

音频大地电磁测深法对正、逆断层的精细解释

苗景春¹, 阮帅², 张悦¹

(1. 河北省地球物理勘察院, 河北 廊坊 065000; 2. 成都理工大学 地球物理学院, 四川 成都 610059)

摘 要: 在隧道勘察中, 使用音频大地电磁测深法 (AMT) 寻找断层、破碎带等。从正、逆断层地电模型的二维正演模拟出发, 使用合成数据进行一维、二维反演, 研究正、逆断层及低阻破碎带在实测数据拟断面和一维反演、二维反演结果上的区别, 以确定如何利于现有的技术手段对断层破碎带 D 的倾向进行有效的定性、定量解释。从所获结果中可以得出, 实测数据解释应以 TM 模式数据分层, TE 模式数据判断倾向。

关键词: 音频大地电磁; 断层; 破碎带; 共轭梯度反演

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2013)04-0681-06

音频大地电磁测深法 (AMT) 对地表天然电磁场进行张量观测, 通过分析岩石的电阻率分布达到勘探目的。公路、铁路隧道在掘进之前需要对横跨掘进线高程的岩性进行深入调查, 防止地质风险, 尤其关注断层和充水低阻破碎带。目前很多解释断面对断层的横向位置反映基本正确, 但对倾向的判定一直存在问题。为此, 笔者对用 AMT 法探测正、逆断层进行了大量的模型试验, 力求挖掘更多信息, 找到正确的资料解释方法和模式。

1 模型设计

地形、地表横向电性不均匀体都会对观测数据形成干扰, 出现静态位移。为将模型尽量简化, 只考虑地表横向不均匀体的影响。

图 1 为断层模型。两个地电模型均长 4 km, 深 2 km, 地表高程为 0 m, 无地形起伏。从上至下分 3 个电性层: Q2 (50 $\Omega \cdot m$)、R (500 $\Omega \cdot m$) 和 O (1 000 $\Omega \cdot m$)。在第一电性层 Q2 地表横向 1.1 ~ 1.4 km 处有一厚 100 m 的低阻体 Q1 (10 $\Omega \cdot m$), 用来模拟地表横向电阻率突变引起的静态位移效应。目标体为低阻充水断层破碎带 D, 电阻率为 10 $\Omega \cdot m$, 中心位置都在横向 2 km 处。不同的是, M1 正断层模型右倾, 而 M2 逆断层模型左倾。

对于隧道工程地质而言, 勘探目标不但是目标体 D 相对地面的水平范围, 其倾向也非常重要。若倾向的定性判断发生错误, 很容易出现错误的井位设计而无法有效发现目标破碎带, 造成施工风险被

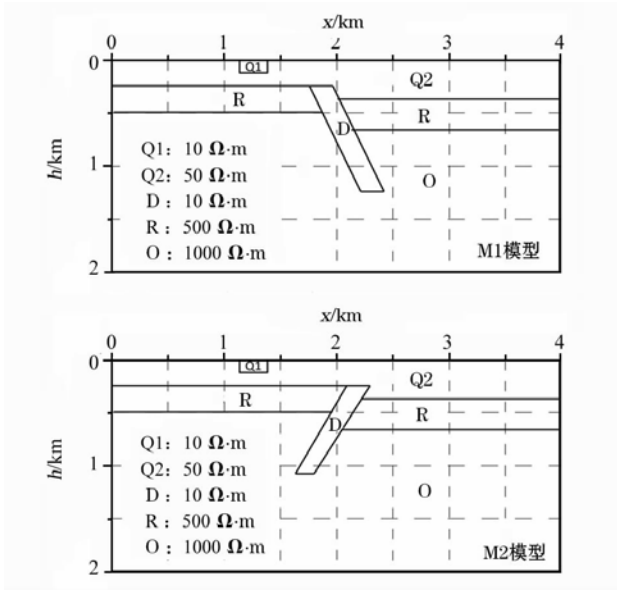
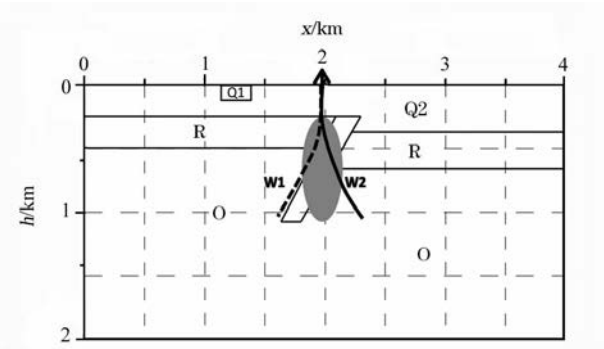


图 1 隧道勘探断层地电模型

低估。

如图 2 所示, 目前, 大部分 AMT 资料成果的断层破碎带形态如图中椭圆所示, 从反演断面图上只能看到低阻异常范围, 无法判定倾向。若图 2 中的模型被错误判断为正断层, 那设计验证钻井的方案最可能为 W1, 若倾向判断正确, 则钻井方案应该为 W2。显然, W1 钻井无法发现低阻断层破碎带, 将给实际掘进带来安全风险。

实际地质、地球物理条件将更加复杂。因此, 在 AMT 的有限分辨率下, 对断层破碎带的定性判断必须作深入研究。



W1—正断层的最佳验证井位;W2—逆断层的最佳验证井位;D—椭圆范围表示二维反演断面上的可能异常形态

图 2 不同倾向下对 M2 模型的两种钻探方案

2 模型正演

对 M1 和 M2 进行网格剖分,填入相应的电阻参数。结果如图 3 所示。

在模型地表以 100 m 点距从横向 0 ~ 4 000 m 的区间内设置了 41 个测点,其中 1 100、1 200、1 300 m 三个测点位于地表异常体 Q1 上。正演方法采用矩形网格的有限单元法,网格设计保证测点位于地表单元边中心,以保证计算精度。主要模拟参数为

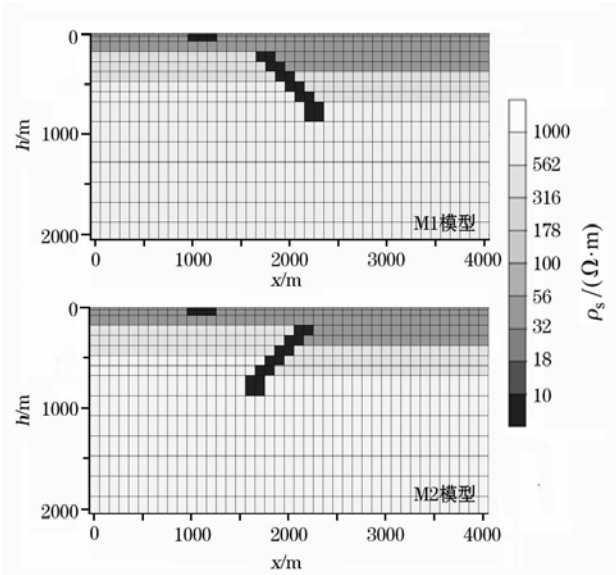
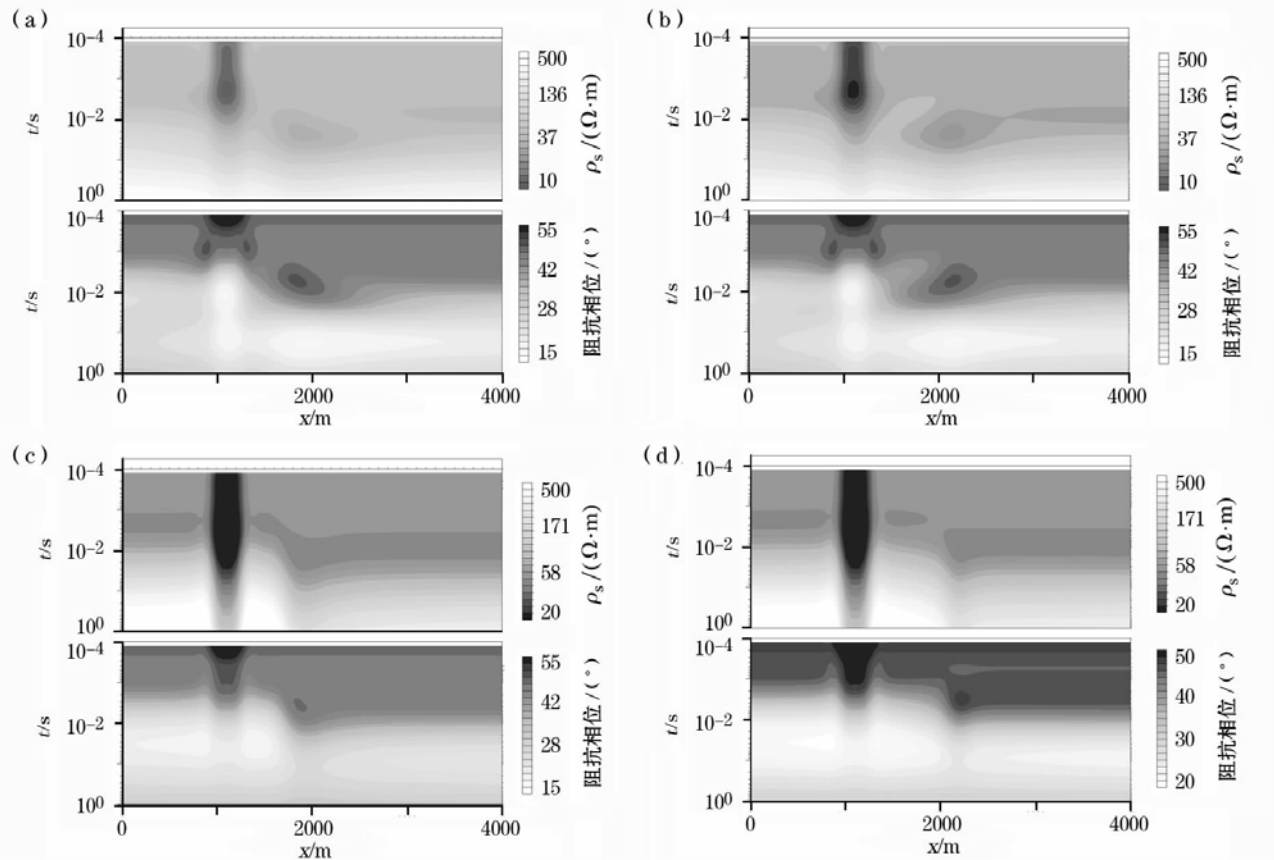


图 3 模型的电阻率填充剖分结果

TE、TM 模式视电阻率、阻抗相位、倾子振幅和倾子相位 6 组数据。频率为生产观测中使用的从 10 000 Hz ~ 1 Hz 频带,每个量级按对数等间隔均匀设置 10 个频点,总频点 40 个。计算结果的拟断面如图 4 所示。



a—M1 模型 TE 模式;b—M2 模型 TE 模式;c—M1 模型 TM 模式;d—M2 模型 TM 模式

图 4 模型的正演 TE、TM 模式数据拟断面

从图 4a、图 4b 中可以看出破碎带 D 的倾向。地表不均匀体 Q1 的影响也很明显。因此,对于所讨论的这类地电模型,可使用 TE 模式数据拟断面确定断层倾向,但是背景地层被异常扭曲,地层呈向斜状,与模型不符。

对破碎带 D 也可进行一些半定量计算。异常体出现的频带为 100 ~ 900 Hz,背景电阻率为 50 Ω · m,按趋肤深度计算公式,估算异常体的深度范围在 119 ~ 355 m,若背景电阻率取 500 Ω · m,则估算的异常深度范围为 376 ~ 1 120 m。比较保守的解释为低阻体纵向延伸 119 ~ 1 120 m,这和预设模型比较接近。

图 4c、图 4d 中 2 个模型的结果基本相似,两者都反映了真实的背景地层,1 000 m 处的 Q1 异常体都对断面产生破坏,对破碎带 D 的倾向都无法分辨。因此,TM 模式的电阻率和阻抗相位更适合分析背景地层,不过必须剔除静态位移的测点。

以 3 000 ~ 4 000 m 之间的拟断面为例进行半定量解释。这一段的灰度图清晰地显示了水平地层的形态,若按 50 Ω · m 背景电阻率估算,界面(取 100

Hz)处的深度为 355 m,按 500 Ω · m 背景电阻率估算,深度大约为 1 120 m,平均 737.5 m。这也与设计的地电模型吻合。

因此,使用 TM 模式拟断面来确定背景地层,使用 TE 模式来确定断层充填物的倾向,通过高、低两个不同的背景电阻率来计算趋肤深度,可对地层和断层充填物的深度范围作近似的半定量解释。

很多学者作了不少简单模型分析,在模型地表均匀的情况下,得出倾子资料有利于判断倾向的结论。但对 M1 和 M2 这两个模型而言,从图 5 的结果可知,由于地表不均匀体 Q1 的影响,倾子幅值和相位的拟断面无法明显分辨断层倾向。若事先不知道模型,根本无法得出地下背景、断层倾向等结论。

所以,在静位移严重区域,利用倾子资料拟断面来作定性解释的难度非常大。加上垂直磁棒更容易受风的影响而震动,噪声较水平观测道更大,而所测得的 H_z 值往往非常小,信噪比大大低于水平观测道。所以,在复杂地区用倾子资料直接进行定性解释应该慎重。

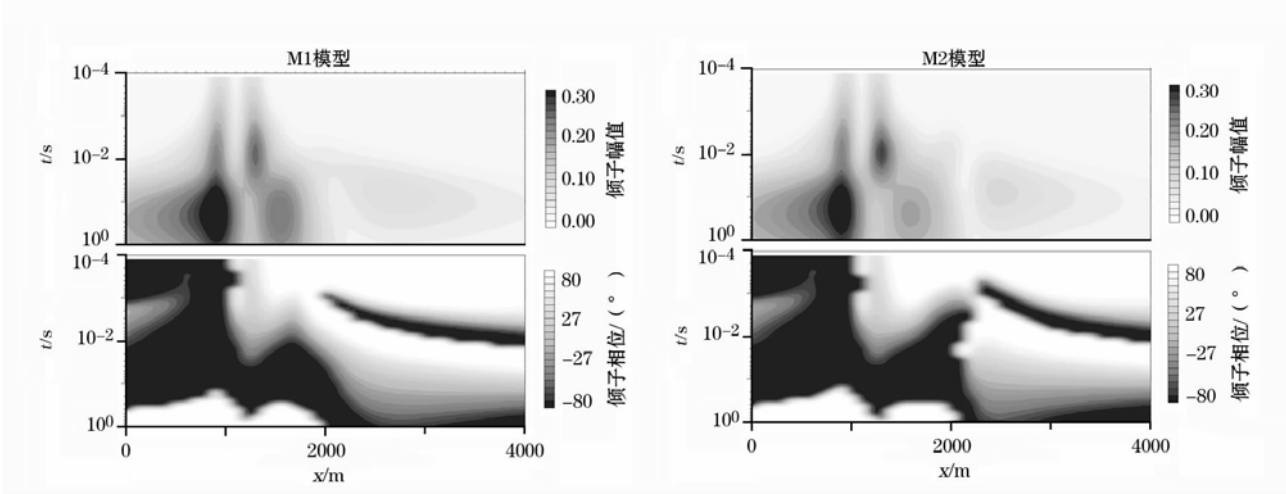


图 5 模型 M1(左)、M2(右)的正演倾子数据拟断面

3 合成数据的一维反演

对资料的定量解释需要进行反演,目前主要采用二维反演结果作为解释依据,但一维反演也非常必要。笔者采用应用最广的 OCCAM 一维反演方法^[1]进行模型 M1、M2 的反演,其主要反演参数为:层数 18 层,最大迭代次数 10 次,初始模型电阻率 100 Ω · m,分层机制为初始模型不同频率趋肤深度的一半,拟合参数包括视电阻率和阻抗相位。反演结果见图 6。

对比图 6a、图 6b,两者都对断层破碎带 D 的倾

向敏感,电阻率值大约是实际的 3 倍,但地层 Q2、R 和 O 的形状出现了较大失真。这和图 4a、图 4b 的视电阻率、阻抗相位拟断面的形态类似。因此,TE 模式数据的一维反演可以用于判断目标体倾向,但必须建立在对背景模型有正确认识的基础上。

图 6c、图 6d 基本一致,可见 TM 模式对于目标体 D 的倾向不敏感,两个模型的一维反演结果基本一样。除 900 ~ 1 400 m 处 Q1 地表低阻体引起的静态位移处地层失真外,其他位置水平地层形态和模型一致。所以,TM 模式数据的一维反演结果有利于对背景地层形态的把握,但是要注意地表不均匀

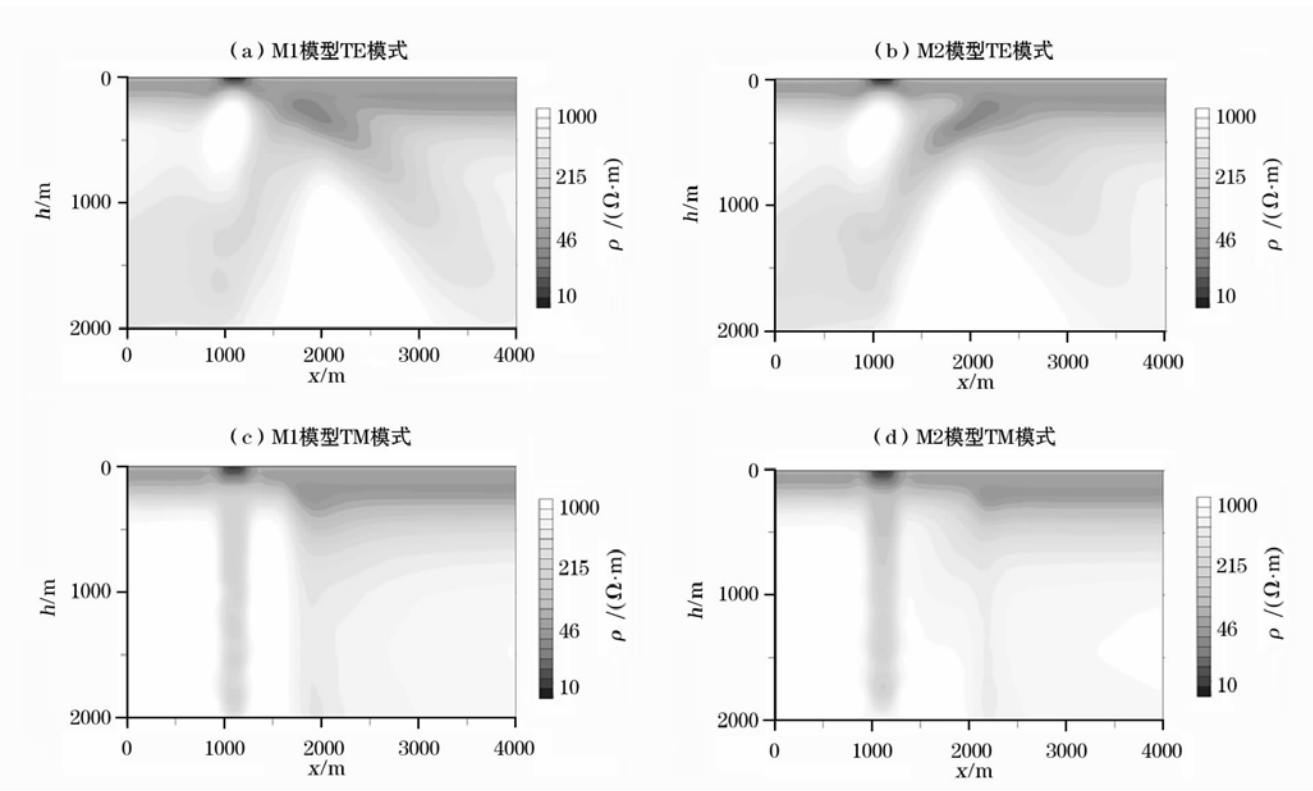


图 6 模型的合成 TE、TM 模式数据一维 OCCAM 反演断面

体和地形的影响。

因此,对于一维反演数据的解释,首先要根据 TM 模式结果确定背景地层形态,断面上垂直条带的结果可以删除,避免“静态校正”,因为人为因素可能会导致背景模型的错误判断。确定背景地层形态后,细节部分的倾向则由 TE 模式反演结果确定。

4 合成数据的二维反演

目前主流的 AMT 二维反演方法是非线性共轭梯度法^[2],简称 NLCG,该方法避免直接近似求解雅可比矩阵,具有较高的模型分辨率和反演稳定性。

为不失一般性,对 M1 和 M2 采用同样的反演算法参数,初始模型为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 均匀空间,使用基于 L2 范数的 Laplacian 正则化算子, τ 值取 3.0,初始阻尼因子 0.3,最大迭代次数为 200 次,电阻率和阻抗相位的门槛误差为 5%, H_z 门槛误差为 10%,视电阻率和阻抗相位均参与反演。

每个模型均采用 4 种反演方案进行计算,不同方案的反演拟合情况及迭代次数见表 1。

单一使用 TE 数据进行二维反演的结果见图 7a、图 7b 所示。断面特征和一维反演情况类似。不过使用二维反演能更好地压制 900 ~ 1 400 m 处横向不均匀体的影响。对于断层破碎带 D 的倾向反映明显。但即使采用了二维反演技术,单一 TE 模

表 1 模型 NLCG 二维反演参数

模型	拟合数据	迭代次数	最终 RMS 误差
M1	单一 TE 数据	200	0.22391%
	单一 TM 数据	200	0.16942%
	TE + TM 数据	200	0.22507%
	TE + TM + H_z 数据	200	0.66307%
M2	单一 TE 数据	200	0.25444%
	单一 TM 数据	89	0.15991%
	TE + TM 数据	79	0.32948%
	TE + TM + H_z 数据	200	0.20904%

式对于背景地层形态破坏的问题仍然不能得到较好解决。

单一使用 TM 数据进行二维反演的结果如图 7c、图 7d 所示。和一维反演相比,二维反演准确地回复了地表不均匀体 Q1 的形状和位置,背景地层的形状也恢复良好,但仍然无法有效确定断层破碎带 D 的倾向。

同时使用 TE 和 TM 模式数据进行二维反演的结果如图 7e、图 7f 所示。这两个断面都较好地恢复了地表不均匀体 Q1 和背景地层的形态。可以依稀看到断层破碎带 D 的倾向,但过于陡立,不利于断层定性。

让 H_z 也参与反演,得到的结果如图 7g、图 7h 所示。在增加了 H_z 数据参加二维反演后,M2 模型的倾角开始变缓,更接近真实模型。但 M1 却未出

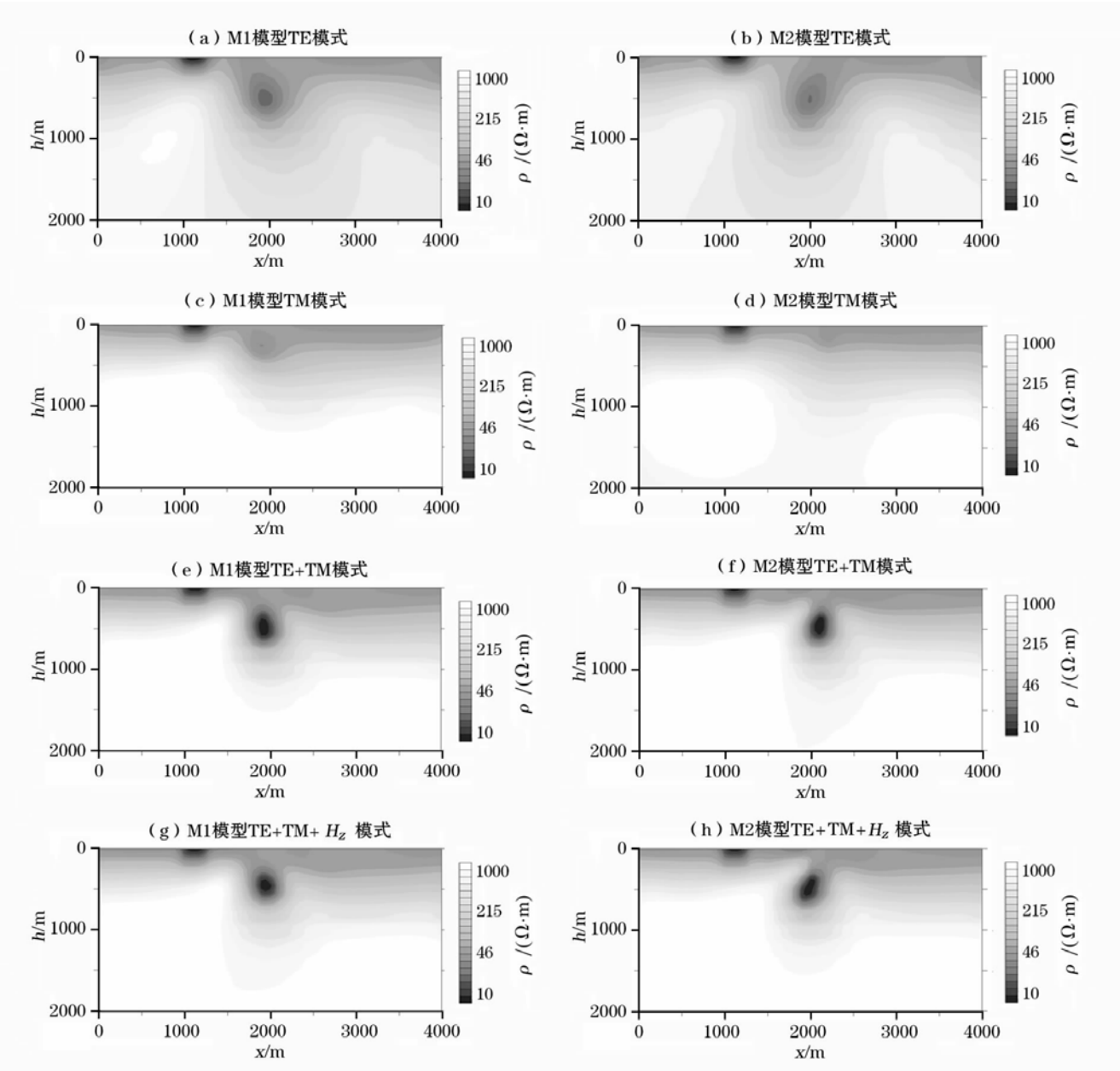


图7 模型 M1、M2 的各种合成模式数据二维 NLCG 反演断面

现明显改善。

计算使用的是合成无噪声数据。实际资料中, H_z 数值极易受噪声干扰,可能会导致错误信息。因此,增加 H_z 数据参与反演的效果仍然很难评价,除非能获取非常好的 H_z 数据,并且反演结果能和一维分析对应良好时,才能对 H_z 参与反演的结果正确认识。

5 结论及建议

(1)实测 TE 模式的视电阻率和阻抗相位拟断面对于断层破碎带的倾向更敏感,拟断面图更不易受地表横向不均匀性影响,更适合对于倾向判定。

对于背景地层形态的定性分析需要参考 TM 模式拟断面。复杂地表地质条件下的倾子资料对于倾向的定性判断意义有限。

(2)TM 模式的一维反演在去掉静态位移的那些测点后,可以提供较正确的背景地层模型。断层的倾向需要在 TE 模式一维反演断面上寻找依据。

(3)单一使用 TE 模式和 TM 模式的二维反演结果对于模型的基本和一维反演类似,但更有利于避免静态位移影响。

(4)同时使用 TE 和 TM 模式数据进行二维反演的结果使断层倾角变陡。

(5)让 H_z 参与反演对于最终确定地层倾向的

帮助有限。本例中,对于逆断层有效,对于正断层无明显改善。实际问题中需小心对照分析。

根据以上结论,实际资料的精细解释必须从已有的反演结果中提炼出简化模型进行正演模拟分析。一般可以根据单一 TM 模式二维反演的拟断面建立简化模型,再在简化模型中设定不同倾角的两 种模式,比较其正演结果和实测结果,可用正演数据 做多种模式组合的反演,看哪种方案更有利于把握 背景地层,哪种方案有利于细节信息。最终的精细 解释,需要结合二维反演、一维反演结果及实测数据 拟断面三种信息。

参考文献:

[1] Constable S C, Parker R L, Constable C G. Occam's inversion; a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data[J]. Geophysics, 1987,52:289-300.

[2] Rodi W, Mackie R L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion[J]. Geophysics,2001,66(1).

[3] 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(4).

[4] 朱庆俊,李凤哲,王璇. AMT 静态效应对导电薄层分辨能力的正演模拟[J]. 物探与化探,2009, 33(2).

[5] 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]. 工程地球物理学报. 2007, 4(4).

[6] 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).

THE APPLICATION OF THE AUDIO MAGNETOTELLURIC SOUNDING METHOD TO THE PRECISE INTERPRETATION OF NORMAL AND REVERSE FAULTS

MIAO Jing-chun¹, RUAN Shuai², ZHANG Yue¹

(1. Hebei Institute of Geophysical Exploration, Langfang 065000, China; 2. Collage of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The audio magnetotelluric sounding method (AMT) is widely used in the highway and railway tunnel exploration to prevent geohazards during the drilling process. Most of the recent survey results show that this method has the capability of locating faults and shatter belts for which the engineering geological survey shows much concern. However, the abnormality is in low resolution and it is very difficult to determine characteristics of the dip of the fault or even to detect whether the fault is normal or reverse. The authors designed two typical comparable fault models for modeling the AMT data and used the synthetic data to do 1D and 2D inversion. A detailed comparison demonstrates that TM data show good results for characteristics of the layer while TE data give more information concerning the target orientation. The research mode used in this paper has certain reference significance for this kind of applications under complicated geological and geophysical conditions.

Key words: audio magnetotelluric sounding, engineering exploration; geoelectric model; fault; fracture zone; conjugate gradient inversion

作者简介: 苗景春(1968 -),男,毕业于成都理工大学,物探高级工程师。