

随钻双感应测井仪器刻度响应研究

许巍^{1,2}, 柯式镇^{1,2}, 姜明^{1,2}, 尹成芳^{1,2}, 李安宗³

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学地球物理与信息工程学院, 北京 102249; 3. 中国石油集团测井有限公司随钻测井仪器研究中心, 陕西西安 710054)

摘要:介绍一种随钻双感应测井仪器,利用三维有限元方法模拟实际仪器结构对仪器响应的影响,针对该仪器设计刻度环和刻度水箱,并探讨最优刻度环参数和水箱刻度校正系数。结果表明:钻铤和反射层是导致仪器响应非线性变化的主要因素,磁环主要导致仪器响应幅值增大。通过刻度环或水箱刻度,仪器响应和真实地层电导率具有较宽的线性响应范围。模拟结果可为随钻双感应测井仪器设计和刻度提供理论参考。

关键词:随钻测井; 感应测井; 有限元方法; 仪器刻度

中图分类号:P 631 **文献标志码:**A

引用格式:许巍,柯式镇,姜明,等. 随钻双感应测井仪器刻度响应研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(6):61-66.

XU Wei, KE Shizhen, JIANG Ming, et al. Numerical simulations of calibration of a dual-induction resistivity LWD tool [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6): 61-66.

Numerical simulations of calibration of a dual-induction resistivity LWD tool

XU Wei^{1,2}, KE Shizhen^{1,2}, JIANG Ming^{1,2}, YIN Chengfang^{1,2}, LI Anzong³

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. College of Geophysics and Information Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
3. LWD Center, China Petroleum Logging Company Limited, Xi'an 710054, China)

Abstract: Instrument structure influences of a new dual-induction resistivity LWD tool were simulated using the finite element method (FEM), and optimal parameters of calibration loop and correction coefficients of the calibration tank were determined and discussed respectively. The results show that the nonlinear responses of the tool are mainly caused by the drill collar and the reflector, while the amplitude enhancement of signal is mainly caused by the magnetic ring. After calibration, a wide linear response range of the formation resistivity is obtained. The simulation results can provide theoretical references for the research and calibration of dual-induction resistivity LWD tools.

Key words: logging while drilling; induction resistivity logging; finite element method; tool calibration

相比传统电缆测井,随钻测井虽发展较晚,但凭借在水平井测量和实时地质导向方面的优势,已成为未来测井发展方向^[1]。随钻电阻率测井是随钻测井技术的重要组成部分,目前各大石油公司均开发有自己的随钻电磁波测井仪器,通常可进行两个频率多个探测深度测量。英国 Geolink 公司拥有目前唯一一支随钻感应测井仪器,由于

该仪器只能进行单一探测深度测量,商业应用相对较少^[2]。随钻电磁波测井仪器将线圈绕在金属钻铤表面,在钻井过程容易被损坏^[3]。这种复杂的仪器结构使得线圈系的维护和修理十分困难。由于钻铤表面涡流和较高发射频率的影响,传统的随钻电磁波测井仪器探测深度和信号强度较小。相对而言,随钻感应测井仪器能够提供更优

的探测效果。在测井仪器商业应用和下井测量之前,都需要对仪器进行刻度。传统的电缆感应测井仪器常采用刻度环进行模拟刻度,而随钻感应测井仪器刻度方法的介绍则相对较少。利用数值方法模拟仪器的刻度响应是实际测井仪器设计的必要环节,但基于真实随钻电阻率测井仪器的响应模拟是非常复杂和困难的,不仅需要考虑仪器结构自身的影响,还需要考虑测量环境的影响^[4-7]。另外,仪器的刻度设计将直接影响仪器测量精度^[8-9]。笔者描述一种随钻双感应测井仪器结构,利用有限元方法^[10-11]模拟仪器结构各部分对仪器响应的影响,并讨论仪器在刻度环和刻度水箱中的刻度响应特性。

1 三维有限元建模

1.1 时谐场波动方程

随钻感应测井仪器发射线圈常通以交变电流 $I = I_0 e^{i\omega t}$, 有用信号为地层介质中涡流在接收线圈中感生的二次感应电动势。根据电磁场原理, 时谐场麦克斯韦方程表示为

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + j\omega\epsilon) \mathbf{E} + \mathbf{J}_s, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu \mathbf{H}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho. \quad (4)$$

式中, $\mathbf{E}$ 为电场强度, V/m; $\mathbf{H}$ 为磁场强度, A/m; $\mathbf{J}_s$ 为外加电流密度, A/m²; ϵ 为介电常数, F/m; μ 为磁导率, H/m; σ 为电导率, S/m; ρ 为电荷密度, C/m³; ω 为电流角频率, rad/s。将式(2)代入式(1)可得电场 $\mathbf{E}$ 在求解域 V 的波动方程^[12]:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right] - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} = -j\omega\mu_0 \mathbf{J}_s. \quad (5)$$

式中, k_0 为自由空间波数, m⁻¹; μ_r 为相对磁导率; μ_0 为真空磁导率; ϵ_r 为复介电常数。

$$\epsilon_r = \frac{1}{\epsilon_0} (\epsilon - j\sigma/\omega). \quad (6)$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数; $\epsilon - j\sigma/\omega$ 为地层复介电常数。

1.2 边界条件

在金属钻铤及有限元模型表面的电场边界条件为^[13]

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0. \quad (7)$$

电场 $\mathbf{E}$ 在不同地层媒质交界面满足连续性条件:

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0. \quad (8)$$

1.3 变分方程

利用变分原理和泛函分析, 得到电场 $\mathbf{E}$ 的泛函表达式:

$$F(\mathbf{E}) = \frac{1}{2} \iiint_V \left[\frac{1}{\mu_r} (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \right] dV + j\omega\mu_0 \iiint_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV. \quad (9)$$

为求解泛函 $F(\mathbf{E})$, 需要将求解区域离散成若干个子空间。在局部坐标系下, 对每个单元分别利用形状函数导出求解场量的表达式, 扩展得到总矩阵方程

$$\mathbf{KX} = \mathbf{P}. \quad (10)$$

式中, $\mathbf{K}$ 为总刚度矩阵; $\mathbf{P}$ 为施加条件; $\mathbf{X}$ 为需要求解的未知变量。由于需要求解大型稀疏矩阵, 本文中采用不完全乔勒斯基共轭梯度求解器 (ICCG) 对方程组求解^[14]。

2 数值模拟及结果分析

2.1 仪器结构影响

随钻双感应测井仪器线圈系和仪器结构如图 1 所示。由图可知, 仪器线圈系由一个发射线圈 (T)、两个接收线圈 (R_1 和 R_2) 和两个补偿线圈 (B_1 和 B_2) 组成, 可使仪器进行两个不同深度的测量。仪器工作频率为 20 kHz, 与电缆感应测井仪器工作频率相同。与传统随钻电磁波测井仪器外置线圈系结构不同, 随钻双感应测井仪线圈系封装在钻铤侧面玻璃钢盖板下的充满油的凹槽中, 用以保护线圈系并对流体静压进行液压补偿。一个高导反射层被安装在线圈系和钻铤之间, 用于屏蔽钻铤对仪器信号的电磁干扰。在凹槽后面的钻铤中设计一个水眼, 用于钻井液的流动, 同时兼顾对钻铤强度的影响降到最小。另外, 为增大仪器响应信号强度, 线圈系中还安装了磁环。

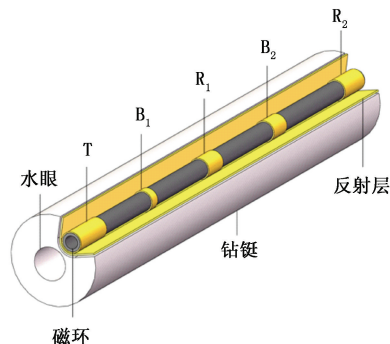


图 1 传感器阵列截面图

Fig. 1 Cross-section of sensor array

基于实际仪器结构,模拟了均匀地层模型中仪器各部分对仪器响应的影响。如图2所示,无仪器结构影响时,除地层电导率较高时受趋肤效应影响外,仪器视电导率与地层电导率呈较好线性关系。对比无仪器结构影响的线圈系结构,仪器结构的影响导致视电导率值增大且在地层电导率低值部分非线性变化。其中,钻铤和反射层均导致仪器响应在

地层电导率低值部分非线性变化,而磁环主要导致仪器响应幅值增大。相对于深感应测井,中感应测井视电导率受仪器结构影响更大,视电导率曲线非线性变化更明显。因此,针对线圈距不同的线圈系需要分别考虑仪器结构的影响。理论上,扣除仪器结构和刻度环境整体影响,即可使仪器响应刻度到真实地层电导率^[9]。

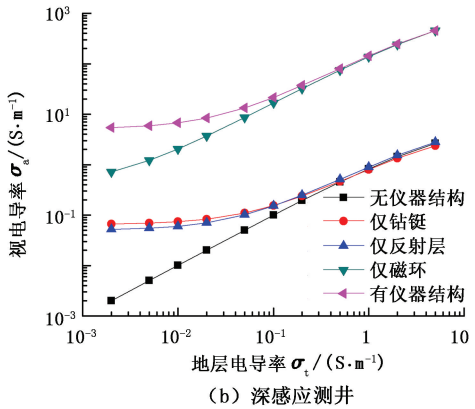
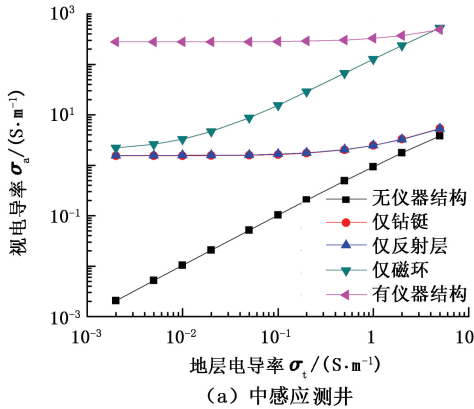


图2 视电导率随仪器结构变化关系
Fig.2 Apparent conductivities versus instrument structure

2.2 半空间响应

传统感应测井仪器刻度过程中,常将仪器水平放置在距离地面一定高度处,由于地层为导电介质,因此需要将地层介质影响扣除或者降低到最小,才能精确地分析仪器刻度响应^[15]。本文中假设仪器刻度环境为地层电导率均匀的半空间,并在此基础上计算了地层介质对半空间水平放置随钻双感应测井仪器视电导率的影响。如图3所示,当地层电导率 $\sigma_t < 1$ S/m且仪器离地高度 H 为固定值时,深感应视电导率值

忽略,可作为仪器刻度时离地高度。

2.3 模拟刻度响应

传统电缆感应测井仪器多采用模拟刻度方法刻度仪器响应,即利用一个电阻已知的金属刻度环代替固定电阻率的地层介质,并将仪器响应标定到真实地层电阻率。两点刻度法将仪器在自由空间响应值和在刻度环中最大响应值分别作为刻度零点和最佳刻度值点,并以此建立仪器读数和介质电导率的线性关系^[16]。实际测井中,接收线圈 R_1 和发射线圈 T 中点为中感应测量记录点,接收线圈 R_2 和发射线圈 T 中点为深感应测量记录点和仪器刻度位置零点。

考察仪器中感应和深感应最佳刻度位置时,将刻度环(刻度环电阻为 $0.3\ \Omega$,刻度环半径为 0.5 m)沿仪器轴向逐点进行刻度测量。图4为扣除仪器结构影响后视电导率随刻度位置的变化关系。深感应和中感应分别在对应记录点处具有最大视电导率值(z 值分别为 0 m 和 0.2 m),且在其附近随刻度位置变化仪器刻度响应变化较小,即深感应和中感应最佳刻度点对应 z 值分别为 0 m 和 0.2 m 。

受几何因子空间分布特性影响,可通过选择最佳刻度环半径使深、中感应获得最大刻度响应。为了获得仪器在不同电导率地层模型中的响应,需要利用不同电阻值的刻度环进行刻度。

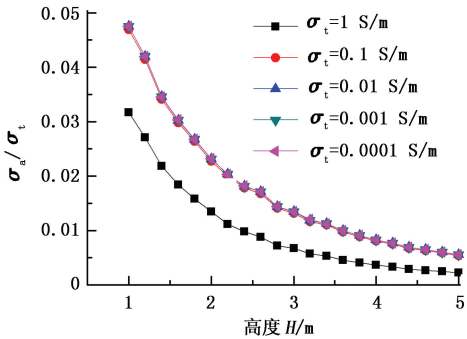


图3 仪器半空间响应
Fig.3 Tool responses in half space

随地层电导率值线性变化(σ_a/σ_t 差异较小)。当仪器离地高度 H 为固定值时,对比地层电导率为 0.1 S/m 和 1 S/m 可知,受趋肤效应影响,视电导率不再随地层电导率线性变化(σ_a/σ_t 差异较大)。当仪器离地高度大于 5 m 时, σ_a/σ_t 值趋于零,地层影响可以

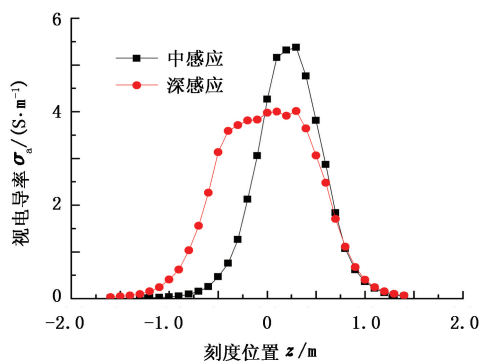


图4 视电导率随刻度位置变化关系

Fig.4 Apparent conductivities versus position of calibration loop

图5为扣除仪器结构影响后视电导率随刻度环半径的变化关系(刻度环固定在深、中感应对应最佳刻度点位置,刻度环电阻为 $0.3\ \Omega$)。深感应和中感应分别在刻度环半径为 $0.5\ \text{m}$ 和 $0.25\ \text{m}$ 时具有最大响应,因此刻度环电阻为 $0.3\ \Omega$ 时深、中感应最佳刻度环半径分别为 $0.5\ \text{m}$ 和 $0.25\ \text{m}$ 。

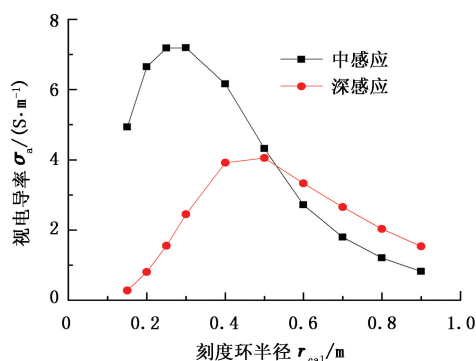


图5 视电导率随刻度环半径变化关系

Fig.5 Apparent conductivities versus radius of calibration loop

选定最佳刻度环半径后,需考虑选用对应最佳电阻使仪器获得最大刻度响应。图6为扣除仪器结构影响后深感应视电导率随刻度环电阻变化关系。当刻度位置和刻度环半径按上述方式选定后(刻度环固定在深感应对应最佳刻度点位置,刻度环半径为 $0.5\ \text{m}$),深感应视电导率在刻度环电阻为 $0.3\ \Omega$ 时具有最大响应。当刻度环电阻小于 $1\ \Omega$ 时,视电导率随刻度环线径(r_a)增大而增大。当刻度环电阻大于 $1\ \Omega$ 时,视电导率随线径增大变化不明显。当选用中感应对应最佳半径刻度环时,中感应刻度环对应最佳电阻可以类似地获得。

实际感应测井仪器刻度时,除确定刻度环最佳参数外,还需要确定刻度系数。通过选择加因子和乘因子,可将仪器响应刻度标定到真实地层电导率

值。刻度公式如下:

$$\sigma_{ac} = k_c (V_R - B). \quad (11)$$

式中, σ_{ac} 为刻度标定后的视电导率; k_c 为刻度乘因子,即为仪器系数; B 为刻度加因子,此处为需要减去的背景噪声; V_R 为线圈接收信号实部。

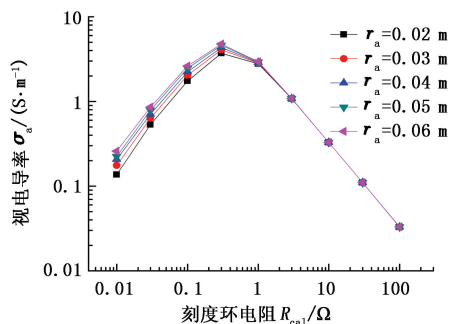


图6 深感应视电导率随刻度环电阻及线径变化关系

Fig.6 Apparent conductivities of deep induction versus resistance and cross-section diameter of calibration loop

2.4 实体刻度响应

除模拟刻度外,部分石油公司还利用刻度水箱对测井仪器进行实体刻度,但相对于简单的刻度环装置,实体刻度装置体积巨大,耗资不菲。本文中对实体刻度系统也进行了模拟分析,给出了实体刻度装置优化设计参数。图7为仪器在刻度水箱架起高度(仪器刻度零点相对于刻度水箱顶界面的距离)对刻度信号的影响(水箱溶液电导率 $\sigma_f = 1\ \text{S/m}$)。

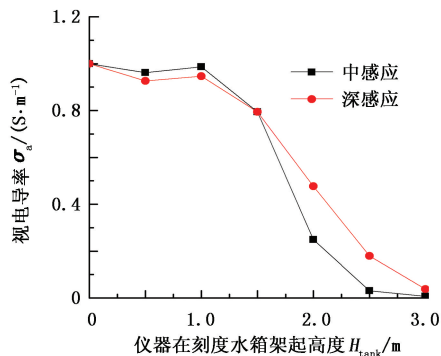


图7 视电导率随仪器在刻度水箱架起高度变化关系

Fig.7 Apparent conductivities versus height of tool in calibration tank

如图所示,当仪器在刻度水箱架起高度大于 $3\ \text{m}$ 时,深、中感应响应值均趋于零,即仪器响应对水箱与空气交界面变化不敏感。考虑现场实际用于刻度的水箱半径常小于 $3\ \text{m}$,本文中讨论了刻度水箱半径在 $1\sim 3\ \text{m}$ 范围内变化时对仪器响应影响(图8)。随刻度水箱半径增大,仪器响应增大,当刻度水箱半径达到 $3\ \text{m}$ 时趋于稳定,考虑实际工程实现等诸多因素,

本文中优选刻度水箱半径为 3 m。图 9 为视电导率随刻度水箱溶液电导率的变化关系,两者比值即为水箱刻度校正系数(即 σ_t/σ_a),中感应和深感应对应刻度水箱刻度校正系数分别为 0.79 和 0.71。视电导率和刻度水箱溶液电导率在较宽范围内呈线性关系,能够满足仪器刻度需要。

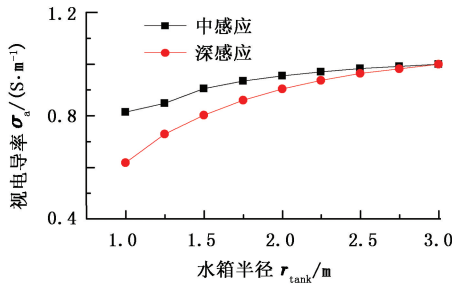


图 8 视电导率随刻度水箱半径变化关系
Fig.8 Apparent conductivities versus radius of calibration tank

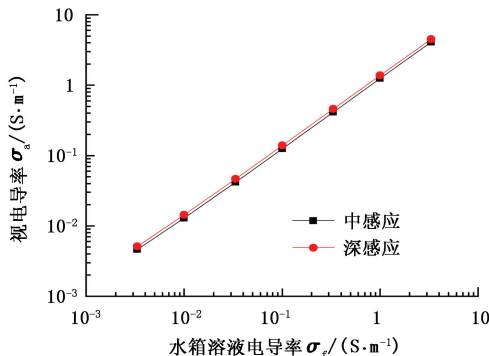


图 9 视电导率随刻度水箱溶液电导率变化关系
Fig.9 Apparent conductivities versus conductivity of calibration tank solution

3 结 论

(1) 钻铤和反射层是仪器响应非线性变化的主要因素,而磁环主要导致仪器响应幅值增大。

(2) 对仪器进行模拟刻度时需要针对不同线圈系分别选取最优刻度环参数和刻度系数。对仪器进行水箱刻度时不仅要考虑仪器最大探测深度,还要针对不同线圈系分别考虑刻度校正系数。通过对随钻双感应测井仪器刻度响应的模拟,使仪器获得了较宽的线性响应范围。

参考文献:

[1] MEYER W H, HART E, JENSEN K. Geosteering with a combination of extra deep and azimuthal resistivity tools [R]. SPE 115675, 2008.
[2] ALLAN V, SINCLAIR P, PRAIN K, et al. Design, de-

velopment and field introduction of a unique low-frequency (20 kHz) induction resistivity logging-while-drilling tool [R]. SPWLA 2004-XX, 2004.

[3] 魏宝君. 一种新型随钻电阻率测井仪器的响应和刻度[J]. 地球物理学报, 2007,50(2):632-641.
WEI Baojun. Response and calibration of a new logging-while-drilling resistivity tool [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007,50(2):632-641.
[4] ANDERSON B, BONNER S, LULING M G, et al. Response of 2-MHz LWD resistivity and wireline induction tools in dipping beds and laminated formations [J]. The Log Analyst, 1992,33(5):461-475.
[5] HAGIWARA T, BANNING E J, OSTERMEIER R M, et al. Effects of mandrel, borehole and invasion for tilt-coil antennas [R]. SPE 84245, 2003.
[6] ZHOU Qiang, HILLIKER D J. MWD resistivity tool response in a layered medium [J]. Geophysics, 1991,56(11):1738-1748.
[7] 魏宝君,田坤,张旭,等. 用并矢 Green 函数的矢量本征函数展开式评价偏心对随钻电磁波电阻率测井响应的影 响 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010,34(5):57-62.
WEI Baojun, TIAN Kun, ZHANG Xu, et al. Evaluating influence of eccentricity on response of electromagnetic wave resistivity logging-while-drilling by vector eigenfunction expansion formulae for dyadic Green's functions [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(5):57-62.
[8] 件杰,刘春雅,张甜甜,等. 阵列感应测井仪刻度系数特性研究 [J]. 测井技术, 2006,30(5):400-403.
WU Jie, LIU Chunya, ZHANG Tiantian, et al. A study of calibration coefficient characteristics of array induction logging tool [J]. Well Logging Technology, 2006, 30(5):400-403.
[9] XU Wei, KE Shizhen, LI Anzong, et al. Responses simulation and theoretical calibration of a dual-induction resistivity LWD tool [J]. Applied Geophysics, 2014,11(1):31-40.
[10] 孙向阳,聂在平,赵延文,等. 用矢量有限元方法模拟随钻测井仪在倾斜各向异性地层中的电磁响应 [J]. 地球物理学报, 2008,51(5):1600-1607.
SUN Xiangyang, NIE Zaiping, ZHAO Yanwen, et al. The electromagnetic modeling of logging-while-drilling tool in tilted anisotropic formations using vector finite element method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008,51(5):1600-1607.
[11] JIN J M. The finite element method in electromagnetics [M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2002.

- [12] DUBCOVA L, SOLIN P, CERVENY J, et al. Space and time adaptive two-mesh hp-finite element method for transient microwave heating problems [J]. *Electromagnetics*, 2010,30(1):23-40.
- [13] 刘得军,马中华,苑赫,等. 自适应高阶矢量有限元方法在随钻电阻率测井中的应用 [J]. *中国石油大学学报:自然科学版*,2012,36(4):77-92.
LIU Dejun, MA Zhonghua, YUAN He, et al. Application of adaptive higher-order vector finite element method to simulate resistivity logging-while-drilling tool response [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012,36(4):77-92.
- [14] YUAN Sanyi, WANG Shangxu. Edge-preserving noise reduction based on Bayesian inversion with directional difference constraints [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2013,10(2):1-10.
- [15] 魏宝君,张中庆,张庚骥. 半空间水平放置阵列感应测井仪的刻度及误差校正 [J]. *西南石油学院学报*, 1998, 20(3):34-37.
WEI Baojun, ZHANG Zhongqing, ZHANG Gengji. The calibration and sonde error correction of horizontal array induction logging tool in half space [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1998,20(3):34-37.
- [16] 冯启宁,鞠晓东,柯式镇,等. 测井仪器原理 [M]. 北京:石油工业出版社,2010:99-108.
- (编辑 修荣荣)