山区线路勘察地质灾害隐患识别技术

于　超

浙江华东岩土勘察设计研究院有限公司　浙江　杭州　310030

摘　要：山区地形起伏剧烈，地质构造复杂，滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害多发，严重威胁线路工程建设与运营安全。地质灾害隐患识别作为山区线路勘察的核心工作，技术体系持续发展。本文系统梳理传统勘察、遥感探测、地球物理勘探与智能识别四类技术，分析各项技术原理、特点与适用条件，对比各类技术优势与局限，探讨多技术协同识别思路，为山区线路地质灾害风险防控提供理论与技术参考。

关键词：山区；线路勘察；地质灾害；隐患识别技术

引言

我国山区面积广阔，地质环境脆弱，线路工程建设面临突出的地质灾害风险。山区线路沿线地质灾害隐患具备隐蔽性、突发性特点，单一勘察手段难以满足高精度识别需求。随着探测设备与信息技术不断发展，各类隐患识别技术逐步在山区线路勘察中得到推广应用。通过对不同识别技术进行系统归纳，厘清各类技术适用边界，能够为工程勘察阶段的技术选型提供支撑，提升地质灾害隐患识别的可靠性。

1 传统山区线路勘察地质灾害隐患识别技术

1.1 地质测绘技术

地质测绘技术依靠野外踏勘、地形测量与地质要素调查，系统采集线路区域地形地貌、地层岩性、地质构造、岩土体风化程度等信息，整理绘制地质图件，直观呈现区域地质条件空间分布规律，依托图件解译识别断层破碎带、软弱夹层、高陡边坡等地质灾害易发地段。该技术基础性与综合性突出，可完整掌握区域宏观地质背景，为后续专项勘察工作提供基础地质资料，是山区线路初步勘察阶段首选技术手段。但人工测绘作业工作量大，勘察周期较长，受山区险峻地形限制明显，悬崖、深切沟谷等区域难以开展实地勘测，部分区域测绘精度无法保证。在山区线路勘察初期阶段，地质测绘用于掌握区域整体地质概况，划定地质灾害隐患分布范围，依靠地貌形态、岩体结构宏观特征，初步判断滑坡、泥石流等灾害潜在发育区域，锁定后续需要重点勘察的区段。

1.2 工程地质钻探技术

工程地质钻探借助钻探机具向地下钻进，提取岩土芯样，通过观察芯样颜色、结构、物质组成，确定地下岩土层厚度、分布规律，同时可在钻孔内开展原位测试，获取岩土体物理力学参数，探明地下隐蔽地质条件。该技术能够直接获取地下岩土真实信息，数据可靠性强，可突破地表观测局限，揭示深部地层与构造特征，为地质灾害隐患定量评价提供关键依据。钻探作业存在成本偏高、施工周期长的问题，山区复杂地形条件下设备转运、安装难度大，同时钻进施工会对原有地表与岩土环境造成一定扰动[1]。工程地质钻探多用于地质测绘圈定的重点隐患区段，开展地下结构精细探查，获取滑坡体厚度、滑动面埋深、软弱夹层发育特征等关键参数，支撑滑坡稳定性计算与灾害治理方案设计。

1.3 槽探和坑探技术

槽探与坑探属于浅层人工开挖勘察手段，通过挖掘槽沟、探坑、探井、探洞，剥离地表覆盖层，直接暴露地下浅层岩土体与地质构造，开展现场观测和岩土取样。槽探更适合浅层大范围地质调查，揭示地层岩性与小型构造；坑探可适度加大探测深度，探查深部浅层岩土结构。槽探坑探最大优势是直观性强，可以直接观察岩体结构面、裂隙发育、岩土破碎程度，相较于钻探，设备投入更少，操作灵活，适合小范围重点位置勘察。但人工开挖作业劳动强度大，工作效率偏低，探测深度有限，不适用于深层地质隐患探查，难以在大范围山区线路中批量使用。在实际勘察工作中，槽探坑探主要针对前期勘察发现的地质异常点开展复核验证，在疑似崩塌、浅层滑坡、地面塌陷区域，查明岩体破碎状态、地下空洞发育情况，判断地质灾害发生可能性，补充浅层地质细节信息。

2 遥感技术在山区线路勘察地质灾害隐患识别中

的应用

2.1 光学遥感技术

光学遥感传感器接收地表反射和自身发射的可见光、近红外波段电磁波，通过图像处理、纹理提取、光谱分析提取地表信息，不同岩土体、灾害体在影像上呈现差异化光谱与纹理特征，以此识别地质灾害隐患。光学遥感覆盖范围广，数据获取速度快，整体勘察成本较低，能够短时间完成山区线路全域地表信息采集，快速圈定潜在灾害区域。光学遥感依赖自然光成像，云雾、降雨天气会大幅降低图像质量，影响解译效果，并且仅能获取地表信息，无法探查地下隐蔽地质体[2]。在山区线路勘察中，光学遥感影像多用于前期大范围隐患初判，依托坡度、坡向、沟谷形态、植被覆盖等指标，识别滑坡潜在发育区域，分析泥石流形成区松散堆积物分布与沟谷形态特征，完成灾害易发区初步划分。

2.2 雷达遥感技术

雷达遥感依靠微波设备主动发射电磁波，接收地表回波信号，经信号处理反演地表特征。微波具备穿透云雾、植被覆盖层的能力，可实现全天候、全天时不间断探测，不受昼夜与气象条件限制，能够捕捉地表微小形变信息。雷达遥感最大特点是环境适应性强，可开展长时间序列动态监测，捕捉毫米级地表位移，监测滑坡、塌陷等隐患的动态演化过程，为灾害预警提供形变数据支撑。雷达遥感数据解译流程复杂，对操作人员专业能力要求高，多解性问题增加地质信息判读难度。山区线路地质灾害隐患识别中，雷达遥感多用于线路沿线隐患点动态监测，周期性获取雷达影像，利用干涉测量技术分析地表形变场，捕捉滑坡体缓慢蠕动、地面沉降等灾害前兆信号，实现地质灾害动态风险研判。

2.3 高光谱遥感技术

高光谱遥感技术依托高分辨率光谱传感器，在宽波段范围内采集大量连续窄波段光谱数据，构建高精度光谱图像，依托不同岩土体、松散堆积物、灾害隐患体独特的光谱响应特征，精准区分地表物质成分、结构与含量差异，实现精细化地质特征识别。该技术光谱分辨率极高、数据信息维度丰富，能够识别常规遥感技术无法捕捉的细微地质差异，可精准研判隐患体物质组成与发育特征，为灾害形成机制、风险等级评估提供精细化数据支撑，大幅提升隐患识别的精准度。但该技术数据体量庞大、冗余信息多，数据预处理、特征提取、分析解译的技术难度大，对算力与专业技术要求较高，作业成本相对偏高。在山区线路勘察中，该技术主要用于隐患精细化研判，通过光谱数据分析识别滑坡体物质构成、泥石流松散堆积物类型与分布范围，明确地质灾害隐患的物质基础与发育条件，精准评估隐患危险程度，为线路优化规划、隐患治理方案设计提供科学依据。

3 地球物理勘探技术在地质灾害隐患识别中的应用

3.1 电法勘探技术

电法勘探技术基于地下不同岩土体、地质异常体的电学性质差异，通过观测人工或天然电场、电磁场的空间分布与变化规律，反演地下电性结构特征，依托电阻率、极化率等电性参数差异，判别地下岩土层分布、断层破碎带、岩溶空洞等地质异常体的发育情况，常见技术方法包括电阻率法、激发极化法等。该技术对地下地质异常体分辨能力较强，勘探深度适配山区中浅层地质勘察需求，可快速获取全域地下电性分布数据，对地下空洞、破碎带、软弱夹层等灾害隐患的识别效果突出。但技术易受山区地形起伏、地下水位、地表杂物干扰，复杂地质条件下电性数据耦合性强，数据解译多解性明显，精准研判难度较大[3]。在实际勘察工作中该技术主要用于探测山区线路沿线地下岩溶发育范围、地下空洞分布、滑坡滑动面埋深与位置，精准排查地面塌陷、深层滑坡等隐蔽地质隐患，为地下灾害隐患风险评估提供数据支撑。

3.2 地震勘探技术

地震勘探技术通过人工激发地震波，利用地震波在不同岩土体中传播速度、振幅、频率的差异化特征，观测地震波传播规律与反射、折射特征，精准反演地下地质界面、地质构造形态与岩土体动力学性质，核心方法包含折射波法、反射波法。该技术勘探深度大、探测分辨率高，能够精准识别地下断层、褶皱、破碎带等复杂地质构造，清晰呈现地下地质结构全貌，可为大型地质灾害隐患的危险性评估、线路选址优化提供精准依据。但其设备集成度高、操作流程复杂、作业成本较高，山区复杂地形下设备布设、震源激发难度大，施工适配性较差，难以开展小规模精细化勘察作业。在山区线路勘察中该技术主要用于查明线路全域大型地质构造特征，判定断层规模、产状、活动性，研判地质构造对线路基础稳定性的影响，同时获取岩土体动力学参数，为滑坡、崩塌等灾害的稳定性定量评价提供核心指标。

3.3 地质雷达勘探技术

地质雷达技术通过发射天线向地下发射高频宽带电磁波，电磁波遇到地下岩土体分界面、异常体后发生反射，由接收天线捕捉回波信号，通过信号处理与图像重

构，直观呈现地下浅层地质剖面，精准识别浅层地质异常体与结构缺陷。该技术核心优势是探测速度快、操作便捷、分辨率极高，可实时生成地下探测图像，可视化呈现浅层地质结构，无损化作业适配山区线路精细化勘察场景。但探测深度存在明显局限，仅适用于几米至几十米的浅层地质探测，无法满足深层地质隐患排查需求。在工程应用中，该技术广泛用于山区线路路基、轨道浅层隐患排查，可精准探测路基下方溶洞、空洞、软弱土层、破碎带等隐患，提前规避路基塌陷、轨道变形等工程风险，保障线路基础结构稳定性。

4 智能识别技术在地质灾害隐患识别中的应用

4.1 基于机器学习的识别技术

机器学习识别技术以大数据驱动为核心，通过整合山区地形、地质、气象、遥感、勘探等多源异构数据，结合已知地质灾害隐患样本数据集，构建智能识别模型，通过模型训练自主挖掘地质灾害隐患的关联特征与分布规律，实现对未知区域隐患的自动分类、识别与风险预判。该技术具备极强的数据适配与自适应能力，可高效处理海量复杂地质数据，规避人工识别的主观误差，显著提升隐患识别的效率与准确率，适配大范围山区线路隐患批量排查工作[4]。但模型识别效果高度依赖样本数据的数量与质量，数据缺失、失真会直接影响识别精度，同时模型黑箱特征明显，识别过程可解释性较差，不利于隐患成因的精准分析。在实际应用中，该技术主要用于多源勘察数据的融合分析，通过支持向量机、随机森林、神经网络等算法，实现遥感图像灾害区域分类、地质灾害危险性分级评价，快速锁定高风险隐患区域。

4.2 基于深度学习的识别技术

深度学习技术是机器学习的进阶分支，通过构建多层深度神经网络模型，实现高维、复杂地质数据的层次化特征自主提取，无需人工干预即可自动挖掘遥感图像、三维地质模型、监测时序数据中的核心隐患特征，适配高精度、精细化的地质灾害识别场景。该技术特征提取能力、模式识别能力远超传统机器学习，可精准捕捉细微、隐蔽的地质灾害隐患特征，能够完成灾害边界勾勒、物质成分识别、形变趋势预判等精细化工作，在复杂山区地质隐患识别中具备极强的应用潜力。但其存在算力消耗大、模型训练难度高的问题，需要海量高质量标注数据支撑模型迭代优化，技术落地门槛较高。在山区线路勘察中该技术主要用于高精度遥感图像精细化解译，通过卷积神经网络实现滑坡、泥石流隐患边界精准划分，依托循环神经网络处理时序监测数据，预判地质灾害动态演化趋势，实现隐患精细化识别与动态研判。

4.3 智能监测与预警系统

智能监测与预警系统集成传感采集、无线传输、智能分析与预警发布模块，在重点隐患点位布设传感器，实时采集岩土位移、应变、地下水位等参数，后台算法持续分析监测数据变化规律，自动判别灾害风险等级并触发预警。系统可实现全天候自动化监测，实时捕捉地质环境动态变化，及时识别灾害前兆，弥补静态勘察无法动态监测的不足，能够针对不同灾害类型设置差异化预警策略。系统部署需要在野外布设硬件设备，山区恶劣环境对传感器可靠性提出较高要求，监测点位布设成本会随着监测范围扩大显著上升[5]。在山区线路运维阶段，智能监测预警系统布设在滑坡、泥石流沟谷等高风险位置，持续监测地质体动态变化，捕捉灾害前兆信息，及时推送预警信号，支撑应急处置，保障线路运营安全。

结语

综上所述，各类地质灾害隐患识别技术拥有各自的适用条件与固有局限，传统勘察手段保障地质信息基础真实性，遥感技术实现大面积地表快速筛查，地球物理勘探技术探明地下隐蔽异常体，智能识别技术提升数据处理与动态预警能力。单一技术很难全面满足山区复杂环境下地质灾害隐患识别需求。工程实践中应当结合勘察阶段、地质条件与工作目标，将多种识别技术组合应用，构建多尺度、多维度的隐患识别体系，持续优化技术协同方案，提升山区线路地质灾害隐患识别水平，降低地质灾害带来的工程风险。

参考文献

[1] 王毅, 李天斌, 李升甫, 等. 山区公路脆弱地质环境灾害多方法早期识别及路线优化 [J]. 武汉大学学报（信息科学版）,2026,51(2):224-235.

[2] 韦宇辉, 刘先林, 邵羽, 等. 山区公路地质灾害早期识别与监测预警方法 [J]. 测绘通报,2026,(1):91-99.

[3] 李重阳, 耿家晨. 地质灾害隐患点识别与勘察设计策略优化研究 [J]. 新疆钢铁,2025,(1):192-194.

[4] 陈兵. 无人机在地质灾害隐患点快速识别与监测中的应用 [J]. 中国高新科技,2025,(22):134-136.

[5] 雷铭, 杨昌钰, 潘润润, 等. 无人机遥感技术在地质灾害隐患识别中的应用研究 [J]. 科技经济市场,2026,(4):56-58.