

深部探测中电磁法勘探数据的精确处理与分析

朱俊

江苏省海洋地质调查院, 江苏 南京 210007

摘要: 随着深部矿产资源勘探需求的不断提升, 电磁法因其探测深度大、分辨率高的特性, 成为探测深部地质信息的重要手段。然而, 在强干扰环境下, 电磁法探测数据的精确处理是获得高质量结果的关键。本文结合广域电磁法 (WFEM)、伪随机信号电磁法 (PREM)、双频激电法 (DFIP) 等技术的最新进展, 从数据采集、去噪、静态效应校正及反演技术等方面探讨了电磁法勘探数据的精确处理方法。研究表明, 基于地质约束的三维反演技术能有效提高数据解析的可靠性, 为深部资源勘探提供了坚实的技术保障。

关键词: 深部探测; 电磁法; 勘探数据; 精确

Accurate Processing and Analysis of Electromagnetic Exploration Data in Deep Exploration

Zhu, Jun

Marine Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing, Jangsu, 210007, China

Abstract: With the increasing demand for deep mineral resources exploration, electromagnetic method has become an important means to detect deep geological information because of its characteristics of large detection depth and high resolution. However, in the strong interference environment, the accurate processing of electromagnetic detection data is the key to obtain high quality results. Based on the latest development of Wide Field Electromagnetic Method (WFEM), Pseudo-Random signal Electromagnetic Method (PREM) and Dual Frequency Induced Polarization Method (DFIP), this paper discusses the accurate processing methods of electromagnetic exploration data from the aspects of data acquisition, denoising, static effect correction and inversion technology. The research results show that 3D inversion technology based on geological constraints can effectively improve the reliability of data analysis and provide a solid technical guarantee for deep resource exploration.

Keywords: Deep exploration; Electromagnetic method; Exploration data; Accurate

DOI: 10.62639/sspis35.20250202

深部矿产资源的开发已成为保障经济发展的重大战略需求。随着浅层矿产逐渐枯竭, 勘探工作正向更大的深度、更复杂的地质条件推进。在此背景下, 电磁法作为一种高效、非侵入式的地球物理探测技术, 凭借其对于金属矿体和能源资源的敏感性, 成为深部资源勘探的首选方法^[1]。然而, 电磁探测数据的高质量分析面临诸多挑战, 包括信号微弱、人文噪声干扰、地表静态效应以及深部反演的非唯一性问题。因此, 探索数据精确处理方法, 对提升勘探精度具有重要意义。

一、数据采集中的关键技术

在深部探测中, 电磁法数据采集的质量直接决定了解释和分析的可靠性。本文结合广域电磁法和伪随机信号电磁法的特点, 探讨了数据采集的优化策略。

(一) 广域电磁法 (WFEM) 采集策略

广域电磁法 (WFEM) 的采集策略在电磁探测中具有划时代的意义, 其摆脱了传统电磁法对远区测量的严格依赖, 以完整的电磁场表达式为基础, 极大地扩展了勘探的可观测范围^[2]。传统方法中, 观测点需要位于场源的远区以满足平面波假设, 而 WFEM 则直接将复杂场源效应纳入模型, 从而显著减少了对收发距的限制。这一特性不仅提升了野

外布点的灵活性, 还在观测范围和精度之间取得了优异的平衡。在实际应用中, 伪随机多频信号的采用成为 WFEM 的一大亮点, 这种技术可以同时发送和接收多个频率信号, 避免了传统逐频观测模式的低效率问题。多频信号的叠加使数据的时空分辨率显著提高, 尤其是在高干扰环境下, 信噪比的优势尤为显著。结合频率覆盖范围和采集时长的优化设计, WFEM 在频谱利用率与数据质量之间实现了深度优化。例如, 在某矿区的应用中, 频率覆盖范围从 0.1Hz 扩展至 1,000Hz, 通过实验测试确定 1 小时采集时长为最佳参数设置, 最终获得的剖面数据在低频段的稳定性和高频段的分辨率上均表现出卓越优势。

(二) 发射偶极与信号优化策略

在发射信号和偶极优化方面, WFEM 进一步发挥了其对深部探测的适应性与灵敏性。长偶极发射因其较大的发射电流和更均匀的电磁场分布, 在深部探测中表现出明显的优势。长偶极的信号强度在深度方向的衰减速率较低, 从而提高了对深部目标体的探测能力, 同时其在频率畸变上的表现优于短偶极, 信号特性更符合理论模型的预期。此外, 伪随机信号技术的引入进一步提升了信号优化水平。相比传统单频信号, 这种信号均匀分布的多频主信号有效抑制了谐波衰减效应, 使探测信号在整个频谱上的能量分布更加均衡^[3]。这种特性使得

(稿件编号: IS-25-2-1040)

作者简介: 朱俊 (1982-), 男, 汉族, 江苏省南京市, 研究生, 江苏省海洋地质调查院, 高级工程师, 研究方向: 电磁法勘探。

WFEM 能够在深度解析和横向分辨率之间获得最佳的平衡。在相关研究中发现，在对某复杂地质构造区域的勘探中，长偶极发射与伪随机信号的结合使目标体的电性异常更为突出，解释结果与钻孔验证的吻合率达到了 90% 以上，进一步印证了这一技术的实际价值和应用前景。

二、数据处理中的去噪方法

强干扰环境是深部探测中电磁法面临的主要挑战之一，本研究开发了一套多维精细去噪算法，系统性地解决了频谱噪声、低阶异常波形及工频干扰的抑制问题，该方法的去噪流程如图 1 所示：



图 1 精细去噪算法流程

（一）相位噪声校正：相位噪声矫正是数据去噪过程的基础步骤，重点在于还原信号的时间特性和频率分布特性，提取出真实的地下响应信号。短时傅里叶变换（STFT）作为处理非平稳信号的有力工具，在电磁法数据处理中广泛应用。通过分析发射信号的时间序列，STFT 能够准确捕捉其主周期的相位特征。在接收端，利用这些提取的相位特征对观测数据进行时间序列补正，最大程度上消除了由于相位漂移而引入的误差。此过程特别适用于高频率和强干扰环境下的数据修正。在实际应用中，相位校正后的信号频谱表现出更清晰的主频分布，同时与地质模型匹配的相关性显著提高。

（二）频谱形态优化：频谱形态优化的意义在于校正高频信号的逸散现象，避免有效信号在频谱能量分布中受到干扰或被噪声掩盖^[4]。逸散现象通常是由于信号处理过程中频率泄漏导致的，而这一现象在高频段尤为显著。通过对频谱进行分段处理，采用加窗函数优化频谱形态，能够减少频率泄漏对目标信号的影响。实验表明，在典型测点数据中，经过频谱形态优化后，高频段的电场信号能量集中度提升了约 20%–30%，曲线更加平滑，这对于定位细小异常体或明确深部边界特性至关重要。此外，优化后的频谱数据呈现出更高的信噪比，与电性反演结果的吻合度进一步提升，显现了其对于地下结构解析的深远影响。

（三）特征噪声剔除：特征噪声剔除是针对特定干扰信号进行的精准处理，其核心方法在于字典匹配。常见的低阶异常波形，例如阶梯噪声和三角噪声，通常具有显著的时间域特征，这为其识别和剔除提供了有利条件。通过构建包含常见噪声模式的字典，并结合模板匹配技术，可以在时间域精确定位这些异常波形的位置和特征。在剔除异常波形后，对原始信号进行重新拟合，能够最大限度地还原有效信号。实践中，典型测点数据剔除阶梯噪声后，其低频段的视电阻率曲线摆脱了异常跳点的影响，进一步显示了该方法的有效性。剔除特征噪声后，剖面的整体一致性显著提高，电性分布更符合实际地质条件。

（四）Robust 拟合：Robust 拟合的核心思想

是利用统计方法，寻求数据的最佳表达形式。它通过权重分配和迭代拟合，在极大化保留有效信息的同时，抑制异常值对结果的影响。在处理电磁法数据时，Robust 拟合方法可基于归一化电场的统计特征，自动分配权重，将异常点的权重降低，从而避免其对整体数据的拉偏^[5]。典型案例分析中，Robust 拟合后的视电阻率数据在高频段表现出更高的连续性，低频段则减少了非线性跳变现象。最终拟合结果与地质钻孔数据对比显示，其浅部误差减小至 3% 以内，深部的反演精度提升了约 15%。这一方法不仅为地下结构的精准刻画提供了强有力的技术支撑，也在实际应用中展现出高度的鲁棒性和适应性。

三、静态效应校正技术

静态效应是由地表不均匀电性分布引起的，常表现为测量数据的条带状畸变。在广域电磁法中，采用汉宁窗滤波对静态效应进行压制，取得了显著效果。

（一）滤波参数优化

汉宁窗滤波的效果高度依赖参数的选择，包括窗宽和阈值。这些参数需要通过实际数据的多次测试来确定，以确保滤波后的曲线平滑，同时保留地质特征。

以 A 矿区为例：

测线：L1 和 L2，测点间距 50 米。

窗宽：测试范围为 1~10 个点，分别测试 3、5、7 点。

阈值：测试范围为 0.1~0.9，间隔为 0.1。

通过逐步调整窗宽和阈值，选择能最大程度消除条带畸变、并保持曲线光滑的组合，表 1 总结了各参数设置下的滤波结果评分。

表 1 各参数设置下的滤波结果评分

参数组合（窗宽 - 阈值）	条带畸变抑制评分	曲线光滑性评分	总评分
3-0.5	8	7	7.5
5-0.6	9	9	9.0
7-0.7	9	8	8.5
7-0.8	9	7	8.0

最终选择窗宽 5、阈值 0.6 作为最佳参数，根据滤波前后的典型测点视电阻率曲线对比结果可知，滤波前，曲线出现多处急剧跳变；滤波后，曲线趋于平滑，条带状畸变显著减小。

（二）静态效应校正结果

静态效应校正后，电性结构剖面显示出更加合理的地质分布特征，以下以 A 矿区 L1 测线为例，展示滤波处理前后的对比。

1. 校正前剖面特征：静态效应校正作为电磁法勘探数据处理中的关键步骤，在 A 矿区 L1 测线的实际应用中展现了显著成效。校正前的剖面结果显示出强烈的条带状畸变，特别是在浅部与深部的过渡区域，这种现象明显偏离地质预期。浅部局部低阻层因地表不均匀电性分布的叠加效应，呈现出非自然的扩展态势，不合理地延伸至深部。此类偏差不仅使得剖面的地质结构呈现出

虚假的低阻特性, 还对高阻目标体的识别形成干扰。这种现象可能与覆盖层电性差异显著、以及深部弱信号被浅部畸变掩盖有关。更为重要的是, 低阻层在剖面中的不合理扩展直接影响到深部反演的可信度, 误导了成矿预测的判断。显然, 这种未经校正的剖面数据难以支持准确的地质解释和成矿靶区评估。

2. 校正后剖面特征: 经过静态效应校正后, 剖面数据的质量得到大幅提升, 条带状畸变现象被有效压制, 剖面结构逐渐趋于连贯与合理。浅部局部低阻层的影响被显著削弱, 其扩展范围恢复至合理水平, 避免了对深部目标区域的掩盖效应。校正后的深部剖面展现出清晰的高阻异常, 与既有钻孔揭露的矿体位置高度吻合, 这一结果为深部成矿机制的研究提供了有力支持。校正后的剖面中, 背斜核心区域的低阻异常轮廓清晰, 与区域构造流体活动和富矿化带的推测高度相关, 进一步增强了对该区域成矿潜力的信心。由此可见, 静态效应校正不仅在数据层面优化了剖面的电性分布, 还为更深层次的地质解析和资源预测奠定了可靠基础, 彰显了其在深部探测中的重要技术价值。

通过汉宁窗滤波对静态效应进行校正, A 矿区的电磁法数据质量得到了显著改善, 具体表现在: (1) 条带状畸变得到有效抑制; (2) 浅部与深部的电性分布更加合理; (3) 深部高阻异常更加清晰, 与已知地质信息吻合。

四、数据反演与地质解译

数据反演是将电磁探测数据转化为地下电性结构的关键环节。本文采用基于地质约束的三维反演方法, 结合实际地质模型和岩石物性, 提高了解释的可靠性。

(一) 拟二维与三维反演比较

拟二维反演是一种常见的反演方法, 它利用横向约束矩阵, 将多个测点的数据联合反演, 显著改善传统一维反演横向连续性不足的问题。这种方法尤其适合初步探测阶段, 可快速构建地下剖面的电性分布。然而, 由于拟二维反演在计算中隐含了沿剖面法向无限延展的假设, 导致其横向分辨率受限, 特别是在处理地质结构复杂的区域时, 容易忽略垂向与横向交互对电性分布的影响。

相比之下, 三维反演通过将地质构造约束纳入计算框架, 更贴近实际地下电性分布。A 矿区的三维反演工作即是一个典型案例。研究中, 反演模型网格设计为包含 411,574 个单元, 并以区域内钻孔资料作为约束点, 确保模型的地质一致性。这种方法克服了拟二维方法中因模型简化导致的局部信息丢失问题, 使其能够解析复杂的地质特征, 如背斜构造、岩浆侵入体和矿体的细节特征。

数据结果显示, 在横向电性变化较大的区域, 三维反演能够更精确地还原电性分布。这一特性尤为重要, 因为金属矿产勘查中常需要明确定位小型异常体的位置及其与周围岩体的关系。拟二

维反演在这些方面则显得力不从心, 其横向分辨率通常在异常体直径的数倍, 而三维反演通过更高密度的数据采集和计算模型, 将分辨率提升至与目标体大小相近的水平。

(二) 三维反演结果

A 矿区作为长江中下游成矿带的重要组成部分, 其地质复杂性对反演技术提出了极高要求。通过基于地质约束的三维反演技术, 该区域深部地质结构得到了细致解析。结果显示, 背斜构造的核心区域存在大面积低阻异常, 这一现象与成矿相关的地质流体活动高度相关, 反映了深部岩浆活动和成矿流体迁移的可能路径。

浅部反演结果与钻孔揭露的岩层产状基本吻合, 尤其是在黄龙组灰岩和船山组岩层的过渡区域, 三维反演成功定位了一个小型高阻异常体。该异常体被认为是与铜矿成矿作用密切相关的热液活动中心。这一结果显著提升了研究区成矿靶区预测的精度, 为后续的钻探验证和资源开发提供了科学依据。

值得注意的是, 反演还揭示了背斜核部深达 2~3 公里的低阻异常。这一异常的范围和形态与矿区内构造控矿作用相符。结合区域地质背景分析, 低阻区可能反映了富流体的岩性或断裂带的导电特性, 而高阻异常则可能代表矿体的存在区域。数据表明, 背斜核部高阻体的深度分布与现有矿井勘探结果高度一致, 进一步佐证了三维反演结果的可靠性。

五、结语

本文针对深部探测中电磁法勘探的挑战, 提出了一套精确处理与分析的完整方法。研究表明:

(1) 广域电磁法结合伪随机信号技术, 能显著提升深部探测的效率和信噪比; (2) 精细去噪与静态效应校正技术是提高数据质量的关键; (3) 基于地质约束的三维反演大幅提高了深部电性结构解析的可靠性。未来的工作方向应在现有技术的基础上, 进一步结合人工智能和大数据分析工具, 为电磁法数据处理注入新的活力, 如借助机器学习技术改进噪声识别与去除的精度; 利用实时数据反馈机制优化采集策略; 通过多物理场耦合方法, 实现电磁探测与地震、重磁等手段的深度融合。这些技术进步不仅能弥补单一方法的局限性, 还将为复杂地质背景下的深部资源预测提供更加科学和精细的解决方案。

参考文献:

- [1] 苏扬. 基于稀疏正则化的电磁勘探数据反演研究 [D]. 吉林大学, 2022.
- [2] 曹凯, 关继凯. 基于瞬变电磁法的矿井勘探数据处理方法分析 [J]. 世界有色金属, 2019, (08): 250+252.
- [3] 张必明, 戴世坤, 蒋奇云, 颜剑, 李广. 时频电磁法勘探数据时域去噪方法研究 (英文) [J]. Applied Geophysics, 2019, 16 (03): 378-393+398.
- [4] 邱晨. 航空瞬变电磁勘探数据的三维反演问题研究 [D]. 厦门大学, 2019.
- [5] 陈松. 地震勘探数据显示软件 V1.0. 湖北省, 中国地质调查局武汉地质调查中心, 2021-09-01.