

doi: 10.11720/wtyht.2015.1.19

仇根根, 张小博, 裴发根, 等. 大地电磁测深反演技术有效性对比试验[J]. 物探与化探, 2015, 39(1): 118–124. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.1.19>

Qiu G G, Zhang X B, Pei F G, et al. Effectiveness of magnetotelluric sounding inversion technique[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1): 118–124. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.1.19>

大地电磁测深反演技术有效性对比试验

仇根根^{1,2}, 张小博^{1,2}, 裴发根^{1,2}, 袁永真^{1,2}, 白大为^{1,2}, 张鹏辉^{1,2}

(1. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 国土资源部 地球物理电磁法探测技术重点实验室, 河北 廊坊 065000)

摘 要: 设计了一个简单的三维模型: 三维低阻异常体和高阻异常体位于一维层状介质模型中, 以“十”字型和“米”字型观测剖面方式作为模拟方式, 开展模型一维、二维、三维反演技术有效性对比试验, 其中一维反演计算采用自适应正则化 (ARIA) 反演, 二维反演计算采用非线性共轭梯度 (NLGG) 反演, 三维反演计算采用 REBOCC 三维反演, 将剖面下方不同的反演结果与原始模型进行对比分析, 发现: 在该模型条件下, 一维和二维反演都能得到反映模型真实信息的结果, REBOCC 三维反演更偏向重建原始模型的宏观电性特征; 在一维反演结果中, 对于深部的电性结构特征, 通常 TE 极化模式的反演结果好于 TM 极化模式, TE/TM 几何平均值反演结果介于前两者之间; 在二维反演结果中, 通常 TM 极化模式的反演结果好于 TE 极化模式, TE/TM 联合模式反演结果与 TM 极化模型相当, 甚至更好; 模型 REBOCC 三维反演相比一维、二维反演更易受反演结果多解性影响, REBOCC 三维反演结果偏向重建原始模型的宏观电性特征。

关键词: 大地电磁法; 一维反演; 二维反演; 三维反演; 层状介质; 数值模拟

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)01-0118-07

大地电磁测深是一种天然电磁场方法, 在 20 世纪 50 年代初由 A. N. Tikhonov 和 L. Cagniard 分别提出。当前, 大地电磁测深法一维、二维反演技术已发展成熟, 并成为实际资料处理和解释中的主要手段^[1-3]。对于大地电磁一维反演, 自 20 世纪 70 年代初期就已开始研究, 至今已出现了许多优秀算法, 常用的一维反演技术包括 Occam 反演、Bostick 反演、高斯-牛顿法、梯度法、广义逆反演、马夸特法、连续介质反演、自适应正则化反演等, 但现今该问题的研究仍在继续, 新的算法仍不断出现^[4-7]。在众多二维大地电磁反演算法中, 现今主要有 3 种方法较为成熟和流行, 即 RRI 反演、OCCAM 反演和共轭梯度法。Siripunvaraporn 和 Egbert 在 OCCAM 算法基础上做了些改进, 提出一种新的反演算法——REBOCC 法 (简化基奥可姆反演), 且经合成数据和实测数据的数值试验表明, 该方法稳定性能高, 计算速度快, 应用前景广阔^[8-11]。大地电磁三维反演研

究随着三维正演计算方法的发展和计算机硬件设备的更新, 正逐步走向实用化阶段, 其主要代表有 OCCAM 三维反演、共轭梯度法极大似然反演、非线性共轭梯度反演、拟线性近似反演、快速松弛反演、积分方程三维反演、贝叶斯统计反演和人工神经网络反演等^[12-14]。

大地电磁测深法利用低维数反演结果逼近解释高维数模型国内外已开展了不少研究工作, 真实的大地构造都是三维的, 实际的一维或二维反演工作都是用一个一维模型或二维模型响应拟合三维真实模型的响应, 用一个一维或二维模型来近似模拟真实的三维构造。关于用一维或二维反演结果逼近解释三维模型的拟合程度、哪一种极化模式的反演结果更接近真实模型、现今的三维反演计算是否真的能准确的反演出真实地下模型等实际问题, 都是值得深入探讨的。

为了了解和掌握一维、二维反演计算逼近解释

收稿日期: 2014-01-23

基金项目: 国家“深部探测技术与实验研究”专项 (SinoProbe-01-04); 国家科技攻关重点项目 (12120114005001); 国土资源部公益性行业科研专项 (201211095-2)

三维真实模型的拟合程度和实际 REBOCC 三维反演计算的反演效果,依据典型的地电特征设计了一个较为简单的三维模型——三维低阻异常体和高阻异常体位于一维层状介质模型当中,以“十”字型和“米”字型观测方式作为模拟方式,开展模型一维、二维、三维反演技术有效性对比试验。其中,一维反演计算采用自适应正则化(ARIA)反演,二维反演计算采用非线性共轭梯度(NLCG)反演,三维反演计算采用 REBOCC 三维反演,将剖面下方不同的反演结果与原始模型进行对比分析,针对一维、二维反演计算逼近解释三维真实模型的拟合程度和实际 REBOCC 三维反演计算的反演效果等实际问题进行探讨分析。

1 三维模型体及反演测线测点的设计

依据较为常见的地电特征设计一个典型的层状地电模型,在其中放置三维低阻、高阻异常体进行三维模型数值模拟。模型第一层模拟浅地表低阻盖层,厚度为 1 077 m,电阻率值为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$;第二层模拟高阻基岩,厚度为 13 981 m,电阻率值为 $5\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$;第三层模拟高阻基岩下方电阻率相对较低的中高阻层,厚度为 63 172 m,电阻率值为 $500\ \Omega\cdot\text{m}$;第四层为最低层,模拟上地幔低电阻岩层,厚度为 125 519 m,电阻率值为 $10\ \Omega\cdot\text{m}$,三维低阻、高阻异常体位于第三层,埋藏深度范围 24 570~32 875 m,厚度为 8 305 m,低阻异常体电阻率值为 $30\ \Omega\cdot\text{m}$,

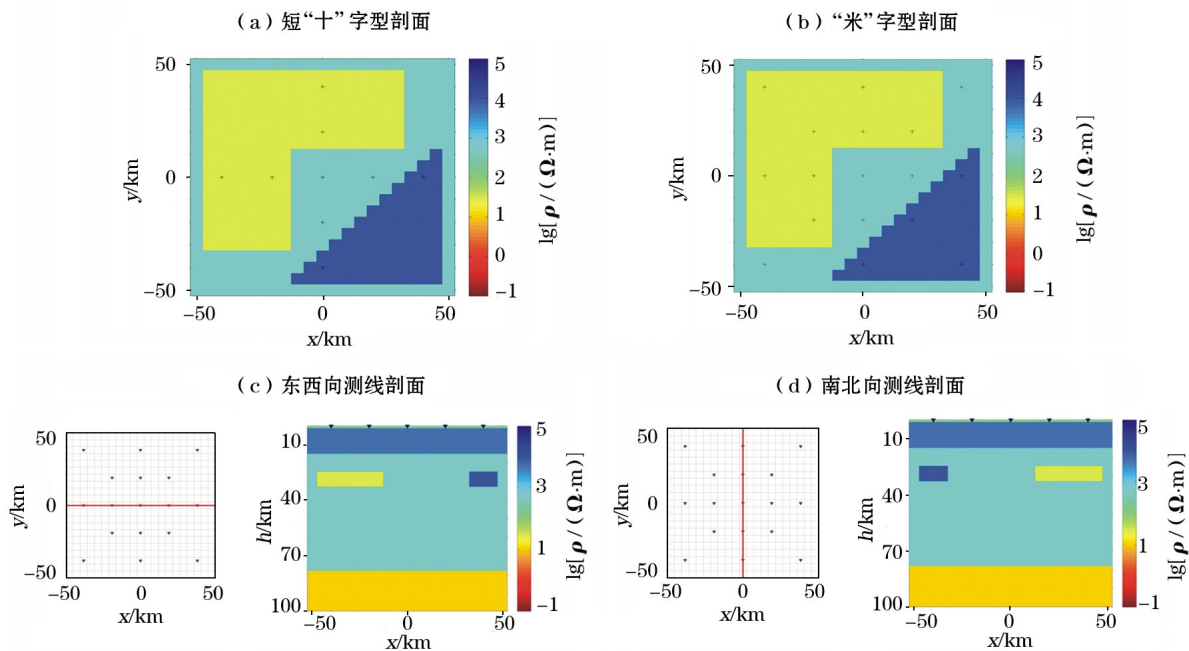


图 1 三维模型体示意

高阻异常体电阻率值为 $10\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,异常体的空间结构形态如图 1 所示。

模拟测点参考东北地区阵列式标准网控制点的测量方式,以短“十”字剖面观测方式作为模拟方式,其中东西向测线命名为 Line_1_WE,南北方向测线命名为 Line_2_SN,测点间距 20 km,东西、南北两条测线共 9 个模拟测点构成一个小面积基本探测单元,短“十”字剖面横跨探测单元内低阻、高阻异常体,测点测线布置图如图 1a 所示。为了模拟分析不同观测方式对三维反演结果的影响,数值模拟结果分析增加“米”字型观测方式(图 1b)的三维反演结果一起进行对比分析。在进行模型三维正反演计算时,中间区域单元网格剖分间距 10 km,外围以 2 倍步长往外扩充,在垂直深度上,首层厚度剖分 50 m,

然后以 1.1 倍步长往下递增,直到剖分深度超过 200 km,最终将网格离散化得到单元数为 $25\times25\times63$ 的三维网格。正反演计算使用频点 40 个,均匀分布在 320~1/2000 Hz 频段范围的对数域中。三维模型正反演计算时,模型往外剖分距离足够远,模型边界效应影响可忽略不计,图 2 为两种观测方式整体设计模型。

首先对模型进行三维正演得到模型的三维正响应数据,再进行不同极化模式的一维、二维反演计算,同时开展短“十”字剖面型和“米”字型三维反演计算,将测线下方不同模式的反演结果与真实模型进行对比分析,开展模型一维、二维、三维反演技术有效性对比试验。

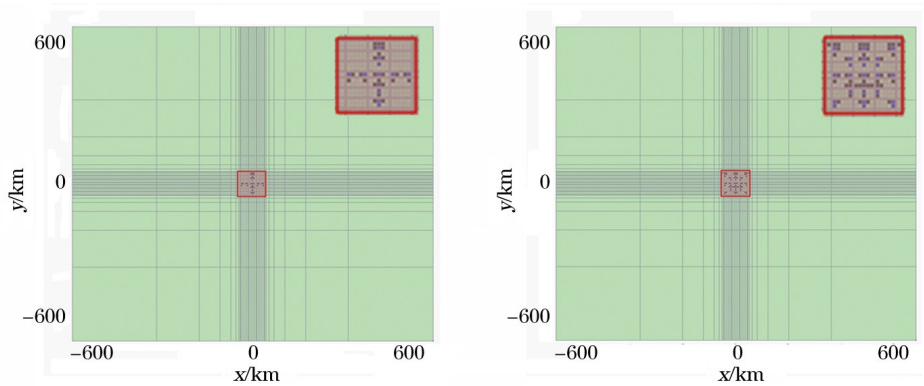


图 2 短“十”字剖面型(左)和“米”字型(右)模拟方式示意

2 一维反演近似情况

按照测线的展布情况,对于 Line_1_WE 线,此时三维 XY 模式相当于二维主轴方向的 TE 模式, YX 模式相当于 TM 模式,对于 Line_2_SN 线,波阻抗旋转-90°之后,此时三维 XY 模式相当于二维主轴方向的 TE 模式, YX 模式相当于 TM 模式。一维反演计算方法选用陈小斌研究员最新研制的自适应正则化反演算法^[4]。自适应正则化反演是一种方差规范化方法,这种方法不仅使得数据方差在反演中更容易处理,而且使得数据方差的影响在数据目

标函数中封闭,不影响数据目标函数和模型约束目标函数在总目标函数中的权重关系,从而使得正则化因子更容易调整,该算法具有反演稳定性好、模型分辨率高等特性,由于不需要像 OCCAM 反演那样每次迭代需要进行多次反演方程的求解和正演计算,因而自适应正则化反演具有较快的计算速度。图 3、图 4 分别为 Line_1_WE 线、Line_2_SN 线的一维反演结果。

从 Line_1_WE 测线的一维反演结果中可以看出,XY 极化模式、YX 极化模式、XY/YX 几何平均值三者一维反演结果非常相似,均能较好地反演出

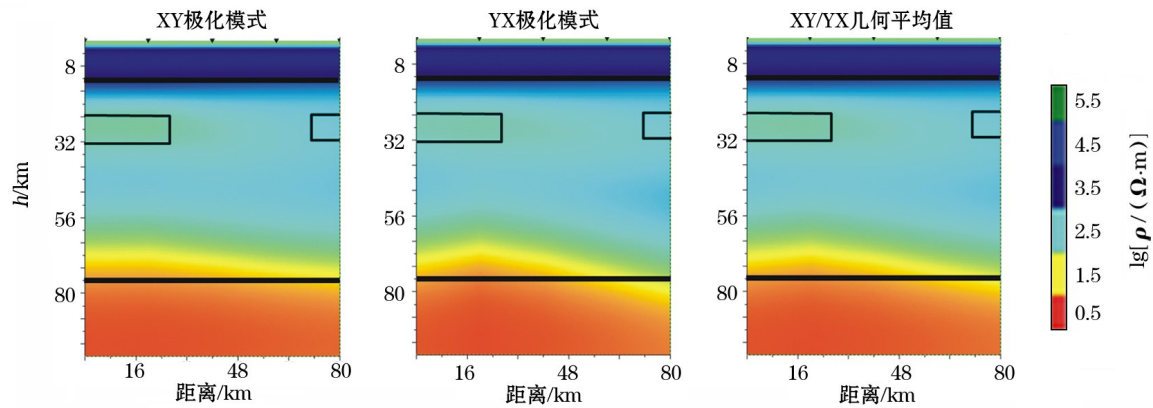


图 3 Line_1_WE 线的一维反演结果

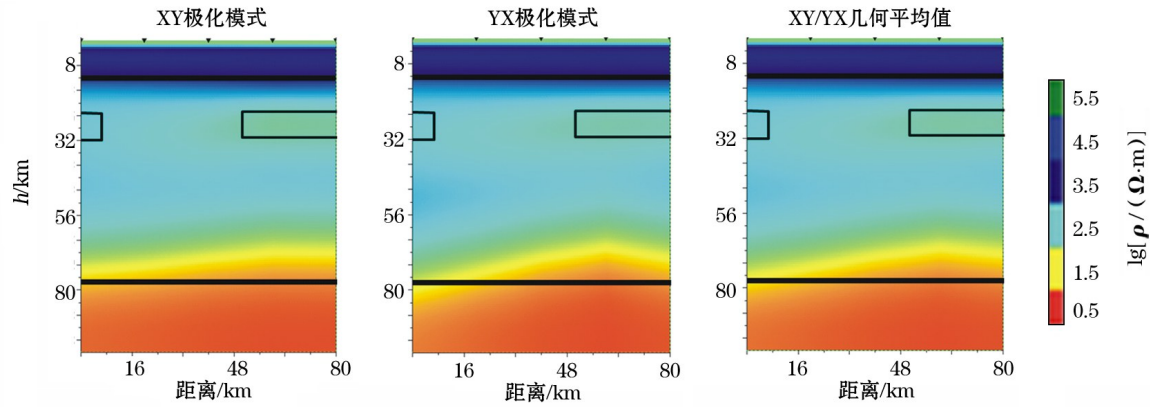


图 4 Line_2_SN 线的一维反演结果

真实模型的结构形态。由于浅地表低阻盖层和高阻基岩部分模型为一维层状构造,三者反演结果在地表浅部完全相同,反演结果与真实模型也基本完全吻合;对于三维低阻异常体而言,三者反演结果均能较好的反映出异常体的存在,从三维低阻异常体模型的空间分辨率来看,XY 极化模式的反演结果模型横向分辨率稍高于 YX 极化模式,XY/YX 几何平均值的反演效果介于前两者之间;对于三维高阻异常体而言,受高阻异常体异常范围较小,同时大地电磁法本身对高阻异常体的响应相对薄弱,反演结果对三维高阻异常体基本没有响应;对于深部的低阻层而言,深部低阻层顶界面受上部三维异常体影响出现一定的起伏构造形态,从深部反演效果来看,XY 极化模式的反演结果优于 YX 极化模式的反演结果,XY/YX 几何平均值的反演效果介于前两者之间。将 Line_2_SN 测线不同极化模式的反演结果进行同样的对比分析,从反演结果中可以看出,反演结果表现出与 Line_1_WE 测线相同的反演特征和规律。

3 二维反演近似情况

将模型三维正演的响应数据按照测线的展布情

况分别进行不同极化模式的二维反演计算,反演算法选用非线性共轭梯度(NLCG)反演,采用的反演软件是陈小斌研究员开发的 MTPioneer 反演软件。“非线性共轭梯度反演”根据最优化问题和线性代数方程组的求解理论,若系数矩阵 A 为对称正定矩阵,非线性共轭梯度法是求解具有大型系数矩阵的线性代数方程组的有效方法。对于二维大地电磁场的有限差分数值模拟问题,所形成的线性代数方程组具有大型系数矩阵,因而可运用非线性共轭梯度迭代算法求解该方程组,实现最小构造反演。这是一种不求偏导数矩阵的反演方法,只计算偏导数矩阵对特征矢量的作用。除避开了大型线性方程组的完全求解外,还避免了完全计算雅可比矩阵,而只计算雅可比矩阵对指定矢量的作用,因此比一般线性反演法大大节省了内存和计算时间。非线性共轭梯度(NLCG)反演是目前二维反演计算中最常用的算法之一^[8]。图 5、图 6 分别为 2 条测线的二维反演结果。

从 Line_1_WE 测线的二维反演结果中可以看出,对于浅地表的低阻盖成和高阻基岩部分,XY 极化模式、YX 极化模式、XY/YX 联合模三者的二维反演结果基本相同,反演结果与真实模型基本吻合;对

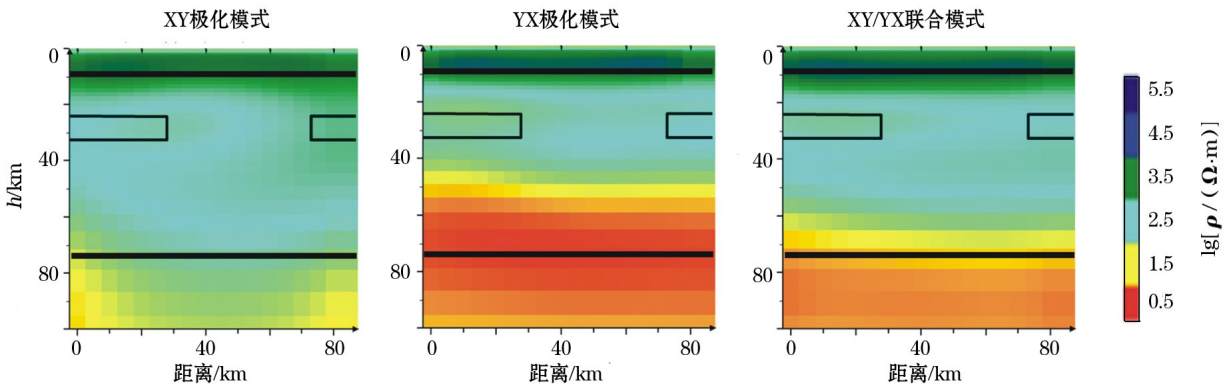


图 5 Line_1_WE 线的二维反演结果

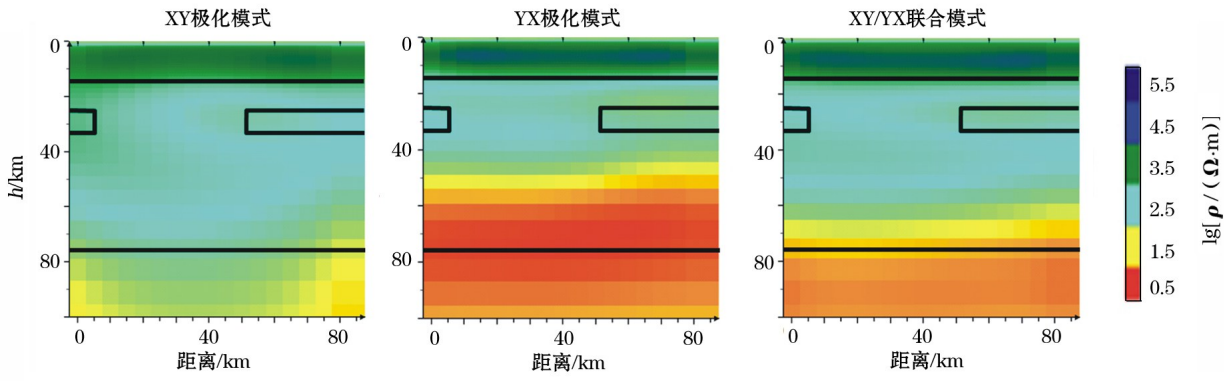


图 6 Line_2_SN 线的二维反演结果

于三维低阻异常体而言,三者的二维反演结果均能较好地反映出异常体的存在;对于三维高阻异常体而言,受高阻异常体异常响应范围较小,三者的二维反演结果对三维高阻异常体没有响应;对于深部的低阻层而言,XY 极化模式对深部低阻层反映较弱,能微弱的显示深部位置存在低阻体信息,YX 极化模式对深部低阻层反映灵敏,能有效的反映低阻层的存在,但对深部低阻体有放大异常范围趋势,低阻层顶界面埋深基本位于异常范围的中心,相比 XY 极化模式的二维反演结果,反演结果更能表现剖面整体宏观电性特征,XY/YX 联合模式的二维反演结果则结合了前两者的优点,反演结果与设计模型最为接近。将 Line_2_SN 测线不同极化模式的二维反演结果进行同样的对比分析,从反演结果中可以看出,反演结果表现出与 Line_1_WE 测线相同的反演特征和规律。

4 三维反演情况

在众多三维反演算法中,目前在国内外应用广泛的是 Siripunvaraporn 推出的 REBOCC 三维反演,该算法把反演问题从模型空间转换到数据空间,把解表示为由模型协方差平滑过的灵敏度矩阵行的线

性组合,这样使原本为 $M \times M$ 阶的方程转换为 $N \times N$ 阶的方程,因为模型参数 M 比数据个数 N 大得多,所以在 CPU 计算时间和内存要求方面有了很大的下降^[15]。将设计的模型先进行三维正演计算,然后再以 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 的均匀半空间作为初始模型进行短“十”字剖面观测方式和“米”字型观测方式的三维反演计算,图 7、图 8 为 2 条测线下方不同观测方式下的三维反演结果。

图 7 中,“十”字型观测方式三维反演结果 RMS 值为 1.21,“米”字型观测方式三维反演结果 RMS 值为 1.23。可以看出,二者的反演结果整体形态结构相似,仅表现在反演电阻率值上存在一定差别,说明基本探测单元内测线的反演结果与地表不同的观测方式有一定的影响关系,但不同的观测方式对测线下方反演结果中结构形态的改变影响不大。从图 7 中可以看出,对于浅地表低阻盖层和高阻基岩部分,反演结果与真实模型基本一致,对高阻基岩下方的低阻异常体和低阻层,受反演结果多解性影响,三维反演结果中异常体的埋深位置与原始模型有一定的出入,三维低阻异常体和低阻层均向上偏离原来的真实埋深位置。从反演结果的整体形态来看,反演结果在 45 km 以上部分与原始模型的整体形态结构

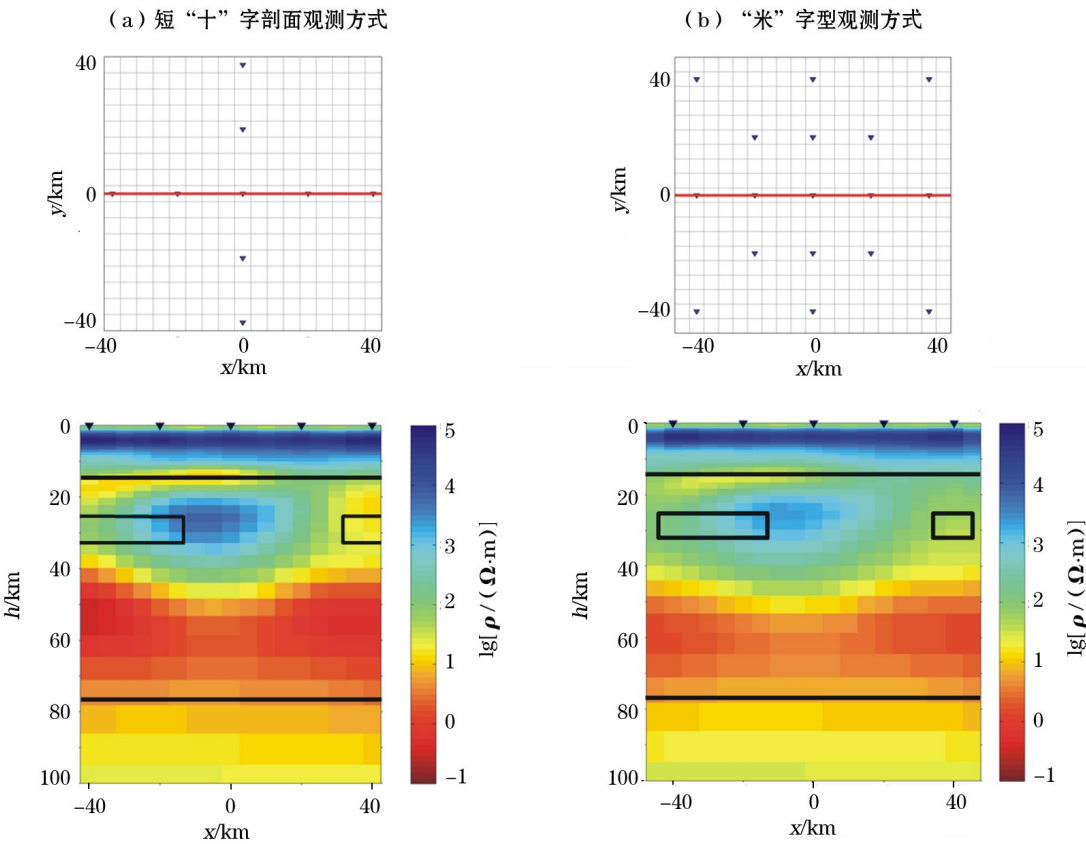


图 7 Line_1_WE 线不同观测方式的三维反演结果

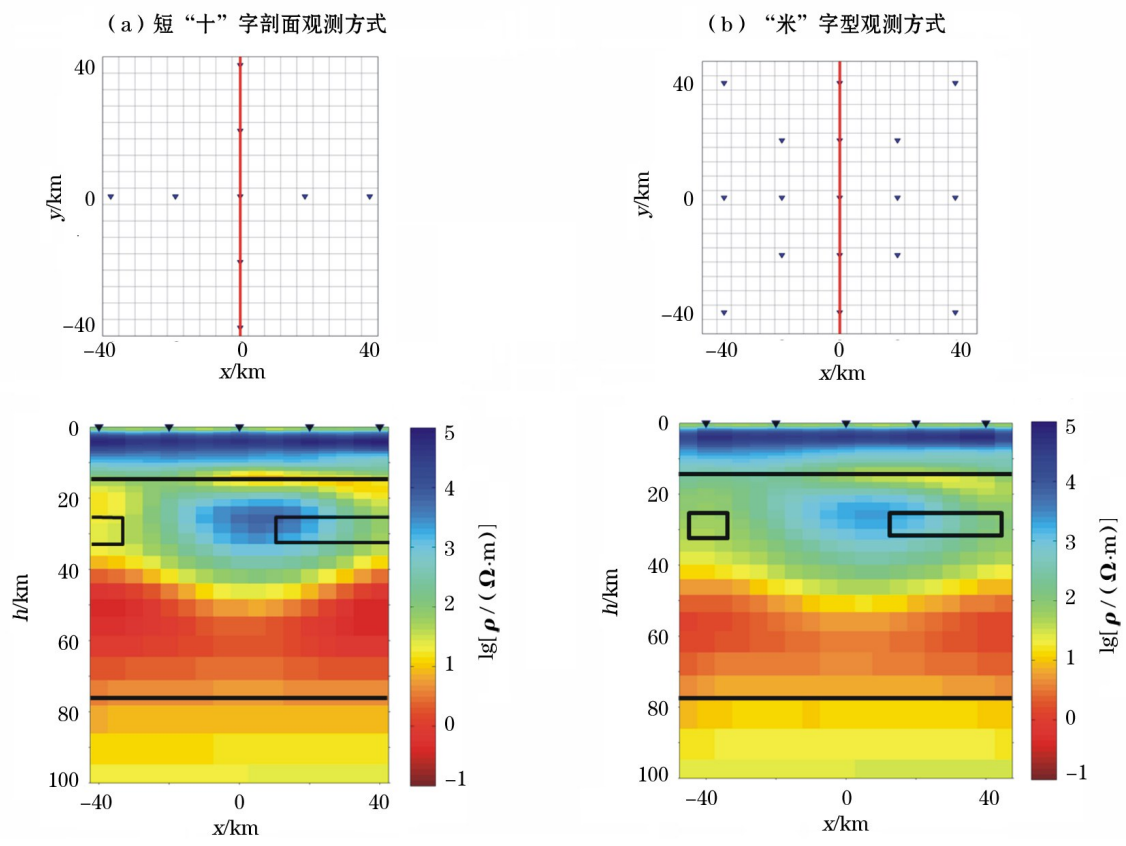


图 8 Line_2_SN 线不同观测方式的三维反演结果

较为相似,能反映低阻异常体和低阻层的存在,但埋深位置不准确。

图 8 显示,Line_2_SN 线的反演结果表现出与 Line_1_WE 线相同的反演特征和反演规律。

5 结论

本次模型数值模拟试验,得出以下结论:①一维和二维反演都能得到反映模型真实信息的结果,文中所设计的模型 REBOCC 三维反演偏向于重建原始模型的宏观电性特征;②在一维反演结果中,对于深部的电性结构特征,通常 TE 极化模式的反演结果好于 TM 极化模式,TE/TM 平均值反演结果介于前两者之间;③在二维反演结果中,通常 TM 极化模式的反演结果好于 TE 极化模式,TE/TM 联合模式反演结果与 TM 极化模型相当;④REBOCC 三维反演计算相比一维、二维反演计算更易受反演结果多解性影响;⑤实际的地质环境复杂多样,为了尽可能准确的得到真实地下模型,应开展不同维数,不同模式反演结果的综合对比研究。

上述反演计算中,一维,二维和三维反演都分别只采用了一种反演方法,由于三维正演计算量非常大,笔者只设计了一个较为简单的三维模型,这给本

次研究带来一定的限制;此外,由于反演的非唯一性,反演结果可能会随着反演方法的不同存在一定的差别。关于多个复杂模型的更详细的研究,拟作进一步研究。

致谢:中国地质大学(北京)魏文博教授、金胜教授、叶高峰副教授对本次研究工作提供了宝贵支持,表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] 韩波,胡祥云,何展翔,等.大地电磁反演方法的数学分类[J].石油地球物理勘探,2012(1):177-188,201.
[2] 陈向斌,吕庆田,张昆.大地电磁测深反演方法现状与评述[J].地球物理学进展,2011(5):1607-1619.
[3] 杨长福,徐世浙.国外大地电磁研究现状[J].物探与化探,2005,29(3):243-247.
[4] 陈小斌,赵国泽,汤吉,等.大地电磁自适应正则化反演算法[J].地球物理学报,2005(4):937-946.
[5] 冯思臣,王绪本,阮帅.一维大地电磁测深几种反演算法的比较研究[J].石油地球物理勘探,2004,05:594-599,498-628.
[6] 徐世浙,刘斌.大地电磁一维连续介质反演的曲线对比法[J].地球物理学报,1995,05:676-682.
[7] 梁宏达.大地电磁反演方法对比研究[J].工程地球物理学报,2012,05:537-543.
[8] 刘芳,秦经纬,朱威.二维大地电磁反演方法对比研究[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2013(1):324-325.

[9] 戴前伟,杨坤平,王洪华.高频大地电磁法对薄层探测能力的分析[J].工程勘察,2013(4):90-96.

[10] 刘苗,吴健生,于鹏,等.基于二维小波分解的 MT 二维反演方法[J].物探与化探,2009,33(3):337-341.

[11] 杨静,陈小斌.剖面长度对大地电磁二维 TM 模式反演的影响[J].地震地质,2010(3):372-381.

[12] 林昌洪,谭捍东,佟拓.大地电磁面积性资料和稀疏测线资料的三维反演解释[J].现代地质,2012(6):1185-1192.

[13] 尹兵祥,王光镔.大地电磁阻抗张量正则分解的地质含义分析[J].[J].地球物理学报,2001(2):279-288.

[14] Pu X H. Three-dimensional numerical modeling of Geo-Electromagnetic induction phenomena[D].Department of Physics and Astronomy, University of Victoria, Canada,1994.

[15] Siripunvaraporn W, Egbert G, Lenbury Y, et al. Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2005, 150(1-3):3-14.

Effectiveness of magnetotelluric sounding inversion technique

QIU Gen-Gen^{1,2}, ZHANG Xiao-Bo^{1,2}, PEI Fa-Gen^{1,2},
YUAN Yong-Zhen^{1,2}, BAI Da-Ming^{1,2}, ZHANG Peng-Hui^{1,2}

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Detection Technology of Ministry of Land and Resources, Langfang 065000, China)

Abstract: A simple three-dimensional model, a low-resistivity abnormal body and a high resistance abnormal body located in one-dimensional layered medium were designed in this paper. The authors used the "+" and "*" type observation profiles as the analog form to carry out the comparative experimental study of the effectiveness of MT 1D, 2D, 3D inversion. The authors employed adaptive regularization (ARIA) to perform 1D inversion, and adopted nonlinear conjugate gradient (NLGG) to conduct 2D inversion and REBOCC to carry out 3D inversion. The comparison of the different inversion results below the profile with the original model shows that 1D and 2D inversion can be reflected in the results of real model information, while 3D inversion of REBOCC tends to build a three-dimensional model of macroscopic electrical characteristics. In the 1D inversion results, as for the deep electrical structure, the inversion result shows that the TE polarization mode is better than TM polarization mode, and the combination mode of TE and TM has a medium result between the TE and TM. In the 2D inversion results, usually the TM polarization mode is better than TE polarization mode, and the inversion results of combination mode of TE with TM are almost equal with the TM polarization mode inversion results, or even better. In the 3D REBOCC inversion results, due to the influence of multiple solutions on inversion results, the 3D inversion of REBOCC tends to build a three-dimensional model of macroscopic electrical characteristics.

Key words: magnetotelluric survey; 1D inversion; 2D inversion; 3D inversion; layered media; Numerical simulation

作者简介: 仇根根(1984-),男,硕士,主要工作方向为大地电磁法方法技术的研究与应用。E-mail:qiugengen@igge.cn