doi: 10.11720/wtyht.2026.1256
任喜荣, 罗维斌. 基于差分进化的 *AB-H*$_z$ 地空电磁频率测深全区视电阻率一维反演[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 716-723. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1256
Ren X R, Luo W B. Differential evolution-based one-dimensional inversion of whole-zone apparent resistivity for *AB-H*$_z$ ground-airborne electromagnetic frequency sounding[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 716-723. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1256

基于差分进化的 *AB-H*$_z$ 地空电磁频率测深全区视电阻率一维反演

任喜荣[1], 罗维斌[2]
(1. 甘肃省地质矿产勘查开发局 第二地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州资源环境职业技术大学 地质与珠宝学院, 甘肃 兰州 730021)

摘 要: 本文研究了 *AB-H*$_z$ 地空电磁频率测深法全区视电阻率计算及一维反演方法, 旨在提升电磁测深精度与效率, 为深地资源高效率勘探提供技术支持。该方法通过地面电偶极源 *AB* 激发电磁场、无人机空中测量垂直分量 H_z 实现对地探测。论文研究了不同收发距全区视电阻率频率测深曲线特征。基于电阻率等效原理, 由水平电偶极子源电磁场 H_z 分量解析表达式构建了两种 *AB-H*$_z$ 地空电磁频率测深全区视电阻率迭代计算方法, 用双频率法对 H 型和 K 型地电模型的计算验证了其正确性。针对一维反演的多参数非线性优化问题, 引入改进的差分进化算法, 提出 4 步变异法强化最优解影响力, 提升全局寻优能力。数值模拟结果显示, 反演结果与模型真值接近, 拟合度高, 验证了该反演方法的有效性。*AB-H*$_z$ 电磁频率测深对于低阻和高阻目标地质体均有良好响应, 较大的收发距对目标体响应更明显, 可为深切割山区等难进入区域勘探提供技术方案。

关键词: *AB-H*$_z$ 地空电磁频率测深; 全区视电阻率; 多步变异差分进化算法; 一维正演
中图分类号: P631; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)04-0716-08

0 引言

电磁测深法因其探测深度大、装置类型多等特点, 在新一轮找矿突破战略行动中发展快速, 成为主流勘探方法[1-2]。天然源大地电磁法(MT 和 AMT)通过获取长周期电磁信号, 可估计出极低频波阻抗及卡尼亚电阻率, 探测深度可达百公里, 已成为深地调查的成熟方法[3-5], 但由于场源随机且微弱, 需要长时间观测, 探测效率低; 可控源音频大地电磁法(CSAMT)通过人工场源激发电磁场, 改进了探测效率, 沿用卡尼亚视电阻率定义, 仍需要在远区同步观测至少 2 个水平正交场分量, 且场源效应明显[6-7]; 广域电磁法(WFEM)实现了只观测一个电磁场分量计算全区视电阻率, 拓宽了观测区域, 且采用 2^n 序列伪随机信号电流激发电磁场, 提高了探测效率和观测精度[8-9]。由于这几类电磁法均需要观测水平电场分量, 因而被限制在地面或海水中观测。

瞬变电磁法通过观测瞬变强磁场在地中感应的涡旋电流产生的二次磁场的衰减特性来获取地电信息, 接收磁传感器无需接地, 其观测装置灵活, 可在地面, 也可在空中观测[10], 因此航空电磁法中瞬变电磁法发展最为成熟。已形成全航空或半航空瞬变电磁法技术体系[11]。全航空瞬变电磁法, 如 VTEM, 电磁场激发和接收均在空中进行, 需要直升机或固定翼大飞机作为飞行平台, 作业成本高, 且由于激发磁偶矩小, 安全飞行高度高而探测深度小; 而基于多旋翼无人机的地空瞬变电磁法, 在地面用接地电偶极子源(HED)或回线源(VMD)激发瞬变场, 在空中测量垂直磁场分量(H_z)的衰减特性获取地电信息, 具有机动性强、探测效率高的优点[12-14], 已发展为较为成熟的技术体系, 但也存在抗干扰能力弱、探测深

收稿日期: 2025-07-24; **修回日期**: 2026-01-27
第一作者: 任喜荣(1982-), 本科, 高级工程师, 研究方向为应用地球物理、城市综合物探应用。Email: 350135513@qq.com
通讯作者: 罗维斌(1972-), 男, 工学博士, 正高级工程师, 主要从事应用地球物理电磁法勘探应用研究工作。Email: lwb210521@lzre.edu.cn

度浅的不足。

天然源 ZTEM(*z*-axis tipper electromagnetic)是一种频率域航空电磁法, 在空中飞行测量垂直磁场 H_z, 同步在地面基站定点测量两个正交水平磁场分量 H_x 和 H_y, 通过估计磁倾子 T_{zx} 和 T_{zy} 来获取大地电导率分布信息, 频率范围 25～720 Hz 共 6 个频率, 具有勘探深度大、经济、高效等优点[15]。但受天然场源随机性限制, 频点少, 空间分辨率不高; 将人工电性源地面激发电磁场与空中接收垂直磁场 H_z 结合便形成地空电磁频率测深法。其关键技术是如何实现在飞行条件下的宽频带覆盖? 电磁频率测深需要场源持续激发宽频带电磁场, 频率范围宽, 则探测深度范围就大。若类似地面 CSAMT 扫频法激发电磁场则需要多次飞行接收, 影响探测效率。周海根[14] 研究了地空电磁频率测深法, 给出了多场源结合伪随机信号电流的建场方式, 为地空电磁频率测深法提供一种方案。

本文在地面 *AB*-H_z 电磁频率测深实验验证的基础上提出一种新的地空电磁频率测深法。地面电性源选用宽频域逆重复 M 序列信号电流激发电磁场, 在空中, 采用高采样率或过采样技术(采样率高于 24 kHz)观测垂直磁场 H_z。逆重复 M 序列信号频带宽, 谱线等间距分布, 是系统辨识常用激励信号。如选用 6 阶逆重复 M 序列信号, 码率 2 000 Hz, 信号周期 0.063 s, 按 24 kHz 采样率, 可辨识出 91 个频率, 频率间距 31.7 Hz, 频率范围 15.873～3 031.7 Hz。持续叠加 400 个周期用时 25.2 s, 按 1 m/s 飞行速度, 每小时测线距离是 3 600 m, 探测深度可达 1 200 m。

另一个核心问题是地空电磁频率测深全区视电阻率计算与反演解释。将观测电磁场值转换为电阻率有利于电磁测深方法研究[16-20], 可直观呈现电性结构变化。考虑地面电性源 *AB* 激发电磁场的垂直磁场分量 H_z 随观测高度增高而衰减的特性, 采用电阻率等效原理实现了全区视电阻率计算[6-7, 21]; 基于层状地电模型, 其电阻率一维反演过程是一个多目标参数优化问题, 选择全局寻优能力强、鲁棒性高且无需梯度信息的差分进化优化算法(differential evolution, DE)[22-27] 实现了全区视电阻率一维反演。

本文首先给出观测电偶极源垂直磁场 H_z 分量的 *AB*-H_z 地空电磁频率测深双频率法全区视电阻率计算方法, 并基于差分进化优化算法实现了全区电阻率一维反演, 从而形成地空电磁频率测深的观测采集方法、数据处理与反演解释的完整技术流程。

1　方法原理

1.1　*AB*-H_z 地空电磁频率测深电阻率计算方法

层状大地表面水平电偶极源(horizontal electric dipole, HED)的电磁场在地面上方 h 高度($h<0$)的垂直磁场响应计算如下[3]:

$$H_z=\frac{IdL}{2\pi}\sin\phi\left[\int_0^{\infty}\frac{\lambda^2}{\lambda+m_1/R_x^*}\mathrm{e}^{\lambda h}J_1(\lambda r)\mathrm{d}\lambda\right], \quad (1)$$

式中: 地层响应系数 $R_x^*=\coth\left[m_1d_1+\coth^{-1}\frac{m_1}{m_2}\coth\times\left(m_2d_2+\cdots+\coth^{-1}\frac{m_{N-1}}{m_N}\right)\right]$; λ 为空间波数; 地层波数 $m_j=\sqrt{\lambda^2-k_j^2}$, $(j=1,2,\cdots,N)$, N 为地层数; $k_j^2=\mathrm{i}\omega\mu\sigma_j$。$\omega$ 为信号频率; μ 为地层磁导率; σ_j 为地层电导率, j 为地层序号。

要计算式(1), 需要递归计算地层响应系数 R_x^*, 以及含 1 阶第一类 Bessel 函数的 Hankel 积分。本文采用了基于连分式加速的数值积分算法。在地表上方一定高度 h 处观测的垂直磁场 H_z 是大地系统对激发电磁场的综合响应, 可以用均匀半空间模型等效。采用迭代法计算观测装置参数相同的均匀半空间表面上方同高度 H_z 响应与观测场值(或层状模型计算场值)进行拟合, 与之等效的均匀半空间电阻率值可作为观测场(或计算场)的电阻率。由均匀半空间表面上方 h 高度($h<0$)垂直磁场 H_z 的计算式(2)构建全区视电阻率迭代计算公式如下:

$$H_{z0}=\frac{IdL}{2\pi}\sin\phi\left[\int_0^{\infty}\frac{\lambda^2}{\lambda+m_1}\mathrm{e}^{\lambda h}J_1(\lambda r)\mathrm{d}\lambda\right], \quad (2)$$

令 $C_{Hz}^0=\int_0^{\infty}\frac{\lambda^2}{\lambda+m_1}\mathrm{e}^{\lambda h}J_1(\lambda r)\mathrm{d}\lambda$, $H_{zs}=\frac{2\pi\cdot H_{z0}}{IdL\cdot\sin\varphi}$

则有:

$$\rho=\rho_1\left|\frac{H_{zs}}{C_{Hz}^0}\right|, \quad (3)$$

式中: r 为收发距; m_1 为地层波数; ρ_1 为均匀半空间电阻率。H_{zs} 为经电偶极矩和方位角正弦值归一化的实测场值或层状模型计算值。对式(3)多次迭代得到全区视电阻率。为了消除近场源效应, 进而在式(2)基础上采用双频率法, 构建全区视电阻率计算公式:

取相邻两个频率(f_h, f_l), 频比 $s=f_h/f_l$, 高频垂直频场响应归一化为:

$$\frac{H_{z0}(f_h)}{PE\sin\phi}=\left[\int_0^{\infty}\frac{\lambda^2}{\lambda+m_1(f_h)}J_1(\lambda r)\mathrm{d}\lambda\right], \quad (4)$$

低频垂直频场响应归一化为:

$$\frac{H_{z0}(f_l)}{PE\sin\phi}=\left[\int_0^{\infty}\frac{\lambda^2}{\lambda+m_1(f_l)}J_1(\lambda r)\mathrm{d}\lambda\right], \quad (5)$$

式(3)、式(4)取虚部, 按式(5)相减, 有[3,6]:

$$\mathrm{Im}\left(\frac{H_{z0}(f_h)}{PE\sin\phi}\right)-s\cdot\mathrm{Im}\left(\frac{H_{z0}(f_l)}{PE\sin\phi}\right)=\left[\mathrm{Im}\left(\int_0^{\infty}\frac{\lambda^2}{\lambda+m_1(f_h)}J_1(\lambda r)\mathrm{d}\lambda\right)-s\cdot\mathrm{Im}\left(\int_0^{\infty}\frac{\lambda^2}{\lambda+m_1(f_l)}J_1(\lambda r)\mathrm{d}\lambda\right)\right], \quad (6)$$

记:

$$\Delta QH_z=\mathrm{Im}\left(\frac{H_{z0}(f_h)}{PE\sin\phi}\right)-s\cdot\mathrm{Im}\left(\frac{H_{z0}(f_l)}{PE\sin\phi}\right), \quad (7)$$

$$\Delta QH_z^0=\mathrm{Im}\left(\int_0^{\infty}\frac{\lambda^2}{\lambda+m_1(f_h)}J_1(\lambda r)\mathrm{d}\lambda\right)-s\cdot\mathrm{Im}\left(\int_0^{\infty}\frac{\lambda^2}{\lambda+m_1(f_l)}J_1(\lambda r)\mathrm{d}\lambda\right), \quad (8)$$

构建双频率法全区视电阻率迭代计算公式:

$$\rho_s=\rho_1\left|\frac{\Delta QH_z^0}{\Delta QH_z}\right|, \quad (9)$$

对式(9)采用多次迭代法得到全区视电阻率, 可较好地消除垂直磁场近场效应。

1.2 *AB-H*$_z$ 全区电阻率差分进化一维反演方法

对 *AB-H*$_z$ 电磁频率测深全区视电阻率进行一维反演得到模型参数(层电阻率及层厚度), 是一个多参数非线性优化问题, 具有强非线性、多极值特性, 常规梯度类算法(如高斯—牛顿法)易陷入局部最优解。为克服此问题引入差分进化算法。差分进化算法(differential evolution, DE)是由 Storn 等[22] 提出的一种强大的全局优化算法 (进化算法的一种), 它通过变异 (mutation)、交叉 (crossover)、选择 (selection) 操作在参数空间中高效搜索全局最优解(或次优解)。核心优势在于其全局搜索能力和对初始模型依赖性弱。Swagatam 等[23] 系统验证了 DE 在电磁参数反演中的有效性, 显著提升了复杂模型的收敛稳定性。因其全局寻优能力强、鲁棒性高且无需梯度信息, 被引入地球物理反演领域[24-28]。

假设大地电性结构在水平方向均匀, 只随深度变化。反演的目标是根据地表或空中观测的不同频率全区视电阻率数据(或其他响应), 求解地下一维层状介质的层厚度和电阻率分布(只考虑电阻率变化, 未考虑磁导率变化, 忽略介电常数), *N* 层介质有 2*N*-1 个参数。本文将常规差分进化算法改进, 提出 4 步变异法分步将最优个体与随机选取的 2 个或 3 个个体经变异产生新个体。加强了最优个体的影响度, 提高了全局寻优能力。通过模型试算结果表明, 四步变异法比传统方法寻优能力更强。其程序设计如下:

第一步: 种群初始化。设置种群规模为 *NP*, 模型参量的空间维数为 *D*, 及每个参量的上、下界范围, 在模型的可行解空间内随机产生实数编码的初始种群 pops 为:

$$\mathrm{pops}(NP,j)=XV_{j\min}+\mathrm{rand}n(NP,1)\times(XV_{j\max}-XV_{j\min}),\ j=1:D \quad (10)$$

式中: $XV_{j\min}$为第 *j* 个模型参量的取值下界; $XV_{j\max}$为第 *j* 个模型参量的取值上界; *D* 为模型参量维数; rand(*n*)为产生的 (0,1) 间的随机数。通过遍历种群寻优, 产生最优解 *bm*;

第二步: 第一类变异, 交叉、选择。

$$hm=bm+F\times(pm1-pm2), \quad (11)$$

式中: *F* 是缩放因子; *pm*1, *pm*2 为从种群 *NP* 中随机索引的 2 个个体; *bm* 为当前最优解。交叉操作的目的是提高种群个体的多样性, 由交叉系数 *CR* 控制, 方式如下:

$$Vm_{i,j}=\begin{cases}V_{i,j}, & \mathrm{if}(\mathrm{rand}\leqslant CR)\\ XV_{i,j}, & \mathrm{if}(\mathrm{rand}>CR)\end{cases},\ j=1:D, \quad (12)$$

式中: *V* 为变异产生的新个体; *XV* 为种群旧个体; 根据产生随机数, 分别从 *V* 和 *XV* 个体中选取第 *j* 个参数, 组成新的个体 *Vm*; rand 为产生 (0,1) 范围内的随机数; *CR* 为交叉控制系数取值 0.8。

选择操作: 计算当前操作个体 XV_i 和新变异、交叉产生新个体 Vm_i 的个体适应度值, 保留适应度值高的个体进入下一轮变异, 同时比较最优解并替换当前最优解 *bm*:

$$XV_i=\begin{cases}Vm_i, & \mathrm{if}(f(Vm_i)>f(XV_i))\\ XV_i, & \mathrm{if}(f(Vm_i)\leqslant f(XV_i))\end{cases}, \quad (13)$$

第三步: 第二类变异, 交叉、选择:

$$hm=pm1+F\times(bm-pm2), \quad (14)$$

式中: *F* 是缩放因子; *pm*1, *pm*2 为从种群 *NP* 中随机索引的 2 个个体; 交叉、选择操作同上, 同时比较最优解并替换 *bm*;

第四步: 第三类变异, 交叉、选择:

$$hm=pm1+F_1\times(bm-pm2)+F_2\times(bm-pm3), \quad (15)$$

式中: F_1, F_2是缩放因子; *pm*1, *pm*2, *pm*3 为从种群 *NP* 中随机索引的 3 个个体; 交叉、选择操作同上, 同时比较最优解并替换 *bm*;

第五步: 第四类变异, 交叉、选择:

$$hm=bm+F_1\times(bm-pm1)+F_2\times(pm2-pm3), \quad (16)$$

式中: F_1, F_2是缩放因子; *pm*1, *pm*2, *pm*3 为从种群 NP 中随机索引的 3 个个体; 交叉、选择操作同上, 同时比较最优解并替换 *bm*;

判断是否达到终止条件, 若满足则退出循环, 输出最优解 *bm*, 否则, 返回至第一步再循环。四步变

异法运用了 4 种不同变异操作, 每次变异均有当前最优解参与变异, 提高了寻优能力。

2　数值模拟

2.1　*AB-H*$_z$ 半航空电磁频率测深电阻率模型计算（双频率法）

1)模型一 H 型

计算参数: 层状地电模型如表 1 所示, 首层电阻率设定为 200 Ω·m, 层厚为 1 170 m。供电电流 *I*=17 A, 电偶极子长度 d*L*=1 200 m, 观测装置采用赤道偶极测量装置, 测点在 *AB* 中垂线上, 接收机记录垂直磁场分量 H_z。首先验证全区视电阻率双频率法计算公式, 垂直磁场 H_z 接收高度分别取 30 m, 60 m 和 90 m, 收发距取 5 000 m, 先计算出 *AB-H*$_z$ 磁场响应, 进而基于式(4)~(10)双频率法计算全区视电阻率。全区电阻率频率测深曲线如图 1 所示。均匀半空间模型飞行高度 60 m 时, 计算的全区视电阻率在计算频率范围内均为 200 Ω·m, 模型一同一收发距 3 个不同飞行高度全区视电阻率近于重合, 不同高度磁场响应计算的全区视电阻率频率测深曲线均反映出了地层由浅至深的电性变化, 高频段电阻率与首层电阻率相同, 200~20 Hz 间的变化是第 2 层的响应; 低频段接近于基底电阻率, 趋近于 230 Ω·m。全区电阻率计算方法正确。

表 1　地电模型参数

Table 1　Geoelectric model parameters

层参数	第1层	第2层	第3层
电阻率/(Ω·m)	200	27	230
层厚/m	1 170	190	∞

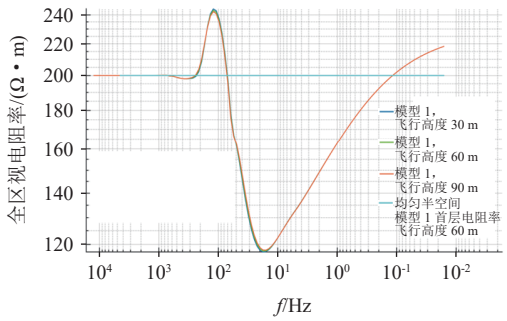


图 1　地—空 *AB-H*$_z$ 不同飞行高度频率测深曲线

Fig. 1　Frequency sounding curves of ground-air *AB-H*$_z$ at different flight altitudes

为验证不同收发距的电磁频率测深特征, 设置 3 个收发距, 分别为 3 500、4 000、4 500 m, 间隔 500 m, 固定飞行高度为 30 m, 计算电磁场垂直分量 H_z 并用双频率法计算全区视电阻率。由图 2 可见, 多收发距电阻率频率测深曲线均反映出 H 型地电模型特征。1 0000~1 000 Hz 频段电阻率值为 200 Ω·m, 是第 1 层的响应, 层厚度越大, 平直段频率越低; 1 000~64 Hz 频段, 是第 2 低阻电性层响应, 其中 600~200 Hz 频段电阻率反冲特征明显, 可解释为由于 1、2 层界面电阻率剧烈差异引起, 反冲峰值频率随收发距增大向低频有频移; 在 64~0.01 Hz 频段, 电阻率随频率降低而升高, 逼近于第 3 层电阻率真值, 表现为第 3 基底层的响应。在 36~10 Hz 频段模型一电阻率计算无解, 推测此频率段为远场与近场转换区。各收发距均反映出了 H 型地电模型特征, 且电阻率计算值与模型参数一致, 说明双频率法全区电阻率计算方法正确, 且消除了近场源效应影响; 对于中间低阻层响应, 收发距为 4 500 m 时响应最明显(频率为 64 Hz 时电阻率最小)。基于本文双频率全区视电阻率定义方法, 收发距 3 500 m 与 4 500 m 一样, 10 000~0.01 Hz 频段均能穿透 1、2 层总厚度 926 m 并对基底层有较大深度响应, 双频率法全区电阻率计算方法使得 *AB-H*$_z$ 具有近场源频率测深功能。

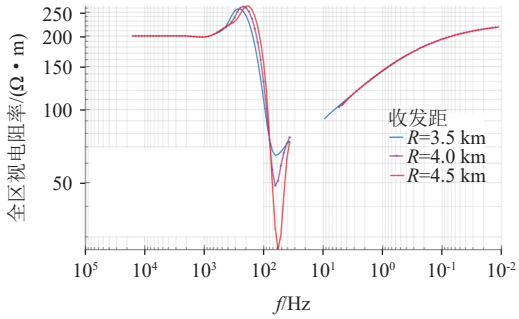


图 2　地—空 *AB-H*$_z$ 多收发距频率测深曲线

Fig. 2　Air-ground *AB-H*$_z$ multi-offset frequency sounding curves

2)模型二 K 型

计算参数同模型一, 层状地电模型如表 2 所示, 首层电阻率设定为 200 Ω·m, 层厚为 670 m, 中间电性层电阻率为 5 300 Ω·m, 层厚度 310 m, 第 3 基底层为 190 Ω·m。基于式(4)~(10)用双频率法计算全区视电阻率, 电阻率频率测深曲线如图 3 所示。

表 2　地电模型参数

Table 2　Geoelectric model parameters

层参数	第1层	第2层	第3层
电阻率/(Ω·m)	200	5 300	190
层厚/m	670	310	inf

由图 3 可见, 多收发距电阻率频率测深曲线均反映出 K 型地电模型特征。10 000~2 000 Hz 频段电

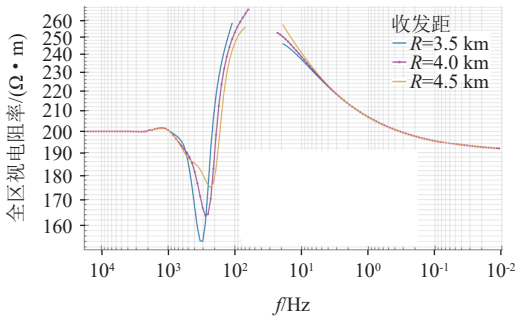


图 3　地空 *AB-H*$_z$ 多收发距频率测深曲线

Fig. 3　Ground-air *AB-H*$_z$ multi-offset frequency sounding curves

阻率值为 200 Ω·m, 是第 1 层的响应, 层厚度越大, 平直段频率越低; 1 500~40 Hz 频段, 是第 2 电性层响应, 其中 1 000~20 Hz 频段电阻率反冲特征明显, 特征与模型一相反, 可解释为由于 1、2 层界面电阻率差异明显引起, 小收发距(3 500 m)反冲效应强而大收发距(4 500 m)反冲效应弱, 随收发距增大, 低冲最小值频率向低频频移; 在 40~0.01 Hz 频段, 电阻率随频率降低而降低, 并逼近于第 3 层电阻率真值, 表现为第 3 基底层的响应。在 60~20 Hz 频段, 模型二电阻率计算无解, 推测此频率段为远场与近场的转换区。各收发距均反映出了 K 型地电模型特征, 且电阻率计算值与模型参数一致, 说明双频率全区电阻率计算方法对于 K 型地电模型同样正确。基于本文双频率法全区视电阻率定义方法, 收发距 3 500 m 与 4 500 m 一样, 穿透 1、2 层总厚度 980 m 并对基底层有较大深度响应, 频率低于 5 Hz 后, 3 个收发距电阻率重合, 这是垂直磁场分量 H_z 近场特征, 计算电阻率与收发距无关, 双频率法消除了近场效应, 使得本方法具有近场源频率测深功能。

2.2　差分进化电阻率一维反演数值模拟

模型参数如表 3 所示。首先正演计算模型参数地电模型的频率测深全区视电阻率, 再运用改进的四步变异差分进化进行反演计算。正演计算参数, 收发距取 2 500 m, 地面电偶极源激发电流为 16 A, 电偶极子长度为 1 150 m, 赤道偶极装置接收垂直磁场 H_z, 方位角 90°, 接收机高度 30 m, 频率范围 0.025~1 2500 Hz, 共 81 个频率对数等间距分布。反演对象是三层 H 型地层电阻率及其厚度, 共 5 个参数, 给每个参数设置取值范围(表 4 第 3 列)。设置最大适应度极限值 *FML*=3, 最大适应度值 *MF* 为 0.998 9, 种群规模 *NP*=49, 最大迭代次数为 64。由于反演计算中, 各频率点电阻率计算中涉及 Hankel 数值积分, 本文采用基于连分式加速的数值积分算法, 计算效率低于数字滤波算法, 但计算精度较高, 耗时较长, 本次反演循环次数 64, 历时近 60 h(受限于计算机性能)。循环控制参数为拟合度, 由各频率点原始电阻率值与反演计算电阻率值的均方根误差 *RMS* 控制。拟合度由式(17)计算:

$$\text{model}\,fitness=(FML-RMS)/FML。\qquad(17)$$

表 3　地电模型参数

Table 3　Geoelectric model parameters

层参数	第1层	第2层	第3层
电阻率/(Ω·m)	200	27	230
层厚/m	1 070	290	∞

表 4　H 型地电阻率模型参数及反演结果

Table 4　Parameters and inversion results of H-type earth resistivity model

模型参数	真值	取值范围	反演结果			相对误差/%
			反演1	反演2	平均值	
ρ_1/(Ω·m)	200	[50,500]	199.974	199.999 5	199.987	−0.006 5
ρ_2/(Ω·m)	27	[10,200]	27.171 7	26.803 3	26.987 5	−0.046 3
ρ_3/(Ω·m)	230	[100,600]	229.958 9	230.166 4	230.062 7	0.027 3
d_1/m	1 070	[500,1 500]	1 069.2	1 070.9	1 070.05	0.004 67
d_2/m	290	[50,600]	292.061 8	287.652 4	289.857 1	−0.049 3

当均方根误差 *RMS* 很小时, 拟合度趋进于 1。由图 4 可知, 四步差化进化反演, 循环 64 次, 拟合度为 0.999 84, 逼近于 1。各频点电阻率最小拟合均方差, 反演 1 为 4.78×10^{-4}; 反演 2 为 5.4×10^{-4}。

从表 4 反演结果可以看出, 反演结果与模型真值很接近。两次反演结果平均值, 第三层电阻率相对误差最大, 为 0.027 3%, 首层厚度的相对误差最小, 为 0.004 67%。图 5 是模型参数电阻率正演值与反演结果模型的电阻率正演值频率测深曲线, 全区视电阻率频率曲线有较高的拟合度(图中两个曲线几乎重合)。

3　结论

基于多旋翼无人机的地空电磁频率测深法在深地探测中有技术优势, 在地面用电偶极源 *AB* 激发电

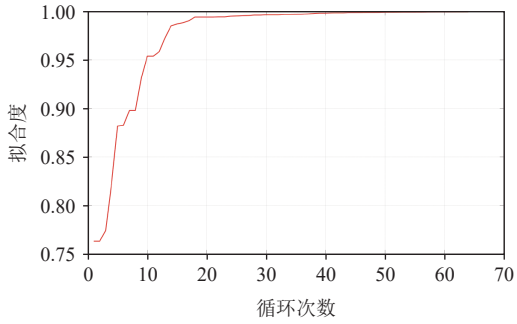


图 4　差化进化反演拟合度效率

Fig. 4　Efficiency of fitting degree in differential evolution inversion

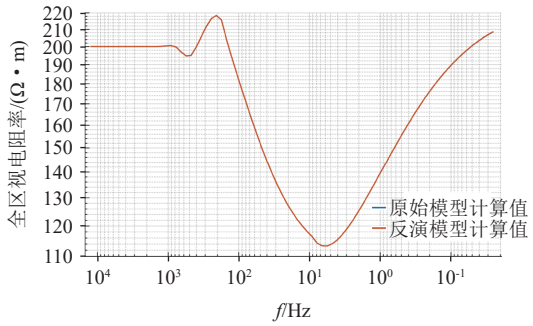


图 5　表 3 模型和反演结果的电阻率测深结果对比

Fig. 5　Comparison of resistivity sounding results of the model and inversion results in table 3

磁场, 在空中接收垂直磁场 H_z 分量频率响应, 可实现电磁频率测深, 场地适应性强, 探测深度大、效率高。本文针对 *AB-H*$_z$ 地空电磁频率测深法关键技术中的全区视电阻率计算和一维反演做了初步研究。

将观测垂直磁场值转换为视电阻率可使地质解释更为直观, 基于电阻率等效原理, 实测场值可用相同观测条件下均匀半空间模型的响应等效。本文基于水平电偶极子源激发电磁场 H_z 分量解析表达式, 构建了两个全区视电阻率迭代计算公式, 式(2)和式(11), 后者双频率法可较好消除近场效应。设计模型用双频率法计算了 H 型和 K 型地电模型全区视电阻率, 电阻率频率曲线与地电模型参数一致, 首枝反映第一层电阻率, 尾枝趋近于基底层电阻率, 中间频率段电阻率是第二层的响应, 由于 1、2 层电阻率差异巨大, 计算的全区视电阻率反冲特征明显。多收发距计算结果表明, *AB-H*$_z$ 在近场源较小收发距也有频率测深功能。

差分进化算法适用于多参数反演。改进的四步变异法强化了当前最优解的影响度, 有利于全局寻优。模型计算结果表明, 基于多步变异的差化进化算法是一种较好的非线性反演算法。在有强大的计算资源保障条件下, 多次反演取平均可显著提高反演精度, 一维全区电阻率反演可以为地质解释提供高精度地电信息。

下一步工作将开展 *AB-H*$_z$ 地空电磁频率测深应用研究, 对于深切割山区、戈壁荒漠等地面难进入勘探区是一种技术方案。

参考文献(References):

[1] 底青云, 朱日祥, 薛国强, 等. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2128−2138.
Di Q Y, Zhu R X, Xue G Q, et al. New development of the Electromagnetic(EM)methods for deep exploration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2128−2138.

[2] 薛国强, 武欣, 陈卫营, 等. 接地源短偏移瞬变电磁法理论及其在深部矿产勘探中的应用 [J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(2): 642−654.
Xue G Q, Wu X, Chen W Y, et al. Theory of short offset transient electromagnetic method of grounding source and its application in deep mineral exploration[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2025, 55(2): 642−654.

[3] Kaufman A A, Alekseev D, Oristaglio M. Principles of electromagnetic methods in surface geophysics[M]. Amsterdam: Elsevier, 2014.

[4] Zhdanov M S. Foundations of geophysical electromagnetic theory and methods[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017.

[5] Chave A D, Jones A G. The magnetotelluric method: Theory and practice[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

[6] 何继善. 伪随机信号广域电磁法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2023.
He J S. Wide-area electromagnetic method of pseudo-random signal[M]. Beijing: Higher Education Press, 2023.

[7] 汤井田, 何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
Tang J T, He J S. Controlled source audio magnetotelluric method and its application[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.

[8] 何继善. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1809−1816.
He J S. Theory and technology of wide field electromagnetic method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1809−1816.

[9] 薛国强, 武欣, 陈卫营, 等. 接地源短偏移瞬变电磁法理论及其在深部矿产勘探中的应用 [J]. 中国科学:地球科学, 2025, 68(2): 626−638.
Xue G Q, Wu X, Chen W Y, et al. Grounded-source short offset transient electromagnetic method: Theory and applications in deep mineral exploration[J]. Science China Earth Sciences, 2025, 68(2): 626−638.

[10] 薛国强, 陈卫营, 武欣. 电性源短偏移距瞬变电磁法理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
Xue G Q, Chen W Y, Wu X. Theory and application of short offset transient electromagnetic method for electrical source[M]. Beijing: Science Press, 2022.

[11] 殷长春. 航空电磁理论与勘查技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.

Yin C C. Airborne electromagnetic theory and exploration technology[M]. Beijing: Science Press, 2018.

[12] Sun H F, Zhang N Y, Li D R, et al. The first semi-airborne transient electromagnetic survey for tunnel investigation in very complex terrain areas[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 132: 104893.

[13] 翟皓. 半航空瞬变电磁探测能力研究及应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
Zhai H. Research and application of semi-airborne transient electromagnetic detection capability[D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[14] 周海根. 多场源地空频率域电磁探测方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
Zhou H G. Research on ground-airborne frequency-domain electromagnetic methods with multiple sources[D]. Changchun: Jilin University, 2017.

[15] Hubert J, Lee B M, Liu L J, et al. Three-dimensional imaging of a Ag-Au-rich epithermal system in British Columbia, Canada, using airborne z-axis tipper electromagnetic and ground-based magnetotelluric data[J]. Geophysics, 2016, 81(1): B1−B12.

[16] 殷长春, 朴化荣. , 电磁测深法视电阻率定义问题的研究 [J]. 物探与化探, 1991, 15(4): 290−299.
Yin C C, Piao H R. A study on the definition of apparent resistivity in electromagnetic sounding method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1991, 15(4): 290−299.

[17] 汤井田, 周聪, 张林成. CSAMT 电场 *y* 方向视电阻率的定义及研究 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(2): 552−558.
Tang J T, Zhou C, Zhang L C. A study on the definition of apparent resistivity of the y-component electric field in CSAMT[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(2): 552−558.

[18] 罗姣, 郭文波, 刘长生, 等. 频率域地空电磁法磁场三分量全域视电阻率的定义 [J]. 物探与化探, 2025, 49(3): 679−686.
Luo J, Guo W B, Liu C S, et al. Definition of global apparent resistivity based on three components of the magnetic field for the interpretation of the ground-airborne frequency-domain electromagnetic data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(3): 679−686.

[19] 罗志亮, 汤井田, 周聪, 等. 频率域电磁法电场梯度视电阻率研究 [J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(1): 243−252.
Luo Z L, Tang J T, Zhou C, et al. Research on apparent resistivity of electric field gradientbased on electromagnetic method in frequency domain[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2025, 60(1): 243−252.

[20] 伏海涛, 罗维斌, 丁志军, 等. 水平电偶极源层状模型垂直磁场全区视电阻率计算方法 [J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1309−1319.
Fu H T, Luo W B, Ding Z J, et al. , The calculation method of whole zone apparent resistivity of vertical magnetic field on the surface of layered model excited by horizontal electric dipole source[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1309−1319.

[21] 程见中. 时频电磁法全参数反演方法研究与应用 [D]. 荆州: 长江大学, 2018.
Cheng J Z. Research and application of full-parameter inversion method for time-frequency electromagnetic method [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018.

[22] Storn R, Price K. Differential evolution–a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimizatio, 1997, 11(4): 341−359.

[23] Swagatam D, Ajith A. Differential evolution using a neighborhood-based mutation operator[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(3): 526−553.

[24] Kumar B V, Oliva D, Suganthan P N. Differential evolution: From theory to practice[M]. New York: Springer, 2022.

[25] 王珺璐, 陈辉, 罗先中, 等. 大功率—超大功率电(磁)探测技术进展与展望 [J]. 物探与化探, 2025, 49(4): 755−767.
Wang J L, Chen H, Luo X Z, et al. Progress and prospect of high-power and ultra-high-power electromagnetic detection technology [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(4): 755−767.

[26] 王天意, 侯征, 何元勋, 等. 基于改进差分进化算法的大地电磁反演 [J]. 地球物理学进展, 2022, 37(4): 1605−1612.
Wang T Y, Hou Z, He Y X, et al. Magnetotelluric inversion based on improved differential evolution algorithm[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(4): 1605−1612.

[27] 曾志文, 陈晓, 杨海燕, 等. 基于改进差分进化算法的大地电磁测深和重力宽范围物性约束联合反演 [J]. 地球物理学报, 2020, 63(12): 4565−4577.
Zeng Z W, Chen X, Yang H Y, et al. Joint inversion of magnetotelluric and gravity based on improved differential evolution algorithm and wide-range petrophysical constraints[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(12): 4565−4577.

[28] 丁志军, 罗维斌, 连伟章, 等. 基于两步变异差分进化算法的激电测深一维反演 [J]. 物探与化探, 2023, 47(4): 1033−1039.
Ding Z J, Luo W B, Lian W Z, et al. 2023. One-dimensional inversion of induced polarization sounding data based on the differential evolution algorithm with two-step mutation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(4): 1033−1039.

Differential evolution-based one-dimensional inversion of whole-zone apparent resistivity for *AB*-H_z ground-airborne electromagnetic frequency sounding

REN Xi-Rong [1], LUO Wei-Bin [2]

(1. *The Second Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development*, *Lanzhou* 730020, *China*; 2. *School of Geology and Jewelry*, *Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech University*, *Lanzhou* 730021, *China*)

Abstract: This study investigated methods for the calculation and one-dimensional (1D) inversion of whole-zone apparent resistivity us-

ing the AB-Hz ground-airborne electromagnetic frequency sounding method. The purpose is to improve the accuracy and efficiency of electromagnetic frequency sounding and provide technical support for the high-efficiency exploration of deep subsurface resources. The AB-Hz ground-airborne electromagnetic frequency sounding method enables subsurface detection by exciting an electromagnetic field using a ground electric dipole source AB and measuring the vertical component Hz via unmanned aerial vehicle (UAV)-based observations. This study investigated the characteristics of frequency sounding curves of the whole-zone apparent resistivity under different transmitter-receiver distances. Two iterative calculation methods were established for the whole-zone apparent resistivity of the AB-Hz ground-airborne electromagnetic frequency sounding using the analytical expression of the Hz component of the electromagnetic field generated by a horizontal electric dipole (HED) source. Based on the equivalent resistivity principle, the correctness of the two methods was verified by calculating the H- and K-type geoelectric models using the dual-frequency method. To achieve the multi-parameter nonlinear optimization in 1D inversion, this study introduced an improved differential evolution algorithm and proposed a four-step mutation method to enhance the influence of the optimal solution. These efforts contributed to enhanced global optimization performance. Numerical simulation results show that the inversion results were close to the true values of the models, with a high goodness of fit, verifying the effectiveness of the proposed inversion method. The AB-Hz electromagnetic frequency sounding method exhibited pronounced responses to both low- and high-resistivity target geobodies, with larger transmitter-receiver distance corresponding to more distinct responses to targets. The proposed method can provide a technical solution for exploring inaccessible areas, such as deeply incised mountainous areas.

Key words: AB-H_z ground-airborne electromagnetic frequency sounding; whole-zone apparent resistivity; multi-step mutation differential evolution algorithm; one-dimensional (1D) forward modeling

（本文编辑: 王萌）