

工程物探技术在岩土工程中的应用解析

虎雄岗

云南省设计院集团勘察院有限公司 云南 昆明 650228

摘要：工程物探技术是一种通过探测地下介质物理性质差异来精确解析地质条件与工程质量的技术手段。该技术综合运用电法、地震法、地质雷达等多种方法，能够有效获取地下地质结构、隐患分布与工程质量的关键数据。在工程实践中，其应用范围广泛，覆盖岩土分层、断层定位、溶洞识别、桩基检测、隧道衬砌评估及地下水位监测等多个方面，为工程全周期提供可靠数据支撑。该技术具有高效、无损、经济等显著优势。通过多方法协同探测与三维建模技术融合，工程物探能够大幅提升岩土工程在勘察、施工与监测环节的科学性与可靠性，有助于推动行业向智能化、绿色化方向转型升级。

关键词：工程物探技术；岩土工程；应用

引言：岩土工程作为基础设施的关键领域，其工程质量与安全受地下地质条件影响显著。传统勘察方法虽能获得一定地质信息，但普遍存在作业效率低、经济成本高、且难以全面反映复杂地质体空间分布特征，尤其针对隐伏断层、溶洞、软弱夹层等不良地质体时，其适应性与可靠性相对不足。工程物探技术作为现代地质勘察体系的重要组成部分，凭借其快速、无损、数据丰富等显著优势，已成为岩土工程勘察、质量检测与安全监测中不可或缺的技术手段。该技术基于地下介质在导电性、波速、密度与磁性等物理性质上的差异，通过集成应用电法、地震、地质雷达与电磁法等系列方法，能够实现地下地质结构、隐患分布及工程质量的精准、立体化探测，为工程的设计优化、施工安全与运营维护提供了重要的依据。本文将系统解析工程物探技术在岩土工程各环节的应用，探讨其面临的挑战与未来发展趋势。

1 工程物探技术概述

1.1 工程物探技术的定义与分类

工程物探技术是借助地下介质物理性质（如电阻率、弹性波速度、磁性等）差异，通过专业仪器采集物理场信号，结合数据处理与解析，推断地下地质结构、隐患分布及工程质量状况的地球物理勘探技术，广泛服务于岩土工程勘察、检测与监测。基于物理原理的分类主要包括：（1）电法，利用介质电阻率差异探测地质体；（2）地震法，通过弹性波传播特征分析地下结构；（3）电磁法，依托电磁感应原理识别异常地质体；（4）重力法，基于重力场变化推断密度差异地质体；（5）声波法，利用声波传播速度与衰减特性评估工程质量。

1.2 常见工程物探方法原理

（1）电法勘探：通过向地下供入稳定电流，测量地

表电位差，计算介质电阻率。不同地质体（如砂层与黏土层）电阻率差异显著，据此划分地层、探测溶洞；高密度电法通过多电极阵列实现高密度数据采集，提升探测分辨率。（2）地震勘探：人工激发弹性波（如锤击、爆破），接收波的传播信号。折射法利用波在不同地层的折射路径推断地层界面；反射法通过波在地质体界面的反射信号定位断层、采空区；面波法基于面波传播速度反演地层剪切波速，评估地基刚度^[1]。（3）电磁法勘探：地质雷达发射高频电磁波，接收地下介质反射波，根据波的旅行时间与振幅判断溶洞、衬砌空洞；瞬变电磁法通过发射脉冲磁场激发感应电流，测量感应磁场衰减特征，探测深部低阻体（如地下水、金属矿体）。（4）其他方法：放射性勘探通过测量地层天然放射性强度，识别特殊岩性（如花岗岩）；声波透射法在桩基中预埋声测管，发射并接收声波，根据波速与波幅判断桩身完整性（如断桩、离析）。

1.3 技术特点与适用性分析

（1）不同方法的优缺点对比：电法分辨率较高（1-5米），但受杂散电流干扰大，成本低；地震法探测深度深（10-100米），抗干扰强，却成本高、效率低；电磁法中地质雷达分辨率高（0.1-1米），但探测深度浅（<30米），瞬变电磁法深度深（>100米），却分辨率低；声波法对工程质量检测精准，仅适用于小范围（如桩基、衬砌）。（2）技术选型依据：地质条件方面，复杂岩溶区优先选地质雷达+瞬变电磁法，均质土层可选电法；工程需求上，浅层隐患探测用地质雷达，深部断层探测用地震反射法；环境限制下，城区需低干扰方法（如面波法），环保敏感区避免放射性勘探，确保技术适配工程实际场景。

2 工程物探技术在岩土工程中的应用

2.1 地质勘查与地层结构分析

(1) 岩土体分层、断层破碎带探测：在岩土工程前期勘查中，地震折射法与高密度电法是实现岩土体分层的核心技术。地震折射法通过捕捉不同岩土界面的地震波传播速度差异，可精准划分黏土层、砂层、卵石层等分层界限，例如在公路路基勘查中，能清晰识别出承载力差异显著的土层界面，为路基设计提供分层参数；高密度电法则依托不同岩土体的电阻率差异，生成连续的地下电性剖面，辅助判断土层厚度与分布范围。针对断层破碎带探测，浅层地震反射法表现突出，其通过分析地震波在断层界面的反射信号，可确定破碎带的走向、倾角及宽度，如在隧道勘察中，能提前探明掌子面前方的断层破碎带位置，避免施工中因突水、塌方引发安全事故^[2]。(2) 溶洞、土洞、采空区等隐患识别：地质雷达与瞬变电磁法是识别地下隐患的关键手段。地质雷达凭借高频电磁波的高分辨率特性，可探测埋深较浅（通常小于30米）的溶洞与土洞，在岩溶地区建筑地基勘查中，能精准定位直径大于1米的溶洞，明确其空间分布与填充情况，为地基处理方案制定提供依据；瞬变电磁法则适用于深部采空区探测，通过观测电磁感应信号的变化，可判断采空区的规模与赋存深度，例如在煤矿采空区上方的建筑选址中，能有效规避因采空区塌陷导致的工程风险。此外，声波透射法可通过检测岩土体声波传播速度的异常衰减，辅助识别土洞发育区域，进一步提升隐患探测的全面性。

2.2 工程质量检测与监测

(1) 桩基完整性检测：低应变反射波法是桩基完整性检测的主流技术，其原理是通过在桩顶施加瞬时激振，产生沿桩身传播的应力波，当桩身存在断桩、缩径、离析等缺陷时，应力波会在缺陷处发生反射。检测人员通过分析反射波的波形、振幅与传播时间，可快速判断缺陷类型与位置，例如在高层建筑桩基检测中，能高效排查出桩身底部的断桩隐患，避免因桩基承载力不足引发结构安全问题。该方法具有检测速度快、成本低、对桩基无损伤的优势，单桩检测时间通常控制在10-20分钟，适用于大规模桩基工程质量筛查^[3]。(2) 隧道衬砌质量评估：地质雷达在隧道衬砌质量评估中发挥着不可替代的作用，其通过向衬砌内部发射高频电磁波，根据电磁波的反射特征判断衬砌的厚度、密实度及内部缺陷。在运营隧道检测中，可精准识别衬砌背后的空洞、不密实区及钢筋分布情况，例如当衬砌与围岩之间存在空洞时，电磁波会在空洞界面形成强反射信号，

结合信号传播时间可计算空洞埋深与规模。该技术检测效率高，单次可检测隧道长度达50-100米，为隧道病害整治提供精准数据支撑。(3) 边坡稳定性监测：微震监测技术通过布设地面或井下微震传感器，实时捕捉边坡内部岩土体破裂产生的微震信号，进而分析边坡的稳定性状态。在露天矿边坡或公路高陡边坡监测中，可通过微震事件的定位、能量释放特征，判断边坡内部的潜在滑动面发育情况，当微震事件频次突然增加、能量显著提升时，可预警边坡失稳风险。该技术实现了边坡监测从“点监测”到“面监测”的升级，监测范围可达数平方公里，能为边坡加固与灾害防控提供提前量。

2.3 地下水资源与环境污染探测

(1) 含水层分布与渗透性评价：电法勘探（如激发极化法、直流电阻率法）是含水层探测的核心技术，通过分析地下介质的电性差异，可确定含水层的分布范围、厚度及埋深。例如在农业灌溉井选址中，激发极化法能区分含水层与隔水层，结合钻孔验证可提高成井率；对于含水层渗透性评价，可通过电阻率成像技术获取含水层的电阻率分布，通常电阻率较低且分布均匀的区域，渗透性较好。此外，示踪试验结合电磁法监测，可进一步量化含水层的渗透系数，为地下水资源开发利用提供参数。(2) 地下水污染范围划定：电阻率成像技术凭借对污染物的高敏感性，广泛应用于地下水污染探测。当地下水受到重金属、有机污染物污染时，污染水体与清洁水体的电阻率会产生显著差异，例如含重金属离子的污染水电阻率通常低于清洁水。通过布设高密度电极阵列，生成地下电阻率剖面图，可清晰划分污染羽的分布范围与污染程度，例如在工业场地地下水污染调查中，能精准圈定污染区域的边界，为污染修复方案设计（如渗透反应墙布设）提供精准的空间坐标^[4]。

2.4 特殊地质问题处理

(1) 软土地基处理效果评估：在软土地基处理（如真空预压、水泥土搅拌桩加固）后，可采用瑞利波法、面波法评估处理效果。瑞利波法通过测试地基土的剪切波速，判断软土的固结程度，通常处理后的软土剪切波速会显著提升（如从100m/s提升至150m/s以上），结合承载力试验可验证处理效果；对于水泥土搅拌桩复合地基，可采用低应变反射波法检测搅拌桩的完整性与桩身强度，判断桩身是否存在断桩、搅拌不均等问题，确保复合地基承载力满足工程要求。(2) 冻土区工程地质条件分析：在冻土区铁路、公路工程建设中，瞬变电磁法与地质雷达可有效分析冻土分布与冻融状态。瞬变电磁法能探测多年冻土的分布范围与冻土层厚度，通过电阻

率差异区分多年冻土（高电阻率）与季节冻土（低电阻率）；地质雷达则可识别冻土中的冰楔、冻胀丘等不良地质体，例如冰楔在雷达图像中表现为强反射界面，结合信号特征可判断冰楔的规模与埋深。此外，地温监测结合电磁法反演，可分析冻土的冻融变化趋势，为冻土区工程结构（如路基保温层设计）提供依据，避免因冻胀融沉引发工程病害。

3 工程物探技术的挑战与发展趋势

3.1 当前面临的主要挑战

（1）复杂地质条件下的信号干扰与数据解析难度：在岩溶发育区、软土与硬岩交互地层等复杂地质环境中，地下介质物理性质差异紊乱，易导致物探信号叠加干扰。例如地震勘探中，溶洞反射波与地层界面反射波相互混淆，难以精准区分；电法勘探时，地下金属管线、工业杂散电流会造成电阻率数据失真。同时，复杂地质条件下数据解析需结合多学科知识，现有解析模型对非均质地层适应性不足，易出现误判，增加工程风险。（2）多源数据融合与三维建模技术不足：工程物探常获取地震、电磁、电法等多源数据，当前数据融合多停留在简单叠加层面，缺乏深度关联分析，无法充分挖掘数据间的互补信息。此外，三维建模技术受限于数据精度与计算能力，在复杂地质体（如不规则采空区）建模中，易出现模型与实际地质情况偏差，难以满足工程对地下空间精准刻画的需求，影响方案设计的科学性。

（3）标准化与规范化程度有待提升：不同地区、不同企业对物探技术的应用流程、数据采集参数、成果验收标准存在差异。例如桩基检测中，低应变反射波法的激振方式、信号采集频率无统一规范，导致检测结果可比性差；地质雷达探测溶洞时，数据解译标准不统一，易出现同一地质体不同单位解译结论不一致的情况，影响技术应用的公信力与工程质量把控。

3.2 未来发展趋势

（1）智能化与自动化技术融合：AI算法将深度应用于物探数据解析，如通过机器学习自动识别地震波异常信号、智能分类地质体；大数据技术可整合历史物探

数据与地质资料，建立预测模型；物联网技术可实现多传感器实时数据采集，提升勘探效率与数据连续性，推动物探技术向“智慧勘探”转型。（2）多物探方法协同与综合解释平台开发：未来将加强地震法、电磁法、电法等多方法协同应用，通过各方法优势互补提升探测精度。同时，将开发集成多源数据处理、三维建模、成果可视化的综合解释平台，实现数据从采集、处理到解析的一体化，减少人为误差，为工程决策提供更全面、精准的地质信息支持^[5]。（3）绿色物探技术的推广：随着环保要求提升，低能耗设备（如新型便携式电磁勘探仪）将逐步替代高能耗设备；无辐射探测技术（如声波法、重力法）的应用范围将进一步扩大，减少对生态环境与人体健康的影响。同时，绿色勘探流程将不断优化，如采用可回收电极、环保耦合剂等，推动工程物探行业向低碳、环保方向发展。

结束语

工程物探技术凭借其高效、精准、无损等显著优势，在岩土工程的勘察、检测、监测及特殊地质问题处理等多方面发挥着难以替代的作用。它不仅提升了工程的安全性与可靠性，还推动了行业向智能化、绿色化迈进。尽管当前在复杂地质条件解析、多源数据融合等方面仍面临挑战，但随着技术不断创新与完善，工程物探技术必将为岩土工程领域带来更广阔的应用前景，持续助力基础设施建设高质量发展。

参考文献

- [1]柴绪令.工程物探技术在岩土工程勘察中的应用研究[J].建筑技术开发,2020,47(23):156-157.
- [2]张鹏.岩土工程中工程物探技术的应用[J].世界有色金属,2020(12):247-248.
- [3]李生龙.工程物探技术在岩土工程勘察中的应用研究[J].建筑技术开发,2020,47(05):163-164.
- [4]余凯.工程物探技术在岩土工程中的应用[J].四川水泥,2020(01):153-154.
- [5]富研科.试论地质勘测中的综合物探技术应用[J].黑龙江科技信息,2020(22):125-126.