

# Research on Collaborative Interpretation Technology of High Density Resistivity Method and Geophysical Radar in Engineering Investigation of Karst Development Areas

Ziheng Guo

Mineral Resources Exploration Center, Henan Provincial Geological Bureau, Zhengzhou, Henan, 450000, China

## Abstract

Karst development zones exhibit complex geological conditions with widespread underground cavities, dissolution fractures, and heterogeneous fillings, posing potential threats to engineering construction safety. Traditional single geophysical methods often suffer from insufficient resolution or interpretation ambiguities under complex medium conditions, making it difficult to comprehensively reflect subsurface structural characteristics. High-density resistivity methods demonstrate advantages such as large detection depths and sensitivity to water-bearing structures, while geophysical radar excels in achieving high-resolution imaging at shallow depths. Collaborative application of these two methods, combined with data fusion and joint interpretation, can significantly enhance karst identification accuracy and spatial positioning capabilities. Studies indicate that collaborative interpretation techniques effectively reduce misjudgment rates and improve the reliability of karst anomaly detection, holding significant implications for engineering surveys in complex geological environments.

## Keywords

Karst development area; high-density resistivity method; geophysical radar; collaborative interpretation; engineering survey; data fusion

## 岩溶发育区工程勘察中高密度电阻率法与地质雷达的协同解释技术研究

郭自恒

河南省地质局矿产资源勘察中心, 中国·河南 郑州 450000

## 摘要

岩溶发育区地质条件复杂, 地下空洞、溶蚀裂隙及不均匀充填体广泛分布, 对工程建设安全构成潜在威胁。传统单一物探方法在复杂介质条件下往往存在分辨率不足或解释歧义问题, 难以全面反映地下结构特征。高密度电阻率法具有探测深度大、对含水结构敏感等优势, 而地质雷达在浅层高分辨率成像方面表现突出。将两种方法进行协同应用, 并通过数据融合与联合解释, 可有效提升岩溶识别精度与空间定位能力。研究表明, 协同解释技术能够显著降低误判率, 提高岩溶异常识别的可靠性, 对复杂地质环境下的工程勘察具有重要意义。

## 关键词

岩溶发育区; 高密度电阻率法; 地质雷达; 协同解释; 工程勘察; 数据融合

## 1 引言

岩溶地貌在我国南方地区分布广泛, 地下空间结构呈现出强烈的非均质性与不连续性特征。溶洞、暗河及裂隙网络对工程基础稳定性产生深远影响, 勘察阶段若识别不足, 易导致后期施工风险增加。随着工程规模不断扩大, 传统钻探手段在空间覆盖与成本控制方面存在局限, 物探方法逐渐成为重要补充。高密度电阻率法与地质雷达在岩溶探测中均

具有良好应用基础, 但单一方法受介质条件影响明显, 解释结果存在不确定性。通过多方法联合与协同解释, 可弥补各自不足, 形成更为可靠的地下结构认知体系。在此背景下, 探讨两种方法的协同解释技术, 对于提升工程勘察质量具有现实价值。

## 2 岩溶发育区工程地质特征与勘察需求

### 2.1 岩溶发育区地质结构特征

岩溶发育区以碳酸盐岩为主体, 在长期水化学溶蚀作用下逐步形成多层次、多尺度的地下空间结构体系。溶蚀孔隙、裂隙网络及溶洞相互交织, 构成具有显著不规则性的空

【作者简介】郭自恒(1984-), 男, 中国河南新乡人, 工程师, 从事工程管理研究。

间形态,其分布受岩性、构造及水动力条件共同控制。局部区域由于溶蚀加剧或结构失稳,易产生塌陷与充填现象,使地下结构呈现出动态演化特征。地下水在岩溶发育过程中具有关键作用,其流动路径与储存条件直接影响岩体的物理性质,使电阻率与介电特性在空间上表现出明显差异。岩溶结构的非均质性使同一剖面中可能同时出现完整岩体、破碎带与空洞结构,多种介质叠加导致地球物理响应复杂多变。这种复杂性对工程基础稳定性评价产生直接影响,也显著提高了勘察工作的技术难度 [1]。

## 2.2 工程勘察面临的技术挑战

在岩溶发育区开展工程勘察,需要解决隐伏空洞识别、填充状态判别及空间分布刻画等关键问题。传统钻探方法虽能提供高精度点位信息,但在空间覆盖范围与效率方面存在明显局限,难以满足大尺度连续探测需求,同时成本投入较高。物探方法在提高覆盖效率方面具有优势,但单一技术受其探测原理限制,难以兼顾深度与分辨率之间的平衡。在复杂地质条件下,探测结果容易受到噪声干扰与环境因素影响,增加解释难度。高密度电阻率法在识别深部异常方面具有较强能力,但对小尺度结构的分辨存在局限;地质雷达能够提供高分辨率浅层信息,但探测深度受介质条件制约。如何在多变环境中实现多尺度信息的有效获取与综合分析,成为提升勘察精度与可靠性的关键技术问题。

## 2.3 多方法协同应用的必要性

面对岩溶结构的复杂性与单一方法的局限,多方法协同应用成为提高勘察效果的重要路径。不同探测技术在物理响应与空间尺度上各具特点,通过整合多源信息,可以从多个角度揭示地下结构特征。高密度电阻率法反映地下介质的电性分布,与含水性及孔隙发育程度密切相关,有助于识别深部异常与区域性结构;地质雷达基于电磁波反射特征,对界面变化与局部异常具有较高敏感性,能够细致刻画浅层结构。通过协同应用,两种方法在深浅层信息与宏观、微观尺度之间形成互补关系,使地下结构呈现更加完整。联合解释能够有效降低单一数据带来的不确定性,提高异常识别的准确性与可靠性,为工程设计与风险评估提供更为坚实的技术支撑。

# 3 高密度电阻率法与地质雷达技术原理及特征

## 3.1 高密度电阻率法的工作机理与优势

高密度电阻率法以多电极布设为基础,通过向地下介质施加电流并测量其响应电位差,从而反演地下电阻率分布特征。不同地质体在含水性、孔隙结构及矿物组成方面存在差异,这些差异直接影响电流传播路径,使其在电性上呈现出可识别的变化特征。岩溶空洞在未充填或充气状态下通常表现为高阻异常,而当空洞被水体或泥质物质充填时,则转化为低阻或中低阻响应。该方法在探测深度与覆盖范围方面具有明显优势,能够从整体上反映地下结构的分布特

征,适用于深部岩溶及地下水富集区的识别。在工程应用中,通过二维与三维反演处理,可以获得连续且具有空间连贯性的电性剖面,为区域地质分析与工程决策提供可靠依据 [2]。

## 3.2 地质雷达的探测原理与应用特点

地质雷达利用高频电磁波在地下传播过程中遇到介电性质差异界面时产生反射的原理,通过接收与分析反射信号,获取地下结构信息。岩溶空洞、裂隙及其填充物在介电常数上的差异,使其在雷达剖面中呈现出明显的反射特征,从而实现对地下异常体的识别。该方法在浅层探测中具有较高分辨率,能够细致刻画结构边界与局部变化,对小尺度异常具有较强敏感性。在道路、隧道及基础工程勘察中,地质雷达常用于识别浅层不良地质体及结构缺陷,其成像结果直观,便于分析与解释。然而,由于电磁波在高含水或高导电环境中衰减较快,其有效探测深度受到一定限制,需要与其他探测方法结合使用,以弥补单一技术的不足。

## 3.3 两种方法数据特征的差异性分析

高密度电阻率法与地质雷达在数据获取与表达形式上存在显著差异,这种差异构成协同解释的重要基础。电阻率法侧重于反映地下介质的整体电性分布,其数据呈现连续变化趋势,适合用于分析宏观结构与深部特征;地质雷达则以反射信号为主,突出界面变化与局部异常,具有较高的空间分辨率,能够揭示细节信息。两者在探测深度、分辨能力及响应机制方面各具特点,使其在同一地质体识别中能够形成互补关系。通过对比分析两类数据,可以从整体与局部两个层面理解地下结构,减少单一方法带来的不确定性,从而提高解释结果的可靠性与准确性,为复杂地质条件下的工程勘察提供更加全面的技术支持 [3]。

# 4 协同解释技术方法与实现路径

## 4.1 多源数据融合与统一处理

协同解释的有效实施依赖于多源数据的标准化处理与统一表达,这是实现信息整合与综合分析的前提条件。在具体操作中,高密度电阻率数据需经过噪声抑制、反演计算与平滑处理,以提高剖面分辨率与稳定性;地质雷达数据则通过时窗调整、滤波及增益控制,使反射特征更加清晰可辨。完成基础处理后,通过建立统一坐标系统,将不同来源数据进行空间配准,使电阻率剖面与雷达剖面在同一参照框架下实现叠加与对比。在融合阶段,可采用加权叠加与特征提取方法,将电阻率异常与雷达反射界面进行关联分析,构建具有综合属性的解释模型。该过程不仅提高了数据利用效率,也为后续定量分析与空间推断提供了可靠基础,使多源信息在统一体系中形成协同作用。

## 4.2 异常体识别与协同判读方法

在复杂岩溶环境中,异常体识别需要依托多种探测手段的响应特征进行综合判读,以提高解释结果的准确性与稳定性。电阻率方法与地质雷达在探测机理上具有差异,其响

应特征的组合能够反映地下介质的多维属性。当高阻异常与强反射界面同时出现时,通常指示未充填或空气填充溶洞的存在;若表现为低阻异常并伴随弱反射特征,则多与泥质或水体充填区相关。对于仅在单一方法中表现突出的异常,应结合区域地质条件与工程背景进行综合分析,避免因信息片面而导致误判。在实践过程中,通过建立典型岩溶体响应模式库,可以对不同类型异常进行归类与对比,提高解释效率。协同判读强调多维信息的整合,使解释过程由单一指标判断转向综合特征识别,从而降低不确定性并增强结果可靠性[4]。

### 4.3 三维建模与解释优化技术

随着计算能力与可视化技术的发展,三维建模已成为岩溶勘察中提升解释深度的重要手段。通过将高密度电阻率反演结果与地质雷达剖面数据进行整合,可以在空间尺度上重建地下结构,形成直观的三维模型。该模型能够展示岩溶体的空间分布形态与发育特征,使地下复杂结构以可视化方式呈现,有助于提升对地质条件的整体认知。在建模过程中,引入钻探资料进行校正与约束,可有效提高模型的精度与可信度,使解释结果更加贴近实际情况。三维建模不仅拓展了数据的表达形式,也增强了分析的深度,使多源信息在空间层面实现统一表达。通过不断优化建模与解释方法,可以进一步提升协同解释技术在工程勘察中的应用效果,为设计与施工提供更加科学的依据。

## 5 工程应用与效果分析

### 5.1 典型工程案例

在岩溶发育区的道路工程勘察实践中,复杂地下结构对探测手段提出较高要求。通过布设高密度电阻率测线与地质雷达测线,对拟建线路进行综合探测,可以在不同尺度上获取地下介质信息。电阻率剖面中出现的低阻异常,反映出地下存在含水或空隙发育区域,而地质雷达剖面中连续反射界面的出现,则进一步揭示结构边界的存在。将两类数据进行对比分析,可在空间位置与物性特征上形成相互印证,从而提高解释的准确性。后续钻探结果与综合解释结论相吻合,说明协同技术在复杂岩溶环境中的适用性较强。该案例表明,通过多源数据的整合分析,可以有效识别隐伏溶洞等不良地质体,为工程设计提供可靠依据,也体现出协同解释在提升勘察质量方面的实际价值。

### 5.2 协同技术对勘察精度的提升

在复杂地质条件下,单一物探方法往往受限于自身探测原理,对异常体的识别存在一定局限。协同解释通过整合多种探测手段的数据,使不同方法在空间信息与物性响应上

形成互补关系,从而显著提高异常识别的准确性。多源数据的交叉验证,使异常特征不再依赖单一指标判定,有助于降低误判与漏判的发生概率。在噪声干扰较强或地质条件复杂的区域,多方法联合应用能够增强整体抗干扰能力,使有效信息更加突出。协同解释还能够在二维或三维空间中重建地下结构形态,为工程设计提供更加完整与直观的依据。通过这种综合分析方式,勘察成果在精度与可靠性方面均得到提升,为复杂工程环境下的决策提供有力支持[5]。

### 5.3 存在问题与优化方向

协同解释技术在提升勘察质量方面具有明显优势,但在实际应用过程中仍面临若干制约因素。多源数据的处理与融合过程较为复杂,不同设备获取的数据在格式与精度上存在差异,增加了数据整合的难度。解释标准尚未完全统一,使结果在不同项目之间缺乏一致性,对技术推广形成一定影响。解释过程对专业经验依赖较强,在面对复杂异常时,主观判断仍占据重要位置,影响结果的稳定性。未来发展可从技术与方法两方面进行优化,通过引入智能算法与数据分析技术,实现对异常特征的自动识别与分类,提高解释效率与客观性。同时,加强地质学、物探技术与信息技术的融合,有助于构建更加系统化的协同解释框架,从而推动该技术在工程勘察中的深入应用。

## 6 结语

岩溶发育区工程勘察面临复杂多变的地质条件,对探测技术提出更高要求。高密度电阻率法与地质雷达在探测机理与数据特征上具有明显互补性,通过协同解释能够显著提升地下结构识别能力。多源数据融合与三维建模技术的发展,为岩溶空间结构分析提供了新的手段。在工程实践中,合理选择探测方法并优化解释流程,有助于提高勘察成果的可靠性与精度。随着信息技术与智能算法的不断进步,协同解释技术将在复杂地质环境中发挥更大作用,为工程建设提供更加坚实的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 黄强.高密度电阻率法在岩溶地基勘察中的应用[J].江西建材,2022,(03):82-83+86.
- [2] 马强.高密度电阻率法在输水隧洞工程岩溶勘察中的应用[J].西部资源,2021,(06):119-120+123.
- [3] 陈硕.高密度电阻率法测试在工程勘察中的应用[J].中国勘察设计,2021,(03):103-104.
- [4] 戴国强,王俊,刘成,等.高密度电阻率法在机场岩溶勘察中的应用[J].工程技术研究,2019,4(22):52-53.
- [5] 张启,宋克英.高密度电阻率法在某岩溶场地勘察中的应用[J].勘察科学技术,2018,(03):62-64.