

doi: 10.11720/wtyht.2018.1569

田郁, 胡祥云, 乐彪. 倾子在地球物理断裂构造解释中的应用[J]. 物探与化探, 2018, 42(6): 1237-1244. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1569>
Tian Y, Hu X Y, YUE B. The application of tipper to geophysical fault interpretation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1237-1244. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1569>

倾子在地球物理断裂构造解释中的应用

田郁^{1,2}, 胡祥云³, 乐彪⁴

(1. 贵州省地质调查院, 贵州 贵阳 550018; 2. 贵州省地质物探开发应用工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550018; 3. 中国地质大学(武汉) 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430000; 4. 贵州正业工程技术投资有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 倾子是大地电磁测深法的实测参数之一, 主要表征垂直磁场和水平磁场之间的复系数线性关系, 对地下介质的横向电性不均匀性较敏感, 且能有效反映断裂构造特征。在二维大地电磁正演模拟的基础上, 根据倾子的定义推导出倾子资料的计算公式, 并通过大量模型试算分析倾子资料特征, 这里重点研究二维地电断裂模型下倾子的正演响应特征。研究表明, 对比视电阻率, 倾子资料对横向电性分界面反映更为准确, 能有效地反映出断裂构造的位置及规模。将倾子这一特性其应用于实测 MT 剖面的推断解释中, 结合已有地质资料, 进一步证明了倾子能有效反应出断裂构造的位置及特征。

关键词: 倾子; 正演模拟; 断裂构造; 大地电磁测深

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2018)06-1237-08

0 引言

大地电磁测深法(MT)是利用天然交变电磁场来研究地球内部电性结构的一种有效的地球物理方法, 目前已广泛应用于众多领域^[1-3]。由于勘探深度由浅变深, 勘探环境由简单变复杂, 仅视电阻率和阻抗相位难以确定研究区的构造特征, 需借助 MT 的其他实测参数进行分析研究。倾子作为大地电磁测深法的实测参数, 主要表征垂直磁场 H_z 和水平磁场(H_x 、 H_y)之间的关系, 能够反映地电构造水平方向的不均性程度。因此, 对倾子资料的研究显得很有必要。

早期很难采集到质量较好的倾子数据, 对倾子资料的研究仅为简单的理论研究。早在 1972 年, Vozoff^[4]完善了倾子的概念; 1995 年, Pedersen 和 Engds 等^[5]研究了倾子正演模拟的基本理论和方法。之后, 国内胡文宝等^[6-8]将倾子应用到不同的二维异常体模型中, 认为倾子资料对电性不均性比

较敏感, 且倾子资料与视电阻率、阻抗相位相比, 受大地电磁静态位移的影响较小^[9-10]; 同时, 董孝忠等^[11-13]分析研究了不同条件下倾子资料的响应特征及影响因素。目前, 倾子在实际地球物理资料中的应用相对较少, 仅作为定性参考来判断构造的维度和走向。最早倾子是以感应矢量的方式应用于实测资料的分析解释中, 利用感应矢量的物理意义来研究地下电性结构探测、地热探测以及断裂带的探测^[14-16]。随着倾子资料理论研究的深入, 其实部、虚部以及振幅逐渐应用于实测资料分析解释中^[17-19]。文中将进一步研究倾子对断裂构造的响应特征, 分析总结不同断裂模型下倾子响应特征的变化规律, 为倾子资料在大地电磁中的应用提供理论依据, 并将倾子资料应用于实测 MT 剖面的断裂构造解释中。

1 二维倾子定义及计算公式

大地电磁测深法的场源为垂直地表入射的平面

收稿日期: 2017-12-18; 修回日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41474055); 贵州省科学技术厅 2018 年度科技平台建设及人才团队计划项目(黔科合平台人才[2018]5626)

作者简介: 田郁(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电磁法勘探及资料处理。

波,则在一维介质中不存在磁场的垂直分量,只有在二维或三维介质中才会产生 H_z 。倾子主要表征垂直磁场分量 H_z 与水平磁场分量 H_x 和 H_y 之间的复系数线性关系:

$$H_z = T_x H_x + T_y H_y = [T_x \quad T_y] \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $T=[T_x \quad T_y]$ 为倾子矢量,它不仅与电磁波的频率相关,还与地下介质的电阻率和电性分布特征相关; T_x 、 T_y 为倾子矢量 T 和 y 方向的分量,对地下介质的横向不均匀性较敏感。

对于二维介质,磁场的垂直分量 H_z 仅存在于 TE 极化模式中,依据 Maxwell 方程组,在水平方向存在电性不均匀性的二维介质中,TE 极化模式(E_x 、 H_y 、 H_z)为

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

式中: σ 为导电率, ω 为角频率, μ 为磁导率。把方程组(2)中的后两个公式带入第一式可得到:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[-\frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[-\frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} \right] = (\sigma - i\omega\mu) E_x \quad (3)$$

假设该地区磁导率均匀分布,那么上式可转化为如下形式的 Helmholtz 方程:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - k^2 E_x = 0 \quad (4)$$

式中, $k^2 = -i\omega\mu\sigma$, k 为波数。对方程(4)进行求解可得到 E_x 的值。

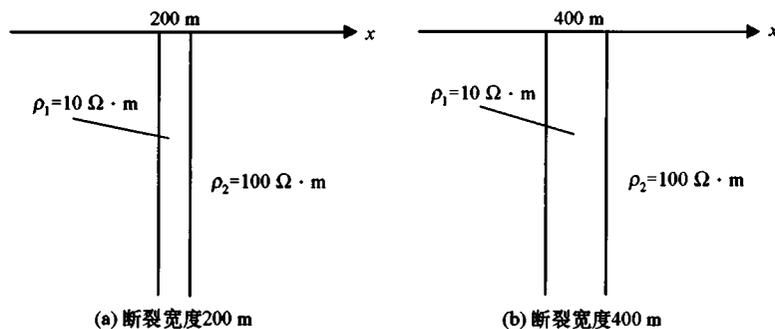


图1 不同宽度的垂直低阻断裂模型示意

图2为不同宽度垂直低阻断裂模型的视电阻率和倾子振幅、实部以及虚部的拟断面图,左边对应断裂宽度 200 m,右边对应断裂宽度 400 m。由于阻抗

假定 x 轴与地质体的走向方向平行, y 轴与地质体的倾向方向一致, z 轴方向向下与地面垂直,则地下介质的电性特征在 x 轴方向保持不变,仅 y 轴和 z 轴方向的电性发生变化,则 $T_x=0$,倾子可简化处理为 $T=T_y$ 。

由大地电磁倾子的理论和定义,可以推出其计算公式:

$$T_y = \frac{H_z}{H_y} = - \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} / \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (5)$$

对于式(5),可以通过大地电磁正演模拟计算出 E_x ,然后分别计算电场水平分量 E_x 在 y 和 z 方向的偏导数,再代入倾子的计算公式,即可计算出不同二维地电模型中倾子正演模拟结果。本文中,二维模型的建立及研究分析均在该理论下进行,且均为 TE 极化模式下的倾子资料。

2 正演模拟及特征分析

有限单元法对异常体适应性好、计算精度高。笔者在前人的二维大地电磁正演程序基础上,采用矩形双二次插值有限单元法进行正演模拟,并进一步计算出倾子资料,建立岩性分界面模型和具有代表性的断裂模型,分析对比倾子和视电阻率对断裂构造的响应特征以及不同宽度、不同倾向下倾子响应特征的变化。

2.1 垂直断裂模型

构造地电模型如图1所示。在电阻率为 $100 \Omega \cdot m$ 的均匀半空间中存在一个垂直低阻断裂,断裂电阻率为 $10 \Omega \cdot m$,断裂宽度分别为 200、400 m,计算频点范围为 0.01~100 Hz,采用对数等间隔,共计 40 个频点。

相位与视电阻率反映情况一致,倾子相位资料较凌乱,故未给出阻抗相位和倾子相位资料图。对比 2 个模型的视电阻率拟断面(图2a,b),可以看出,视

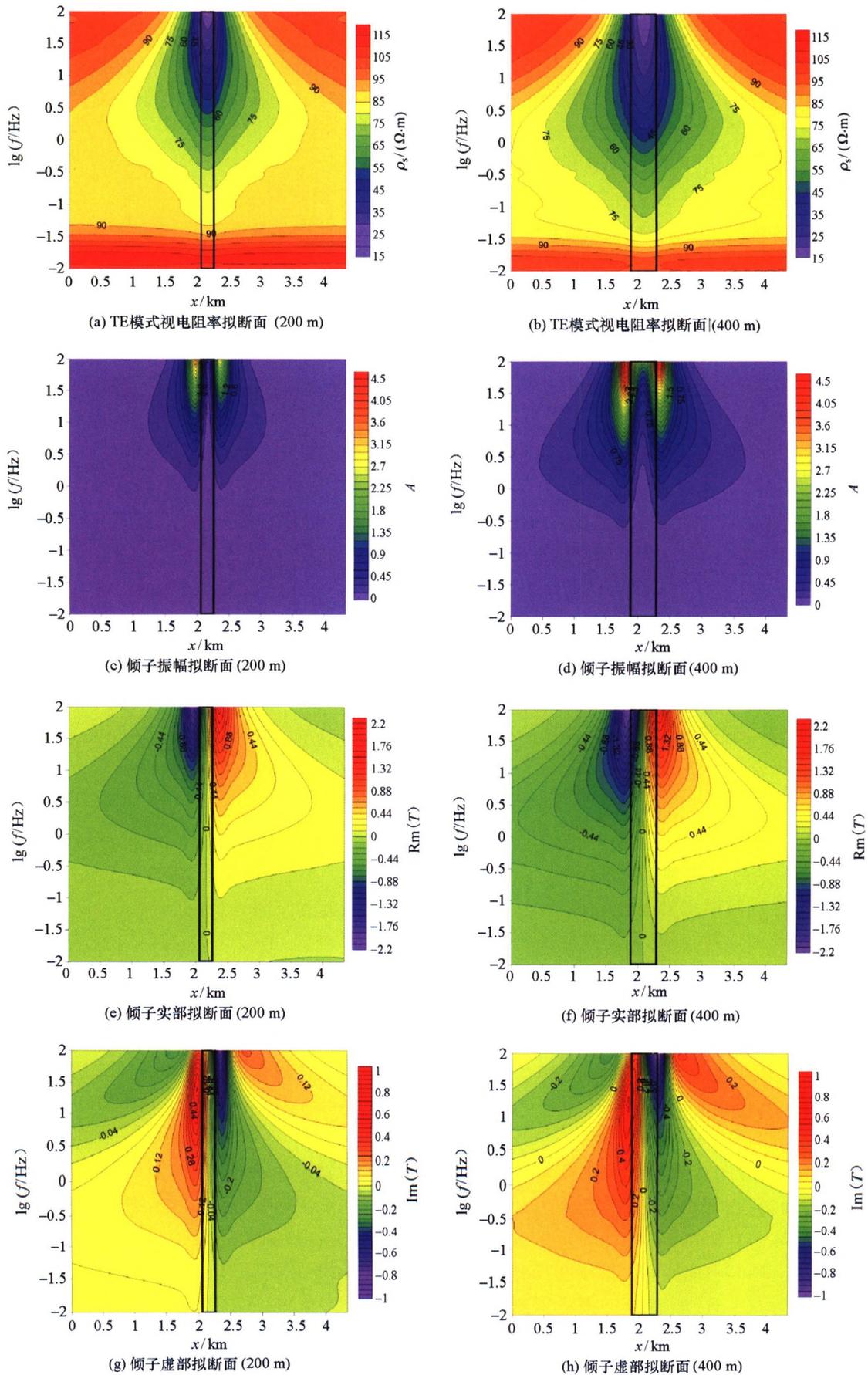


图 2 垂直低阻断裂模型视电阻率和倾子响应拟断面

电阻率能反映出低阻断裂位置,但对断裂的宽度以及边界反映不准确,且仅高频段能反映出低阻断裂的存在。倾子振幅、实部和虚部对低阻断裂均有较好的反映,从地表往下延伸,均有明显的分界面,也能准确反映出断裂的宽度。在断裂分界面上,左右存在明显的电阻率变化,即倾子异常值在分界面上表现为最大或最小。随着垂直断裂宽度的增加,倾子异常值最值区域的中心距离也在增大,且异常值的幅值也在增加,图中黑色直线即为断裂边界位置。对比可以发现,断裂的宽度在倾子振幅上(图 2c, d)反映最为明显,倾子振幅的两异常值区域之间即为垂直断裂的位置和宽度,断裂边界位于异常值的最大值处,当断裂宽度变大时,振幅两最大值区域的中心距离也变大了,且以断裂为中心呈左右对称状态。对于倾子实部、虚部拟断面图,同样以断裂为中心呈

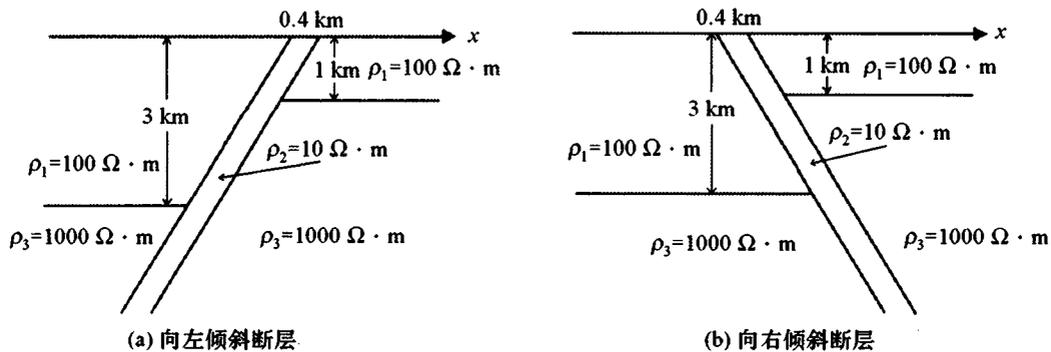


图 3 倾斜断层模型示意

图 4 为倾斜断裂模型正演模拟的视电阻率和倾子拟断面,可以发现,视电阻率拟断面图大致反映出了倾斜断裂的位置和模型的电性分层情况,能基本确定断裂的倾向,但对倾斜断裂的宽度及倾角反映不准确。倾子振幅、实部和虚部响应结果在高频段与垂直低阻断裂模型响应结果相同,都反映出了倾斜断裂的倾向方向和基本空间分布情况,但无法反映出其倾角的大小,且倾子资料没有反映出围岩介质的分层性。分析倾子振幅拟断面(图 4c, d),可以发现断裂位于振幅异常值区域之间的等值线接触带上,且断裂的延伸方向从等值线的延伸方向上得到了反映,向左倾斜的断裂在倾子拟断面图上表现为左边异常值区域向左侧延伸,向右倾斜断裂则表现为右边异常值区域向右侧倾斜。倾子实部和振幅的正演响应异常形态一致,断裂位于倾子实部的两异常区域之间,对断裂倾向的反映情况与振幅响应一致。在倾子虚部拟断面图中,断裂沿着中、高频段的最小值和最大值区域以及中、低频段最大值和最小值之间的区域延伸,对断裂倾向的反映情况与倾子

左右对称,断裂位于实部和虚部的最大值区域和最小值区域之间,且实部和虚部的中低频段对断裂的反映情况比振幅效果要好,反映出了断裂的深度。通过对倾子振幅、实部和虚部拟断面图的分析,可以确定低阻断裂的具体位置、边界位置以及宽度等信息。

2.2 倾斜断层模型

在垂直断裂模型的基础上,分别设计向左倾斜和向右倾斜的断裂模型,如图 3 所示。模型大致可划分成两层,顶层电阻率为 $100 \Omega \cdot m$,底层电阻率为 $1000 \Omega \cdot m$,倾斜断裂电阻率为 $10 \Omega \cdot m$,露出地表的断裂宽度为 $400 m$ 。采用矩形双二次插值有限单元法进行正演模拟,分析倾子对不同宽度的断裂模型的响应特征,计算频点范围为 $0.01 \sim 100 Hz$,采用对数等间隔,共计 40 个频点。

实部、振幅一致。在实际资料解释中,对于倾斜断裂,可以通过倾子实部、虚部和振幅的特征来确定断裂的位置和空间分布。

3 实例应用

3.1 研究区背景介绍

研究区位于江西省北部,江西省北部地处中生代以来欧亚大陆板块东南沿海前陆推覆冲断带,位于扬子、华夏古板块结合带复合叠加的部位,研究区深大断裂活动强烈,推覆构造系统发育广泛,造就了独特的地质环境^[20],区内断裂构造发育较多。

大地电磁测深测点位置如图 5 所示,西起江西省景德镇,穿越江西省北部,东至浙江省衢州市,经过宜丰—景德镇—歙县^[21]、婺源—余干^[22]、江山—绍兴^[23]等多个 NE 向断裂构造单元,整条剖面共计测点 12 个,测线长达约 $220 km$ 。该剖面测点采用加拿大凤凰公司生产的 MTU-5A 多功能电磁仪采集,每个 MT 测点都采集了 E_x 、 E_y 、 H_x 、 H_y 、 H_z 五个电磁

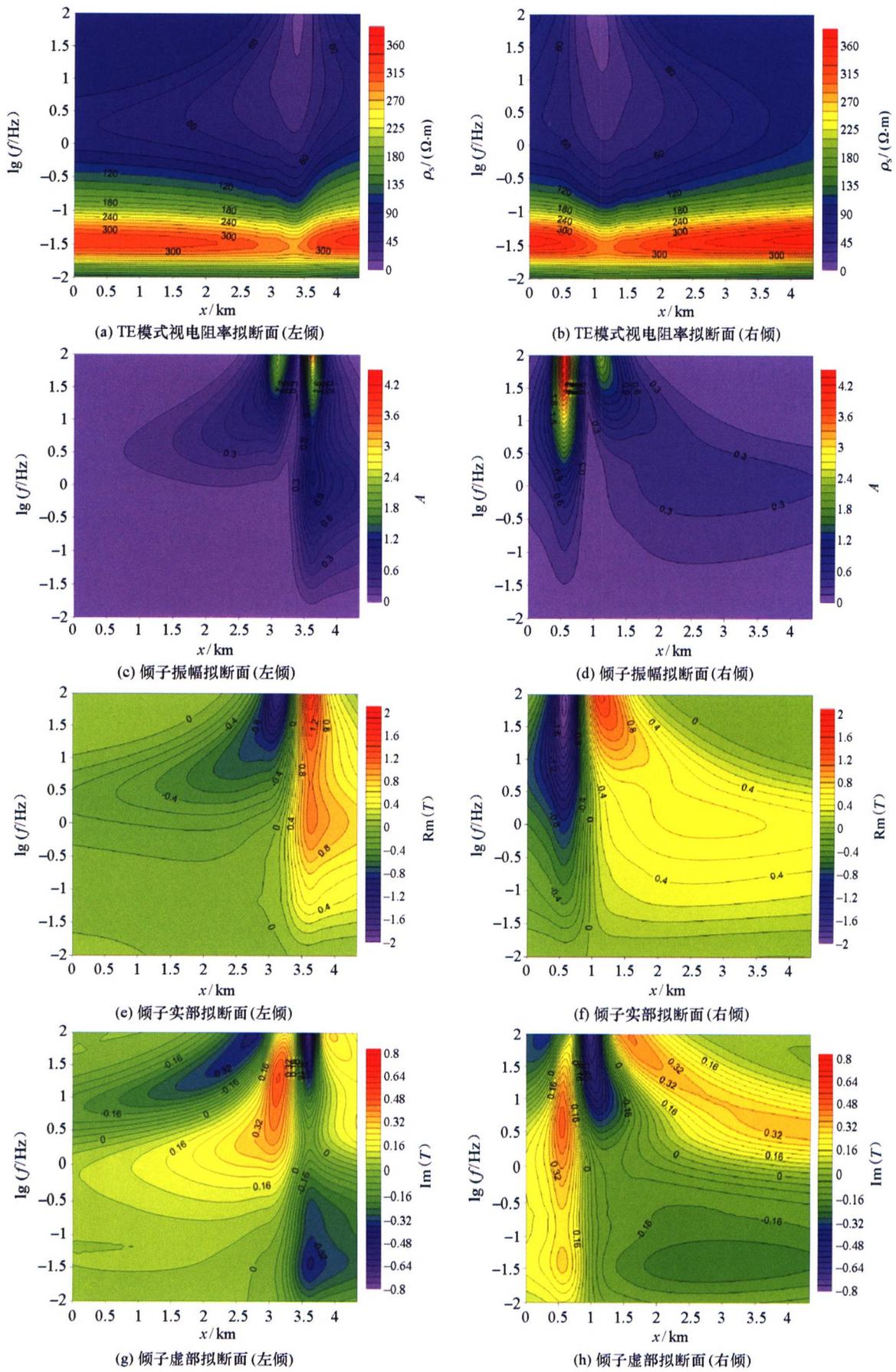


图 4 倾斜断层模型视电阻率和倾子响应拟断面

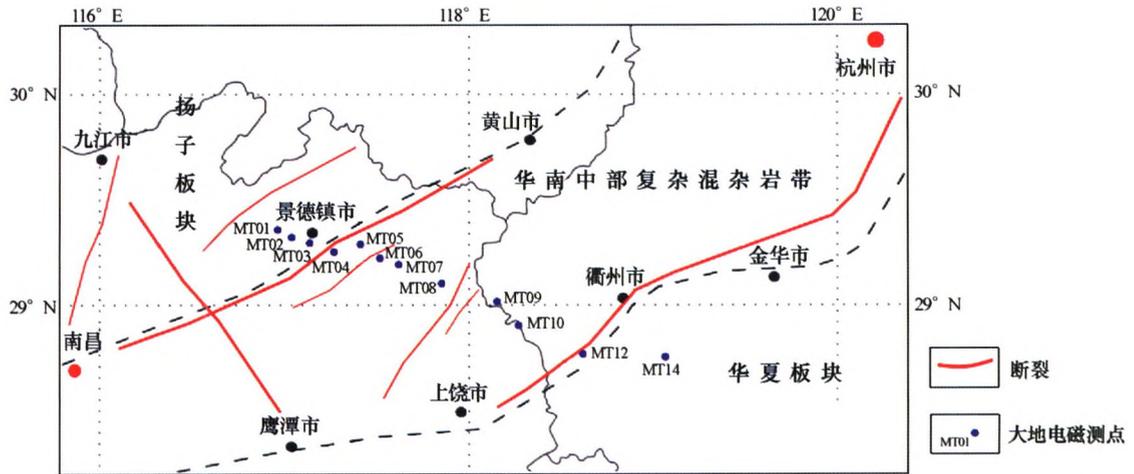


图5 大地电磁测点位置

场分量,其中包含了求取倾子资料的磁场在垂直方向的分量 H_z ,采集的频率范围为 930 ~ 0.000 021 5 Hz,数据整体质量较好。

3.2 倾子资料特征分析

该剖面倾子资料质量较好,其中倾子为复矢量,有实部和虚部分量,利用倾子的实部和虚部可以转换成磁感应矢量值,磁感应矢量是倾子的图示方式,其本质就是倾子。

在 1970 年, Schmucker 给出了感应矢量表达式:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_R &= T_{zxR}e_x - T_{zyR}e_y, \\ \mathbf{G}_I &= T_{zxI}e_x - T_{zyI}e_y, \end{aligned} \quad (6)$$

其中: \mathbf{G}_R 为实感应矢量, \mathbf{G}_I 为虚感应矢量, T_{zxR} 和 T_{zxI} 分别为 T_{zx} 的实部和虚部, T_{zyR} 和 T_{zyI} 分别为 T_{zy} 的实部和虚部, e_x 、 e_y 为单位矢量, 分别表示正北和正东方向。

大量研究者证明实感应矢量的物理意义较为明确^[24],其大小直接可以反映介质在横向方向上的电阻率的变化梯度,其值越大则表明横向方向上的变化越大,方向一般表示电流聚集的方向,即从高阻指

向低阻,而虚感应矢量的物理意义尚不明确,其应用也较少。结合实感应矢量的物理意义和倾子振幅拟断面图,可以更加准确地判断出研究区存在电性不均匀体的位置,以及其规模大小和地下介质的电性特征。

图 6、图 7 分别为大地电磁倾子振幅拟断面图和实感应矢量图。从倾子振幅拟断面(图 6)可以看出,倾子振幅值随深度由浅变深逐渐变大,明显分为低、中、高三层,倾子振幅值越大,表明横向不均匀性越明显。图中浅部地层电性结构比较简单,构造表现为一维特性,但在中深部,地下结构较浅部复杂,倾子振幅值也逐渐变大,地层电性结构也由二维变为三维。在剖面左端 MT03 号与 MT04 号测点之间倾子振幅表现为较高的异常值,表明地下横向电性结构不均匀性较为明显,且在实感应矢量图中,测点 MT03 与 MT04 所对应的红色箭头指向电流聚集的地方,即指向低阻,两幅图都显示了该地区存在断裂,结合已有的地质构造资料分析该段为宜丰—景德镇—歙县深断裂带。在测点 MT05 和 MT07 之间

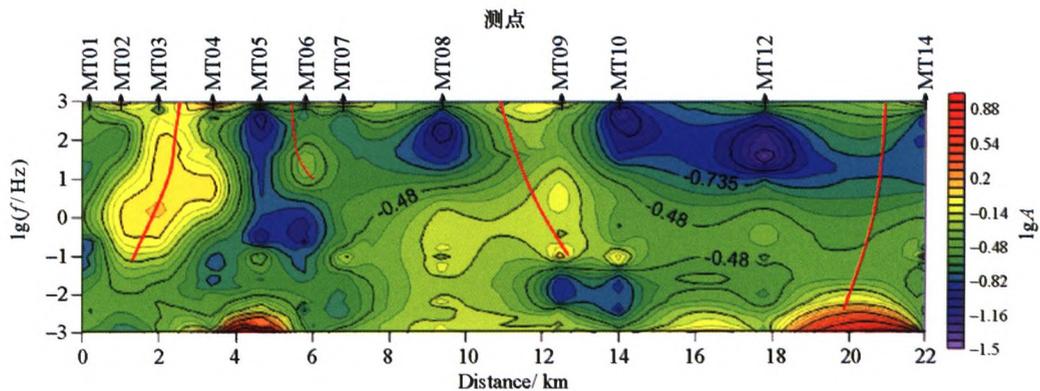


图6 实测倾子振幅拟断面

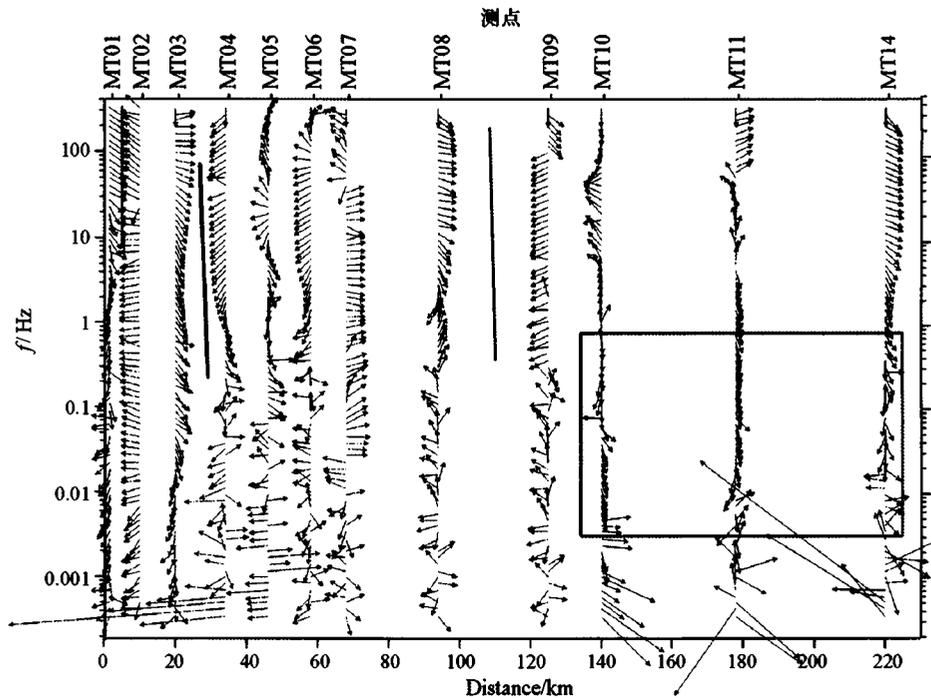


图7 实测磁感应矢量实部矢量图

倾子振幅值也表现为高值异常,异常区域和幅值不大,表明横向电性结构不均匀的范围小,在实感应矢量图中,由于宜丰—景德镇大断裂的存在,直接影响了 MT06 号测点的实感应矢量的箭头方向,根据 MT 趋肤效应,10 Hz 以上的高频部分表示的是层位比较浅的断裂,已有地质资料显示该断裂为余干—婺源断裂,且断裂规模较小。同样在测点 MT08 与 MT09 之间倾子振幅异常值较高且异常区域较大,实感应矢量高频部分相向而对,低频部分实感应矢量形态较乱,没有规律存在,说明该区域在深部的电性结构比较复杂,由于该区域为扬子、华夏板块结合带复合叠加的部位,大小断裂发育较多且断裂构造复杂。分析测点 MT10、MT12 和 MT14 的实感应矢量形态,可以发现低频部分实感应矢量的方向均指向深部,表明深部存在低阻区域,根据地质构造资料显示该段对应江山—绍兴深大断裂带。

4 结论

在二维介质中,磁场的垂直分量 H_z 仅存在 TE 极化模式中,通过构建二维断裂构造模型,对比 TE 极化模式下倾子和视电阻率对断裂构造的反映情况,分析倾子振幅、实部和虚部的响应特征,并将倾子资料应用到实测大地电磁测深数据的断裂分析解释中。本次研究所取得的成果归纳如下:

倾子资料对异常体边界的识别能力高于视电阻

率,且在 TE 极化模式下,倾子资料对低阻异常体的分辨率高于高阻异常体,特别是对低阻断裂反映灵敏。对于低阻垂直断裂,倾子资料能准确地判断出断裂的位置和宽度,断裂位于倾子响应的最值区域之间的接触带上,且倾子响应以断裂为中心呈左右对称状态;对于低阻倾斜断裂,倾子响应能基本反映其位置及倾向,倾子振幅和实部对倾斜断裂的反映情况相同,断裂沿着响应值最值区域之间延伸,其延伸方向为断裂的倾向,但对其倾角的反映相对较差。

从倾子正演模拟结果可以得出,倾子异常值最值均位于分界面上,即分界面上存在电阻率突变,导致倾子出现明显的异常。在倾子振幅拟断面图中,高值异常区存在电阻率变化,对应为横向电性不均匀区域即断裂构造带,且异常值越大,断裂特征越明显。在感应矢量图中,实感应矢量一般由高阻指向低阻区域,结合倾子振幅和实感应矢量,能较准确地判断断裂带或电性不均匀体的位置和规模。

参考文献:

- [1] 刘光鼎. 论地球科学[J]. 地学前缘, 1998, 5(1): 1-8.
- [2] 王家映. 我国大地电磁测深研究新进展[J]. 地球物理学报, 1997(s1): 206-216.
- [3] Hu X, Peng R, Wu G, et al. Mineral exploration using CSAMT data: application to longmen region metallogenic belt, Guangdong Province, China[J]. Geophysics, 2013, 78(3): B111-B119.
- [4] Vozoff K. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins[J]. Geophysics, 1972, 37: 98-141.

- [5] Pedersen L B, Engels M. Routine 2D inversion of magnetotelluric data using the determinant of the impedance tensor[J]. *Geophysics*, 2005, 70(2): 33-41.
- [6] 胡文宝, 苏朱刘, 陈清礼. 倾子资料的特征及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 1997, 32(2): 202-213.
- [7] 于鹏, 王家林, 吴健生. 利用大地电磁测深视倾子资料来研究断裂[C]//GPS/SEG 2004 国际地球物理会议论文集, 2004: 479-482.
- [8] 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.
- [9] Ledo J, Gabas A, Marcuello A. Static shift leveling using geomagnetic transfer functions[J]. *Earth Planets Space*, 2002, 54: 493-498.
- [10] Berdichevsky M N, Dmitriev V I, Golubtsova N S, et al. Magneto-variational sounding: new possibilities, *Izvestiya*[J]. *Physics of the Solid Earth*, 2003, 39: 701-727.
- [11] 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(s1): 349-354.
- [12] 甘佳雄. MT 倾子响应的有限元模拟及影响因素分析[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [13] 徐凌华, 甘佳雄, 柳建新, 等. MT 倾子响应的影响因素分析[J]. *物探化探计算技术*, 2013, 35(4): 430-437.
- [14] Parkinson W D. Directions of rapid geomagnetic fluctuations[J]. *Geophysical Journal International*, 1959, 2(2): 1-14.
- [15] 汤吉, 晋光文, 赵国泽, 等. 感应矢量及其在长白山天池火山区的应用[J]. *地质论评*, 1999, 45(s1): 294-303.
- [16] 张盛, 徐义贤, 刘营. 感应矢量在西准噶尔盆地断裂带中的应用[C]//中国地球科学联合学术年会, 2014: 279-280.
- [17] Pedersen L B. Groundwater exploration using combined controlled-source and radiomagnetotelluric techniques [J]. *Geophysics*, 2005, 70(10): 8-12.
- [18] 余年. 大地电磁二、三维倾子正演模拟与联合反演研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [19] 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.
- [20] 张彦杰, 廖圣兵, 周效华, 等. 江南造山带北缘鄂源构造带主要地质特征[J]. *地质学报*, 2012, 86(12): 1905-1916.
- [21] 楼法生, 黄志忠, 宋志瑞, 等. 华南中部中新元古代造山带构造演化探讨[J]. *地质调查与研究*, 2003, 26(4): 200-206.
- [22] 余忠珍, 罗小洪. 江西北部成矿地质环境与成矿特征[J]. *资源调查与环境*, 2002(4): 257-265.
- [23] 李起彤, 毛正毅. 江山—绍兴断裂带在杭州湾延伸的探讨[J]. *地质科学*, 1986(3): 211-216.
- [24] 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, 11(4): 626-636.

The application of tipper to geophysical fault interpretation

TIAN Yu^{1,2}, HU Xiang-Yun³, YUE Biao⁴

(1. *Guizhou Geological Survey, Guiyang 550018, China*; 2. *Guizhou Engineering Research Center for Geological-geophysical Development and Application, Guiyang 550018, China*; 3. *Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430000, China*; 4. *Zhengye Engineering & Investment Incorporation limited, Guiyang 550081, China*)

Abstract: As one of the measured parameters of the magnetotelluric sounding method, the tipper mainly represents the linear relationship between the vertical magnetic field and the horizontal magnetic field. In this paper, based on the forward modeling of magnetotelluric sounding, the authors derived the formula for calculating the two-dimensional tipper according to the definition of the dump, with emphasis placed on the forward modeling of two-dimensional fault structure model. Compared with the apparent resistivity, it is proved that tipper can more accurately reflect the lateral heterogeneity of dielectric properties. Tipper was successfully applied to the analysis and identification of the fault structure of the measured MT profile.

Key words: tipper; forward; fracture structure; magnetotelluric sounding

(本文编辑:沈效群)