

倾斜线圈随钻电磁波电阻率测量仪器的 响应模拟及应用

宋殿光^{1,2}, 段宝良², 魏宝君³, 张贵宾¹

(1. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 中国电波传播研究所, 河南新乡 453003;
3. 中国石油大学理学院, 山东青岛 266580)

摘要:采用各向异性水平层状介质磁偶极子源并矢格林函数计算接收线圈倾斜的随钻电磁波电阻率仪器的响应, 利用新的方式定义出定向相位差及幅度比信号。分析视电阻率以及定向信号的探测特性, 总结出地层边界、地层对比度、相对倾角、各向异性、线圈倾斜角度对仪器响应的影响规律。结果表明, 倾斜线圈仪器不但可以利用视电阻率进行地层评价, 还可以利用新的定向信号探测出地层上下界面, 相比传统的电磁波电阻率仪器具有更好的地层评价和地质导向功能, 是一种应用前景广阔的仪器。

关键词:随钻测井; 电磁波电阻率; 倾斜线圈; 地质导向; 并矢格林函数

中图分类号:P 631.9

文献标志码:A

Response simulation and application of electromagnetic wave resistivity measurement-while-drilling tool with tilted coil

SONG Dian-guang^{1,2}, DUAN Bao-liang², WEI Bao-jun³, ZHANG Gui-bin¹

(1. College of Geophysics and Information Technology in China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. China Research Institute of Radiowave Propagation, Xinxiang 453003, China;
3. College of Science in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The azimuthal response of electromagnetic wave resistivity measurement while drilling with tilted coil was computed via the dyadic Green's function produced by magnetic dipole in a horizontally stratified anisotropic media. The directional phase difference and amplitude ratio signal were defined in a new way. The detection characteristics of apparent resistivity and directional signals were analyzed. The response rules affected by formation boundary, formation contrast ratio, relative dip, anisotropy and coil's tilting angle were obtained. The rule shows that the tool with tilted coil can be used not only to make formation evaluation through apparent resistivity, but also to detect upper and lower boundary of formation using directional signals. Compared with traditional electromagnetic wave resistivity tool, it has better application in formation evaluation and geosteering with more broad application prospects.

Key words: logging while drilling; electromagnetic wave resistivity; tilted coil; geosteering; dyadic Green's function

随钻电磁波电阻率测井仪因其在地质导向及实时地层对比中具有重要的价值而成为随钻测井中最为常用的仪器之一。传统的电磁波电阻率仪器一般采取对称结构, 具有高低两个频率和多个源距, 可以提供多个探测深度的测量^[1-2], 但其发射和接收线圈均采用轴向共轴的结构, 不具备方向性, 无法通过测

井响应区分上下界面, 使其在地质导向的应用中始终存在缺陷^[3]。针对这个问题各大仪器研制公司纷纷开始将接收线圈倾斜^[4-8], 使得测量到的信号包含方位信息。笔者将两个接收线圈倾斜, 发射线圈形式不变, 采用与传统仪器相同的定义方式来获得两个接收线圈间的相位差和幅度比^[9-10], 进而得到

视电阻率,对定向探测采用一种新的定义方式。另外,利用并矢格林函数理论,通过数值模拟对视电阻率及定向探测信号进行分析。

1 倾斜线圈测井基本理论

采用层状各向异性介质中磁流源并矢格林函数理论,分别推导了 x 、 y 、 z 三个方向的单位磁偶极子在层状各向异性地层下产生的电磁场公式。这样,通过矢量分解就可以计算任意方向的单位磁偶极子产生的电磁场。

设层状单轴各向异性介质共有 $n+1$ 层(图 1),各层编号为 $l=0,1,\dots,n$,源在第 j 层,各层参数分别为 $\mu_l, \varepsilon_{vl}, \varepsilon_{hl}$, 则 $k_{hl}^2 = \omega^2 \mu_l \varepsilon_{hl}, \Lambda_{hl} = \sqrt{\lambda^2 - k_{hl}^2}, k_{vl}^2 = \omega^2 \mu_l \varepsilon_{vl}, \Lambda_{vl} = \sqrt{\lambda^2 - k_{vl}^2}, K_l = \sqrt{\frac{\sigma_{hl}}{\sigma_{vl}}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{hl}}{\varepsilon_{vl}}}, h_l = z_l - z_{l-1} (l=1, \dots, n-1)$ 。将 G^{EM} 和 G^{HM} 表示为背景项和散射项之和,即 $G^{EM} = {}^P G^{EM} + {}^S G^{EM}, G^{HM} = {}^P G^{HM} + {}^S G^{HM}$,对于非含源层($l \neq j$),则只有散射项。对于 ${}^P G^{EM}$ 和 ${}^P G^{HM}$,可以根据均匀单轴各向异性介质中单位磁偶极子产生的 Hertz 势较容易地写出其解析式。对于任意 l 层内 ${}^S G^{HM}$ 的各分量,经理论推导整理后可表示为如下形式:

$$\begin{cases} {}^S G_{xx(l)}^{HM} = \frac{1}{4\pi} \left[\left(\frac{1}{\tilde{r}} - \frac{2(x-x')^2}{\tilde{r}^3} \right) {}^S R_1^{HM} + \frac{(x-x')^2}{\tilde{r}^2} {}^S R_2^{HM} + {}^S R_3^{HM} \right], \\ {}^S G_{yx(l)}^{HM} = {}^S G_{xy(l)}^{HM} = \frac{(x-x')(y-y')}{4\pi\tilde{r}^2} \times \left[-\frac{2}{\tilde{r}} {}^S R_1^{HM} + {}^S R_2^{HM} \right], \\ {}^S G_{zx(l)}^{HM} = \frac{(x-x')}{4\pi\tilde{r}} {}^S R_4^{HM}, \\ {}^S G_{yy(l)}^{HM} = \frac{1}{4\pi} \left[\left(\frac{1}{\tilde{r}} - \frac{2(y-y')^2}{\tilde{r}^3} \right) {}^S R_1^{HM} + \frac{(y-y')^2}{\tilde{r}^2} {}^S R_2^{HM} + {}^S R_3^{HM} \right], \\ {}^S G_{zy(l)}^{HM} = \frac{(y-y')}{4\pi\tilde{r}} {}^S R_4^{HM}, \\ {}^S G_{xz(l)}^{HM} = -\frac{(x-x')}{4\pi\tilde{r}} {}^S R_5^{HM}, \\ {}^S G_{yz(l)}^{EM} = -\frac{(y-y')}{4\pi\tilde{r}} {}^S R_5^{HM}, \\ {}^S G_{zz(l)}^{HM} = \frac{1}{4\pi} {}^S R_6^{HM}. \end{cases} \quad (1)$$

式中的 6 个 Sommerfeld 积分分别为

$$\begin{aligned} {}^S R_1^{HM} &= \int_0^\infty \left\{ \Lambda_{hl} E_l(\lambda) \exp[\Lambda_{hl}(z-z_l)] - \Lambda_{hl} F_l(\lambda) \exp[-\Lambda_{hl}(z-z_{l-1})] - \frac{\kappa_{vl}^2 K_l}{\Lambda_{vl}} C_l(\lambda) \exp[\Lambda_{vl} K_l(z-z_l)] - \frac{\kappa_{vl}^2 K_l}{\Lambda_{vl}} D_l(\lambda) \exp[-\Lambda_{vl} K_l(z-z_{l-1})] \right\} J_1(\lambda \tilde{r}) d\lambda, \\ {}^S R_2^{HM} &= \int_0^\infty \lambda \left\{ \Lambda_{hl} E_l(\lambda) \exp[\Lambda_{hl}(z-z_l)] - \Lambda_{hl} F_l(\lambda) \exp[-\Lambda_{hl}(z-z_{l-1})] - \frac{\kappa_{vl}^2 K_l}{\Lambda_{vl}} C_l(\lambda) \exp[\Lambda_{vl} K_l(z-z_l)] - \frac{\kappa_{vl}^2 K_l}{\Lambda_{vl}} D_l(\lambda) \exp[-\Lambda_{vl} K_l(z-z_{l-1})] \right\} J_0(\lambda \tilde{r}) d\lambda, \\ {}^S R_3^{HM} &= \int_0^\infty \lambda \frac{\kappa_{vl}^2 K_l}{\Lambda_{vl}} \{ C_l(\lambda) \cdot \exp[\Lambda_{vl} K_l(z-z_l)] + D_l(\lambda) \cdot \exp[-\Lambda_{vl} K_l(z-z_{l-1})] \} J_0(\lambda \tilde{r}) d\lambda, \\ {}^S R_4^{HM} &= \int_0^\infty \lambda^2 \{ E_l(\lambda) \cdot \exp[\Lambda_{hl}(z-z_l)] + F_l(\lambda) \cdot \exp[-\Lambda_{hl}(z-z_{l-1})] \} J_1(\lambda \tilde{r}) d\lambda, \\ {}^S R_5^{HM} &= \int_0^\infty \lambda^2 \{ A_l(\lambda) \cdot \exp[\Lambda_{hl}(z-z_l)] - B_l(\lambda) \cdot \exp[-\Lambda_{hl}(z-z_{l-1})] \} J_1(\lambda \tilde{r}) d\lambda, \\ {}^S R_6^{HM} &= \int_0^\infty \frac{\lambda^3}{\Lambda_{hl}} \{ A_l(\lambda) \cdot \exp[\Lambda_{hl}(z-z_l)] + B_l(\lambda) \cdot \exp[-\Lambda_{hl}(z-z_{l-1})] \} J_0(\lambda \tilde{r}) d\lambda. \end{aligned}$$

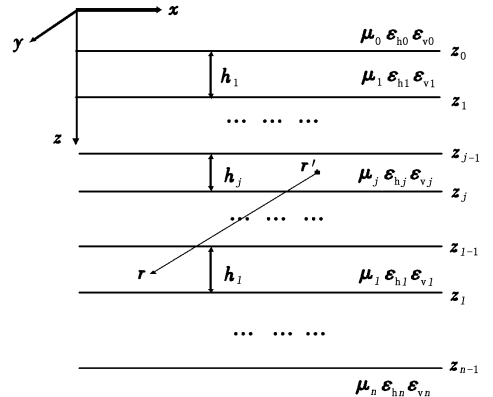


图 1 水平层状各向异性介质模型

Fig. 1 Model of horizontally stratified anisotropic media

根据层界面上的电场和磁场边界连续条件,对于 TM 波为 $\frac{\partial E_z}{K^2 \partial z}$ 和 $\varepsilon_v E_z$ 连续,对于 TE 波为 μH_z 和 $\frac{\partial H_z}{\partial z}$ 连续,可以得到求解 6 个 Sommerfeld 积分中的所有待定系数的带状稀疏矩阵,具体推导及求解过程详见文献[11] - [12]。

将推导的磁流源并矢格林函数 $\tilde{G}^{HM}$ 的表达式写成矩阵形式为

$$\tilde{\mathbf{G}}^{\text{HM}} = \begin{pmatrix} \tilde{G}_{xx}^{\text{HM}} & \tilde{G}_{yx}^{\text{HM}} & \tilde{G}_{zx}^{\text{HM}} \\ \tilde{G}_{yx}^{\text{HM}} & \tilde{G}_{yy}^{\text{HM}} & \tilde{G}_{yz}^{\text{HM}} \\ \tilde{G}_{zx}^{\text{HM}} & \tilde{G}_{zy}^{\text{HM}} & \tilde{G}_{zz}^{\text{HM}} \end{pmatrix}.$$

其中 $\tilde{G}_{xz}^{\text{HM}}$ 为 z 方向的磁偶极子在 x 方向上产生的磁场分量,其余分量的含义与其相同。

传统的随钻电磁波电阻率仪器两个接收线圈与发射线圈的磁矩与仪器轴方向一致,本文考察的是接收线圈磁矩与仪器不一致的情况,模型见图 2。其中箭头方向为磁矩方向, T_1 和 T_2 为上下对称的发射线圈, R_1 和 R_2 为两个接收线圈。

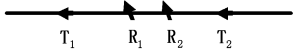


图 2 倾斜线圈结构示意图

Fig. 2 Configuration schematic drawing of tilt loop

由于此仪器具有倾斜线圈,且基本在大斜度井中测量,因此要将开发的以地层为坐标系的并矢格林函数在 xz 平面内转换到仪器坐标系下^[13-14]:

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

其中 $\mathbf{G}^{\text{HM}}$ 为仪器坐标系下的并矢格林函数,矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_y$ 的表达式如下:

$$\tilde{\mathbf{R}}_y = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中, γ 为井眼相对倾角。将接收线圈上沿 x, y, z 三个分量的磁场进行合成后很容易得到接收线圈上的磁场表达式为

$$\begin{aligned} H_R = & M_T [2G_{zz}^{\text{HM}} \cos \theta_T \cos \theta_R + (G_{xx}^{\text{HM}} + \\ & G_{yy}^{\text{HM}}) \sin \theta_T \sin \theta_R] / 2 + M_T (G_{xz}^{\text{HM}} \cos \theta_T \sin \theta_R + \\ & G_{zx}^{\text{HM}} \sin \theta_T \cos \theta_R) \cos \phi + M_T (G_{yz}^{\text{HM}} \cos \theta_T \sin \theta_R + \\ & G_{zy}^{\text{HM}} \sin \theta_T \cos \theta_R) \sin \phi + M_T (G_{xy}^{\text{HM}} - \\ & G_{yx}^{\text{HM}}) \sin \theta_T \sin \theta_R \cos(2\phi) / 2 + M_T (G_{xy}^{\text{HM}} + \\ & G_{yx}^{\text{HM}}) \sin \theta_T \sin \theta_R \sin(2\phi) / 2. \end{aligned} \quad (4)$$

式中, M_T 为磁偶极矩; θ_T 为发射线圈与仪器轴的夹角; θ_R 为接收线圈与仪器轴的夹角; ϕ 为仪器相对初始方位的方位角。设发射源随时间的变化规律为 $e^{j\omega t}$, 则接收线圈上的感应电动势可简写为

$$V = -j\omega\mu H_R N_R A_R = a_0 + a_1 \cos \phi + b_1 \sin \phi + a_2 \cos(2\phi) + b_2 \sin(2\phi). \quad (5)$$

式中, N_R 为接收线圈的匝数; A_R 为接收线圈面积; a_0, a_1, b_1, a_2, b_2 的表达式可以根据式(4) 容易写出,从公式中看出,若 $\theta_T = \theta_R = 0$,即常规的电磁波电阻率仪器,则只有 $a_0 \neq 0$,测量到的电动势与 ϕ 无关,不具有方向性。对于图 1 所示的仪器模型,由于接

收线圈的倾斜,即 $\theta_T = 0, \theta_R \neq 0$,则 $a_0 \neq 0, a_1 \neq 0, b_1 \neq 0$,使得测量到的信号具有方向性。考虑到仪器只是在 xz 平面内钻进,则 $G_{yz}^{\text{HM}} = G_{zy}^{\text{HM}} = 0$,此时的电势公式简化为

$$V = a_0 + a_1 \cos \phi. \quad (6)$$

仪器的测量方式与常规仪器的相同,仍然是测量两个接收线圈间的相位差和幅度比,表示为

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = \frac{180}{\pi} \text{Imag} \left[\ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right], \quad (7)$$

$$A = 20 \lg \left(\frac{|V_1|}{|V_2|} \right). \quad (8)$$

其中 V_1 和 V_2 分别为两个接收线圈上的感应电动势。

2 应用分析

2.1 视电阻率探测特性

当仪器在直井中,由于 $G_{xz}^{\text{HM}} = 0$,因此仪器不具备方向性,此时仪器与常规仪器相同。但在大斜度井和水平井中,仪器的视电阻率响应随着仪器方位的变化而变化,当方位角为 90° 时,根据公式(5) 容易看出电势只剩 a_0 项,在此方位角下的测量结果也不具有方向性。因此,图 1 所示的仪器不但可以获得地层的方位信息,同时可以实现常规的电率率测量。利用常规随钻电磁波电阻率解释方法进行地层评价,这是该仪器与常规仪器相比一个很大的优势。

定义接收线圈的磁矩在 xz 平面位置时的方位角为 0° ,令接收线圈的磁矩与仪器轴倾斜 45° ,模拟了仪器在三层地层模型下的方位响应曲线。仪器的工作频率为 2 MHz,源距为 0.762 m,接收线圈间距为 0.2032 m,倾角为 30° ,测量点在目的层中点。模型上下围岩电阻率为 $1.0 \Omega \cdot \text{m}$,目的层分水平和垂直电阻率均为 $10.0 \Omega \cdot \text{m}$ 的各向同性和水平电阻率为 $10.0 \Omega \cdot \text{m}$,垂直电阻率为 $50.0 \Omega \cdot \text{m}$ 的各向异性两种情况,层厚 2 m。图 3(a)、(b) 分别为目的层各向同性和各向异性情况。观察图 3 发现,两组曲线以 180° 方位角对称,并在 0° 到 180° 区间成单调递增或递减的规律。改变井斜、围岩电阻率及测量点位置等参数,发现曲线形态始终在图 3(a) 与 3(b) 之间变化,但数值改变较大,而且并未找到明显规律,说明方位的视电阻率电阻率受这些因素的共同影响,但曲线以 180° 方位角呈对称的形态,且对称轴两侧的曲线呈单调变化这个规律始终不变。在实际地层中,无法保证实测 0° 的方位与定义的方位相一致,但通过曲线的形态根据最大值或最小值可以

找到对应的与定义 0° 相一致的实际方位角,进而得到地层的方位倾角。同时,利用这个特性也可以很容易得到定义的 90° 方位对应的实际方位,这也是实现常规电磁波电阻率测量的一个必要前提。在 xz 平面内,考察方位角为 0° 时视电阻率受各向异性的影响,仪器的频率分别选择 2 MHz 和 400 kHz,源距

分别为 0.508、0.762 和 1.168 4 m,在水平电阻率为 $1.0\ \Omega\cdot\text{m}$,垂直电阻率为 $4.0\ \Omega\cdot\text{m}$ 的均匀各向异性地下,计算了仪器倾角从 0° 变化到 90° 时的视电阻率值,并将其与常规电磁波电阻率仪器的响应曲线进行比较。结果见图 4、5。

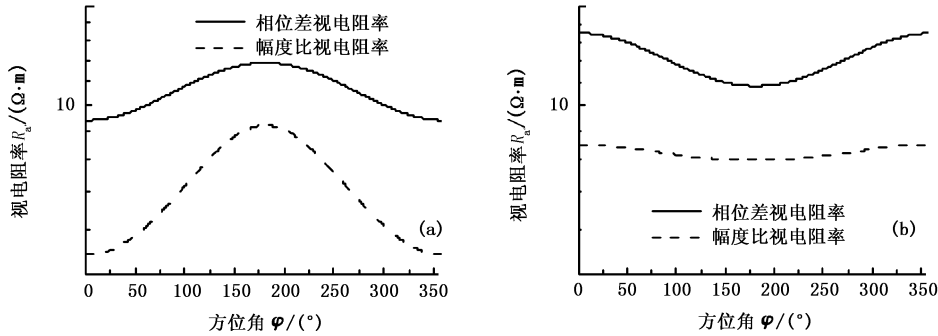


图 3 方位视电阻率响应曲线
Fig. 3 Response curve of azimuthal apparent resistivity

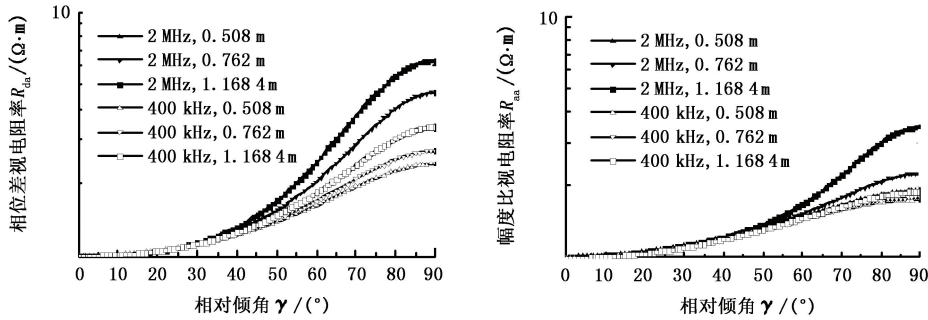


图 4 常规电磁波电阻率响应曲线
Fig. 4 Response curve of traditional electromagnetic wave resistivity

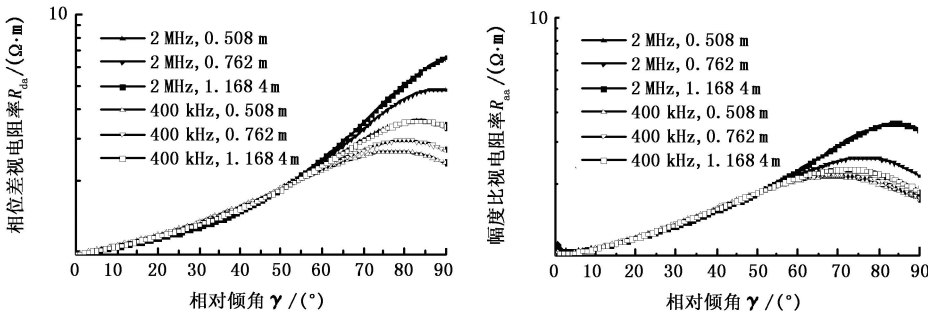


图 5 倾斜线圈电磁波电阻率响应曲线
Fig. 5 Response curve of electromagnetic wave resistivity with tilted coil

对比图 4、5,发现倾斜线圈的几条视电阻率曲线之间出现了交叉现象,无法找出受各向异性影响的大小关系,而且随着角度的增大受各向异性影响曲线也不是单调增加的。这种不规则规律难以对曲线进行定性分析,但可明显地发现倾斜线圈受各向异性的影响整体比常规的要大,说明倾斜线圈对各向异性地层的响应更加敏感,在各向异性地层的评

价中应该会有较好的应用。
2.2 方位信号在地质导向中的应用
利用常规电磁波电阻率测井仪的相位差和幅度比定义,采用新的定义方式得到一种新的定向探测信号,即将上发射线圈在两个接收线圈上的相位差和幅度比信号与下发射线圈在两个接收线圈上的相位差和幅度比信号相减:

$\Delta\varphi' = \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_D, A' = A_U - A_D,$ (9)
式中, $\Delta\varphi_U$ 和 A_U 为上发射线圈工作时获得的相位差和幅度比; $\Delta\varphi_D$ 和 A_D 为下发射线圈工作时获得的相位差和幅度比。

模型 1 首先以两层地层为例,上层电阻率为 $1.0\ \Omega\cdot\text{m}$,下层电阻率分别为 10.0 和 $30.0\ \Omega\cdot\text{m}$,仪器水平,工作频率分别为 125 和 $500\ \text{kHz}$,源距分别为 0.762 和 $1.1684\ \text{m}$,两个接收线圈间距为 $0.2032\ \text{m}$,接收线圈倾斜 45° 。计算仪器距离层界

面不同位置时的定向信号,见图 6。可以看出,对于同一频率,无论哪种地层下,无论是相位还是幅度定向信号,如电路能分辨的定向信号给定后,这个信号对应的仪器离界面的距离关系是长源距的大于短源距。说明同频率下长源距探测范围大于短源距。但同源距下由于不同频率的曲线有交叉,探测范围关系不明确。电阻率对比度增大后定向信号随距离的增大而减小的变化趋势变缓,说明所有曲线的探测范围均变大。

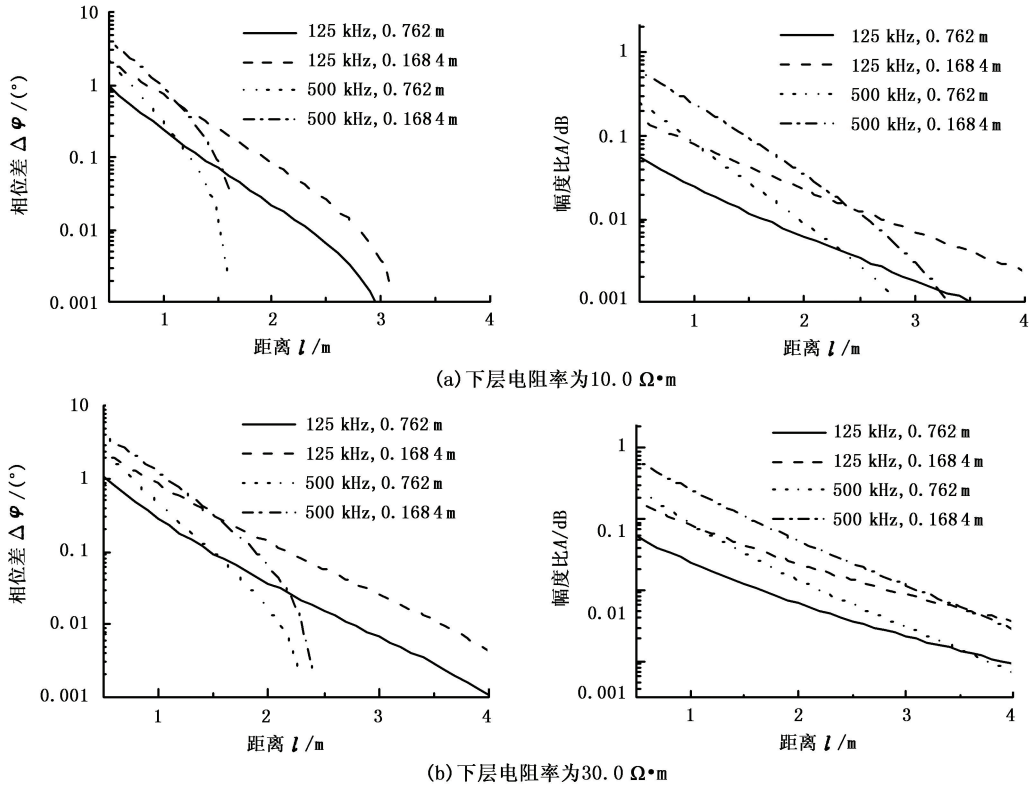


图 6 定向信号曲线

Fig.6 Curve of directional signal

模型 2 以三层地层为例,上下围岩电阻率为 $1.0\ \Omega\cdot\text{m}$,仪器工作频率为 $125\ \text{kHz}$,源距为 $1.1684\ \text{m}$,接收线圈距离为 $0.2032\ \text{m}$,接收线圈倾斜 45° 。考虑目的层为各向同性和各向异性情况,各向同性时目的层电阻率为 $10.0\ \Omega\cdot\text{m}$,各向异性时水平电阻率为 $10.0\ \Omega\cdot\text{m}$,垂直电阻率为 $50.0\ \Omega\cdot\text{m}$,层厚 5m 。仪器在 xz 平面内以方位角为 0° 时水平穿过层界面时的定向衰减曲线见图 7。观察发现,当仪器无论是从低阻上围岩还是高阻目的层靠近上边界时定向衰减信号都会出现正的信号,而且离边界越近信号越大,而靠近下边界时的信号特征则完全相反,在地层中点附近的信号为零。利用这个特征可以直观判断出仪器与上下边界的位置关系,并且知道是靠近边界还是远离边界,实现地质导向功能。同时

发现地层的各向异性对定向信号并没有太大影响,只是在界面处的峰值稍有变化,其余位置均无变化,说明这种定义方法的方位信号基本不受地层各向异性的影响。改变模型 1 中的接收线圈倾斜角度,在各向同性地层中考察不同倾角下仪器水平钻井时的定向曲线,见图 8。观察发现,随着接收线圈倾斜角度的增大,方位信号对界面的敏感性增加,能更早地判断出界面的存在,而且在界面处的方位信号也增大,说明接收线圈倾角越大越有利于地质导向的应用,但很明显接收线圈的倾角越大接收线圈上的感应电动势就会越小,因此通常选择将倾角定位 45° ,可以使电动势信号不至于太小,又能具有较好的地质导向功能。

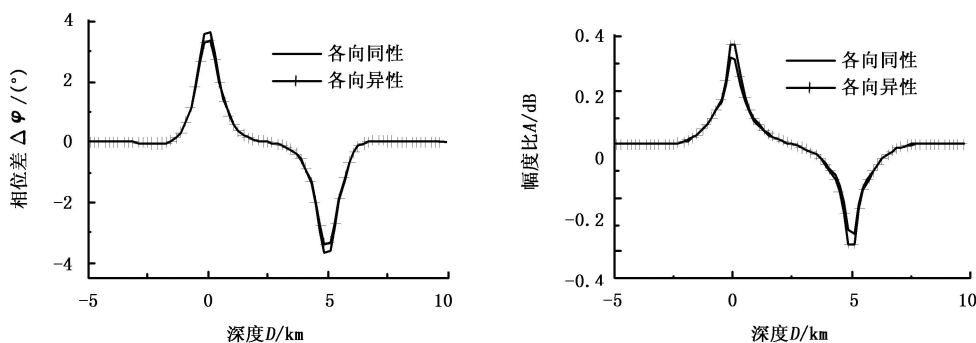


图 7 定向衰减信号曲线

Fig. 7 Curve of directional attenuation signal

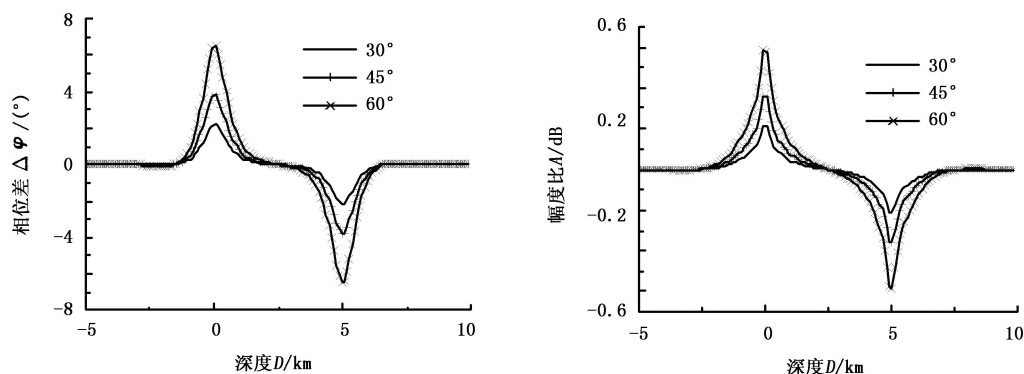


图 8 定向信号曲线随接收线圈倾角变化关系

Fig. 8 Relation between directional signal and receive coil's angle

在实际钻井中,仪器在不停地旋转,首先只考虑两层地层,将模型 1 的上围岩去掉,同样考虑各向同性和各向异性,仪器水平钻进,仪器参数与模型 1 相同,计算仪器距离边界不同距离时的方位旋转信号见图 9。从图 9 中得出,定向相位差和幅度比信号随方位角呈正弦周期性变化,振幅与仪器距界面的距离有关,仪器距离界面越近则振幅越大,越远则振幅越小,显然在均介质中的振幅为零。相同情况下相位差的振幅要比幅度比的振幅大,这是由于相同地层下幅度比的信号比相位差的信号小,因此转化为方位的信号后幅度比的方位信号仍然比较小,可见相位差的应用要好于幅度比。另外,发现曲线的幅值出现在 0° 和 180° ,这个规律与图 3 的方位视电阻率规律相似,但在 90° 和 270° 时有两个零点,说明在这两个方位的定向信号为零,正好可以利用这两个点找到上述实现常规视电阻率测量时的方位角。同样,利用定向曲线一样可以确定出地层的倾斜方位角。观察图 10,当考虑地层各向异性时,曲线的形态及变化规律并没有变化,只是在幅值上有少许变化,说明地层电阻率特性的变化并不会改变曲线

的形态,而且无论仪器从边界上面靠近还是边界下面靠近曲线的形态均不变,只是幅值有变化。

考虑各向同性三层地层模型,仪器水平钻进,工作频率为 125 kHz,源距为 1.1684 m,两接收线圈间距为 0.2032 m。模拟仪器在距目的层中点的距离不同时相位差方位信号,将目的层中点纵坐标定位 0m,向下为正方向。首先考虑目的层电阻率为 $20.0 \Omega \cdot \text{m}$,上下围岩均为 $1.0 \Omega \cdot \text{m}$,见图 11(a)。观察发现,仪器靠近目的层上边界时呈余弦变化,靠近下边界时呈正弦变化,且离界面越近振幅越大,在目的层中点时信号为零,由于上下围岩相同使得离目的层中心距离相同的曲线成对称的形态。观察图 11(b),由于下围岩电阻率增大,破坏了离目的层中心距离相同的曲线成对称形态的规律,而且下围岩电阻率与目的层电阻率越接近这种不对称现象越明显,靠近下边界时的振幅也相应越小,信号为零点的坐标也相应向下平移。由图 11 可以看出,根据曲线的形态成正弦时判断出仪器正靠近目的层下边界,曲线形态成余弦时仪器正靠近上边界,且振幅越大离界面越近。

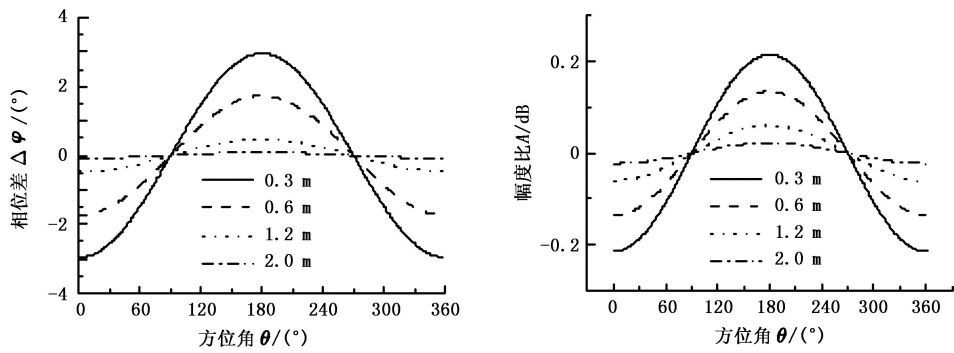


图 9 各向同性地层定向信号与方位角的关系

Fig. 9 Relation between directional signal and azimuthal angle in homogeneous formation

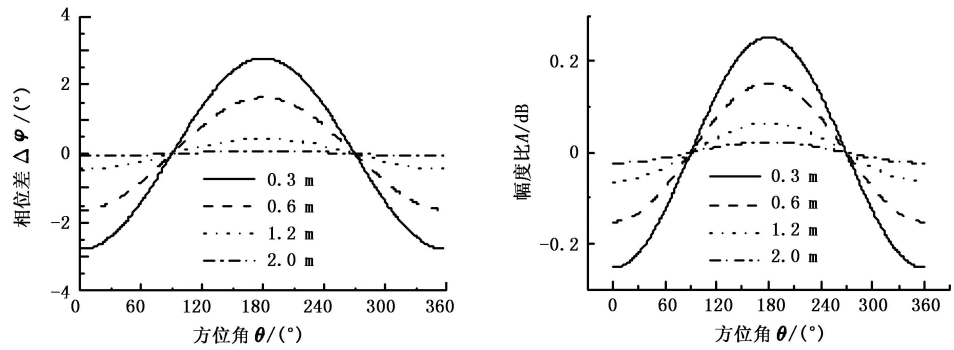


图 10 各向异性地层定向信号与方位角的关系

Fig. 10 Relation between directional signal and azimuthal angle in inhomogeneous formation

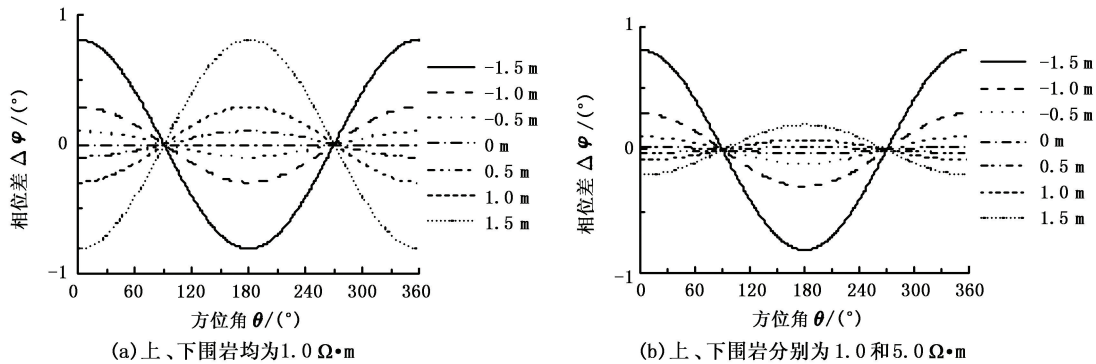


图 11 三层各向同性地层定向信号随方位角的变化关系

Fig. 11 Relation between directional signal and azimuthal angle in three-layer homogeneous formation

3 结 论

(1)方位视电阻率曲线因地层不同随方位角呈正弦或余弦的变化,而且对地层电阻率及仪器在地层中的位置很敏感,可能随时会改变正弦和余弦的形态,但峰值的位置不变,可以根据此规律估算地层的方位倾斜角度。

(2)根据方位视电阻率曲线的峰值可以找到0°或180°的仪器方位角,以此为标准找到仪器90°或270°的方位角,而在这两个方位角下的视电阻率不具有方向性,因此可以得到与传统电磁波电阻率仪

器相同的测量结果。

(3)定向方位信号在水平通过目的层上下界面时会产生相反方向的尖角,而且地层的各向异性并不影响该规律,只是对尖角的峰值稍有影响。

(4)在频率相同情况下,源距越长定向信号的探测范围越大。地层电阻率的对比度增大,所有定向信号的探测范围也相应增大。

(5)线圈倾斜角度对定向方位信号有影响,倾角越大,方位信号对层界面的敏感性越大,在界面上的尖角也越大,但同时线圈接收到的电势信号也越小,因此要折中选择接收线圈角度。

(6)方位分辨信号根据地层参数不同呈现出正弦和余弦的形态,但只要确定了高阻低阻的关系,无论从哪个方向靠近,同一个界面仪器的方位分辨信号的形态是不变的,而且靠近上下边界时的方位分辨信号形态相反,即靠近目的层上边界时是余弦形态,靠近目的层下边界时是正弦形态,利用这些规律可以很好地判断仪器钻进的方向,可以估算出地层的方位倾角。

参考文献:

- [1] CLARK B, ALLEN D F, BEST D L, et al. Electromagnetic propagation logging while drilling: theory and experiment[R]. SPE 18117, 1990.
- [2] COOPE D, SHEN L C, HUANG F S C. The theory of 2 MHz resistivity tool and its application to measurement-while-drilling[J]. The Log Analyst, 1984, 25(3): 1-11.
- [3] 史晓锋. 水平井中随钻电阻率测量仪定位和预测地层界面的方法[J]. 测井技术, 2006, 30(2): 119-121.
SHI Xiao-feng. Methods for orientation of formation layerings and formation boundary prediction with LWD resistivity logs in HZ wells[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(2): 119-121.
- [4] LI Q, OMERAGIC D, CHOU L, et al. New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling[C]. SPWLA 46th Annual Logging Symposium, June 26-29, 2005.
- [5] PALMER R, SILVAV A, HAJARI A A. A new deep azimuthal resistivity LWD for optimal well placement and reservoir[R]. SPE 120811, 2008.
- [6] WIIG M, BERG E, SALTNES M, et al. Geosteering using new directional electromagnetic measurements and a 3D rotary steerable system on the Veslefrikk field, North Sea[R]. SPE 95725, 2005.
- [7] BITTAR M, KLEIN J, BESTR R, et al. A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation[R]. SPE 109971, 2009.
- [8] 魏宝君, 欧永峰, 武杨, 等. 柱状成层介质中倾斜线圈响应的模拟及其在电磁波传播随钻测量中的应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(5): 78-85.
WEI Bao-jun, OU Yong-feng, WU Yang, et al. Simulation of tilted coil's response in cylindrically stratified media and its application for electromagnetic propagation measurement while drilling[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012, 36(5): 78-85.
- [9] 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 Bao-jun, XU Dan, WANG Sha-sha. 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.
- [10] 张中庆, 穆林雪, 张雪. 矢量有限元素法在随钻电阻率测井模拟中的应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(4): 64-71.
ZHANG Zhong-qing, MU Lin-xue, ZHANG Xue. Application of vector finite element method to simulate Logging-while-drilling resistivity tools[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011, 35(4): 64-71.
- [11] WEI B J, ZHANG G J, LIN Q H. Recursive algorithm and accurate computation of dyadic Green's functions for stratified uniaxial anisotropic media[J]. Science in China(Series F), 2008, 51(1): 63-80.
- [12] 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 Bao-jun, WANG Tian-tian, 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 J Geophys, 2009, 52(11): 2920-2928.
- [13] 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 Hong-nian, TAO Hong-gen, YAO Jing-jin, 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 J Geophys, 2008, 51(5): 1591-1599.
- [14] 魏宝君, 田坤, 张旭. 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 Bao-jun, TIAN Kun, ZHANG Xu. Physics of directional electromagnetic propagation measurements-while-drilling and its application for forecasting formation boundaries[J]. Chinese J Geophys, 2010, 53(10): 2507-2515.

(编辑 修荣荣)