

# 瞬变电磁法在金属矿勘探中的三维反演算法研究

刘 洋 张立楠

中陕核工业集团二一一大队有限公司 陕西 西安 710000

**摘要:** 瞬变电磁法 (TEM) 在金属矿勘探中展现出显著优势, 其三维反演算法是关键技术。本文详细探讨了瞬变电磁法的基本原理及三维反演技术, 分析了模型构建、网格剖分、正演计算、反演迭代、观测数据处理与误差分析等关键问题, 并提出了算法优化、模型优化、数据处理与误差分析优化以及软件平台优化等策略。这些策略旨在提升三维反演的精度、效率和可靠性, 为金属矿勘探提供坚实的技术支撑。

**关键词:** 瞬变电磁法; 金属矿勘探; 三维反演算法

## 引言

瞬变电磁法作为一种高效的地质勘探技术, 在金属矿勘探领域具有广泛应用。其核心在于利用地下介质导电性和导磁性的差异, 通过人工发射短暂脉冲磁场并观测二次涡流场的变化, 实现对地下异常体的精确定位。随着三维反演技术的发展, 瞬变电磁法的勘探精度和解释能力得到显著提升。本文旨在探讨瞬变电磁法三维反演算法的关键问题及其优化策略, 为金属矿勘探提供理论和技术支持。

## 1 瞬变电磁法的基本原理及三维反演概述

### 1.1 瞬变电磁法的基本原理

瞬变电磁法 (Transient Electromagnetic Method, TEM) 是一种高度依赖于地壳内部岩石和矿石间显著导电性与导磁性差异的地质勘探技术。其核心运作原理基于电磁感应的基本定律, 通过人工手段利用不接地回线或接地线源作为发射装置, 向地下发送一次短暂的脉冲磁场。这一磁场在穿透地下导电介质时, 会诱导出涡流, 而这些涡流进而产生自己的二次磁场, 即二次涡流场。在一次脉冲磁场结束后的一段间隙期内, 利用线圈或接地电极精确捕捉并记录这一二次涡流场随时间的变化特征。这一过程之所以有效, 是因为二次涡流场的空间分布格局及其随时间衰减的特性与地下介质的导电性能和几何结构紧密相连。通过对这些精细观测数据的深入分析, 地质学家能够准确地推断出地下异常体的具体位置、几何形态、埋藏深度以及其导电性质等关键信息。瞬变电磁法凭借施工简便、地形适应性强、对低阻异常体具有卓越的探测能力、高精度以及深达地层的广泛探测范围等优势, 在金属矿勘探领域展现出了非凡的应用价值, 为金属矿产资源的立体勘探与评估提供了强有力的技术支持<sup>[1]</sup>。

### 1.2 三维反演概述

三维反演技术的核心在于利用地表或空中观测的地球物理场数据, 结合精密数学模型与先进算法, 逆向解析地下介质的三维空间分布特征。在瞬变电磁法 (TEM) 的应用中, 三维反演技术尤为关键, 它不仅能够精细描绘地下电性结构, 还显著提升了勘探的精确度和地质解释能力。回顾历史, 三维反演算法经历了从简单到复杂、二维到三维的逐步演变。早期, 受计算能力和算法设计限制, 地球物理数据反演主要局限于二维空间, 虽能基本反映地下结构特征, 但在面对复杂地质构造时, 解释能力和精度受限。随着计算机科学和数学理论的快速发展, 三维反演技术应运而生, 成为瞬变电磁法勘探的重要组成部分。在三维反演实践中, 首先需根据观测的电磁场数据构建准确反映地下介质电性特征的正演模型, 随后通过非线性最小二乘法、蒙特卡罗法、遗传算法等优化算法, 对模型参数进行迭代调整, 直至理论数据与观测数据误差最小化。这一过程不仅挑战算法的稳定性和收敛速度, 还需大量计算资源支持。三维反演技术的引入, 使瞬变电磁法在金属矿勘探、油气资源勘探、地下水探测等领域展现出巨大潜力, 提供了更真实、立体的地下结构图像, 助力地质学家准确识别潜在矿产资源和地质构造特征, 为矿产开发和地质环境保护提供了坚实的科学依据。

## 2 瞬变电磁法三维反演算法关键问题

### 2.1 模型构建与网格剖分

模型构建的核心在于精确描绘地下介质的电性参数及其几何形态, 这是实现地下结构精准还原的前提。鉴于地下介质的复杂性, 涵盖不同岩性、构造和流体分布等因素, 模型构建时需综合考虑这些复杂性, 紧密结合勘探目标特征及观测数据精度, 以确保模型既贴近地质实际, 又满足反演算法需求。而网格剖分作为模型与反演算法间的关键纽带, 其重要性显而易见。在瞬变电磁

法三维反演中, 网格剖分的优劣直接影响计算效率和反演精度。规则网格剖分虽因简单易行、计算高效而广泛应用, 但难以精确匹配复杂地质模型, 可能导致反演失真。相反, 非规则网格剖分能更好适应复杂地质结构, 通过调整网格大小和形状反映地下介质实际分布, 但会增加计算量和算法复杂度, 所以选择网格剖分方法时, 需综合考虑计算效率、反演精度和地质模型复杂性, 力求在三者间找到最佳平衡点, 以实现高效、精准的三维反演<sup>[2]</sup>。

## 2.2 正演计算与反演迭代

在瞬变电磁法的三维反演算法中, 正演计算与反演迭代是两个相互依存且至关重要的组成部分, 它们共同塑造了反演的最终精度和解释能力。正演计算作为算法的基石, 其核心任务是根据预设的地下介质电性参数及其几何形态, 借助电磁场理论精确求解出观测点处的电磁场响应。这一环节不仅要求数值方法的高度准确性, 还需对计算参数进行精细优化, 以确保计算结果的精确度, 因为正演计算的准确性直接构成了三维反演成功的基础。为了实现这一目标, 研究人员通常运用高精度的数值求解方法, 如有限元法、有限差分法等, 并通过精细划分计算网格、恰当设定边界条件以及精细调整计算参数, 来最大限度地提升正演计算的精度和效率。而反演迭代则构成了三维反演算法的核心, 它基于观测数据与正演计算结果之间的差异, 通过迭代的方式不断优化地下介质的电性参数和几何形态, 直至差异最小化, 从而实现对地下介质结构的真实还原。反演迭代的效率和精度是衡量三维反演算法性能的关键标准。为了提高反演迭代的效率和精度, 研究人员需精心选择迭代策略, 并根据具体问题特性对迭代参数进行细致调整, 为了增强迭代过程的稳定性和收敛速度, 还需引入正则化技术、多尺度反演策略等高级技巧。

## 2.3 观测数据处理与误差分析

观测数据构成了反演算法的基础输入, 但这些数据在采集过程中极易受到环境噪声、仪器误差等多种因素的干扰, 影响其真实性和可用性, 所以观测数据处理成为一个必不可少的步骤, 它涉及滤波、去噪、校正等一系列技术的精细实施, 有效消除或减弱这些不利因素的影响, 提高数据的准确性和可靠性。通过选择合适的滤波器去除高频噪声, 利用统计方法或信号处理技术进一步减少噪声干扰, 以及针对仪器误差、环境因素等进行补偿校正, 这些处理步骤为后续的反演算法提供了高质量的数据基础。误差分析同样占据重要地位, 它是对观测数据、正演计算结果以及反演结果中的误差进行全面

评估和分析的过程, 有助于深入了解三维反演的精度和可靠性, 为后续的地质勘探和解释提供科学依据。在误差分析中, 选择合适的误差评估方法至关重要, 需要根据数据的特性和反演算法的需求, 采用合适的统计指标和评估模型对误差进行量化描述, 并通过不断优化误差评估参数, 提高误差分析的准确性, 指导反演算法的改进和优化。

## 3 瞬变电磁法三维反演算法优化策略

### 3.1 算法优化

在瞬变电磁法的三维反演算法优化策略中, 数值方法、迭代策略及并行计算技术的优化共同推动着算法性能的提升、计算效率的增强以及精度的提高, 针对复杂多变的地质模型, 优化数值方法尤为关键。有限差分法、有限元法和边界元法等传统数值方法各有千秋, 有限差分法在处理规则网格时展现出简单直观、易于编程的优势, 有限元法则在处理不规则网格和复杂边界条件时更为灵活, 而边界元法则擅长求解无限域或半无限域问题。为了充分利用这些方法的优势, 混合数值算法应运而生, 它能够根据具体的地质模型和反演需求, 灵活调整数值求解策略, 从而在确保计算精度的同时, 进一步提升计算效率。在迭代策略方面, 高效的迭代算法对于加速反演过程和提高反演结果准确性至关重要, 拟牛顿法和共轭梯度法等迭代策略因其收敛速度快、迭代次数少的特点而备受青睐。全局优化算法能够快速定位较大搜索空间内的最优解大致位置, 而局部优化算法则能在小范围内精细搜索最优解。这种全局与局部优化的结合, 显著提高了反演迭代的收敛速度和精度。分布式计算、GPU加速等并行计算技术的采用, 能够充分利用现代计算机的多核处理器和高速存储设备, 实现计算任务的并行处理和加速, 从而大幅缩短三维反演的计算时间, 提升算法的实时性和实用性。

### 3.2 模型优化

地质模型的构建远非数据的简单堆砌, 而是地质理论与实际勘探经验深度融合的结晶。为确保模型既遵循地质规律, 又精准反映地下实况, 必须细致考量勘探目标、地质构造特性及潜在储层属性, 据此选定最适宜的建模方法和参数配置。提升模型精准度与可靠性还需整合多元信息源, 地质勘探提供的地层结构与岩石类型等直观证据, 与地球物理勘探通过地震、电磁等手段揭示的地下介质物理属性相辅相成, 将这些信息有机整合成综合地质模型, 能显著提升模型的预测效能与实际应用价值。在模型构建的另一关键环节——网格剖分上, 优化空间同样广阔。传统固定网格剖分在面对复杂地质结

构时显得捉襟见肘，自适应网格剖分技术应运而生，该技术依据地下介质复杂度和勘探需求动态调整网格尺寸与形态，在地质构造复杂、储层特征多变的区域采用更细密的网格以捕捉细微变化，在地质条件简单的区域则采用较大网格以缩减计算量，这种灵活调整不仅提高了三维反演的精确度，还极大提升了计算效率，使得地质模型构建更加高效且精准<sup>[3]</sup>。

### 3.3 数据处理与误差分析优化

在瞬变电磁法（TEM）三维反演算法的优化策略中，数据处理与误差分析的改进发挥着至关重要的作用，它们不仅是保障反演结果准确性的基石，也是提升勘探效率与增强解释可靠性的关键所在。面对复杂多变的观测数据，采用更为先进的滤波、去噪及校正技术变得尤为重要，这些技术能够精确剔除数据中的噪声干扰，并纠正因仪器误差或环境因素而引发的数据偏差，从而显著提高数据的准确性和可靠性。为了进一步优化数据处理，不应局限于单一方法，而应积极探索并综合多种方法的优势，形成一套能够充分利用各种方法长处、相互补充的综合数据处理策略。在误差分析方面，其准确性直接关联到反演结果的可靠性，因此采用更为精确的误差评估方法和参数显得尤为重要。这要求我们不仅要考虑观测数据的直接误差，还需深入分析数据转换、模型假设等环节可能引入的间接误差。与数据处理相似，误差分析也应打破单一方法的局限，融合多种方法的优点，构建综合误差分析策略，以更全面地评估误差来源并提供更准确的误差范围，为后续勘探和解释工作提供更加可靠的依据。

### 3.4 软件平台优化

集成化平台作为高效勘探的基石，将三维反演算法、数据处理方法及误差分析技术等核心功能整合于一体，形成了一个综合性的地球物理勘探软件系统，这一平台简化了操作流程，实现了数据处理、三维反演与解

释分析的一体化，使用户能够在同一平台上无缝完成从数据预处理到最终成果输出的全过程，显著降低了操作复杂度，缩短了勘探周期。可视化技术的引入为勘探工作带来了直观洞察力，通过三维图形、图像等形式清晰展示三维反演结果，使地下介质的电性分布特征和地质结构信息一目了然，为勘探人员提供了宝贵的视觉参考，助力他们更准确地理解地下情况，并在后续勘探和解释中发挥重要指导作用。最后，智能化发展作为提升勘探水平的又一重要途径，通过在软件平台中融入机器学习、深度学习等人工智能技术，实现了对观测数据的智能识别、分析和处理，不仅提高了自动化程度，还显著提升了数据处理的准确性和效率。同时结合专家系统和决策支持系统等技术手段，软件平台为勘探和解释工作提供了智能化的辅助决策支持，帮助勘探人员快速做出决策，并在复杂地质条件下提供更为精准的解释建议，从而进一步提升了勘探的可靠性和成功率。

### 结语

综上所述，瞬变电磁法三维反演算法在金属矿勘探中发挥着重要作用。通过优化算法、模型、数据处理与误差分析以及软件平台，可以显著提升三维反演的精度、效率和可靠性。未来，随着技术的不断进步和算法的持续优化，瞬变电磁法将在金属矿勘探领域展现出更加广阔的应用前景，为矿产资源的立体勘探与评估提供强有力的技术支持。

### 参考文献

- [1]李祖强,席振铎,芦磊,等.井中等值反磁通瞬变电磁法原理及应用[J].地球物理学进展,2024,39(4):1512-1519.
- [2]赵林林.瞬变电磁法在新疆科依铜锌多金属矿区勘查中的应用[J].新疆有色金属,2023,46(5):28-30.
- [3]王云.地面瞬变电磁法勘探在矿井中的应用[J].中国金属通报,2023(13):98-100.