

复杂地形条件下的可控源音频大地电磁测深数据 二维反演技术及应用效果

雷达^{1,2}, 孟小红¹, 王书民^{1,2}, 李汝传^{1,2}, 方慧^{1,2}, 赵富刚²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 物化探所 勘查地球物理开放实验室, 河北 廊坊 065000)

摘要: 复杂地形严重地影响可控源音频大地电磁测深(CSAMT)的解释结果, 为此, 笔者考虑了地形的影响, 将地电断面模型经过精细剖分, 对模型正演计算的数据进行 CSAMT 二维反演, 得出的结果与正演模型的形态基本一致, 获得的电性断面能很好地反映地下地质结构, 与实际地质资料相吻合, 证实了该方法的正确性和有效性。

关键词: 可控源音频大地电磁法; 地形影响; 二维反演; 奥克姆反演

中图分类号: P631.32 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2004)04-0323-04

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是一种频率域人工源电磁测深法, 研究大地的电磁响应, 探测地下电性分布及地质构造。由于它可以穿过高电阻薄层, 有些无法用直流电法和地震法探测到的高电阻薄层下的地质体, 用 CSAMT 法可得到好的效果。因此, 它已广泛应用于地质构造探测, 石油天然气、煤田、地热普查以及地下水和金属矿产勘查, 并取得了好的地质效果。

在 CSAMT 数据反演研究中, 许多地球物理学者做了很多的研究工作。早期的 CSAMT 一维反演^[1]可以模拟简单的水平层状模型, 但是, 对于起伏地形和复杂的二维、三维地电条件下获取的 CSAMT 数据, 在资料处理时, 用一维反演就会给出错误解。为了处理复杂的地电结构, 在用 CSAMT 进行浅层的工程、金属矿勘查时, 当收-发距是探测深度的 3~5 倍时, 对于高频所测得的高频数据均可视为平面波产生的结果。所以, 可用 MT 反演方法反演 CSAMT 数据。Wannamaker^[2]曾把一维 CSAMT 反演和二维 MT 反演结合起来, 取得了有效的成果。我们在研究具有地形剖分的 MT 二维正演的基础上, 给最小二乘法加上一个圆滑因子, 得到模型的正则化解。这种二维反演方法用于地形起伏的 CSAMT 数据二维反演, 取得了较好的反演结果。

1 二维 CSAMT 数据反演方法

在二维构造情况下, CSAMT 数据反演时运用奥克姆反演法^[1,3,4], 使用最大圆滑模型——在横向和

纵向上都运用了圆滑因子。

在离散情况下, 观测数据与模型之间的关系可写成泛函形式, $d = F(m) + e$, 其中 d 为观测数据向量, $F(m)$ 为正演函数, m 为模型向量, e 为观测数据与正演计算值的误差, 对于简单的电性结构, $F(m)$ 可用有限元等数值计算方法获得。

在同时考虑横向和垂向圆滑程度的情况下, 定义粗度矩阵为 $R_1 = \|\partial_y m\|^2 + \|\partial_z m\|^2$ 。 y 为垂直构造走向方向, z 为垂直向下方向。

给定约束条件: $x^2 = \|Wd - WF(m)\|^2$, 其中 W 是加权对角矩阵, $W = \text{diag}\left[\frac{1}{\sigma_1}, \frac{1}{\sigma_2}, \dots, \frac{1}{\sigma_M}\right]$, σ_j 是已知的观测数据 $d_j (j = 1, 2, \dots, M)$ 的方差, M 是观测值的个数。若假设噪声是不相关的, 且假设服从零均值高斯分布, 即为不相关数: $X^2 = X_*^2 = M$ 。

引入拉格朗日乘子, 将条件约束变为无条件约束, 目标函数为

$$U(m) = \|\partial_y m\|^2 + \|\partial_z m\|^2 + \mu^{-1} \{ \|Wd - WF(m)\|^2 - X_*^2 \}。$$

式中的 μ^{-1} 是拉格朗日乘子。对于上式求 m 的极小, 相应的 $i+1$ 次迭代解为

$$m_{i+1} = \mu [(\partial_y m)^T \partial_y m + (\partial_z m)^T \partial_z m + (wJ_i)^T (wJ_i)]^{-1} (wJ_i)^T \widehat{Wd}_i,$$

其中 $\widehat{d}_i = d - F(m_i + J_i m_i)$ 。 J_i 为雅可比矩阵的元素, 当存在电磁场的解析解时, 可由解析解获得, 否则采用数值方法或近似方法获得。

2 理论模型反演

图1是对山脊的二维地电模型正演计算的数据进行有无地形限制的二维地电模型反演结果。图1a是二维正演模型,山脊下方15 m处有一宽30 m,高50 m的高阻体,电阻率为 $200 \Omega \cdot \text{m}$,围岩电阻率为 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 。图1b是用图1a模型计算出的水平地形(未加地形限制)二维反演电阻率断面,对应模型高阻体位置的电阻率却为低阻(小于 $16 \Omega \cdot \text{m}$),这是由于水平模型反演时,地形影响造成的。而图1c是带有地形的地电模型反演结果的断面,其形态和正演模型基本一致。由于运用的奥克姆二维反演在横向、纵向都采用了圆滑模型,所以反演获得的高阻体规模较正演模型大些。

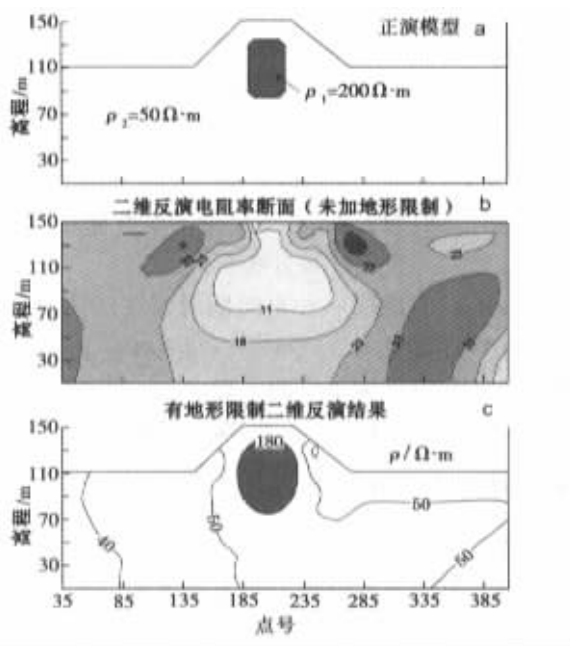


图1 有无地形限制的二维地电模型反演结果

3 反演实例

秦始皇陵^①座落在骊山北麓,西距临潼县城5 km,距西安市约20余公里。陵墓的地面建筑早已荡然无存,仅存封土堆,其上遍种石榴树,陵园内其他部位也布满了绿地、花坛和树林。陵园周围建有围墙,墙外不均匀地分布着许多建筑物。

3.1 物性条件

经过对测区钻孔岩石、土样电阻率资料的统计分析得出:工区内与修陵有关的扰动土(夯土、花土)与未扰动土(黄土、生土)的电阻率都偏低,它们的变化范围约 $20 \sim 40 \Omega \cdot \text{m}$,差异不大。但是,从趋势看,若湿度相当,火烧过的陪葬坑的电阻率略高于

一般黄土、生土,没有火烧过的夯土和陪葬墓中的花土的电阻率略低于一般黄土、生土,差异往往不到1倍。未扰动和扰动土中含砂量不同,电阻率值也不同,砂质土的电阻率高于粘土。陪葬坑、陪葬墓中的夯土、花土与围土的含砂量关系不完全相同,其电阻率差异的特点也有高、平、低之分,这为利用CSAMT法勘查陪葬坑、陪葬墓提供了良好的物性前提。

砂砾石层的电阻率明显高于黄土,其差异从数倍到近于一个数量级,这为利用CSAMT法勘查古河床和“泥石流”层提供了良好的物性前提。经考古探明当时以青膏泥用作阻水材料,测得其电阻率为 $20 \sim 35 \Omega \cdot \text{m}$ 。空气电阻率很高,土中的空洞与土的电阻率差异甚大,这为使用CSAMT法勘查未坍塌墓室提供了良好的物性前提。

从以上资料表明,不同岩性的岩土间存在一定的电性差异,是在该区开展CSAMT测深探测地宫、陪葬坑(火烧)的地球物理前提。

3.2 工作布置和技术参数

在试验中,CSAMT布置的测线有在穿过封土堆顶部的1-2线和封土堆以南1-1线(与1-2线偏东16 m)。采用的工作装置是收发距为2500 m,接收极距为10 m;参加二维反演的频率从8192~16 Hz。

3.3 计算及试验结果

封土堆顶至北、西、南、东边沿的落差分别为47、42、30、36 m,1-2线在封土堆的高差为47 m,正演模型是以三角单元方式进行网格剖分的,横向宽度为5 m;纵向高度划分是在高程531.6~480 m,选定2 m的间距;高程480~450 m,以10 m为间距;高程450~350 m,间距以10 m的0.3倍递增进行网格剖分。所有单元电阻率初始值选为 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 。经过5次反演迭代结果,1-1线反演拟合的平均均方误差为 $\pm 1.89 \Omega \cdot \text{m}$,1-2线反演拟合的平均均方误差为 $\pm 1.75 \Omega \cdot \text{m}$ 。

1-2线反演结果如图2所示,图2a为原始观测的卡尼亚电阻率断面,由于地形影响,在山顶测得的卡尼亚电阻率值较低,一般小于 $15 \Omega \cdot \text{m}$,在山坡和山下测得的卡尼亚电阻率平均值为 $50 \Omega \cdot \text{m}$,经过一维圆滑反演后结果如图2b所示。在172~195点处的已知火烧过的陪葬坑群反映为高阻异常。对应地宫位置却表现为低阻异常,和图1b的一维反演结果相似,是地形影响造成的。

① 国家863计划“考古遥感与地球物理综合探测技术”研究课题第二子课题“考古地球物理探测技术”总报告部分成果,2003。

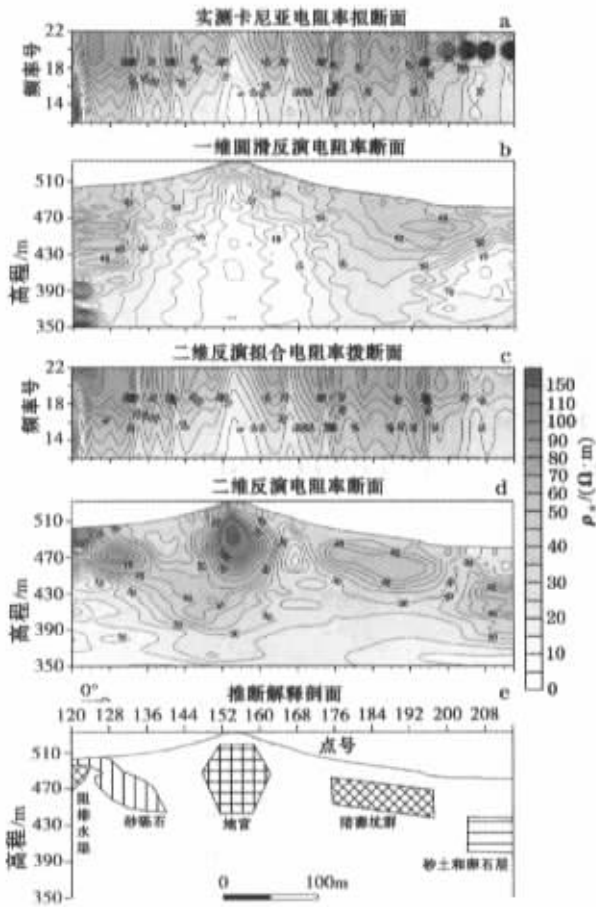


图2 1-2线CSAMT反演推断解释

图2d是带有地形限制的二维反演电阻率断面,它清晰地反应出以下几个电阻率异常:在120~123点处的低阻异常,与已知的阻排水渠青膏泥位置一致,其电阻率值为20~35 Ω·m;在120~134点处有一向北倾斜的高阻异常,其电阻率值为70~110 Ω·m,经打钻证实为砂砾石层;在146点~162点处的高阻异常(50~110 Ω·m),是一维反演结果中没有的,这个异常对应着地宫的位置,应是地宫的反映。根据该高阻异常的边界可估计地宫宽度约90 m,其底界大致在高程440 m处;在172~195点处的高阻异常,其电阻率值为45~50 Ω·m,此地段正是已知火烧过的陪葬坑群;在204~214点处,高程400~440 m之间有一高阻异常层,可能为砂砾石层,其电阻率值为35~90 Ω·m。最终推断解释结果如图2e所示。

图3给出了1-1线的二维反演结果,图3a为原始观测的卡尼亚电阻率断面,图3c是反演计算结果,其结果表明在350 m以上的地层大致为低—高一低3层电性层,在浅部表层土的电阻小于40 Ω·m,其厚度为15 m;在深度15~60 m处有一高阻层,为含砾砂石层(“泥石流”层),其电阻率值为35

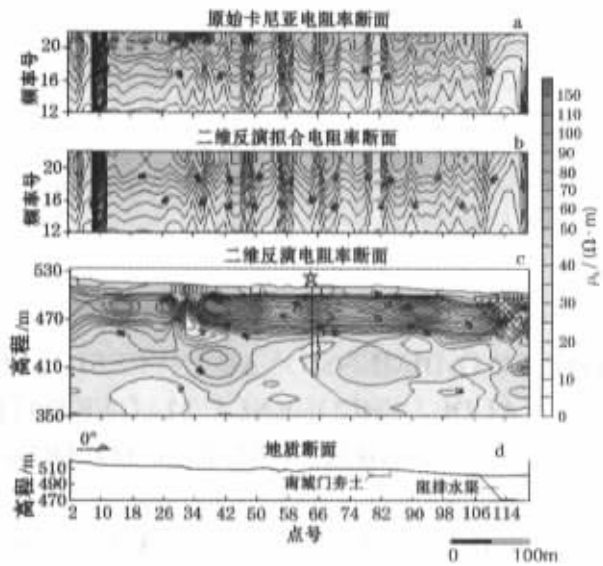


图3 1-1线CSAMT反演推断解释

~90 Ω·m;高程460~350 m的低阻电性层,其电阻值约为20 Ω·m,对应着亚砂土。层位划分和在65点处验证钻井的岩心电阻率曲线基本吻合。

在浅部有2处异常:79~83点为相对低阻(20 Ω·m),其位置、宽度与考古资料中已知的南城门外土一致,在110~120点间由地表到高程430 m的电阻率与两侧电阻率出现不连续现象,它与已知的阻排水渠位置吻合;浅部17 m的高阻异常,对应着细夯土,其下部的低阻异常,是青膏泥夯层的反应。

上述结果表明,CSAMT法对地宫、陪葬坑群反应为高阻异常,对阻排水渠浅部反应为高阻异常,而对其深部和南城门外土表现为低阻异常,这和陕西考古队提供的已知考古资料基本一致,说明了CSAMT法在秦始皇陵测区考古勘查有较好的效果。

4 结束语

从以上正演模拟、理论数据反演结果表明,基于带有地形限制的模型的二维正演,较真实地反映了正演模型的地电结构。对实测数据进行的反演,较好地反应出地宫、陪葬坑群、阻排水渠和南城门外土的位置,结果与实际地质资料基本吻合,说明了CSAMT法在秦始皇陵测区考古勘查有效,也证实了该反演方法有很好的实用效果。

由于模型用三角剖分,剖分的网格单元越多,雅可比矩阵就越大,所占的内存很大,反演时解方程组需要的时间就越多。由于计算机内存的限制,无法做长剖面数据反演,尚需做进一步的研究。

本项工作得到刘士毅教授级高工热情指导和帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Boerner D E, Wright J A, Thurlow J G, et al. Tensor CSAMT studies at the Buchans Mine in central Newfoundland[J]. *Geophysics*, 1993, 58(1): 12 - 19.
- [2] Wannamaker P. Tensor CSAMT survey over the Sulphur Springs thermal area, Valles Calder, New Mexico, U SA, Part 1: Implications for structure of the western caldera[J]. *Geophysics*, 1997, 62(2): 451 - 465.
- [3] deGroot-Hedlin C, Constable S. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data[J]. *Geophysics*, 1990, 55(12): 1613 - 1624.
- [4] 王若, 王妙月. 可控源音频大地电磁数据的反演方法[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(2): 197 - 202.

THE TWO-DIMENSIONAL INVERSION TECHNIQUE FOR CONTROLLABLE SOURCE AUDIO FREQUENCY MAGNETOTELLURIC SOUNDING (CSAMT) DATA UNDER COMPLEX TOPOGRAPHY AND ITS EFFECTIVENESS

LEI Da^{1,2}, MENG Xiao-hong¹, WANG Shu-min^{1,2}, LI RU-chuan^{1,2}, FANG Hui^{1,2}, ZHAO Fu-gang²

(1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *Exploration Geophysics Open Laboratory of Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China*)

Abstract: Complex topography seriously affects the interpretation of CSAMT. Considering the influence of the topography, the authors analyzed in detail the geoelectric section model and made CSAMT two-dimensional inversion for the direct calculation data of the model. The result is basically consistent with the shape of the direct model. The electric section obtained can satisfactorily reflect the underground geological structure and accord with the geological data. All this proves the correctness and effectiveness of this technique.

Key words: controllable source audio frequency magnetotelluric method; influence of topography; two-dimensional inversion; Occam inversion

作者简介: 雷达(1966 -), 男, 1989年毕业于中国地质大学(武汉), 高级工程师, 现在主要从事电磁法方法技术研究和应用工作。

兰州地震研究所特别推荐——

LGB 系列型固体不极化电极

LGB 系列型固体不极化电极是中国地震局兰州地震研究所研制成功的高科技产品, 于 1997 年 11 月 21 日在北京通过了专家鉴定。主要结论是: 固体不极化电极具有电极差小、稳定性好、噪声低、频带宽、轻便耐用、易于保存、携带和使用方便等特点; 在载体选择、配方研究、技术性能等方面都具有创新性; 与国内外同类产品相比达到了国际先进水平。

登载刊物:《中国石油石化工程技术和物装手册》第 2 分册, 技术卷 C51(2003 年 8 月中国财政经济出版社)。

网络发布: www.sunbidding.com;

www.cppei.org.cn(物资装备企业专区)。

性能特点: 电解质为固体, 一次装配, 长期使用, 勿需更换; 电极外壳为全 PVC 材料, 在使用过程中即使跌落也不易破碎, 壳体颜色明显, 便于识别。目前已研制出使用期为 1.3、5 年, 直径为 20~200 mm, 既适用于野外流动测量, 又能埋入地下长期观测,

还可用于深井、钻孔、海洋、水上等电法探测的系列型不极化电极。

技术指标: 在室温条件下的 5% NaCl 溶液中满足: 1 对电极的极差电位 ≤ 1 mV; 24 h 内极差漂移 ≤ 0.1 mV; 10 s 内短周期噪声 ≤ 0.01 mV; 频率响应范围 0~10 kHz; 电极重量约 0.5 kg($\varnothing 50$); 使用温度范围 -20~40 °C。

该电极目前已在各个领域得到了广泛的应用, 并取得了明显的社会效益。实践证明: 与国内外电极相比, 我们产品的突出优点是性能稳定, 使用可靠, 质优价廉。

联系人: 陆阳泉

联系地址: 兰州市东岗西路 410 号

邮政编码: 730000

联系电话: (0931)8269948; 13679430968