

文章编号:1673-5005(2021)01-0060-09 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.01.007

随钻电磁波测井响应函数理论及探测特性

林发武, 田超国, 耿学杰, 司兆伟, 刘得芳, 庄东志

(中国石油冀东油田公司勘探开发研究院, 河北唐山 064300)

摘要: 为研究随钻电磁波测井响应探测特性, 基于 Born 几何因子近似方法, 推导各向异性介质中随钻电磁波测井响应函数, 用于刻画各向异性地层中信号空间分布特征, 以有效分析幅度比和相位差信号的敏感性。在此基础上定义径向及纵向积分几何因子, 分析信号频率、地层电阻率及线圈距对探测能力的影响。结果表明: 幅度比和相位差信号空间分布规律相似, 幅度比信号分布相对发散, 具有更大的探测范围, 而相位差信号分布更为聚焦, 纵向分层能力更强; 井斜角的加大导致响应函数的旋转对称性消失, 对各向异性的敏感性增高; 随着各向异性系数的加大, 响应函数空间分布受水平电阻率的影响逐渐增强; 径向及纵向积分几何因子能够表征仪器的探测能力, 随着信号频率的增加, 仪器的径向探测深度减小, 纵向分辨能力增强; 仪器径向探测深度及纵向分辨率, 随着线圈距均匀改变而出现规律性的变化; 在电阻率逐渐减小的过程中, 随钻电磁波测井空间响应会出现负贡献区域。

关键词: 随钻电磁波测井; 响应函数; 探测特性; 各向异性地层; 积分几何因子

中图分类号: P 631.9 **文献标志码:** A

引用格式: 林发武, 田超国, 耿学杰, 等. 随钻电磁波测井响应函数理论及探测特性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 60-68.

LIN Fawu, TIAN Chaoguo, GENG Xuejie, et al. Theory of response function and analysis of detecting characteristic of electromagnetic logging while logging[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(1): 60-68.

Theory of response function and analysis of detecting characteristic of electromagnetic logging while drilling

LIN Fawu, TIAN Chaoguo, GENG Xuejie, SI Zhaowei, LIU Defang, ZHUANG Dongzhi

(Exploration and Development Research Institute, Jidong Oilfield Company, Tangshan 064300, China)

Abstract: Based on the Born geometric factor approximation method, a response function of electromagnetic logging while drilling in anisotropic medium is constructed to characterize the spatial distribution of the response function in electromagnetic wave logging while drilling. This response function can be effectively used to analyze the sensitivity of amplitude ratio, phase shift signals, and to study the detection characteristics of electromagnetic wave logging while drilling. On this basis, the radial and vertical integral geometric factors are defined to analyze the radial detection range and vertical resolution. In addition, the influences of signal frequency, formation resistivity and spacing on detection ability are analyzed. The research indicates that the spatial distribution of amplitude ratio and phase shift is similar. The distribution of amplitude ratio signal is relatively less focused, which has a larger detection range. The distribution of phase difference signal is more focused, and the vertical stratification is stronger. With increasing dipping angle of the well, the rotational symmetry in response function's spatial distribution disappears and the response function is more sensitive to the coefficients. With increasing anisotropy coefficient, the spatial distribution of response function is gradually influenced by horizontal resistivity. Radial and vertical integral geometric factors can be quantitatively used to characterize the detection capability of the instrument. With increasing signal frequency, the detection range of the instrument decreases but the vertical resolution increases. The detection range

收稿日期: 2019-12-29

基金项目: 国家重大油气专项(2016ZX05006)

第一作者: 林发武(1982-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为测井解释与评价。E-mail: jd_lfw@PetroChina.com.cn。

and vertical resolution of the instrument vary periodically with uniform variations in spacing. In the process of decreasing resistivity, the spatial response of electromagnetic logging while drilling will have a negative contribution area.

Keywords: electromagnetic logging while drilling; response function; resistivity sensitivity; anisotropic media; integrated geometrical factor

随钻电磁波测井成为解决复杂油气储层开发的重要手段之一。如何掌握随钻电磁波测井探测特性及响应规律,获取其信号空间分布特征是关键。近十几年来部分学者对电磁波类测井探测机制进行了大量研究^[1-7],在感应测井中几何因子理论能够有效指导仪器设计,定量分析响应特征等^[8-11]。Doll 几何因子将地层介质等效成由互不干扰的独立单元环组成,分析其对测井响应贡献的空间分布,以此来指导仪器设计及响应分析^[12]。在此基础上,Howard 等^[13]将量子散射问题中的 Born 近似方法引入感应测井问题的求解,提出了二维 Born 几何因子;王磊等^[14]针对多分量感应测井进行了三维 Born 几何因子的理论研究,分析了同轴分量及交叉分量在不同井斜角及地层各向异性下的响应规律。不同于感应测井直接探测电场信号,随钻电磁波类测井采用幅度比和相位差的刻度方式进行测量,传统的感应几何因子理论不再适用。邢光龙等^[15-16]针对传播电阻率测井仪器提出了幅度比与相位差关于介电常数与电导率的响应函数,分析了响应信号空间分布规律,但未模拟地层各向异性及井斜角的影响,且未给出定量识别探测范围的方法。伪几何因子理论^[17]可有效分析测井仪的径向探测深度,但对纵向及微观敏感性描述不足。目前国内外对于由幅度比、相位差刻度且对井周地层属性敏感的纵、横向微观及宏观几何贡献分布的精确描述研究较少。笔者从 Born 几何因子理论出发,从感应测井推广到随钻电磁波测井中,研究各向异性地层中电性异常体对接收信号的响应规律,提出一种能够刻画幅度比及相位差的响应函数方法,用于定量分析随钻电磁波类测井探测特性。

1 随钻电磁波响应函数

根据 Born 近似方法,当背景介质中存在异常体时,异常体内任意一点电场可以等效为源在背景介质中激发的一次场 $\mathbf{E}_b(\mathbf{r})$ 与异常体产生的散射场 $\delta\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 的叠加:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_b(\mathbf{r}) + \delta\mathbf{E}(\mathbf{r}). \quad (1)$$

其中背景场可通过解析方法获取^[18],散射场可以表示为

$$\delta\mathbf{E}(\mathbf{r}) = i\omega\mu_0 \int_{V_s} d\mathbf{r}' \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{E}_b(\mathbf{r}'). \quad (2)$$

式中, ω 和 μ_0 分别为角频率和地层磁导率; V_s 为异常体边界; $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{r}'$ 分别为接收点和异常点相对位置; $\mathbf{E}_b(\mathbf{r}')$ 为发射线圈在异常体内某点处产生的电场; $\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 为该异常点对接收信号的影响,可通过电偶极子的位函数推导得到。以 x 方向电偶极子源为例,其对应位函数为

$$\mathbf{A} = \frac{\exp(ik_h r)}{4\pi r} \mathbf{e}_x + \frac{xz}{4\pi\rho^2} \left(\frac{\exp(ik_h r)}{r} - \frac{\lambda \exp(ik_v s)}{s} \right) \mathbf{e}_z. \quad (3)$$

其中

$$s = \sqrt{x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2},$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2},$$

$$r = \sqrt{\rho^2 + z^2}.$$

利用源的矢量位函数结合洛伦兹条件可以得到:

$$\mathbf{G} = \nabla \times \mathbf{A} = \frac{\partial A_z}{\partial y} \mathbf{e}_x + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \mathbf{e}_y - \frac{\partial A_x}{\partial y} \mathbf{e}_z. \quad (4)$$

将式(3)带入式(4)可得

$$G_{xx} = \frac{-2xyz}{4\pi\rho^4} \left(\frac{\exp(ik_h r)}{r} - \frac{\lambda \exp(ik_v s)}{s} \right) - \frac{xyz}{4\pi\rho^2} \left(\frac{(1-ik_h r) \exp(ik_h r)}{r^3} - \frac{\lambda(1-ik_v s) \exp(ik_v s)}{s^3} \right). \quad (5)$$

$$G_{xy} = \frac{(x^2 - y^2)z}{4\pi\rho^4} \left(\frac{\exp(ik_h r)}{r} - \frac{\lambda \exp(ik_v s)}{s} \right) - \frac{y^2 z}{4\pi\rho^2} \frac{(1-ik_h r) \exp(ik_h r)}{r^3} - \frac{x^2 z}{4\pi\rho^2} \frac{\lambda(1-ik_v s) \exp(ik_v s)}{s^3}. \quad (6)$$

$$G_{xz} = \frac{y(1-ik_h r) \exp(ik_h r)}{4\pi r^3}. \quad (7)$$

其中 G_{ij} 代表 i 方向的电偶极子源在 j 方向产生的响应,因此异常体内某点产生的散射场可以表示为 $E_{ij} = \lambda^2 E_{ix} G_{xj} + g\lambda^2 E_{iy} G_{yj} + g_{iz} G_{zj}$,通过大地坐标系与仪器坐标系间变换关系,可以得仪器坐标系下接收线圈处散射场:

$$E_s = E_{xx} \sin^2 \varphi + E_{zz} \cos^2 \varphi + (E_{xz} + E_{zx}) \sin \varphi \cos \varphi. \quad (8)$$

随钻电磁波测井采用单发双收线圈结构(图1),发射和接收线圈中心在同一轴线上,图中T表示发射线圈,R1和R2分别代表两接收线圈。利用两个电势信号 V_1 和 V_2 ,计算两者之间的幅度比 A 和相位差 $\Delta\theta$ 来识别地层参数,可表示为

$$\frac{V_1(\mathbf{r}_{R1}, \mathbf{r}_T)}{V_2(\mathbf{r}_{R2}, \mathbf{r}_T)} = A \cdot \exp(i\Delta\theta) \Leftrightarrow \ln V_1 - \ln V_2 = \ln A + i\Delta\theta. \quad (9)$$

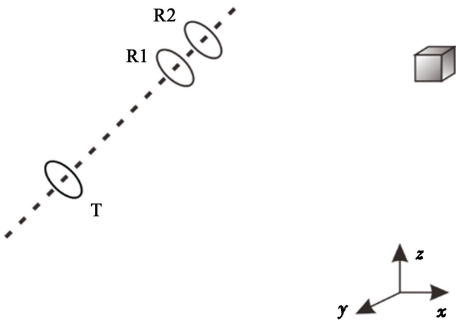


图1 随钻电磁波测井响应模型

Fig. 1 Modeling of electromagnetic logging while drilling response

对式(9)取微分可得随钻电磁波测井响应函数 S :

$$S = d\ln A + i d\Delta\theta = \frac{dV'_1}{V'_1} - \frac{dV'_2}{V'_2}. \quad (10)$$

整理可得

$$\left\{ \begin{aligned} d\ln A &= \text{Re} \left(\frac{\int_V d\mathbf{r}' d\sigma(\mathbf{r}') \mathbf{G}(\mathbf{r}_{R1}; \mathbf{r}') \mathbf{E}_b(\mathbf{r}')}{E_{b1}} - \frac{\int_V d\mathbf{r}' d\sigma(\mathbf{r}') \mathbf{G}(\mathbf{r}_{R2}; \mathbf{r}') \mathbf{E}_b(\mathbf{r}')}{E_{b2}} \right), \\ d\Delta\theta &= \text{Im} \left(\frac{\int_V d\mathbf{r}' d\sigma(\mathbf{r}') \mathbf{G}(\mathbf{r}_{R1}; \mathbf{r}') \mathbf{E}_b(\mathbf{r}')}{E_{b1}} - \frac{\int_V d\mathbf{r}' d\sigma(\mathbf{r}') \mathbf{G}(\mathbf{r}_{R2}; \mathbf{r}') \mathbf{E}_b(\mathbf{r}')}{E_{b2}} \right). \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式中, $d\ln A$ 和 $d\Delta\theta$ 分别为幅度比和相位差的响应函数,代表地层中任意地层单元对幅度比和相位差的贡献。

2 随钻电磁波测井探测特性分析

2.1 响应函数空间分布

研究随钻电磁波测井的响应函数空间分布特性,发射线圈位于坐标原点,信号频率为2 MHz,发

射线圈到两个接收线圈的距离分别为0.610和0.762 m,地层背景电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 。图2给出了随钻电磁波测井幅度比和相位差的响应等值面,其中红色表示所有响应点值的90%;图3为沿 x 方向与 z 方向的积分平面。等值面及 z 方向积分平面表明,随钻电磁波测井响应函数在径向上具有旋转对称性,在井轴附近地层贡献较小,能够减弱井眼的影响;从 x 方向积分平面可以看出,发射线圈到接收线圈间区域贡献较小,而响应函数贡献主要集中在两接收线圈间,这表明其纵向分层能力与线圈距密切相关。对比幅度比和相位差积分平面表明,二者响应函数分布规律大致相同,幅度比敏感性空间分布较发散,相位差敏感性分布更为集中。

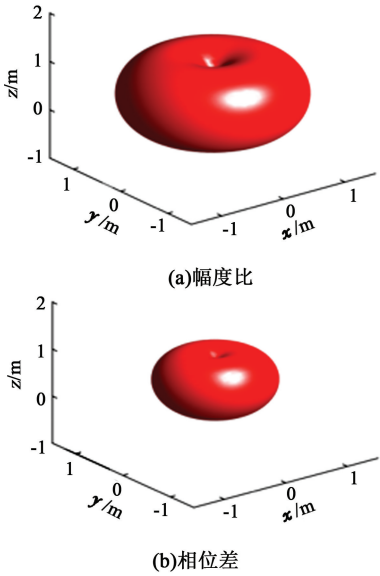


图2 幅度比及相位差响应函数等值面

Fig. 2 Response isosurface of amplitude ratio and phase shift

2.2 井斜角影响

由于幅度比及相位差响应函数空间分布类似,故仅对幅度比响应函数进行分析。在保持仪器参数不变的条件下,水平电阻率设为 $10 \Omega \cdot \text{m}$,地层各向异性系数为 $\sqrt{10}$ 时,图4为不同井斜角条件下的响应函数等值面。从图4(a)中可知,在直井条件下随钻电磁波测井响应函数空间分布不随各向异性的改变而变化;随着井斜角的加大,响应函数等值面的主轴方向出现倾斜,且由于地层各向异性的存在,导致响应函数沿仪器轴的旋转对称性逐渐消失;由于水平电阻率小于垂直电阻率,使得水平方向等值面的空间分布范围明显大于垂直方向。

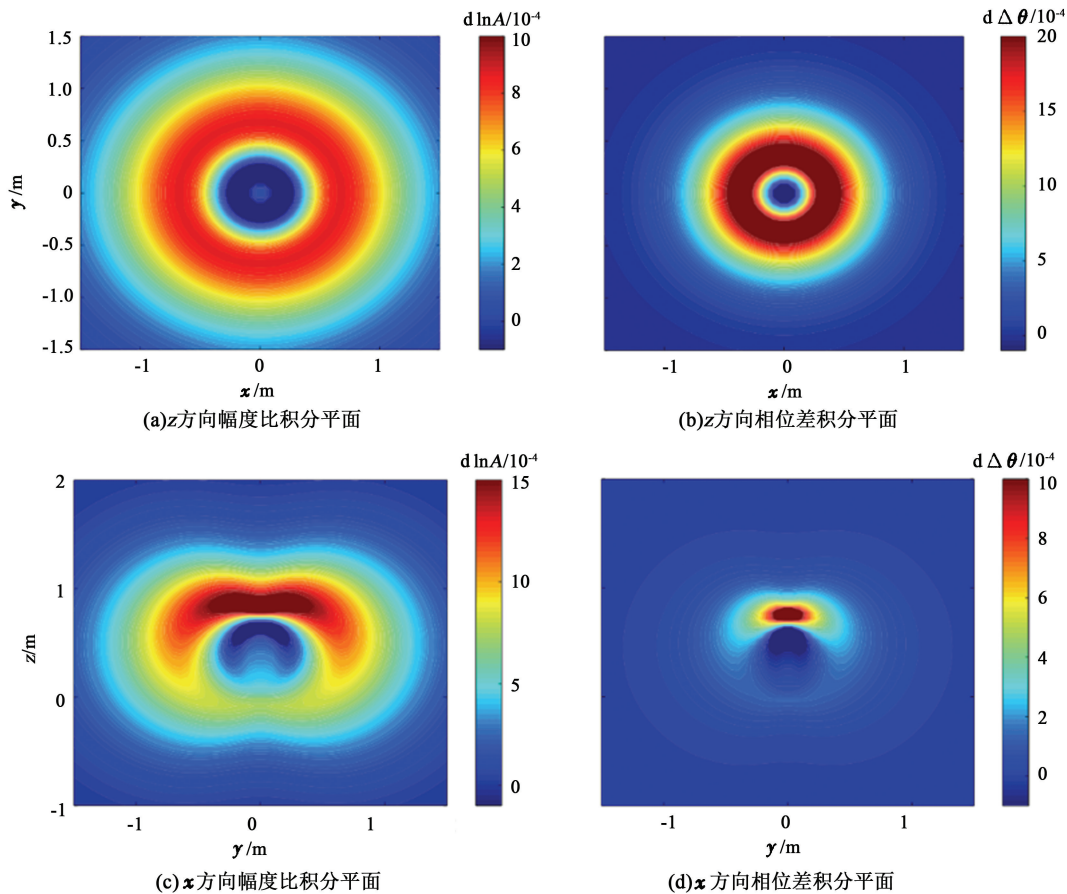


图 3 幅度比及相位差响应函数积分平面图

Fig. 3 Response function integral plane of amplitude ratio and phase shift

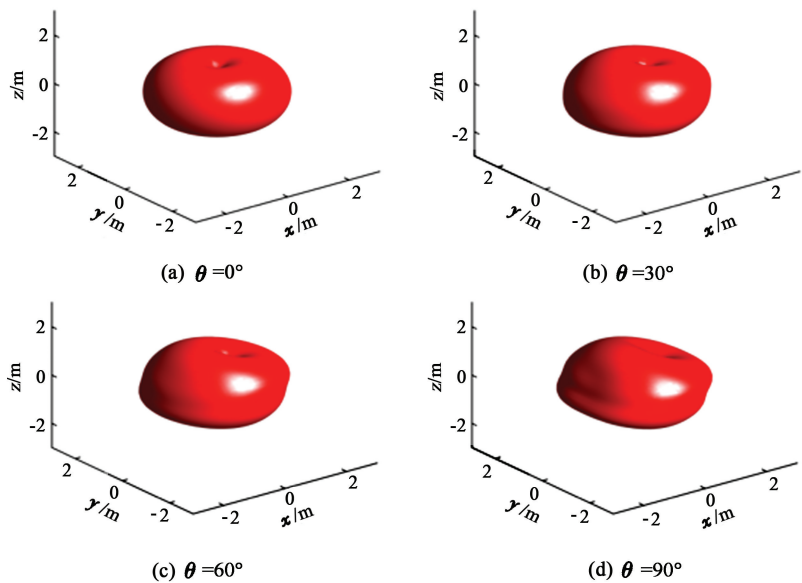


图 4 不同井斜角条件下响应函数等值面

Fig. 4 Responses isosurface with different dipping angle

2.3 各向异性系数影响

图 5 给出在水平井条件下保持其他仪器参数不变时,不同各向异性系数条件下的响应函数等值面,

各向异性系数分别为 $\sqrt{3}$ 、 $\sqrt{5}$ 、 $\sqrt{10}$ 、10。从图 5 中可知,随着各向异性系数的变大,响应函数形态由椭球状逐渐变为沿 x 轴方向延伸的不规则扁平状,当地

层电阻率各向异性达到一定值时,发射和接收线圈附近出现负贡献;随着垂直电阻率的增加,考虑趋肤

效应的影响,仪器受垂向电阻率的影响降低,受水平方向电阻率影响相应增加。

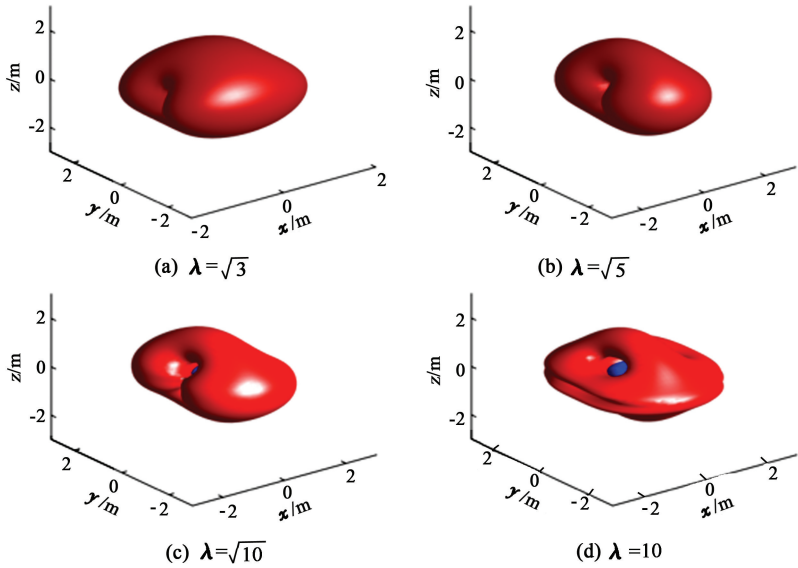


图 5 不同各向异性条件下响应函数等值面

Fig. 5 Response isosurface with different anisotropic coefficient

3 探测特性的影响因素

3.1 响应函数积分几何因子

对积分平面分别沿 x 轴与 z 轴进行积分,由于响应函数在径向上具有旋转对称性, x 正半轴几何因子与径向几何因子相等,得到径向及纵向微分几何因子,如图 6 所示。径向微分几何因子曲线在井轴附近出现小段负敏感区域,幅度比信号尤为明显,

负敏感区将导致井轴附近区对响应贡献率降低,井周地层对响应信号的贡献降低;纵向微分几何因子曲线在发射线圈与近接收线圈之间有小段曲线敏感度不变,在接收线圈附近敏感度高,相位差微分几何因子分布更为集中,能够有效区分薄层。对比幅度比和相位差敏感性曲线可以发现,幅度比信号径向探测深度更广,相位差具有更好的纵向分层能力。

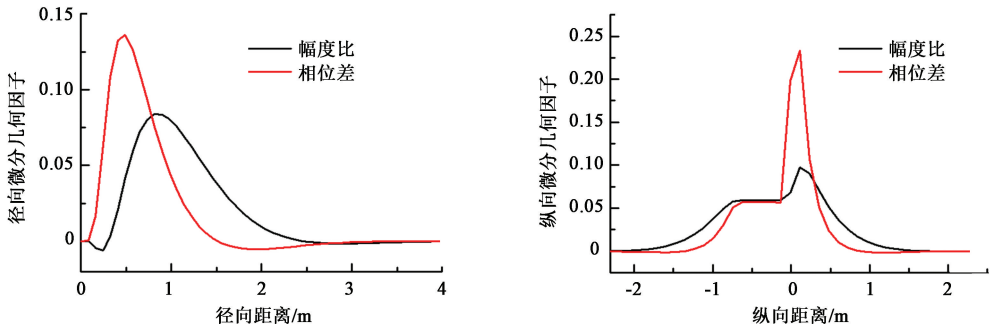


图 6 响应函数径向及纵向微分几何因子曲线

Fig. 6 Radial and vertical differential geometry factor of response function

为定量分析随钻电磁波测井径向探测深度及纵向分辨率的变化规律,引入径向积分几何因子 S_r 与纵向积分几何因子 S_h ,通过对微分几何因子进行积分,计算得到幅度比与相位差的径向与纵向积分几何因子曲线,定义表达式如下:

$$\begin{cases} S_r(x) = \frac{\int_0^x \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S dx dy dz}{S_x}, \\ S_h(z) = \frac{\int_0^z \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S dx dy dz}{S_z}. \end{cases} \quad (12)$$

式中, S_x 和 S_z 分别为响应函数在 $x>0$ 和 $z>0$ 空间内贡献的总和。

图 7 为随钻电磁波测井幅度比和相位差信号的径向积分几何因子与纵向积分几何因子变化曲线,图 7 中径向及纵向积分几何因子坐标原点分别为井轴及两接收线圈中点。类比伪几何因子^[17],此处定

义 $S_r = 50\%$ 时对应的径向距离为径向探测深度,并且假定 $S_h = 90\%$ 时对应的距离为纵向分辨率。观察图 7 可知,幅度比和相位差的径向探测深度分别为 0.97 和 0.51 m,分辨率分别为 0.76 和 0.34 m,这也验证了幅度比信号具有更大的径向探测深度,而相位差信号能够有效分辨薄地层。

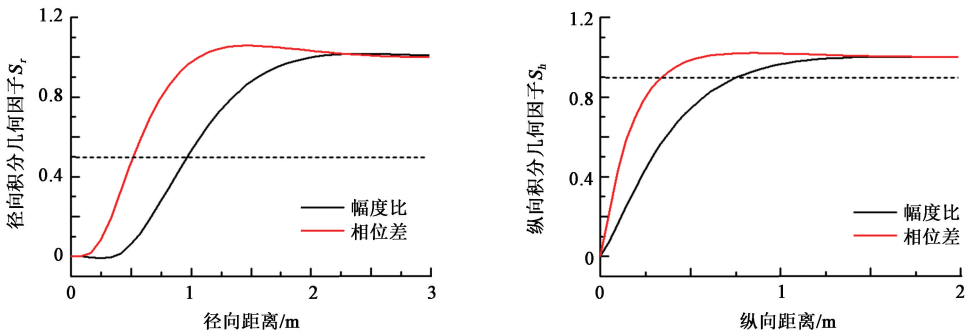


图 7 随钻电磁波测井积分几何因子曲线

Fig. 7 Integrated geometric factor curve of electromagnetic logging while drilling

3.2 信号频率的影响

利用径向及纵向积分几何因子,在不同信号频率条件下,分析随钻电磁波测井径向探测深度和纵向分辨率的变化规律。仪器发射线圈到两个接收线圈的距离分别为 0.610 和 0.762 m,背景地层电阻率 $R_b = 10 \Omega \cdot m$,信号频率分别选取 200 kHz、400 kHz、800 kHz、1 MHz 及 2 MHz。图 8 (a) 和 (b) 分别表示随钻电磁波测井幅度比和相位差信号的径向积分几何因子曲线。从图 8 中可以看出,随着信号频率的增加,幅度比和相位差信号曲线的探测范围都随之降低。对比图 8 (a) 和图 8 (b) 可以

发现,幅度比信号的探测范围受频率的影响较大,且幅度比径向积分几何因子在小于 0.5 m 时贡献接近于零,说明幅度比信号受此范围内地层影响较小。图 8 (a) 中幅度比信号在频率为 200 kHz 时,其径向探测深度近 2 m,而当频率增加到 2 MHz 时,径向探测深度缩减到 1 m 以内,相对变化明显;图 8 (b) 中相位差信号的径向探测深度明显小于幅度比信号,均小于 1 m,且探测范围变化较小。在相同条件下,信号频率越低,信号的探测范围越大,且幅度比信号径向探测能力要强于相位差信号。

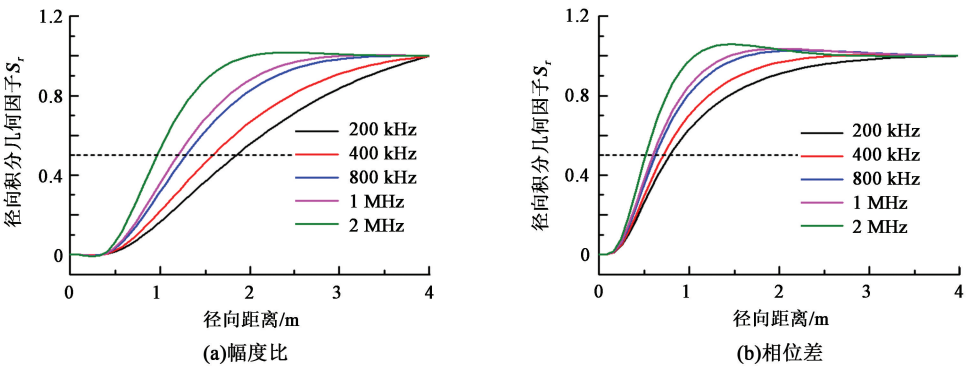


图 8 不同发射频率条件下径向积分几何因子曲线

Fig. 8 Radial integral geometric factor curves under different frequencies

图 9 (a) 和 (b) 分别表示随钻电磁波测井幅度比和相位差信号的纵向积分几何因子曲线,图中随着发射信号频率的增加,随钻电磁波测井信号的纵向分辨率增强。信号频率为 200 kHz 时,幅度比信号和相位

差信号的纵向分辨率分别为 1.56 和 0.81 m,表明在相同信号频率条件下,相位差信号具有更好的纵向分层能力;而当信号增加到 2 MHz 时,纵向分辨能力均增强 2~3 倍,相位差纵向分辨率可达 0.33 m。

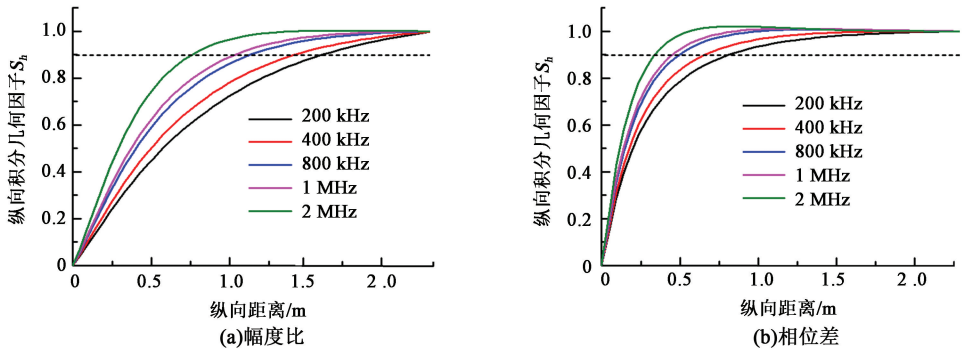


图 9 不同发射频率条件下纵向积分几何因子曲线

Fig. 9 Vertical integral geometric factor curves under different frequencies

3.3 线圈距的影响

考虑到实际随钻电磁波测井常采用阵列化设计,为分析不同线圈距对探测特性的影响,参照 ARC312 随钻电磁波仪器线圈布置进行模拟,令仪器发射频率为 2 MHz,地层背景电阻率为 $10\ \Omega \cdot \text{m}$,发射线圈到两接收线圈中点距离分别为 0.254、0.406、0.559、0.711 和 0.864 m,相邻两接收线圈间隔 0.1524 m。图 10 和图 11 表示了幅度比和相位

差曲线在不同源距条件下径向及纵向积分几何因子的变化趋势。观察两图可发现,随着线圈距的增大,仪器的径向探测深度响应逐渐增加,而纵向分辨率逐渐减小。通过该方法可有效评估不同源距条件下探测特性,为随钻电磁波测井采用阵列化的线圈系设计提供定量分析,利用不同源距的线性组合,降低井眼、围岩等因素的影响,有效获取地层参数。

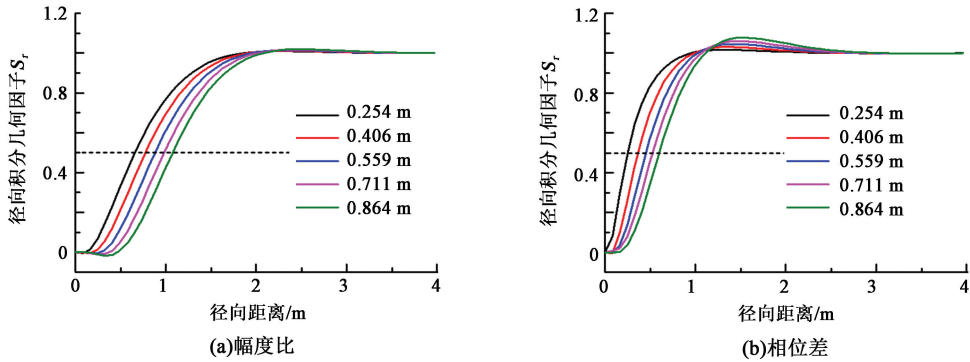


图 10 不同线圈距下径向积分几何因子曲线

Fig. 10 Response function integral curve with horizontal distance

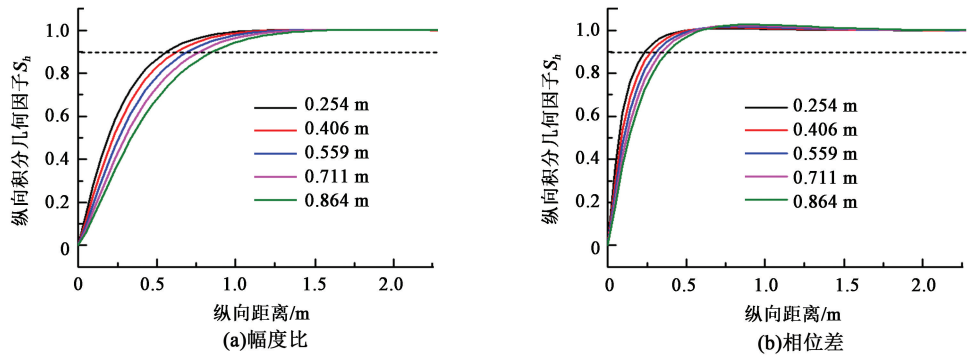


图 11 不同线圈距下纵向积分几何因子曲线

Fig. 11 Response function integral curve with horizontal distance

3.4 地层电阻率的影响

发射线圈到两个接收线圈的距离分别为 0.610

和 0.762 m,信号频率为 2 MHz 不变,选取不同背景地层电阻率 R_b 分别为 1、5、10、50 和 $100\ \Omega \cdot \text{m}$,分

析 R_b 变化对随钻电磁波测井信号探测能力的影响。如图 12 所示,当电阻率由 $1\ \Omega\cdot\text{m}$ 增大到 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,幅度比信号径向探测深度由 $0.5\ \text{m}$ 增加到 $1.9\ \text{m}$,相位差信号径向探测深度由 $0.3\ \text{m}$ 增加到 $0.8\ \text{m}$ 。在电阻率较小时,幅度比径向积分几何因子在井轴附近存在小段负敏感区,能够有效减弱井周地层影响,随钻电阻率的增加影响逐渐消失;相位差径向几何因子会在 $1\ \text{m}$ 附近出现明显凸起,表明地

层相对贡献在此处达到最大值,而后地层会产生负贡献,随着地层电阻率增加,峰值逐渐降低且距仪器距离增加。图 13 表明,随着电阻率的增加,仪器的纵向分辨能力逐渐降低。对比图 12 与图 13 可以发现,随着电阻率的增大,仪器探测范围加大,径向探测能力增强,纵向分层能力下降。这符合电阻率越大,趋肤深度越大,电磁波衰减慢,纵向分辨率受到影响更大。

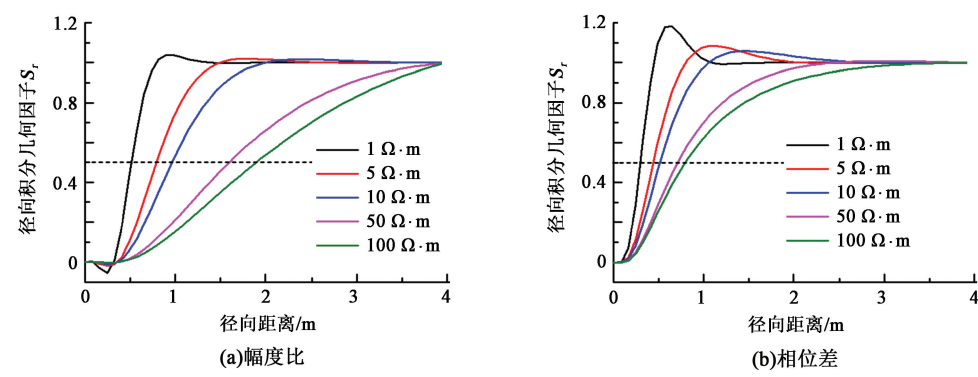


图 12 不同背景地层电阻率条件下径向积分几何因子曲线
Fig. 12 Radial integral geometric factor curves under different formation resistivity

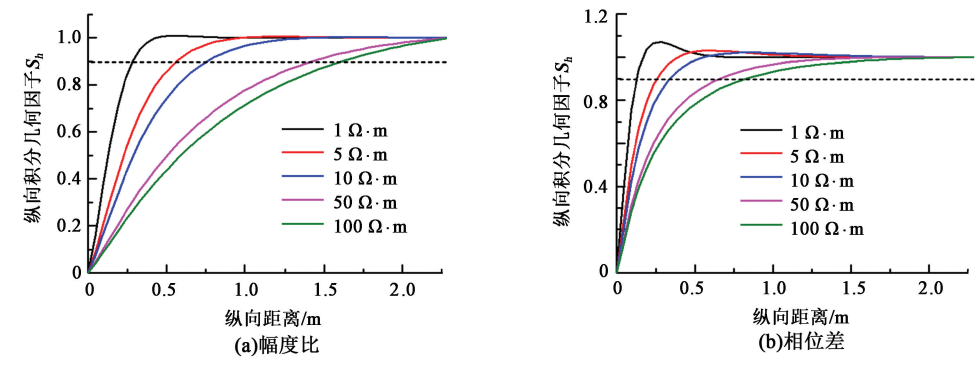


图 13 不同背景地层电阻率条件下纵向积分几何因子曲线
Fig. 13 Vertical integral geometric factor curves under different formation resistivity

4 结 论

(1) 所提出的随钻电磁波测井响应函数可有效表征随钻电磁波幅度比和相位差信号的空间探测特性,数值模拟表明两者空间分布规律类似,均具旋转对称性,相位差信号相对幅度比信号而言更为集中,在相同条件下,幅度比信号具有更大的探测范围,而相位差信号纵向分辨率更强。

(2) 各向异性系数及井斜角的加大均明显改变随钻电磁波测井响应函数的空间分布:在斜井及水平井条件下,随着各向异性系数的加大,响应函数在横向上呈现不规则扁平状,在接收和发射线圈附近逐渐出现负贡献,且随地层各向异性系数的增加而扩大;随着井斜角的加大,响应函数旋转对称性逐渐

消失。

(3) 在不同信号频率、地层电阻率及线圈距条件下,随钻电磁波测井幅度比与相位差信号探测范围均出现规律变化。随着信号频率的增加,地层电阻率加大及线圈距的增长,仪器的径向探测深度会随之加大,纵向分辨率降低,该方法对于仪器的探测特性研究及线圈系设计有着重要作用。

参考文献:

[1] ZHOU Q. Short note on the depth of investigation-achieving deeper investigation with shorter source-receiver spacing[J]. *Petrophysics*, 2009,50(5):427-429.

[2] KHOSHBAKHT F, RASAIE M R, SHEKARIFARD A. Investigating induction log response in the presence of

- natural fractures[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 145:357-369.
- [3] RABINOVICH M, LE F, LOFTS J, et al. The vagaries and myths of look-around deep resistivity measurements while drilling[J]. *Petrophysics*, 2012, 53(2):86-101.
- [4] 胡松, 王晓畅, 孔强夫. 水平井随钻电磁波电阻率数值模拟[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(14):59-66.
HU Song, WANG Xiaochang, KONG Qiangfu. Numerical simulation of LWD resistivity in horizontal wells[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(14):59-66.
- [5] BARBER T D. Induction vertical resolution enhancement- physics and limitations [C/OL]//SPWLA 29th Annual Logging Symposium. San Antonio, Texas: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. June 5-8, 1988 [2018-12-06]. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-1988-0>.
- [6] 李辉, 鄢志丹, 刘长波. 随钻方位电阻率测井仪器响应数值模拟[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(1):42-52.
LI Hui, YAN Zhidan, LIU Changbo. Numerical simulation of azimuthal resistivity LWD instrument responses [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2019, 43(1):42-52.
- [7] 马明学, 岳喜洲, 李国玉. 基于倾斜发射-倾斜接收仪器结构进行随钻地质导向与地层各向异性评价[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(4):50-58.
MA Mingxue, YUE Xizhou, LI Guoyu. Geosteering and anisotropic resistivity evaluation by using a tilted transmitter-tilted receiver tool structure[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2018, 42(4):50-58.
- [8] 张庚骥. 电法测井(上册)[M]. 北京:石油工业出版社, 1984:144-147.
- [9] ZHDANOV M S, KENNEDY W D, CHERYAYKA A B, et al. Principles of tensor induction well logging in a deviated well in an anisotropic medium [C/OL]//SPWLA 42nd Annual Logging Symposium. San Antonio, Texas. June 17-20, 2001 [2018-12-06]. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2001-R>.
- [10] 洪德成, 杨善德. 大介电常数地层中多分量感应测井响应研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(10):773-780.
HONG Decheng, YANG Shande. Multi-component induction logging response in large dielectric formation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10):773-780.
- [11] 胡松, 王晓畅, 孔强夫, 等. 水平井感应测井在精细构造解释中的应用[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(2):60-70.
HU Song, WANG Xiaochang, KONG Qiangfu, et al. Application of horizontal well induction logging in fine structure interpretation[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2018, 42(2):60-70.
- [12] DOLL H G. Introduction to induction logging and application to logging of wells drilled with oil base mud[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1949, 1(6):148-162.
- [13] HOWARD A Q, CHEW W C. A new correction to the Born approximation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(3):394-399.
- [14] 王磊, 范宜仁, 黄瑞, 等. 各向异性介质多分量感应测井三维 Born 几何因子理论研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(23):438-448.
WANG Lei, FAN Yiren, HUANG Rui, et al. Three dimensional born geometrical factor of multi-component induction logging in anisotropic media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(23):438-448.
- [15] 邢光龙, 王宏建, 杨善德. 二维轴对称介质中电磁波测井的响应函数[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3):924-932.
XING Guanglong, WANG Hongjian, YANG Shande. The response functions of electromagnetic wave logs in the 2-D axis-symmetric formation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3):924-932.
- [16] XING G L, YANG S D. The response functions of electromagnetic wave logs and their applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006, 44(6):1413-1418.
- [17] CLARK B, LILING M G, JUNDT J, et al. A dual depth resistivity measurement for FEWD [C/OL]//SPWLA 29th Annual Logging Symposium. San Antonio, Texas, June 5-8, 1988 [2019-02-16]. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-1988-A>.
- [18] MICHAEL Z, DAVID K, ERTAN P. Foundations of tensor induction well-logging[J]. *Petrophysics*, 2001, 6(42):588-610.

(编辑 修荣荣)