

无人机倾斜摄影在公路边坡稳定性监测中的应用分析

常 晨

中科路恒工程设计有限公司 山西 太原 030032

摘 要：随着公路建设规模扩大，边坡稳定至关重要。本文聚焦无人机倾斜摄影在公路边坡稳定性监测中的应用。首先阐述无人机倾斜摄影技术原理与特点，接着分析其在公路边坡稳定性监测中具备的高效、高精度、安全、全面等优势。详细介绍该技术在数据采集、三维建模、变形监测及误差控制等方面的具体应用。最后对其应用前景进行展望，包括技术创新趋势、与其他技术融合以及应用领域拓展等，旨在为公路边坡稳定性监测提供新的有效技术手段与思路。

关键词：无人机倾斜摄影；公路边坡；稳定性监测；技术应用

引言：公路建设与运营中，边坡稳定性至关重要，其失稳易引发滑坡等灾害，威胁交通与生命财产安全。传统监测方法存在效率低、精度受限、安全性差等问题。随着科技发展，无人机倾斜摄影技术凭借独特优势，在众多领域得到广泛应用。将其应用于公路边坡稳定性监测，可突破传统方法局限，快速获取边坡多视角影像，实现高效、精准、安全监测，为公路边坡稳定性评估与预警提供可靠依据，对保障公路安全运营意义重大。

1 无人机倾斜摄影技术概述

1.1 倾斜摄影技术原理

倾斜摄影技术通过无人机搭载的多镜头相机系统，突破传统正射影像单一视角的局限。该系统通常由垂直镜头与四个倾斜镜头（前、后、左、右）组成，倾斜角度在 40° - 60° 之间，实现垂直与倾斜多角度同步影像采集。垂直镜头获取地物顶面信息，倾斜镜头捕捉侧面轮廓及纹理，弥补正射影像无法获取立面细节的缺陷。通过多视影像联合空三加密技术，自动匹配同名点生成高精度三维点云，再经纹理映射构建带有真实色彩的三维模型。该过程依赖无人机搭载的POS系统（GPS/IMU）提供影像位置与姿态参数，确保模型几何精度与空间定位准确性。

1.2 无人机倾斜摄影测量技术特点

无人机倾斜摄影测量技术以高效、高精度、低成本为核心优势。其采用低空飞行模式，可快速获取厘米级分辨率影像，单次飞行覆盖范围达平方公里级，数据采集效率较传统方法提升数倍。通过自动化空三解算与三维建模流程，无需人工干预即可生成真实纹理的三维模型，模型精度满足工程测量需求。该技术数据量小且格式兼容性强，支持快速网络发布与共享应用。此外，无人机平台灵活性高，可深入复杂地形区域，结合多源数

据融合能力，在灾害监测、城市建模、工程勘测等领域展现显著应用价值，成为数字孪生与智慧城市建设的关键技术支撑^[1]。

2 无人机倾斜摄影在公路边坡稳定性监测中的优势

2.1 高效性

无人机倾斜摄影在公路边坡稳定性监测中展现出显著高效性。其搭载的多镜头相机系统可同步获取垂直与多角度倾斜影像，单次飞行即可完成大面积边坡数据采集，大幅缩短外业作业时间。结合自动化空三解算与三维建模软件，数据处理流程实现全自动化，从影像匹配到模型生成仅需数小时，较传统人工测量效率提升数倍。同时，无人机可快速响应边坡突发变形，通过多次飞行获取时序数据，实现动态监测的高频更新，为边坡稳定性评估提供及时的数据支持，满足工程应急需求。

2.2 精度性

该技术通过多视角影像联合解算，可获取厘米级精度的三维空间信息。倾斜摄影获取的丰富侧面纹理数据，有效弥补了正射影像的几何畸变问题，结合POS系统提供的精确位置与姿态参数，模型几何精度达到工程测量标准。通过密集点云生成的三维模型，可精确提取边坡表面位移、裂缝宽度等变形参数，精度优于传统单点测量方法。此外，多期数据对比分析可进一步消除系统误差，提升变形监测的可靠性，为边坡稳定性定量评价提供高精度数据基础。

2.3 安全性

无人机倾斜摄影实现了“非接触式”监测，操作人员无需攀爬危险边坡或进入复杂地形区域，显著降低了外业作业风险。尤其在雨季、滑坡高发期等恶劣条件下，无人机可远程执行监测任务，避免人员直接暴露于潜在灾害环境中。同时，其低空飞行特性可贴近边坡表

面获取细节信息,较卫星遥感更具灵活性。通过预设飞行航线与避障系统,无人机可自动规避障碍物,确保飞行安全。

2.4 全面性

无人机倾斜摄影通过多镜头协同工作,可同步获取边坡顶面、立面及隐蔽区域的完整三维信息,实现“全要素”监测。其生成的真实纹理三维模型,可直观呈现边坡表面裂缝、滑移面、岩体结构等细节特征,弥补了传统监测方法的信息碎片化问题。结合多期数据对比,可全面分析边坡变形时空演化规律,识别潜在失稳区域。此外,该技术支持与地质雷达、应力监测等数据融合,形成“空-地-深”立体监测体系,为边坡稳定性综合评价提供多维度数据支撑,提升监测结果的全面性与可靠性^[2]。

3 无人机倾斜摄影在公路边坡稳定性监测中的技术应用

3.1 数据采集与多视角影像获取

数据采集与多视角影像获取是无人机倾斜摄影应用于公路边坡稳定性监测的首要技术环节,其核心在于通过多传感器协同实现边坡三维空间信息的全面捕捉。首先,需根据边坡地形特征、监测精度要求及作业环境条件,科学规划无人机飞行参数,包括飞行高度、航向重叠率、旁向重叠率等。飞行高度直接影响影像分辨率与覆盖范围,需平衡数据细节与作业效率;重叠率设置则确保影像间存在足够冗余信息,为后续空三解算提供可靠匹配基础。其次,无人机搭载的多镜头相机系统(通常包含1个垂直镜头与4个倾斜镜头,倾斜角度 40° - 60°) 在飞行过程中同步触发,垂直镜头获取边坡顶面正射影像,倾斜镜头从不同角度捕捉边坡立面及隐蔽区域影像,形成多视角影像数据集。这种多角度拍摄方式有效解决了传统正射影像立面信息缺失的问题,为三维建模提供完整几何与纹理数据。再者,为保障数据质量,需严格控制拍摄环境条件,避免强风、降雨等恶劣天气干扰,同时利用POS系统(GPS/IMU)实时记录每张影像的精确位置与姿态参数,为后续处理提供空间基准。通过上述流程,可高效获取高分辨率、多视角的边坡影像数据,为后续三维建模与变形分析奠定坚实基础。

3.2 三维建模与地形重构

三维建模与地形重构是无人机倾斜摄影在公路边坡稳定性监测中的关键技术环节,其通过多视角影像数据实现边坡几何形态与空间关系的数字化还原。首先,需基于空三解算技术,利用影像间的同名点匹配与POS系统提供的初始外方位元素,自动计算每张影像的精确空

间位置与姿态参数,生成密集的三维点云数据集。这一过程通过多视影像联合平差,消除因拍摄角度差异导致的几何畸变,确保点云数据的空间精度与几何一致性。其次,对点云数据进行滤波与分类处理,通过算法分离地面点与非地面点(如植被、建筑物等),提取边坡表面真实地形信息。在此基础上,结合纹理映射技术,将倾斜影像中的真实色彩与细节信息赋予点云模型,生成带有真实纹理的三维表面模型,直观呈现边坡地形起伏、裂缝发育及岩体结构等特征。再者,基于三维模型可进一步生成数字高程模型(DEM)与数字正射影像(DOM),量化分析边坡坡度、坡向、高程变化等地形参数,并通过多期数据对比,识别地形变形区域与演化趋势。

3.3 变形监测与稳定性分析

变形监测与稳定性分析是无人机倾斜摄影在公路边坡稳定性监测中的核心应用目标,其通过多期三维模型对比实现边坡形变特征的定量提取与稳定性评估。首先,需基于前期构建的高精度三维模型,建立边坡表面关键点空间坐标基准库。通过多时相影像数据采集与处理,生成不同时期的边坡三维模型,并利用特征点匹配或点云配准技术,实现多期模型的精确对齐,消除因拍摄条件差异导致的系统误差,确保变形监测结果的可靠性。其次,通过对齐后的多期模型进行差异分析,提取边坡表面位移矢量场,量化变形幅度与方向,识别潜在滑移面、裂缝扩展等失稳前兆特征。结合边坡地质条件与力学参数,可进一步分析变形机制,判断边坡处于稳定、欠稳定或失稳状态。再者,基于变形监测结果,可构建边坡稳定性评价模型,通过设定变形阈值与预警指标,实现边坡失稳风险的动态预警。同时,将变形监测数据与地质雷达、应力监测等物理参数融合分析,可形成“空-地-深”立体监测体系,提升稳定性分析的全面性与准确性。

3.4 误差控制与精度验证

误差控制与精度验证是确保无人机倾斜摄影在公路边坡稳定性监测中数据可靠性的关键环节,其贯穿于数据采集、处理到分析的全流程。首先,在数据采集阶段,需严格控制无人机飞行参数与相机曝光条件,通过预设飞行高度、重叠率及光照条件,减少因航高波动、影像畸变或光照不均导致的几何误差。同时,利用高精度POS系统(GPS/IMU)实时记录影像位置与姿态参数,结合地面控制点(GCP)校正,可有效消除系统误差,提升空三解算的绝对定位精度。其次,在三维建模过程中,需通过点云滤波、粗差剔除等算法优化模型质量,

减少因植被覆盖、阴影或反射差异导致的噪声干扰。采用多视影像密集匹配技术,可提高点云密度与几何一致性,进一步降低模型空洞或变形风险。再者,精度验证需结合全站仪、水准仪等传统测量手段,对模型关键点坐标、边坡坡度及变形量进行对比分析,计算中误差(RMSE)等指标,评估模型精度是否满足工程需求。通过建立误差传递模型,可量化各环节误差对最终结果的影响,指导技术参数优化^[3]。

4 无人机倾斜摄影在公路边坡稳定性监测中的应用前景展望

4.1 技术创新与发展趋势

未来,无人机倾斜摄影技术将向智能化、自动化与高精度方向加速演进。硬件层面,无人机载荷能力与续航能力将持续提升,支持多传感器集成(如激光雷达、高光谱相机),实现地质结构、植被覆盖与形变信息的同步获取。同时,轻量化设计将拓展其在复杂地形(如高山峡谷)的应用场景。算法层面,深度学习与人工智能技术将深度融入数据处理流程,例如通过卷积神经网络(CNN)自动识别边坡裂缝、滑移面等特征,结合时间序列分析模型预测变形趋势,减少人工干预。此外,边缘计算技术的引入将推动无人机实现实时数据处理,在机载端完成点云配准、模型生成等任务,显著提升监测效率。发展趋势上,技术标准化与模块化将成为重点,通过建立统一的数据格式与处理流程,降低跨平台应用门槛,促进技术普及。

4.2 与其他技术的融合应用

无人机倾斜摄影正与多源技术深度融合,形成综合监测体系。与卫星遥感(如InSAR)结合,可构建“宏观-微观”立体监测网:卫星遥感提供大范围形变数据,无人机倾斜摄影补充高精度局部模型,二者数据融合可实现从区域尺度到单体边坡的分级监测,提升监测覆盖范围与精度。与物联网(IoT)技术联动,无人机可搭载微型传感器(如应力计、含水率传感器),实现“影像-物理参数”交叉验证,例如通过影像分析边坡表面变形,结合传感器数据解析内部应力变化,全面评估稳定性。此外,数字孪生技术的引入将推动监测模式升级,通过将无人机三维模型导入虚拟仿真平台,可模拟不同

工况(如降雨、地震)下的边坡响应,为防护工程设计提供虚拟验证环境。

4.3 应用领域的拓展

无人机倾斜摄影的应用边界正从单一监测向全生命周期管理延伸。在工程建设期,其高精度三维模型可辅助边坡开挖设计,通过模拟不同坡比、支护方案下的稳定性,优化工程参数,降低施工风险。在运营维护阶段,结合AI病害识别算法,无人机可定期自动巡检,生成边坡健康报告,标注裂缝、剥落等病害位置与严重程度,为养护决策提供数据支持。此外,技术正向地质灾害预警、生态修复评估等领域渗透:在地质灾害高发区,通过多期影像对比分析形变速率,结合地质条件预测滑坡、崩塌风险,为防灾减灾提供早期预警;在生态修复项目中,通过对比修复前后的三维模型,量化植被覆盖率、地形起伏度等指标,评估工程效果,指导后续修复策略。同时,技术还可应用于城市边坡监测,例如对山区城市道路、建筑边坡进行长期稳定性跟踪,保障城市安全运行^[4]。

结束语

无人机倾斜摄影技术为公路边坡稳定性监测提供了高效、精准的解决方案,其通过多视角影像获取与三维建模,实现了边坡形变的动态捕捉与量化分析。随着技术创新与多技术融合,该技术正从单一监测向全生命周期管理延伸,覆盖设计优化、运营维护及灾害预警等环节。未来,随着硬件性能提升、算法智能化及5G通信普及,无人机倾斜摄影将构建“空-地-深”立体监测网络,为公路安全运营提供更可靠的技术保障。

参考文献

- [1]胡淼,胡永梁,王路,等.低空经济浪潮下高速公路无人机运营管理探究[J].中国交通信息化,2025,(S1):117-119.
- [2]顾苏楠.无人机技术在桥梁检测中的应用与发展[J].汽车画刊,2024,(10):104-106.
- [3]皮鹤,彭诗怡,曾宪明.基于无人机倾斜摄影测量的高速公路高边坡监管信息提取[J].北京测绘,2023,37(04):620-624.
- [4]田艳.浅析无人机倾斜摄影测量技术及应用[J].华北自然资源,2020,(05):77-79.