第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0022-07

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:郭　晨, 陈晓亮, 卢圣鹏. 基于三维有限差分方法的三分量感应测井正演模拟[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 22—28
Guo Chen, Chen Xiaoliang, Lu Shengpeng. Forward modeling for three-component induction logging using 3D finite difference method[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 22—28

基于三维有限差分方法的三分量感应测井正演模拟

郭　晨　陈晓亮　卢圣鹏
(长安大学电磁探测技术研究所,西安 710054)

摘　要　在三分量感应测井中,正演模拟是研究测井响应特征和资料处理的必要基础,其能够为快速有效分析地层物理特性提供依据,从而帮助找到最佳钻井区域。为系统考察多种复杂地层模型下的三分量感应测井的响应特征,从 Maxwell 电磁方程组出发,利用交错网格有限差分法推导三维频域电磁响应的差分计算格式。针对水平地层和倾斜地层等复杂模型中的三分量感应测井响应进行数值计算,总结发现三维感应测井工具对复杂地层具有很强的探测能力,且纵向磁场分量比水平磁场分量具有更高的纵向分辨率,对于地层变化更加敏感。正演模拟及分析结果可为三分量感应测井仪器参数的优化设计、资料处理等工作提供重要的理论基础及参考依据。

关键词　三分量感应测井　　电磁方程组　　交错网格　　有限差分法
中图法分类号　P631;　　**文献标志码**　A

三分量感应测井的数值模拟本质上是求解频率空间域中三维方程的电磁场响应,三维数值模拟技术分为有限差分(FDM)、有限元(FEM)等。三维有限差分方法是将求解域划分为差分网格,利用有限个网格节点来代替连续的求解域,该方法是一种将微分问题转变为代数问题的近似数值解法,由于该方法数学概念直观,表达简单,是发展较早并且比较成熟的数值方法,因此,有限差分方法成为勘探中应用最为广泛的数值方法。Zhdanov[1]使用基于耦合势的有限差分方法研究三维电磁散射问题。沈金松[2]、汪功礼等[3]用交错网格有限差分方法,将电磁基本方程组离散化,实现三维频域电磁场响应的数值模拟。用简单的三层均匀各向同性模型,考察了算法程序的正确性,沈金松[4]又研究了传统的感应测井仪器在测井时得到的水平电阻率小,由此得到的地层含水饱和度偏高的问题。用多层模型计算检验交错网格有限差分算法程序,利用三层模型数值模拟分析不同磁场分量对各向异性介质的响应特征,但没有进一步对复杂的有井眼和侵入影响的倾斜地层及任意各向异性模型计算,王昌学等[5]利用 YEE 氏有限差分方法推导了垂直井中的多分量感应测井响应,并用所推导的算法考察了三层、含垂直井条件下的电磁场响应规律,Hou 等[6]用基于势函数理论的有限差分算法优化了网格技术,提高了正演计算的计算效率。但是,目前没有一个全面的不同地层模型下三分量感应测井响应特征参考。因此,本文开发了算法程序,系统考察多种复杂地层模型下三分量感应测井的磁场响应特征,深入研究不同参数变化对三分量感应测井磁场响应的影响,并总结分析三分量感应测井仪器在地层中的探测规律,为三分量感应测井仪器参数的优化设计以及测井数据解释提供重要的参考依据。

2018 年 6 月 30 日收到　　自然科学基金(41404095)和中央高校基本科研业务专项(310824173702)资助
第一作者简介:郭　晨,女,副教授,博士。研究方向:岩石物理。E-mail:chanekwok@gmail.com。

1　三维频域有限差分的离散方法

1.1　基本原理推导

忽略井孔以及套管的影响,从微分形式的 Maxwell 方程组出发:

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \tag{3}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho \tag{4}$$

存在如式(5)的本构关系:

$$\begin{cases} \boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{B} = \mu(\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M}) \end{cases} \tag{5}$$

式中,$\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{H}$、$\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{M}$ 分别为电场强度、磁场强度、电位移矢量、磁感应强度和磁流;$\boldsymbol{J}$ 为电流密度,电场

和磁场是空间位置和时间的函数,ε 为媒质的介电常数;$\mu=4\pi\times10^{-7}\mathrm{H\cdot m^{-1}}$ 为真空中磁导率;σ 为地层电导率。在各向同性介质中,电导率以及磁导率等特性参数都是标量,然而在各向异性介质中则为张量;在均匀的媒质中,特性参数都是常量,然而在非均匀的介质中,特性参数则随空间位置的变化而变化[7]。一个一般物理量,对其进行 Fourier 变换,即可以看作无数个频率的叠加,先计算一个频率,然后把所有频率量进行叠加即可得到解,由于要将 Maxwell 方程组应用在地层中并考虑趋肤深度,所以选用的频率较低,一般介于 1 ~ 100 kHz 之间,此时电位移矢量 D 远远大于传导电流,因此可忽略计算。所以可以得到频域 Maxwell 方程组为

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=\mathrm{i}\omega\mu(\boldsymbol{H}+\boldsymbol{M}) \tag{6}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=\sigma\boldsymbol{E} \tag{7}$$

将式(7)代入式(6),可以得到:

$$\left[\nabla\times\left(\frac{1}{\sigma}\nabla\times\right)-\mathrm{i}\omega\mu\right]\boldsymbol{H}=\mathrm{i}\omega\mu\boldsymbol{M} \tag{8}$$

将式(8)用矩阵表示,以便下一步在 YEE 氏网格中求解方程,其中令 $\boldsymbol{L}=\nabla\times\left(\frac{1}{\sigma}\nabla\times\right)$,可以得到:

$$[\boldsymbol{L}-\mathrm{i}\omega\mu]\boldsymbol{H}=\mathrm{i}\omega\mu\boldsymbol{M} \tag{9}$$

式(9)用来表征在系统中接收的磁场响应,通过这个方程可以将电导率 σ 独立出来。选用吸收边界条件,减少反射波对磁场响应的干扰:

$$n(\nabla\times\boldsymbol{E})-\mathrm{j}nk(\boldsymbol{E}n)=0 \tag{10}$$

式(10)中,$\boldsymbol{E}$ 为电场矢量,n 为规范化的边界法向量,k 为波数,j 为虚数。

为求出磁场响应,首先必须先定义算子 ∇:

$$\nabla\boldsymbol{A}_{i,j,k}=\begin{bmatrix}\dfrac{A_{xi+1,j,k}-A_{xi+1,j,k}}{\Delta x_i}\\[2ex]\dfrac{A_{yi,j+1,k}-A_{yi,j+1,k}}{\Delta y_j}\\[2ex]\dfrac{A_{zi,j,k+1}-A_{zi,j,k+1}}{\Delta z_k}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_{xi,j,k}\\\boldsymbol{C}_{yi,j,k}\\\boldsymbol{C}_{zi,j,k}\end{bmatrix} \tag{11}$$

整理后可得 x 方向的差分算子:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{LH}_{xi,j,k}=\nabla\times\left(\frac{1}{\sigma}\nabla\times\boldsymbol{H}_{xi,j,k}\right)=\\-\frac{1}{\sigma_{i,j,k}}\frac{1}{\Delta y_{j-1}\Delta y_j}\boldsymbol{H}_{xi,j-1,k}-\frac{1}{\sigma_{i,j,k}}\frac{1}{\Delta z_{k-1}\Delta z_k}\boldsymbol{H}_{xi,j,k-1}+\\\left[\frac{1}{\Delta y_j}\left(\frac{1}{\sigma_{i,j+1,k}}\frac{1}{\Delta y_j}+\frac{1}{\sigma_{i,j,k}}\frac{1}{\Delta y_{j-1}}\right)+\right.\\\left.\frac{1}{\Delta z_k}\left(\frac{1}{\sigma_{i,j,k+1}}\frac{1}{\Delta z_k}+\frac{1}{\sigma_{i,j,k}}\frac{1}{\Delta z_{k-1}}\right)\right]\boldsymbol{H}_{xi,j,k}-\\\frac{1}{\sigma_{i,j,k+1}}\frac{1}{\Delta z_k\Delta z_k}\boldsymbol{H}_{xi,j,k+1}-\frac{1}{\sigma_{i,j+1,k}}\frac{1}{\Delta y_j\Delta y_j}\boldsymbol{H}_{xi,j+1,k}+\\\frac{1}{\sigma_{i,j+1,k}}\frac{1}{\Delta x_{i-1}\Delta y_j}(\boldsymbol{H}_{yi,j+1,k}-\boldsymbol{H}_{yi-1,j+1,k})-\\\frac{1}{\sigma_{i,j,k}}\frac{1}{\Delta x_{i-1}\Delta y_j}(\boldsymbol{H}_{yi,j,k}-\boldsymbol{H}_{yi-1,j,k})+\\\frac{1}{\sigma_{i,j,k+1}}\frac{1}{\Delta x_{i-1}\Delta z_k}(\boldsymbol{H}_{zi,j,k+1}-\boldsymbol{H}_{zi-1,j,k+1})-\\\frac{1}{\sigma_{i,j,k}}\frac{1}{\Delta x_{i-1}\Delta z_k}(\boldsymbol{H}_{zi,j,k}-\boldsymbol{H}_{zi-1,j,k})\end{aligned} \tag{12}$$

根据磁场分量 x 方向的推导结果,可以看出在某一个 i、j、k 网格中,磁场分量 $\boldsymbol{H}_{x\,i,j,k}$ 只与本身和周围的共 13 个网格的各个磁场分量有关,同理可以得到 y、z 方向的差分算子。

1.2　网格剖分

由于模型的复杂性和多样性,有限差分方法的实现必须要将计算区域剖分为若干六面体网格,然后分区域进行剖分。采用一组六面体片构成的封闭空间来包围复杂几何形状目标。所以在做差分算法的时候必须对研究的模型进行网格剖分,所有的研究模型都可以包含很多层,每一层都有属于自身的信息,包括厚度、电导率等。YEE 氏交错网格差分方法将离散的磁场分量定义在网格面的中心,离散的电场分量定义在网格棱的中点,这样规定离散变量的位置,一方面符合法拉第提出的电磁场右手电磁感应螺旋法则,另一方面能保证离散电场切向分量的连续性[8],如图 1 所示。

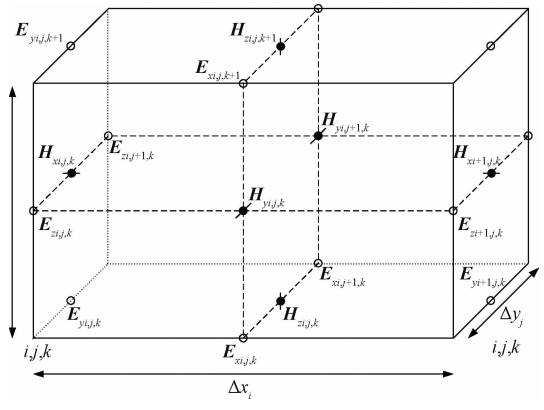


图 1　YEE 氏交错网格离散化

Fig. 1　YEE staggered-grid discretization

首先规定在研究区域内 X、Y、Z 轴上三个方向的网格索引规则,假设在 X、Y、Z 方向上分别有 i、j、k 个网格,那么可以将每个整数网格节点标记为 $x_1<x_2<\cdots<x_i<\cdots<x_n$ 此时 $i=1,2,\cdots,n$,在每个网格的中点称为半整数节点,在 X 方向上共有 $n-1$ 个半整数节点,可标记为 $x_{3/2}<x_{5/2}<\cdots<x_{i-1/2}<\cdots<x_{n-1/2}$ 此时 $i=2,3,\cdots,n$。所以在 X 轴方向上,就可以统一表示出网格的间距,表示为

$$\Delta x = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}, \quad i = 2,3,\cdots,n \tag{13}$$

同理,在 Y 轴、Z 轴上的网格整数节点、半整数节点和网格的间距也可如此表示。所以根据每个网格体中心是否有场量,以及场量是离散的电场还是离散的磁场,可以将网格分成四类,以便有限差分方法的实现:

$$V_{i,j,k} = [x_{i-1/2}, x_{i+1/2}] * [y_{j-1/2}, y_{j+1/2}] * [z_{k-1/2}, z_{k+1/2}] = \Delta x_i * \Delta y_j * \Delta z_k \tag{14}$$

$$V_{i+1,j,k} = [x_i, x_{i+1}] * [y_{j-1/2}, y_{j+1/2}] * [z_{k-1/2}, z_{k+1/2}] = \Delta x_{i+1/2} * \Delta y_j * \Delta z_k \tag{15}$$

$$V_{i,j+1/2,k} = [x_{i-1/2}, x_{i+1/2}] * [y_j, y_{j+1}] * [z_{k-1/2}, z_{k+1/2}] = \Delta x_i * \Delta y_{j+1/2} * \Delta z_k \tag{16}$$

$$V_{i,j,k+1/2} = [x_{i-1/2}, x_{i+1/2}] * [y_{j-1/2}, y_{j+1/2}] * [z_k, z_{k+1}] = \Delta x_i * \Delta y_j * \Delta z_{k+1/2} \tag{17}$$

式中,“$*$”表示卷积运算;$i = 2,3,\cdots,n$;$j = 2,3,\cdots,n$;$k = 2,3,\cdots,n$。

2 行压缩 LU 分解求解方程组

离散化后的电磁场求解问题最终都是归结为对超大型稀疏矩阵方程的求解问题,一般来说稀疏矩阵的压缩存储通常针对的是直接法求解,因为传统的迭代法求解方程中只需要保存稀疏矩阵和计算时需要的一些少量的向量,同时在耗费计算时间上一般是一些简单的稠密向量和稀疏矩阵之间的乘法操作。行压缩的基本方法是构建三个一维数组。第一个数组用来储存稀疏矩阵的非零元素,按照行的顺序,逐一储存非零元素的值;第二个数组用来储存稀疏矩阵非零元素所在列的索引;第三个数组用来储存稀疏矩阵每一行的第一个非零元素的值;因此第二个和第三个数组只需设置为整数型数组[9],将基础向量进行行压缩储存后用高斯消元法做 LU 分解[10]。

3 算法验证和模型分析

3.1 数据对比论证

为了考察 FDM 算法的精度和效率,以均匀各向同性均匀全空间介质地层模型为例,采用表 1 模型 1 参数,把解析解和数值算法的结果进行对比[11—15],如图 2 所示。三轴测井仪器与地层重合也为垂直,地层电导率为 1 $S \cdot m^{-1}$,层厚无限大,测井仪器采用三线圈系多分量测井仪器,发射线圈系和接收线圈系收发距为 1 m,激励源采用磁偶极子,工作频率均为 20.0 kHz,整个线圈系沿 Z 轴上下移动。运用 COMSOL Multiphysics 进行模型仿真,图 3 所示为 COMSOL 所建模型及磁偶源在均匀全空间流线示意图。

表 1 不同模型参数

Table 1 Different model parameters

模型	层数	层厚度/m	电导率/($S \cdot m^{-1}$)
模型 1	1	∞	1
模型 2	3	+∞,1,−∞	$1, 10^{-5}, 1$
模型 3	2	+∞,−∞	$1, 10^{-5}$

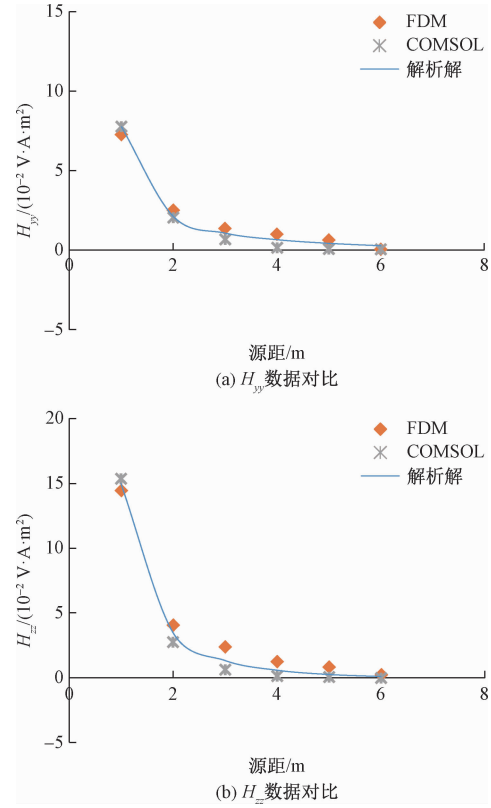
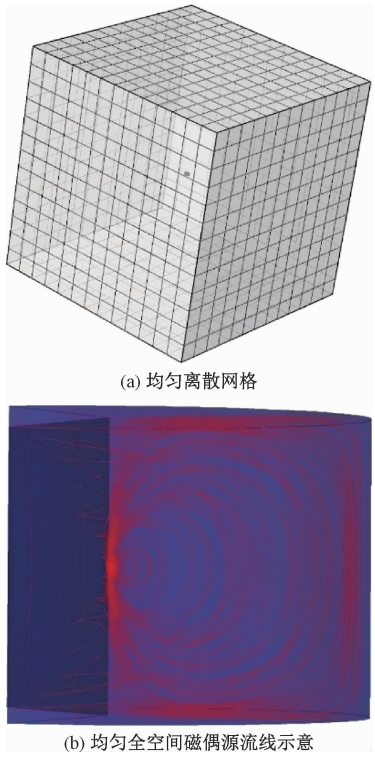


图 2 FDM 与解析解、COMSOL 解对比

Fig. 2 Comparison of FDM with analytic solutions and COSMOL solutions

从图 2 中曲线可以看出,提出的 FDM 算法与软件仿真值、解析解吻合,但是在源距为 3 m 后磁场计算误差较大,误差可能原因包括:①FDM 方法在网格剖分上由于受计算机内存和性能影响不能做到无限小,导致一定的误差;②由于数值方法建模不能按照实际情况来建立无限厚度层的模型,研究区域有一定的范围,只能在边界上添加吸收边界,并且根据趋肤效应来计算模型大小,这也会导致一部分误差,不过从图 2 中可以看出,曲线大部分吻合较好,平均相对误差低于 8%。全三维数值模拟计算法与解析算法相比,无论从计算精度上,还是计算效率上,纯数值算法都不能与解析算法相比,但基于 FDM 的压缩 LU 分解算法可以计算出不具有对称性且比较复杂的三维测井模型的响应,这是解析算法所不能实现的。



(a) 均匀离散网格

(b) 均匀全空间磁偶源流线示意

图 3　COMSOL 所建模型

Fig. 3　The model build by COMSOL

3.2　地层中断层垂直位移对测井响应的影响

利用 FDM 方法分别对未断裂地层和发生垂直位移地层进行仿真,注意到的是地层在水平方向上分为沿着断裂层方向和垂直断裂层方向。因此,H_{xx} 与 H_{yy} 等将呈现各自不同的磁场特征响应。

采用模型 2 数据,结果如图 4 所示,磁偶源位于第二层上方 0.5 m 处,同时对比地层是否发生断裂位移和三个方向接收到的磁场响应可以得到:①在 TI(水平层状各向同性)地层中,地层发生向上位移断裂不对平行于断裂层的磁场分量 H_{xx} 有所影响,H_{xx} 不随着地层断裂位移而变化;②从变化量上比较,H_{zz} 与 H_{yy} 变化量相当,可得:在地层发生垂直断裂时不会对磁场的衰减速度产生影响,磁场仍旧呈缓慢衰减趋势;③在垂直源距上接收到的磁场分量 H_{yy} 和 H_{zz} 随着 TI 地层发生断裂有较为明显的变化。在同一位置上当地层发生向上位移断裂的时接收到的 H_{yy} 越大,而接收到的 H_{zz} 越小,随着源距变大,变化量逐渐变小重合,最终在远离激励源距离较远时衰减为 0。

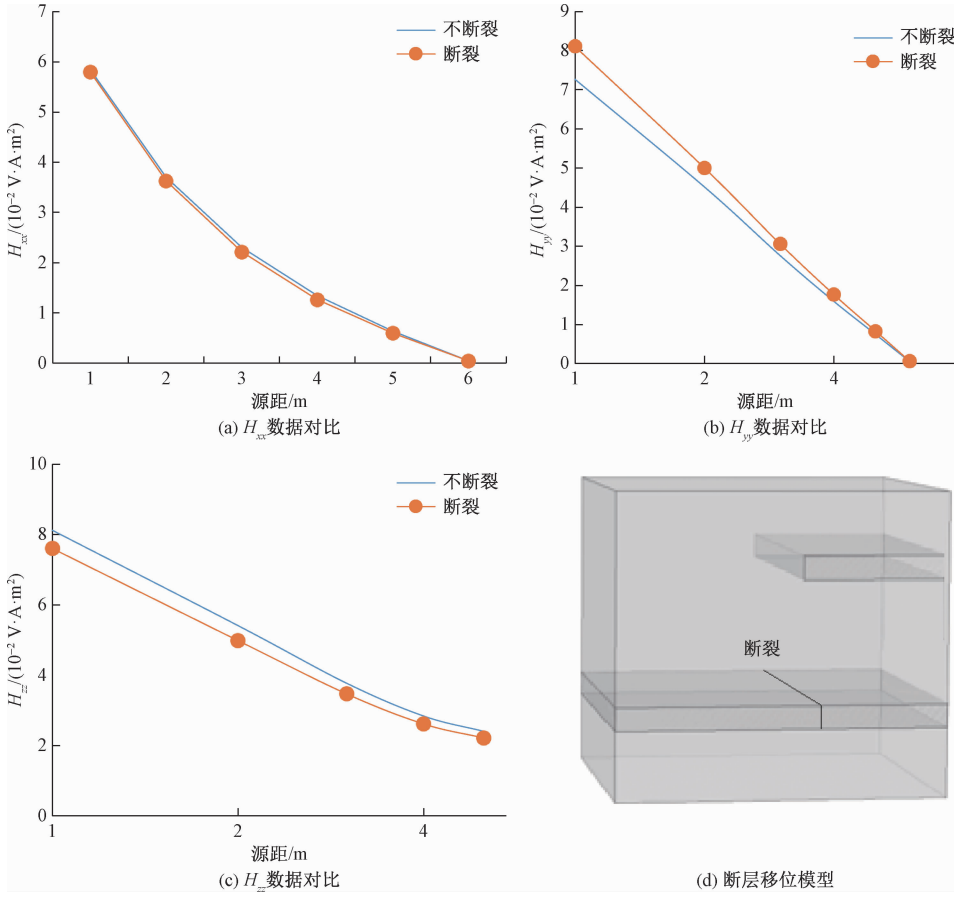


图 4　未断裂地层和发生垂直位移地层的磁场响应

Fig. 4　Magnetic field response of the not fracture formation and the vertical displacement's formation

3.3 垂直十字形裂缝对测井响应的影响

在 FDM 建模过程中,将模型地层等效设置为无限大,裂缝设置在模型正中央,背景电导率设置为 1 S·m^{-1}。裂缝中充满高阻态泥浆,以电导率设置为 0.001 S·m^{-1}为例,十字形裂缝在 *XOZ*、*YOZ* 平面上向外延伸,建模测试了裂缝长度 *L* 分别是 3、5、7、9、11 m 情况下的磁场响应,得到一些规律[11],如图 5 所示。

当电阻率和其他的影响因子保持不变时,随着源距的增大,三个方向的磁场强度均呈现逐渐下滑趋势,也表明距离越远电磁波在地层中传播损耗越大。当裂缝长度 *L* 变大时,横向磁场 *X* 和 *Y* 方向上的磁场响应 H_{xx}、H_{yy}均有一定程度的起伏,但变化甚微,这表明在横向方向上磁场响应基本不受到横向上的裂缝长度 *L* 的影响;纵向磁场响应 H_{zz}随着裂缝长度 *L* 的变化有明显变化,当裂缝长度由 3 m 增加到 11 m 时,纵向磁场分量 H_{zz}随着裂缝的长度变长而变小。可以从变化幅度看出,当裂缝长度较短时,H_{zz}变化较大,当裂缝长度较长时 H_{zz}变化减弱。由此推断出:①三分量感应测井仪器在纵轴方向上进行测量地层时,横向磁场分量对地层裂缝变化不敏感;②在电阻率和其他影响因子保持不变时,纵向磁场分量 H_{zz}随着裂缝长度变长而变小;③在一定范围内,随着裂缝长度变长 H_{zz}的变化量减少,当裂缝趋于无限远时,H_{zz}响应也趋于稳定。

3.4 倾斜地层角度对测井响应的影响

采用模型 3,激励源是磁偶极子,磁偶极矩设置为 1,放置在模型的正中间,距离分层处 1 m 处。激励源与接收源放置在 *Z* 轴方向上,源距随沿着 *Z* 轴延伸。着重研究横向磁场 H_{xx}、H_{yy}和纵向磁场分量 H_{zz}等主要磁场分量随着倾斜角 α 的变化,结果如图 6所示。

同时对比不同的斜角 α 和三个方向接收到的磁场响应可以得到:①在倾斜地层中,地层倾斜角度的变化基本不对轴向磁场分量 H_{xx}有所影响,H_{xx}不随着地层倾斜角度的变化而变化;②在 *Z* 轴上接收到的磁场分量 H_{yy}和 H_{zz}随着高阻层的倾斜角变化有明显变

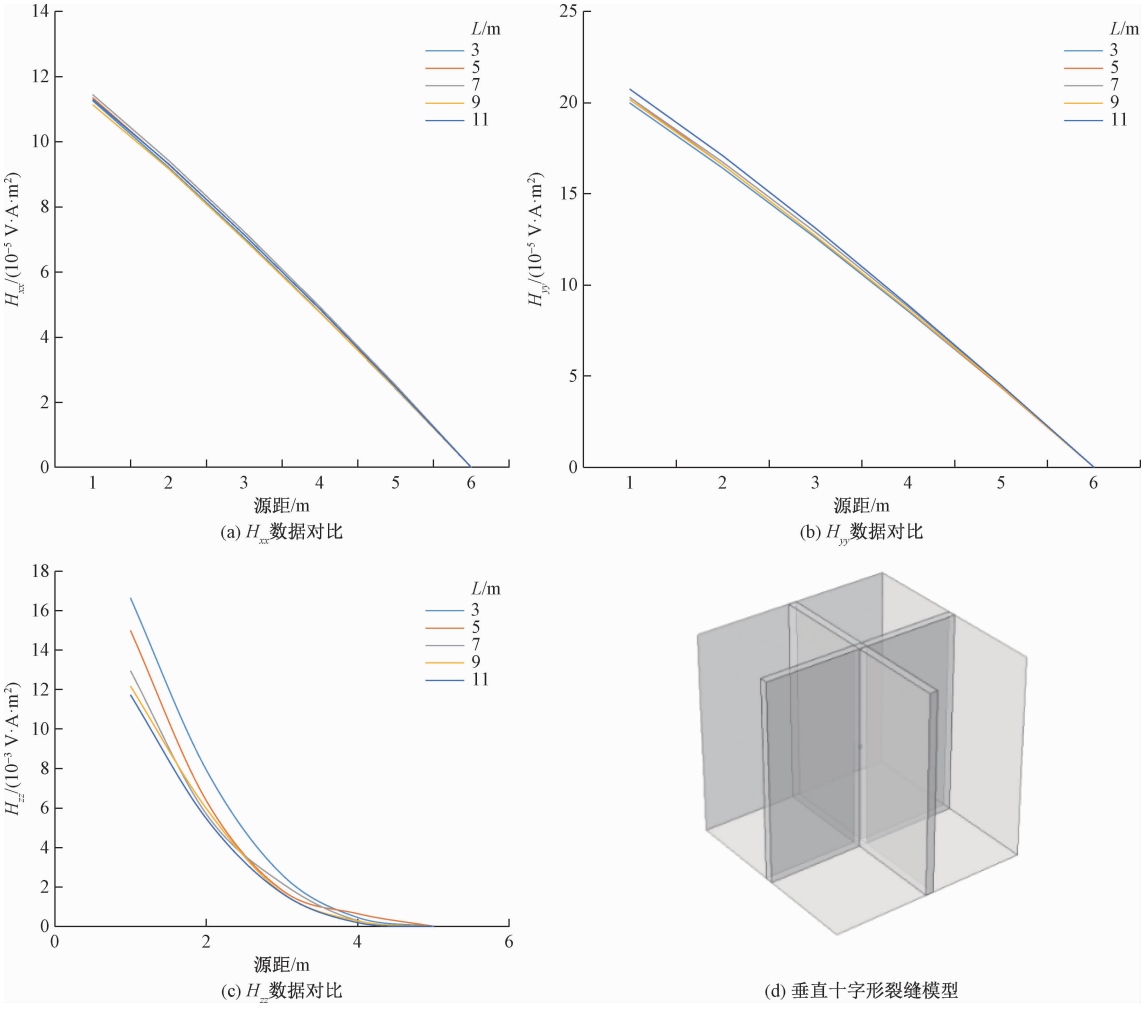


图 5 不同裂缝长度下的磁场响应

Fig. 5 The magnetic field response under the different crack length

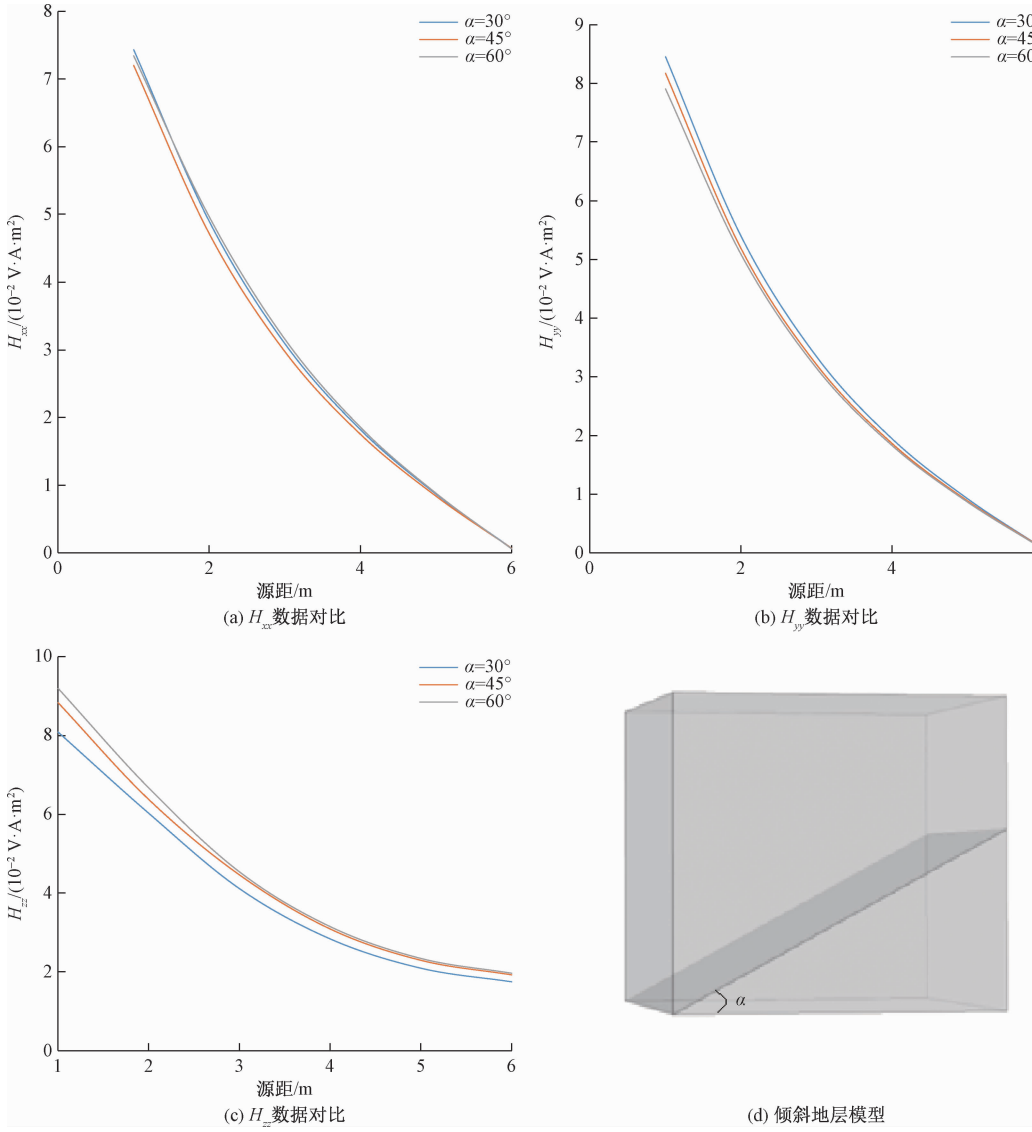


图 6　垂直源距随倾斜角 α 变化的响应

Fig. 6　Response of vertical source distance to the change of tilt angle α

化。在同一位置上随着高阻层倾角越大的时候接收到的 H_{yy} 越小,而接收到的 H_{zz} 越大,随着源距变大,变化量逐渐变小重合,最终在远离激励源距离较远时衰减为零;③从变化量上比较,相比 H_{yy},H_{zz} 变化更加明显,说明垂直源距上 Z 轴分量 H_{zz} 较比 H_{yy} 来说有更高的分辨率,H_{zz} 对高阻层的倾斜较为敏感。

4　结论

DFA 算法使用交错网格推导三维频域电磁响应的差分计算格式,并采用行压缩技术对大型稀疏矩阵的数据存储,开发计算程序并详细分析了复杂地形模型的三分量磁场响应特征,为三分量感应测井工具的应用提供理论基础。由正演模型分析,可以得到很多有意义的感应测井磁场响应结论。

(1)数值仿真结果表明,基于 YEE 氏交错网格有限差分法对 Maxwell 方程组的离散是可行的,并且十分有效,数值结果具有很高的精确度。

(2)通过对离散磁场方程组系数矩阵研究,发现该系数矩阵属于大型非对称系数复矩阵,可以看出矩阵的总元素个数和非零元素随着网格剖分个数增加而增加,但是稠密度却在逐渐减小。因此用大型稀疏矩阵存储技术进行行压缩存储时,网格量越大压缩优势越明显,不仅节省了存储空间而且加快了计算速度。

(3)三分量感应测井对复杂地层具有很强的探测能力,纵向磁场分量在水平源距上比水平磁场分量具有更高的纵向分辨率,对于地层变化更加明显;在断裂地层中,不影响平行于断裂层的磁场分量,但是对另一水平分量和纵向磁场分量的影响正好相反;对垂直型十字裂缝来说,水平分量没有影响,而

随着裂缝的长度增加,纵向磁场分量变小,直到不产生变化,当地层发生倾斜时,不影响轴向磁场分量,对另一方向横向磁场分量与纵向磁场分量的影响相反,并且纵向磁场分量较横向磁场分量更加敏感。

参 考 文 献

1 Zhdanov S M. Three-dimensional electromagnetics. New York: Elsevier, 2002: 148—160

2 沈金松. 用有限差分法计算各向异性介质中多分量感应测井的响应. 地球物理学进展, 2004;19(1): 101—107
Shen Jinsong. Modeling of the multi-component induction log in anisotropic medium by using finite difference method. Progress in Geophysics, 2004; 19(1): 101—107

3 汪功礼, 张庚骥, 崔锋修, 等. 三维感应测井响应计算的交错网格有限差分法. 地球物理学报,2003; 46(4): 561—567
Wang Gongli, Zhang Gengji, Cui Fengxiu, *et al*. Application of staggered grid finite difference method to the computation of 3-D induction logging response. Progress in Geophysics, 2003; 46(4): 561—567

4 沈金松. 用交错网格有限差分法计算三维频率域电磁响应. 地球物理学报, 2003; 46(2): 281—289
Shen Jinsong. Modeling of 3-D electromagnetic response in frequency domain by using staggered grid. Progress in Geophysics, 2003; 46(2): 281— 289

5 王昌学, 杨韦华, 楚昭坦, 等. 多分量感应测井响应的交错网格有限差分法模拟. 石油大学学报, 2005; 29(3): 35—40
Wang Changxue, Yang Weihua, Chu Zhaotan, *et al*. Modeling of multicomponent induction log responses by staggered-grid finite difference method. Journal of the University of Petroleum, 2005; 29(3): 35—40

6 Hou J, Mallan R K, Torresverdín C. Finite-difference simulation of borehole EM measurements in 3D anisotropic media using coupled scalar-vector potentials. Geophysics, 2006; 71(5): 225—233

7 Dang R R, Wang H M, Xie Y. A multi-component induction logging tool and recognition of the anisotropic reservoirs. Progress in Geophysics, 2006; 21(4): 1238—1243

8 肖调杰, 王 赟, 宋 滔, 等. 大地电磁法的理论探测深度. 地球物理学进展, 2015; 30(5): 2100—2106
Xiao Tiaojie, Wang Yun, Song Tao, *et al*. Depth of investigation in magnetotelluric method. Progress in Geophysics, 2015; 30(5): 2100—2106

9 王 敏. 基于压缩存储的稀疏矩阵转置算法研究. 科学技术与工程, 2010; 10(4): 1041—1044
Wang Min. Study on the sparse matrix transpose algorithms based on compressed storage. Science Technology and Engineering, 2010; 10(4): 1041—1044

10 李 方. P_0-矩阵的 LU-分解. 东南大学学报(自然科学版), 1995; 12(3): 115—119
Li Fang. LU-decomposition of P_0-matrices. Journal of Southeast University (Nature Science), 1995; 12(3): 115—119

11 Shen J S, Su B Y, Guo N C. Studyon the anisotropic characteristics of the electric response to fractured reservoir. Physical Geography, 2009; 52(11): 2903—2912

12 Newman G A, Alumbaugh D L. Three-dimensional induction logging problems, part 2: A finite-difference solution. Geophysics, 2002; 67: 484—502

13 Weiss C J, Newman G A. Electromagnetic induction in a fully 3-D anisotropic earth. Geophysics, 2002; 67(4): 1104—1114

14 Nie X C, Yuan N, Liu C R. Simulation of LWD tool response using a fast integral equation method. IEEE Trans on Geophysics and Remote Sensing, 2009; 48(1): 72—81

15 Wang G L, Abubakar A. Effect of crossbedding on triaxial induction measurements in high angle and horizontal wells. SEG Technical Program Expanded, 2016; 76(10): 708—712

Forward Modeling for Three-component Induction Logging Using 3D Finite Difference Method

GUO Chen, CHEN Xiao-liang, LU Sheng-peng

(Electromagnetic Exploration Technology Laboratory, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

[**Abstract**] Forward modeling of the formation logging response is the necessary foundation for the formation characterization and inversion in the three-component induction logging application. It provides the reference for the prediction of the formation physical properties, which helps find the best drilling area. In order to investigate the response characteristics of the three-component induction logging under a variety of complex formation model, a differential computing format of the three dimensional electromagnetic response in frequency domain was derived from the Maxwell's equations with a staggered-grid finite difference method. The numerical calculation of the three-dimensional induction logging response in the horizontal formation and tilting formation proved that the three-dimensional induction logging method yields an advantage in the complex formations, and the longitudinal magnetic field component has a higher vertical resolution than horizontal magnetic field component, which has a better sensitivity to the formation variation. The results of the forward modeling can provide a significant reference for the logging data analysis as well as for the parameter optimization in the three-component induction logging tool design.

[**Key words**] three-dimensional induction logging electromagnetic equations staggered-grid finite difference method