

无人机航测与物探技术融合在水文地质调查及泥石流灾害治理中的应用

袁红昌

江苏省生态地质调查大队 江苏省南京市 210000

【摘要】随着先进勘查理念的深入发展,传统单一的地质调查方法已难以满足现代水文地质研究和地质灾害防治的需要,无人机航测技术以其高时效性、高分辨率和三维实景建模能力,实现了地面信息的精确捕获,同时地球物理勘探技术可以穿透浅层地表,揭示地下构造的分布和物性参数,如果将两者深度融合,构建“地表-地下”一体化协同探测系统,就可以水文地质调查和泥石流灾害防治进行有效控制。因此,本文阐述了无人机航测与物探技术的内涵和组成结构,深入分析了两者在多源数据融合、模型耦合、协同解释等方面的融合机制,并分析了未来技术融合的发展趋势,旨在为相关领域的科学研究和实践提供技术支撑。

【关键词】无人机航测;物探技术融合;水文地质调查;泥石流灾害治理

The application of the integration of drone aerial survey and geophysical exploration technology in hydrogeological survey and debris flow disaster mitigation

Yuan Hongchang

Jiangsu Provincial Ecological Geological Survey Brigade, Nanjing City, Jiangsu Province 210000

【Abstract】With the in-depth development of advanced exploration concepts, traditional and singular geological survey methods have become insufficient to meet the needs of modern hydrogeological research and geological disaster prevention. Unmanned aerial vehicle (UAV) survey technology, with its high timeliness, high resolution, and 3D real-scene modeling capabilities, achieves precise capture of ground information. Meanwhile, geophysical exploration technology can penetrate the shallow surface to reveal the distribution and physical properties of underground structures. If the two are deeply integrated to construct an "above-ground-underground" integrated collaborative detection system, effective control can be achieved in hydrogeological surveys and debris flow disaster prevention. Therefore, this paper expounds the connotation and composition structure of UAV survey and geophysical exploration technology, deeply analyzes the integration mechanism of the two in multi-source data fusion, model coupling, collaborative interpretation, and other aspects, and analyzes the development trend of future technology integration, aiming to provide technical support for scientific research and practice in related fields.

【Keywords】Unmanned aerial survey; Integration of geophysical exploration technology; Hydrogeological survey; Debris flow disaster mitigation

引言

水文地质调查是水资源评价、开发利用和保护的基础,主要对含水层的空间分布、边界条件、富水性以及地下水的补径排关系进行有效区分,而泥石流作为一种突发、破坏力极强的地质灾害,其发展与流域内的地形、岩性、构造、水文条件息息相关。传统的调查方法主要依靠人工地面测绘、钻孔和单一钻探手段,其存在效率低、成本高、“点”代替“面”的局限性,难以全面、准确地展示出复杂地质构造和灾害发展机制。在水文地质调查及泥石流灾害治理中,将无人机航测获得的高精度地表模型与物探技术融合,实现地表信息与地下数据的空间配准、联合解释和模型耦合,构建准确的“地质体三维透明化”,从而大大提高水文地质调查的准确性和效率,为泥石流灾害的风险评估、监测预警和工程

控制提供相应的科学依据。

1、研究背景

水文地质调查的目的就是对地下水的赋存状态、运移模式及其与岩土介质的相互作用进行分析,而泥石流灾害防治的关键是准确识别物质来源,明确起生机制,模拟运移路径,设计有效的防治工程。长期以来,这两项任务主要依靠人工地面调查、钻井和分散点数据收集,这些方法虽然不可或缺,但也存在一定的局限性:效率与覆盖之间的矛盾,在地形广阔或地形险峻地区,人工调查效率低,难以对探测区域进行全覆盖,从而遗漏关键的地质信息;数据来源单一,传统的物探剖面提供“线状”信息,取法构建真正的三维地质模型,对复杂地质体空间分布的推断存在不确定性;对于

泥石流活跃区、陡峭边坡等安全风险高的区域进行人工勘察,不仅严重威胁技术人员的人身安全,还阻碍了工作的有效进行;动态监测能力弱,无法对于地下水动态变化、边坡变形等过程现象进行实时监测,同时传统方法难以实现高频、快速的时空连续监测,无人机航测技术与物探技术的兴起和融合,不仅避免了上述的不足,还实现了“天空地”一体化勘察体系。

2、技术融合的内涵与核心组成

2.1 无人机航测技术体系

无人机(UAV)航测技术主要是指利用高分辨率光学相机、多光谱相机、热红外相机、激光雷达等传感器射不死,快速获取地面高精度、多光谱空间信息。高精度实景三维建模主要是利用斜向摄影测量技术,生成高分辨率数字正射影像图、数字高程模型和实景三维模型,准确反映地表微地貌、岩层产状、裂缝发育、植被覆盖度等信息,是水文地质勘察和泥石流防治的基础。激光雷达能有效穿透植被覆盖,获得高精度高程数据,可以有效识别植被覆盖的古滑坡体、谷形、微地貌特征等;多光谱和热红外遥感应用,其中反演植被指数、岩性分类可应用多光谱数据,另外地下水出露点(泉)、土壤湿度差异等水文地质信息可以通过热红外数据探测地表温度异常进行控制。

2.2 地球物理勘探技术

地球物理勘探技术主要是通过探测地下介质物性差异来推断地质构造,与无人机相结合的物探技术主要包括:无人机航磁测量,探测岩体中圈定岩性边界、断裂构造的磁化率差异,对含水构造进行准确分类;无人机瞬变电磁法主要是通过发射和接收二次电磁场,探测地下介质的电性结构,并利用低阻流体(如含水层和富水断裂带)的敏感响应,对水文地质调查中寻找地下水进行探测;无人机(UAV)伽马能谱测量,测量地表岩石和土壤中放射性元素的含量,主要应用在构造识别和岩性填图^[1]。

2.3 技术融合机制

2.3.1 数据层面的融合

无人机航测可以对空间进行精确定位,可以利用无人机航测生成的高精度DOM和DEM为目标检测线的布置和测点位置的精确定位提供地理参考,传统的地球物理勘探测量通常依赖于手持GPS,其精度有限。现在地球物理勘探技术可以精确地将物探剖面“拟合”到三维模型上,从而消除地形波动引起的位置误差;许多物探方法(如电法、磁法)的数据容易受地形波动影响,如果利用无人机生成的高精度DEM对物探数据的地形进行精确校正,不仅可以提高反演模型的可靠性,还可以提高勘察的准确性;调查线路规划与优化,基于三维实景模型,调查人员可以提前在计算机上进行虚拟侦察,避开障碍物,根据对地表线性结构(如断层、沟壑)的初步理解,合理地规划目标检测线,保证探测的有效性。

2.3.2 模型层面耦合

无人机航测解译的地表地质边界、断层迹线、岩性单元等可作为物探数据反演的先验约束条件,限制反演解的非唯一性,利用反演算法获得更符合地质规律的解;多属性模型融合是将物探反演得到的地下电阻率模型、波速模型等与无人机生成的三维地表模型融合,并在同一三维可视化平台上,生成“表皮透明、内部有物”的综合地质模型。例如,在三维空间中,可以将电阻率降低某一阈值的区域(可能为富水区),并叠加在详细的表面模型上,从而形成直观地空间形态^[2]。

2.3.3 解释层面协同

无人机航测与物探技术融合的核心及时“地表形迹”与“地下异常”之间的联系,例如,在地表上识别的珠状洼地或线性分布的湿地(通过无人机的多光谱图像),如果在其下方有相应的低电阻率异常带(通过高密度电法),则可以综合解释为控制地下水运动的断裂带。在泥石流区域中,如果地表识别的不稳定边坡(通过LiDAR DEM计算)与地下(通过地震方法)检测到松散层的厚度大和波速低的区域相匹配,就可将该区域划分为高风险地区;对勘探过程进行动态监测,利用无人机航测和物探的重复观测,监测地下水位的动态变化、滑坡体的变形、泥石流物质源的增减,实现过程动态监测^[3]。

3、在水文地质调查中的应用

3.1 含水层结构精细刻画

传统的水文地质钻探只能提供“一孔之见”,融合技术可以实现含水层空间结构的“三维成像”:首先,利用无人机(UAV)激光雷达获取高精度DEM,识别宏观地貌单元(如冲积扇和阶地);其次,在关键地貌单元上绘制高密度电法或地震折射剖面,并将物探反演结果与DEM相结合,清晰地显示潜水面起伏形态、含水层(低阻/低速)与含水层(高阻/高速)的接触关系以及古河道或埋藏谷地的空间分布,同时对区域水资源评价和水资源划界也非常重要^[4]。

3.2 地下水补径排条件分析

利用无人机多光谱图像对植被异常和土壤湿度差异进行解释,可以精确定位泉水出露点和地下水浅埋区,并在此基础上,沿推断补给通道(如河道、山前断层)建立地球物理勘探剖面,然后通过电阻率或感应极化特征验证地下水补给路径,并对其深部特征进行了刻画,另外在排泄区,还可以通过物探圈定地下水溢流带的范围和深度,并利用“地表指示-地下验证”的模式,使补径排分析从定性转向了定量^[5]。

3.3 构造控水规律

无人机和DSM的高分辨率图像可以精确识别地球表面的线性结构、断层三角面等,沿这些构造迹线垂直布设物探探测线,探测其深处的低阻异常带或波速突变带,确定构造的深度延伸、裂缝带宽度和含水率,从而确定其导水率或阻水

率,为水文地质勘探和泥石流防治提供技术支持^[9]。

4、技术融合在泥石流灾害治理中的应用

4.1 精准识别与量化物源

灾害评估的首要问题就是对泥石流源区(如滑坡体和松散沉积物)的分布进行分析,利用激光雷达去除植被,获得高精度 DEM,自动识别和量化斜坡的稳定性和松散沉积物的体积,然后通过对多次航测数据的对比,准确计算出物质源区因侵蚀或滑坡而产生的新物质量,实现物质源区的动态清单管理^[7]。

4.2 泥石流动力学参数反演与风险区划

无人机(UAV)激光雷达 DEM 可以精确提取流域内沟槽河床纵向坡度、环流区地形和堆积区地形,这些地形参数是泥石流运动模拟的基本参数输入。物探提供的物质源厚度和横波速度,可用于估计物质源的内摩擦角、黏聚力等力学参数,使动态模拟的参数设置更加准确,另外,结合精确参数数值模拟更准确地预测泥石流的淹没范围、流速和堆积厚度,从而绘制高精度的风险分区图。

4.3 泥石流动态监测与预警

在汛期前后,利用无人机定期对重点沟渠进行航测,通过三维模型的对比,可以监测源区的新增变形、沟道下切侧蚀情况、以及植被覆盖度的变化,这些信息都是灾害发生的先兆信息;对地下水动态进行勘探与监测,泥石流的发生与降雨量渗入引起的地下水位突然上升密切相关。在重点物质来源区域或流通区域布设高密度电法时间序列监测系统,定期采集数据,反演地下电阻率随时间的变化,推断土壤含水量或地下水位的动态变化,从而为预警模型提供关键参数。数据同化与预警主要是将无人机监测的地表变形数据和物探监测的地下水位数据输入到泥石流起爆机制模型(如无限边坡稳定模型、水动力模型)中,实现对沟谷稳定状态进行

实时评估(当多个指标同时超过阈值时,系统可发出不同级别的预警信号)。

4.4 物源识别与动态储量估算

在初步背景调查中,使用无人机和激光雷达快速识别流域内所有潜在的不稳定斜坡、崩塌体和松散沉积物,通过对多个 DEM 相的差分计算,准确地获得源区的侵蚀和堆积量;物源性判断,仅根据松散堆积的形态很难确定其厚度和内部结构。此时,在重点物质源区建立物探剖面(如高密度电法、面波勘探),可以揭示松散层与基岩界面,估算有效物质源区厚度,从而将二维物质源区面积转化为三维物质源区,进而提高储量估算精度。例如,在高频泥石流调查中,无人机激光雷达探测到沟壑中有大量巨大的砾石堆积,而在巨大的砾石下面是存在一层数米厚的低阻层(即含水饱和的泥沙层),在大雨条件下,该泥沙层可能液化并启动,带动表层巨砾共同运动,形成了“揭底”式泥石流。

结束语

综上所述,无人机航测与物探技术的深度融合是未来地质调查技术发展的重要方向,在实际应用中,主要通过高精度三维地表信息与揭示地下构造的物探数据的空间配准、模型耦合和协同解释,构建了“地表-地下”一体化系统。在水文地质调查中,该技术系统实现了从宏观到微观、从定性到定量对含水层结构、地下水补给、排水条件和构造控水规律的详细描述,极大地提高了水资源勘查的效率;在泥石流灾害治理中,它贯穿于源头识别、动态参数反演、风险分区和工程效果评价全过程,为灾害的精准预警和科学防控提供了坚实的数据支持。另外,随着人工智能、新型传感器、云计算等技术的不断引进,无人机航测与物探的融合将更加灵活、更加智能、更加高效,从未推动水文地质防灾进入“透明化”和“智能化”的全新时代。

参考文献

- [1]何健. 地热资源勘查中水文地质调查的运用分析[J].中国战略新兴产业,2025,(11):67-69.DOI:CNKI:SUN:ZLXC.0.2025-11-019.
- [2]戴如俊,丁慧明,谢波,等. 无人机航测在海外热带雨林地区露天矿中的应用[J].矿业装备,2024,(10):161-163.DOI:CNKI:SUN:KYZB.0.2024-10-053.
- [3]尚洪俊,李宏伟,邢启明,等. 物探技术在天津市滨海地区某场地污染状况调查中的应用[J].新疆有色金属,2023,46(02):80-81.DOI:10.16206/j.cnki.65-1136/tg.2023.02.031.
- [4]郝爱兵,赵伟,郑跃军,等. 水文地质调查技术方法发展与应用综述[J].测绘科学,2022,47(08):25-35.DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2022.08.004.
- [5]周杭懿.长江源区辫状河流多尺度形态特征与变化规律[D].长沙理工大学,2022.DOI:10.26985/d.cnki.gcsjc.2022.001110.
- [6]朱臻鸿,黄兴. 传统水文地质调查方法在矿区地下水环境污染调查中的应用[J].中国金属通报,2022,(01):175-177.DOI:CNKI:SUN:JSTB.0.2022-01-059.
- [7]刘真真,史功名. 水文分析在无人机航测 DEM 产品质量控制中的应用[J].勘察科学技术,2018,(05):49-53.DOI:CNKI:SUN:KCKX.0.2018-05-011.