

基于 hp-FEM 的随钻电磁波测井仪器响应正演分析

朱庚雪¹, 刘得军¹, 张颖颖¹, 王 政¹, 赖天祥²

(1. 中国石油大学(北京)地球物理与信息学院, 北京 102249; 2. 中国石化中原油田分公司采油三厂, 河南濮阳 457001)

摘 要:为研究复杂井周条件下随钻电磁波测井的响应规律,优化仪器参数,开展了基于 hp-FEM 算法的随钻电磁波测井仪器响应正演研究。根据时谐电磁场理论建立数学模型,考虑边界条件建立了变分方程,采用 hp-FEM 算法对仪器在二维旋转对称性地层模型中的响应进行模拟。数值模拟结果表明,均匀地层 hp-FEM 数值解与解析解相对误差仅 0.046 3%,验证了正演程序的精确性。在其他参数不变的条件下,发射线圈频率越大,相位差曲线变化幅度越大,且极化角所处位置越靠近真实模型的分界面;仪器的源距越小,极化角越明显,纵向分辨能力越强。相对于低阻层,仪器进入高阻层时,相位差曲线上出现的极化角较大。研究结果表明,提高频率和缩短源距可以更加精确地反映地层界面位置,为地质导向决策提供测井资料支持。

关键词:随钻测井 电磁波传播测井 正演 仪器参数 极化角

中图分类号:P631.8⁺13 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2015)02-0063-08

Forward Modeling of Responses of an ELWD Tool Based on hp-FEM

Zhu Gengxue¹, Liu Dejun¹, Zhang Yingying¹, Wang Zheng¹, Lai Tianxiang²

(1. College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. No. 3 Oil Production Plant, Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan, 457001, China)

Abstract: In order to identify the responses of the electromagnetic logging while drilling (ELWD) tool under complex near-wellbore conditions and to optimize the tool parameters, the forward modeling of such responses was carried out based on hp-FEM. A mathematical model was established based on the theory of time harmonic electromagnetic field, and a variation equation built considering boundary conditions, the response of the instrument in a two-dimensional rotational symmetric formation model was simulated by using the hp-FEM algorithm. The result of the numerical simulation shows that the relative error between numerical solutions and analytic solutions is only 0.046 3% in the homogeneous formation model, and the accuracy of the forward modeling program can be verified. When other parameters are kept constant, the higher the emission frequency of coil, the larger the change of the phase difference curve, and the closer the location of polarization angle to the interface of true model; when the source spacing of the instrument is smaller, the polarization angle is more evident, and the vertical resolution is higher. As the tool goes into a high-resistivity zone, the polarization angle in the phase difference curve is larger than that in the low-resistivity zone. The research results show that the tool parameters can be optimized by increasing the frequency and shortening the source spacing, so as to reflect the formation interface accurately, and to provide the support for geosteering decisions with logging data.

Key words: logging while drilling; electromagnetic wave propagation logging; forward modeling; tool parameters; polarization angle

随钻电磁波测井技术得到众多石油公司的认可和使用^[1-5],国内外学者也对随钻电磁波数值模拟做了相关研究。1991 年, L. C. Shen^[6]首次对随钻电磁波测井仪器响应进行了理论研究,得到了轴旋转对称地层的解析解; Q. Zhou 等人^[7]研究了水平多层介质中随钻电磁波仪器响应的解析解及数值计算解; J. R. Lovell 等人^[8]和 T. Wang 等人^[9]分别采用有限元法和时域有限差分法进行随钻电磁波仪器响

应数值研究; Liu Qinghuo 等人^[10]使用共轭梯度法

收稿日期:2014-07-13; 改回日期:2014-02-10。

作者简介:朱庚雪(1989—),女,山东济宁人,2008 年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业,地球探测与信息技术专业在读硕士研究生,主要从事随钻电阻率数值模拟研究。

联系方式:13263312603, zhugengxue@163.com。

通讯作者:刘得军, liudj65@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“高精度自适应目标导向 hp 有限元随钻电阻率测井响应数值模拟”(编号:41074099)和国家自然科学基金项目“地下管线磁异常三层分量联合反演成像探测新方法研究”(编号:41374151)资助。

来求解轴对称条件下不均匀介质层的散射解;孙向阳等人^[11]采用矢量有限元法模拟随钻测井仪的电磁响应;魏宝君等人^[12]采用混合法和递推矩阵算法模拟层状介质中的随钻电磁波仪器响应。这些研究已取得了一定的成果,但如何达到计算精度高、收敛速度快以及实现动态数值模拟,是目前各种数值模拟算法有待解决的问题。

自适应 hp-FEM 算法是一种研究工程结构问题的有效计算方法,适用于具有复杂边界形状或边界条件、含有复杂媒质的问题,在分析井周复杂地层时具有明显的优势^[13-19]。hp-FEM 算法能对不同区域采取自适应细化策略,通过减小局部误差来提高精度,降低计算次数,可以显著地提高有限元计算分析的效率及可靠性。笔者利用 hp-FEM 算法结合 HERMERS 软件进行了建模和运算,根据电磁场理论建立数学模型,考虑边界条件,对所建立的二维旋转对称性地层模型进行了数值模拟,得到了随钻电磁波测井的幅值比和相位差响应曲线,刻度成更直观的电导率曲线,并分析了仪器响应随频率和源距的变化规律,以期对仪器参数设计优化提供参考。

1 随钻电磁波测井原理和方法

1.1 时谐电磁场理论

在随钻电磁波测井中,基于时谐电磁场理论,利用麦克斯韦方程组进行求解,微分形式的麦克斯韦方程组可写成:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + i\omega\epsilon)\mathbf{E} + \mathbf{J}^{\text{imp}} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mu\mathbf{H} \\ \nabla \cdot (\epsilon\mathbf{E}) = \rho \\ \nabla \cdot (\mu\mathbf{H}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为磁场强度, A/m; $\mathbf{E}$ 为电场强度, V/m; ω 为发射源角频率($\omega \neq 0$), rad/s; σ 为媒介的电导率, S/m; ϵ 为介电常数, F/m; μ 为磁导率, H/m; ρ 为空间电荷密度, C/m³; $\mathbf{J}^{\text{imp}}$ 为发射线圈上外加电流密度, A/m²; $i = \sqrt{-1}$ 。

可得到时谐麦克斯韦方程在求解域 Ω 上的波动方程:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - (\mu\omega^2\epsilon - i\mu\omega\sigma)\mathbf{E} + i\mu\omega\mathbf{J}^{\text{imp}} = \mathbf{0} \quad (2)$$

又因为

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E} \quad (3)$$

则式(2)化简后得到时谐麦克斯韦方程在均质介质求解域 Ω 上满足的波动方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = i\mu\omega\mathbf{J}^{\text{imp}} \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad k^2 = \mu\omega^2 \left(\epsilon - i \frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (5)$$

$$\text{令} \quad k = \beta - i\alpha \quad (6)$$

$$\text{其中} \quad \alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} - 1 \right]} \quad (7)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} + 1 \right]} \quad (8)$$

式中: k 为传播常数,也称波数; β 为相位常数; α 为衰减常数。

1.2 边界条件处理

在利用有限元方法进行随钻电磁波正演计算时,根据所处理问题的边界条件进而求解。

1.2.1 理想导体边界条件

由理论电磁场可知,任意导体分界面上,电场强度的切向分量和磁感应强度的法向分量都是连续的。换句话说,理想导体表面不可能存在电场切向分量和磁场法向分量。因此,在理想导体边界求解域 Γ_1 上满足的边界条件为:

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \times \mathbf{E} &= 0 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为磁感应强度, T; $\mathbf{n}$ 为在发射线圈边界求解域 Γ_2 所满足边界条件下的任意试函数沿法线方向的矢量。

1.2.2 发射线圈边界条件

由于发射线圈模型中通入外加电流 $\mathbf{J}^{\text{imp}}$, 为方便计算,根据场的等效原理,可将外加电流等效为面电流 $\mathbf{J}_s^{\text{imp}}$, 来建立发射线圈模型。因此,在求解域 Γ_2 上满足的边界条件为:

$$\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -i\mu\omega\mathbf{J}_s^{\text{imp}} \quad (10)$$

1.2.3 非理想导体边界条件

与理想导体不同,非理想导体中存在电阻、损耗,即 $\sigma \neq 0$, 求解域 Γ_3 为非理想导体边界,故其边界条件为:

$$\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -k^2 \mathbf{E} \quad (11)$$

2 随钻电磁波数值模拟方法求解

2.1 时谐麦克斯韦方程的变分方程

随钻电磁波测井响应模拟过程是对高频情况下

的矢量电场进行分析,因此采用矢量有限元法对 $\mathbf{H}(\text{curl})$ 高频电磁场进行求解,从而确保各单元相邻表面之间电场切向的连续性和场的旋度零空间的正确表示。在 $\mathbf{H}(\text{curl})$ 空间求解电场可以保证求解过程中不出现伪解,正演仿真结果准确可靠。 $\mathbf{H}(\text{curl})$ 空间定义为:

$$\mathbf{H}(\text{curl}, \Omega) = \{\mathbf{E} \in (L^2(\Omega))^2; \nabla \times \mathbf{E} \in L^2(\Omega)\} \quad (12)$$

式(9)、(10)、(11)结合其相应的封闭区域边界条件作为约束条件代入式(4)中,然后在方程中引入矢量试函数 $\mathbf{F}$,并在求解域 Ω 上对各项进行积分运算,即可得到在 $\mathbf{H}(\text{curl})$ 空间下有限元变分问题的标准方程:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E} \right) \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) dV - \int_{\Omega} (\omega^2 \varepsilon - j\omega\sigma) \mathbf{E} \cdot \mathbf{F} dV \\ = -j\omega \int_{\Omega} \mathbf{J}^{\text{imp}} \cdot \mathbf{F} dV + j\omega \int_{\Gamma_2} \mathbf{J}_s^{\text{imp}} \cdot \mathbf{F}_t ds - \\ \int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu} \mathbf{M}^{\text{imp}} \right) \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) dV \quad (\mathbf{E} \in \mathbf{H}, \forall \mathbf{F} \in \mathbf{H}) \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{M}^{\text{imp}}$ 为外加磁场强度, A/m; Γ_2 为发射线圈边界条件; $\mathbf{F}$ 为任意的一个试函数,且 $\mathbf{F} \in \mathbf{H} = \{\mathbf{E} \in \mathbf{H}(\text{curl}, \Omega); \mathbf{n} \cdot \mathbf{E} = 0 \text{ on } \Omega\}$; $\mathbf{F}_t$ 为在 Γ_2 边界条件下的任意试函数沿切线方向的矢量。

当外加磁场 $\mathbf{M}^{\text{imp}}$ 为 0 时,式(13)可写成一个双线性函数和一个线函数的组合,即:

$$a(\mathbf{E}, \mathbf{F}) = l(\mathbf{F}) \quad (14)$$

利用有限元法,对式(13)进行离散化处理,建立了大型稀疏线性方程组:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{C} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为容量矩阵; $\mathbf{C}$ 为施加条件数; $\mathbf{x}$ 为需要求解的未知变量。

hp-FEM 是以细分单元网格或提高插值函数阶次为手段的一种自适应算法,在求解区域较大的网格剖分问题上具有计算能力强、计算精度高、收敛速度好的特点,因此采用 hp-FEM 有限元法并结合 UMFPACK 求解器对式(15)进行求解。

2.2 hp-FEM 算法求解过程

用初始网格 $T_{h,p}$ 将 Ω 划分为多个互不重叠的单元 $k_1, k_2, \dots, k_n$, 其中每个单元的尺寸 $h_1, h_2, \dots, h_n > 0$, 对应的多项式阶次 $p_1, p_2, \dots, p_n \geq 1$ 。那么,在求解空间 $\mathbf{H}(\text{curl})$ 下,有限元求解子空间定义为:

$$\mathbf{H}_{h,p} = \{\mathbf{E}_{h,p} \in \mathbf{H}\} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{E}_{h,p}$ 为 $k_{h,p}$ 中依据初始网格得到的电场 $\mathbf{E}$ 的近似解。

由 $\mathbf{H}(\text{curl})$ 空间特性可知,此时空间 $\mathbf{H}_{h,p}$ 中的矢量场分布是不连续的,但是该矢量场的切向分量在整个求解区域各单元表面上保持连续变化,满足高频情况下求解随钻电磁波测井过程中电场分布的要求。通常情况下,自适应 hp-FEM 算法的求解步骤如图 1 所示。

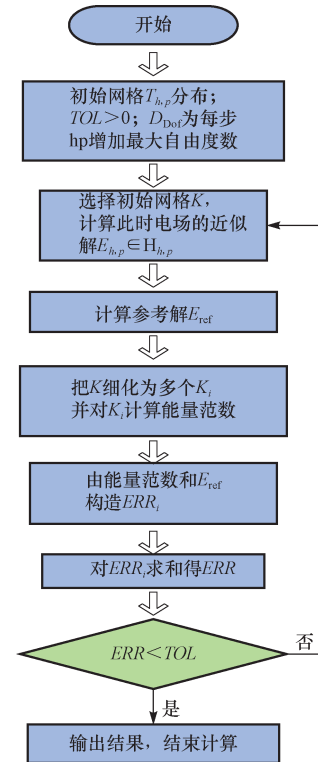


图 1 自适应 hp-FEM 算法的求解流程

Fig. 1 Solving the process of the hp-FEM adaptivity algorithm

图 1 中, $T_{h,p}$ 指初始网格分布,由多个互不重叠的单元组成; TOL 是求解过程中最大容许误差; $E_{h,p}$ 是初始网格得到的电场的近似解; E_{ref} 是计算电场的参考解; $H_{h,p}$ 是求解空间范围内的电场近似解的集合; K 是选择的一个初始网格, $K_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是由 K 细化为多个子单元; $ERR_i (i=1, 2, \dots, n)$ 指每个子单元误差, ERR 是根据子单元误差求解的全局误差。

3 模拟算例

3.1 无限大均匀地层验证

随钻电磁波测井仪测量的幅值比和相位差数据与仪器附近的地层电导率存在着对应关系,因此用幅值比和相位差数据来表征地层的电导率。

随钻电磁波测井仪器如图2所示,发射线圈T的匝数为 n_T ,半径为 a_T ,其中通以交变电流 $I_T = I_0 e^{i\omega t}$;接收线圈 R_1 和 R_2 的匝数和半径相同,均为 n_R 和 a_R , R_1 和T的距离是 L_1 , R_2 和T的距离是 L_2 。由于 $L_1 \gg a_T$,为简化起见,把发射线圈看作磁偶极子处理。发射线圈T发射高频电磁波,经过地层到达接收线圈 R_1 和 R_2 ,并记录接收线圈间感应电动势的幅值比 E_{ATT} 和相位差 $\Delta\Phi$ 。这2个参数的优点为:一是幅值比和相位差为相对测量值,可以降低井眼和线圈尺寸的影响;二是无需去掉直耦信号,简化了仪器结构,降低了仪器实现的复杂程度。

根据式(4),计算得到均匀各向同性介质中接收线圈间幅度值和相位差的解析式:

$$E_{ATT} = 20 \lg \left| \frac{V_1}{V_2} \right| = 10 \{ \lg [(\alpha L_1)^2 + (1 + \beta L_1)^2] - \lg [(\alpha L_2)^2 + (1 + \beta L_2)^2] \} + 60(\lg L_2 - \lg L_1) + 8.686\beta(L_2 - L_1) \quad (17)$$

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = \alpha(L_1 - L_2) + \arctan \frac{1 + \beta L_1}{\alpha L_1} - \arctan \frac{1 + \beta L_2}{\alpha L_2} \quad (18)$$

地层模型1是不考虑井眼和钻铤存在条件下的无限大均质各向同性地层,参数设置如下:圆柱状地层半径为300 m,高为500 m(将该模型假设为无限大

地层模型),发射频率2 MHz,源距 L_1 为1.0 m, L_2 为1.2 m,地层电阻率为 $1 \Omega \cdot m$,相对磁导率设为1.0。均质单一地层利用hp-FEM算法的计算结果如图3

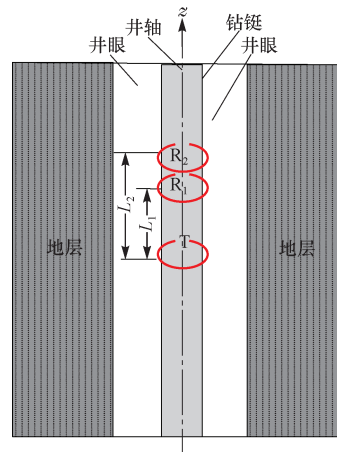


图2 随钻电磁波测井仪器模型

Fig. 2 Model of the electromagnetic LWD tool

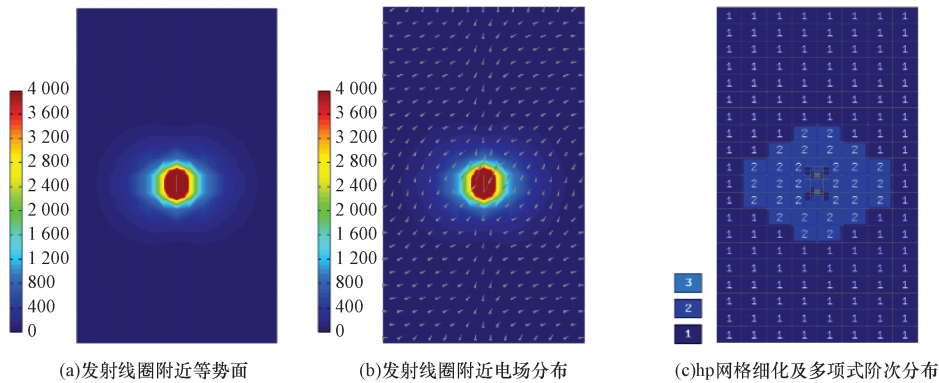


图3 均质单一地层基于hp-FEM算法模拟的结果

Fig. 3 Simulation result of a single homogeneous stratum based on hp-FEM

所示,显示了hp-FEM方法的网格划分和网格多项式阶次分布。从图3可以看出,均质地层中的电场分布对称,网格细化对称,一定程度上验证了该方法和程序的正确性和稳定性。

图4为均匀地层hp-FEM数值模拟结果相位差计算值与解析值^[13,18]的对比,两者能很好地吻合,进一步验证了算法的正确性。

由式(18)得到的解析值和由h-FEM、hp-FEM正演模拟得到的相位差计算值见表1,可以看出2种方法得到的计算值和解析值很接近,hp-FEM的相对误差比h-FEM小一个数量级,进一步验证了自适应hp-FEM

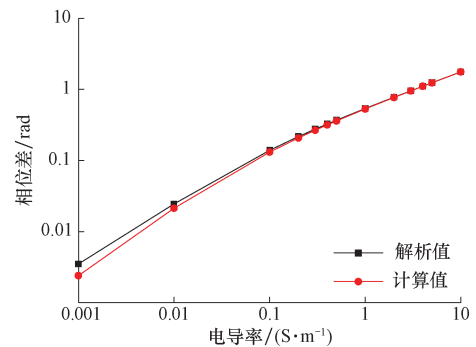


图4 均匀地层解析值与hp-FEM模拟计算值对比

Fig. 4 Comparison of the analytical value with the hp-FEM calculation value for the homogeneous layer

正演算法的准确性和可靠性。误差主要源于地层模型 的尺寸(虽然很大,但仍达不到无限大情况)。对比 2 种方法可以看出, hp-FEM 具有迭代次数更少、 计算精度高、网格剖分少和计算速度快等优点,因此 hp-FEM 可以在随钻电磁波测井正演模拟过程中 应用。

表 1 均质单-地层相位差 h-FEM 和 hp-FEM 模拟计算结果 对比

Table 1 Simulation results of single homogeneous formation based on h-FEM/hp-FEM

方法	迭代 次数	计算值/ dB	解析值/ dB	相对误 差, %	计算时 间/s	网格划 分数
hp-FEM	3	0.539 65	0.539 9	0.046 3	3.75	17442
h-FEM	5	0.538 70	0.539 9	0.222 0	5.26	26 706

3.2 视电导率曲线转化

采用式(17)和式(18),对无限大均质地层计算 随钻电磁波测井仪器响应幅值比和相位差电导率的 转换关系。考虑发射频率 400 kHz 和 2 MHz,幅值 比和相位差主要反映地层电导率的变化,故此处假 设地层介电常数为常数。

根据 hp-FEM 算法数值正演结果,在 2 MHz 和 400 kHz 发射频率下,地层无倾斜,源距 L_1 为 1.0 m, L_2 为 1.2 m,相对磁导率为 1.0 的条件下, 相位差和幅值比在均匀介质中随电导率的变化关 系如图 5 所示。从图 5 可以看出,在较低的电导率 情况下,相位差和幅度比数值相应较小;相同的电 导率条件下,2 MHz 频率下的相位差比 400 kHz 的 数值大,2 条曲线整体变化趋势相同。另外,相 位差和地层电导率在双对数坐标下具有比较好的 线性关系,幅值比刻度曲线也有类似特点,因此, 可用线性插值的方法对相位差和幅值比进行视电 导率的转换。

3.3 简单模型算例

地层模型 2 由 6 层层状水平地层组成,每个地 层的厚度均为 5 m,电阻率依次为 2, 10, 1, 25, 1 和 15 $\Omega \cdot \text{m}$ 。井眼半径 0.1 m,钻井液电阻率为 0.1 $\Omega \cdot \text{m}$ 。随钻测井仪器参数设定如下:接收线圈 间距 0.2 m,相对磁导率为 1,仪器源距分别为 0.5 m 和 1.0 m,发射频率分别为 400 kHz 和 2 MHz。按照 上述地层模型正演,得到其对应的相位差曲线和幅值 比曲线,及其刻度对应的电阻率曲线,如图 6 所示。

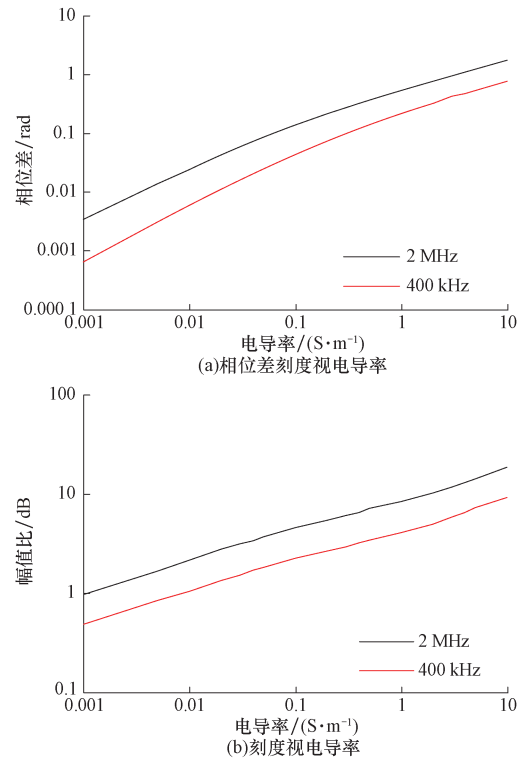


图 5 均匀地层相位差和幅值比刻度视电导率插值

Fig. 5 Apparent conductivity interpolation of phase difference and amplitude ratio scale in the homogeneous formation model

从图 6 可以看出,相对于源距因素,频率对相位 差的影响较大;2 MHz 下的相位差的变化范围明显 大于 400 kHz 下的相位差变化范围,而且在同一深 度时,2 MHz 对应的 2 种相位差的数值比较大。从 图 6(c)可以看出,仪器源距越小,幅值比越大;在 两地层的交界面处,相位差曲线存在明显的极化角 现象;而且极化角处对应的地层深度与所设模型的 地层界面相近;在高阻层的分界面深度为 5, 15 和 25 m 处,仪器源距越小,尖角现象越明显。幅值 比曲线(见图 6(c))与相位差曲线有相似的结果,在 由低阻层进入高阻层时,幅值比曲线极化角现象十 分突出,说明幅值比曲线在确定高阻含油地层具有 较好的参考价值。

4 影响因素分析

采用控制变量法研究源距和频率对随钻电磁波 测井仪器响应的影响。模型参数为:地层厚度 12 m (下围岩厚度为 4 m,目的层厚度为 3 m,上围岩厚 度为 5 m),均为水平层状地层,且电阻率依次为 1, 10 和 1 $\Omega \cdot \text{m}$,相对磁导率为 1;井眼半径为 0.1 m,

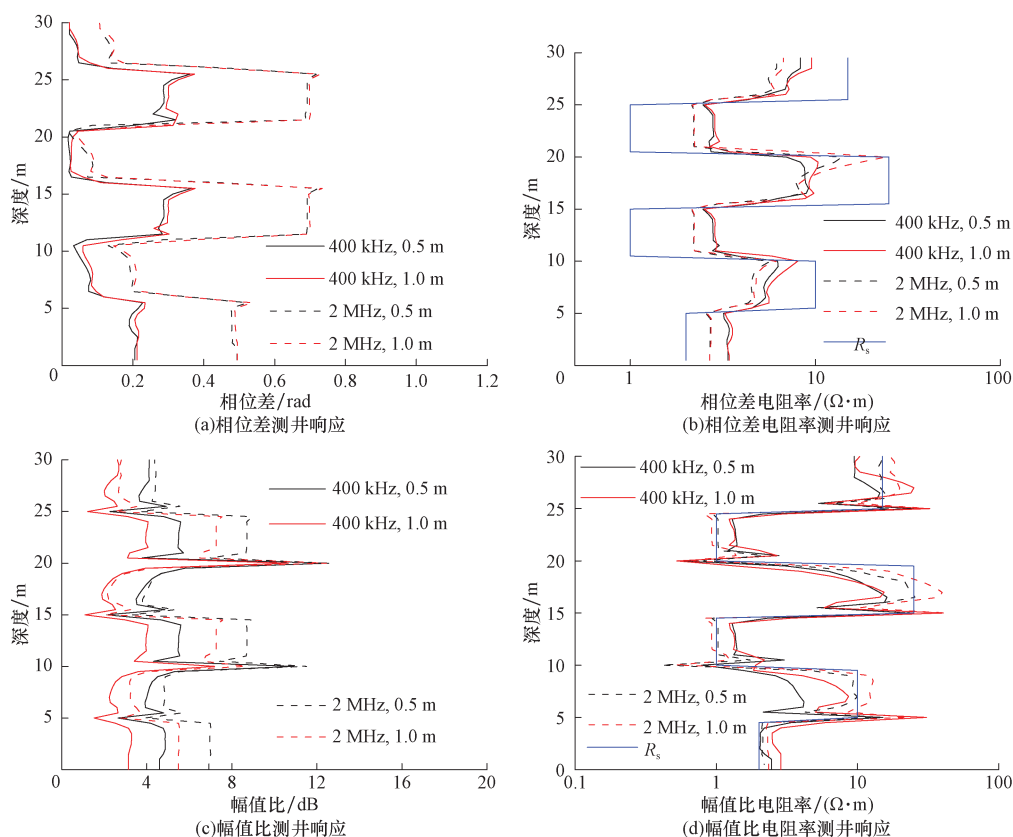


图6 6层水平地层测井响应

Fig. 6 Logging responses of 6-layer horizontal formations

设钻井液电阻率为 $0.1 \Omega \cdot \text{m}$; 接收线圈间距为 0.2 m , 发射电流为 0.005 A ; 迭代误差为 2% 。

4.1 仪器源距因素

设仪器发射频率 2 MHz , 源距依次设为 $0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25$ 和 1.50 m , 考察不同源距条件下数值模拟得到的测井响应曲线, 分析源距对随钻电阻率电磁波仪器响应的影响。

在保持仪器间距和发射频率固定的情况下, 不同仪器源距条件下得到的相位差和幅值比曲线如图7所示。

从图7(b)可以看出: 源距对幅值比曲线影响较大; 源距越小, 幅值比越大; 当仪器穿越不同地层界面时, 源距越小, 极化角越明显; 在高阻地层界面分界面处, 仪器的源距越小, 幅值比曲线的分辨能力越强。

然而, 相对于幅值比曲线, 相位差曲线能更好地反映地层界面的响应效果, 更能反映地层模型的分层情况。从图7(a)可以看出, 源距越小, 相位差越大; 在两地层交界面处, 仪器源距越小, 极化角越明显。由低阻层过渡到高阻层时, 相位差曲

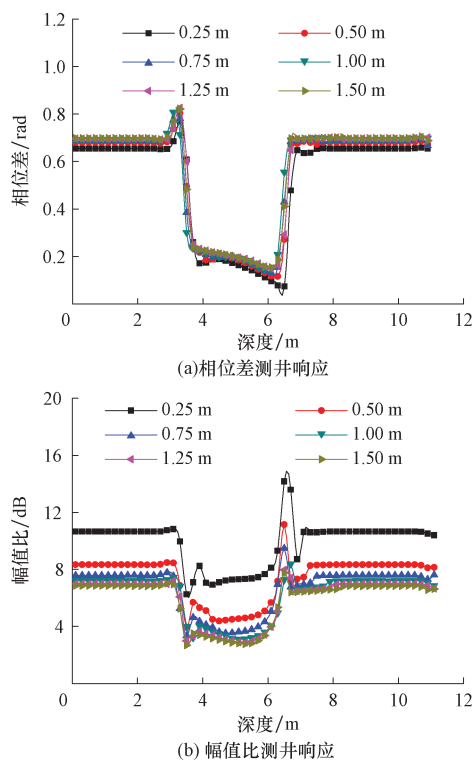


图7 不同源距的测井响应

Fig. 7 Logging responses under different source spacings

线出现了明显的极化角,而由高阻层过渡到低阻层时,虽然也有极化角现象,但是程度不大。因此仪器在通过低阻地层到达高阻地层时,对地层的分辨能力更强。

4.2 仪器发射频率因素

设线圈源距为 1.0 m,发射频率依次为 400 kHz、1 MHz 和 2 MHz,考察不同发射频率条件下数值模拟得到的测井响应曲线,分析源距对于随钻电磁波仪器响应的影响。

在仪器源距保持固定的情况下,不同发射频率条件下得到的相位差和幅值比曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出,相对于幅值比曲线,相位差曲线在反映地层界面信息方面的效果明显较好,能更清楚地反映地层模型的分层情况。

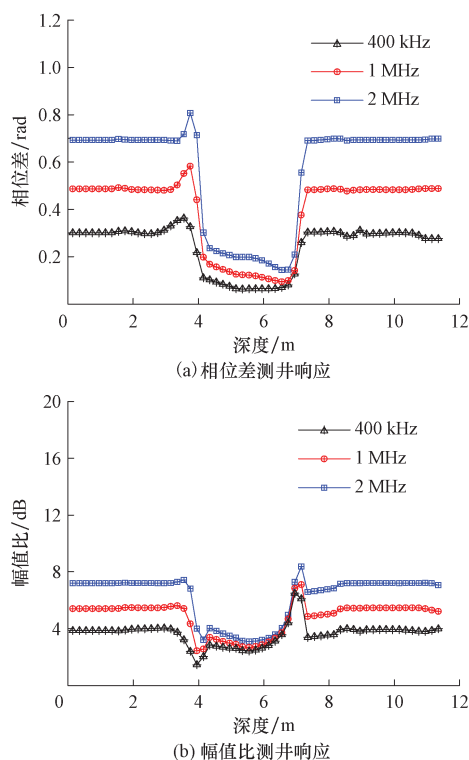


图 8 不同频率的测井响应

Fig. 8 Logging responses under different frequencies

从图 8(a)可以看出,仪器频率越大,相位差变化幅度越大,得到的相位差也越大;在两地层交界面处,相位差曲线存在明显的极化角,极化角对应的地层深度与所设模型的地层界面相近;在高阻层的分界面处,2 MHz 对应的相位差曲线越大,极化角现象也越明显。由低阻层过渡到高阻层时,相位差曲线中出现了一个明显的极化角,而由高阻层过渡到

低阻层时,极化角不大,因此仪器在由低阻地层穿过高阻地层时,地层分辨能力更强。图 8(b)的幅值比曲线与相位差曲线有相似的结果。

5 结 论

1) 采用自适应 hp-FEM 算法建立随钻电磁波测井仪器响应数值模拟模型,在保证计算精度的前提下对自由度、计算时间以及迭代次数等参数进行了计算,得到了幅值比和相位差响应曲线。

2) 在不同的仪器结构和地质条件下,测井响应值会有很大的变化;相位差曲线能更好地反映地层界面的响应效果,更趋向于地层模型的分层情况;仪器源距越小,发射频率越高,地层分界面处极值角越明显,分辨能力更强;仪器在由低阻穿过高阻时,极化角更为明显,可以为地质导向决策提供信息。

3) 基于 hp-FEM 的数值模拟能够根据地层模型的实际情况和误差指示自动选择合适的细化方式和计算策略,通过减小局部误差来提高计算精度,降低了计算次数,提高了有限元计算分析的效率及可靠性。

参 考 文 献

References

- [1] 张辛耘,王敬农,郭彦军. 随钻测井技术进展和发展趋势[J]. 测井技术,2006,30(1):10-15.
Zhang Xinyun, Wang Jingnong, Guo Yanjun. Advances and trends in logging while drilling technology[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(1): 10-15.
- [2] 苏义脑,窦修荣. 随钻测量、随钻测井与录井工具[J]. 石油钻采工艺,2005,27(1):74-78,85.
Su Yinao, Dou Xiurong. Measurement while drilling, logging while drilling and logging instrument[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(1): 74-78, 85.
- [3] 杨锦舟,林楠,张海花,等. 相对介电常数对电磁波电阻率测量值的影响及校正方法[J]. 石油钻探技术,2009,37(1):29-33.
Yang Jinzhou, Lin Nan, Zhang Haihua, et al. The impact of dielectric on MWD array electromagnetic wave resistivity tools and correction method[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(1): 29-33.
- [4] 闫振来,韩来聚,李作会,等. 胜利油田水平井地质导向钻井技术[J]. 石油钻探技术,2008,36(1):4-8.
Yan Zhenlai, Han Laiju, Li Zuohui, et al. Geo-Steering drilling technique of horizontal wells in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(1): 4-8.
- [5] 叶志,樊洪海,纪荣艺,等. 基于随钻测井资料的地层孔隙压力监测方法及应用[J]. 石油钻探技术,2014,42(2):41-45.
Ye Zhi, Fan Honghai, Ji Rongyi, et al. Investigation and appli-

- cation of pore pressure monitoring method based on LWD data [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 41-45.
- [6] Shen L C. Theory of a coil-type resistivity sensor for MWD application[J]. The Log Analyst, 1991, 32(5): 603-611.
- [7] Zhou Q, Hilliker D J. MWD resistivity tool response in a layered medium[J]. Geophysics, 1991, 56(11): 1738-1748.
- [8] Lovell J R. Finite element methods in resistivity logging[D]. The Netherlands: Delft University of Technology, 1993.
- [9] Wang T, Sigorelli J. Finite difference modeling of electromagnetic tool response for logging drilling[J]. Geophysics, 2004, 69(1): 152-160.
- [10] Liu Qinghuo, Chew Wengcho. A CG-FFHT method for the scattering solution of axisymmetric inhomogeneous media [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1993, 6(2): 101-104.
- [11] 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.
- [12] 魏宝君, 张克, 欧永峰, 等. 采用混合法和递推矩阵算法模拟层状介质中随钻电磁波电阻率测量仪器的响应[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(1): 61-69.
- Wei Baojun, Zhang Ke, Ou Yongfeng, et al. Simulating electromagnetic wave resistivity MWD tool's response in stratified media using hybrid method and recursive matrix algorithm [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2013, 37(1): 61-69.
- [13] Demkowicz L, Vardapetyan L. Modeling of electro-magnetic absorption scattering problems using hp-adaptive finite elements[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, 152(2): 103-124.
- [14] Pardo D, Demkowicz L, Torres V C. A self-adaptive goal-oriented hp finite element method with electromagnetic applications. Part I: Electrodynamics [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007, 196: 3585-3597.
- [15] 陈晓晖, 刘得军, 马中华. 基于高精度自适应 hp-FEM 的随钻电阻率测井电场数值模拟[J]. 计算物理, 2011, 28(1): 50-56.
- Chen Xiaohui, Liu Dejun, Ma Zhonghua. Numerical simulation of electric field in resistivity LWD using high accuracy self-adaptive hp-FEM[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2011, 28(1): 50-56.
- [16] 李辉, 刘得军, 刘彦昌, 等. 自适应 hp-FEM 在随钻电阻率测井仪器响应数值模拟中的应用[J]. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2787-2797.
- Li Hui, Liu Dejun, Liu Yanchang, et al. Application of self-adaptive hp-FEM in numerical simulation of resistivity logging-while-drilling [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(8): 2787-2797.
- [17] 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.
- [18] Babuska I, Suri Manil. The h-p version of the finite element method with quasi-uniform meshes[J]. Mathematical Modeling and Numerical Analysis, 1987, 21(2): 199-238.
- [19] 冯硕, 刘得军, 张颖颖, 等. 基于 COMSOL 的井地电阻率正演研究[J]. 断块油气田, 2013, 20(5): 589-592.
- Feng Shuo, Liu Dejun, Zhang Yingying, et al. Study on borehole-to-ground resistivity forward modeling based on COMSOL [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20(5): 589-592.

[编辑 滕春鸣]

单井蒸汽辅助重力泄油新技术

某国际石油公司研究发展了单井蒸汽辅助重力泄油 (steam assisted gravity drainage, SAGD) 技术。该技术采用了特殊设计的六翼套管, 可膨胀形成均匀分布的 6 个槽, 压裂后注入含粒径 $1\ 700\sim 850\ \mu\text{m}$ 支撑剂的凝胶, 形成与油藏接触的 6 个均匀分布的压裂面, 再从油藏顶部注入蒸汽, 油从油藏底部的泄油通道流回井底, 从而达到开采目的。

该单井 SAGD 技术具有以下特点: 1) 与水平井 SAGD 技术相比, 能在很低的压力下操作; 2) 多方位支撑面使油藏的各向异性最小化; 3) 充分利用整个油藏垂直高度的重力, 蒸汽压力梯度适宜; 4) 效率高, 在蒸汽注入启动后立即开始生产; 5) 形成的多维垂直发射状压裂支撑面, 使蒸汽分布更加均匀; 6) 对于浅层油藏, 需要注入低压蒸汽或溶剂, 多维结构是理想的选择, 可以瞬时使储层接触面积达到最大。

试验研究表明, 在 35 m 厚的某含沥青油藏中, 5 m 厚的渗透性区域应用了该单井 SAGD 技术, 预估净现值是传统 SAGD 技术的 6 倍。

[供稿 思 娜]