

AMT、TEM、VES 地层响应特征模拟分析 及其联合反演探讨

杨云见¹, 何展翔¹, 王绪本², 罗卫锋¹

(东方地球物理公司综合物化探事业部,涿州 072751; 2.成都理工大学,成都 610059)

摘要 通过正演模拟方式分析音频大地电磁法(AMT)、中心回线瞬变电磁法(TEM)、直流电测深法(VES)对地层的响应特征,结果表明:TEM、AMT 对地层的响应特征类似,即对低阻层反应灵敏,而对高阻层的分辨能力较差;VES 对高阻层及低阻层的分辨能力相当,相对于 TEM、AMT,VES 对低阻层的分辨能力差,而对高阻层的分辨能力较高.基于 AMT 或 TEM 与 VES 对地层的响应具有互补的特点,探讨了对 AMT 或 TEM 与 VES 数据进行的联合反演.结果表明,AMT 或 TEM 与 VES 进行联合反演,相比单一方法进行反演,结果能得到明显的改善.

关键词 AMT,TEM,VES,地层响应特征,联合反演

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)05-1550-06

A discussion on layer response characters of AMT, TEM and VES and joint inversion

YANG Yun-jian¹, HE Zhan-xiang¹, WANG Xu-ben², LUO Wei-feng¹

(1. BGP Inc. ZHuzhou 072751, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract The paper discusses the layer response characters of AMT, TEM (central loop configuration) and VES (schlumberger configuration) by forward modeling procedure. The result shows that AMT or TEM is more sensitive to low resistivity layers than high resistivity layers, and VES is more sensitive to high resistivity layers comparing with AMT and TEM. Based on the response characters the paper then discusses the joint inversion of AMT or TEM and VES. The model inversion trial shows that the joint inversion results are much better than the result of any single method inversion.

Keywords AMT, TEM, VES, layer response character, joint inversion

0 引言

直流电测深法(VES,以对称四极为例,以下使用简写)、中心回线瞬变电磁法(TEM,以下使用简写)及音频大地电磁法(AMT,以下使用简写)为目前矿产、水、工、环等勘探领域应用广泛的三种电法勘探方法.这三种方法均是以地下介质的电阻率差异为主,通过研究地下介质的电性特征来解决地质问题,由于基于的原理及观测域的不同,分属于三类不同的方法(VES 为传导类方法,TEM 为时间域电磁感应法,AMT 为频率域电磁感应法),因此有必要分析这三种方法对地层的响应特征,为勘查设计

选取合适的方法提供参考.在对这三种方法对地层响应特征分析的基础上,本文同时尝试对这几种方法进行联合反演,以提高反演解释的精度.

1 AMT、TEM 及 VES 的地层响应特征

为简明起见,本文采用一维数值模拟的方法来分析 AMT、TEM 及 VES 对地层的响应特征^[1~3].为便于对比,均对二次参数—视电阻率曲线(AMT 还包括相位,TEM 由 Hz 定义全区视电阻率^[2])进行讨论,并采用相对异常曲线评价其对地层的分辨能力.相对异常定义为目标层(低阻或高阻)半空间响应与均匀半空间响应之差再与均匀半空间响应的

百分比.

分别选取 H 型模型及 K 型模型来讨论 AMT、TEM 及 VES 对低阻层或高阻层的响应特征. 对于 H 型模型, 设第一、三层的电阻率为 $100 \Omega \cdot m$, 低阻目标层(第二层)的电阻率为 $20 \Omega \cdot m$ (为背景电阻率的 $1/5$), 厚度 $50 m$, 顶面埋深为 $200 m$; 为与 H 型模型进行对比分析, K 型模型相应地设计为: 第一、三层的电阻率为 $100 \Omega \cdot m$, 高阻目标层(第二层)的电阻率为 $500 \Omega \cdot m$ (为背景电阻率的 5 倍), 厚度 $50 m$, 顶面埋深为 $200 m$. 此外取电阻率为 $100 \Omega \cdot m$ 均匀半空间模型的响应为基准计算相对异常曲线.

对于 AMT 正演, 取频率范围为 $0.1 \sim 2500 Hz$, 上述目标层模型的视电阻率、相位及其相对异常曲线的如图 1、2、3、4. 对于 TEM 正演, 取发射圆线圈半径为 $200 m$, 发射电流为 $10A$, 观测时窗为 $1e-5 \sim 1s$, 上述目标层模型的视电阻率曲线及其相对异常曲线的如图 5、6. 对于 VES 正演, 取 $AB/2$ 极距为 $10 \sim 3000 m$, 上述目标层模型的视电阻率曲线及其相对异常曲线如图 7、8. 由图 1~6 可见, AMT 及 TEM 对目标层的响应特征类似: 这两种方法均对低阻目标层反应灵敏, 本例中 AMT 视电阻率相对异常幅度最大为 -31.4% 、相位相对异常最大幅度为 15.9% , TEM 视电阻率曲线相对异常幅度最大

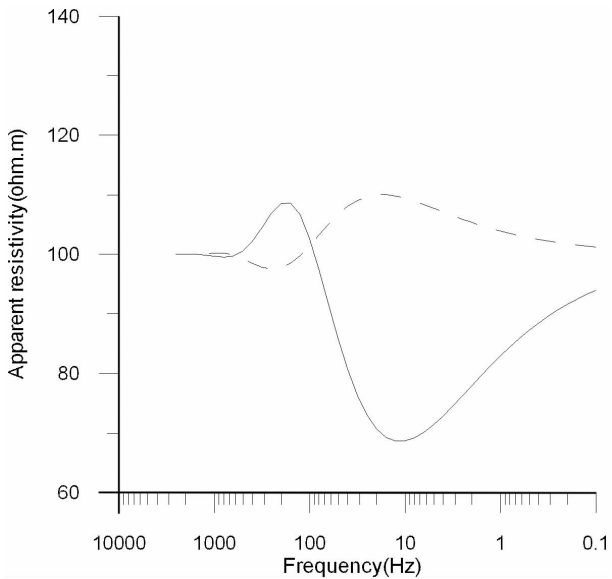


图 1 AMT 正演视电阻率曲线

实线为 H 型模型的响应, 虚线为 K 型模型的响应

Fig. 1 Apparent resistivity curve of AMT forward modeling

The solid line denotes the response of "H" model; the dash line denotes the response of "K" model.

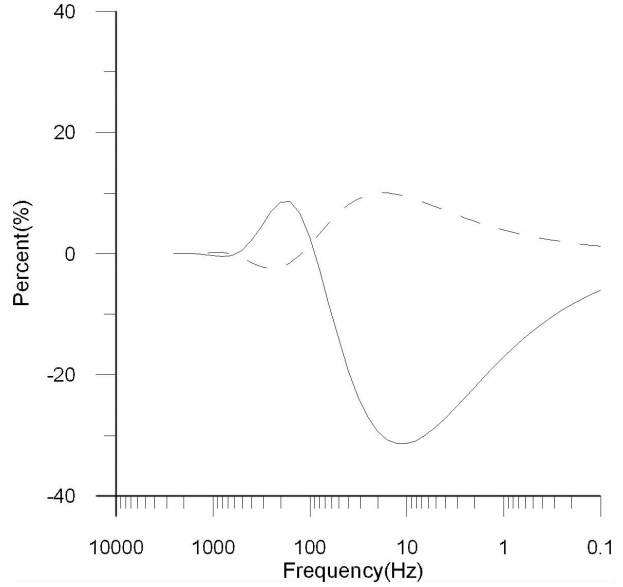


图 2 AMT 正演视电阻率相对异常曲线
实线为 H 型模型的响应, 虚线为 K 型模型的响应

Fig. 2 Same as Fig. 1 but for relative apparent resistivity

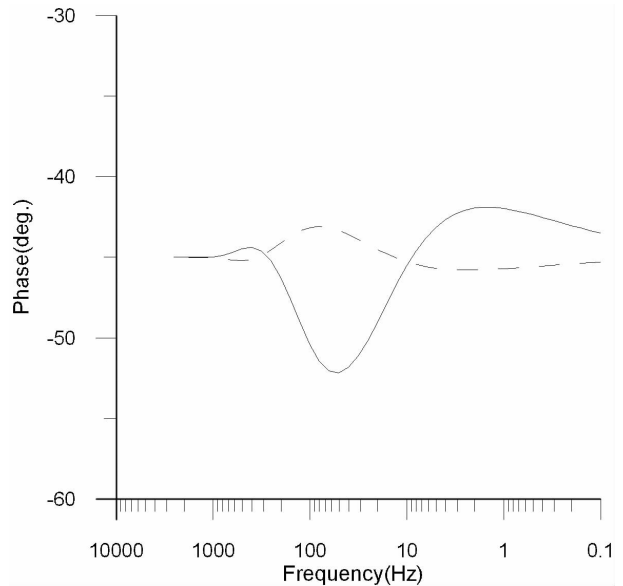


图 3 AMT 正演阻抗相位曲线

实线为 H 型模型的响应, 虚线为 K 型模型的响应

Fig. 3 Same as Fig. 1 but for impedance phase

为 -31.1% ; 而对高阻目标层的分辨能力却较差, 相对异常幅度较小, 本例中 AMT 视电阻率相对异常幅度最大仅为 10.0% 、相位相对异常最大幅度为 -4.3% , TEM 视电阻率曲线相对异常幅度最大也仅为 9.4% . 图 7~8 可见, VES 对目标层的响应特征则与 AMT、TEM 不同: VES 对高阻目标层、低阻目标层分辨能力相当, 在本例中高阻目标层的相对异常幅度最高为 27.7% , 低阻目标层的相对异常幅度

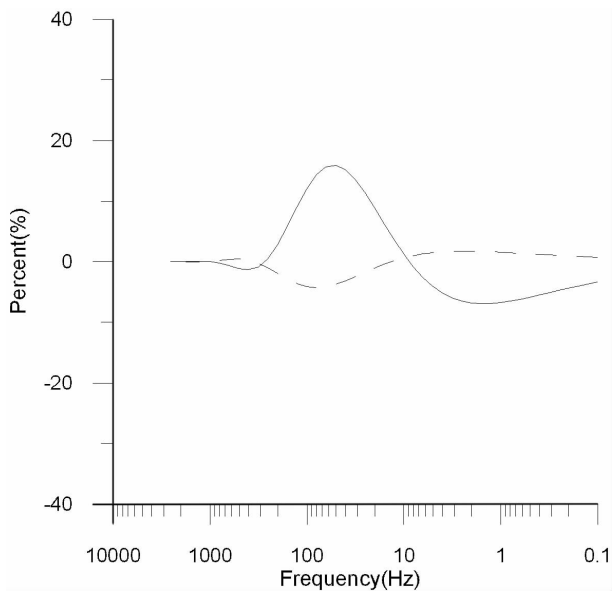


图 4 AMT 正演阻抗相位相对异常曲线
实线为 H 型模型的响应,虚线为 K 型模型的响应

Fig. 4 Same as Fig. 1 but for relative impedance phase

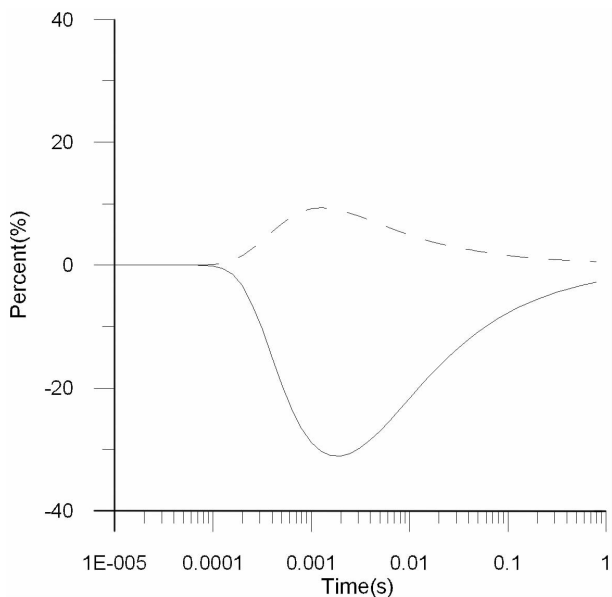


图 6 TEM 正演全区视电阻率相对异常曲线
实线为 H 型模型的响应,虚线为 K 型模型的响应

Fig. 6 Same as Fig. 5 but for relative anomaly

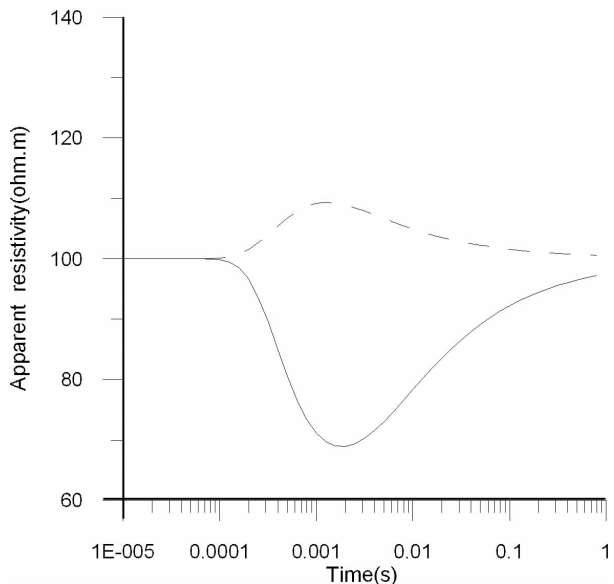


图 5 TEM 正演全区视电阻率曲线
实线为 H 型模型的响应,虚线为 K 型模型的响应

Fig. 5 All time apparent resistivity curve
of TEM forward modeling

The solid line denotes the response of "H" model;
the dash line denotes the response of "K" model

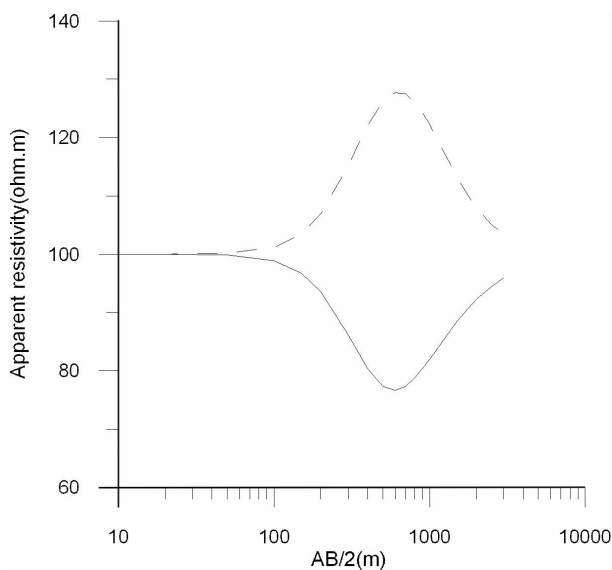


图 7 VES 正演视电阻率曲线

实线为 H 型模型的响应,虚线为 K 型模型的响应

Fig. 7 Apparent resistivity curve of
VES forward modeling

The solid line denotes the response of "H" model;
the dash line denotes the response of "K" model.

最高为-23.4%。相对于 AMT 及 TEM, VES 对低阻层的分辨能力差一些,但对高阻层却有较高的分辨能力。

由正演模拟可知,TEM、AMT 对地层的响应特征类似,即对低阻层反应灵敏,对高阻层则不灵敏,

适合于解决低阻目标层的问题;VES 对高阻层及低阻层的分辨能力相当,相对于 TEM、AMT 而言, VES 对低阻层的分辨能力差一些,但高阻层的分辨能力更高,更适合于解决高阻目标层的问题。

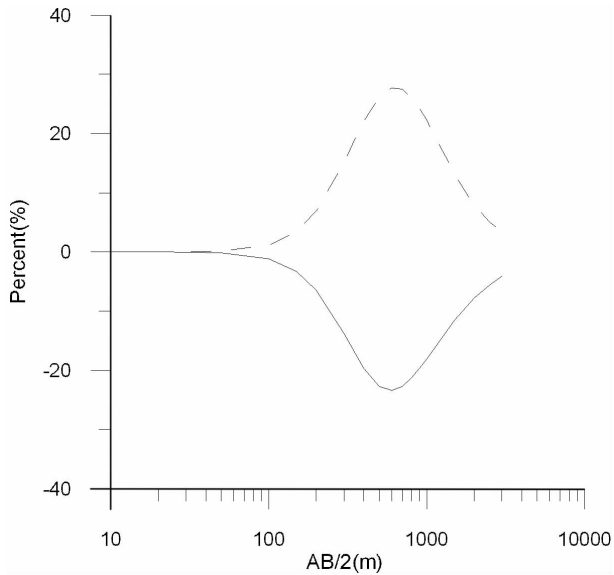


图 8 VES 正演相对异常曲线

实线为 H 型模型的响应,虚线为 K 型模型的响应

Fig. 8 Same as Fig. 7 but for relative anomaly

2 联合反演探讨

减小反演的多解性、提高反演解释的精度一直是地球物理反演解释努力的方向. 基于 AMT、TEM 对低阻层反应灵敏,而 VES 对高阻层具有较高的分辨能力,即 AMT 或 TEM 与 VES 资料存在互补的特点,作者尝试对 AMT 或 TEM 与 VES 进行联合反演,以期能够改善反演的效果、提高反演解释的精度.

2.1 联合反演方法

设 AMT 或 TEM 测深点有 m 个频点(f)或延时(t),观测数据为 $\mathbf{D}=(d_1, \dots, d_m)^T$; VES 观测数据有 l 个极距(r),观测数据为 $\mathbf{D}'=(d'_1, \dots, d'_l)^T$; 设大地由 n 层介质组成,模型参数为: $\mathbf{X}=(\rho_1, \dots, \rho_n, h_1, \dots, h_{n-1})^T$. 根据最小二乘法原理可建立目标函数:

$$\varphi = \sum_{k=1}^m [d_k - f(t_k, \rho_1, \dots, \rho_n, h_1, \dots, h_{n-1})]^2 + \sum_{k=1}^l [d'_k - f'(r_k, \rho_1, \dots, \rho_n, h_1, \dots, h_{n-1})]^2, \quad (1)$$

式中 f 表示 AMT 或瞬变响应正演算子, f' 表示直流电测深正演算子.

由于 φ 为非线性函数,直接求取使 φ 最小的 \mathbf{X} 很困难,通常采取迭代求解的方法.

依据阻尼最小二乘法原理,可得到迭代方程:

$$(\mathbf{A} + \alpha \mathbf{I}) \Delta \mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (2)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{12n-1} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{22n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{2n-11} & a_{2n-12} & \cdots & a_{2n-12n-1} \end{bmatrix},$$

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^m \frac{\partial f}{\partial x_j} \frac{\partial f}{\partial x_i} + \sum_{k=1}^l \frac{\partial f'}{\partial x_j} \frac{\partial f'}{\partial x_i},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \cdots \\ g_{2n-1} \end{bmatrix},$$

$$g_i = \sum_{k=1}^m [d_k - f(t_k, \mathbf{X}_0)] \frac{\partial f}{\partial x_i} + \sum_{k=1}^l [d'_k - f'(r_k, \mathbf{X}_0)] \frac{\partial f'}{\partial x_i}.$$

α 为阻尼因子, \mathbf{I} 为单位阵, $\Delta \mathbf{X}$ 为模型修正量, x_i, x_j 表示 \mathbf{X} 的第 i, j 个分量.

给出初始模型 \mathbf{X}_0 , 即可由 (2) 式求出模型修正量 $\Delta \mathbf{X}$, 得到一次迭代解 $\mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_0 + \Delta \mathbf{X}$, 将本次迭代解作为下次迭代的初值, 即可得到新的迭代解, 如此迭代计算, 即可得到最小二乘意义下的最佳模型.

2.2 模型试算

选取较为复杂的包含两个高阻目标层或低阻目标层的算例来分析 AMT 与 VES、TEM 与 VES 联合反演的效果.

算例 1 (低阻目标层模型):

取层数为 5 层的一维层状模型(第二、四层为低阻目标层), 各层的参数见表 1. AMT 模型正演取频率范围为 0.1~2500Hz. TEM 模型正演参数取: 回线半径为 200m, 供电电流为 10A, 观测时间范围 1e-5~1s. VES 正演, 取 AB/2 极距从 10~3000m. 对此模型的 AMT 与 VES、TEM 与 VES 的正演结果分别进行联合反演, 结果如表 1, 表中同时给出了单一方法反演的结果以供对比. 反演所取的初始模型由 TEM“烟圈法”近似反演的结果给出. 由表 1 可见: 无论是 AMT 与 VES, 还是 TEM 与 VES 联合反演, 10 次迭代的结果即很接近正演模型; 而采用 AMT、TEM 或 VES 单一方法进行反演, 由于视电阻率曲线存在“等值性”, 即使拟合误差很小, 反演结果与正演模型也有相当的差距.

算例 2 (高阻目标层模型):

同样取层数为 5 层的一维层状模型(第二、四层为高阻目标层), 各层的参数见表 2. AMT 模型正演取频率范围为 0.1~2500Hz. TEM 模型正演参数

表 1 低阻目标层模型的反演结果

Table 1 The inversion results of low resistivity target layered model

地层参数	$h_1(\text{m})/\rho_1$ ($\Omega \cdot \text{m}$)	$h_2(\text{m})/\rho_2$ ($\Omega \cdot \text{m}$)	$h_3(\text{m})/\rho_3$ ($\Omega \cdot \text{m}$)	$h_4(\text{m})/\rho_4$ ($\Omega \cdot \text{m}$)	ρ_5 ($\Omega \cdot \text{m}$)
正演模型	100/100	15/10	185/100	50/10	100
初始模型	80/100	60/40	90/50	110/40	80
AMT 反演	96.3/100	31.1/16.4	141.3/172.1	105/17.7	100
TEM 反演	96.8/100	28.7/15.6	149.7/158	89.2/15.5	100
VES 反演	93/100	67.1/35.4	133.8/113	174.8/30.2	101.1
AMT、VES 联合反演	99.7/100	16.4/10.7	178.3/103	61.4/11.9	100
TEM、VES 联合反演	99.7/100	16.3/10.7	178.9/103	59.9/11.6	100

迭代次数: 10 次 AMT 反演拟合误差: .084% TEM 反演拟合误差: .11% VES 反演拟合误差: .032% AMT、VES 联合反演拟合误差: .12% TEM、VES 联合反演拟合误差: .12%

表 2 高阻目标层模型的反演结果

Table 2 The inversion results of high resistivity target layeres model

地层参数	$h_1(\text{m})/\rho_1$ ($\Omega \cdot \text{m}$)	$h_2(\text{m})/\rho_2$ ($\Omega \cdot \text{m}$)	$h_3(\text{m})/\rho_3$ ($\Omega \cdot \text{m}$)	$h_4(\text{m})/\rho_4$ ($\Omega \cdot \text{m}$)	ρ_5 ($\Omega \cdot \text{m}$)
正演模型	100/10	15/100	185/10	50/100	10
初始模型	80/10	50/12	80/11	150/12	10
AMT 反演	89.8/10	53.8/14.8	97.3/9	167.2/14.5	10
TEM 反演	89.7/10	54.4/14.7	88.3/9	167.3/14.4	10
VES 反演	92.8/10.	67.7/28	120.4/8.8	242.9/26	9.8
AMT、VES 联合反演	100.1/10	15.3/98.5	183.7/10.	50.7/98.7	10
TEM、VES 联合反演	100/10	15.2/98.9	184.1/10.	50.5/99	10.

迭代次数: 10 次 AMT 反演拟合误差: 0.02% VES 反演拟合误差: .029% TEM 反演拟合误差: .025% AMT、VES 联合反演拟合误差: 0.023% TEM、VES 联合反演拟合误差: .017%

同样取:回线半径为 200 m,供电电流为 10A,观测时间范围 $1e-5 \sim 1s$. VES 正演,也取 $AB/2$ 极距从 10~3000 m. 对此模型的 AMT 与 VES、TEM 与 VES 的正演结果分别进行联合反演,结果如表 2,表中也给出了单一方法反演的结果以供对比. 反演所取的初始模型同样由 TEM“烟圈法”近似反演的结果给出. 由表 2 可见:AMT 与 VES、TEM 与 VES 联合反演均对感应法(AMT、TEM)不敏感的高阻目标层的反演有明显的改善,10 次迭代的结果几乎重现了正演模型. 而采用单一方法反演的结果,由于视电阻率曲线存在“等值性”,即使拟合误差很小,反演结果与正演模型也有相当的差距,特别是 AMT 及 TEM 方法由于对高层反应不灵敏,反演结果的电阻率与正演模型的电阻率差距较大.

由模型试算结果可见,采取 AMT 或 TEM 与 VES 联合反演的方法,相比单一方法,结果能得到明显的改善.

3 结 论

由本文的正演模拟可知,TEM、AMT 对地层的响应特征类似,即对低阻层反应灵敏,而对高层层不灵敏,适合于解决低阻目标层的问题;相对于 TEM、AMT 而言,VES 对高层层却有较高的灵敏度,更适合于解决高阻目标层的问题. 基于 AMT 或 TEM 与 VES 对地层的响应具有互补的特点,AMT 或 TEM 与 VES 进行联合反演,相比单一方法进行反演,其结果能得到明显的改善.

参 考 文 献 (References):

- [1] 傅良魁主编. 应用地球物理教程—电法 放射性 地热[M]. 北京:地质出版社,1991.
Fu L K, Edited. Applied geophysics-fundamentals of electrical, radiological and geothermal method [M]. Beijing: The Geological Publishing House, 1991.
- [2] 方文藻,李子国,李貅. 瞬变电磁测深法原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1993.

- Edited by Fang WenZao, Li YuGuo and Li Xiu. Transient Electromagnetic Sounding Method Principle [M]. Xi'an: North-western Polytechnical University Press, 1993.
- [3] 米萨克 N. 纳比吉安主编, 赵经祥译. 勘查地球物理-电磁法 [M]. 北京:地质出版社, 1992.
Nabigan M N, Edited, Zhao J X, Translated. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory [M]. Beijing: The Geological Publishing House, 1992.
- [4] 杨云见, 王绪本, 何展翔. 考虑关断时间效应的瞬变电磁一维反演[J]. 物探与化探, 2005, 3: 234~236.
Yang Y J, Wang X B, He Z X. 1D Inversion of Transient Electromagnetic Data in Consideration of Ramp Time Effect [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 3: 234~236.
- [5] 徐海浪, 吴小平. 电阻率二维神经网络反演[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 584~589.
Xu H L, Wu X P. 2-D resistivity inversion using the neural network method. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(2): 584~589
- [6] 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 坑道直流电阻率法超前探测研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1529~1538.
Huang J G, Wang J L, Ruan B Y. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(5): 1529~1538.
- [7] 闫述, 陈明生. 瞬变电磁场资料的联合时-频分析解释[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 203~208.
Yan S, Chen M S. Interpretation of transient electromagnetic field data using joint time-frequency analysis. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(1): 203~208.
- [8] 王光杰, 王勇, 李帝铨, 等. 基于遗传算法 CSAMT 反演计算研究[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1285~1289
Wang G J, Wang Y, Li D Q, *et al.* The application of Genetic Algorithm to CSAMT inversion [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(4): 1285~1289.
- [9] 罗红明, 王家映, 师学明, 等. 量子路径积分算法及其在大地电磁反演中的应用[J]. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1268~1276.
Luo H M, Wang J Y, Shi X M, *et al.* Quantum path integral algorithm and its application in magnetotelluric inversion [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(4): 1268~1276.
- [10] 师学明, 王家映, 易远元, 等. 一种新的地球物理反演方法——模拟原子跃迁反演法[J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 305~312.
Shi X M, Wang J Y, Yi Y Y, *et al.* A study on the simulated atomic transition algorithm for geophysical inversion [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(1): 305~312.
- [11] 于鹏, 王家林, 吴健生, 等. 重力与地震资料的模拟退火约束联合反演[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 529~538.
Yu P, Wang J L, Wu J S, *et al.* Constrained joint inversion of gravity and seismic data using the simulated annealing algorithm [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(2): 529~538.
- [12] 吴子泉, 尹成. 电阻率横向剖面法及其在隐伏断层探测中的应用研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 625~631.
Wu Z Q, Yin C. Application of Schlumberger transverse profiling method to detecting buried faults [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(2): 625~631.
- [13] 嵇艳鞠, 林君, 王忠. 瞬变电磁接收装置对浅层探测的畸变分析与数值剔除[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 262~267.
Ji Y J, Lin J, Wang Z. Analysis and numerical removing of distortion in transient electromagnetic receiver device for shallow sounding [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(1): 262~267.
- [14] 苏永军, 王绪本, 罗建群. 高密度电阻率法在三星堆壕沟考古勘探中应用研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 268~272.
Su Y J, Wang X B, Luo J Q. The archaeological application of high-density resistivity method to ditch exploration on Sanxingdui site [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(1): 268~272.
- [15] 朱传庆, 杨书江, 李同彬, 等. 最优化电性分层技术在柯克亚山前带的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 562~566.
Zhu C Q, Yang S J, Li T B, *et al.* Application of optimization layering technology to CEMP profile in Kekeya complicated fore-mountains area [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(2): 562~565.
- [16] 王若, 王妙月, 卢元林. 三维三分量 CSAMT 法有限元正演模拟研究初探[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 579~585.
Wang R, Wang M Y, Lu Y L. Preliminary study on 3D3C CSAMT method modeling using finite element method [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(2): 579~585.
- [17] 李貅, 薛国强, 郭文波. 瞬变电磁法拟地震成像研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 811~816.
Li X, Xue G Q, Guo W B. Research progress in TEM pseudo-seismic imaging [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(2): 811~816.
- [18] 张志厚, 刘国兴, 唐君辉, 等. 漠河地区天然气水合物远景调查之一——电法探测岩石性永久冻层的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 887~895.
Zhang Z H, Liu G X, Tang J H, *et al.* The prospective investigation of gas hydrate in Mohe region—the application research of using electrical method to explore the ever frozen layer [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(2): 887~895.
- [19] 李天成, 牛滨华, 孙春岩, 等. 2D 电阻率正反演成像在水平和垂直模型上的异常响应研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 940~946.
Li T C, Niu B H, Sun C Y, *et al.* 2D resistivity tomography for anomalous response study on horizontal layered and vertical model [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(2): 940~946.
- [20] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1195~1200.
Xue G Q, Li X, Di Q Y. The progress of TEM in theory and application [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(2): 1195~1200.