

井周界面电磁散射探测数值模拟

邓少贵, 张盼, 王正楷, 袁习勇

(中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580)

摘要:依据电磁散射理论,模拟电磁散射对地层界面响应,探讨电磁波测井“向前看”能力。根据电磁场分布特征,将接收天线对称分布在发射天线两侧,对比接收天线信号差异,获取井旁界面电磁散射信号;在不同供电频率、天线源距、电阻率对比度条件下,模拟天线分量信号的响应特征,分析其与地层界面关系及敏感性。结果表明:与现有测量方法相比,在更小的源距条件下,该方法利用电磁散射信号探测井旁界面,达到了更优的探测效果;仪器信号强度和探测范围受界面两侧电阻率及其差异的影响,并随着电阻率差异的增大而增大;将同轴和倾斜天线幅度差信号交会,根据交会数据落点位置,确定界面位置简单有效。

关键词:电磁波测井;地层界面;幅度差;探测深度;对称分布

中图分类号:P 631.8

文献标志码:A

引用格式:邓少贵,张盼,王正楷,等.井周界面电磁散射探测数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(1):67-72.

DENG Shaogui, ZHANG Pan, WANG Zhengkai, et al. Numerical simulation of electromagnetic scattering of interface around borehole [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(1): 67-72.

Numerical simulation of electromagnetic scattering of interface around borehole

DENG Shaogui, ZHANG Pan, WANG Zhengkai, YUAN Xiyong

(School of Geoscience in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The response to the interface is numerically simulated based on the electromagnetic scattering theory. Putting symmetrically the receiving antenna on two sides of the transmitting antenna, the scattered signal off the interface can be reflected by the difference of receiving signals. The electromagnetic responses to the bed boundary were analyzed at different frequencies, distances of antenna and resistivity contrast ratios of two sides' formations. The results show that electromagnetic scattering measurements can reach deeper sensitivity than most current tools. The contrast ratio of the formation resistivity determines the signal strength. The sensitivity depth becomes larger with increasing resistivity contrasts. A cross plot can be drawn to show the signal magnitude difference between the coaxial and tilt antenna, which can be easily used to determine the position of formation interfaces.

Keywords: electromagnetic logging; formation boundary; magnitude difference; detection depth; symmetrical antenna structure

随钻电磁波测井是随钻地质导向与储层评价的重要方法^[1-3]。传统随钻电磁波仪器发射天线和接收天线同轴设置,不具有方位探测能力,仪器工作频率为 0.4 ~ 2 MHz,采用相位差和幅度比的方式刻度

地层电阻率,获得地层界面信息,探测范围可达 2 ~ 3 m^[4]。随钻方位电磁波测井仪器,在多频、多源距基础上,采用同轴/倾斜/共面天线,实现对电磁场交叉分量的测量,仪器在高阻层且围岩为低阻层时,边

收稿日期:2017-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41574118,41174099,41674131);国家科技重大专项(2017ZX05009-001);中国石油科技创新基金项目(2015D-5006-0303);中央高校基本科研业务费专项(17CX06044)

作者简介:邓少贵(1970-),男,教授,博士,研究方向为电测井方法。E-mail:dengshg@upc.edu.cn。

界探测范围理论可达到 $5 \sim 6 \text{ m}^{[5-9]}$ 。电磁波仪器界面探测主要受仪器测量精度、相对井斜角、地层电阻率以及界面两侧电阻率差异影响^[10]。目前,电磁波测井基本靠发射和接收天线间的几何关系来分辨地层,即为了增加探测深度而增加仪器尺寸,但仪器过长会给实际应用带来不便^[11]。井周存在地层界面时可以产生电磁散射,不同介质条件电磁散射和吸收情况不同,同种条件不同频率的电磁波也存在“色散”现象。散射波具有更好刻画地层细节的能力^[12],地层边界处电磁波测井曲线“犄角”现象本质是电磁散射造成^[13]。井中电磁波信号是一次场和散射场的叠加,但散射信号相对背景一次场弱很多(千分之几)。优化天线结构和参数,削弱地层背景一次场,提高异常体散射信噪比,可以增加随钻导向探边深度。笔者采用对称天线结构设计,提取井周异常体散射信号,根据不同发射频率、源距、电阻率对比度下信号响应特征,利用接收天线信号幅度差获得地层界面信息。

1 界面电磁散射响应计算方法

1.1 模型设定

采用单发双收对称天线结构(图1),发射和接收天线中心在同一轴线上,发射天线为T,两接收天线(R_1 、 R_2)到发射天线距离相等,线圈匝数均为1。在带井眼均匀介质中,发射天线产生电磁场具有对称性,两接收天线信号完全相同。当井周(含钻前)有界面存在时,电磁散射引起电磁场分布变化,散射信号到达两个接收天线时幅度和相位出现差异。仪器正前方(井眼)地层界面深度设为0,仪器到界面的垂直距离为 D ,发射天线到仪器前端距离为 L ,前探距离为 d , $d=D/\cos \alpha-L$ 。除特殊说明外,以下算例均以此为模型。

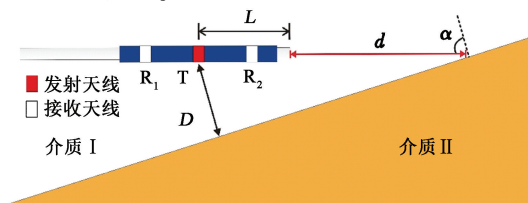


图1 地层模型与线圈系结构

Fig.1 Formation model and coil array configuration

1.2 计算方法

利用矢量电位法进行一维层状介质正演模拟算法的研究,将线圈等效为磁偶极子源(M),其电磁场空间分布可看成由水平磁偶极子源(M_x)和垂直磁偶极子源(M_z)单独产生的叠加。接收信号为背景

介质一次矢量电位和界面电磁散射的二次矢量电位的叠加。引入矢量电位(F)描述磁偶极子源电磁场分布, F 满足亥姆赫兹方程^[14-15]:

$$\nabla^2 F + k^2 F = -i\omega\mu m \delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0). \quad (1)$$

式中, k 、 ω 、 μ 和 m 分别为波数、角频率、磁导率和磁偶极子强度; $\mathbf{r}_0$ 和 $\mathbf{r}$ 分别为源点及测量点位置。

垂直磁偶极子 M_z 的矢量电位仅存在垂直分量 F_z^z ,在介质I和介质II中的矢量电位分别为

$$F_{z1}^z = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \left[\frac{\tau_1}{\xi_1} e^{-\xi_1 |z-z_1|} + B_1 e^{\xi_1 z} \right] \lambda J_0(\lambda \rho) d\lambda, \quad (2)$$

$$F_{z2}^z = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \left[\frac{\tau_2}{\xi_2} e^{-\xi_2 |z-z_2|} + A_2 e^{-\xi_2 z} \right] \lambda J_0(\lambda \rho) d\lambda. \quad (3)$$

其中

$$\xi = (\lambda^2 - k^2)^{1/2}.$$

式中, λ 为积分变量; ρ 为源点到测量点的距离。当 j 层有源时, $\tau_j = i\omega\mu_j m_j$;当 j 层无源时, $\tau_j = 0$ 。

水平磁偶极子 M_x 既存在水平方向分量 F_x^x ,还存在垂直方向分量 F_z^x 。在介质I和介质II中的垂直分量分别为

$$F_{z1}^x = \frac{\cos\varphi}{4\pi} \int_0^\infty D_1 e^{\xi_1 z} \lambda J_1(\lambda \rho) d\lambda, \quad (4)$$

$$F_{z2}^x = \frac{\cos\varphi}{4\pi} \int_0^\infty C_2 e^{-\xi_2 z} \lambda J_1(\lambda \rho) d\lambda. \quad (5)$$

水平分量分别为

$$F_{x1}^x = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \left(\frac{\tau_1}{\xi_1} e^{-\xi_1 |z-z_1|} + B_1 e^{\xi_1 z} \right) \lambda J_0(\lambda \rho) d\lambda, \quad (6)$$

$$F_{x2}^x = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \left(\frac{\tau_2}{\xi_2} e^{-\xi_2 |z-z_2|} + A_2 e^{-\xi_2 z} \right) \lambda J_0(\lambda \rho) d\lambda. \quad (7)$$

式中, φ 为仪器与地层夹角; A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 为未知系数,可通过边界连续条件得到。根据式(2)~(7),计算得到分量信号:

$$F_1 = (F_{z1}^z + F_{z1}^x) \mathbf{e}_z + F_{x1}^x \mathbf{e}_x, \quad (8)$$

$$F_2 = (F_{z2}^z + F_{z2}^x) \mathbf{e}_z + F_{x2}^x \mathbf{e}_x. \quad (9)$$

由于磁场和矢量电位满足下式:

$$\mathbf{H} = -(\sigma + i\omega\epsilon) \mathbf{F} + \frac{1}{i\omega\mu} \nabla \nabla \cdot \mathbf{F}. \quad (10)$$

通过磁场求得感应电场为

$$\mathbf{E} = i\omega\mu_s \mathbf{H}.$$

式中, s 为线圈面积。

根据两个接收天线的感应电动势 $\mathbf{E}_{R1}$ 、 $\mathbf{E}_{R2}$,得

到测量信号的幅度差和相位差,如

幅度差 = $|E_{R_1}| - |E_{R_2}|$, (11)

相位差 = $\arg(E_{R_1}) - \arg(E_{R_2})$. (12)

对比幅度差和相位差,可以识别地层界面。

1.3 界面响应

令发射和接收天线的源距为 1 m,发射信号频率为 400 kHz,介质 I 和介质 II 电阻率分别为 100 和 10 Ω·m,仪器与地层界面垂直。两接收天线的信号幅度和相位如图 2(a),当仪器离地层界面较远时,两接收天线的信号幅度和相位完全相同;当仪器

靠近地层界面时,两接收天线中信号差异增大。如图 2(b)所示,发射天线在界面附近时,接收天线信号差值达到峰值,其中信号幅度差约为 7×10^{-7} V,相位差约为 4°;界面在仪器之前 9 m 或在仪器之后 4.3 m,幅度差异降为 1×10^{-9} V。如采用实际仪器天线匝数(几十到上百匝),信号幅度会增大百倍以上。目前国外仪器的信号强度分辨能力为 10 nV,该方法对界面探测范围可到达 9 m,远高于现有仪器(线圈距 243.84 cm)的探测深度 5 m^[16]。

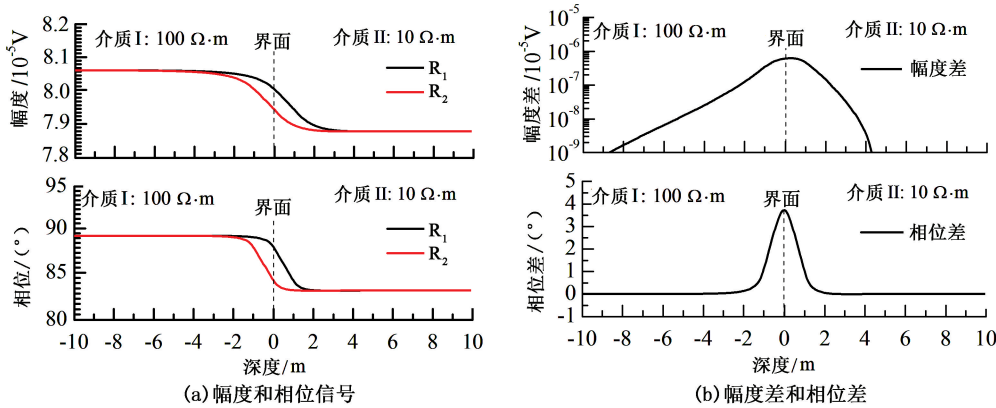


图 2 接收天线中信号及其差异

Fig. 2 Response and differences of two receives

2 影响因素模拟

2.1 发射频率

电磁波测井探测深度受到信号频率限制,也受介质电阻率本身性质影响。分别针对高阻地层和低阻地层的情况,探讨多频率下天线系统的探边特性:①高阻地层背景,介质 I、II 的电阻率分别为 100 和 10 Ω·m,供电频率分别选取 200、400、800 kHz 和 1

MHz;②低阻地层背景,介质 I、II 电阻率分别为 10 和 1 Ω·m,发射频率分别选取 40、80、100 和 200 kHz。假设源距为 1 m,仪器与地层界面垂直。如图 3 所示,随着信号频率增大,接收天线信号差幅度明显增大,且信号变化率也明显加大,有利于信号检测,但信号衰减加快引起探测范围减小,不利于界面的远探测。

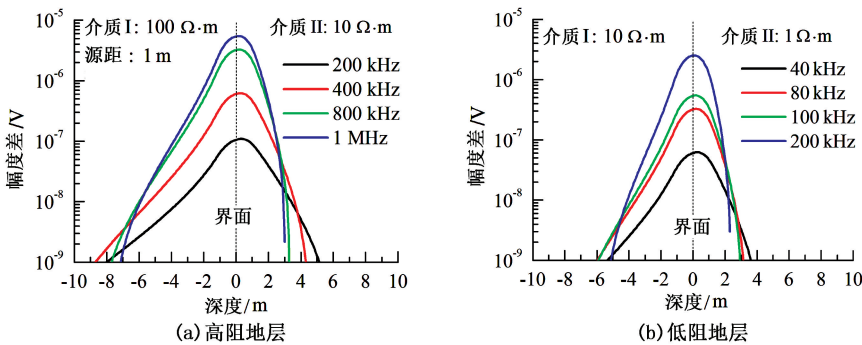


图 3 不同频率下的信号

Fig. 3 Signal with different frequencies

供电频率选取需要考虑信号强度和信号变化速率两方面,也要考虑介质电阻率的影响。如在低阻背景条件下,发射频率高于 100 kHz 会造成边界探

测距离明显减小;在高阻背景条件下,发射频率在 800 kHz 才会使边界探测距离明显减小;如使用相同的信号测量分辨率,低电阻率背景条件的探边距

离要明显小于高阻背景条件的探边距离。所以根据地层电阻率不同需要选取不同频率信号,以达到好的探测效果。

2.2 线圈距

地层模型与 2.1 相同,发射频率分别为 800 和 100 kHz,仪器源距分别选取 0.5、1、1.2 和 2 m。如

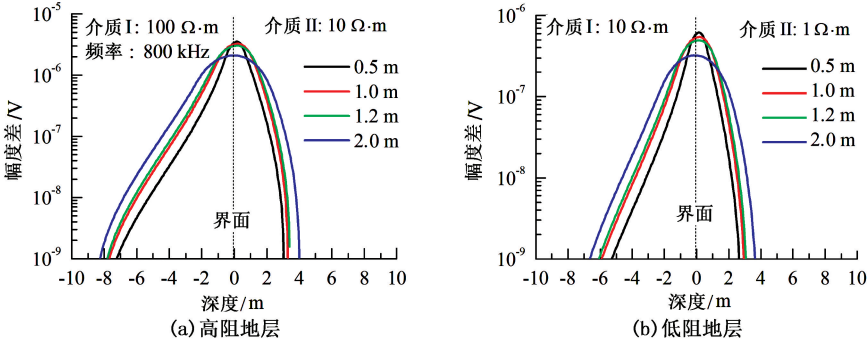


图 4 不同源距条件下的响应

Fig. 4 Response with different coil spacing

2.3 电阻率对比度

散射信号强弱受到界面两侧地层电阻率的影响。考虑两种条件:①高阻背景,背景介质 I 电阻率为 100 $\Omega \cdot m$,介质 II 电阻率分别为 10、20、30 和 50 $\Omega \cdot m$,天线源距为 1 m,发射频率选取 800 kHz;②低阻背景,背景介质 I 电阻率为 2、3、5 和 10 $\Omega \cdot m$,

图 4 所示,随着源距增大,幅度差异信号峰值逐渐减小,但源距增大,界面处信号衰减变小,故离开界面位置较远时,接收天线信号差异较大,而使探测范围加大。考虑到信号强度、探测范围和线圈系长度等因素,源距从 1、1.2 m 增加到 2 m,其探测深度增加效果并不明显。

介质 II 电阻率为 1 $\Omega \cdot m$,发射频率为 100 kHz。如图 5 所示,天线探测范围受到介质背景电阻率和电阻率对比度的影响,高阻地层信号衰减速度较慢,且天线探测范围较大;电阻对比度越大,界面散射效果越明显,差异信号幅度越大,探测范围加大。

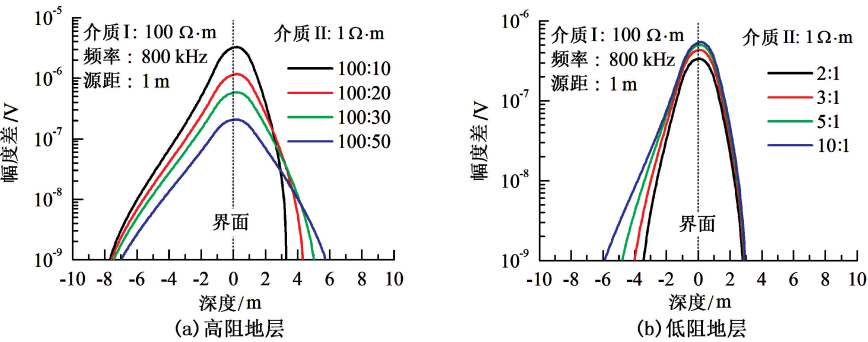


图 5 不同电阻率对比度下的信号

Fig. 5 Response with different resistivity contrasts

2.4 界面相对倾斜

当地层界面在天线旁边时,随着仪器轴与地层界面夹角减小,界面电磁散射轴向分量降低,会使与发射天线同轴设置的接收天线信号减弱。设置倾斜(45°)接收天线,结合同轴天线,分析不同倾斜界面电磁散射信号变化。介质 I 的电阻率为 100 $\Omega \cdot m$,介质 II 电阻率为 10 $\Omega \cdot m$;天线源距取 1 m,发射频率取 800 kHz。结果显示,当仪器与地层垂直时,接收天线差异信号幅度最大,随着夹角的减小,信号幅度和探边距离(地层界面到发射天线的距离)都显

著降低,如图 6(a);倾斜天线信号差异幅度和探测范围变化较小,如图 6(b),随着仪器与界面夹角减小,信号差异先增大再减小。同轴天线和倾斜天线的响应差异反映了地层界面散射信号分量变化,与地层界面位置、角度、介质电阻率对比度有关。

3 界面相对位置的确定

对比同轴和倾斜天线的信号,根据轴向和径向分量之间关系,确定仪器与地层界面夹角。采用分量组合天线结构,如图 7 所示, R_1 和 R_2 为同轴天

线, R_3 和 R_4 为倾斜天线, 源距分别为 0.8 和 1 m, 发射频率为 800 和 100 kHz。分别针对高阻地层和低阻地层情况进行分析: ①高阻地层背景, 介质 I、II

的电阻率分别为 100 和 $10\ \Omega \cdot \text{m}$; ②低阻地层背景, 介质 I、II 电阻率分别为 10 和 $1\ \Omega \cdot \text{m}$, 仪器均位于介质 I 中。

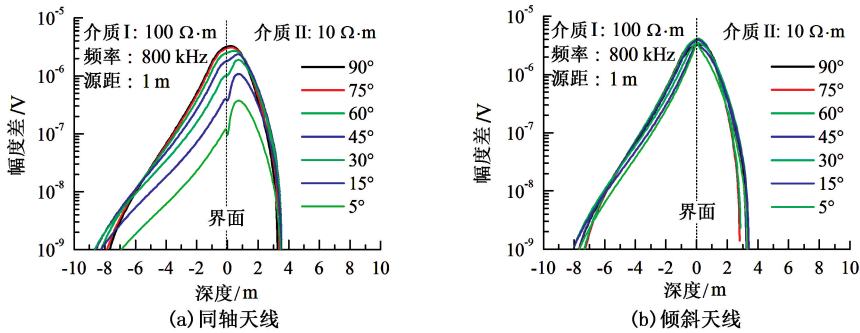


图 6 不同夹角条件下的信号

Fig. 6 Response with different angles

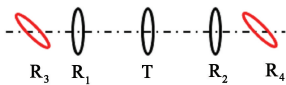


图 7 仪器线圈系结构

Fig. 7 Configuration of transmitters and receivers

根据接收天线 R_1 与 R_2 、 R_3 与 R_4 之间的信号差异确定界面相对位置和倾斜角度。如图 8 所示, 横坐标为同轴天线信号差异强度, 纵坐标为倾斜天线信号差异强度, 竖实线表示相对倾斜角度, 横虚线

表示界面位置。当地层界面与天线轴线夹角较大时, 模拟地层界面在仪器前方, 交会图对相对倾斜角度的分辨能力相对较弱, 但对界面位置确定有利。当地层界面与天线轴线夹角较小时, 模拟地层界面在仪器侧方, 交会图对夹角的分辨能力相对较强, 但对界面位置响应相对降低。根据图 1 所示模型中仪器和地层界面位置关系, 可预测界面在仪器前所在距离(准向前看)。

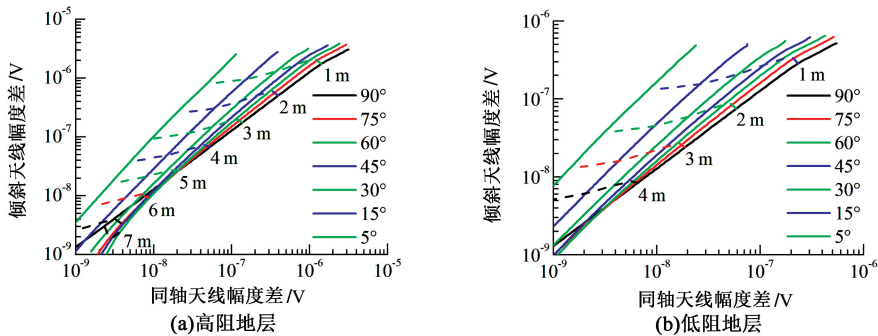


图 8 界面位置识别图版

Fig. 8 Identification chart for location of interface

4 结 论

- (1) 采用天线对称布局方式, 利用接收天线信号差, 可以较好消除背景一次场, 反映界面电磁散射特点, 在有限的源距条件下达到更优的探测效果。
- (2) 探边距离受电阻率对比度、发射频率、天线倾角等因素影响, 增大电阻率对比度、降低发射频率以及天线倾斜都会导致探边距离加大。
- (3) 利用交会图法识别仪器与界面的距离及夹角, 识别效果简洁, 可以准确地判断界面的位置, 有效指导仪器准确着陆及地质导向。

(4) 散射信号相对一次场信号弱很多, 进一步提升散射信号强度和信噪比, 是电磁波测井向前/远看的关键。

致谢 衷心感谢哈里伯顿公司李善军博士的悉心指导。

参考文献:

[1] 宋殿光. 随钻电磁波测井仪的数值模拟及地质导向应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
SONG Dianguang. The study on numerical simulation and geosteering application of electromagnetic logging while drilling tools[D]. Beijing: China University of Geosci-

- ences(Beijing),2014.
- [2] EDWARDS M, WATCHARANANTAKUL R, FARID S, et al. Advanced high definition multi-layer geosteering technology to overcome horizontal drilling challenges in complex reservoirs: proceedings of Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, 7-10 November,2016[C]. Dallas, TX:Society of Petroleum Engineers,2016.
 - [3] FARHAD K, MOHAMMAD R R, ALI S. Investigating induction log response in the presence of natural fractures[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016,145:357-369
 - [4] 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.
 - [5] 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.
 - [6] 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 Greens functions in cylindrically stratified anisotropic media[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016,40(2):59-69.
 - [7] ZHOU J, LI H. Interpretation of azimuthal propagation resistivity measurements: modeling, inversion, application and discussion: proceedings of SPWLA 57th Annual Logging Symposium, Reykjavik, Iceland, 25-29 June, 2016 [C]. Houston, TX:Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2016.
 - [8] 宋殿光,段宝良,魏宝君,等.倾斜线圈随钻电磁波电阻率测量仪器的响应模拟及应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(2):67-74.
SONG Dianguang, DUAN Baoliang, WEI Baojun, et al. Basic theory of electromagnetic wave resistivity measurement while drilling tool with tilted antennas and its application for geosteering[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2014,38(2):67-74.
 - [9] CHRIS B, JOHB H, PETER E, et al. Navigating and imaging in complex geology with azimuthal propagation resistivity while drilling[R]. SPE 102637, 2006.
 - [10] 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.
 - [11] 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. Response simulation and application of electromagnetic wave resistivity measurement-while-drilling tool with tilted coil[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2009,33(1):44-49.
 - [12] 罗明璋.脉冲电磁法理论与硬件实现[D].武汉:长江大学,2012.
LUO Mingzhang. Research on pulsed electromagnetic method and the hardware implementation[D]. Wuhan: Yangtze University, 2012.
 - [13] 杨震,刘庆成,岳步江,等.随钻电磁波测井中极化角的形成机理及其影响因素模拟分析[J].测井技术,2010,34(3):210-214.
YANG Zhen, LIU Qingcheng, YUE Bujiang. On mechanism of polarization angle of electromagnetic logging while drilling and its influence factors simulation[J]. Well Logging Technology, 2010,34(3):210-214.
 - [14] 李虎.复杂介质随钻方位电磁波测井数值模拟与应用基础研究[D].青岛:中国石油大学,2013.
LI Hu. Simulation and applied basic research of directional electromagnetic LWD tool in complex media[D]. Qingdao:China University of Petroleum, 2013.
 - [15] 范宜仁,巫振观,王磊,等.大斜度井各向异性地层双感应测井响应特征研究[J].测井技术,2016,40(3):262-269,275.
FAN Yiren, WU Zhenguan, WANG Lei, et al. Response characteristics of dual induction logging in anisotropic formation and high deviated wells[J]. 2016,40(3):262-269,275.
 - [16] 杨震,杨锦舟,韩来聚,等.随钻方位电磁波界面探测性能分析[J].石油学报,2016,37(7):930-938.
YANG Zhen, YANG Jinzhou, HAN Laiju, et al. Interface detection performance analysis of azimuthal electromagnetic while drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(7):930-938.