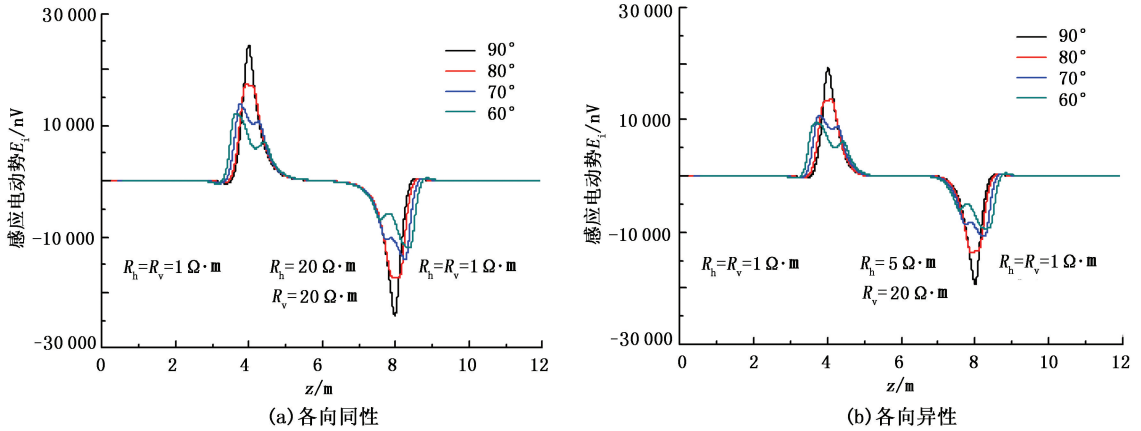


图7 双发单收补偿测量响应模拟

Fig.7 Response simulation of transmitter-receiver-transmitter compensation measurements

图8为单发双收补偿测量响应模拟,两个横向接收天线对称位于发射天线两端(图5(c)),工作频率分别为2 MHz。

横向接收天线的测量值进行相加补偿处理,可以用一种线圈结构同时实现两种补偿测量方式,在保证仪器探测深度的同时,又能准确判断地层界面位置。

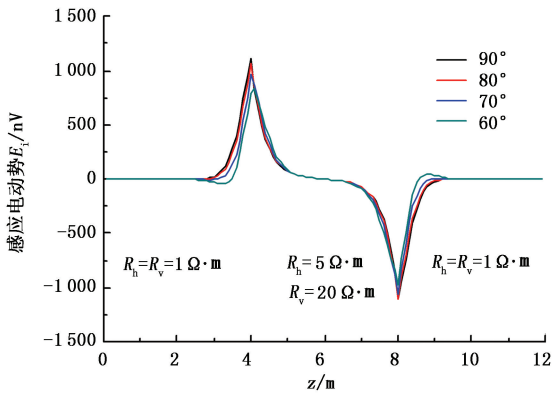


图8 单发双收对称补偿测量响应模拟

Fig.8 Response simulation of receiver-transmitter-receiver compensation measurements

经过补偿发射后,可以消除电阻率各向异性的影响。在相同信号动态范围内,图5(b)双发单收补偿测量方式对界面的探测距离更大一些,但图5(c)单发双收补偿测量方式中信号幅度的极值点出现在界面位置上,因此对界面位置的准确判断更为有效。胜利钻井工艺研究院研发的AMR仪器在实际测量中通过延时补偿测量,即图5(b)中T2发射时横向接收天线的测量值与T1到达T2位置时,T1发射,

为了消除井眼偏心的影响,贝克休斯APR仪器采用两个横向接收天线电动势虚部信号的差预测和确定地层界面(图5(d)),具体表示^[20]为

$$H_{T1} = H_2 - \left(\frac{d_1}{d_1 + d_2} \right)^3 H_1, \quad (7)$$

$$H_{T2} = H_1 - \left(\frac{d_1}{d_1 + d_2} \right)^3 H_2. \quad (8)$$

式中, H_1 、 H_2 分别为横向接收天线R1和R2测到的信号; d_1 、 d_2 分别为T1与R1的距离以及R1与R2的距离。

专利US7483793^[20]中模拟井眼偏心情况下对电定向电动势信号的影响,采用有限差分方法对距离界面不同位置时,不同偏心距离的定向电动势响应进行模拟。模拟结果表明,经过单发双收补偿测量后,能够在一定程度上减小井眼偏心造成的影响。

图9(a)为T1发射,R1、R2接收,2 MHz工作频率下各向同性地层响应模拟,图9(b)为400 kHz工作频率下各向异性地层响应模拟。该单发双收测量模式能在一定程度上消除井眼偏心的影响,但无法消除电阻率各向异性的影响。单发双收补偿后,2

MHz 定向电动势信号响应更加复杂,不利于地质导向应用,400 kHz 定向电动势信号经过单发双收补偿测量后响应曲线形态变化不大。

图 10 为贝克休斯 APR 仪器双发双收补偿测量模式仪器响应模拟,工作频率分别为 2 MHz 和 400 kHz。由响应模拟曲线可以看出,2 MHz 工作频率双发双收补偿测量模式响应曲线比较复杂,虽然消除了电阻率各向异性的影响,但单独利用信号正负判断界面方位存在一定不确定性。工作频率为 400

kHz 时,双发双收既可消除电阻率各向异性的影响,又能降低井眼偏心的影响,并且仪器响应简单,离开界面一定距离后,仪器与界面的垂直距离与井眼相对倾斜角无关,有利于精确地质导向。双发双收补偿后,随着相对井斜角的降低,信号幅值极值点偏离界面,可能会造成界面判断不准确,在实际应用中可综合利用单发单收响应信号进行预测和判断,提高地质导向的准确性和可靠性。

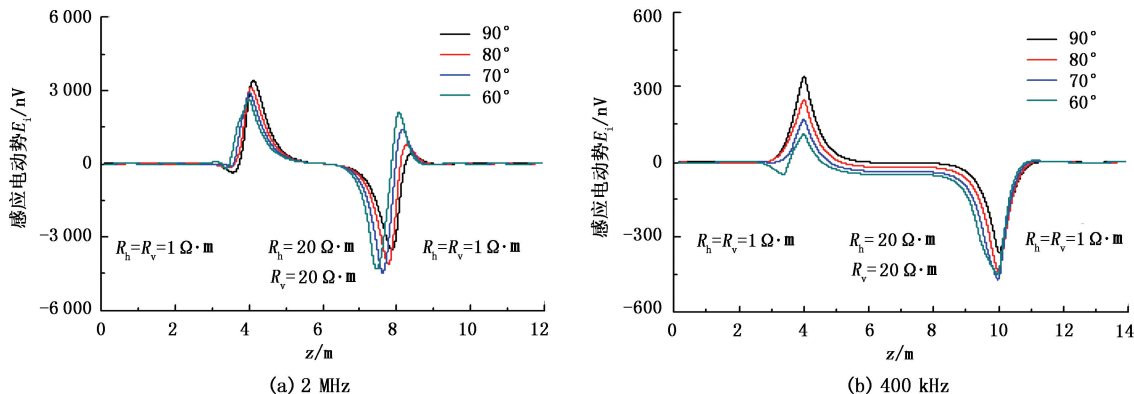


图 9 单发双收补偿测量仪器响应

Fig. 9 Response of transmitter-receiver-receiver compensation measurements

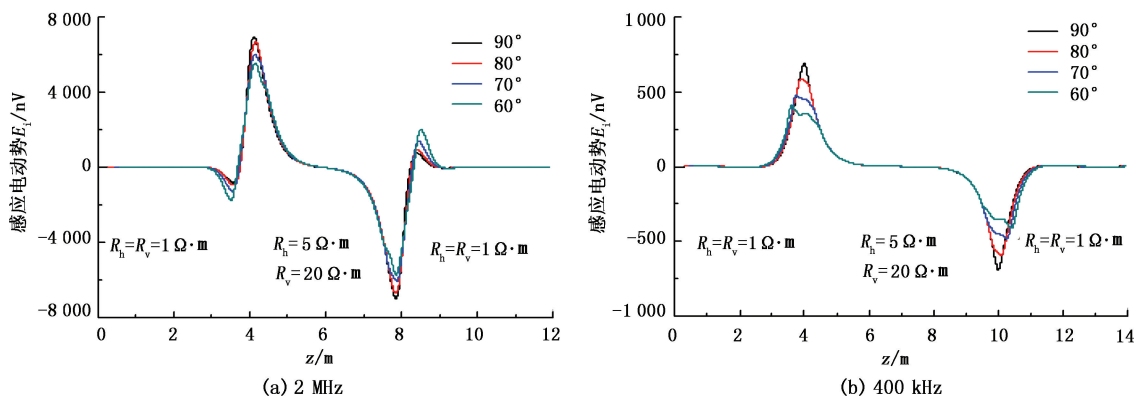


图 10 双发双收补偿测量方式响应模拟

Fig. 10 Response simulation of transmitter-receiver-receiver-transmitter compensation measurements

4 结 论

(1) 交叉耦合磁场分量 H_{zx} 虚部信号对界面有明确的预测和指示作用,在水平层状均匀各向同性地层介质中,定向电动势信号在界面附近达到极值,随着界面距离增大逐渐减小至零;受电阻率各向异性的影响,单发单收定向电动势信号在远离界面时,定向信号偏离零点,并随相对倾斜角的变化而变化。

(2) 通过对称发射补偿可以消除电阻率各向异性的影响,在目的层内离开界面一定距离后,仪器与界面的垂直距离与井眼的相对夹角无关,有利于精

确地质导向应用。

(3) 胜利钻井工艺研究院的 AMR 仪器通过双发单收消除电阻率各向异性的影响,通过信号延迟补偿处理方法,AMR 仪器也可以实现横向接收天线对称分布于发射天线的测量方式,两种测量方式相结合,更有利于界面位置的预测和判断。通过数值模拟发现,AMR 仪器的补偿测量方式在 2 MHz 和 400 kHz 情况下都有较好的效果,能提供两种频率的方位电磁波信息。

(4) 贝克休斯 APR 仪器两个接收天线位于发射天线同侧,通过接收补偿测量减小井眼的影响,双发

双收补偿测量可以同时削弱井眼偏心和电阻率各向异性的影响,从响应效果来看,该补偿测量方式更适合 400 kHz 工作频率。

参考文献:

- [1] OMERAGIC D, LI D, CHOU L, et al. Deep directional electromagnetic measurement for optimal placement [R]. SPE 97045, 2005.
- [2] ROLAND E, CHEMALI, TSILI W, et al. Method for signal enhancement in azimuthal propagation resistivity while drilling: US, 7375530B2 [P]. 2008-05-20.
- [3] KENNEDY W D, BILL C, STEPHEN P, et al. Geosteering using deep resistivity image from azimuthal and multiple propagation resistivity [C/CD]. SPWLA 50th Annual Logging Symposium, 2009, Paper ZZ.
- [4] 肖加奇, 张庚骥. 用快速傅里叶-汉克耳变换算法计算层状介质中偶极天线电磁场 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1995, 19(5): 25-29.
- XIAO Jiaqi, ZHANG Gengji. Computation of electromagnetic field due to dipole antenna in stratified media with fast Fourier-Hankel transform (FFHT) algorithm [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1995, 19(5): 25-29.
- [5] 高杰, 陈木银, 陈紫薇, 等. 定向井各向异性地层交流电测井响应模拟 [J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(4): 301-304.
- GAO Jie, CHEN Muyin, CHEN Yawei, et al. Forward modeling of AC logging response in directional wells of anisotropic formations [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(4): 301-304.
- [6] 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.
- [7] WEI B J, ZHANG G J, LIU Q. Recursive algorithm and accurate computation of dyadic Green's function for stratified uniaxial anisotropic media [J]. Science in China (ser F), 2008, 51(1): 63-80.
- [8] 魏宝君, 陈涛, 候学理, 等. 利用径向成层介质的 Green 函数和积分方程模拟含金属套管井间电磁场的响应 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(1): 57-63.
- WEI Baojun, CHEN Tao, HOU Xueli, et al. Simulating cross-hole electromagnetic field's response with metal casing using Green's function of radial-layered medium and integral equation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(1): 57-63.
- [9] 魏宝君, 张克, 欧永锋, 等. 采用混合法和递推矩阵算法模拟层状介质中随钻电磁波电阻率测量仪器的响应 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(1): 61-69.
- WEI Baojun, ZHANG Ke, OU Yongfeng, et al. Simulating electromagnetic wave resistivity MWD tool's response in stratified media using hybrid method and recursive matrix algorithm [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(1): 61-69.
- [10] 杨锦舟, 魏宝君, 林楠. 倾斜线圈随钻电磁波电阻率测量仪器基本原理及其在地质导向中的应用 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(1): 44-49.
- YANG Jinzhou, WEI Baojun, LIN Nan. Basic theory of electromagnetic wave resistivity measurement while drilling tool with tilted antenna and its application for geosteering [J]. Journal of China University of Petroleum, (Edition of Natural Science), 2009, 33(1): 44-49.
- [11] 张辉, 李桐林, 董瑞霞, 等. 利用高斯求积和连分式展开计算电磁张量格林函数积分 [J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 667-670.
- ZHANG Hui, LI Tonglin, DONG Ruixia, et al. Computation of Green's tensor integrals for electromagnetic problem using Gaussian quadrature and continued fraction [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(3): 667-670.
- [12] ZHANG Z Y, GONGUET C, RAJAN V, et al. Directional LWD resistivity tools and their business impacts [C/CD]. SPWLA 49th Annual Logging Symposium, 2008, Paper FFFF.
- [13] 沈金松. 用交错网格有限差分法计算三维频率域电磁响应 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(2): 281-288.
- SHEN Jinsong. Modeling of 3-D electromagnetic responses in frequency domain by using staggered grid finite difference method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(2): 281-288.
- [14] 汪功礼, 张庚骥, 崔锋修, 等. 三维感应测井响应计算的交错网格有限差分法 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(4): 561-567.
- WANG Gongli, ZHANG Gengji, CUI Fengxiu, et al. Application of staggered grid finite difference method to the computation of 3-D induction logging response [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(4): 561-567.
- [15] 王昌学, 周灿灿, 储昭坦, 等. 电性各向异性地层频率域电磁响应模拟 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1873-1883.

- WANG Changxue, ZHOU Cancan, CHU Zhaotan, et al. Modeling of electromagnetic responses in frequency domain to electrical anisotropic formations [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1873-1883.
- [16] ZHANG Z Y, YU L, KRIEGSMAUSER B, et al. Simultaneous determination of relative angles and anisotropic resistivity using multicomponent induction logging data [C/CD]. SPWLA 42nd Annual Logging Symposium, 2001, Paper S.
- [17] 肖加奇, 张庚骥. 水平井和斜度井中的感应测井响应计算[J]. 地球物理学报, 1995, 38(3): 396-404.
- XIAO Jiaqi, ZHANG Gengji. Computation of induction logging response in horizontal and highly-deviated wells [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(3): 396-404.
- [18] 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.
- [19] TSILI W, ROLAND C, ERIC H, et al. Real-time formation imaging, dip, and azimuthal while drilling from compensated deep directional resistivity [C/CD]. SPWLA 48th Annual Logging Symposium, 2007, Paper NNN.
- [20] TSILI W, ROLAND E C. Method of generating a deep resistivity image in LWD measurement: US, 7483793B2 [P]. 2009-01-27.

(编辑 修荣荣)