航运界常见的高压交流制式，又要兼容低压需求，同时还需要处理光伏发电的直流输入以及风电的变频交流输入，如此多制式的复杂供电环境催生了新一代宽频段智能岸电电源系统的创新发展。在硬件架构方面，最新研发的第四代变频变压装置采用三级功率转换拓扑结构，前级采用三电平 ANPC 整流器，实现风光直流输入与交流电网的柔性接入；中间级配置基于 SiC 器件的双向 DC/DC 变换器，实现 200~1500V 宽范围直流电压调节；后级采用模块化多电平矩阵变换器（M3C），可在输出端生成 30~70Hz 连续可调的交流电压，电压等级覆盖 380V~11kV[4]。在控制策略上，其智能装置集成了多模式自适应算法，当检测到船舶接入时会自动识别其电压 / 频率需求并切换至相应模式，当风光发电充足时会优先采用“直流微网”模式，将光伏直流电直接经 DC/DC 升压后供给船舶，而在电网供电模式下，则启动有源滤波功能，消除岸电负荷产生的谐波污染。

3.2.2 虚拟同步机技术

在港口岸电与分布式风光协同供电系统中，VSG 技术通过数字化的方式模拟同步发电机的关键动态特性，有效解决了高比例可再生能源接入导致的系统惯性下降以及调频能力不足等核心问题，现代 VSG 技术不仅模拟了同步发电机的转子运动方程，还扩展了对励磁调节系统等关键功能的数字化重构。通过实时解算摇摆方程 $Jd^2\delta/dt^2+Dd\delta/dt=\Delta P$（其中 J 为虚拟惯量，δ 为功角，ΔP 为功率差额），VSG 控制器能够动态调整逆变器输出特性，使风光发电单元具备与传统同步机组相似的频率响应能力。在控制架构方面，最新研发的第三代 VSG 系统采用分层控制策略，底层硬件控制环基于 FPGA 实现微秒级快速响应，确保电压 / 电流的精确跟踪，中层虚拟同步算法运行在实时操作系统上完成功频调节及无功电压控制等核心功能，上层系统优化模块则通过模型预测控制实现多 VSG 单元的协调运行。

3.3 政策引导与商业模式创新

3.3.1 峰谷电价联动

根据电网公司制定的分时电价政策，在电价较低的谷时段储存电能，在电价较高的峰时段释放使用，从而降低整体用电成本。目前我国大部分地区实行的是三时段电价制度：高峰时段（一般为 8:00—11:00、18:00—23:00）、平段（6:00—8:00、11:00—18:00）以及低谷时段（23:00—次日 6:00），不同时段的电价差异可达 2-3 倍。而实施峰谷电价联动需要具备几个基本条件，首先是储能设施的建设，港口通常采用锂电池储能系统，其容量配置要根据港口用电负荷来确定，一般建议储能时长在 4~6 小时，随后是智能控制系统的部署，该系统需要实时监测电价信号及负荷需求，并自动制定最优的充放电策略，还有电网接入条件的保障，包括必要的电力计量装置与通信接口 [5]。

3.3.2 绿电交易机制

通过市场化的碳交易以及绿电认证体系，将港口使用可再生能源产生的环境效益转化为实际经济收益，从而反哺协同供电系统的运营。在我国绿电交易机制主要包括碳排放权交易与绿电证书交易，港口可以通过使用岸电与可再生能源替代传统燃油发电，获得相应的碳减排量，而减排量则可以在全国碳市场进行交易。以年吞吐量 500 万标箱的大型集装箱港口为例，全面使用岸电后每年可减少碳排放约 5 万吨，按照当前 60 元 / 吨的碳价计算，可获得 300 万元的碳收益。同时港口还可以通过采购或自发自用的可再生能源电力，获得国家认可的可再生能源证书，凭借证书就能在绿电交易平台上进行售卖。

4 结语

综上所述，港口岸电系统与分布式风光能源的协同供电，需从技术经济与社会政策等多维度协同推进，今后对其研究将会朝着高比例可再生能源渗透下的电网韧性提升，以及港口—船舶—城市能源网络的全局优化方向进展，以此来助力国家“双碳”的目标实现，更为全球港口绿色转型提供可复制的方案。

参考文献

[1] 查道正,姚晨,李夫仲,等.港口岸电现状及运维技术讨论[J].中国物流与采购,2025(02):59-60.

[2] 顾伟博.基于通信网络交换的分布式风电光伏智能运维系统设计[J].电子技术,2024,53(09):304-305.

[3] 郭少臣.大数据下分布式风电光伏储能容量配置方法[J].光源与照明,2024(05):111-113.

[4] 段树勋.面向分布式风电光伏的储能容量优化配置方法研究[J].自动化应用,2023,64(19):68-70.

[5] 张怡,常鹏飞.新能源电力系统分布式模型预测负荷频率控制[J].电气传动,2022,52(20):70-75.

 DOI: https://doi.org/10.12349/foer.v2i2.6298

Improvement of hierarchical interpretation method and engineering applicability analysis of high-density electric method in foundation investigation in karst area

Hui Zhang Huihui Mi Yuanfeng Zhang

Shaanxi Geominerals Exploration Team Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

In this study, aiming at the problem of layered interpretation and engineering applicability of high-density electric method in foundation investigation in karst area, the limitations of traditional methods are deeply analyzed, and improvement strategies are proposed and verified. Through multi-parameter fusion, the introduction of artificial intelligence algorithms, and the optimization of electrode arrangement and data acquisition schemes, the hierarchical interpretation method of high-density electrical method was improved. The numerical model was constructed and field experiments were carried out, and the results showed that the improved method was significantly better than the traditional method in the accuracy of karst cave and dissolution fracture identification and stratigraphic division, and the interpretation accuracy was increased by more than 30%. The engineering applicability analysis shows that this method has its own advantages and disadvantages under different karst geological conditions, and can complement each other when combined with geological radar, shallow seismic and other methods, and plays an important role in engineering cases such as highways, bridges, and high-rise buildings. The study points out that in the future, it is necessary to optimize the numerical model, expand the experimental scope, and explore the application of new technologies to improve the survey efficiency.

Keywords

high-density electrical method; foundation investigation of karst area; hierarchical interpretation; Artificial intelligence algorithms

高密度电法在岩溶区地基勘察中的分层解译方法改进及工程适用性分析

张辉 米慧慧 张援峰

陕西地矿物化探队有限公司，中国·陕西 西安 710000

摘 要

本研究针对高密度电法在岩溶区地基勘察中分层解译与工程适用性问题，深入剖析传统方法局限性，提出改进策略并开展验证。通过多参数融合、引入人工智能算法及优化电极排列与数据采集方案，改进高密度电法分层解译方法；构建数值模型并开展现场实验，结果表明改进方法在岩溶洞穴、溶蚀裂隙识别及地层划分精度上显著优于传统方法，解译准确率提升超 30%。工程适用性分析显示，该方法在不同岩溶地质条件下各有优劣，与地质雷达、浅层地震等方法结合可优势互补，在高速公路、桥梁、高层建筑等工程案例中均发挥重要作用。研究指出未来需优化数值模型、并探索新技术应用以提升勘察效能。

关键词

高密度电法；岩溶区地基勘察；分层解译；人工智能算法

1 岩溶区地基勘察中高密度电法分层解译方法现状

在岩溶区地基勘察中，传统高密度电法分层解译主要依赖电阻率剖面特征分析与异常识别技术，通过对比第四系松散层（电阻率几十至几百欧姆·米）与基岩（上千欧姆·米）的电阻率差异划分地层界面，依据岩溶洞穴的高阻亮色异常、溶蚀裂隙的低阻暗色异常判断其位置与规模，并利用数据滤波、对比分析等手段甄别真实异常，曾在某岩溶区公路项目中精准定位洞穴保障工程安全。然而，随着工程精度要求提升和岩溶地质条件日趋复杂，传统方法弊端尽显：复杂地层岩性致使电阻率差异模糊，地层划分困难进而误判地基稳定性；岩溶构造形态多变，仅靠简单电阻率异常易漏判小洞穴、误判裂隙，埋下塌陷隐患；地下水活动使介质电阻率旱雨季波动大，传统固定特征解译难以适应；受电极间距和装置分辨率限制，难以识别 1 米以下小尺度岩溶体，且人工

【作者简介】张辉（1987–），男，中国陕西商洛人，工程师，从事物探方法在工程勘探中的应用研究。

分析数据效率低、准确性差，无法满足勘察时效需求 [1]。如广西某岩溶区工程中，传统方法将 5 米厚强风化基岩误划至第四系，遗漏多个 1 - 3 米小洞穴，误判 10 米长、0.5 米宽的溶蚀裂隙，严重威胁地基安全，这充分表明在复杂岩溶地质条件下，改进高密度电法分层解译方法对实现工程勘察高精度需求刻不容缓。

2 高密度电法分层解译方法改进方向与策略

2.1 基于多参数融合的解译方法改进

在岩溶区地基勘察中，基于多参数融合的高密度电法分层解译方法，能显著提升解译准确性。传统单参数解译依赖电阻率，难以应对复杂地质，而多参数融合可实现信息互补。电阻率可初步识别岩溶构造位置与范围，但存在局限。当岩溶洞穴被黏土填充，其电阻率与周围地层相近，易造成误判。极化率能反映介质电化学性质，富含金属矿物的岩溶体极化率与围岩差异大，可弥补电阻率解译不足。将电阻率与极化率融合，通过多参数反演算法联合建模。先依电阻率定位地质体，再借极化率分析其性质。此外，自然电位、介电常数等参数也可引入。自然电位与地下水活动相关，能辅助判断岩溶连通性；介电常数可用于识别地层含水状态。某岩溶区工程实践印证了多参数融合的优势。通过同步测量电阻率、极化率和自然电位，采用多参数反演处理，相较于传统方法，该方案精准识别出更多小尺度岩溶洞穴与溶蚀裂隙，明确地质构造的位置、规模和性质，为工程设计提供可靠依据，有效降低施工风险，展现出显著的应用价值。

2.2 引入人工智能算法提升解译精度

引入人工智能算法是改进高密度电法分层解译的核心策略。神经网络与支持向量机（SVM）凭借独特优势，为岩溶区复杂地质解译提供新方案。神经网络具备强大的非线性映射与自学习能力。以多层感知器为例，其输入层接收视电阻率等数据，隐藏层提取地质特征，输出层给出解译结果。训练时需用涵盖多样岩溶地质情况的样本数据，并通过数据增强、正则化防止过拟合，提升泛化能力。SVM 基于结构风险最小化原则，通过将电阻率数据映射至高维空间，寻找最优分类超平面识别地质体。核函数选择是关键，径向基核函数因适应非线性数据，在岩溶地质解译中应用广泛。合理调参可提升其对岩溶洞穴、溶蚀裂隙等的识别精度。某岩溶区工程勘察实践证实，传统解译方法对岩溶构造误判率约 30%，引入神经网络与 SVM 后，误判率降至 10% 以内。神经网络能捕捉小尺度岩溶洞穴，SVM 擅长区分复杂溶蚀裂隙形态。二者协同应用，显著提升高密度电法解译精度，为工程建设提供可靠地质支撑，展现出人工智能算法在该领域的巨大应用潜力

2.3 优化电极排列与数据采集方案

电极排列与数据采集方案直接影响高密度电法在岩溶区地基勘察的分层解译效果，合理优化可提升勘察效能。温纳装置电极等间距排列，对浅层岩溶体分辨率高，适用于 5 米内浅层勘察，但探测深度有限。偶极 - 偶极装置通过调整偶极间距增强深部探测能力，可识别 30 米以下岩溶构造，不过易受旁侧地质体干扰。施伦贝格装置在深浅层探测间取得平衡，利于划分地层界面与识别大型岩溶构造，却难以捕捉小尺度岩溶体。实际应用中，应按需选择电极排列方式：浅层岩溶区优先用温纳装置；探测深部构造选偶极 - 偶极装置；综合勘察则采用施伦贝格装置。还可采用组合排列，如某项目结合温纳与偶极 - 偶极装置，分别探测浅部与深部岩溶，综合分析后显著提升解译精度。数据采集环节，电极间距需兼顾分辨率与工作量；供电电流和测量时间要保障数据稳定。在噪声大的区域，可增加测量次数并运用滤波技术。某复杂岩溶区通过增加测量频次、启用低通滤波，有效降噪，优化数据质量，使分层解译结果更精准，充分体现参数优化对提升勘察准确性的重要意义。

3 改进方法的数值模拟与实验验证

为验证改进后的高密度电法分层解译方法在岩溶区地基勘察中的有效性，本研究通过数值模拟与现场实验展开系统性验证。

在数值模拟实验设计中，构建涵盖多元地质特征的岩溶区模型，设置直径 1 - 10 米、形态各异的岩溶洞穴，模拟水或黏土填充的溶蚀裂隙，以及第四系松散层与基岩组合、石灰岩与白云岩互层等复杂地层。依据实际地质数据设定各介质电阻率，考虑 5 - 15 米深度的地下水位影响。采用 Comsol Multiphysics 软件，基于有限元法模拟电场与电流，运用温纳 - 偶极 - 偶极组合电极排列，电极间距设为 1 - 5 米，多次采集数据并滤波降噪。同时，以电极间距 3 米的单温纳装置、传统电阻率剖面分析方法作为对照，对比改进前后对岩溶地质体的识别精度与解译效果。

模拟结果显示，改进方法优势显著。在岩溶洞穴识别上，传统方法因依赖单一电阻率参数，在模拟连通且黏土填充的洞穴场景中，漏判两个 2 - 3 米直径小洞穴；而改进方法融合电阻率、极化率等多参数，结合神经网络算法，不仅精准识别所有洞穴，还能清晰刻画边界。对于溶蚀裂隙，传统方法面对水与黏土混合填充、走向复杂的裂隙时难以判断；改进方法通过多参数融合与人工智能算法，利用极化率判断填充物质，经神经网络综合分析，准确识别裂隙走向与范围。划分地层界面时，传统方法在电阻率相近地层中易误判；改进方法引入支持向量机结合多参数分析，实现精准分层 [2]。

现场实验选址贵州强岩溶发育区，采用组合电极排列方案，浅部用 2 米间距温纳装置提升浅层分辨率，深部以偶极间距 10 米、电极间距 2 米的偶极 - 偶极装置增强深部探测能力。经 5 次测量取均值并数字滤波降噪后，与电极间距 5 米的单温纳传统方法对比。结果表明，改进方法在岩溶洞穴与溶蚀裂隙识别上表现优异，如精准定位直径 3 米、埋深