

The Characteristics and Effects of Anomalous Body on Magnetotelluric Tripper Responses

Xiong Li¹, Zhonghua Yuan¹, Xiaozhong Tong^{1,2*}

¹School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan

²Key Laboratory of Non-Ferrous Resource and Geological of Hunan Province, Central South University, Changsha Hunan

Email: *csumaysnow@163.com

Received: May 30th, 2018; accepted: Jun. 15th, 2018; published: Jun. 22nd, 2018

Abstract

In the two-dimensional geo-electric model, the tipper responses of magnetotelluric (MT) depend on the numerical simulation of the TE mode, which can reflect the horizontal distribution of the body and can provide for qualitative interpretation of field data. Because of the shielding effect on electromagnetic waves, the low-resistivity cover can reduce the detectability of magnetotelluric sounding method. The low hindrance cover model and the model without low resistance cover are calculated, and the low resistance cover layer has no influence on the qualitative analysis of the magnetotelluric response data, but it has a great influence on the qualitative analysis of the apparent resistivity data. At the same time, for the simulation calculation of the static displacement model, the lateral distribution of the inhomogeneous body can be reflected by the real part, the imaginary part and the amplitude of the tilting response, and the lateral in-homogeneity of the surface inhomogeneous body can be distinguished.

Keywords

Magnetotelluric/MT, Tripper Responses, Numerical Simulation, Low-Resistivity Cover, Detectivity

大地电磁倾子响应的异常规律及影响分析

李 雄¹, 袁中华¹, 童孝忠^{1,2*}

¹中南大学地球科学与物理工程学院, 长沙

²中南大学“有色资源与地质灾害探查”湖南省重点实验室, 长沙

Email: *csumaysnow@163.com

收稿日期: 2018年5月30日; 录用日期: 2018年6月15日; 发布日期: 2018年6月22日

*通讯作者。

摘要

在二维地电模型中,大地电磁测深的倾子响应依赖于TE极化模式的数值模拟问题,能很好地反映地电构造的水平非均匀性,可作为复杂构造的表征。低阻覆盖层对电磁波具有屏蔽效应,会降低大地电磁测深的探测能力。通过对存在低阻覆盖层模型与不存在低阻覆盖层模型进行了正演计算,低阻覆盖层对于定性分析大地电磁的倾子响应资料是不存在影响的,而对于定性分析视电阻率资料的影响较大。同时,对静位移模型的模拟计算,倾子响应的实部、虚部和振幅均能反映出不均匀体的横向分布情况,且能分辨出地表不均匀体的横向不均匀性。

关键词

大地电磁测深, 倾子响应, 数值模拟, 低阻覆盖层, 探测能力

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大地电磁(Magnetotelluric, 简称 MT)是以天然电磁场为场源,通过在地表观测相互正交的电磁场分量来研究地球内部电性结构的一种重要的地球物理手段。大地电磁场具有很大的能量和极宽的频带范围,可以穿过巨厚的岩石圈,能为研究几十公里乃至数百公里深的地壳与上地幔提供信息[1]。大地电磁场的频带很宽,根据趋肤效应的原理,对应的探测深度的范围就很大,用它可以解决较多的地质问题,如大尺度地质单元的电磁感应研究、深部地壳地幔电性结构研究及壳幔中高导层的检测、油气资源普查、地热资源勘查、天然地震活动前兆监测以及地下水资源勘查和环境保护等[2] [3] [4] [5]。

大地电磁观测资料可以提供 20 多个参数供地质解释之用,但目前用于定性解释与定量解释的主要参数是视电阻率和阻抗相位,迫切需要借助其它参数来研究地下构造[6]。倾子响应能很好地反映地电构造的水平非均匀性,可作为复杂构造的表征,因此在构造解释中可以起到十分重要的作用[7] [8] [9]。因此,开展大地电磁倾子响应的异常规律特点及影响分析,有着重要的理论意义与实际意义。

2. 大地电磁倾子响应计算

在二维、三维地电模型中,磁场垂直分量 $H_z \neq 0$, H_z 与两个磁场水平分量 H_x 和 H_y 之间存在如下的复系数线性关系[10]:

$$H_z = T_{zx}H_x + T_{zy}H_y = \begin{bmatrix} T_{zx} & T_{zy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{T} = [T_{zx}, T_{zy}]$, 称为倾子响应, 也叫做地磁转换函数。

假定地下电性结构是二维的,取走向为 x 轴正向, y 轴与 x 轴垂直,保持水平, z 轴垂直向下。根据谐变场的 Maxwell 方程组,可以导出两组独立的电磁场分量,称它们为 TE 极化模式和 TM 极化模式。

TE 极化模式:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x \\ H_y = \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} \\ H_z = -\frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial y} \end{cases} \quad (2)$$

TM 极化模式:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega\mu H_x \\ E_y = \frac{1}{\sigma} \frac{\partial H_x}{\partial z} \\ E_z = -\frac{1}{\sigma} \frac{\partial H_x}{\partial y} \end{cases} \quad (3)$$

式中 ω 为角频率, σ 和 μ 为介质的电导率和磁导率。

从式(2)和式(3)可知: H_z 只存在于 TE 极化模式中。因此, 二维地电模型的倾子响应依赖于 TE 极化模式下的电磁场求解, 从而有

$$T_{zy} = \frac{H_y}{H_z} = -\frac{\frac{\partial E_x}{\partial z}}{\frac{\partial E_x}{\partial y}} \quad (4)$$

在二维地电模型中, 电场 E_x 满足的偏微分方程为

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + i\omega\mu\sigma E_x = 0 \quad (5)$$

为了解亥姆霍兹方程(5), 我们还必须给出相应的边界条件, 如图 1 所示。

考虑到二维大地电磁倾子响应只依赖于 TE 极化模式的正演计算, 我们这里给出 TE 极化模式的边界条件:

1) 上边界 $z = z_{\min}$ 离地面足够远, 使异常场在 z_{\min} 上为零, 以该处的 E_x 为 1 单位

$$E_x \Big|_{z=z_{\min}} = 1 \quad (6)$$

2) 下边界 $z = z_{\max}$ 以下为均质岩石, 局部不均匀体的异常场在 z_{\max} 上为零, 电磁波在 z_{\max} 以下的传播方程为

$$E_x = E_x^* e^{-kz} \quad (7)$$

其中 E_x^* 是常数、 $k = \sqrt{-i\omega\mu\sigma}$, σ 是 z_{\max} 以下岩石的电导率。

式(7)对 E_x 求偏导, 即得 z_{\max} 处的边界条件为

$$\left(\frac{\partial E_x}{\partial z} + kE_x \right) \Big|_{z=z_{\max}} = 0 \quad (8)$$

3) 取左右边界 $y = y_{\min}$ 、 $y = y_{\max}$ 离局部不均匀体足够远, 电磁场在 y_{\min} 、 y_{\max} 上左右对称, 其上的边界条件是

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} \Big|_{y=y_{\min}} = \frac{\partial E_x}{\partial y} \Big|_{y=y_{\max}} = 0 \quad (9)$$

根据电场 E_x 满足的偏微分方程以及相应的定解条件, 利用有限差分法可以得到离散化的电场值 E_x 。

3. 倾子响应特点分析

3.1. 简单异常体模型

选取的单个异常体模型如图 2 所示, 均匀半空间(电阻率值为 $100 \Omega\cdot\text{m}$)存在一个低阻异常体(电阻率值为 $10 \Omega\cdot\text{m}$), 异常体在水平方向上的位置为 3 km 至 5 km 之间、深度方向上的位置为 -1 km 至 -3 km 之间。正演模拟过程中, 观测点数为 33 个(点距 0.25 km), 采用的记录频点为 40 个。

单个异常体模型的倾子响应结果(包括实部、虚部和振幅)如图 3 所示。从图上可以很好的判别出异常体的横向分布情况, 说明倾子响应可作为定性分析判别地电模型的横向不均匀性。同时, 在倾子响应的实部等值线图中, 横向不均匀体的位置介于实部最大值和最小值之间的区域。

3.2. 地垒构造模型

构制的第二个模型为地垒构造地电模型, 如图 4 所示。均匀半空间的电阻率值设置为 $100 \Omega\cdot\text{m}$, 地垒构造的电阻率值设置为 $1 \Omega\cdot\text{m}$ 。

图 5 为计算所得的地垒构造模型倾子响应拟断面图(包括倾子响应的实部、虚部和振幅), 从倾子响应

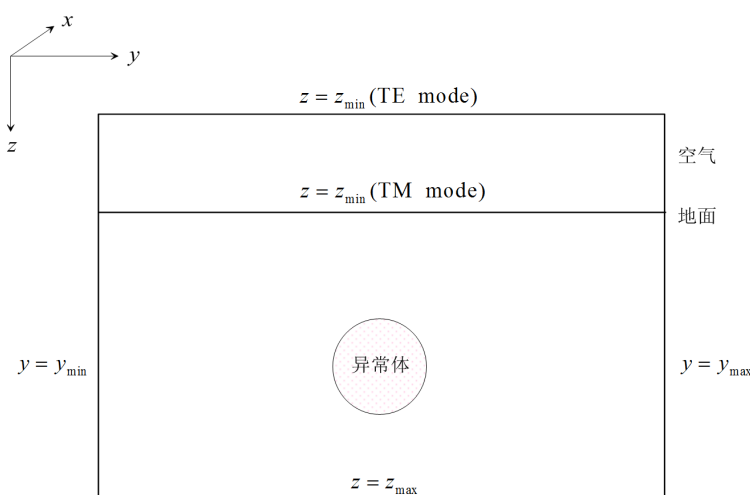


Figure 1. Boundary conditions of 2D geo-electric model

图 1. 二维地电模型的边界示意图

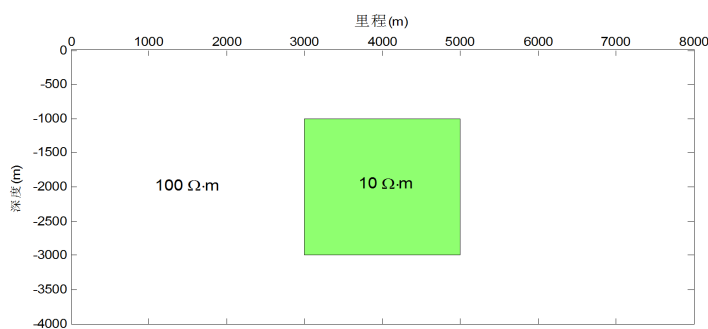


Figure 2. Simple model with a low resistivity anomaly

图 2. 简单电阻率异常体模型

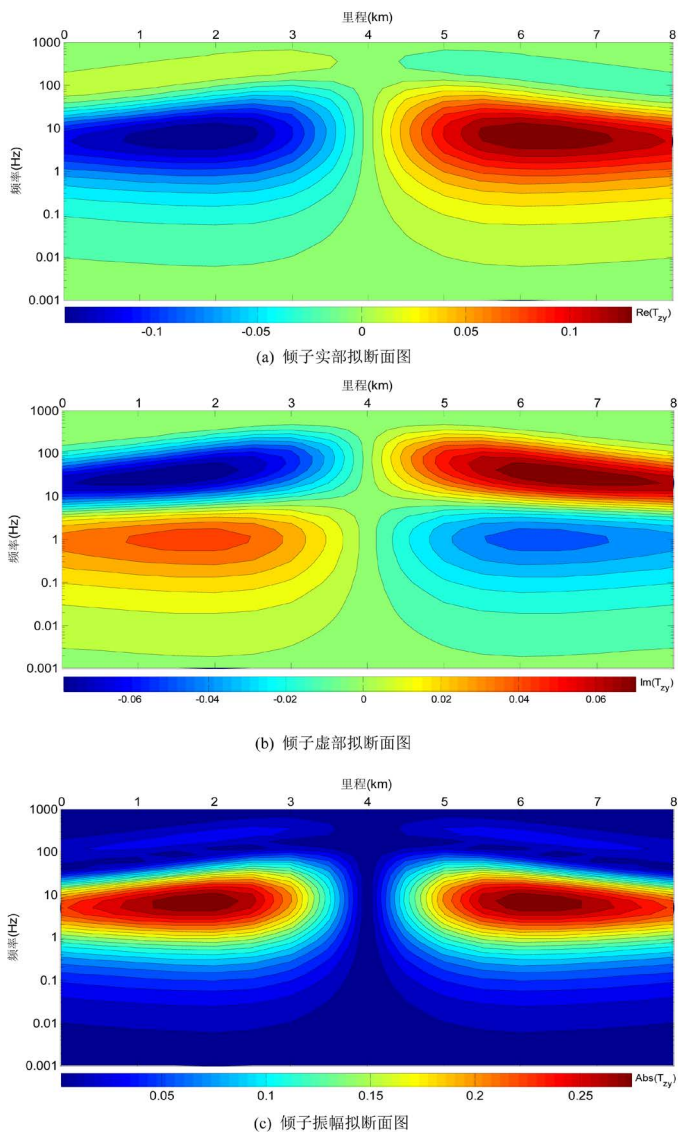


Figure 3. MT tripper responses for the simple model with finite difference method

图 3. 单个异常体模型的 MT 倾子响应差分模拟结果

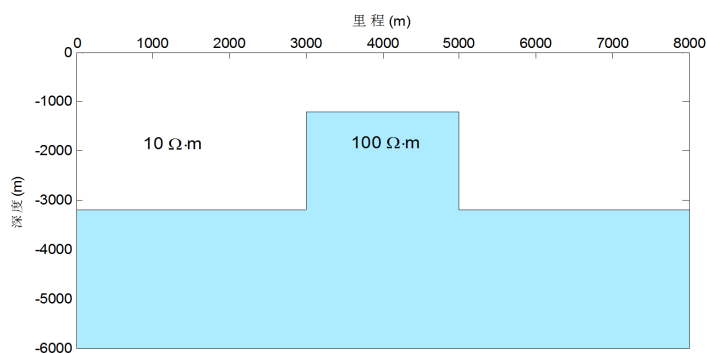


Figure 4. 2D host structure model

图 4. 二维地垒构造模型

拟断面图上可以定性判别出地垒构造的横向非均匀性。

4. 倾子响应的影响分析

4.1. 低阻覆盖层影响

选取的地电模型如图 6 所示,均匀半空间(电阻率值为 $100 \Omega\cdot\text{m}$)存在低阻异常体(电阻率值为 $10 \Omega\cdot\text{m}$),

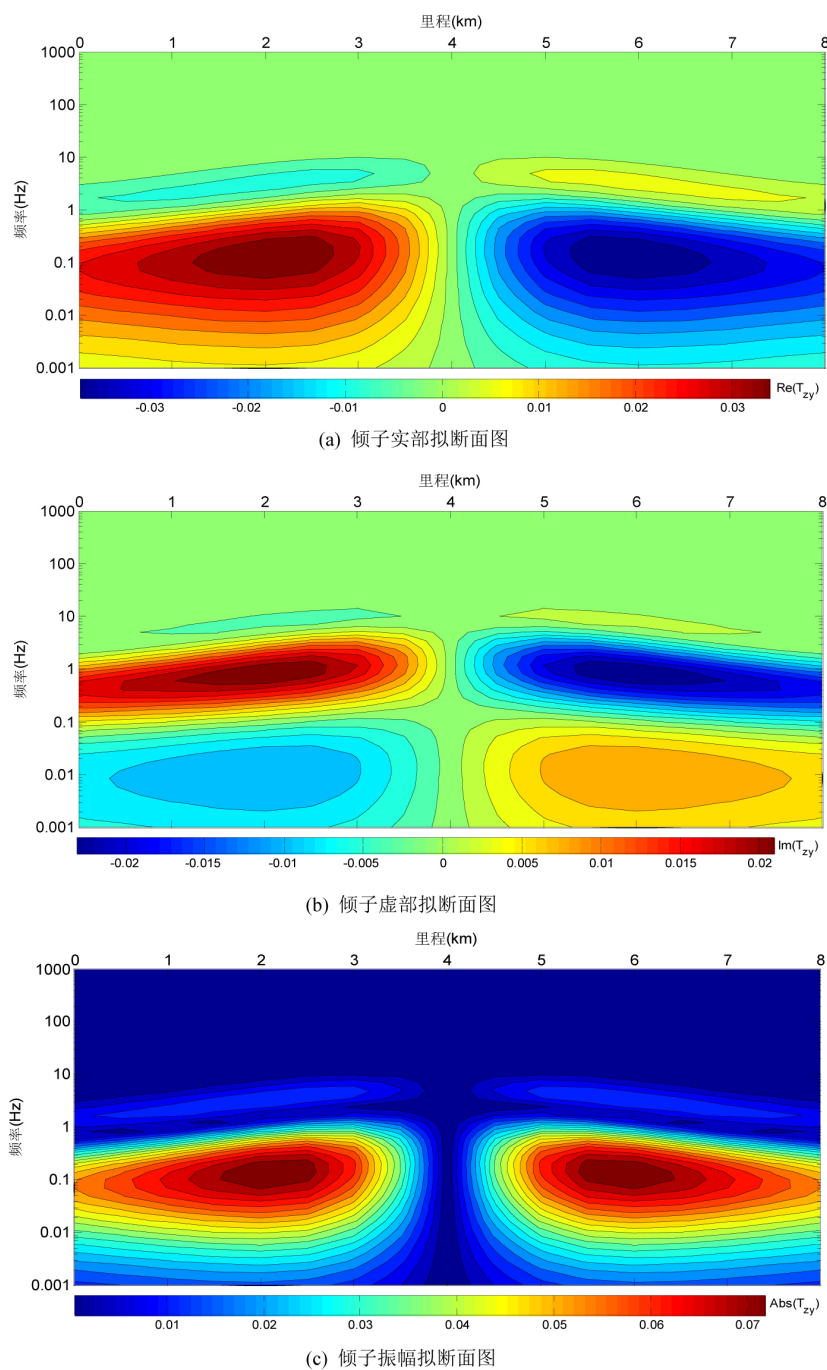


Figure 5. MT tripper responses for the host structure model with finite difference method
图 5. 地垒构造模型的 MT 倾子响应差分模拟结果

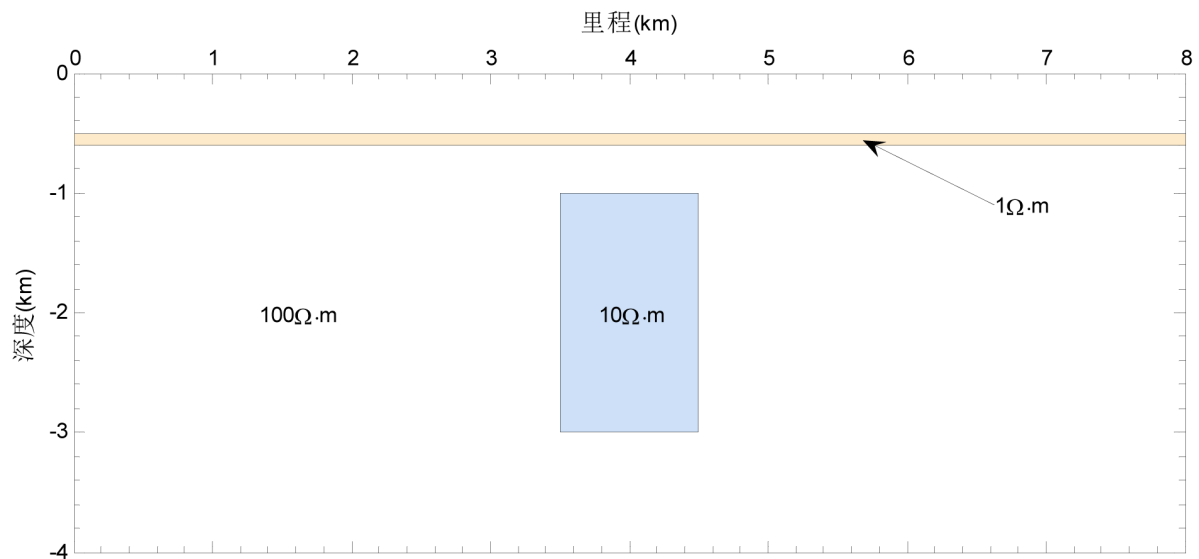


Figure 6. Sketch of a low-resistivity cover model

图 6. 低阻覆盖层模型示意图

在深度-500 m 处存在一低阻覆盖层，其电阻率值为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 、厚度为 100 m。

数值模拟过程中，分别对存在低阻覆盖层模型与不存在低阻覆盖层模型进行了正演计算。当不存在低阻覆盖层时，视电阻率拟断面图(见图 7(a))很好的反映出低阻异常体的分布情况，倾子响应拟断面图(见图 7(c)、(e)、(g))能反映出不均匀体的横向分布情况；当存在低阻覆盖层时，视电阻率拟断面图(见图 7(b))已经很难反映出低阻异常体的分布情况，但倾子响应拟断面图(见图 7(d)、(f)、(h))仍然可以反映出异常体的横向不均匀分布情况。所以可知，低阻覆盖层对于定性分析大地电磁的倾子响应资料是不存在影响的，而对于定性分析视电阻率资料的影响较大。

4.2. 静位移模型的倾子响应分析

选取的静位移模型如图 8 所示，均匀半空间(电阻率值为 $100 \Omega \cdot \text{m}$)存在低阻异常体(电阻率值为 $10 \Omega \cdot \text{m}$)，而近地表处存在一个电阻率值为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 的低阻不均匀体，低阻不均匀体厚 10 m、宽 1000 m。

图 9 为模拟所得的倾子响应拟断面图，倾子响应的实部、虚部和振幅均能反映出不均匀体的横向分布情况，并且还能分辨出地表不均匀体的横向不均匀性。因此，静态位移模型对二维倾子响应是没有影响的，这也与 TE 极化模式的大地电磁响应不存在静态效应是吻合的。

5. 结语

1) 对典型二维地电模型的倾子响应进行了模拟，倾子响应能较好的判别出异常体的横向分布情况，且横向不均匀体的位置介于倾子实部的最大值与最小值之间，这能为实测数据的定性解释提供指导作用。

2) 低阻覆盖层对于定性分析大地电磁的倾子响应资料是不存在影响的，而对于定性分析视电阻率资料的影响较大。

3) 大地倾子电磁倾子响应的异常值很小，而且容易受到环境噪声的干扰，导致倾子响应的信噪比较低。因此，利用倾子响应作定性解释与定量解释时，一定要慎重。

4) 若将大地电磁倾子响应与二维大地电磁反演技术相结合，必能充分发挥大地电磁的技术优势和特点，进而能完善大地电磁基本理论和应用技术。

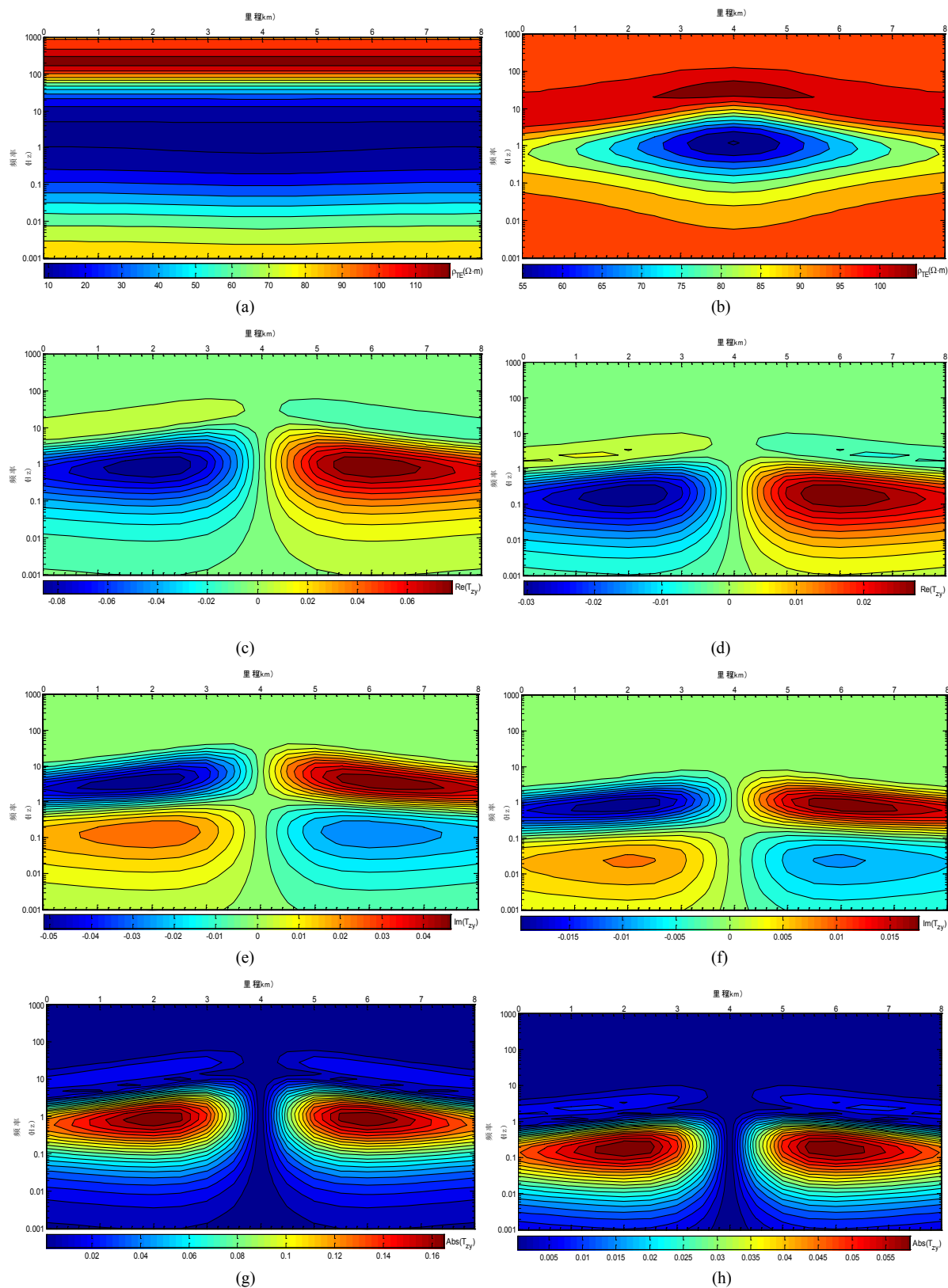


Figure 7. MT tripper responses for the low-resistivity cover model with finite difference method
 图 7. 低阻覆盖层模型的大地电磁响应数值模拟结果

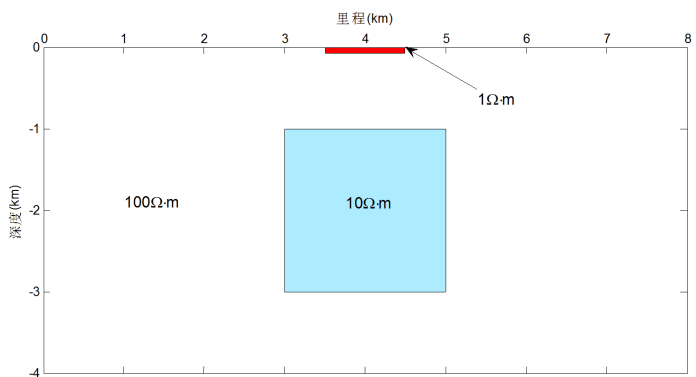


Figure 8. The static geo-electric model
图 8. 静位移地电模型

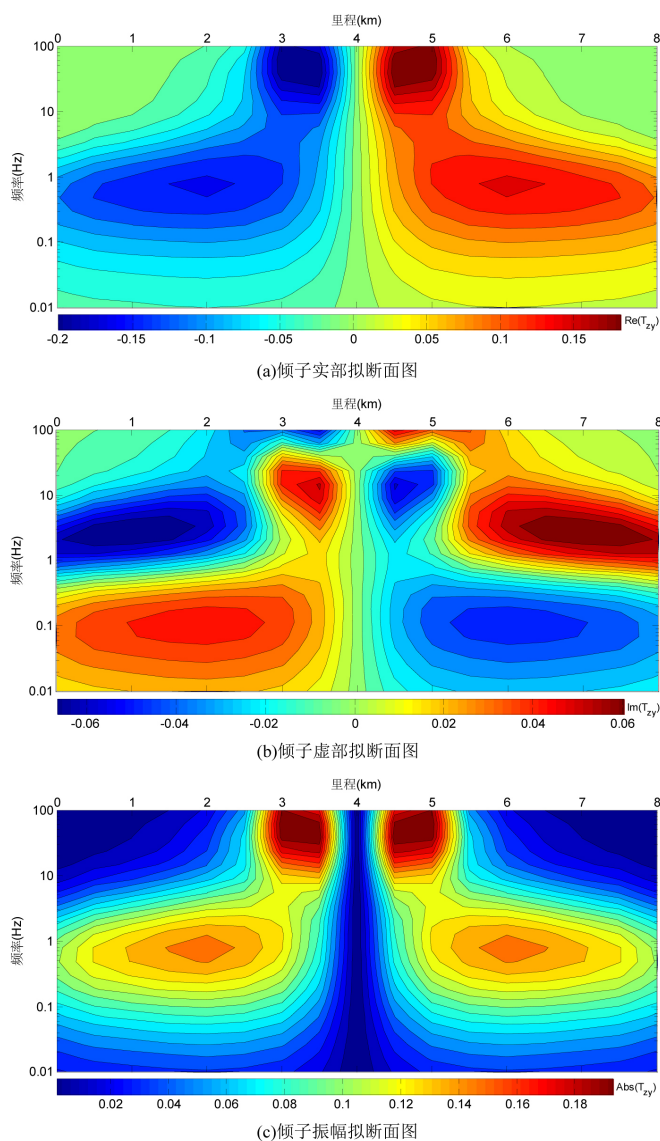


Figure 9. MT tripper responses for the static model with finite difference method
图 9. 静态位移模型的 MT 倾子响应数值模拟结果

基金项目

国家自然科学基金(41674080)。

参考文献

- [1] 陈乐寿. 大地电磁测深——探测地球深部电性和物质状态的一种有效手段[J]. 自然杂志, 2009, 31(1): 39-46.
- [2] 肖晓, 王显莹, 汤井田, 等. 安徽庐枞矿集区大地电磁测深与电性结构分析[J]. 地质学报, 2014, 88(4): 478-495.
- [3] 余年, 李坚, 王绪本. 二维大地电磁反演及其在铁路长大隧道勘探中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(5): 598-602.
- [4] 柳建新, 童孝忠, 郭荣文. 大地电磁测深法勘探[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [5] de Groot-Hedlin, C. and Constable, S. (1990) Occam's Inversion to Generate Smooth, Two-Dimensional Models from Magnetotelluric Data. *Geophysics*, **55**, 1613-1624. <https://doi.org/10.1190/1.1442813>
- [6] 潘伟, 肖晓, 王永明. 倾子资料特征分析研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2741-2748.
- [7] 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.
- [8] 余年, 王绪本, 阚瑗柯, 等. 倾子和视倾子的研究及在断裂解释中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(4): 275-281.
- [9] 童孝忠, 柳建新, 刘颖, 等. 利用有限单元法模拟二维 MT 倾子响应[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(S1): 349-354.
- [10] 陈乐寿, 刘任, 王天生. 大地电磁测深资料处理与解释[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org