

无人机技术在超高陡边坡危岩体半自动识别中的应用

程雨柯, 李亚虎, 夏金梧, 侯 赠, 陈 娜

Application UAV technology semi-automatic identification dangerous rock masses on ultra-high steep slopes

CHENG Yuke, LI Yahu, XIA Jinwu, HOU Zeng, and CHEN Na

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202310028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于无人机航测的丹霞地貌区危岩结构面识别与三维裂隙网络模型

Identification of dangerous rock structural planes and fracture network model in Danxia landform based on UAV aerial survey: A case study at Simianshan scenic area of Chongqing

熊开治, 任志远, 赵亚龙, 杨忠平, 张黎健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 62–69

无人机载LiDAR和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用

The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards

贾虎军, 王立娟, 范冬丽 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 60–65

控制点布设方案对无人机精度测量的影响及其应用

Influence of control point number on UAV low-altitude photogrammetry and its application: A case study in subsidence monitoring of a tailing dam area in northwestern China

戴嵩, 魏冠军, 梁斌 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 113–120

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞, 甘淑, 李绕波, 胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91–100

地质灾害无人机调查数据管理云平台建设

马娟, 张鸣之, 韩冰, 黄, 石爱军, 薛跃明 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(1): 100–105

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 黄波林, 张枝华, 胡明军 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 105–112



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202310028

程雨柯, 李亚虎, 夏金梧, 等. 无人机技术在超高陡边坡危岩体半自动识别中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 143-154.

CHENG Yuke, LI Yahu, XIA Jinwu, et al. Application UAV technology semi-automatic identification dangerous rock masses on ultra-high steep slopes[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 143-154.

无人机技术在超高陡边坡危岩体半自动识别中的应用

程雨柯^{1,2,3}, 李亚虎^{1,2}, 夏金梧^{1,2}, 侯 赠^{1,2}, 陈 娜³

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430011; 2. 水利部长江勘测技术研究所, 湖北 武汉 430011; 3. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 在新疆山区开展危岩体勘察时, 由于工程区存在复杂且陡峭的山体, 传统人工勘察危岩体的方案往往受限。为了有效地提高危岩体调查的效率与自动化程度, 本研究提出了一种基于无人机的超高陡边坡危岩体半自动勘察技术。将无人机贴近摄影测量技术与精确的仿地飞行路线规划相结合, 获取超高陡边坡精确三维点云模型; 应用 CloudCompare 软件点云剖分工具结合危岩体突出于边坡表面的形态特征对异型滑移式块体进行语义分割; 并通过分析异型滑移式块体的三维特征, 实现对危岩体的定性分析。将上述理论方法应用于玉龙喀什水利工程左岸超高陡边坡坝址, 在试验区提取出了 4 块危岩体。所有危岩体稳定性系数(K)均低于 0.9, 平均体积均在 2 000 m³ 左右, 最大高差在 7~11 m。危岩体的空间位置分布和三维特征与现场人工勘测的基本一致。试验表明, 结合危岩体特征的高精度边坡点云模型能有效识别危岩体, 提高调查效率并解决人工数据模糊的问题, 对高陡边坡的危岩体评估具有实际应用价值。

关键词: 无人机; 高精度点云; 异型滑移式块体; 危岩体

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)01-0143-12

Application UAV technology semi-automatic identification dangerous rock masses on ultra-high steep slopes

CHENG Yuke^{1,2,3}, LI Yahu^{1,2}, XIA Jinwu^{1,2}, HOU Zeng^{1,2}, CHEN Na³

(1. Yangtze River Survey, Planning, Design and Research Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430011, China; 2. Yangtze River Survey Technology Research Institute of the Ministry of Water Resources, Wuhan, Hubei 430011, China; 3. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China)

Abstract: In the mountainous regions of Xinjiang, traditional manual survey methods for dangerous rock masses are often restricted by the complex and steep terrain. To improve the efficiency and automation of dangerous rock masses surveys, this study proposes a semi-automatic technique using unmanned aerial vehicle (UAV) for high and steep slopes. This methodology integrates close-range photogrammetry with precise terrain-following flight path planning to generate accurate 3D point cloud models of ultra-high steep slopes. Considering the distinctive shapes of dangerous rock masses protruding from the slope

收稿日期: 2023-10-21; 修订日期: 2024-01-08

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009038); 新疆和田玉龙喀什水利枢纽工程专项科研实验(YLKS-SW-2022-016); 爆破工程湖北省重点实验室开放基金(BL2021-21)

第一作者: 程雨柯(1999—), 男, 湖北仙桃人, 土木水利专业, 硕士研究生, 主要从事岩质边坡危险特征地质勘察研究。

E-mail: cyk173628720392022@163.com

通讯作者: 陈 娜(1989—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事边坡安全防控、土木建筑的智能监测与检测、三维模型重构等智能土木方向的研究。E-mail: cn_research@hbut.edu.cn

surfaces, this research leveraged CloudCompare software's point cloud segmentation tool to perform semantic segmentation of these profiled blocks. Furthermore, a qualitative assessment of dangerous rock masses is achieved through an analysis of their three-dimensional features. This methodology was applied to the ultra-high slope dam site on the left bank of the Yulong Kashi Hydropower Project. In the test area, four dangerous rock masses were identified (all with stability coefficients lower than 0.9, average around 2000 m³ in volume, with height differences ranging from 7-11m), aligning closely with manual field surveys. The research shows that high-precision slope point cloud models, integrated with rock body characteristics, can effectively detect dangerous rock masses, enhance survey efficiency, and mitigate the inaccuracies associated with manual data collection. This approach holds significant practical value for assessing dangerous rock masses on ultra-high steep slopes.

Keywords: unmanned aerial vehicle; accurate point cloud; profiled block; dangerous rock masses

0 引言

高陡边坡上的危岩区域是水利水电工程建设中常见工程问题之一,其稳定状况事关水利枢纽工程建设和运行安全^[1-2]。对边坡岩体进行地质勘察,获取边坡岩体的地质参数,是危岩体研究的首要工作。传统的地质勘察主要采用的是人工接触式方法,例如用皮尺和地质罗盘测量^[3-5]。随着建设工程规模的不断增大,高陡边坡地质环境变得更加险峻和复杂,由于调查人员的可及范围有限,地质勘察工作的展开不仅效率低下,而且获取的地质参数不完整。传统的接触式调查已经难以满足实际工程的高效化和数字化要求。

在过去的 20 年中,许多研究人员采用了非接触式数据采集方法来解决这一问题^[6]。Bitenc 等^[7]将优化后的激光雷达测量技术(light laser detection and ranging, LiDAR)应用于边坡地形测量数据采集,提高了边坡数据采集的精度;Salvini 等^[8]结合直升机摄影测量技术和地面激光扫描技术(terrestrial laser scanning, TLS)进行了边坡岩石块体和节理系统的详细地理信息绘制;Kumhálová等^[9],贾虎军等^[10]通过机载激光扫描和倾斜摄影技术,获取精准的地质灾害隐患点、精细的地形地貌勘测数据,解决了设备难以进入的陡峭地形模型数据采集的问题。然而,激光扫描设备即便借助直升机等多地形工具,在进行高差过大,时限较短的数据采集任务时仍然显得笨重,难以满足需求。

近年来,为了满足快速获取复杂边坡表面特征的需求,成本更低、灵活方便、不受地形限制的无人机得到了一定的应用,它可以解决复杂边坡死角模型难以采集的问题。Niethammer 等^[11],Riquelme 等^[12],Zeybek 等^[13]采用无线电控制小型四旋翼无人机拍摄完整边坡滑坡的图像,进一步建立高分辨率的数字地形模型,实现了更快速获取坡面点云数据;赵婷婷等^[14],梁京涛等^[15],黄发明等^[16]通过无人机倾斜摄影技术(unmanned aerial

vehicle oblique photography technology, UAVOP)与多图像重建技术(structure from motion, SfM)采集复杂边坡表面点云模型,实现了对紧急、复杂的边坡数据采集任务的快速反应。基于无人机的数字摄影测量技术已经足以表现复杂边坡表面的详细形态,但这些研究对精确模型的利用率仍然较低,尚未充分地通过精确点云对其所反映的边坡隐蔽、细微的安全隐患(如危岩体)进行有效的勘察。

采用无人机开展高陡边坡的安全勘察研究时,由于数据采集方案单一,设备效率、模型精度较低或高精度模型的利用率较低^[17-19],尤其在高陡边坡中,由于畸变问题,会使得模型结果与实际情况产生一些偏差。为解决这一问题,本研究提出了一种基于无人机点云的超 500 m 高位边坡孤立单平面滑移式危岩体半自动提取的新方法,实现了以下三项关键的目标:

(1)基于免像控的无人机贴近摄影测量技术,设计了一套高陡边坡表面点云模型的测量方法,并构建了三维坐标精度为±10 cm、影像分辨率为 1 cm 的试验区精细边坡三维点云模型。

(2)基于高陡边坡点云模型提取了异型滑移式块体。利用异型滑移式块体突出于边坡表面的细微特征,手动分割确定了异型滑移式块体的位置和其具体形态。

(3)根据异型滑移式块体模型边界点云的密度特征拟合了后壁平面。此外,自动计算了异型滑移式块体模型各类特征值,并进一步得出稳定性系数(K)以确定块体中的危岩体。最后,结合危岩体的方量和最大高差,对危险岩体进行了危害性评价。

1 研究区概况

玉龙喀什水利枢纽工程(图 1)是新疆和田玉龙喀什河山区河段的控制性水利枢纽工程,水库设计最大坝高 230.5 m,总库容 5.36×10^8 m³,工程主要有最大坝高 233.5 m 的面板堆石坝、“表、中、深”泄洪隧洞以及引



图 1 试验区三维地形概览

Fig. 1 Three-dimensional terrain overview of the test area

水发电系统等组成, 属大(2)型Ⅱ等工程。

试验区为工程左岸坝址区的高位边坡, 最大高差超过 500 m。边坡地形陡峭, 坡面植被不发育, 山体的表面覆盖有大量灰尘, 边坡表面并未出露明显的结构面。考虑施工场地狭窄、施工周期长, 坝基边坡开挖对上部高位边坡扰动大, 而坝址区两侧自然高位边坡存在大量危岩体和不良地质块体, 在施工期构成重大安全隐患。亟须对坝址区超高位边坡进行危岩调查和稳定性分析。

经过人工初步调查, 勘察到可能的危岩体多为平面滑移式危岩体(见 图 2)。岩体突出于边坡表面, 且与边坡斜面之间存在有明显的连接边缘。本研究对试验区表面此类孤立的单平面滑移式危岩体进行进一步的调查。

2 技术方法

针对试验区高边坡广泛分布平面滑移式危岩体的情况, 本文设计了一套从边坡点云模型数据采集到危岩体半自动识别及评价的边坡危岩体完整的地质勘察方法(图 3)。程序主要由 Python 语言编写。该识别方法包括以下四个步骤:

- (1)数据采集阶段: 采用无人机贴近摄影测量结合精细的仿地飞行航路设计、智能建模等多种技术手段, 获取高边坡精细地表 LAS 点云。
- (2)孤立异型滑移式块体点云模型提取阶段: 依据边坡突出块体边界特征将孤立的异型滑移式块体点云模型分别手动分割出来, 并对模型进行点云下采样。
- (3)滑移破坏后壁平面提取阶段: 应用点云的密度特征自动提取突出块体与边坡连接的边界, 此边界可近似为该块体的滑移破坏的平面的边界。

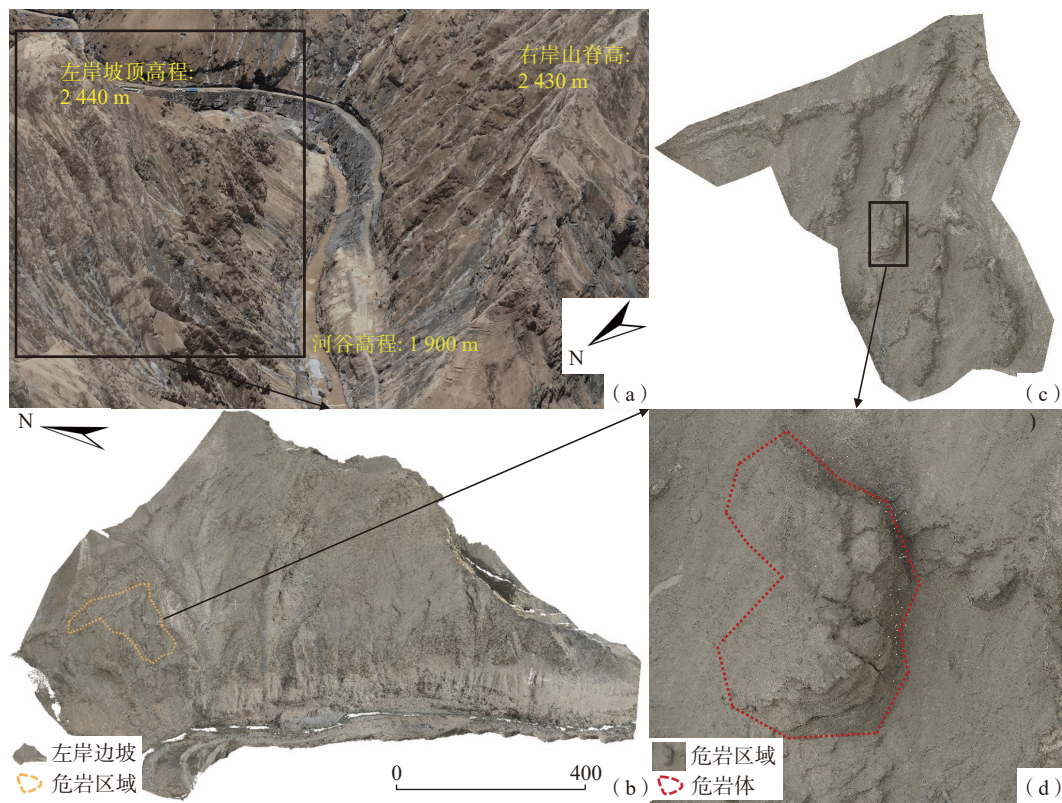


图 2 人工对左岸边坡的典型危岩体的初步调查

Fig. 2 Preliminary investigation of typical dangerous rock masses on the left bank slope by manual methods

注: (a)为试验区三维地形; (b)为试验区左岸边坡; (c)为左岸边坡样本区; (d)为人工调查的典型危岩体。

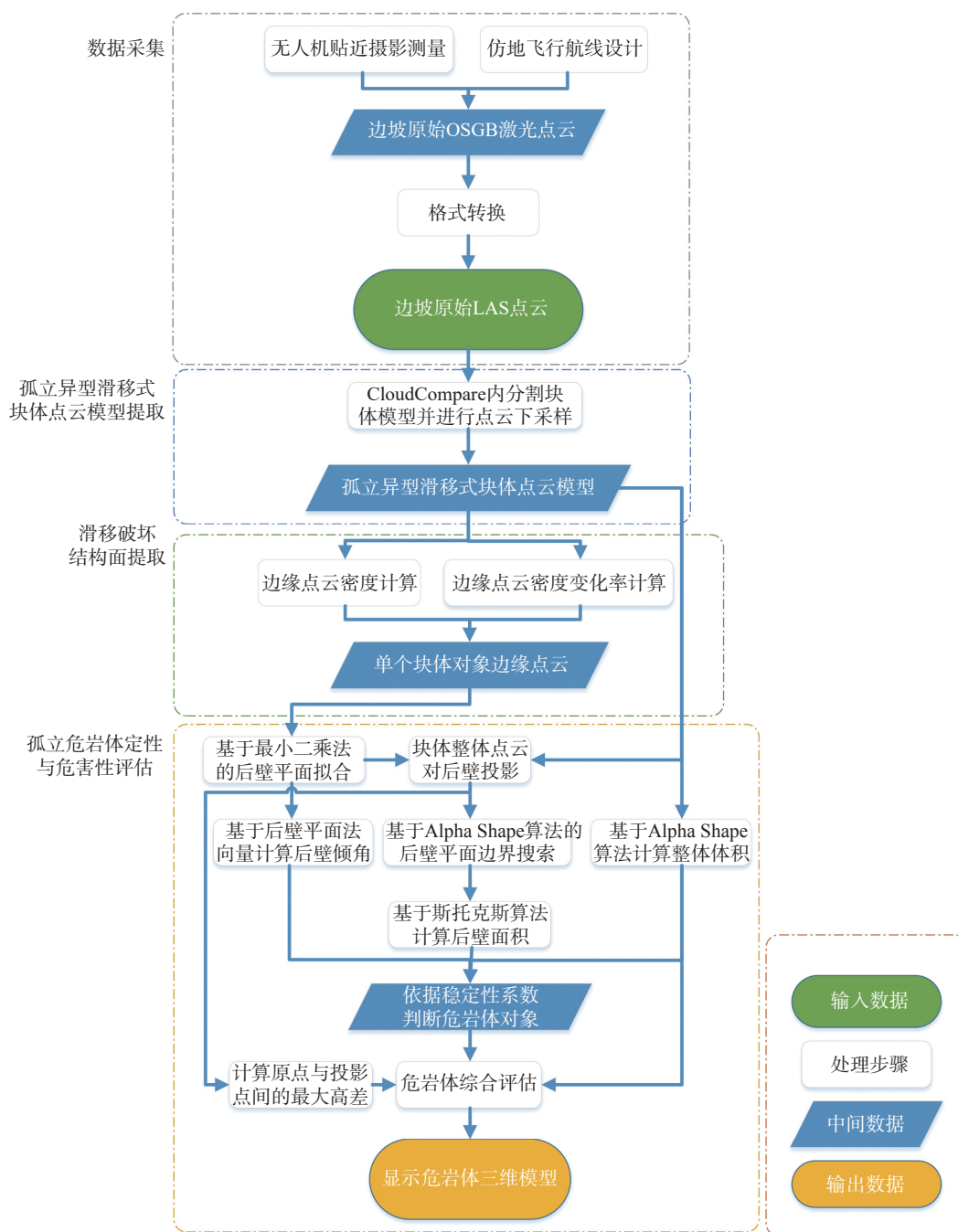


图 3 研究技术方案

Fig. 3 Research technical scheme

(4)孤立危岩体定性 & 危害性评估阶段:应用最小二乘法将边界点云拟合到后壁平面上,计算后壁倾角^[20]。使用原块体点云和对后壁投影点之间的欧式距离计算最大高度差。利用 Stokes 公式和 Alpha Shape 算法确定投影点的平面边界,计算后壁平面的面积和块体点云体积。以上特征参数将用于定性孤立的危岩体(依据稳定性系数)。对于已经定性的危岩体,依据其体积与最大高差依次对所有危岩体的危害性进行进一步的评价。

2.1 数据采集及异型滑移式块体识别

本文使用的数据是新疆玉龙喀什水利工程左岸斜坡的有序点云数据,考虑到试验区山、谷、沟、梁交错的特殊地形,本文采用无人机贴近摄影测量^[21-23]和全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)实时动态差分定位技术^[24]相结合的方法,综合利用免像控的无人机摄影测量技术、精细化地面模拟航路设计、智能建模等多种技术手段,获取 500 m 以上边坡的精细

化地表信息。

本研究使用大疆 M300 RTK 无人机设备搭载 Zenmuse P1 全画幅云台相机(见图 4)。无人机集成了双 GNSS 导航定位设备, 通过集成的网络 RTK 模块, 获取附近 CORS 站提供的实时动态差分信息, 可为无人机提供实时厘米级定位数据, 满足了免像控标准。

在对试验区模型采集的应用中, 本研究设计的基于精细仿地飞行路线的贴近摄影测量技术方法主要采用三种综合航摄方案。

(1)初始飞行和航线规划(见图 5): 采用航天飞机雷达地形测绘(shuttle radar topography mission, SRTM)



图 4 无人机设备

Fig. 4 UAV equipment

采集 30 m 分辨率数字高程模型(digital elevation model, DEM), 初始飞行航路较高。通过空中三角测量, 可以获得调查区域的图像, 并生成初始数字地表模型(digital surface model, DSM)^[25]。

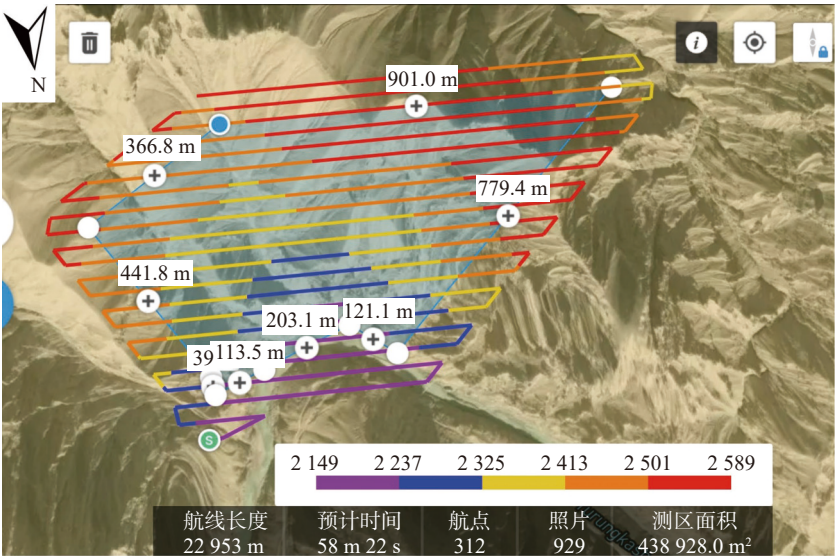


图 5 第一张正射影照片路线规划(分辨率 2.5 cm)

Fig. 5 Route planning of the first orthophoto photograph (resolution 2.5 cm)

(2)二次精细仿地飞行规划与飞行(见图 6): 基于初始模型 DSM 高程数据, 规划精细地面模拟飞行路线, 并为该路线建立多组使用精细仿地飞行的镜头拍摄角度。为了获得高坡度倾斜摄影测量图像, 对近似直立的

坡面使用了贴近摄影测量技术。通过无人机三角测量和建模, 生成测量区倾斜摄影测量 OSGB 模型^[26]。考虑到试验区边坡沟梁相间的地形, 精细的仿地飞行路线沿地形梯度呈上下方向设置。

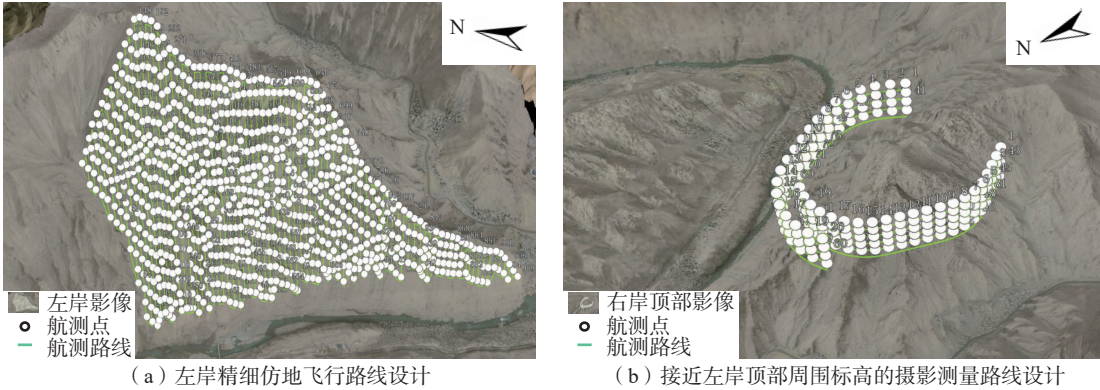


图 6 精细的仿地飞行路线规划

Fig. 6 Detailed terrain-following flight path planning

(3)三次手控飞行:检查 OSGB 模型存在的空洞和纹理拉伸的区域。如果出现这种情况,必须对关键区域进行额外的手动飞行拍摄。补拍完成后,再次进行空中三角测量和建模,生成测量区域完整的真实场景,即为最终的三维模型。针对研究区倒悬岩体等特殊场景,采用 -10° 等特殊视角和手控飞行的拍摄方案。

DJI Maps 被用于无人机三维模型建模,采用基于计算统一设备架构(compute unified device architecture, CUDA)的智能重构算法^[27],并将场景图文件格式模型(open scene graph binary, OSGB)转换为二进制 LAS 点云模型(见图 7)。

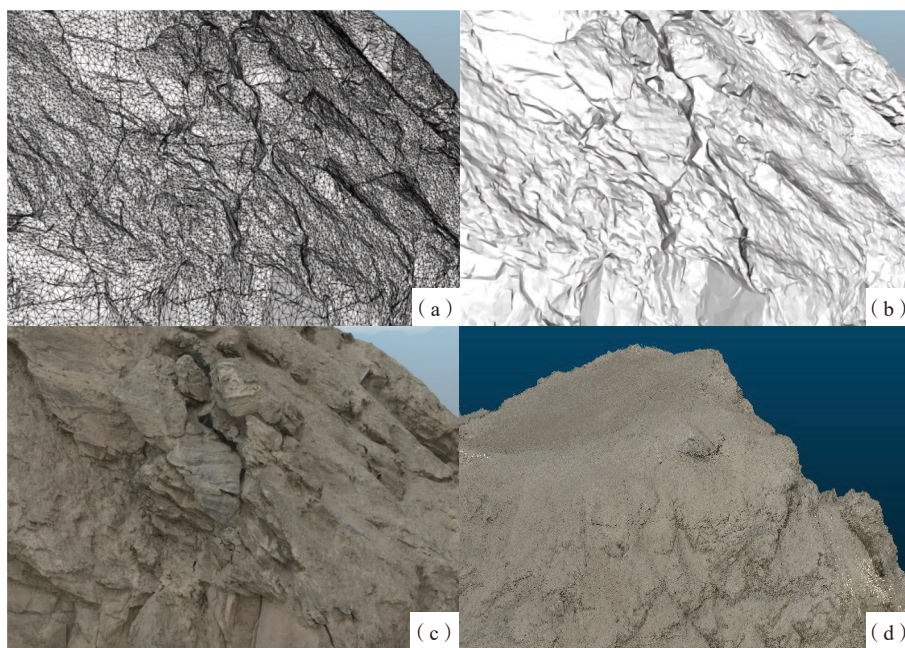


图 7 无人机三维模型建模并生成点云模型

Fig. 7 UAV three-dimensional modeling and point cloud model generation

注: (a)为构造三角网 TIN; (b)为生成模型白膜; (c)为模型纹理映射; (d)LAS 点云格式转换

异型滑移式块体在边坡表面表现为一块完整的突出块体。对于边坡的点云模型,其与边坡接触处通常为一圈曲率较大的闭合点云。依据此特征在软件 Cloud-Compare 内使用点云切分工具将孤立的异型滑移式块体点云模型进行提取。此外,为了减小后续的计算量,使用滤波工具进一步进行点云下采样。

2.2 块体失稳平面自动提取

2.2.1 后壁平面边界点云

本研究认为,异型滑移式块体点云的边界近似处于滑移的后壁平面上,依据边界点云的密度与密度变化率特征进行后壁平面边界的提取。对于表面均匀的点云模型来说,处于模型边缘的点云一般密度(在某范围内的点云个数)相对较小^[28-30]。此外,该处的点云在某个范围内密度会明显的下降。

对于单独的异型滑移式块体点云,构造点云的 K 邻近(K-nearest neighbor, KNN)搜索结构,对每个点查找其搜索范围内的点云密度。对于点 P1,当该点点云密度较小,在 R1 范围内的点数为 8(该点的密度)或者

在一定的范围 R2 内,存在密度远大于它的点 P2(密度为 19)时,本研究认为其为一枚后壁平面的近似边界点(见图 8)。

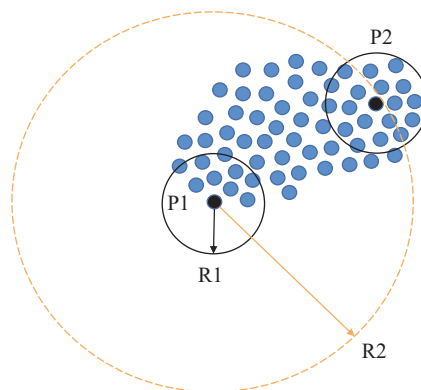


图 8 边界点云密度与密度变化率

Fig. 8 Boundary point cloud density and density change rate

2.2.2 后壁平面拟合

异型滑移式块体边界点云可近似拟合于空间中的一块平面。考虑到试验区表面被大量的灰尘覆盖,边坡

模型并未出露明显的结构面,则该平面被认为是当前异型滑移式块体可能的滑动结构面(后壁平面)。图 9(a)中蓝色的点云为通过边界密度分析得到的后壁平面边界点,灰色点为该块体的其他点云。利用最小二乘法将边界点拟合为图 9(b)中的黑色网格平面,该平面将为异型滑移式块体点云模型的各种特征计算提供依据。

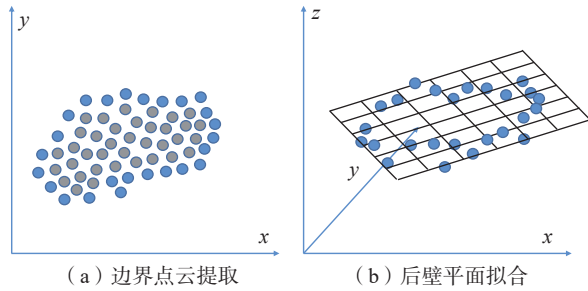


图 9 异型滑移式块体的后壁平面提取

Fig. 9 Extraction of the rear wall plane of profiled block

2.3 孤立危岩体定性分析

2.3.1 三维特征估算

将异型滑移式块体点云整体向后壁平面进行投影,并对其进一步进行 Alpha Shape 边界搜索^[31],得到平面的边界点索引。该索引方向对应的边界点逆时针排列。对边界点利用 Stokes 的三维有向平面面积积分公式进行积分^[32],得到后壁平面的面积。后壁平面多边形 A 有 N 个顶点 $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_N$ 呈逆时针方向排列,形成一个环 L 顶点坐标表示为 $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$, 如图 10(a) 所示。可求得其面积为 $S_A = \iint_A d_s$ 。

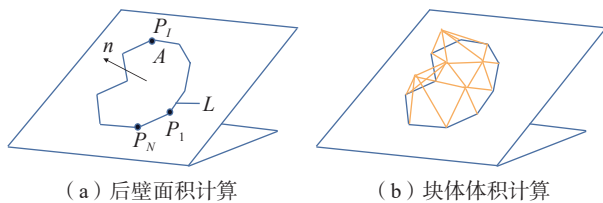


图 10 异型滑移式块体的后壁面积与块体体积计算

Fig. 10 Calculation for the rear wall area and block volume of profiled block

面积由 Stokes 公式求得:

$$\oint_L P d_x + Q d_y + R d_z = \iint_A \left[\left(\frac{\partial R}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial z} \right) \cos(n, x) + \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial x} \right) \cos(n, y) + \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) \cos(n, z) \right] d_s \quad (1)$$

式中: L ——后壁平面多边形边界形成的环;

P, Q, R ——代表空间中某一点依赖于 x, y, z 坐标的向量场三个分量函数;

d_x, d_y, d_z ——表示线积分中的微分元素;

A ——后壁平面多边形;

$\frac{\partial R}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial z}, \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial x}, \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y}$ ——旋度向量分别指向 x, y, z 轴的分量;

$(n, x), (n, y), (n, z)$ ——多边形的单位法向量 n 与坐标轴 x, y, z 的夹角;

d_s ——平面上的微小面积元素。

对完整的异型滑移式块体点云应用 Alpha Shape 算法得到异型滑移式块体点云的体积,如图 10(b)所示。后壁平面与水平面之间的夹角为后壁倾角^[33],后壁倾角由公式(2)计算,可记为 θ ,如图 11(a)所示。后壁面与孤立岩体所有点之间的最大垂直距离为最大高差,见图 11(b)。孤立岩体的最大高差可依据公式(3)进行计算。

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{n} \cdot \vec{v}}{|\vec{n}| \cdot |\vec{v}|} \right) \quad (2)$$

式中: θ ——后壁面倾角;

$\vec{n}$ ——后壁平面的法向量;

$\vec{v}$ ——水平面的法向量。

$$\Delta H = \max \left\{ |\overrightarrow{A_1 B_1}|, |\overrightarrow{A_2 B_2}|, \dots, |\overrightarrow{A_n B_n}| \right\} \quad (3)$$

式中: ΔH ——孤立岩体最大高差;

A_i ——第 i 个对应的投影点云;

B_i ——孤立岩体的第 i 个原点云。

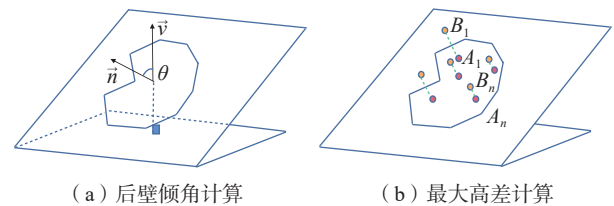


图 11 异型滑移式块体的后壁倾角与最大高差计算

Fig. 11 Calculation of the rear wall inclination angle and maximum height difference of profiled blocks

2.3.2 危岩体定性

得到了岩体点云模型的各种空间特征后,要判断提取的异型滑移式块体是否为危险岩体^[34-35],则应结合稳定系数(K)进行定性判断。稳定系数是定性判断沿后壁平面滑移破坏的危岩体的常用依据^[36]。其公式已广泛应用于单滑移面危岩体稳定性试验领域。利用《中华人民共和国新能源行业标准》中《水电工程危险岩体

工程地质调查与治理规范》(以下简称《规范》)对 K 进行计算和评价,如表 1。

表 1 单平面滑动岩体稳定性评价

稳定性系数	稳定性分级
$K \geq 1.15$	稳定
$1.05 \leq K < 1.15$	基本稳定
$1.00 \leq K < 1.05$	欠稳定
$K < 1.00$	不稳定

对于每一个可能的危险岩体对象,自动依次计算其对应的后壁面积、后壁倾角和块体方量,并对结果进行综合的稳定性分析。稳定性系数可依据式(4)计算。

$$K = \frac{Q \cos \alpha \tan \varphi + cS}{Q \sin \alpha}$$

(4)

式中: Q ——异型滑移式块体的重量/N;
 α ——后壁的倾角/(°);
 φ ——后壁滑动面的内摩擦角/(°);
 c ——黏聚力/MPa;
 S ——异型滑移式块体的滑动面积/m²。

2.4 危岩体危害性评估

应用安全系数判断异型滑移式块体是否为危岩体后,还需要综合评价危岩体方量和最大高差的特征^[37],以确定这些危岩体的危险等级和危害性,其中《规范》提供的危岩体规模分类依据如表 2 所示。

表 2 水电工程危险岩体规模分级

评价依据	小型	中型	大型	超大型
体积/m ³	$V \leq 100$	$100 \leq V < 1\,000$	$1\,000 \leq V < 10\,000$	$10\,000 \leq V$

3 结果与讨论

3.1 数据采集与异型滑移式块体识别

通过精细化地面模拟航路设计、无人机贴近摄影测量、多图像三维智能建模等步骤重建获得玉龙喀什水利工程左岸 500 m 以上边坡的高精度三维点云模型信息(图 12)。考虑到玉龙喀什水利枢纽孤立岩体多为异型滑移式块体,研究以左岸 1 块危岩体密集的区域进行危岩体半自动提取试验。

在软件 CloudCompare 内依据异型滑移式块体与边坡面的接触边界特征将该样本区可能的异型滑移式块体点云模型切分出来,如图 13(a)。

共提取出 5 块异型滑移式块体(L1, L2, L3, L4, L5)

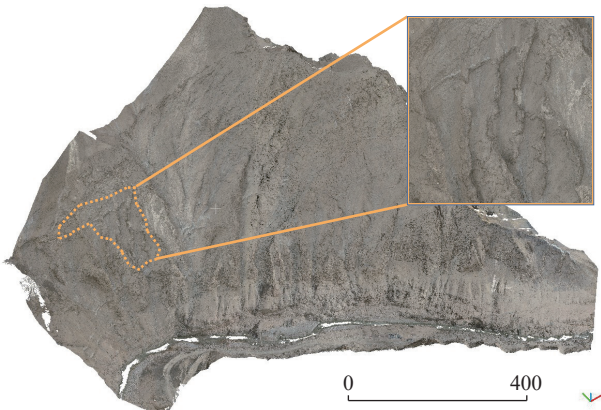


图 12 左岸整体点云,左岸样本区区域

Fig. 12 Overall point cloud on the left bank and sample area on the left bank

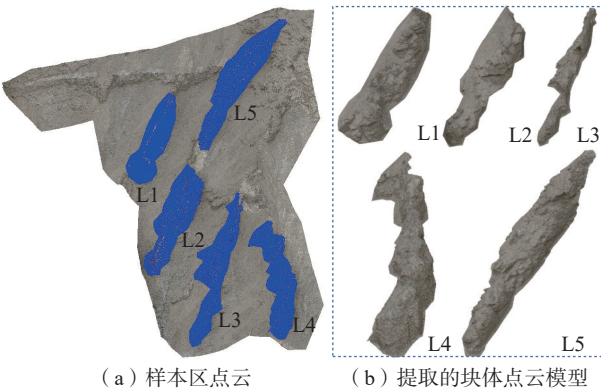


图 13 异型滑移式块体点云模型提取

Fig. 13 Point cloud model extraction of profiled blocks

见图 13(b),所有的块体均具备明显的边界特征。此外,为了减少计算成本,对点云进行下采样。图 14(b)为块体 L1 下采样后的点云(采样前点云个数:10 486 631,采样后点云个数:1 171 753)。



图 14 异型滑移式块体下采样

Fig. 14 Downsampling of profiled block

3.2 精确特征提取与危岩体定性

以块体 L1 为例,对于切分出的异型滑移式块体点云模型,使用点云密度与密度变化特征提取后壁平面边缘点云见图 15(b),这类点可近似处地于后壁平面上。

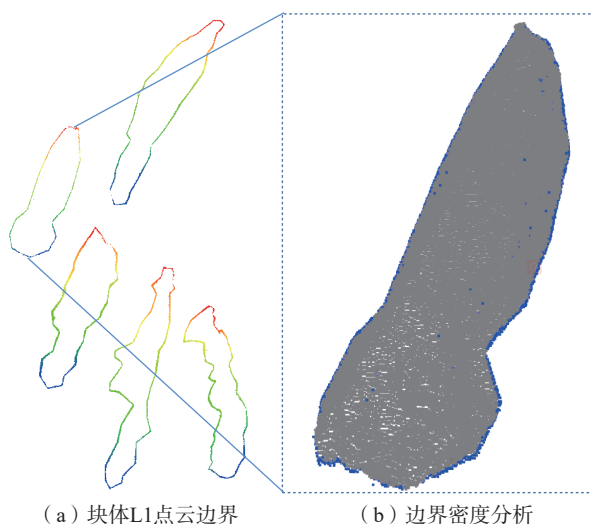


图 15 依据点云密度提取的异型滑移式块体后壁平面边缘点云

Fig. 15 Edge point cloud of the rear wall plane of profiled blocks extracted based on point cloud density

图 15(b)中蓝色点为通过点云密度分析所提取的后壁平面边缘点云,其表现为一圈闭合的边界。而灰色点为块体点云的其他部分。五块异型滑移式块体点云边界准确模型见图 15(a)。利用最小二乘法将点云拟合为平面方程,此平面为岩体破坏时可能的滑动面(见图 16)。

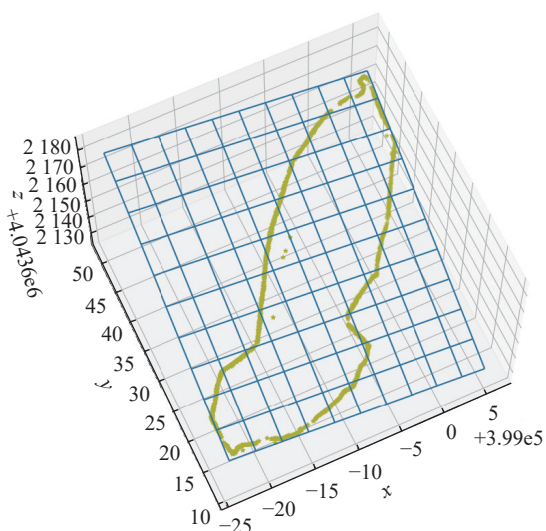


图 16 最小二乘法的后壁平面拟合

Fig. 16 Rear wall plane fitting using the least square method

根据《规范》,应确定异形滑块的后壁倾斜度、后壁面积与方量三项特征,以判断和评价危岩体。以异型滑

移式块体 L1 为例,对 L1 点云边界应用最小二乘法得到平面方程,由式(4)计算后壁面与水平面的法向量夹角,即后壁面倾角。将 L1 点云垂直投影到后壁上,计算原始点与投影点之间的欧氏距离。最大距离对应于 L1 的最大高差(见图 17)。

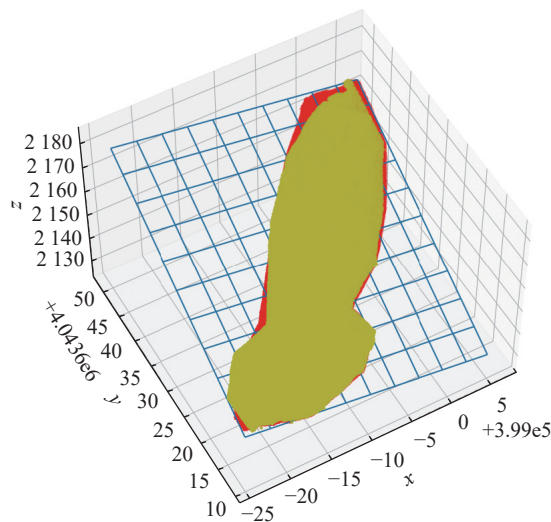


图 17 异型滑移式块体 L1 的后壁平面和点云投影

Fig. 17 Rear wall plane and point cloud projection of profiled block L1

L1 的面积和体积可以使用 Alpha Shape 算法和 Stokes 积分计算。图 18(a)中的红色点云表示通过 Alpha Shape 算法提取的异形滑动块的后壁有向的精细边界。该边界将用于计算后壁面积。此外,图 18(b)描绘了异形滑块外表面的三角形包络网络,将用于计算块体的体积。

如表 3 所示,采用提出的方法确定各异形滑块的后壁倾角、后壁面积、岩石体积和最大高差。

通过工作人员的现场调查,可获得现场大部分岩质边坡危岩体以及后壁平面的物理力学参数(如表 4)。进一步,对所有识别出的异形滑块进行稳定性 K 计算,从而判断其是否为危险岩体(如表 5),可以看出,除了 L5 以外均为危岩体。

3.3 危岩体综合评价

在本研究中,在提取了试验区的危岩体后,还需要对危险岩体的危险性等级进行确定和评价。孤立岩体的稳定性和危险等级应结合稳定性系数、岩体体积和最大高差来确定。为了定量评价危险岩体的危险性,结合危险岩体的体积和高差特征对《规范》进行了评价。

如表 6 所示,本研究在试验区发现了一系列小山梁状危岩体,体积均在 $2\,000\text{ m}^3$ 左右,属大型的单平面滑动危岩体,危岩体最大高差在 $7\sim 15\text{ m}$,其中 L4 高差为 14.53 m 。经过现场调查,这些危险岩体已被爆破拆除。

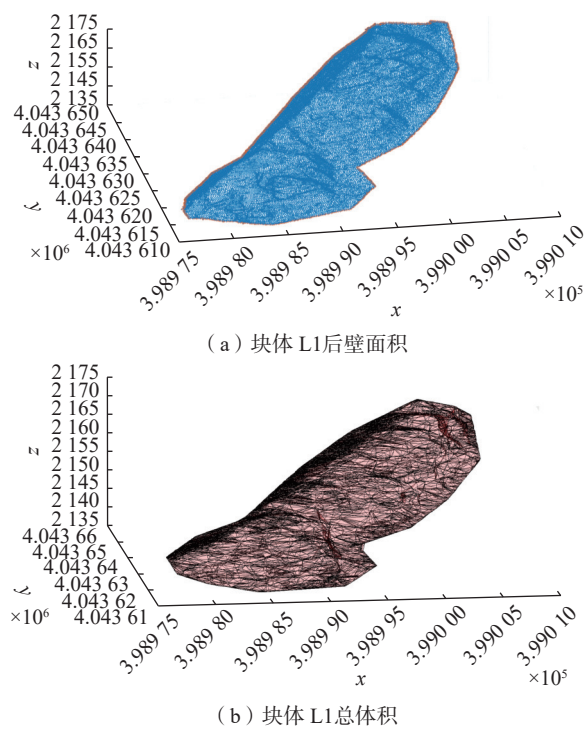


图 18 Alpha Shape 算法分别计算异形滑移式块体的后壁面积与体积
Fig. 18 Alpha Shape algorithm for separate calculation of the rear wall area and volume of profiled block

表 3 异形滑移式块体特征数据统计

Table 3 Statistical analysis of characteristic data for profiled blocks

块体编号	后壁倾角/(°)	后壁面积/m ²	块体体积/m ³	最大高差/m
L1	50.35	728.15	1 712.30	7.65
L2	45.58	835.53	2 398.60	10.60
L3	40.42	842.94	2 299.47	9.48
L4	26.23	706.89	3 294.37	14.53
L5	46.61	886.78	1 690.18	7.71

表 4 异形滑移式块体物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of profiled block

参数	块体重度/(kN·m ⁻³)	结构面黏聚力/MPa	结构面内摩擦角/(°)
取值	25.8	0.100	35

表 5 危险岩体稳定系数的计算与定性

Table 5 Calculation and qualitative characterization of stability coefficient of dangerous rock mass

块体编号	稳定性系数	稳定性分析	块体性质
L1	0.58	不稳定	是
L2	0.69	不稳定	是
L3	0.82	不稳定	是
L4	1.42	稳定	否
L5	0.66	不稳定	是

3.4 适用性讨论

(1)方案没有考虑详细的地质参数。由于本研究的

表 6 危险岩体与岩体体积评价

Table 6 dangerous rock mass and rock mass volume evaluation

危岩体编号	危岩体体积/m ³	危岩体体积评价
L1	1 712.30	大型
L2	2 398.60	大型
L3	2 299.47	大型
L5	1 690.18	大型

重点是快速识别危险岩体并提供初步评价,因此没有将岩体的具体地质特征作为依据。在未来的研究中,将自动识别过程与详细的地质参数相结合,实现对危险岩体更精细的评价。

(2)本研究只考虑了危岩体的单平面滑动的破坏模式,没有对其他滑动模型进行研究。这主要是由于研究区内普遍存在沿单一平面滑动的岩体。目前提出的半自动识别模型仅能提取沿后壁平面滑动的岩体。在未来的研究中,该模型将进一步扩展,以包含识别具有各种失稳和破坏模式的危岩体。

4 结论

本研究基于无人机贴近摄影测量技术与点云模型数据处理算法,对玉龙喀什水利枢纽工程左岸边坡一块岩体密集区进行了初步的快速地质勘察,实现了试验区边坡点云模型重建、异形滑移式块体提取、稳定性分析等目标。该方法在快速获取高精度边坡数据、智能提取三维异形滑移式块体、准确计算三维特征、评估危险岩体等方面相对于传统方法具有一定的优势。本文提供了从数字边坡模型获取到危险岩体识别和初步评价的解决方法。为边坡工程数字化奠定一定的研究基础。研究得出了如下的主要结论:

(1)结合无人机贴近摄影测量、GNSS 实时动态差分定位技术,以及自主设计的三次精细综合无人机飞行路线规划和手控校验,可为航空三角测量和建模提供分辨率优于 1 cm 的图像,解决了由于高差较大而产生模型畸变的问题。

(2)利用最小二乘法 and Alpha Shape 计算异形滑块的后壁倾角、后壁面积、方量等特征数据,确定异形滑块的稳定系数。从计算结果可以看出,试验区大部分块体为危险岩体($K<1.05$),只有 1 个块体为稳定的异形滑移式块体(L4: $K=1.42$),解决了人工调查危岩精度较低的问题,与现场稳定性评价结果一致。

(3)对识别出的异形滑块进行特征计算,可快速初步确定危险岩体的危险等级。采用高差和体积相结合的方法对危险岩体进行评价。其中危害性最大的一

块大型危岩体(L2),高差为 10.60 m,体积为 2 398.60 m³,对危岩体的提取与准确的评价为边坡工程的数字化奠定了一定的基础。

参考文献(References):

- [1] 黄发明,石雨,欧阳慰平,等.基于证据权和卡方自动交互检测决策树的滑坡易发性预测[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(5):16-28. [HUANG Faming, SHI Yu, OUYANG Weiping, et al. Landslide susceptibility prediction modeling based on weight of evidence and Chi-square automatic interactive detection decision tree[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 16-28. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 赵树兴.基于FLAC和极限平衡法的边坡稳定性分析[J].市政技术,2021,39(7):35-39. [ZHAO Shuxing. Slope stability analysis based on FLAC and limit equilibrium method[J]. Municipal Engineering Technology, 2021, 39(7): 35-39. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 傅宏易,刘远征.激光测距仪在MATLAB辅助下的危岩体调查应用[J].科技通报,2021,37(1):34-38. [FU Hongyi, LIU Yuanzheng. Application of laser rangefinder in dangerous rock mass survey assisted by MATLAB[J]. Bulletin of Science and Technology, 2021, 37(1): 34-38. (in Chinese with English abstract)]
- [4] DUAN Shuqian, FENG Xiating, JIANG Quan, et al. *In situ* observation of failure mechanisms controlled by rock masses with weak interlayer zones in large underground cavern excavations under high geostress[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(9): 2465-2493.
- [5] WANG Xueliang, FRATTINI P, STEAD D, et al. Dynamic rockfall risk analysis[J]. *Engineering Geology*, 2020, 272: 105622.
- [6] 陈文宝,王立明,张宏伟,等.基于ABAQUS的边坡稳定性分析[J].市政技术,2017,35(4):177-180. [CHEN Wenbao, WANG Liming, ZHANG Hongwei, et al. Slope stability analysis based on ABAQUS[J]. Municipal Engineering Technology, 2017, 35(4): 177-180. (in Chinese with English abstract)]
- [7] BITENC M, KIEFFER D S, KHOSHELHAM K. Range versus surface denoising of terrestrial laser scanning data for rock discontinuity roughness estimation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(9): 3103-3117.
- [8] SALVINI R, FRANCIONI M, RICCUCCI S, et al. Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domodossola-Iselle railway, the Italian Alps[J]. *Geomorphology*, 2013, 185: 110-122.
- [9] KUMHÁLOVÁ J, KUMHÁLA F, NOVÁK P, et al. Airborne laser scanning data as a source of field topographical characteristics[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2013, 59(9): 423-431.
- [10] 康尘云.基于倾斜摄影的高位危岩特征获取和稳定性评价——以重庆万州观音山危岩带为例[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(5):66-75. [KANG Chenyun. Feature acquisition and stability evaluation of high dangerous rock mass based on oblique photography: a case study at Guanyinshan in Wanzhou, Chongqing Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 66-75. (in Chinese with English abstract)]
- [11] NIETHAMMER U, JAMES M R, ROTHMUND S, et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: evaluation and results[J]. *Engineering Geology*, 2012, 128: 2-11.
- [12] RIQUELME A, TOMÁS R, CANO M, et al. Automatic mapping of discontinuity persistence on rock masses using 3D point clouds[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(10): 3005-3028.
- [13] ZEYBEK M, ŞANLIOĞLU İ. Point cloud filtering on UAV based point cloud[J]. *Measurement*, 2019, 133: 99-111.
- [14] 赵婷婷,高文娟,李志林,等.实景三维技术在“8·8”九寨沟地震地质灾害快速调查中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(3):93-99. [ZHAO Tingting, GAO Wenjuan, LI Zhilin, et al. Application of real-scene 3D technology in the rapid survey of geological disasters after the “8·8” Jiuzhaigou earthquake[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 93-99. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 梁京涛,成余粮,王军,等.基于无人机遥感技术的汶川震区典型高位泥石流流动态监测——以绵竹市文家沟泥石流为例[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(3):54-61. [LIANG Jingtao, CHENG Yuliang, WANG Jun, et al. Monitoring of a typical high position debris flow dynamic change in Wenchuan earthquake areas with unmanned aerial vehicles case study of Wenjiagou debris flows in Mianzhu County[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(3): 54-61. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 黄发明,陈佳武,唐志鹏,等.不同空间分辨率和训练测试集比例下的滑坡易发性预测不确定性[J].岩石力学与工程学报,2021,40(6):1155-1169. [HUANG Faming, CHEN Jiawu, TANG Zhipeng, et al. Uncertainties of landslide susceptibility prediction due to different spatial resolutions and different proportions of training and testing datasets[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1155-1169. (in Chinese with English abstract)]
- [17] NICHOLSON L, MERTES J. Thickness estimation of supraglacial debris above ice cliff exposures using a high-resolution digital surface model derived from terrestrial photography[J]. *Journal of Glaciology*, 2017, 63(242): 989-998.
- [18] 王明辉,曹熙平,谯立家.危岩体精细调查与崩塌过程三维场景模拟——以西南某水电站高边坡为例[J].中

- 国地质灾害与防治学报, 2023, 34(6): 86 – 96. [WANG Minghui, CAO Xiping, QIAO Lijia. Comprehensive analysis of hazardous rock mass and simulation of potential rockfall processes using 3D terrain model: a case study of the high cut slope near damsite of a hydropower station in Southern China [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 86 – 96. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 党杰, 董吉, 何松标, 等. 机载 LiDAR 与地面三维激光扫描在贵州水城独家寨崩塌地质灾害风险调查中的应用 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 106 – 113. [DANG Jie, DONG Ji, HE Songbiao, et al. Application of airborne LiDAR and ground 3D laser scanning in geological hazard risk investigation of Dujiazhai collapse in Shuicheng, Guizhou [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 106 – 113. (in Chinese with English abstract)]
- [20] RABATEL A, DELINE P, JAILLET S, et al. Rock falls in high-alpine rock walls quantified by terrestrial lidar measurements: a case study in the Mont Blanc Area [J] . Geophysical Research Letters, 2008, 35(10): L10502.
- [21] BAR N, KOSTADINOVSKI M, TUCKER M, et al. Rapid and robust slope failure appraisal using aerial photogrammetry and 3D slope stability models [J] . *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(5): 651 – 658.
- [22] CARA S, FIORI M, MATZUZZI C. Assessment of landscape by photogrammetry proximity uav survey technique: a case study of an abandoned mine site in the Furtei Area (Sardinia-Italy) [J] . 2013.
- [23] HAVAEJ M, COGGAN J, STEAD D, et al. A combined remote sensing–numerical modelling approach to the stability analysis of delabole slate quarry, cornwall, UK [J] . *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(4): 1227 – 1245.
- [24] 杜源, 王纯, 张勤, 等. 顾及黄土滑坡灾害状态特征的实时 GNSS 滤波算法 [J] . 武汉大学学报 (信息科学版), 2023, 48(7): 1216 – 1222. [DU Yuan, WANG Chun, ZHANG Qin, et al. Real-time GNSS filtering algorithm considering state characteristics of loess landslide hazards [J] . Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7): 1216 – 1222. (in Chinese with English abstract)]
- [25] ALI S, LIU Dong, FU Qiang, et al. Improving the resolution of GRACE data for spatio-temporal groundwater storage assessment [J] . *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3513.
- [26] YANG Boxiong, ALI F, ZHOU Bo, et al. A novel approach of efficient 3D reconstruction for real scene using unmanned aerial vehicle oblique photogrammetry with five cameras [J] . *Computers and Electrical Engineering*, 2022, 99: 107804.
- [27] INAM O, QURESHI M, LARAIB Z, et al. GPU accelerated Cartesian GRAPPA reconstruction using CUDA [J] . *Journal of Magnetic Resonance*, 2022, 337: 107175.
- [28] 黄发明, 殷坤龙, 蒋水华, 等. 基于聚类分析和支持向量机的滑坡易发性评价 [J] . 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 156 – 167. [HUANG Faming, YIN Kunlong, JIANG Shuihua, et al. Landslide susceptibility assessment based on clustering analysis and support vector machine [J] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 156 – 167. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 武永彩. 基于 LiDAR 点云的电力线自适应密度聚类提取 [J] . 工程勘察, 2023, 51(5): 52 – 56. [WU Yongcai. Adaptive density clustering for extracting power line based on LiDAR point clouds [J] . Geotechnical Investigation & Surveying, 2023, 51(5): 52 – 56. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 王道杰, 陈倍, 孙健辉. 机载 LiDAR 点云密度对 DEM 精度的影响 [J] . 测绘通报, 2022(5): 140 – 144. [WANG Daojie, CHEN Bei, SUN Jianhui. Study on the effects of point density on DEM accuracy of airborne LiDAR [J] . Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(5): 140 – 144. (in Chinese with English abstract)]
- [31] MAYR A, RUTZINGER M, BREMER M, et al. Object-based classification of terrestrial laser scanning point clouds for landslide monitoring [J] . *The Photogrammetric Record*, 2017, 32(160): 377 – 397.
- [32] GOLDMAN R N. AREA OF PLANAR POLYGONS AND VOLUME OF POLYHEDRA [J] . *Graphics Gems II*, 1991: 170 – 171.
- [33] WANG Binbin, XIE Jiacheng, WANG Xuewen, et al. A new method for measuring the attitude and straightness of hydraulic support groups based on point clouds [J] . *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(12): 11739 – 11757.
- [34] LATO M, KEMENY J, HARRAP R M, et al. Rock bench: establishing a common repository and standards for assessing rockmass characteristics using LiDAR and photogrammetry [J] . *Computers & Geosciences*, 2013, 50: 106 – 114.
- [35] WANG Luqi, YIN Yueping, HUANG Bolin, et al. Damage evolution and stability analysis of the Jianchuandong Dangerous Rock Mass in the Three Gorges Reservoir Area [J] . *Engineering Geology*, 2020, 265: 105439.
- [36] WU Wenlong, LIU Xiliang, GUO Jiaqi, et al. Upper limit analysis of stability of the water-resistant rock mass of a Karst tunnel face considering the seepage force [J] . *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(7): 5813 – 5830.
- [37] TAO Zhigang, FAN Fangzheng, YANG Xiaojie, et al. Prediction of deep rock mass quality and spatial distribution law of open-pit gold mine based on 3D geological modeling [J] . *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 39(4): 3221 – 3238.