

DOI: 10.11720/j.issn.1000-8918.2014.1.28

带地形的可控源音频大地电磁法二维正演

张斌¹, 谭捍东²

(1. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012; 2. 中国地质大学 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

摘 要: 利用二次场算法研究了可控源音频大地电磁法二维正演问题。采用有限单元法进行正演模拟, 将矩阵压缩存储和共轭梯度解方程方法应用到正演算法中, 加快了正演算法的速度, 并且将地形因素考虑到正演算法中。通过不同的模型验算, 检验了算法的精度。

关键词: 可控源音频大地电磁法; 2.5 维正演; 地形因素; 有限元单元法

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2014)01-0151-06

可控源音频大地电磁法因其勘探深度大、抗干扰能力强、采集效率高而被广泛应用于地质勘探中, 仪器的功能和测量精度日臻完善。但是由于人工场源的引入, 其处理技术却远不如大地电磁方法那么成熟。目前多采用二维大地电磁反演程序处理可控源数据, 但可控源数据中包含了场源的影响, 近区场和过渡区场、阴影效应等因素会影响处理结果的解释, 所以有必要研究场源对数据的影响。另外, 通过时频转换, 可将频率域电磁法的结果变换到时间域, 为时间域电磁法正演奠定基础。因此研究可控源音频大地电磁法正演有一定的实际应用价值。

相关领域国内外学者作了许多工作, Stoyer 和 Greenfield^[20] 通过有限元方法计算了磁偶极子频率域的电磁响应; Unsworth^[15] 计算了电偶极子频率域的响应; Sugeng 和 Mitsuhata 先后应用等参单元研究了带地形的电磁场模拟。国内罗延钟^[7] 和底青云^[2] 研究了 CSAMT 有限元正演算法; 雷达^[4] 研究了带地形的正反演算法; 沈金松^[6] 研究了海底可控源的电磁响应。阎述^[10]、陈小斌^[11]、王若^[12]、张继峰^[13]、柳建新^[14] 等分别研究了线源大地电磁法正演模拟。

此次研究考虑从三维场源二维模型入手, 一方面比线源模拟更加符合实际情况, 另一方面比三维算法计算速度更快。现有的研究中常通过总场算法来处理地形问题, 而二次场算法中因涉及到一次场的求取, 很少考虑地形因素。为了减小场源对计算精度的影响, 在二次场算法中使用“拟均匀半空间”方法将地形因素加入到二次场算法中, 提高方法的

适用性和精度。同时分析算法的特点, 以提高正演模拟计算速度。

1 可控源音频大地电磁法正演

1.1 电磁场方程

二维正演计算中所用到的模型和网格如图 1 所示, y 为走向方向, 电阻率值沿走向方向不变, 仅在 xz 平面内变化。

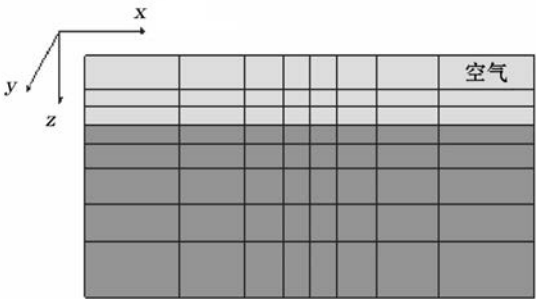


图 1 正演剖分网格

参考 Nabighian 等人的研究成果^[19], 假设时间因子为 $e^{i\omega t}$, 并且忽略位移电流的影响, 二次场满足的麦克斯韦方程组描述为^[19]

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times E^s &= -i\omega\mu H^s, \\ \nabla \times H^s &= \sigma E^s + \sigma_a E^p, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, μ 为自由空间磁导率; σ 、 σ_0 分别为模型及背景的电导率, $\sigma_a = \sigma - \sigma_0$ 为异常电导率; E^s 、 H^s 分别为电场、磁场的二次场值, E^p 为根据背景场计算的电场值。该方法相对总场模拟方法精度高, 并且适用于不同场源的数值模拟。以下使用均匀半空间来

计算背景场值。利用公式^[19]

$$\hat{F}(x, ky, z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y, z, \omega) e^{-iky y} dy \quad (2)$$

沿走向方向对 y 做傅立叶变换, 将式(1)从频率空

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\hat{y}}{k_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\hat{y}}{k_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} \right) - \hat{y} \hat{E}_y^s + ik_y \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{k_e^2} \right) \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{k_e^2} \right) \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} \right] = \sigma_a \hat{E}_y^p - ik_y \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma_a}{k_e^2} \hat{E}_x^p \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\sigma_a}{k_e^2} \hat{E}_z^p \right) \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\hat{z}}{k_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\hat{z}}{k_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} \right) - \hat{z} \hat{H}_y^s + ik_y \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{k_e^2} \right) \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{k_e^2} \right) \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right] = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{z \sigma_a}{k_e^2} \hat{E}_z^p \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{z \sigma_a}{k_e^2} \hat{E}_x^p \right) \right]. \quad (4)$$

其中, $\hat{E}_y^s$ 、 $\hat{H}_y^s$ 分别为电场和磁场 y 方向二次场波数域的值, $\hat{E}_x^p$ 、 $\hat{E}_y^p$ 、 $\hat{E}_z^p$ 分别为电场 x 、 y 、 z 三个方向背景场波数域的值, k_y 为波数值, $\hat{z} = i\mu\omega$, $\hat{y} = \delta$, $k^2 = -i\mu\delta\omega$, $k_e^2 = k_y^2 - k^2$ 。式(3)和式(4)加上相应的边界条件就构成了正演模拟所要解决的问题。

间域变换到频率波数域中, 将三维问题转化成二维的数值模拟问题。用“ $\hat{}$ ”表示频率波数域的结果, 变换后经整理得到的频率波数域的电磁场方程为^[19]

1.2 有限元单元法计算公式

利用 4 节点等参单元来进行数值模拟, 将伽里金方法和格林公式应用到式(3)和式(4), 正演使用第一类边界条件, 边界网格上的电磁场值为零, 最终得到电磁场有限元计算公式^[16]

$$\sum_{i=1}^4 \iint \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \left(\frac{\hat{y}}{k_e^2} \cdot \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial z} \left(\frac{\hat{y}}{k_e^2} \cdot \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} \right) + N_i \hat{E}_y^s + \frac{ik_y}{k_e^2} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} - \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} \right) \right] dx dz =$$

$$- \sum_{i=1}^4 \iint \left[N_i \sigma_a \hat{E}_y^p + \frac{ik_y \sigma_a}{k_e^2} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \hat{E}_x^p + \frac{\partial N_i}{\partial z} \hat{E}_z^p \right) \right] dx dz, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 \iint \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \left(\frac{\hat{z}}{k_e^2} \cdot \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial z} \left(\frac{\hat{z}}{k_e^2} \cdot \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} \right) + N_i \hat{H}_y^s + \frac{ik_y}{k_e^2} \left(-\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right) \right] dx dz =$$

$$- \sum_{i=1}^4 \iint \left[\frac{z \sigma_a}{k_e^2} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \hat{E}_x^p - \frac{\partial N_i}{\partial z} \hat{E}_z^p \right) \right] dx dz, \quad (6)$$

N_i 为形函数。通过单元分析和系数矩阵存储, 最终正演计算形成的矩阵方程形式为

$$\begin{pmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$k_1 = \iint \left[\frac{\hat{y}}{k_e^2} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) + \hat{y} N_i N_j \right] dx dz,$$

$$k_2 = \iint \left[\frac{ik_y}{k_e^2} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial z} - \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} \right) \right] dx dz,$$

$$k_3 = \iint \left[\frac{\hat{z}}{k_e^2} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) + \hat{z} N_i N_j \right] dx dz,$$

$$k_4 = \iint \left[\frac{ik_y}{k_e^2} \left(-\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial z} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} \right) \right] dx dz,$$

$$S_1 = - \iint \left[N_i \delta_a \hat{E}_y^p + \frac{ik_y \delta_a}{k_e^2} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \hat{E}_x^p + \frac{\partial N_i}{\partial z} \hat{E}_z^p \right) \right] dx dz,$$

$$S_2 = - \iint \left[\frac{z \delta_a}{k_e^2} \left(\frac{\partial N_i}{\partial z} \hat{E}_x^p - \frac{\partial N_i}{\partial x} \hat{E}_z^p \right) \right] dx dz.$$

式(7)中 e 和 h 代表网格节点上待求的电场和磁场值。求解由以上各式构成的线性方程组, 即可得到

频率波数域中的结果, 将不同波数值的结果通过样条插值和反余弦变换, 即可得到频率域的结果。以下在 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ 间按对数等间隔取 21 个波数值计算。

1.3 矩阵压缩存储

有限元形成的右端矩阵具有稀疏和对称的特点, 如果将其全部储存需要很大的内存空间。考虑到矩阵每行只有有限个非零元素, 如果能充分利用这个特点, 可以有效的节约内存空间。结合有限元法的特点, 单元分析时仅每个节点与其周围的几个节点参与运算。以 4 节点的等参单元为例, 最终形成的矩阵中每行最多只有 18 个非零元素, 将它们存储即可。

每行 18 个非零元素的位置, 在网格剖分后, 即可根据有限元单元分析特点得到非零元素的行列号。采用 CSR(即按行压缩稀疏矩阵)方法, 通过三个一维向量就可完成矩阵的存储, 便于共轭梯度法的使用。使用对称逐步超松弛预处理共轭梯度法解线性方程组, 来加快正演的速度。

1.4 地形模拟

野外常在地形有起伏的地方采集数据,因此采用肖明顺介绍的“拟均匀半空间”方法^[9]来模拟地形对数据产生的影响。算法仅在求取一次场时有所变化,如图 2 所示,将地形的最高点作为均匀半空间水平面的起始位置,其下的空气当做高阻异常,场源位于水平面以下。一次场计算时,即计算距水平面 H 处场源在均匀半空间产生的场值,通过这种方法可以方便的模拟地形起伏的影响。

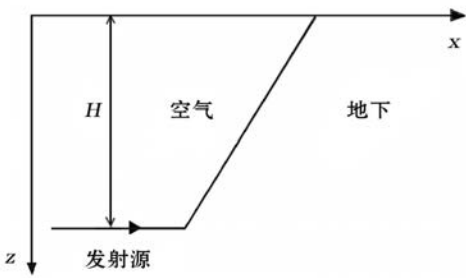


图 2 地形起伏下模拟示意

2 结果检验

将正演结果与 Key Kerry 的一维程序进行对比验证。模型见图 3,采用 x 方向电偶极子,模型层数为 3 层,发射频率为 50 Hz。测点沿 x 轴方向布设,范围从 300~3 000 m。通过正演计算可以得到 h_y 和 e_y 的结果,然后利用 h_y 和 e_y 的导数值求得 e_x 二次场的结果,重点对比 e_x 二次场的结果。

图 4 为一维和二维正演结果对比,通过 e_x 二次

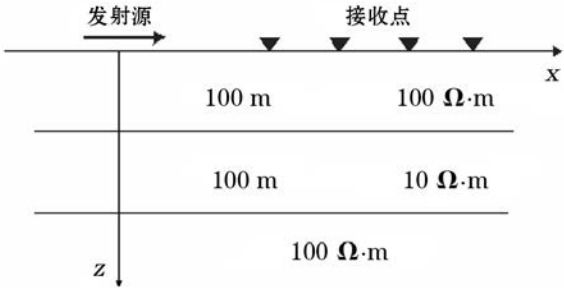


图 3 三层模型示意

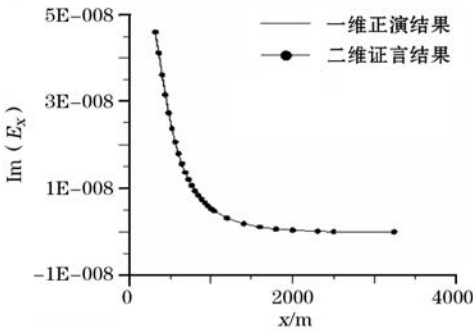
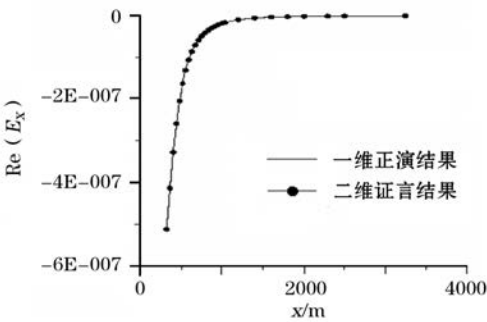


图 4 e_x 实部与虚部对比结果

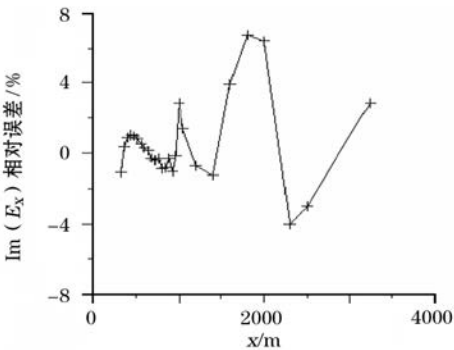
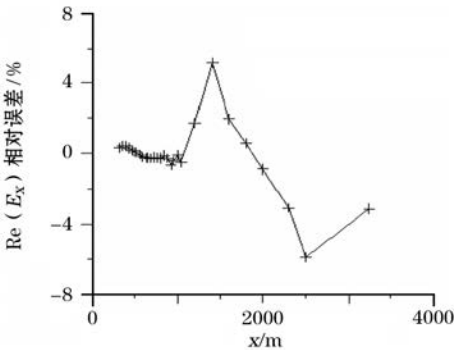


图 5 e_x 实部与虚部相对误差曲线

场实部、虚部的对比可以看出,两种计算方法得到的结果能很好地对应上。

图 5 显示,大部分测点误差在 5% 左右,部分测点离场源远,网格剖分粗糙误差稍大,说明本算法精度是可靠的。

3 模型计算

3.1 近地表低阻模型

二维模型如图 6a 所示,发射源位于原点,采用 x 向偶极子,模型背景电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$,在 4 000

~5 000 m 间有一位于地表的低阻体,200 m 长,150 m 厚。图 6b 给出了发射信号为 1 000、50 Hz 时,用 e_x 和 h_y 计算的卡尼亚视电阻率曲线。图 6c 是发射信号在 1 000~1 Hz 时,不同测点上的测深曲线。

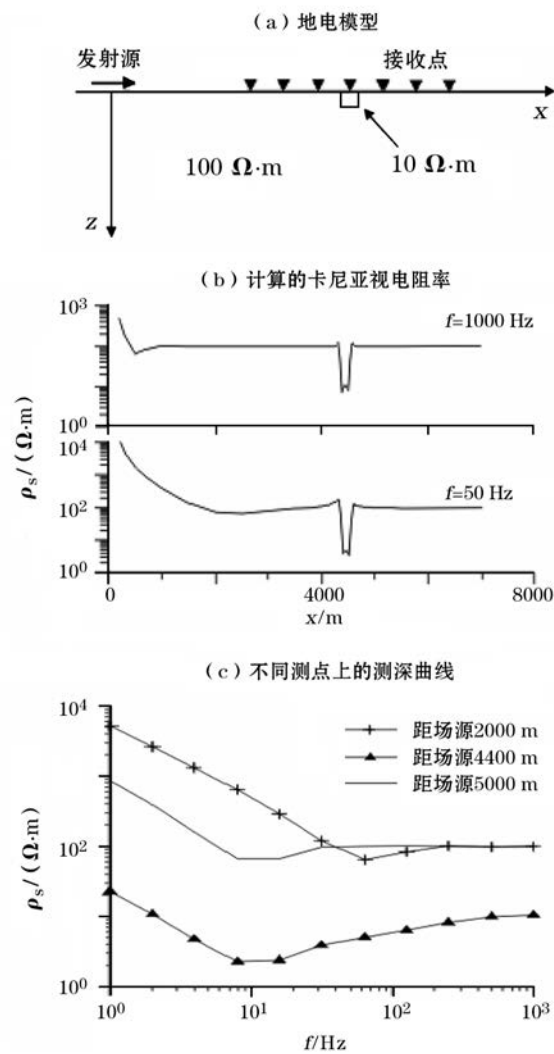


图 6 单模型及其计算结果

从图 6b 可以看出,发射频率不同时视电阻率曲线都对低阻体有所反应。发射频率为 1 000 Hz 时,若接收距离大于 1 000 m,则测点进入远区,且异常部位曲线对称性很好;发射频率为 50 Hz 时,当接收距大于 4 000 m 时,曲线仍然受到场源的影响。所以加大收发距和发射高频信号,可以减小场源对测点的影响。

从图 6c 可以看出,不同测点的频率进入近场区后,视电阻率曲线都呈 45° 直线上升,曲线已经不能真实地揭示地下模型。相比距离场源 2 000 m 处的测点,5 000 m 处的测点进入近场区的频率更低,且近区场时的视电阻率值更低。而距离场源 4 440 m 处的测点位于近地表的低阻上,曲线相对其他测点

发生了偏移,低阻体的存在一直影响到反映深部的低频数据。

由于使用 e_x 和 h_y 分量计算视电阻率,在近地表由于电阻率值横向变化大,对 e_x 分量产生影响,视电阻率曲线静态效应明显,因此可以通过正演模拟来研究近地表地质体的影响,达到寻找浅部地质体的目标。

3.2 组合模型

构造如图 7 所示的高、低阻组合模型。在离 x 方向发射源 4 000 m 的地下有两个低阻、高阻模型,电阻率分别为 10、1 000 Ω·m,发射频率 1 000~50 Hz,按对数等间隔取了 9 个频率值,测点位于 4 000~5 000 m 间,点距 40 m,正演计算 e_x 与 h_y 分量的值,求取卡尼亚视电阻率。

从计算结果中可以清楚地看出,在 4 400 m 下存在一低阻异常体,在 4 720 m 下存在一高阻异常体,大部分的测点位于远区,场源的影响相对较小,通过卡尼亚视电阻率的计算可以分辨出两个组合模型的位置和大小。但是在拟断面 4 000~4 200 m 的下部,由于测点离场源近,信号频率低,产生了一个虚假的高阻异常体。

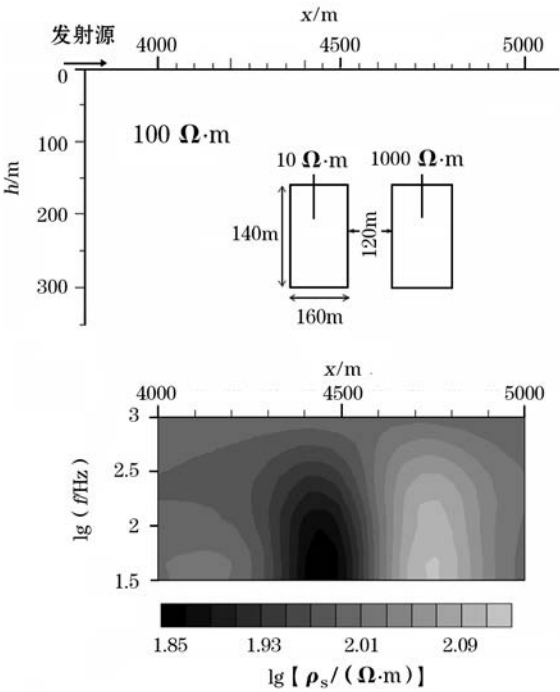


图 7 组合模型及其视电阻率拟断面

3.3 地形模拟

使用图 8a 所示的模型,进行带地形的均匀半空间正演模拟。起伏地形最高点中心离发射源 4 500 m,偶极子沿测线方向,频率为 1 000 Hz,测点位于 4 000~5 000 m 之间,可以保证接收点位于远区,视

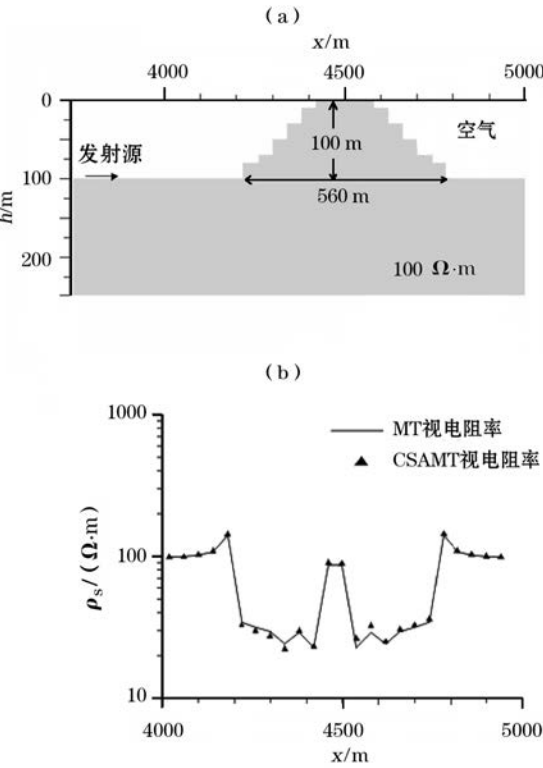


图 8 带地形的模型及其正演模拟结果

电阻率曲线可以与大地电磁的数据进行对比,以验证算法的正确性。

图 8b 为可控源音频大地电磁数据与大地电磁数据的对比结果,其中大地电磁正演数据使用陈小斌^[8]的程序计算得到,图中三角点为可控源音频大地电磁 e_x 与 h_y 分量计算的视电阻率结果,实线为大地电磁 TM 模式计算的视电阻率结果。可以看到,两种计算结果可以较好地重合上,说明在二次场算法中使用“拟均匀半空间”方法可以有效模拟地形起伏对数据产生的影响。

从图 8b 还可以看出,正演的结果近似“W”形态,在地下无异常的情况下,地形起伏变化大的地方产生了虚假的低阻异常。可见,地形对数据的影响是不容忽视的,在数据的处理中应加以考虑。

4 结语

通过正演模拟得出,在可控源音频大地电磁应用中,场源、频率、收发距、近地表异常体以及地形起伏都会对数据产生一定的影响,增加了处理和解释的难度,不恰当的处理方法可能带来错误的认识。通过更加深入的正演模拟来了解可控源音频大地电磁方法的特点,以及对数据产生影响的因素,并且如何在处理中去除它们的影响是以后进一步研究的重点。

参考文献:

[1] 底青云,Unsworth M,王妙月.复杂介质有限元法 2.5 维可控源音频大地电磁法数值模拟[J].地球物理学报,2004,47(4):723-730.

[2] 底青云,Unsworth M,王妙月.有限元法 2.5 维 CSAMT 数值模拟[J].地球物理学进展,2004,19(2):317-324.

[3] 徐世浙.地球物理中的有限单元法[M].北京:科学出版社,1994.

[4] 雷达.起伏地形下 CSAMT 二维正反演研究与应用[J].地球物理学报,2010,53(4).

[5] 林绍忠.对称逐步超松弛预处理共轭梯度法的改进迭代格式[J].数值计算与计算机应用,1997(4).

[6] 沈金松.2.5 维电磁响应的有限元模拟与波数取值研究[J].物探化探计算技术,2008,30(2).

[7] 罗延钟,周玉冰,万乐.勘查地球物理勘查地球化学文集[M].北京:地质出版社,1996,20:57-68.

[8] 陈小斌.有限元直接迭代算法[J].物探化探计算技术,1999,21(2):165-171.

[9] 肖明顺.带地形的瞬变电磁 2.5 维有限元数值模拟研究[D].武汉:中国地质大学,2008.

[10] 阎述.线源频率电磁测深二维正演[J].煤田地质与勘探,1999(5).

[11] 陈小斌.有限元直接迭代算法及其在线源频率域电磁响应计算中的应用[J].地球物理学报,2002,45(1).

[12] 王若.频率域线源大地电磁法有限元正演模拟[J].地球物理学报,2006(6).

[13] 张继峰.基于二次插值的线源可控源有限元数值模拟[J].吉林大学学报:地球科学版,2009(5).

[14] 柳建新.基于全区视电阻率的线源 FCSEM 二维正演模拟[J].地球物理学进展,2012(1).

[15] Unsworth M J,Traves B J,Chave A D.Electromagnetic induction by a finite electric dipole source over a 2-D earth[J].Geophysics,1993,58(2):198-214.

[16] Mitsuata Y.2-D electromagnetic modeling by finite-element method with a dipole source and topography[J].Geophysics,2000,65(2):465-475.

[17] Wilson G A,Ralche A P,Sugeng F.2.5D inversion of airborne electromagnetic data[J].Exploration Geophysics,2006,37:363-371.

[18] Kerry K.1D inversion of multicomponent, multifrequency marine CSEM data: Methodogy and synthetic studies for resolving thin resistive layers[J].Geophysics,2009,74(2).

[19] Nabighian N.Electromagnetic Methods in Applied Geophysics[J].Theory Society of Exploration Geophysicists,1992(1).

[20] Stoyer C H,Greenfield R J.Numerical solutions of the response of a two-dimensional earth to an oscillating magnetic dipole source[J].Geophysics,1976,41(3):519-530.

THE TWO-DIMENSIONAL CSAMT MODELING WITH TOPOGRAPHY

ZHANG Bin¹, TAN Han-dong²

(1. China Non-ferrous Metals Resources Geological Survey, Beijing 100012, China; 2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, secondary field algorithm was used to study CSAMT two-dimensional forward problem. Forward modeling used finite-element method, and it employs compressed storage and conjugate gradient technique to accelerate the speed of forward algorithm. In addition, topography was added to the forward algorithm. Finally, the algorithm was tested by means of a synthetic model. The test shows promising results.

Key words: CSAMT; 2.5D forward; topography factor;finite element method

作者简介: 张斌(1985-),男,硕士研究生,主要从事有色金属矿产勘查和电磁法研究工作。

上接 144 页

THE APPLICATION OF FIBER BRAGG GRATING TECHNOLOGY
TO INTELLIGENT MONITORING OF LANDSLIDE

ZENG Ke

(Institute of Hydrogeology and Engineering Geological Techniques, CGS, Baoding 071051 , China)

Abstract: Based on the principle of Fiber Bragg Grating Sensor,the authors put forward packaging of fiber grating strain sensors,and studied its sensing characteristics with laboratory experiments. Fiber Bragg grating sensors in monitoring geological hazards were studied based on the emplacement of landslide processes and monitoring, and fiber Bragg grating sensors were used to monitor the process of change. In combination with practical applications, the field application examples of grating sensor for monitoring landslides were given. The early-stage monitoring results were obtained and analyzed. Advices are proposed for handling the problems that may occur during the instrumentation.

Key words: geohazards monitoring; Fiber Bragg grating sensor; landslide body

作者简介: 曾克(1963-),国土资源部地质环境监测技术重点实验室工程师,主要从事地质仪器和地质灾害监测系统的研究与开发。