引文格式：曹建君,王凤瑞,姚志刚,等. 基于无人机巡检的矿山边坡安全监测与预警[J]. 地理空间信息, 2026, 24(7): 128-131. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.07.025

基于无人机巡检的矿山边坡安全监测与预警

曹建君[1,2]，王凤瑞[3]，姚志刚[1]，高丽君[1]，马永东[1]，王　鹏[4*]
（1. 甘肃省矿业权管理服务中心，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃省基础地理信息中心，甘肃 兰州 730070；3. 武汉大势智慧科技有限公司，湖北 武汉 430223；4. 兰州市勘察测绘研究院有限公司，甘肃 兰州 730070）

摘　要：针对传统边坡监测方法覆盖窄、效率低、成本高的问题，集成无人机机场、实景三维建模与智能识别技术，构建了一套露天矿边坡安全智能监测预警系统。系统通过无人机自动巡检获取影像，云端重建厘米级实景三维模型，并利用改进的特征线提取算法自动解译平台宽度、台阶高度和坡面角等关键参数。通过建立监测参数与设计值的动态比对模型，实现了“红、橙、黄、蓝”4级风险预警。在华南某花岗岩露天矿的应用结果表明，系统单次全域作业周期小于8 h，平台宽度、台阶高度、坡面角的平均监测误差分别为0.23 m、0.39 m和1.54°，预警准确率在92%以上，显著提升了边坡安全监测的自动化、全覆盖与智能化水平，为矿山安全管理提供了高效可靠的技术手段。

关键词：露天矿山；无人机机场；实景三维建模；边坡监测；风险预警
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）07-0128-04

Mine Slope Safety Monitoring and Early Warning Based on UAV Inspection

CAO Jianjun[1,2], WANG Fengrui[3], YAO Zhigang[1], GAO Lijun[1], MA Yongdong[1], WANG Peng[4]
(1. Gansu Provincial Mining Rights Management Service Center, Lanzhou 730070, China;
2. Geomatics Center of Gansu Province, Lanzhou 730070, China;
3. Wuhan Daspatial Technology Co., Ltd., Wuhan 430223, China;
4. Lanzhou Survey and Mapping Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

Abstract: To address the limitations of traditional slope monitoring methods, such as limited coverage, low efficiency and high cost, we integrated UAV airports, 3D real scene modeling, and intelligent recognition technologies to develop an intelligent safety monitoring and early warning system for open-pit mine slopes. The system performs automated data collection via UAVs, reconstructs centimeter-level 3D models in the cloud, and automatically interprets key parameters including berm width, bench height, and slope angle using an improved feature line extraction algorithm. By establishing a dynamic comparison model between monitored parameters and design values, we realized a four-tier (red, orange, yellow, blue) risk early warning mechanism. Application results from a granite open-pit mine in South China demonstrate that the system completes a full-area operation cycle in under 8 h, with average monitoring errors of 0.23 m, 0.39 m, and 1.54° for berm width, bench height and slope angle, respectively, achieving an early warning accuracy rate above 92%. The system significantly enhances the automation, full coverage, and intelligence of slope safety monitoring, providing an efficient and reliable technical solution for mine safety management.

Key words: open-pit mine, UAV airport, 3D real scene modeling, slope monitoring, risk early warning

露天开采是我国矿产资源开发的主要方式之一。随着开采深度与规模的不断加大，由复杂地质条件、不当施工和环境影响引发的边坡失稳问题日益突出，严重威胁人员生命与财产安全[1]。2023年内蒙古阿拉善露天煤矿发生的重大边坡坍塌事故，再次以惨痛代价警示了边坡安全常态化、精准化监测与预警的极端重要性[2]。当前，露天矿边坡稳定性监测技术主要包括大地测量法、GNSS、测量机器人、地基合成孔径雷达（GB-InSAR）、三维激光扫描等[3-7]。这些方法虽各有优势，但普遍存在局限性[8]：GNSS与测量机器人属于点式监测，难以全面反映边坡整体变形；GB-InSAR设备昂贵，监测视角受限，且易受大气干扰；人工三维激光扫描效率低下，难以适应大范围、高频次监测需求[9-11]。因此，开发一种覆盖广、效率高、成本低且

项目来源：甘肃省自然资源厅科技创新资助项目（202208）。
第一作者简介：曹建君（1973—），博士研究生，正高级工程师，研究方向为遥感与地理信息系统在自然资源管理方面的应用，E-mail：gschj4568@163.com。
通信作者：王鹏（1970—），本科，高级工程师，研究方向为测绘地理信息生产技术在矿山监测方面的应用，E-mail：wangpeng.2009nian@163.com。

能直观反映边坡空间形态变化的监测技术，已成为智慧矿山建设的迫切需求。

近年来，无人机倾斜摄影测量技术因其灵活、高效、高分辨率的优势，在边坡监测领域得到广泛应用[12-14]。然而，现有研究多集中于利用单次飞行数据进行变形量测或模型重建，在实现常态化、自动化监测流程，以及从三维模型到安全参数的智能解译与预警方面，尚未形成完整、成熟的技术体系[15]。基于此，本文创新性地将无人机机场（自动化部署）[16]、云端实景三维建模（高效处理）与AI智能识别算法（精准解译）三者深度融合，旨在构建一套完整的露天矿边坡安全智能监测与预警系统。

1　研究方法

研究区位于某丘陵矿区，地势北高南低，自东、西两侧向中部倾斜，形成狭长槽形地带。矿山开采矿种为建筑用花岗岩，方式为露天开采，矿区面积约为2.51 km^2，开采最低标高为+30 m，+366.20~+105 m为山坡露天开采，+105~+30 m为凹陷露天开采。采用自上而下水平分层台阶式开采，设计台阶高度为7.5~15 m，边坡角为45~60°。矿区矿体及其围岩致密坚硬，整体稳固，但上部强—中风化花岗岩厚度大，边坡高度大，矿区的工程地质条件为中等。

无人机机场设备选型需综合考虑矿区地形和面积、续航能力、抗风性能、部署条件和维护便捷性等因素。无人机机场部署完成后，利用无人机定期巡检采集可见光影像数据，建立露天矿山实景三维模型；然后基于三维模型识别矿山边坡平台和台阶坡面，进而计算平台宽度、台阶高度和台阶坡面角等关键参数；最后结合矿山边坡安全设计参数，对比分析指定区域的边坡形态和设计参数之间的差异，按差异程度划分不同等级，实现对边坡风险的分级预警，提供全面、准确的边坡安全监测。

1.1　台阶结构智能识别

为实现边坡平台、台阶坡面的自动提取，针对传统人工或规则方法难以高效识别复杂台阶结构的问题，本文引入AI深度学习技术实现台阶的自动语义理解。首先从三维模型中计算数字法向模型，以地表点法向量为几何特征，增强平台（法向近垂直）与坡面（法向倾斜）的可分性；再通过人机交互方式对典型特征区域进行精细标注，构建包含“平台”、“坡面”等类别的专用分割数据集；然后训练得到面向露天矿场景的台阶分割模型；最后基于分割结果自动提取平台与坡面交界线，并结合法向方向、高程梯度等几何特征，智能判别边坡平台、台阶坡面。

1.2　边坡安全参数分析

边坡安全监测参数是露天矿山边坡安全监测预警的基础。平台宽度、台阶高度、边坡坡面角等边坡安全监测参数见图1。平台宽度W_{step}为台阶上部平台两侧轮廓线之间的水平距离。台阶高度H为台阶上部平台与台阶下部平台之间的垂直距离，台阶坡面角α为台阶坡面与水平面之间的夹角。

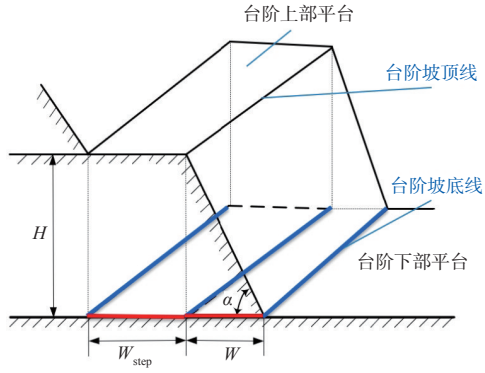
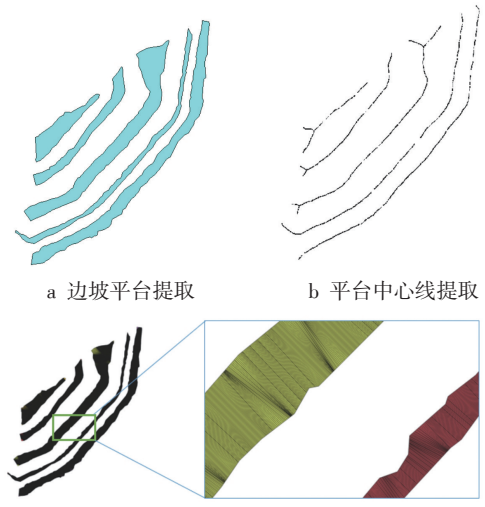


图1　边坡安全监测参数示意图

通过无人机采集数据并建立矿山三维模型后，基于该三维模型识别出台阶平台面，并提取平台面的中心线，平台面上垂直于中心线的最短距离即为平台宽度（图2）。



a 边坡平台提取　　b 平台中心线提取

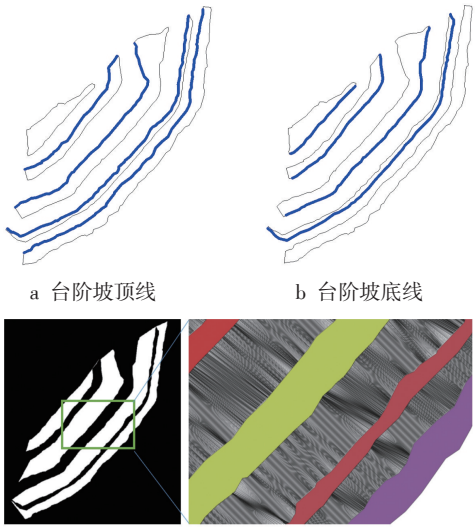
c 宽度线示意图

图2　平台宽度分析

基于三维模型提取台阶坡顶线、台阶坡底线，并组合形成台阶坡面；然后提取坡面的中心线，对于坡面中心线上的每个点，取垂线与坡面相交，得到一系列高度线和角度线；最后找到对应的坡顶点、坡底点即可计算高度和坡面角（图3）。

1.3　分区分级预警

在矿山开采过程中，由于矿区的地质条件存在差异，各区域的边坡宽度、高度和坡面角等安全设计参数也有所不同。为提高预警判别的准确性，确保预警判别规则能够更好地适应各区域的实际情况，根据安



a 台阶坡顶线　　b 台阶坡底线

c 台阶高度与坡面线

图3　台阶高度与坡面角分析

全设计参数对监测区进行分区处理，作为后续预警分析的基础。在对监测数据进行预警分析时，依据各区域特定的安全参数进行风险识别。根据边坡宽度、高度和坡面角的实际测量值逼近或超出设计值的程度，将风险等级划分为红、橙、黄、蓝4级，从而提供直观的风险标识，有助于矿山管理人员及时了解风险程度。

2　研究结果与分析

2.1　边坡监测与预警结果

试点矿山面积约为2.5 km^2，无人机完成全域航飞数据采集需3架次共约3 h，数据传输和完成单次建模需约4 h，模型建立后自动进行边坡参数分析。该矿区边坡监测预警分为红、橙、黄、蓝4级，蓝色预警定义为边坡监测参数接近但未超出设计值10%的范围，黄、橙、红分别为超出设计值5%、10%、20%。以4 m平台宽度为例，红、橙、黄、蓝4级预警值范围分别为0~3.6、3.6~3.8、3.8~4.0、4.0~4.2 m。平台已在试点矿山连续稳定运行6个月，矿区边坡监测预警分级结果见图4。

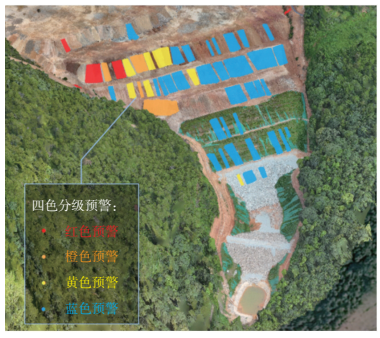


图4　排土场边坡风险分级预警结果

2.2　边坡安全监测精度评价

为验证监测预警结果的可靠性，选用RTK开展现场实测，以实测数据计算的坡面角、平台宽度和台阶高度结果作为参考值，将平台监测预警输出结果与RTK实测数据进行对比，以平台监测结果与参考值的差值的绝对值作为误差指标。以坡面角监测为例，共测量了10组点位，测量结果如表1所示（N表示该组点位未出现预警），其中6、7、8组实测的坡面角未超限（角度设计限值为45°，蓝色预警限值为40.5°），算法也未给出超限预警，证明系统能够正确识别处于安全范围内的台阶坡面角且没有出现误报；1、2、3、4、5、9、10组数据的实测点位与参考值之间误差的均值和标准差分别为1.54°和0.99°，说明该平台在预测台阶坡面角时表现出较高的精度和稳定性。

表1　坡面角结果对比/(°)

序号	RTK实测结果	平台监测结果	误差
1	58.95	56.54	2.41
2	58.12	55.93	2.19
3	56.39	55.93	0.46
4	55.94	57.99	2.05
5	60.62	57.99	2.63
6	39.81	N	–
7	36.76	N	–
8	38.12	N	–
9	40.34	40.72	0.38
10	40.40	41.05	0.65

同样对平台宽度和台阶高度结果进行对比分析，结果如图5所示，平台宽度与参考值之间的误差均值为0.23 m，标准差为0.32 m；台阶高度的误差均值为0.39 m，标准差为0.20 m。监测结果同样具有较高的精度，能满足矿山大范围、常态化边坡安全监测的实际需求。

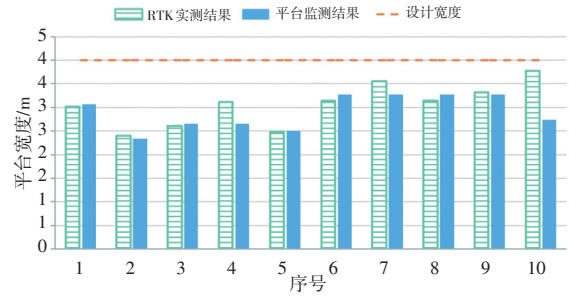


图5　平台宽度结果对比

3　结　语

本文构建了一套完整的露天矿边坡安全监测体系和安全预警方法，实现了自动化数据采集、智能化边坡参数分析与风险分级预警。工程应用表明，该系统监测效率高（全域周期<8 h），参数解译精度可靠（坡面角误差<1.6°，平台宽度误差<0.25 m），预警准确率高（>92%），能显著提升边坡安全管理的主动性、覆盖面和智能化水平。相较于传统的点监测方式，本文

方法不仅覆盖范围更广、灵活性更强，而且能够与边坡安全设计参数进行对比，反映边坡整体的空间变化情况，加强了对开采过程边坡安全管控的能力，及时发现并预警未按设计施工导致的边坡安全风险。

随着技术的不断革新和应用经验的积累，该智能巡检系统的技术框架经适应性调整后，可推广至水电工程、交通线路、地质灾害体等领域的边坡安全监测，具有广阔的应用前景。未来研究将聚焦于多源数据融合、智能算法升级与动态预警模型构建，以进一步提升系统的全时域、全天候适应能力与预警前瞻性。

参考文献

[1] 张亦海,牛西安,马海涛,等. 露天采场高陡边坡监测技术研究现状与发展趋势分析[J]. 矿产勘查,2024,15(增刊1):154-158

[2] 中华人民共和国应急管理部. 内蒙古阿拉善新井煤业有限公司露天煤矿“2·22”特别重大坍塌事故调查报告公布 [EB/OL]. (2023-08-29)[2026-01-29] https://www. mem. gov. cn/xw/bndt/202308/W020240204676132623855. pdf.

[3] 秦秀山,张达,曹辉. 露天采场高陡边坡监测技术研究现状与发展趋势[J]. 中国矿业,2017,26(3):107-111

[4] 吴易航,张士海. 德兴铜矿大型露天边坡的监测技术[J]. 采矿技术,2024,24(3):124-128

[5] 陈兰兰,夏益强,肖海平,等. 露天矿边坡稳定性监测方法研究现状及进展[J]. 测绘通报,2022(5):7-13

[6] 王旭,孙海,潘懿,等. 露天边坡雷达监测预警技术应用研究[J]. 矿业研究与开发,2021,41(7):56-60

[7] 程林. 高陡边坡在线监测系统在南泥湖露天钼矿中的应用[J]. 黄金科学技术,2024,32(2):366-376

[8] 张劲松,吴军,王星杰. 地基合成孔径雷达在矿区边坡监测预警应用研究[J]. 工程勘察,2021,49(12):59-62

[9] 丁震. 露天煤矿边坡实时监测技术应用对比分析[J]. 煤炭科学技术,2017,45(增刊1):189-192

[10] 吴星辉,璩世杰,马海涛,等. 边坡雷达系统在露天矿边坡监测中的应用[J]. 金属矿山,2018(2):188-191

[11] 何维,林永春,李永昌. 拖车式合成孔径边坡雷达监测站在金属露天矿山边坡监测预警中的应用[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(增刊1):99-103

[12] 万忠明,王亚文,范子义. 无人机倾斜摄影技术在边坡监测中的应用[J]. 测绘通报,2022(6):170-172

[13] 宿文松. 基于无人机倾斜摄影测量的露天矿三维建模及应用[D]. 邯郸:河北工程大学,2023

[14] 吴光军,黄威,龙俊鹏,等. 光伏电站无人机巡检技术及应用[J]. 水电与新能源,2024,38(4):1-5

[15] 武杨. 地质灾害风险评价视角的国土空间规划优化方法探讨[J]. 地理空间信息,2024,22(12):7-10

[16] 李军. 金属非金属露天矿山边坡安全管理建议[J]. 金属矿山,2010(10):172-175

（上接第127页）

参考文献

[1] 实景三维地理信息元数据规范: DB 32/T 4156-2021[S].

[2] 燕琴,翟亮,刘坡. 实景三维中国建设关键技术研究综述[J]. 测绘科学,2023,48(7):1-9

[3] 陈军,田海波,高鉴,等. 实景三维中国的总体架构与主体技术[J]. 测绘学报2025,54(4):636-649

[4] 苏光日,刘博,张学之. 贴近摄影与倾斜摄影测量技术在宗教活动场所三维建模的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(增刊1):260-263

[5] 王宏昌,吴琪,徐明策,等. 基于垂直航空摄影的地形级实景三维地理场景制作[J]. 测绘通报,2024(增刊1):35-38

[6] 赵伟山,李治明,胡天明,等. 基于倾斜摄影空地一体单体化建模技术的研究[J]. 地理空间信息,2022,20(6):102-105

[7] 毛浩杰,梁文彪,鲍秀武. 一种融合多源影像的精细化三维建模方法[J]. 自然资源信息化,2024(2):50-56

[8] 周保兴,王兵,张航钒,等. 融合多源空间数据的复杂场景真三维模型构建方法[J]. 测绘通报,2024(4):13-17

[9] 车德福,陈峰,马保东,等. 倾斜摄影三维模型中水域空洞的自动识别与修复[J]. 桂林理工大学学报,2024,44(3):476-480

[10] 丁乐乐,刘艳飞,孟凡效,等. 深度学习倾斜三维模型车辆去除算法[J]. 测绘通报,2023(3):94-98

[11] 朱立波,黄文骞,石志远,等. 倾斜摄影三维建模及不同软件修模效果分析[J]. 地理空间信息,2023,21(10):104-107

[12] 陈方圆,于洪雨,李雪杉,等. 基于倾斜摄影测量技术的城市实景三维模型制作与质量分析[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(增刊1):222-223

[13] 闫昶,刘文杰,孙永康. 实景三维模型在房屋信息化管理中的应用[J]. 城市勘测,2024(1):27-30

[14] 李晓,连蓉,罗鼎,等. 无人机倾斜摄影及实景三维建模技术在应急测绘中的应用:以巫溪6·23湖塘滑坡为例[J]. 测绘地理信息,2024,49(6):107-110

[15] 刘鹏,王芳,赵焕祯,等. 基于镶嵌线的实景三维动态更新及场景融合技术研究[C]//第十六届智慧城市大会论文集,2023

[16] 吴晓章,王磊,刘敏,等. 多维实景模型动态更新和展示平台建设技术研究[J]. 测绘通报,2022(增刊2):291-296

[17] 关于印发新型基础测绘与实景三维中国建设技术文件(1-4)的函[EB/OL]. (2021-12-27)[2025-03-17]. https://gi.mnr. gov. cn/202112/t20211227_2715842. html

[18] 闫昶,宋伟凯. 面向多源数据的开源三维GIS关键技术研究[J]. 地理空间信息,2024,22(6):39-42