

EH-4 数据在 IMAGEM 与 WINGLINK 下反演处理的对比

张 凯 飞

(铁一院甘肃勘察院 物探新技术研究所,甘肃 兰州 730000)

摘要: 对目前在工程上应用比较广泛的 2 款大地电磁勘察反演软件——基于博斯蒂克(BOSTIK)方法的 IMAGEM 软件和基于非线性共轭梯度(NLCG)方法的 WINGLINK 软件的特点进行了对比研究。这两款软件在反演方法、操作系统平台、数据编辑、静态校正、反演效果等方面有很大的不同。在此基础上,对兰渝线某隧道工程 EH-4 大地电磁资料的反演解释实例进行了分析,认为两款软件各有侧重,建议结合使用。

关键词: 大地电磁; 反演问题; EH-4 系统; IMAGEM; WINGLINK; 隧道勘察

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2013)06-1146-06

目前,国内许多使用 EH-4 电磁勘探系统的用户,对后期资料大都使用 EH-4 系统自带的 IMAGEM 软件进行处理,并在此基础上进行地质解释。然而,在生产中发现 IMAGEM 软件存在许多问题,如:软件为 DOS 处理界面,操作不方便;反演采用的是以一维模型为基础的博斯蒂克反演,不是真正意义上的二维反演;软件在曲线编辑上功能有限,无法满足需要;由于系统采用的是空间滤波法进行静态校正,滤波因子的选择人为因素大,对结果的把握难度大,不利于资料的解释等。

为了更好地处理 EH-4 资料,克服 IMAGEM 软件的缺点,在生产中使用 WINGLINK 软件对 EH-4 资料进行带地形的二维反演处理,取得了较好的效果。通过对 IMAGEM 和 WINGLINK 软件在资料处理各个方面的对比分析,我们认为,使用带地形的二维反演来处理 EH-4 资料,有着必要的现实意义。

1 反演的理论基础

在众多的大地电磁反演软件中,反演问题一直是其核心问题。经过几十年的发展,目前大地电磁反演已经有最优化解法与完全非线性解法,比较有代表性的是最速下降法、共轭梯度法、最小二乘法、马奎特法及最小模型约束反演、最平缓模型约束反演^[1]、松弛反演方法^[2]、广义逆反演、BOSTIK 反演、徐世浙的曲线对比法、王家映的大地电磁拟地震反演、大地电磁偏移成像^[3]、蒙特卡洛、师学明的模拟退火、多尺度逼近遗传算法^[4]、遗传算法或改进的遗传算法^[5]等。

笔者所讨论的两款软件,IMAGEM 软件采用的反演理论是 BOSTIK 一维频深转换,不带地形的二维显示;WINGLINK 软件采用的是有限差分正演和带地形的非线性共轭梯度(NLCG)反演。

BOSTIK 反演是以低频区视电阻率曲线尾支渐近线的特征为基础,将视电阻率随周期(频率)变化的曲线转化为电阻率随深度变化的曲线,在简单的水平层状介质上,假设下半空间介质电阻率为无穷大和零两种极限情况,曲线渐近线方程为

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu S^2}, \quad \rho_a = \frac{1}{\omega\mu H^2},$$

式中, S 为下半空间上面多层介质的总纵向导电率; H 为下半空间上面多层介质的总厚度。由上式推导出地层电性是随深度连续变化的情况,则纵向电导可以表示为

$$\sigma(H) = \frac{dS/d\omega}{dH/d\omega},$$

对上式取对数,求导,带入希尔伯特转化公式整理可得

$$H = \sqrt{\rho_a/\omega\mu},$$

$$\rho(H) = \rho_a(\omega) \left[\frac{\pi}{2\theta(\omega)} - 1 \right].$$

以上二式就是现实应用的博斯蒂克反演公式^[6],式中 $\theta(\omega)$ 可以由相位曲线读出。

NLCG 法是由 Fletcher 和 Reeves 提出来的一种改进的共轭梯度法,其基本思想是把共轭性与最速下降方法结合,将常规共轭梯度法的 β_k 变化为 $\beta_k^{FR} = \|g_{k+1}\|^2 / \|g_k\|^2$ 来求取高于二次的连续的

目标函数 $\Phi(x)$ 的最优化解。文献 [7] 中给出了其大致算法, 这里不再赘述。

2 功能比较

WINGLINK 是运行在 Windows XP 下的一款大地电磁法处理系统, 它包括数据库建立、曲线编辑、拟断面图形成(频率—电阻率和频率—相位)、一维反演、二维反演及结果显示、输出等模块, 其中曲线可进行数字或 D + 拟合编辑, 二维反演采用带地形的非线性共轭梯度(NLCG); IMAGEM 软件是 EH-4 系统自带的运行在 DOS 环境下的处理软件, 它包括数据格式转换、数据圆滑、编辑、一维反演、二维显示及成果图件的绘制打印。这两款软件在进行 EH-4 大地电磁资料处理解释时需要进行的操作步骤与参数设置是各不相同的。表 1 给出了两款软件的综合对比情况。

表 1 IMAGEM 与 WINGLINK 软件的对比

	IMAGEM	WINGLINK
数据格式	@、X、Y、Z 文件	EDI 文件
程序运行环境	DOS	Winxp、2000 及其以上
圆滑方式	手动和自动圆滑	数字圆滑、D + 圆滑
曲线编辑	仅简单剔除“非点”	人机交互拟合
静态校正	空间滤波法	静态校正相位法等
地形改正	无	带地形二维反演
反演模式	标量模式	TE/TM 两种模式
一维反演	Bostick 方法	Bostick、Occam 方法
二维反演	二维显示	NLCG 方法
计算速度	高效	一般
处理结果	随机性强、解释难度大	资料可解释性强

2.1 数据库的建立

EH-4 大地电磁系统实际采集的原始数据为时间序列的数据, 而导入 IMAGEM 软件的需要是文本格式的 @、X、Y、Z 文件数据, 导入 WINGLINK 软件的数据需要是 EDI 格式文件, 要实现原始数据在两款软件中的数据库建立, 就要对原始数据进行格式转换, 以保证格式兼容。由于 IMAGEM 软件是 EH-4 自带的解释软件, 因此在 IMAGEM 下可以实现时间序列数据向 Z 文件数据的转换; 然而 WINGLINK 软件无法对原始时间序列数据进行预处理, 则需要借助其他软件来进行数据格式转换。

数据预处理的大致流程如图 1 所示。需要指出的是, WINGLINK 软件能实现带地形的二维反演, 而 EH-4 系统采集的原始数据没有坐标信息, 因此需要结合手持 GPS 定点的坐标信息, 将经纬、高程等信息输入 WINGLINK 软件以建立完整的数据库。

2.2 数据编辑

数据编辑是资料处理的重要部分, 包含数据圆

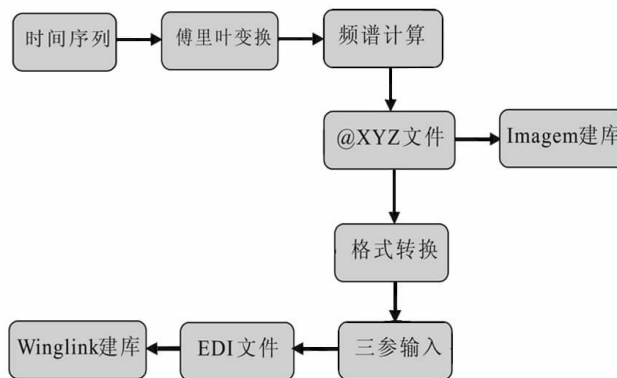


图 1 所需数据格式的预处理流程

滑、曲线编辑、静态校正等内容, 主要目的是消除仪器噪声、天然电磁噪声、风噪声和人文噪声引起的明显畸变, 并为模型背景的确定、静态校正等反演参数选择提供依据。由于 EH-4 系统受接地条件和电力线影响较大, 数据编辑显得尤为重要, 而数据的圆滑、曲线编辑等在两款软件中的处理方式方法都不一样。

2.2.1 数据圆滑、编辑

WINGLINK 软件中对数据的圆滑有两种方式: 数字圆滑和 D + 圆滑。其中, D + 圆滑是将视电阻率曲线和相位曲线结合起来的圆滑方法, 而且不会削弱有效信号, 也不会对数据进行剔点处理, 减少了人工编辑中的人为因素的干扰, 提供了静态偏移影响的定量和定性评估^[8], 能对曲线各频点对应的视电阻率和相位逐个进行编辑, 还能实现曲线的反复编辑拟合, 可以有效去掉“非点”等明显有误的频点, 保证视电阻率和相位曲线间的物理有效性, 有利提高反演效果, 并且编辑界面设计的比较人性化, 人机交互强, 能大大提高曲线编辑的质量。

IMAGEM 软件对曲线的编辑则仅仅是对数据进行简单的“非点”剔除, 对数据采用自动圆滑, 包括三点、五点、三点二次和五点三次圆滑, 而且可以选择不同的圆滑因子来对资料进行处理, 对反演结果可以进行对比分析。

图 2 给出了某隧道工区中典型测点用这两款软件作圆滑编辑前、后的结果(截屏)比较, 对比可以发现, IMAGEM 软件进行数据处理的是 DOS 界面, 人机交互和效率都非常一般, 并且相比 WINGLINK 软件, 有效频点少, 频率分布也不均匀。

2.2.2 静态校正

静态效应是由于地表电阻率横向不均匀引起的一种电荷积累效应, 其突出表现是视电阻率曲线沿视电阻率轴出现的一个平行移动, 不进行静态校正

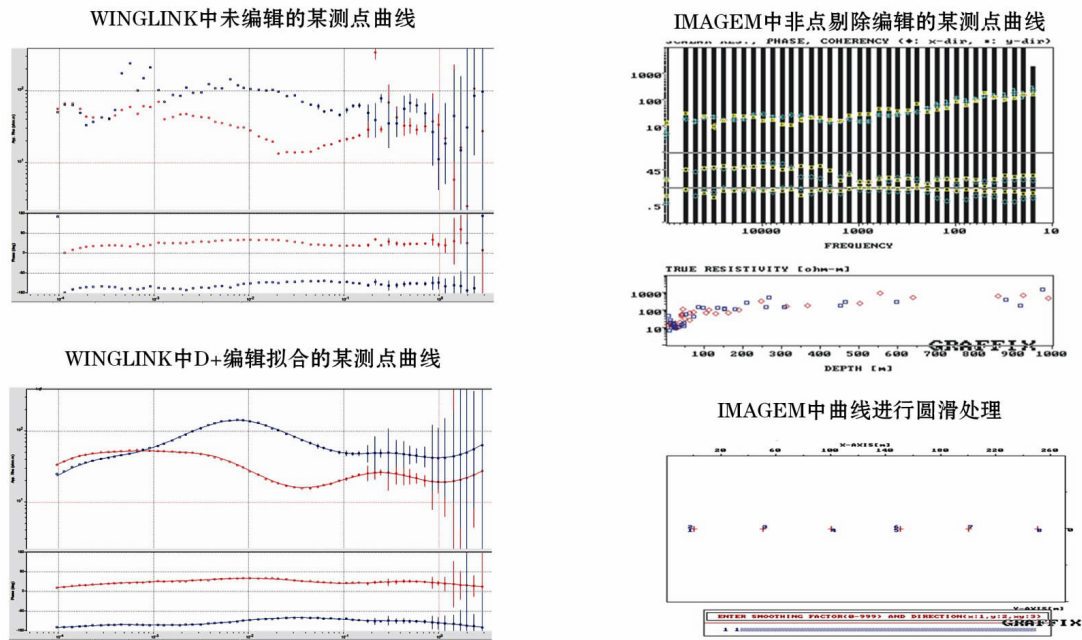


图2 某实测数据用两款软件进行圆滑编辑前、后的结果比较

可能导致最终反演结果出现严重的“挂面条”现象,不利于后期资料的地质可解释性。目前,空间滤波法、时频分离与压制、静校正相位法、利用磁场实测数据作静态校正、联合反演法、二维正演模拟法、直接二维反演法、电磁列阵剖面法是静态效应校正的几种主要方法^[9]。

WINGLINK 软件进行静态偏移校正的方法是静态校正相位法,即利用不受静态效应影响的相位资料作静态校正,或者利用瞬变电磁测深(TEM)数据进行比对来作静态校正,另外在反演模块中也可以通过“static shift”设置静态校正值(一般在5%~10%)。在反演中对数据进行自动静态校正;而IMAGEM 软件采用的是空间滤波法(滤波因子的选择一般在0~1之间),根据勘察需要选取不同的滤波因子,这就要求编辑人员具备丰富的工作经验和工作经历,而且还会出现因人而异的可能。

2.3 资料反演

反演是资料处理解释的核心部分,反演结果的质量直接影响后期的综合解释,这两款软件最大的区别就在于反演模块,下面就从反演模式、一维、二维反演、计算速度及反演结果等方面对两款软件的异同进行对比。

2.3.1 反演模式选择

目前对EH-4大地电磁资料的二维反演有三种模式:TE模式、TM模式及TE与TM联合模式。WINGLINK 软件进行的是张量处理,所以在该软件中能够实现上述三种反演模式,理论上,TE与TM联

合模式反演最为理想,但除非野外数据极为理想,否则反演时曲线拟合误差较大。通过几年来的工作总结,我们发现在WINGLINK 软件下TM模式二维反演是较为实用的反演模式,TE模式、TE与TM联合模式作为参考;而IMAGEM 软件只能进行标量处理,无法分TE和TM以及TE与TM联合模式处理,这样就使得在该软件下进行处理的EH-4资料具有很大的局限性,不利于资料的分析比较。

2.3.2 一维、二维反演

在一维反演方面,两款软件的大致方法一致,都能实现BOSTIK反演,实现地电模型的转换。如图3某测点的一维反演资料所示,通过BOSTIK反演可从图中的视电阻率—频率、相位—频率的曲线(右上部分)得到一维的电阻率—深度的曲线。不同之处在于,除了BOSTIK反演外,WINGLINK 软件还能进行OCCAM方法的一维反演,如图4所示,能更直观地得到单点大地电磁曲线的拟合情况和该点的大致地层信息。

二维反演方面,从理论上比较,IMAGEM 软件并无真正意义上的二维反演,WINGLINK 软件采用的是带地形的非线性共轭梯度反演;参数设置上比较,IMAGEM 软件仅需要选择参与反演的测点、圆滑因子就可以快速地反演得到如图5所示的不带地形的结果,而WINGLINK 软件的反演需要经过反演剖面建立、有效拟合频段的确定、初始模型选择、带地形的有限差分的网格剖分、正则化因子选取、权重系数设置、迭代次数、拟合误差的选取等,才能进行带地

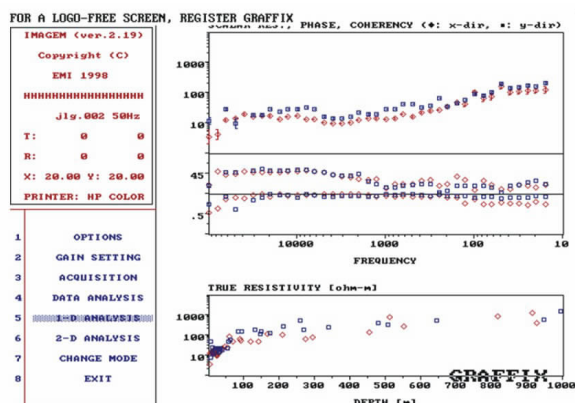


图3 IMAGEM 中某测点的一维反演资料

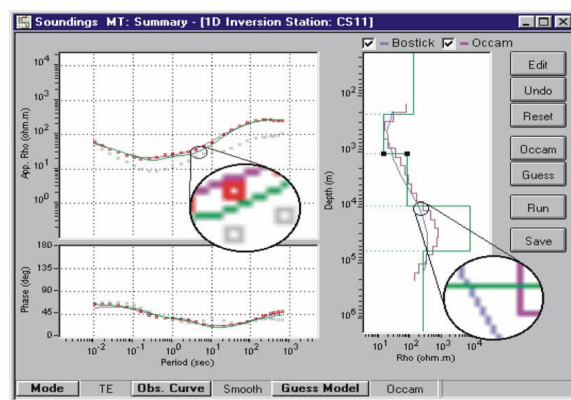


图4 WINGLINK 中某测点的一维反演资料

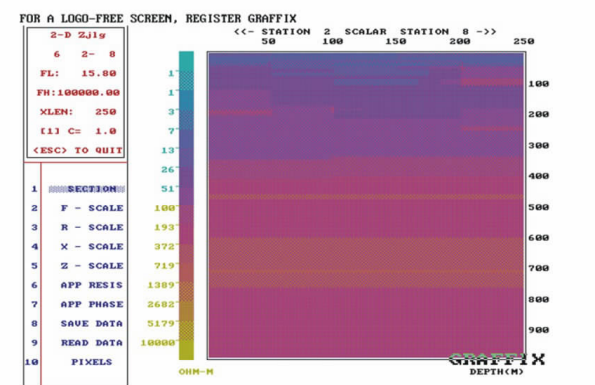


图5 IMAGEM 中资料二维反演结果

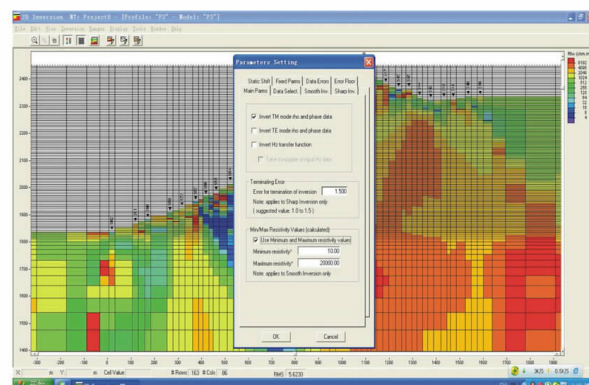


图6 WINGLINK 中资料的二维反演

形的 NLCC 反演,如图 6 所示,且由于物探结果的多解性,反演参数的确定至关重要,因此经过多次试算才能得到最适合的参数。

2.3.3 反演成果

在两款软件中均有相应的绘图模块,但通常情况下都是将输出的反演结果(常转换为 DAT 格式文件)在 Surfer 或 CAD 软件下绘制最终成果图。从结果上来比较,二款软件的特点主要体现在反演的速度和反演结果的类型。在反演速度方面,对于同样的工作量,IMAGEM 软件的资料反演速度比 WINGLINK 软件的高效许多,在一维反演方面甚至能达到工作现场直接给出电阻率—深度的大地电磁测深曲线的效果,这对工作人员现场实际工作的开展和方法有效性的把握有着直观的指导作用,而 WINGLINK 软件的非线性共轭梯度反演需要做大量的资料处理工作,且反演时间一般比较长。在反演结果方面,IMAGEM 软件的 BOSTIK 反演实际上是一维地电模型的转换,没有实质的二维反演,而 WINGLINK 软件的带地形 NLCC 反演则是严格的带地形的、进行过反复拟合的二维反演,反演结果的质量能由曲线的拟合情况以及迭代次数等来控制。

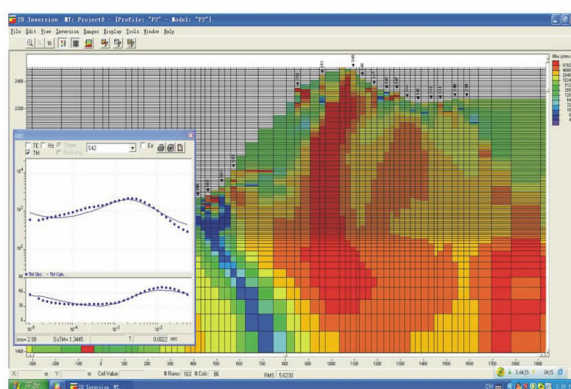


图7 WINGLINK 中兰渝线某隧道 EH-4 资料的反演电阻率剖面

图 7 显示了兰渝线某隧道的反演断面以及其中 42 号测点的曲线拟合情况。

3 应用实例分析

新建铁路兰渝线某隧道进口在开挖至 DK302 + 926 后,掌子面多处出现粗股状喷水,水压较大,最远喷射近 20 m,日出货量约 20 000 m³。根据区域地质和现场踏勘,测区主要为二叠系的灰岩和石炭系的板岩、碳质板岩,灰岩主要存在于进洞口地区,板

岩存在于偏向大里程的范围。根据洞内调查的情况,初步推断出水区为节理裂隙密集带或断层破碎带。进行地面大地电磁勘察的目的就是进一步找出出水带的宽度、位置、形态以及水的来源等地质情况,为科学施工提供参考。

大地电磁测线布置在隧道中线 DK300+300~DK303+750 处,为了圈定异常范围,在隧道中线左边布置了一条补充大地电磁测线,同时还投入 TSP 隧道超前预报、探地雷达和红外探水等方法。

勘察工作使用美国的 EH-4 系统,采用天然场的大地电磁测深法,张量采集模式,电极距 E_x 、 E_y 均为 50 m,点距为 50 m,单测点的叠加次数为 30 次,两条测线共计完成测点 124 个,选取其中典型的一段(S39~S62),分别在 IMAGEM 软件、WINGLINK 软件进行多次对比反演,得到最终反演结果。相关参数设置如下:IMAGEM 软件中,圆滑因子选择 0.5,反演方向为沿测线的 x 方向,地形为后期添加;WINGLINK 软件中,圆滑方式 D+且视电阻率和相位的拟合误差(RMS)均设置为 5%,静校正(static shift)值设置为 10%,反演模式为 TM,迭代终止误差设置为 1.5%,正则化因子取值 1,门槛误差(error floor)分别设置为电阻率 2、相位 1,最小迭代次数 100 次。

图 8 为兰渝线某隧道高频大地电磁法经两种方法反演处理后得到的电阻率剖面。可以看出,整体上看电阻率能对应上,但 WINGLINK 反演结果中有一个明显的低阻异常带,而在 IMAGEM 处理结果中虽然有低阻的迹象,但异常表现极不明显,主要原因可能是没有进行静校正处理以及无地形所引起的,导致无法进行资料解释。最终,根据 WINGLINK 反演结果得出解释结果。

(1) DK302+250~DK303+926 段的电阻率较高,基本大于 $500 \Omega \cdot m$,通过区域地质资料和现场观测,认为此为二叠系下统的灰岩。

(2) 在 DK302+926~DK303+160 段存在明显的低阻异常,电阻率在 $20 \sim 500 \Omega \cdot m$ 之间,推断节理裂隙密集带倾向小里程方向,电阻率较低。

(3) 从地层上看节理裂隙带位于二叠系灰岩和石炭系的碳质岩、板岩的交汇带附近,节理裂隙带中心充泥含水,两侧导水。

(4) 从平面上看,线路位置 DK302+926 处于汇水狭窄地段,因此导致开挖面水压较大。

TSP 隧道超前预报、探地雷达和红外探水等方法的探测结果,均与 WINGLINK 反演解释结果有较高的吻合性。上述 WINGLINK 反演解释资料与目前隧道实际开挖结果一致。

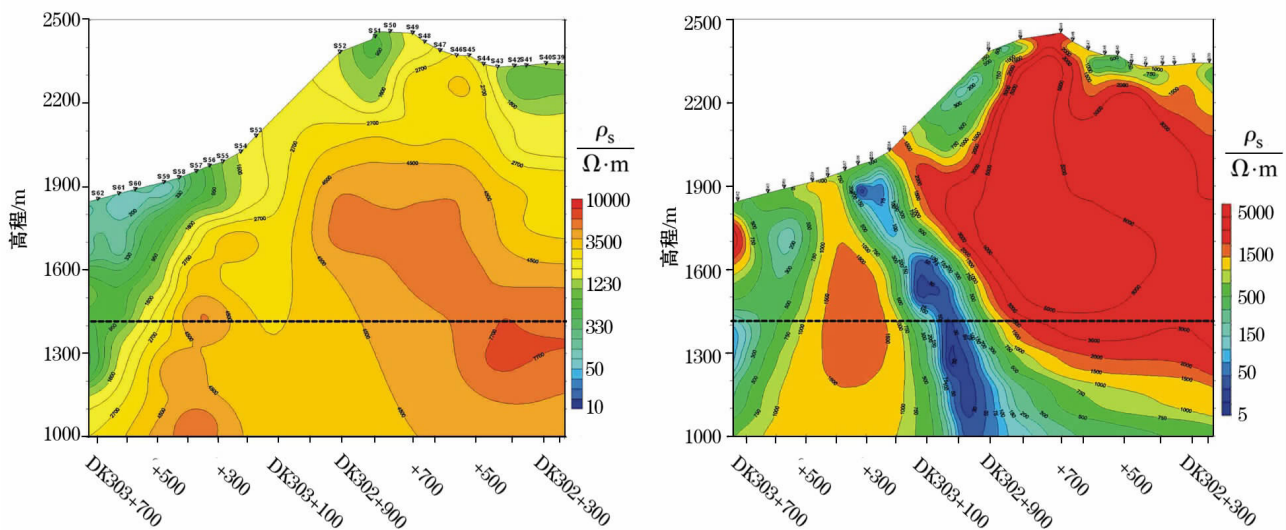


图 8 兰渝线某隧道 EH-4 数据两种方法处理的电阻率断面对比

4 结论与建议

WINGLINK 带地形的二维非线性共轭梯度反演兼顾了效率和效果,对静态效应进行校正,减小了地形带来的影响;D+数据编辑保证了曲线的物理有效性,提高了数据的信噪比,为进一步反演处理打下

了坚实的物理基础;Windows XP 操作平台,从数据库建立到反演结果输出,功能强大,人机交互性强,满足了大地电磁资料反复、复杂、多变的数据处理环境。但是该软件需要进行的数据预处理工作量大,曲线编辑也比较繁琐,需要反复编辑反演,反演计算时间较长,反演中容易因局部数据质量差的测点影

响整体反演拟合效果。

IMAGEM 软件具有计算速度快、操作简洁、工作现场给出反演结果的优点,其反演结果能直观揭示地下的电性结构特征,不会因为局部测点数据不好影响整个反演结果。该方法的不足之处是:只能对数据进行标量处理,无法用 TE 和 TM 两种模式处理数据;采用 BOSTICK 反演进行频-深转换,没有进行曲线反演拟合,不是真正意义上的反演;无法对畸变严重的 EH-4 曲线进行有效编辑,不能保证视电阻率和相位的物理有效性,使后续处理失去物理基础;大地电磁测深的工区一般地形复杂,IMAGEM 本身无法作地形的处理,只能后期依靠其他方法;一维转换不能进行静态校正,无法消除山区的地形影响;DOS 版软件,界面不友好,容易出错,效率低下。

两款软件各有侧重,建议结合使用,前期采用 IMAGEM 软件进行资料快速一维反演,定性了解工区地层的电性特征,后期采用 WINGLINK 带地形的 NLCG 二维反演,定量进行工区地质解释,达到互补对比的效果。另外,BOSTICK 反演属于二维显示,无实际的反演拟合;NLCG 反演属于非线性问题线性化的反演方法,对背景电阻率的依赖性较强,参数试算反演拟合过程复杂,而且容易陷入局部极值,而完全非线性反演方法(蒙特卡洛法、模拟退火法、遗传算法等)却不是很依赖初始模型,可以尝试二者的联合互取优点开发出更好的大地电磁资料解释软件。

致谢:在撰写本文过程中得到韩永琦教授的悉心指导,在资料处理过程中也得到了蔡少锋、朱光喜

等人的大力支持,在此一并表示感谢。

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] Smith J T, Booker J R. Rapid inversion of two - and three-dimensional magnetotelluric data [J]. *Geophys Res*, 1991, 96 (b3) : 3905 - 3922.
- [3] 魏胜,王家映. 二维大地电磁资料的偏移[J]. *地球物理学报*, 1993, 36(2): 256 - 262.
- [4] 师学明,王家映. 一维层状介质大地电磁模拟退火反演法[J]. *地球科学*, 1998, 23(5): 542 - 545.
- [5] 陶春辉,何樵登,王晓春. 用遗传算法反演层状介质[J]. *石油地球物理勘探*, 1994, 29(2): 156 - 166.
- [6] 刘乐寿,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.
- [7] 朱培民,王家映. 共轭梯度法[J]. *工程地球物理学报*, 2008, 5(4): 381 - 386.
- [8] 张军. D + 处理在 CSAMT 曲线编辑中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2010, 7(2): 185 - 189.
- [9] 何明峰. CSAMT 法在深埋长大隧道勘察中的应用与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [10] 郭建强,武毅,邵汝君,等. EH-4 电导率成像系统简介及应用[J]. *物探与化探*, 1998, 22(6).
- [11] 韩永奇. V8 与 EH-4 系统 AMT 数据对比研究[J]. *物探化探计算技术*, 2011, 33(增刊): 1 - 5.
- [12] 化希瑞,曹哲明,刘铁,段圣龙. 高频大地电磁系统数据处理方法研究[J]. *工程地球物理学报*, 2009, 6(增刊): 25 - 32.
- [13] 蔡少锋. AMT 法在隧道开挖前方出水段预测的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2011, 33(增刊): 228 - 231.

THE CONTRAST AND ANALYSIS OF EH-4 DATA PROCESSED WITH IMAGEM AND WINGLINK SOFTWARE

ZHANG Kai-fei

(*Geophysics Department of Gansu Exploration Institute of First Survey and Design Institute of China Railway Lanzhou 730000 China*)

Abstract: Among all MT Inversion methods used at present, there are two sorts of MT Inversion software which have mature system and have been widely used in engineering: One is the IMAGEM software applying inversion method of "Bostik", and the other is the WING-LINK software applying inversion method of "NLCG". There exist obvious differences between the two sorts of software in such aspects as inversion theory, operation system, smoothing pattern static correction and inversion result. On such a basis, the authors analyzed the inversion interpretation of EH-4 magnetotelluric data obtained in a tunnel of Lanyu Railway. The contrast and analysis of the data processed with the two sorts of software are demonstrated in this paper.

Key words: MT; inversion problem; EH-4 system; IMAGEM; WINGLINK; tunnel exploration

作者简介: 张凯飞(1986 -),男,学士,助理工程师。