

doi: 10.11720/wtyht.2019.1297

许智博, 谭捍东. ZTEM 二维非线性共轭梯度反演研究[J]. 物探与化探, 2019, 43(2): 393–400. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1297>

Xu Z B, Tan H D. Two-dimensional nonlinear conjugate gradient inversion of ZTEM[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(2): 393–400. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1297>

ZTEM 二维非线性共轭梯度反演研究

许智博¹, 谭捍东²

(1. 北华大学 土木与交通学院, 吉林 吉林 132013; 2. 中国地质大学(北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

摘要: ZTEM(Z 轴倾子电磁法)是一种天然场源的频率域航空电磁法,其特点是磁场垂直分量在空中机载平台测量,磁场水平分量在地面的固定基站测量,具有勘探深度大、速度快、成本低、覆盖面积大等技术优势。本文实现了 ZTEM 二维有限差分正演和二维非线性共轭梯度(NLCG)反演算法。研究对象是倾子资料,反演过程中通过解“拟正演”问题来避开雅克比矩阵的直接计算。通过理论模型合成数据反演试算,验证了 ZTEM 倾子资料二维 NLCG 反演算法的稳定性与可靠性。与大地电磁(MT)TE 模式阻抗资料反演结果进行对比,发现在异常体横向边界的约束方面,ZTEM 倾子反演比 MT 阻抗反演更具优越性。

关键词: ZTEM; 倾子; 航空电磁法; 二维反演; 非线性共轭梯度法

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2019)02-0393-08

0 引言

天然场源的大地电磁法(MT)具有较大的勘探深度,不容易受到高阻层屏蔽的影响,对低阻层反应比较灵敏,因此,MT 的应用范围非常广泛,其在二维和三维资料处理和正反演研究中取得了巨大进展,其中共轭梯度法^[1-3]以其计算效率的突出表现而被广泛采用并取得不断发展。然而,由于采集 MT 数据需要很大的工作量,因此勘探的成本花费相对较大,耗时也比较长。如果能在飞机上采集 MT 数据是最好的,但是由于电场测量难度太大,所以这一目标还无法实现。因此,如何将天然场勘探深度大和航空测量工作效率高的特点有效地结合起来,成了人们所关注的焦点。在音频磁场(AFMAG)技术^[4-5]的基础上,国际上提出了一种新型航空电磁法— Z 轴倾子电磁法(ZTEM)^[6],该方法只采集音频段(25~720 Hz)天然源磁场信号,磁场垂直分量在整个研究区域上空测量,磁场水平分量则在地面某一基站上观测。由于在空中测量磁场的垂直分

量可以克服调查区域地形复杂、范围巨大的问题,而且大型调查区域的数据可以快速采集到,这样既提高了效率,也相对节省了成本。通过取两个磁场的比值,来消除未知源的影响,即使用倾子作为研究参数^[7]。另一点就是天然场源航空电磁法相比人工源航空电磁法,在勘探深度方面有着更大的优势。

目前对倾子的研究主要集中于 MT 方法中。吴頔^[8]对二维及三维倾子响应和异常体识别方法进行了讨论;余年^[9]基于二维 Occam 反演实现了二维 MT 视电阻率、相位资料与倾子资料的联合反演算法;林昌洪^[10]实现了 MT 倾子资料三维有限差分正演和 NLCG 反演算法。在过去的几年中,业内人士已经认识到 ZTEM 技术的潜力,但需要能够反演 ZTEM 倾子数据的算法。加拿大 Geotech 公司 2009 年在阿拉斯加南部的布里斯托湾地区将 ZTEM 应用到了实际生产工作中,并取得了很好的效果。Holtam 和 Oldenburg^[11-12]实现了 ZTEM 三维正演数值模拟和反演算法的研究;国内王涛等^[13]采用三维有限差分数值模拟算法进行了 ZTEM 响应特征的研究,为 ZTEM 的反演研究奠定了较好的基础。

收稿日期: 2018-08-10; 修回日期: 2018-12-01

基金项目: 国家重点研发计划课题“综合航空地球物理数据处理、解释和管理软件平台研发”(2017YFC0602204)和国家自然科学基金(41830429)联合资助

作者简介: 许智博(1990-),男,硕士,助教,主要从事电法勘探、数值模拟算法研究。Email: 283483358@qq.com;

文中探讨了如何利用 ZTEM 倾子资料进行二维反演获得地下二维电阻率结构信息,建立了 ZTEM 倾子二维 NLCC 反演的目标函数,不直接计算雅克比矩阵,而是通过解多次的“拟正演”问题来实现 ZTEM 倾子二维 NLCC 反演;给出理论模型合成数据的二维反演试算结果,比较了 ZTEM 倾子反演相对 MT 阻抗反演对模型约束的效果,说明了 ZTEM 方法在一定背景电阻率条件下,具有对异常体恢复横向约束优于垂向的特点。

1 二维有限差分正演

1.1 ZTEM 倾子响应计算公式

ZTEM 倾子二维有限差分正演是基于 MT 二维有限差正演,唯一的区别就是磁场的垂直分量的采集位置不同。

在以 z 方向垂直向下的右手坐标系中,倾子矢量 T 的定义为^[6]

$$H_z = T_{zx}H_x + T_{zy}H_y \circ \tag{1}$$

把整个地球模拟为地下半空间介质作为二维地质模型,其上方为绝缘空气层,电磁场源为在地表或地表上方 $z=-h$ 处的平面电流层。在二维地下结构中, x 轴正向是走向的方向, y 轴与 x 轴是相互垂直的,保持水平, z 轴垂直向下。根据麦克斯韦方程组:

$$\begin{cases} \nabla \times E = i\omega\mu H \\ \nabla \times H = \sigma E \\ \nabla \cdot E = 0 \\ \nabla \cdot H = 0 \end{cases}$$

以 x 分量为准,将得到的两个独立方程组分为 TE 模式和 TM 模式。由于 H_z 只存在于 TE 模式中,所以式(1)可以简化为

$$H_z = T_{zy}H_y \circ$$

其中,TE 模式的数值模拟问题的基本公式为^[14]

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x, \tag{2}$$

$$H_y = \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z},$$

$$H_z = -\frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial y} \circ$$

所以,ZTEM 倾子响应的计算表达式为

$$T_{zy} = \frac{H_z}{H_y} = -\frac{\partial E_x}{\partial y} \bigg/ \frac{\partial E_x}{\partial z}, \tag{3}$$

式中: H_z 为空气层中的场值, H_y 为地表固定一点的场值。 万方数据

1.2 二维有限差分方程

文中的二维数值模拟采用有限差分法。电工学中的传输线方程为^[15]

$$\begin{cases} \nabla \cdot V = -ZI \\ \nabla \cdot I = -YV \end{cases} \tag{4}$$

式中 Z 和 Y 分别是单位长度上的分布阻抗和分布导纳参数。

传输线方程对应的是一维问题,所以可以把这种概念推广到与二维问题相对应的情况,形成传输面的概念。对于传输面来说,方程(2)可以展成如下形式:

$$\begin{cases} \frac{\partial I_y}{\partial y} + \frac{\partial I_z}{\partial z} = -YV \\ \frac{\partial V}{\partial z} = -ZI_z \\ \frac{\partial V}{\partial y} = -ZI_y \end{cases}$$

利用能量保持守恒的条件,选择二维构造条件下大地电磁场方程式与传输面方程式进行对比,以此能够建立他们之间的对应关系。因此,TE 极化模式和 TM 极化模式下的麦克斯韦方程组可以写成如下统一形式:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{Z} \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{Z} \frac{\partial V}{\partial z} \right) = YV \\ \frac{\partial V}{\partial z} = -ZI_z \\ \frac{\partial V}{\partial y} = -ZI_y \end{cases}$$

对于 TE 模式来说, V 对应 E_x , I_z 对应 H_y , I_y 对应 $-H_z$, Z 对应 $-i\omega\mu$, Y 对应 σ 。

由此可见,解偏微分方程其实就是二维有限差分数值模拟问题,需要给出正确的边界条件,进而得到偏微分方程的解。对于 TE 极化模式,文中将网格的上边界取在地表上方 $z=-h$ 处,在其上 H_y 为常数,即电磁场源。

在确定边界条件和网格参数之后,根据麦克斯韦方程组就可以对每一个节点写出电流连续性方程:

$$\sum \frac{V_{\text{adjacent}} - V_{ij}}{Z_{\text{connecting}}} + Y_{ij}V_{ij} = S_{ij}, \tag{5}$$

$i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N.$

式中: i 为水平网格数, j 为竖直网格数, $Z_{\text{connecting}}$ 为相邻节点间的集总阻抗, Y_{ij} 为所论节点对地的集总导纳, S_{ij} 为仅在 TE 模式情况下在网格的顶部 $z=-h$ 处存在的外加线电流源。按顺序排列每个节点上的电

磁场分量,可将式(5)写成标准形式:

$$Kv = s。$$
 (6)

式中: K 为对称的大型稀疏系数矩阵, v 在 TE 模式下对应为 E_x , s 是与源及边界场值有关的列向量。

将求得的 E_x 代入式(3),就可以得到二维模型的倾子响应。因此 ZTEM 倾子可以表示为

$$T = \frac{a^T v}{b^T v}，$$
 (7)

式中: a 和 b 为给定的向量。

1.3 正演精度的验证

为验证 ZTEM 二维有限差分正演的准确性,选取一个二维地下目标体模型(图 1)进行试算。目标体的几何尺寸为 100 m×300 m,电阻率为 10 Ω·m,上顶面位于地表,围岩电阻率为 1 000 Ω·m。 H_z 在地表上方 100 m 处的空气层测量, H_y 在地表固定一点测量。用 ZTEM 二维有限差分法计算出目标体的

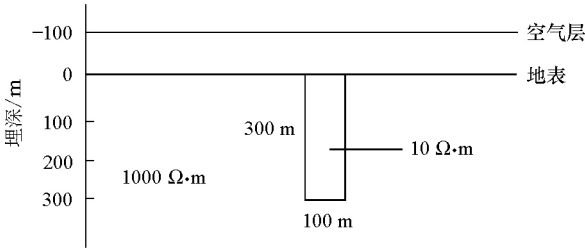


图 1 二维目标体模型

Fig.1 A schematic diagram of two dimensional object model

倾子响应,计算结果与王涛等的 ZTEM 三维有限差分法^[13]计算得到的数值解进行对比验证。

图 2 是两种有限差分算法在频率为 25 Hz 和 600 Hz 时计算结果的对比。由图可见,ZTEM 倾子数据的实部和虚部都拟合得非常好,证明了 ZTEM 二维有限差分正演是准确可靠的。

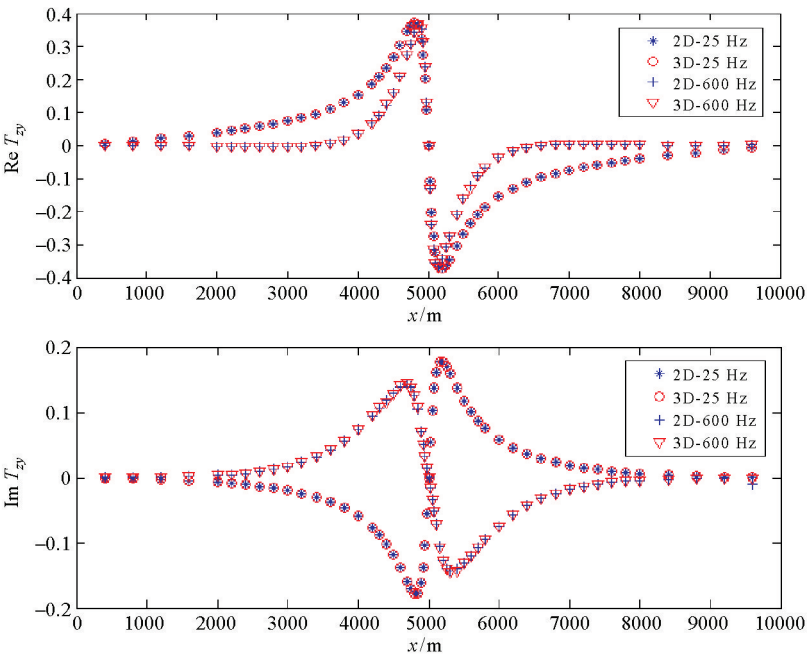


图 2 二维模型倾子响应的二维有限差分数值解与三维数值解的对比

Fig.2 The tipper response comparison between the 2D finite difference modeling results and the 3D finite difference modeling results generated from 2D model

2 二维 NLCG 反演

2.1 目标函数

ZTEM 倾子二维 NLCG 反演算法的目标函数定义为

$$\psi(m) = [T - F(m)]^T V^{-1} [T - F(m)] + \lambda m^T L^T L m$$
 (8)

式中: T 是倾子数据的观测值; $F(m)$ 是用正演函数

数值模拟得到的 ZTEM 倾子数据(倾子的实部或虚部); λ 为正则化参数,一般是取正数; L 表示二次差分拉普拉斯算子; V 是误差向量 e 的方差。

目标函数的梯度相应可以表示为

$$g(m) = -2A(m)^T V^{-1} [T - F(m)] + 2\lambda L^T L m。$$
 (9)

式中 A 表示雅可比矩阵,取 $e = d - F(m_{ref})$ 。

2.2 “拟正演”问题

反演问题中,最关键的部分在于求取雅可比矩

阵。在计算出雅可比矩阵后,便可获得每次模型更新所需的模型修正量,实现模型的更新迭代。ZTEM 倾子二维 NLCG 反演过程避开了实际计算和存储雅可比矩阵的每个元素,而以通过计算雅可比矩阵的转置与一个向量的乘积以及雅可比矩阵与另一个向量的乘积直接获得模型修正量,其算法流程与 MT 阻抗二维 NLCG 反演^[2]的算法流程类似。ZTEM 倾子二维非线性共轭梯度反演最主要的计算量在于梯度 $g(\mathbf{m})$ 和 $f = \mathbf{A}(\mathbf{m}_{\text{ref}})\mathbf{p}$ 的计算。可见,想要计算出模型的修正量,迭代更新模型的参数,只需要计算出 $\mathbf{A}(\mathbf{m}_{\text{ref}})^T \mathbf{V}^{-1}\mathbf{e}$ 和 $\mathbf{A}(\mathbf{m}_{\text{ref}})\mathbf{p}$ 的值就可以了。下面介绍 ZTEM 倾子二维 NLCG 反演如何求取这两个值。

令 $\mathbf{V}^{-1}\mathbf{e} = \mathbf{q}$, 那么 $\mathbf{A}(\mathbf{m}_{\text{ref}})^T \mathbf{V}^{-1}\mathbf{e}$ 和 $\mathbf{eA}(\mathbf{m}_{\text{ref}})\mathbf{p}$ 可以表示为 $\mathbf{A}^T \mathbf{q}$ 和 $\mathbf{A}\mathbf{p}$ 。方程(6)表示所有频率和 TE 极化模式下的麦克斯韦方程组的有限差分形式。对于向量 $\mathbf{m}$ 来说,ZTEM 倾子响应的正演函数可以表示为

$$F(\mathbf{m}) = \frac{\mathbf{a}_i(\mathbf{m})^T \mathbf{v}(\mathbf{m})}{\mathbf{b}_i(\mathbf{m})^T \mathbf{v}(\mathbf{m})} \quad (10)$$

用如下的公式表示 $\mathbf{A}$ 与正演函数的关系:

$$\mathbf{A}^j(\mathbf{m}) = \partial_j F(\mathbf{m}), \quad (11)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, N$; 代表数据的个数; $j = 1, 2, \dots, M$ 代表模型参数的个数。

把公式(10)代入公式(11),可得 $\mathbf{A}$ 的表达式:

$$\mathbf{A}^j = \mathbf{A}_1^j + \mathbf{A}_2^j, \quad (12)$$

$$\mathbf{A}^j = \left\{ \left(\frac{1}{\mathbf{a}_i^T \mathbf{v}} \partial_j \mathbf{a}_i - \frac{1}{\mathbf{b}_i^T \mathbf{v}} \partial_j \mathbf{b}_i \right)^T \mathbf{v} + \left(\frac{1}{\mathbf{a}_i^T \mathbf{v}} \mathbf{a}_i - \frac{1}{\mathbf{b}_i^T \mathbf{v}} \mathbf{b}_i \right)^T \partial_j \mathbf{v} \right\} \frac{\mathbf{a}_i^T \mathbf{v}}{\mathbf{b}_i^T \mathbf{v}} \quad (13)$$

在本文中考虑到 $\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{b}$ 的取值,方程(13)可进一步化简为

$$\mathbf{A}^j = \frac{\mathbf{a}_i^T \mathbf{v}}{\mathbf{b}_i^T \mathbf{v}} \left(\frac{1}{\mathbf{a}_i^T \mathbf{v}} \mathbf{a}_i - \frac{1}{\mathbf{b}_i^T \mathbf{v}} \mathbf{b}_i \right)^T \partial_j \mathbf{v} \quad (14)$$

取

$$\mathbf{c}_i = \frac{\mathbf{a}_i^T \mathbf{v}}{\mathbf{b}_i^T \mathbf{v}} \left(\frac{1}{\mathbf{a}_i^T \mathbf{v}} \mathbf{a}_i - \frac{1}{\mathbf{b}_i^T \mathbf{v}} \mathbf{b}_i \right), \quad (15)$$

因为向量 $\mathbf{v}$ 可以使用解 ZTEM 倾子二维有限差分方程(6)的方法算出,本文已经确定选取 TE 极化模式,而且在向量 $\mathbf{v}$ 也已经算出的情况下,其中 $\mathbf{a}_i$ 和 $\mathbf{b}_i$ 也是已知给定的,那么 $\partial_j \mathbf{a}_i$ 和 $\partial_j \mathbf{b}_i$ 也就可以得出了,因此,就可以得出雅可比矩阵的表达式的第一部分 $\mathbf{A}_1^j$ 。但是,计算雅可比矩阵表达式的第二部分 $\mathbf{A}_2^j$ 相对来说是比较有难度的,下面主要讨论这一部分的计算方法。

通过 ZTEM 倾子正演的有限差分方程(6)能够得到:

$$\mathbf{K} \partial_j \mathbf{v} = \partial_j \mathbf{s} - (\partial_j \mathbf{K}) \mathbf{v}, \quad j = 1, 2, \dots, M; \quad (16)$$

同样的,假设已经知道 $\mathbf{K}, \mathbf{s}$ 和 $\partial_j \mathbf{s}, \partial_j \mathbf{K}$ 的值,如果把方程(16)中的 $\partial_j \mathbf{v}$ 看作方程的解向量,把 $\partial_j \mathbf{s} - (\partial_j \mathbf{K}) \mathbf{v}$ 当成是方程的右端向量,则可把方程(16)当成是一个正演模拟的有限差分方程,通过计算 M 次“拟正演”问题,就能够得到 $\partial_j \mathbf{v}$,然后把 $\partial_j \mathbf{v}$ 代入方程(14),这样就能够得到雅可比矩阵表达式的第二项 $\mathbf{A}_2^j$ 了。

第二种方法就是利用矩阵 $\mathbf{K}$ 的对称性还有正演问题的互换性,把方程(16)代入方程(14),能够得到:

$$\mathbf{A}_2^j = \mathbf{c}_i^T \mathbf{K}^{-1} [\partial_j \mathbf{s} - (\partial_j \mathbf{K}) \mathbf{v}], \quad (17)$$

取

$$\mathbf{K} \mathbf{u}_i = \mathbf{c}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (18)$$

由于 $\mathbf{K}$ 具有对称的性质,可以将公式(17)变为

$$\mathbf{A}_2^j = \mathbf{u}_i^T [\partial_j \mathbf{s} - (\partial_j \mathbf{K}) \mathbf{v}]. \quad (19)$$

在方程(18)中,假如向量 $\mathbf{u}_i$ 作为解向量,向量 $\mathbf{c}_i$ 作为方程的右端向量,则方程(18)也可以看作是一个正演模拟的有限差分方程,通过计算 N 次“拟正演”问题,就能够计算出 $\mathbf{u}_i$,然后将 $\mathbf{u}_i$ 带回到方程(19)就能够计算出 $\mathbf{A}_2^j$ 。

由此可得出,计算雅可比矩阵所使用的两种传统方法会占据大量的内存空间,同时也需要大量的计算时间,这样会严重影响反演的计算效率;尤其是 ZTEM 倾子数据的反演往往都是要处理大量的航测数据,这就更需要计算效率的提高,否则反演计算将很难进行。

通过公式(12)可以得到:

$$\mathbf{A}\mathbf{p} = \mathbf{A}_1\mathbf{p} + \mathbf{A}_2\mathbf{p},$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{q} = \mathbf{A}_1^T \mathbf{q} + \mathbf{A}_2^T \mathbf{q}.$$

与之前的道理一样,假设方程的第一项基本都是已知的或者是可以计算得到的,还是主要研究方程的第二项。首先是计算 $\mathbf{A}\mathbf{p}$ 。从方程(14)可知:

$$\sum_j \mathbf{A}_2^j \mathbf{p}^j = \mathbf{c}_i^T \mathbf{t}, \quad (20)$$

其中定义 $\mathbf{t}$ 为

$$\mathbf{t} = \sum_j \mathbf{p}^j \partial_j \mathbf{v},$$

通过方程(16)能够得到 $\mathbf{t}$:

$$\mathbf{K} \mathbf{t} = \sum_j \mathbf{p}^j [\partial_j \mathbf{s} - (\partial_j \mathbf{K}) \mathbf{v}]. \quad (21)$$

在方程(21)中,假如把 $\mathbf{t}$ 当成是方程的解向量,然后把 $\sum_j \mathbf{p}^j [\partial_j \mathbf{s} - (\partial_j \mathbf{K}) \mathbf{v}]$ 当成是方程的右端向量,这样实际上方程(21)也是一个正演模拟的有限差

分方程。在计算一次“拟正演”之后,就能够计算出 t ,然后把得到的 t 代入到方程 (20) 之中,这样 $A_2^j p$ 就能够计算得到了。

接着计算 $A^T q$ 。原理上是一样的,通过方程 (19) 得到:

$$\sum_i q^i A_2^j = r^T [\partial_j s - (\partial_j K) v] \quad (22)$$

其中,定义 r 为: $r = \sum_i q^i u_i$,通过方程 (18) 能够得到 r :

$$Kr = \sum_i q^i c_i \quad (23)$$

在方程 (23) 中,假如把 r 当成是方程的解向量,然后把 $\sum_i q^i c_i$ 当成是方程的右端向量,这样方程 (23) 也是一个正演模拟的有限差分方程,在计算一次“拟正演”之后,就能够计算出 r 。把得到的 r 代入到方程 (22) 中,这样 $A^T q$ 就能够计算得到了。

综上所述,相比于传统的反演算法存在的计算效率低下的问题(尤其是在计算雅克比矩阵的时候),共轭梯度(NLCG)反演算法仅仅是计算 2 次或 4 次(单极化模式计算 2 次,双极化模式计算 4 次)“拟正演”问题。在 TE 极化模式的情况下,NLCG 反演每迭代一次,正演模拟的次数为:3(3 次正演)× 频率的个数。如此,计算效率得到了很明显的提升,也有利于对大量的 ZTEM 倾子数据进行处理计算。

3 算例

基于以上的理论和公式,编程开发了 ZTEM 倾子数据二维 NLCG 反演算法。为了验证二维反演算法的正确性和稳定性,设计了两个二维地电模型。ZTEM 倾子二维 NLCG 反演比较依赖于初始模型的选取。当选取的初始模型的电阻率与背景电阻率相差较大时,反演的结果不是很好,只有当初始模型选取与背景电阻率值相接近的电阻率时,反演才能达到比较好的效果。所以需要预先知道背景电阻率才能得到更好的反演结果,比如通过 MT 阻抗的反演结果或者是钻孔资料等得到背景电阻率值,再进行反演。

3.1 模型一

单个异常体模型如图 3 所示,异常体的长度为 1 500 m,宽度为 1 250 m,顶面距离地表 350 m,异常体的电阻率为 $10 \Omega \cdot m$,地下均匀半空间的背景电阻率为 $100 \Omega \cdot m$ 。

二维网格剖分为 46×38 ,其中空气层的层数为 10。选取 5 个计算频率,分别为:25 Hz、75 Hz、150

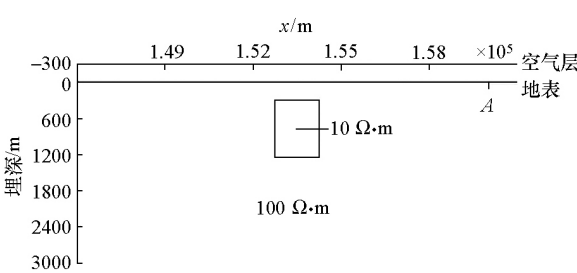


图 3 单个异常体模型示意

Fig.3 Schematic diagram of single abnormal body model

Hz、300 Hz 和 500 Hz。在地表上方 300 m 处的空气层中设置 46 个测点采集 H_z 数据,在地表的点 A 处固定采集 H_y 数据,对正演算出的 ZTEM 倾子数据中加入 3% 的高斯随机误差,对合成数据做 ZTEM 倾子数据的二维 NLCG 反演。图 4 是 ZTEM 倾子数据的拟合差收敛曲线(均方根数据拟合差,RMS misfit);图 5 是 ZTEM 倾子二维 NLCG 反演电阻率断面;图 6 是 MT 阻抗二维 NLCG 反演电阻率断面。

由图 4 可看出,ZTEM 倾子反演迭代了 9 次,数据的拟合差从初始值 3.2 一直收敛至 1.1 左右趋于

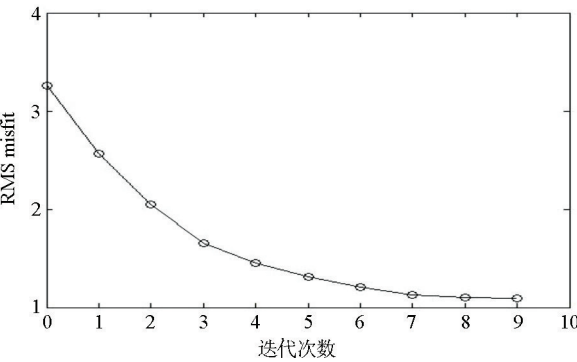


图 4 拟合差随迭代次数收敛曲线

Fig.4 Convergence Curve of RMS misfit versus iteration number

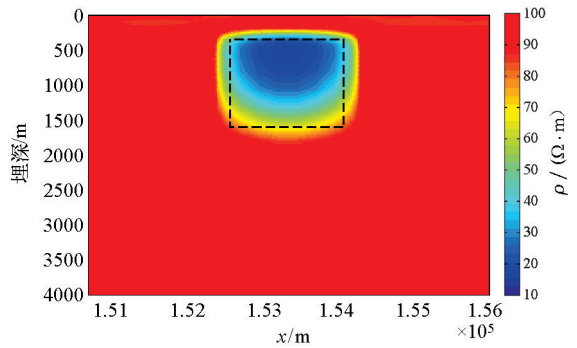


图 5 对单个异常体模型产生的 ZTEM 倾子数据进行反演的结果

Fig.5 The inversion results of ZTEM tipper data generated by a single abnormal body model

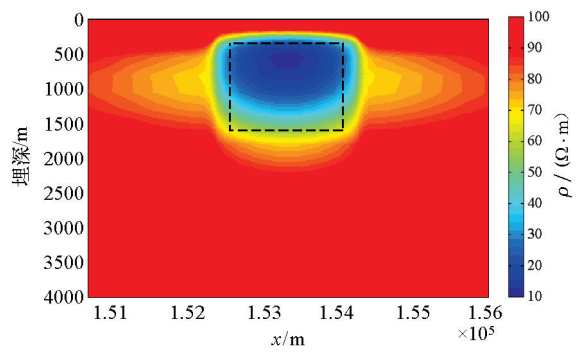


图 6 对单个异常体模型产生的 MT 阻抗数据进行反演的结果

Fig.6 The inversion results of ZTEM tipper data generated by a single abnormal body model

平稳。在将 ZTEM 倾子的反演结果(图 5)与 MT 阻抗的反演结果(图 6)相对比的过程中,可以发现 ZTEM 倾子的反演基本上能够恢复异常体的空间位置、大小和形状,但是对异常体电阻率的恢复结果要稍逊于 MT 阻抗反演,倾子反演的电阻率最低值在 $16\ \Omega \cdot \text{m}$ 左右,而阻抗反演的电阻率最低值可以达到 $10\ \Omega \cdot \text{m}$ 左右。然而,在异常体的横向边界的约束方面,从电阻率断面图来看,ZTEM 倾子资料的反演效果都比 MT 阻抗的反演效果好。

3.2 模型二

两个异常体模型如图 7 所示,两个异常体的长度均为 $1\ 200\ \text{m}$,宽度均为 $800\ \text{m}$,顶面距离地表均为 $300\ \text{m}$,异常体的电阻率均为 $10\ \Omega \cdot \text{m}$,地下均匀半空间的背景电阻率为 $100\ \Omega \cdot \text{m}$ 。

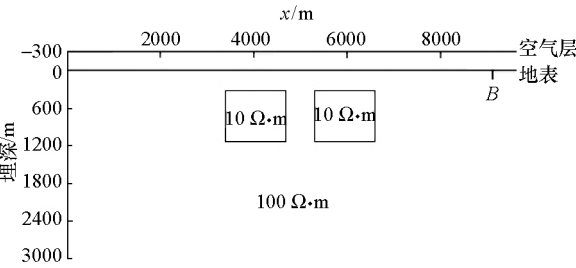


图 7 两个异常体模型示意

Fig.7 Schematic diagram of two abnormal bodies model

二维网格剖分为 58×51 ,其中空气层的层数为 10。选取 5 个计算频率,分别为 25、75、150、300、500 Hz。在地表上方 $300\ \text{m}$ 处的空气层中设置有 58 个测点采集 H_z 数据,在地表的点 B 处固定采集 H_y 数据,对正演算出的 ZTEM 倾子数据中加入 3% 的高斯随机误差,对合成数据做 ZTEM 倾子数据的二维 NLCG 反演。图 8 是 ZTEM 倾子数据的拟合差收敛曲线,图 9 是 ZTEM 倾子二维 NLCG 反演的电阻率断面,图 10 是 MT 阻抗二维 NLCG 反演的电阻率断

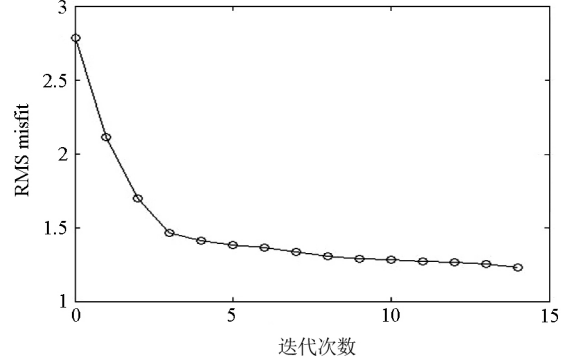


图 8 拟合差随迭代次数收敛曲线

Fig.8 Convergence Curve of RMS misfit versus iteration number

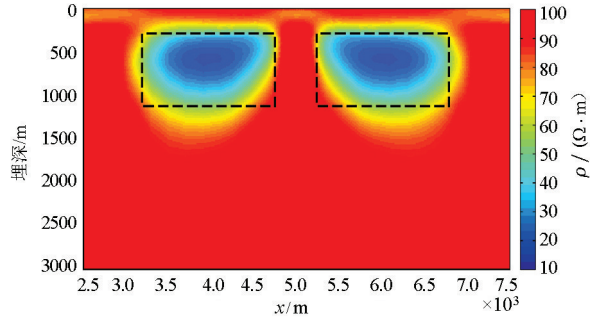


图 9 对两个异常体模型产生的 ZTEM 倾子数据进行反演的结果

Fig.9 The inversion results of ZTEM tipper data generated by two abnormal bodies model

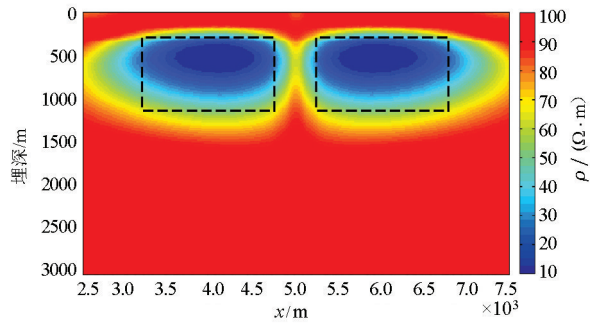


图 10 对两个异常体模型产生的 MT 阻抗数据进行反演的结果

Fig.10 The inversion results of MT tipper data generated by two abnormal bodies model

面。

由图 8 可以看出,ZTEM 倾子反演迭代了 14 次,数据的拟合差从初始值 2.8 一直收敛至 1.2 左右趋于平稳。在将 ZTEM 倾子的反演结果(图 9)与 MT 阻抗的反演结果(图 10)相对比的过程中,可以发现 ZTEM 倾子的反演基本上能够恢复异常体的空间位置、大小和形状,但是对异常体电阻率的恢复结果要稍逊于 MT 阻抗反演,倾子反演的电阻率最低值在 $20\ \Omega \cdot \text{m}$ 左右;而阻抗反演的电阻率最低值可

以达到 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右。然而,在异常体的横向边界的约束方面,从电阻率断面图来看,ZTEM 倾子资料的反演效果都比 MT 阻抗的反演效果好。

4 结论

作为大地电磁测深法中的一个重要参数,倾子数据也可以进行定量解释,本文正是实现了 ZTEM 倾子资料的二维反演,从而获取了地下二维模型的电阻率结构。在将 ZTEM 倾子二维 NLCG 反演的结果与 MT 阻抗二维 NLCG 反演的结果进行对比时,可以发现 ZTEM 倾子二维 NLCG 反演基本上能够恢复异常体的空间位置、大小和形状,但是对异常体电阻率的恢复结果要稍逊于 MT 阻抗二维 NLCG 反演结果;在异常体横向边界的约束方面,ZTEM 倾子反演比 MT 阻抗反演更具优越性。所以本文中的 ZTEM 倾子二维 NLCG 反演算法是可靠且稳定的。

ZTEM 倾子二维 NLCG 反演比较依赖于初始模型的选取。当选取的初始模型的电阻率与背景电阻率相差较大时,反演的结果不是很好;只有当初始模型选取与背景电阻率值相接近的电阻率时,反演才能达到比较好的效果。所以需要预先知道背景电阻率才能得到更好的反演结果。

参考文献 (Reference) :

[1] Mackie R L, Madden T R. Three-dimensional magnetotelluric inversion using conjugate gradients [J]. Geophysics. J. Int., 1993, 115:215 – 229.

[2] Rodi W, Mackie R L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion [J]. Geophysics, 2001, 1 (1) : 174 – 187.

[3] Lin C H, Tan H D, Tong T. Three-dimensional conjugate gradient inversion of magnetotelluric sounding data [J]. Applied Geophysics (in Chinese), 2008, 5 (4) : 314 – 321.

[4] Ward S H. AFMAG—airborne and ground [J]. Geophysics, 1959, 24 (4) : 761 – 787.

[5] Ward S H, O'Donnell J, Rivera R, et al. AFMAG-application and limitation [J]. Geophysics, 1966, 31 (3) : 576 – 605.

[6] Lo B, Zang M. Numerical modeling of Z-TEM (airborne AFMAG) responses to guide exploration strategies [C] // 78th International Exposition and Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2008, 1098 – 1102.

[7] Labson V F, Becker A, Morrison H F, et al. Geophysical exploration with audiofrequency natural magnetic fields [J]. Geophysics, 1985, 50 (4) : 656 – 664

[8] 吴頔.二维及三维倾子响应和异常体识别 [D].长沙:中南大学,2012.

Wu D. 2D and 3D tipper response and abnormal body recognition [D].Changsha: Central South University, 2012.

[9] 余年,王绪本,阚媛珂,等.倾子和视倾子的研究及在断裂解释中的应用 [J].工程地物学报,2007,4 (4) : 275 – 281.

Yu N, Wang X B, Kan Y K, et al. Research on tilter and apparent tilter and its application in fracture interpretation [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 4 (4) : 275 – 281.

[10] 林昌洪,谭捍东,佟拓.倾子资料三维共轭梯度反演研究 [J].地球物理学报,2011,54 (4) : 1106 – 1113.

Lin C H, Tan H D, Tong T. 3D conjugate gradient inversion of dipper data [J]. Applied Geophysics, 2011, 54 (4) : 1106 – 1113.

[11] Holtham E, Oldenburg D W. Three-dimensional inversion of ZTEM data [J]. Geophysical Journal International, 2010, 182:168 – 182.

[12] Holtham E, Oldenburg D W. Three-dimensional inversion of MT and ZTEM data [C] // 80th Ann Internet Mtg, SEG, Expanded Abstracts, 2010:655 – 659.

[13] Wang T, Tan H D, Li Z Q, et al. 3D finite-difference modeling algorithm and anomaly features of ZTEM [J]. Applied Geophysics (in Chinese), 2016, 13 (3) : 553 – 560.

[14] 王绪本.二维大地电磁测深资料处理与反演解释方法研究 [D].成都:成都理工大学,2002.

Wang X B. Research on processing and inversion interpretation method of two-dimensional magnetotelluric sounding data [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2002.

[15] Madden T R. Transmission systems and network analogies to geophysical forward and inverse problems [M]. ONR Technical Report, 1972:72 – 3.

[16] 胡文宝,苏朱刘,陈清礼,等.倾子资料的特征及应用 [J].石油地球物理勘探,1997,32 (2) : 202 – 213.

Hu W B, Su Z L, Chen Q L, et al. Characteristics and application of tilter data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997, 32 (2) : 202 – 213.

[17] 陈小斌,赵国泽,詹艳,等.磁倾子矢量的图示分析及其应用研究 [J].地学前缘,2004,1 (4) : 626 – 636.

Chen X B, Zhao G Z, Zhan Y, et al. Analysis of tipper visual vectors and its application [J]. Geoscience Frontiers, 2004, 1 (4) : 626 – 636.

[18] 陈清礼,胡文宝,李金铭,等.埋藏球体的倾子响应特征分析 [J].石油天然气学报,2007,29 (3) : 75 – 78.

Chen Q L, Hu W B, Li J M, et al. Analysis of tipper response characteristics of buried sphere [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29 (3) : 75 – 78.

[19] 马为.MT 二维正演中辅助场计算新方法研究 [R].中国地震局地质研究所,2007.

Ma W. A new method for calculating auxiliary field in MT two-dimensional forward modeling [R]. Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2007.

[20] 陈小斌.MT 二维正演计算中地形影响的研究 [J].石油物探, 2000, 39 (3) : 112 – 120.

Chen X B. Research on terrain effect in MT two-dimensional forward modeling [J]. Oil Exploration, 2000, 39 (3) : 112 – 120.

Two-dimensional nonlinear conjugate gradient inversion of ZTEM

XU Zhi-Bo¹, TAN Han-Dong²

(1. Civil and Transportation College of Beihua University, Jilin 132013, China; 2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geoscience (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The ZTEM (Z-Axis Tipper Electromagnetics) is a frequency-domain airborne electromagnetic method that results from natural sources. It has the feature that the vertical component of magnetic field is measured from a moving helicopter platform and the horizontal component of magnetic field is measured at a reference station on the ground. In addition, it has the advantages of deep exploration, fast speed, low cost and large coverage area. This paper realizes the 2D finite difference forward modeling and NLCG inversion of ZTEM. The object of the study is the tipper data. The direct calculation of Jacobian matrix is avoided by solving the " quasi-forward " problem in the inversion process. The stability and reliability of the 2D NLCG inversion of ZTEM tipper data are verified by the trial calculation of synthetic data inversion of theoretical model. A comparison with the inversion result of impedance data of magnetotelluric (MT) TE mode shows that the ZTEM tipper inversion is superior to the MT impedance inversion in the constraint of the lateral boundary of the anomalous body.

Key words: Z-Axis Tipper Electromagnetics; tipper; airborne electromagnetic survey; 2D inversion; NLCG

(本文编辑:沈效群)