

# 静态校正对反演的影响

朱崇利<sup>1</sup> 刘兵<sup>1</sup> 黄培东<sup>1</sup> 耿力奇<sup>2</sup>

1. 遵义职业技术学院; 2. 四川省地球物理调查研究所

**摘要:** 大地电磁测深勘探技术被广泛应用于各类地球物理研究领域, 而数据反演分析研究是地球物理工作的最终目标。反演方法的好坏, 决定反演解释工作的质量, OCCAM 和 RRI 反演方法一直深受人们的喜爱。而如何提高反演的精度, 最重要的一个因素就是如何优化数据, 排除干扰因素, 有效地识别异常体; 静态畸变对数据影响很大, 给解释工作带来了阻碍, 经过校正处理后的数据基本较好地消除了这一不利因素的影响。

**关键词:** 反演; 数据处理; 静态校正; 大地电磁; 地质勘查

**DOI:** 10.65976/3078-8145.2026.03.016

## 引言

自从 20 世纪 50 年代初, 大地电磁测深 (MT) 法问世以来<sup>[1-3]</sup>, MT 方法在油气勘探、地层物性结构的探究、地热的勘查、矿产资源勘探等方面都得到了广泛的应用<sup>[4-9]</sup>。而从海量的采集数据中挖掘更多有效、有价值的各类地质信息是地球物理研究方向的终极目标, 基于数据反演解释工作的不可或缺的地位和研究应用价值, 才有诸多的地球物理科研人员乐此不疲地深入探索研讨。依据数据反演解释过程是否包含迭代求解运算, 现有大地电磁数据反演解释可分为直接反演与间接反演两类不同方法。其中直接反演法能够依托实测观测数据直接求解获取地下电性结构模型; 间接反演法则需要先构建初始预定模型, 经正演模拟计算得出模型地表电磁响应, 再将理论响应与实测数据开展拟合对比分析, 结合各类优化算法及数学处理方法迭代修正模型参数, 最终获取最贴实际的地下电性模型<sup>[3]</sup>。虽然地球的电性结构是极其复杂的, 很难有定性模式, 很少有一维、二维地电断面存在。但是, 因为三维 MT 反演技术尚处于不成熟阶段, 直到今天奥克姆 (OCCAM)、快速超松弛反演 (RRI) 等反演方法仍在 MT 反演中占据主导地位, 不仅仅因为一维、二维反演技术已经相当成熟, 而且也因为一维、二维模型虽然简单, 但它仍可以从大量数据中提取有用的近似信息<sup>[10-16]</sup>。而为了降低各类干扰因素对大地电磁数据资料反演精度的影响, 需强化静态校正技术的相关研究, 完成观测数据的优化提纯预

处理工作, 从观测数据中提取更多的地质、地球物理信息。

## 1 OCCAM 法原理

反演问题可用数学方程描述如下:  $d=F(m)+e$ , 其中,  $d=[d_1, d_2, \dots, d_N]^T$  代表观测数据向量;  $F(m)$  代表地电模型正演响应函数,  $m=[m_1, m_2, \dots, m_N]^T$  代表地电模型参数向量;  $e$  代表残差向量。据此, 便可推导出现场实测数据与理论地电模型正演响应之间的拟合误差表达式为  $\varphi_d=\|W_d e\|^2$ 。高斯-牛顿法核心思想是将非线性的正演响应函数  $F(m)$  线性化, 同时通过  $m_{k+1}=m_k-(H_k+\epsilon_k I)^{-1}g_k$  式来改善 Hessian 矩阵的条件数, 但由于雅克比矩阵的秩常小于模型参数个数导致方程组病态。而马奎特法通过调整主对角线的系数, 来改变方程组的矩阵条件数。但是它们都不能对模型进行评价, 还是会出现发散的情况。针对这种情况, OCCAM 法被 Constable 等人在 1987 年提出来, 它是针对压制来自非数据的模型构造, 达到最小化模型的粗糙度, 构造出拟合数据的最小模型。所以目标函数的构建和解的稳定性等方面要同时考虑。对二维构造, Constable 等人考虑了模型的横纵向光滑问题, 假设模型粗糙度为:  $R_1=\|\partial_y m\|^2+\|\partial_z m\|^2$ ,  $\partial_y m$  和  $\partial_z m$  分别表示横纵向相邻块的模型参量的粗糙度矩阵。将模型范数项替换为粗糙度矩阵, 即为 OCCAM 法的目标函数和罚函数, 对  $F(m)$  仍然象 GS-N 法一样进行泰勒级数一阶展开得到:  $F(m_{k+1})=F(m_k+\delta_m)=F(m_k)+J_k(m_{k+1}-m_k)$

**基金项目:** 贵州省教育科学规划课题 (2024A017); 院级自然科学类 (重大) (2024-ZZZKZA-03, [2025]7号)。

**作者简介:** 朱崇利 (1974—), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为地勘、土木工程。

刘兵 (1988—), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为建筑力学与结构。

黄培东 (1994—), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为工程检测。

耿力奇 (1988—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为工程结构防灾减灾。

$$\text{基中 } J = \frac{\partial F}{\partial m} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial m_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial m_M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial m_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial m_M} \end{pmatrix}$$

$J_k = (\partial F / \partial m)|_{m_k}$  是在  $m_k$  处计算的  $N \times M$  阶灵敏度矩阵, 然后根据正则化思想构造一个无约束的函数, 由微分建立方程, 进而产生一逼近解的迭代序列, 从以上过程看出 OCCAM 法实质上是一种平滑约束的最小二乘法正则化反演方法, 在每次迭代过程中, 由正则化参数调控方向和步长; 这种方案大大提高了反演的稳定性和收敛速度。初始模型的选取对反演结果不起决定作用, 反演速度不快, 但是很稳定。

### 2 RRI 反演基本理论

反演的方法不同之处主要在于目标泛函的构建不同, RRI 中对应的目标函数离散表达式为:  $W=(R_{m-c})^T(Rm-c)+\beta e^T e$ , 其中, 参数  $R$  表示测点粗糙度数学矩阵, 参数  $m$  表示待求解模型, 参数  $c$  表示偏差向量, 参数  $\beta$  表示拉格朗日常量, 上标参数  $T$  表示矩阵转置运算。数据残差参数  $e$  通过下式计算确定:  $(d-e)-d_0=Fm-Fm_0$ , 其中, 参数  $m_0$  和  $m$  依次对应初始模型和迭代更新模型, 参数  $d_0$  和  $d$  依次对应理论正演计算数据和野外实测数据, 参数  $F$  为 Frechet 偏导数矩阵。数据反演迭代流程为: 通过给定初始地电模型  $m_0$  来计算  $d_0$  和求解出各测点对应的积分核函数及数据残差  $e$ , 通过极小化目标函数完成更新模型  $m$ , 反复循环迭代直至结果收敛并满足精度标准要求。其中 RRI 算法核心原理是用上一次迭代二维正演电、磁场来近似求解场的横向偏导数项, 构建一个近似的线性泛函式。借鉴一维反演求解思路求解各测点模型参数, 再经空间插值重构新的二维电性断面, 之后继续迭代运算, 从而避免直接线性搜索带来的大量计算, 将二维问题转化成了一维问题来求解。RRI 对初始模型依赖性较大, 反演的迭代过程基本是稳定收敛的, RRI 速度很快, 结果较理想, 由于不用参与计算雅可比矩阵, 减少了内存需求, 不受人为因素干扰等因素, 在现实生活中深受欢迎。但是如果数据量很多时, 模型的不确定性因素较大, 会感到无力应付, 尤其是原始数据比较粗糙时, 难度更大。

### 3 静态效应

大地电磁测深 (MT) 的大量实测数据资料表明, 地下浅层电性不均匀会导致同一测点两条不同极化模式的视电阻率曲线, 或相邻测点的视电阻率曲线之间会出现垂向偏移。然而, 视电阻率曲线和相位曲线的

形态及相位曲线的坐标位置却始终保持稳定不动。该现象类似于地震学中“静态位移”, 故称之为静位移 (Static Shift) [17-21]。若对畸变后的曲线直接进行反演解释, 将不仅会歪曲岩层的电性参数, 还会造成层面真实深度的偏差, 甚至引发地质构造形态的完全变形。静位移产生的根本原因在于, 由浅层不均匀体边界表面积累的电荷, 破坏了地下电场的原始分布形态, 畸变诱发了视电阻率曲线的垂向移动。该畸变效应的强弱主要取决于区域地质背景、浅层异常体的几何形态、规模尺寸大小、物性差异以及测点空间位置等多种参数因素密切相关。进一步可以探究静态效应是由于 MT 在时间上和空间上采样不足造成的。为减少或克服静位移给 MT 测深曲线的不良影响, 我们用空间滤波法来校正处理 [22-27]。但要注意不论是在空间域还是波数域滤波, 均需要保证 MT 数据资料具备充足的空间采样密度, 避免遗漏浅层电性异常所对应的空间分布特征。

### 4 模型案例

选取高阻电性异常体构建正演模型 (见图 1): 模型整体为均匀半空间背景, 均匀半空间介质内存在一处长度 4 km 矩形异常体, 异常体电阻率值为  $1000 \Omega \cdot m$ , 上界面埋深为 1km, 下界面埋深为 2 km, 背景地层电阻率值为  $10 \Omega \cdot m$ 。

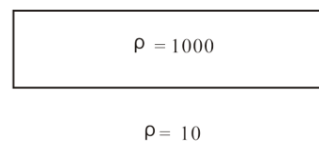


图 1 高阻模型

图 2 为 TE 极化模式下, 电性数据校正前后采用 OCCAM 反演方法得到的结果分析对比。

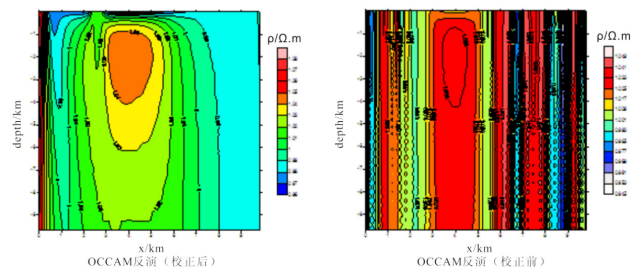


图 2 OCCAM 反演对比

从整体数据反演效果分析, 两组反演结果均能够较为准确地识别出异常体中心位置, 与初始模型匹配程度较高; 但反演获取的异常体中心电阻率与真实电阻率

值偏差明显,同时异常体在水平两边以及垂向上下方向均出现一定的扩散延展,边界略超出真实异常的分布范围。但校正前反演结果出现挂“面条”现象,背景电阻率也是交错变化状态,导致无法真实反映地电模型的构造。而校正后反演结果中,模型轮廓相对接近真实物性特性。

图3是数据校正前后TE模式RRI反演对比。从总体来看,数据反演结果的异常中心与原始模型吻合度较高,能够精准识别异常体中心位置,仅在水平两侧出现轻微延展、垂向略向下延伸。整体反演模型与理论原始模型契合度高,对异常体空间范围、埋藏深度以及背景电性分布特征均有着良好的还原反映效果,背景电阻率反演值与真实电阻率值偏差较小。

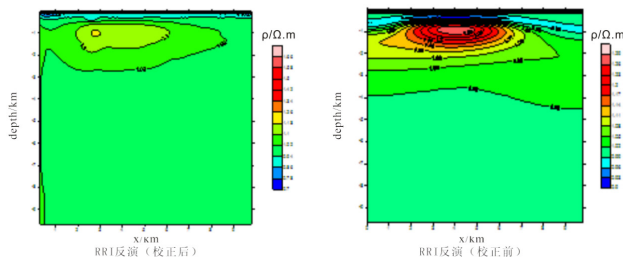


图3 RRI反演对比

由此不难看出,经过校正处理后的反演剖面更贴近地层地电物性分布规律,能够更加准确地反演解释地下真实地电模型结构。

## 5 结论

(1) 整体上看 OCCAM 反演对高阻体反演效果较差,特别是未经校正的 OCCAM 反演结果无法真实的表征地电模型物性参数,而 RRI 反演结果则能够更为准确地表征地电模型物性特征。

(2) 经静态校正后的观测数据,其反演解释结果可以更好地客观还原地下真实的地电模型结构。

(3) 通过实践,我们要不断找到更好 MT 的应用效果的方法,压制像浅层电性不均匀对视电阻率曲线的影响的这种干扰。

### 参考文献:

[1] 张庆元,王斌,张飞,等.黄河上游兴海盆地大地电磁测深数据集[J].中国科学数据(中英文网络版),2025,10(4):90-100.

[2] 程怀蒙,张文慧,张笑,等.MT与WFEM方法在覆盖区中深层地热勘探中的关键作用——以朱湖农场ZK01井为例[J].资源环境与工程,2025,39(6):791-799.

[3] 李富,夏时斌,梁生贤,等.综合物探方法在大关铝土矿勘查中的应用研究[J].沉积与特提斯地质,2025,45(4):701-711.

[4] 杨富强,廖海志,王正,等.海岸效应对大地电磁测深数据畸变影响研究[J].物探与化探,2024,48(5):1284-1293.

[5] 夏福瑞,皇健,武斌,等.音频大地电磁测深法在汉源县地下水资源勘查方面的应用[J].四川地质学报,2024,44(S1):161-165.

[6] 蔡足根,耿德祥,王明明,等.VMD-HHT方法在大电磁强人文干扰去噪中的应用[J].物探化探计算技术,2024,46(4):446-452.

[7] 夏时斌,廖国忠,邓国仕,等.高密度电法和音频大地电磁测深法在西南岩溶地区地下水勘探中的应用[J].物探与化探,2024,48(3):651-659.

[8] 许第桥,李茂.二连盆地宽频大地电磁法数据精细反演处理研究——以满都拉图地区的数据为例[J].物探与化探,2023,47(4):994-1001.

[9] 于建华,夏方华,张志强,等.基于大地电磁测深的平原区隐伏断裂构造研究——以天津蔡公庄乡等四幅区调为例[J].矿产勘查,2023,14(7):1161-1173.

[10] 李忠,张小兵,黄钊,等.激电测深及音频大地电磁测深(EH4)在鲁甸旱谷地地区找矿中的应用[J].云南大学学报(自然科学版),2023,45(S1):15-21.

[11] 张廷彦,张翔,王利军.音频大地电磁在高原河流深厚沉积层勘查中的应用[J].水利科学与寒区工程,2023,6(5):138-140.

[12] 邵炳松,石峰,刘志龙,等.大地电磁测深法在太康隆起西部地热资源勘查中的应用研究[J].物探化探计算技术,2023,45(3):379-388.

[13] 屈有恒,胡斌,汤彬,等.新疆卡鲁安锂矿床花岗岩与伟晶岩成因关系:音频大地电磁数据反演的证据(英文)[J].Applied Geophysics,2023,20(1):62-76+131.

[14] 孟锐,吴思远,朱圣伟,等.基于遗传算法的地震面波和大地电磁数据一维联合反演算法研究[J].矿产与地质,2023,37(1):128-137.

[15] 祁程,何昕欣,艾虎,等.北天山七角井南部石英斑岩发育特征及其找矿意义:来自综合物探测量的证据[J].科学技术与工程,2022,22(35):15494-15505.

[16] 罗卫锋,胡志方,张家强,等.CSAMT和测井联合约束反演在松辽盆地东南隆起区油页岩识别中的应用[J].地质通报,2024,43(5):692-700.

[17] 苏士星,宋双全,魏明君.综合物探方法在河南济源疙瘩深隐伏铁矿床勘查中的应用[J].矿产勘查,2022,13(8):1191-1197.

[18] 刘泽丞,梁红波,王汉卿,等.广域电磁法与可

- 控源音频大地电磁法探测效果对比研究——以浙西北巨厚沉积岩地区为例 [J]. 资源信息与工程, 2022, 37(3): 91-94.
- [19] 董基恩, 叶高峰, 魏文博, 等. 华南陆块东北部构造特征、成矿作用与动力学机制——来自大地电磁测深的认识 [J]. 地质论评, 2022, 68(3): 921-937.
- [20] 杨敏, 于鹏, 朱光有, 等. 耦合地震约束信息的重磁电联合反演方法及其应用——以塔里木盆地深层地质结构解析为例 [J]. 天然气地球科学, 2022, 33(1): 168-179.
- [21] 刘桂梅, 范剑, 王茜, 等. 可控源音频大地电磁和折射地震在隧道勘查中的应用: 以沈白铁路杨树隧道为例 [J]. 西部探矿工程, 2021, 33(11): 179-182.
- [22] 黄建乐, 陈晓冬, 李家金, 等. 综合物探法在砂岩型铀矿中深部找矿中的实践与分析——以新疆昭苏盆地为例 [J]. 地质与勘探, 2021, 57(5): 1099-1106.
- [23] 张伟, 曾昭光, 周军, 等. 宽频大地电磁法寻找“界面型”隐伏金矿床: 以黔西南戈塘地区深部找矿为例 [J]. 中国地质, 2023, 50(2): 359-375.
- [24] 王佳龙, 张宝松, 陈基炜, 等. 大地电磁测深不同反演方法的应用效果对比——以安徽皖江地区页岩气调查为例 [J]. 华东地质, 2020, 41(1): 79-87.
- [25] 陈乐寿, 王光镔. 大地电磁测深法 [M]. 北京: 地震出版社, 1990.
- [26] 王家映. 地球物理反演问题概述 [J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(1): 1-3.
- [27] 胡祖志, 胡祥云, 吴文鹏, 等. 大地电磁二维反演方法对比研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(1): 64-68.