

岩土工程勘察中地球物理探测数据反演与地层精细识别技术研究

苏向美

昆明理工泛亚设计集团有限公司 云南昆明 650000

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17690

[摘要] 本文旨在突破传统岩土工程勘察的限制,以契合现代工程对于地层精细结构的探测要求,研究重点集中于地球物理探测数据反演以及地层精细识别技术,在研究方法方面,运用数据预处理优化、多方法数据融合、地层物性阈值标定以及动态反演迭代修正等手段,研究结果显示,可提高原始数据质量,加强地层信息互补,建立岩性与物性的对应关系,优化地层识别精度。最终达成复杂地质条件下地层层序的划分以及特殊地质体的精准识别。

[关键词] 岩土工程勘察; 地球物理; 探测数据反演; 地层精细识别技术

工程地质勘察是建设工程项目设计和施工的基础和理论依据,其成果的准确性、可靠性、全面性直接影响到工程建设的安全性和经济性^[1]。传统岩土工程勘察使用钻探和试验方法,存在采样离散性大、获取深部地层信息成本高的问题,难以满足现代工程对地层精细结构探测的要求。地球物理探测技术通过采集多个参数,能实现对地下介质的空间连续探测,但地层精细识别要依靠高效的数据反演技术,把物理场信号转化为地层参数模型。当前技术实践中,复杂地质条件下物性差异重叠、深部弱异常信号提取困难等情况,限制了地层层序划分和特殊地质体的准确识别,需要从反演模型构建和识别方法创新方面突破技术瓶颈。

一、地球物理探测技术基础与数据特点

1.1 常用地球物理探测方法概述

岩土工程勘察中,地球物理探测技术通过捕捉地层物性差异实现勘察目标,常用方法围绕不同物性参数展开。地震勘探技术以弹性波在不同地层传播速度差异为核心,激发弹性波并接收反射、折射信号,反推地层情况,适用于深层地层结构探测与不良地质体定位。电法勘探依据地层电性差异工作,包括直流电法、激发极化法等,可识别饱水地层等,在浅层岩土体性质勘察中应用广泛。重力与磁法勘探分别利用地层密度与磁性差异,多用于区域地质构造勘察,辅助判断岩土体分布与基底起伏^[2]。此外,探地雷达技术借助高频电磁波传播特性,分辨率高,适合浅层岩土体分层等探测。

1.2 探测数据特征与采集要求

地球物理探测数据核心特征为多维度与多干扰性。维度上,涵盖时间域(如地震波旅行时)、频率域(如电磁波频

率响应)、空间域(如测点坐标与物性参数空间分布),不同维度数据需协同分析以反映地层信息。干扰性方面,数据易受外部环境(如电磁干扰、地形起伏)、仪器误差(如传感器精度、信号放大偏差)及地层非均质性影响,存在噪声与失真,需后续处理降低干扰。

数据采集有三项核心要求。一是分辨率要求,根据勘察目标深度与精度确定采集参数,如探地雷达选合适天线频率,确保浅层小尺度地层界面清晰识别;二是信噪比要求,采集时通过多次叠加、屏蔽防护等增强有效信号、抑制干扰信号,如地震勘探增加激发次数提升反射波信号强度;三是一致性要求,同一勘察区域保持采集仪器、参数设置与操作流程统一,避免采集条件差异导致数据偏差,确保数据空间可比性与连续性。

二、地球物理探测数据反演方法体系

2.1 反演技术分类与核心原理

地球物理探测数据反演技术按解的确定性可分为确定性反演与随机性反演两类,两类技术的核心原理与应用场景存在显著差异。

确定性反演以“正演模型→数据拟合→模型修正”为核心逻辑,基于预设的地层物理模型,通过迭代计算调整模型参数,使正演模拟数据与实际观测数据的误差最小化,最终得到唯一的反演结果。该类方法假设地层物性参数连续且符合特定数学规律,适用于地层结构相对简单、干扰较少的勘察场景,可快速获取地层宏观分布特征^[3]。

随机性反演则基于概率统计理论,不预设唯一模型解,而是通过构建大量可能的地层模型,利用蒙特卡洛模拟、马

尔可夫链等方法，分析不同模型参数组合与观测数据的匹配概率，最终输出参数的概率分布范围与置信区间。该类方法可量化反演结果的不确定性，适用于地层非均质性强、干扰因素多的复杂场景，能更全面反映地层参数的真实分布特征。

2.2 典型反演算法解析

典型反演算法的选择需结合数据类型与勘察需求，不同算法在计算效率、精度与适用性上各有侧重，具体对比见表 1。

表 1 典型地球物理探测数据反演算法对比表

算法类型	核心思路	优势	适用场景
最小二乘法	构建误差平方和函数，通过求导获取极小值对应的模型参数	计算效率高，收敛速度快	线性问题、地层结构简单场景
模拟退火算法	借鉴物理退火过程，通过随机扰动与概率接受准则寻找全局最优解	可避免局部最优解，适用于非线性问题	复杂地层、多参数反演场景
遗传算法	模拟生物进化过程，通过选择、交叉、变异操作优化模型参数	鲁棒性强，可处理多目标优化问题	非均质地层、多方法数据融合反演
正则化反演	引入正则化项约束模型复杂度，平衡数据拟合度与模型稳定性	抑制数据噪声影响，提升反演结果稳定性	数据质量较差、观测数据不足场景

最小二乘法是确定性反演的基础算法，通过线性化处理将反演问题转化为线性方程组求解，在电法勘探电阻率反演中应用广泛，但易受数据噪声影响，在非线性较强的场景中可能陷入局部最优解。模拟退火算法与遗传算法均属于随机性反演算法，前者通过控制“温度”下降速度实现全局寻优，后者通过群体进化机制提升优化效率，两者均适用于地震勘探、探地雷达等非线性较强的反演问题。正则化反演则通过引入 L1 或 L2 正则化项，限制模型参数的剧烈变化，在数据量不足或噪声较大时，可有效避免反演结果出现无意义的波动，保障模型的物理合理性。

2.3 反演结果的不确定性分析

反演结果的不确定性源于数据、模型与算法三方面，需系统分析为勘察结论提供可靠依据。

数据层面，不确定性来自观测误差与数据不完备性。观测误差如仪器精度偏差、野外环境干扰致信号失真，像电法勘探电极接触电阻变化使电阻率测量值偏差；数据不完备性指受勘察条件限制，观测数据无法覆盖全区域或全部物性参数，导致反演信息缺失^[4]。

模型层面，不确定性源于地层模型简化假设与参数设定。实际地层具非均质性、各向异性，反演常采用层状均匀或连续介质模型简化，模型与实际差异致反演偏差；同时，模型初始参数设定依赖经验，不合理初始值影响反演收敛与精度。

算法层面，不确定性与算法特性相关。确定性算法易受局部最优解影响，不同初始条件结果不同；随机性算法输出概率分布，结果可靠性依赖样本数量与迭代次数，样本不足

或迭代不充分会导致概率偏差。

针对上述不确定性，可采取三项措施降低影响：一是多方法数据交叉验证，对比不同探测方法反演结果，识别异常数据与模型偏差；二是开展敏感性分析，调整模型参数或数据权重，评估各因素对反演结果的影响，明确关键控制因素；三是增加数据采集密度，在重点或复杂区域加密测点，提升数据覆盖度与信息量，减少数据不完备性带来的不确定性。

三、岩土工程勘察中地球物理地层精细识别技术实现路径

3.1 数据预处理优化：提升原始数据质量

数据预处理是地层精细识别的基础，通过多步骤处理消除干扰、统一格式，为后续反演与识别提供高质量数据支撑。首先进行数据格式标准化处理，将不同探测方法（如地震勘探、电法勘探）的原始数据转换为统一格式，建立包含测点坐标、观测时间、物性参数的数据库，确保数据可跨方法调用与关联分析。其次开展噪声压制，针对不同数据类型选择适配的去噪方法，例如地震数据采用带通滤波消除低频干扰与高频噪声，探地雷达数据采用背景去除与均值滤波抑制杂波信号；同时，通过异常值检测算法（如 3σ 准则、箱线图法）识别并修正数据中的粗大误差，避免异常数据影响反演结果。最后进行数据校正，包括地形校正（消除地形起伏对观测数据的影响）、仪器校正（根据仪器标定曲线修正测量值）与几何校正（调整测点位置偏差，确保数据空间定位准确），通过多环节校正实现原始数据的精准化。

3.2 多方法数据融合：强化地层信息互补

多方法数据融合通过整合不同地球物理探测方法的优

势, 解决单一方法信息局限问题, 实现地层精细识别。融合过程遵循“物性差异互补→数据尺度统一→协同分析”的逻辑, 具体包括三个层面。

数据层融合针对原始观测数据, 通过数据配准技术将不同方法的观测数据统一到同一空间坐标系, 例如将地震勘探的时间剖面与电法勘探的电阻率剖面进行空间对齐, 确保相同位置的地层信息可直接对比; 同时, 通过数据插值、重采样等方法调整数据分辨率, 使不同方法的数据尺度保持一致, 为后续融合奠定基础。

特征层融合聚焦数据的特征提取与关联, 通过边缘检测、纹理分析等算法, 从不同方法数据中提取地层界面、物性异常区等关键特征, 例如从地震数据中提取反射波组特征, 从电法数据中提取电阻率突变特征; 随后建立特征关联模型, 通过特征匹配算法识别不同方法中对应同一地层界面或地质体的特征信息, 实现特征层面的互补验证^[5]。

决策层融合基于反演结果进行综合判断, 结合各方法反演得到的地层参数, 建立多参数协同识别模型; 通过权重分配算法(如层次分析法、模糊综合评价法), 根据各方法在特定地层中的识别精度赋予不同权重, 最终输出综合地层划分结果, 例如通过地震波速度与电阻率的协同分析, 精准区分砂层、黏土层与风化岩层的界面。

3.3 地层物性阈值标定: 建立岩性-物性对应关系

地层物性阈值标定通过建立岩性与物性参数的定量对应关系, 实现从物性反演结果到岩性识别的转化, 是精细识别的关键环节。首先开展野外地质编录与取样, 在勘察区域内选择代表性钻孔或探坑, 通过地质编录明确地层岩性、厚度、结构特征, 同时采集不同岩性的岩土样本, 记录样本采集深度与地层位置; 随后在室内进行物性测试, 利用电阻率仪、声波仪等设备测量样本的电阻率、声波速度、密度等物性参数, 建立“岩性-物性参数”原始数据库。

基于数据库进行阈值分析, 采用统计分析方法处理同一岩性的物性参数数据, 去除异常值后计算参数的均值、标准差与置信区间, 确定该岩性物性参数的合理范围; 同时, 对比不同岩性的物性参数分布特征, 寻找岩性间的物性差异临界点, 例如砂层与黏土层的电阻率阈值、风化岩与新鲜岩的声波速度阈值。最后建立地层物性阈值表, 明确各岩性对应的物性参数范围与判别标准, 在实际识别过程中, 通过将反演得到的地层物性参数与阈值表对比, 实现岩性的精准判定。

3.4 动态反演迭代修正: 优化地层识别精度

动态反演迭代修正通过“反演→识别→验证→修正”的循环流程, 持续优化反演模型与识别结果, 适应复杂地层条件下的精细识别需求。首先基于预处理后的初始数据进行首轮反演, 利用预设的地层模型与反演算法得到初始地层物性分布与岩性识别结果; 随后结合钻孔地质资料、野外露头观察等实际地质信息, 对初始识别结果进行验证, 重点检查地层界面位置、岩性划分与实际地质情况的吻合程度, 识别差异区域(如反演结果显示的地层界面与钻孔揭露界面偏差较大的区域)。

针对差异区域, 分析偏差原因并调整反演策略: 若偏差源于数据质量, 需重新进行该区域的数据采集与预处理, 补充观测数据; 若偏差源于模型假设, 需修正地层模型或调整模型初始参数; 若偏差源于算法选择, 需更换更适配的反演算法。调整后开展新一轮反演, 将新的反演结果与实际地质信息再次验证, 重复迭代过程, 直至反演结果与实际地质情况的吻合度满足勘察精度要求, 最终输出高精度的地层精细识别结果。

四、结语

在岩土工程勘察方面, 地球物理探测数据反演和地层精细识别技术很重要。通过多方面研究和实践, 建立包含反演方法体系、数据融合办法及动态修正方式的技术框架。该技术框架能整合多种来源数据, 计算反演不确定性, 实现从物理场信号到地层参数模型的准确转化。它突破了传统方法在复杂地质条件下的应用困难, 为现代工程建设提供可靠地质依据, 推动岩土工程勘察技术向智能化和精细化发展。

[参考文献]

- [1] 马云超, 吕丰强, 甘露, 等. 地球物理探测在工程地质勘察中的运用浅析[J]. 四川地质学报, 2025, 45 (03): 542-548.
- [2] 王佳. 复杂地质条件下岩土工程勘察技术的应用研究[J]. 城市建设, 2025, (15): 64-66.
- [3] 靳雄兵. 岩土工程勘察技术在基础设施建设中的应用研究[J]. 产品可靠性报告, 2025, (07): 247-248.
- [4] 李世权. 复杂地质环境背景下岩土工程勘察技术探究[J]. 工程建设与设计, 2025, (12): 31-33.
- [5] 查道静. 新型勘察技术在复杂地质岩土工程勘察中的应用[J]. 建材发展导向, 2025, 23 (08): 49-51.

作者简介: 苏向美(1991-06), 女, 白族, 云南省大理市人, 本科, 工程师, 研究方向: 岩土工程勘察。