

# 三维感应测井仪器在三维井眼环境中的正演模拟

张国艳<sup>1</sup>, 肖加奇<sup>1</sup>, 肖占山<sup>1</sup>, 洪德成<sup>2</sup>, 王 林<sup>1</sup>

(1. 中国石油集团 长城钻探工程有限公司, 北京 100176; 2. 吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:**分析三维感应测井仪器三线圈系视电导率受层边界、井眼钻井液、侵入和仪器偏心等因素的影响。结果表明:井眼对  $XX/YY$  方向视电导率的影响比  $ZZ$  方向显著;侵入对  $XX/YY/ZZ$  方向视电导率都有影响,且  $XX/YY$  方向视电导率偏移方向与  $ZZ$  方向视电导率偏移方向相反;井眼和侵入对  $XZ/ZX$  分量影响主要表现在边界附近;偏心对  $ZZ$  方向视电导率几乎没影响,但当测井仪器偏心在  $X$  方向时,  $YY$  分量的响应影响最大,而当测井仪器偏心在  $Y$  方向时,  $XX$  分量的响应影响最大。

**关键词:**三维感应测井; 三线圈系; 视电导率; 层边界; 井眼环境; 钻井液; 仪器偏心; 正演模拟

中图分类号:P631.8

文献标志码:A

## Forward modeling of 3D induction logging tool in 3D borehole environment

ZHANG Guo-yan<sup>1</sup>, XIAO Jia-qi<sup>1</sup>, XIAO Zhan-shan<sup>1</sup>, HONG De-cheng<sup>2</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>

(1. CNPC Greatwall Drilling Company, Beijing 100176, China;

2. College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** The influence of the bed boundary, borehole drilling fluid, invasion and the tool eccentricity on apparent conductivity of the three-coil array of a 3D induction well logging tool was analyzed. The results show that the apparent conductivity in the  $XX/YY$  direction can be affected more by borehole drilling fluid than the apparent conductivity in the  $ZZ$  direction. In the presence of invasion, the shift direction of the apparent  $XX/YY$ -direction conductivity is opposite to the  $ZZ$ -direction apparent conductivity. The borehole drilling fluid and invasion affect  $XZ/ZX$ -direction apparent conductivity mainly in the boundary. A decentralized tool will not affect the  $ZZ$ -direction apparent conductivity. When the tool is decentralized in the  $X$  direction, the apparent conductivity in the  $YY$  direction can be significantly distorted. But when the tool is decentralized in the  $Y$  direction, the effect on the apparent conductivity in the  $XX$  direction will be the maximum.

**Key words:** 3D induction logging; three-coil array; apparent conductivity; bed boundary; borehole environment; drilling fluid; tool eccentricity; forward modeling

据估计,世界上大约有 30% 的油气储存于砂-泥岩薄交互层中<sup>[1]</sup>,这种地层表现为宏观横向各向同性(TI)地层<sup>[2-3]</sup>,也称为单轴各向异性地层,其水平(横向)电导率  $\sigma_h$  和垂直(纵向)电导率  $\sigma_v$  不相等。现有的感应测井仪器由于纵向分辨率还不够高,往往将这种薄交互油储层误认为是高含水饱和度层而漏掉<sup>[3]</sup>。三维感应测井仪器是由 3 个彼此垂直的发射线圈和与之平行的 3 个接收线圈组成,可以从三维角

度确定各向异性地层特性。目前水平井和斜井越来越多,水平井、斜井所带来的井眼、泥浆侵入、偏心等因素给三维感应测井数据处理和解释增加难度。数值模拟对三维感应测井仪器在三维井眼环境中的响应特征的分析 and 数据反演处理技术的开发具有重要意义。目前国外已有大量文献阐述了三维感应测井仪器在三维井眼环境中的响应特征<sup>[4-9]</sup>,笔者模拟分析三维感应测井仪器三线圈系中井眼倾角、层边界、

井眼、侵入、偏心对视电导率的影响。

## 1 三维感应测井仪器计算理论

三维感应测井仪器的线圈系结构<sup>[10]</sup>由3个中心共点的、彼此垂直的发射线圈 $T_x$ 、 $T_y$ 、 $T_z$ 和与其平行的3个接收线圈 $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$ ,以及3个屏蔽线圈 $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$ 组成。当发射线圈系向周围发射正弦交流电时,可同时测量接收线圈系上磁场(或感应电动势)张量的9个分量。磁场强度张量 $\hat{H}$ 及对应的视电导率张量 $\sigma$ 为

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} & H_{xz} \\ H_{yx} & H_{yy} & H_{yz} \\ H_{zx} & H_{zy} & H_{zz} \end{bmatrix}, \quad \sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}.$$

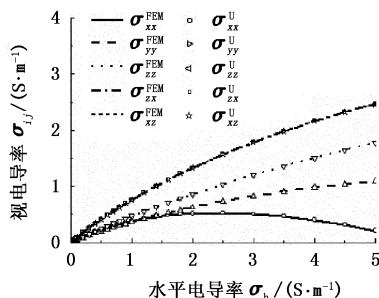
其中 $H_{xy}$ 表示由 $x$ 方向发射、 $y$ 方向接收产生的磁场强度,其他分量定义依此类推。

为了抵消发射线圈在接收线圈中产生的直接耦合分量引入屏蔽线圈。屏蔽线圈与接收线圈的绕线方向相反,匝数不等,在空气中屏蔽线圈和接收线圈中产生的直耦电动势相互抵消。

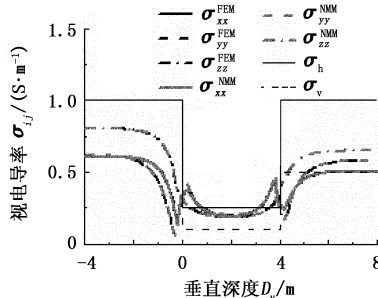
对于三线圈系,计算过程中线圈等效为点磁偶极子,考虑直耦电动势的消除,补偿后线圈系磁场强度 $H_{ij}^A$ <sup>[11]</sup>可表示为

$$H_{ij}^A = H_{ij1} - \frac{L_2^3}{L_1^3} H_{ij2}, \quad i = X, Y, Z; j = X, Y, Z.$$

式中, $L_1$ 为发射线圈和接收线圈间距离; $L_2$ 为发射线圈和屏蔽线圈间距离; $H_{ij1}$ 、 $H_{ij2}$ 分别为发射线圈为单位磁矩时接收线圈和屏蔽线圈磁场强度。



(a) 有限元(FEM)结果和均匀介质中解析解<sup>[12]</sup>



模拟计算得到的磁场虚部要转换成视电导率张量 $\sigma_{ij}^A$ <sup>[7,12-13]</sup>:

$$\sigma_{ij}^A = \frac{\text{Im}(H_{ij}^A)}{K_{ij}}, \quad i = X, Y, Z; j = X, Y, Z.$$

其中 $\text{Im}(H_{ij}^A)$ 为线圈系磁场强度的虚部; $K_{ij}$ 为线圈系仪器系数。

$$K_{xx} = K_{yy} = \frac{\omega\mu_0}{8\pi L_1} \left(1 - \frac{L_2^2}{L_1^2}\right), \quad K_{zz} = \frac{\omega\mu_0}{4\pi L_1} \left(1 - \frac{L_2^2}{L_1^2}\right),$$

$$K_{xy} = K_{yx} = \frac{\omega\mu_0}{8\pi L_1} \left(1 - \frac{L_2^2}{L_1^2}\right),$$

$$K_{zx} = K_{xz} = K_{zy} = K_{yz} = -\frac{\omega\mu_0}{16\pi L_1} \left(1 - \frac{L_2^2}{L_1^2}\right).$$

式中, $\omega$ 为角频率; $\mu_0$ 为空气中磁导率。

## 2 数值模拟及分析

### 2.1 算法检验

有限元(FEM)软件的计算结果与其他方法的结果对比见图1。其中井眼倾角 $\alpha = 60^\circ$ , $\sigma_h/\sigma_v = 10$ ,发射线圈 $X/Y/Z$ 三个方向的磁矩分别为 $M_x = M_y = M_z = 1$ ,发射线圈和接收线圈/屏蔽线圈间距离分别为 $L_1 = 0.762$  m,  $L_2 = 0.52$  m;工作频率 $f = 25$  kHz; $\sigma_{ij}^{\text{FEM}}(i, j = x, y, z)$ 为有限元数值模拟结果, $\sigma_{ij}^{\text{U}}(i, j = x, y, z)$ 为解析解结果; $\sigma_{ij}^{\text{NMM}}(i, j = x, y, z)$ 为数值模式匹配法求解结果。可以看出,有限元算法模拟结果和均质解析解及数值模式匹配法结果吻合得很好。说明有限元软件在模拟三维感应测井响应计算精度是可靠的。

图1 有限元结果与均质中解析解和数值模式匹配法对比结果

Fig. 1 Comparison FEM results with analytic and NMM results

### 2.2 结果分析

利用有限元(FEM)软件对三维感应测井仪器响应受井眼和地层环境影响进行了三维数值模拟,计算地层模型如图2所示,地层包括3层模型,上下围岩有侵入,中间层厚4 m,其中 $\sigma_h/\sigma_v$ 为TI地层水平方向和垂直方向电导率; $\sigma_{\text{hin}}/\sigma_{\text{vin}}$ 为TI地层侵

入带水平方向和垂直方向电导率; $\sigma/\sigma_{\text{inv}}$ 为各向同性地层电导率和侵入带电导率; $\sigma_m$ 为井眼钻井液电导率; $L_{\text{inv}}$ 为侵入带半径; $\alpha$ 为井眼倾角。井眼半径0.10795 m,侵入带半径 $L_{\text{inv}} = 0.41275$  m;泥浆电导率 $\sigma_m = 2.5$  S/m。为了研究井眼和侵入的影响,本文计算了1维分层模型、分层有井眼模型、分层有井眼有

侵入模型,记录点为发射线圈位置。

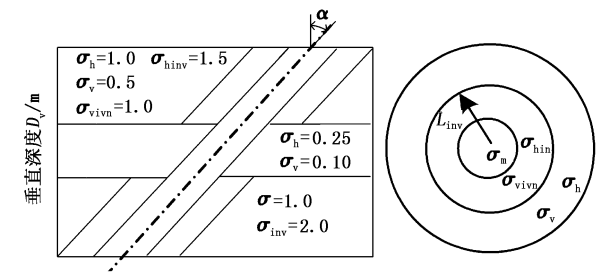


图 2 分层地层模型和泥浆侵入界面示意图

Fig. 2 Layer formation model and invasive interface diagram

2.2.1 层边界的影响

改变井眼倾角<sup>[12]</sup>  $\alpha$  为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $80^\circ$ ,用模式匹配法对 1 维分层模型进行了模拟计算,仪器方位角<sup>[10]</sup> 为零,计算结果如图 3 所示。由图中可以看

出,XX/YY 方向视电导率响应有“羊角”特性,主要是由于在层边界的电荷积累引起的,这个电荷积累与垂直层边界的电流流动有关,随着井眼倾角的提高,XX 方向的感应电流越来越平行于层边界,相反地,ZZ 方向的感应电流变得越来越垂直于层边界;因此,随着井眼倾角的增加,XX 方向视电导率响应里的“羊角”逐渐消失;同时,ZZ 方向视电导率响应里的“羊角”逐渐形成;YY 方向视电导率响应里的“羊角”基本保持不变,因为 YY 方向感应电流环相对于层边界的方向随着井眼倾角的改变保持不变;另一方面,XZ 和 ZX 方向视电导率响应是不对称的。这是由于 XZ 和 ZX 视电导率分量都与非对称空间敏感度函数有关<sup>[15]</sup>。而且,XZ 和 ZX 视电导率在边界处峰值分别偏置于层边界的上面和下面。

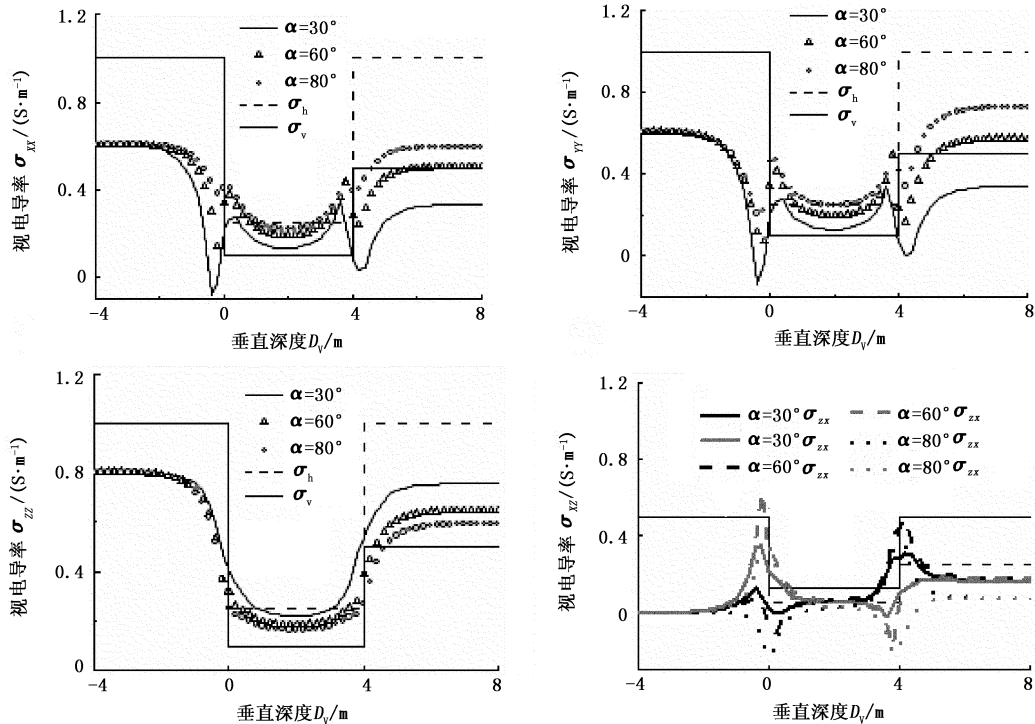


图 3 井眼倾角改变时线圈系视电导率沿垂直深度的变化

Fig. 3 Apparent conductivity response for different dip angle

2.2.2 井眼泥浆和侵入的影响

考虑井眼和侵入影响的模拟结果如图 4 所示。只含井眼地层模型与无井眼的分层模型相比,XX/YY 方向的视电导率在围岩层中都有一个均匀的偏移。但 ZZ 方向的视电导率偏移很小,说明井眼对轴向源分量测井响应影响不大。在中间层,XX 方向的视电导率偏离不大,这是由于中间层电导率比较低,视电导率值也比较小的缘故。YY 方向的视电

导率比 XX 的偏离要明显得多,说明同是径向源分量的 YY 方向测井响应受井眼环境影响要更大。远离边界处的 XZ/ZX 方向视电导率几乎不受影响,但峰值会变得比较模糊,响应曲线也平滑得多。

侵入对 XX/YY/ZZ 方向线圈系视电导率都有影响,但 XX/YY 方向视电导率偏移方向与 ZZ 方向视电导率偏移方向相反;侵入对 XZ/ZX 方向视电导率影响也主要表现在边界附近的峰值上。

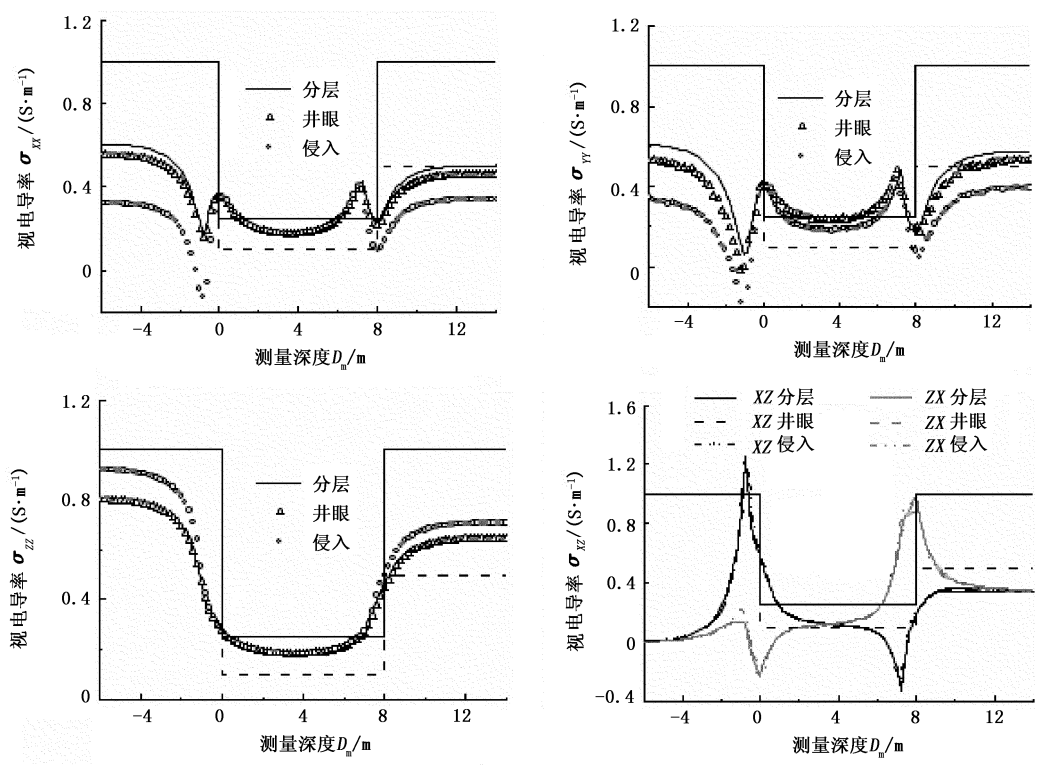


图4 在分层/井眼/侵入条件下线圈系视电导率的变化

Fig. 4 Apparent conductivity response in layer/borehole/invasion formation

可以看出,井眼环境对三维感应测井响应影响并没有改变其在水平层状地层模型中测井响应的基本特征,只是使电导率响应视值沿某一方向有所偏移。为了进一步寻找井眼环境的影响规律,数值模拟了只有径向分层地层模型的测井响应。图5给出了侵入带半径改变时的模拟结果。其中,井斜角 $\alpha$ 为 $60^\circ$ ,井眼泥浆电导率 $\sigma_m=2.5\text{ S/m}$ ,侵入层电导率 $\sigma_{\text{hin}}=1.5, \sigma_{\text{vin}}=1$ ;原状地层电导率 $\sigma_h=1, \sigma_v=0.5$ 。可以看出,随着侵入半径的增加,ZZ方向的视电导率几乎呈线性增加,XX方向和YY方向视电导率都是先降低然后增加<sup>[8]</sup>,交叉分量ZX/XZ几乎不受影响。

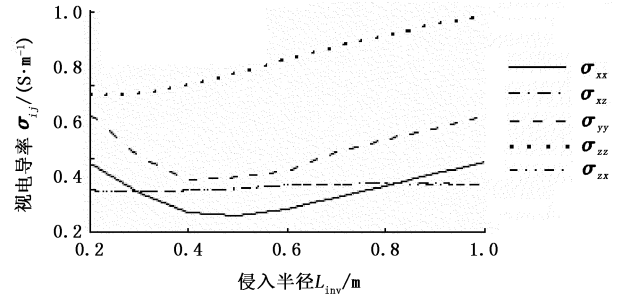


图5 侵入带半径改变时三维感应测井响应数值模拟结果

Fig. 5 Apparent conductivity response for different invasion radius

2.2.3 偏心的影响

计算时井眼倾角 $\alpha=0$ (垂直井),研究测井仪器偏心在X方向和Y方向时(图6)三维感应仪器响应变化(图7),偏心距离0.03 m。图中侵入代表仪器居中有井眼有侵入地层情况,偏X代表仪器偏心X方向,偏Y代表仪器偏心Y方向;其他参数同上,当井眼为传导性泥浆时,ZZ方向视电导率几乎不受影响;最大的偏心影响发生在当测井仪器偏心在X方向时,YY分量的响应影响最大;而当测井仪器偏心在Y方向时,XX分量的响应影响最大。

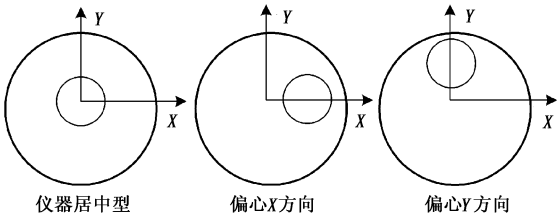


图6 仪器居中/偏心XY方向示意图

Fig. 6 Schematic drawing of tool in the center/eccentric at X direction/eccentric at Y direction of borehole



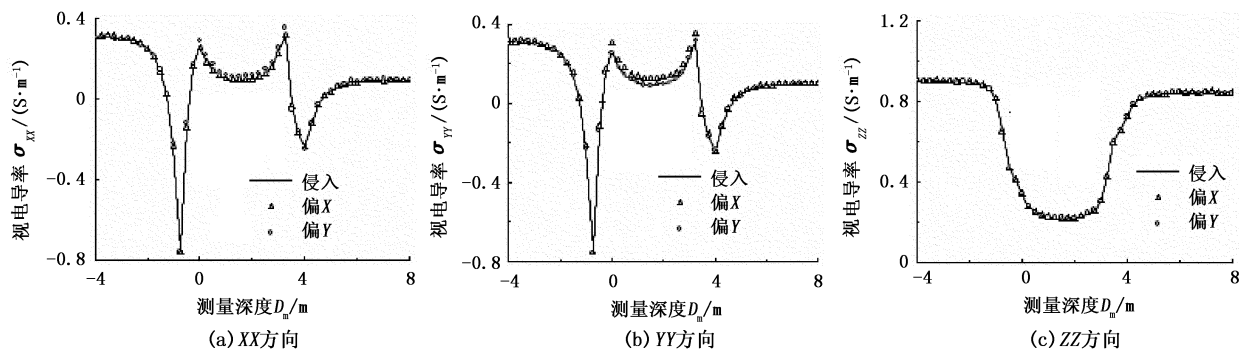


图 7 仪器位置对视电导率的影响

Fig. 7 Influence of tool location on apparent conductivity

### 3 结束语

计算分析了三维感应测井仪器三线圈系视电导率受井眼倾角、井眼泥浆、侵入和偏心等因素的影响。结果显示,随着井眼倾角的增加,XX 方向视电导率响应里的“羊角”逐渐消失;ZZ 方向视电导率响应里的“羊角”逐渐形成;YY 方向视电导率响应里的“羊角”基本保持不变;XZ 和 ZX 方向视电导率响应是不对称的。井眼对 XX/YY 方向视电导率的影响比 ZZ 方向显著;侵入对 XX/YY/ZZ 方向视电导率都有影响,且 XX/YY 方向视电导率偏移方向与 ZZ 方向视电导率偏移方向相反;井眼和侵入对 XZ/ZX 分量影响主要表现在边界附近的峰值上。偏心对 ZZ 方向视电导率几乎没影响,最大的偏心影响发生在当测井仪器偏心在 X 方向时,YY 分量的响应影响最大;而当测井仪器偏心在 Y 方向时,XX 分量的响应影响最大。

### 参考文献:

[1] 党瑞荣,秦瑶,谢雁,等. 三维感应测井系统研究[J]. 石油地球物理勘探, 2006,41(4):484-488.  
DANG Rui-rong, QIN Yao, XIE Yan, et al. Study of 3-D induction log system[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006,41(4):484-488.

[2] KLEIN J D, MARTIN P R, ALLEN D F. The petrophysics of electrically anisotropic reservoirs [J]. The Log Analyst, 1997,38(3):25-36.

[3] FANINI Otto N, FORGANG Stanislav, TABAROVSKY Leonty A, et al. Method and apparatus for transverse electromagnetic induction well logging: United States, 5781436 [P]. 1998-07-14.

[4] NAM Myung Jin, PARDO David, TORRES-VERDIN Carlos. Simulation of triaxial induction measurements in dipping, invaded, and anisotropic formations using a

Fourier series expansion in a nonorthogonal system of coordinates and a self-adaptive hp finite-element method [J]. Geophysics, 2010,75(3):83-95.

[5] XUE D, RABINOVICH M, CORLEY B, et al. Solutions to near zone effects on multi-component induction measurements [C/OL]// The 48th SPWLA Annual Logging Symposium, June 3-6, 2007 [2012-03-10]. [http://www.onepetro.org/mslib/app/Preview.do?paperNumber=2007\\_DD&societyCode=SPWLA](http://www.onepetro.org/mslib/app/Preview.do?paperNumber=2007_DD&societyCode=SPWLA).

[6] TSILI W, LIMING Y, FANINI O N, et al. Understanding multi-component induction logs in a 3-D borehole environment [C/OL]// The 42nd SPWLA Annual Logging Symposium, Houston, June 17-20, 2001 [2012-03-10]. <http://www.onepetro.org/mslib/app/Preview.do?paperNumber=SPWLA-2001-GG&societyCode=SPWLA>.

[7] WANG H, BARBER T, MORRIS C, et al. Determining anisotropic formation resistivity at any relative dip using a multiarray triaxial induction tool [R]. SPE 103113, 2006.

[8] MALLAN K R, TORRES-VERDIN Carlos. Effects of geometrical, environmental, and petrophysical parameters on multi-component induction measurements acquired in high-angle wells [J]. Petrophysics, 2007,48(4):271-288.

[9] YU Li-ming, RABINOVICH Michael, TABAROVSKY Lev, et al. The reduction of near zone effects on the multi-component induction logging tool [R]. SPE 84097, 2003.

[10] 张国艳,肖加奇,郝永杰. 三维感应测井数值计算与理论分析[J]. 测井技术, 2012,36(1):15-19.  
ZHANG Guo-yan, XIAO Jia-qi, HAO Yong-jie. Numerical computation and theoretical analysis of 3D induction logging tool [J]. Well Logging Technology, 2012,36(1):15-19.

(下转第 82 页)