

基于无人机摄影测量的高边坡危岩体智能识别技术研究

胡祺杰, 汪旭, 刘昊松

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川成都 610213)

摘要:卡拉水电站地处高山峡谷,其左岸边坡危岩大面积分布且块体方量较大,极易导致危岩落石灾害,给电站的施工和运行安全造成威胁,急需对危岩体进行高效治理。而查明潜在危岩体的分布、具体位置并进行准确定位,进而准确测量出潜在危岩体的形态参数成为危岩体治理的关键任务。阐述了以无人机摄影测量技术为基础提出的一套快速识别水电站高边坡危岩体的方法。该方法结合结构面自动识别算法,通过 SAD 算法对坡度角的分布、结合块体稳定性分析的运动学方法实现了对危岩体的准确识别。识别结果表明:卡拉水电站左岸危岩体的稳定性主要受 NE 倾向的结构面控制,它与其他主要结构面组合控制着危岩发育的边界和规模;另外,受左岸边坡冲沟的影响,冲沟附近的危岩体较为发育且方量较大。该识别技术为危岩体的治理提供了极有价值的依据。

关键词:卡拉水电站;无人机摄影测量;危岩体;结构面识别

中图分类号:TV7;TV52;TV522

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)05-0118-05

Research on Intelligent Identification Technology of Dangerous Rock Masses on High Slope Based on Unmanned Aerial Vehicle Drone Photogrammetry

HU Qijie, WANG Xu, LIU Haosong

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610213)

Abstract: The Kala Hydropower Project is located in a high mountain canyon, with a large area and a large volume of dangerous rock masses distributed on the left bank slope, which is prone to dangerous rockfall disasters, posing a threat to the construction and operation safety of the hydropower project, for which it is urgent to carry out efficient management of dangerous rock mass. Identifying the distribution and specific location of potential dangerous rock masses, accurately locating them, and then accurately measuring the morphological parameters of potential dangerous rock masses are the key tasks. Therefore, based on UAV photogrammetry technology, this article proposes a set of methods for quickly identifying dangerous rock masses on high slopes of hydropower projects. This method combines automatic recognition algorithms for structural planes, analyzes slope angle distribution through SAD algorithm, and combines kinematic methods with mass stability analysis to achieve accurate identification of hazardous rock masses. The identification results indicate that the stability of the dangerous rock masses on the left bank of Kala is mainly controlled by the NE trending structural planes, combined with other major structural planes, which control the boundary and scale of the dangerous rock development. Affected by the left bank slope gully, the dangerous rock masses near the gully is relatively developed and has a large volume. This identification technology provides a very valuable basis for the management of dangerous rock masses.

Key words: Kala Hydropower Project; Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry; Dangerous rock mass; Structural plane recognition

1 概述

随着水电工程向西南山区挺进,其所面临的边坡日益高陡,导致边坡治理的难度不断增加。通常边坡的高陡会伴随着广泛分布的危岩体,而

在边坡开挖时,尤其是坝肩边坡的开挖,对危岩体的识别与治理一直是水电站较为困难的问题之一。为此,诸多学者对危岩体的智能识别与高效治理进行了广泛且深入的研究。高效的自动化识别技术不仅提高了危岩体识别的精度,同时亦减

收稿日期:2024-07-19

轻了人工调查危岩体的工作量,进而提高了工作效率^[1-2]。危岩体智能识别技术借助非接触技术,如无人机摄影测量技术(UAV)^[3-4]、三维激光扫描技术(TLS),能远程、无接触地获取原始数据^[5-6],进而降低了调查风险。其中无人机摄影测量技术因其适用于各种地形、操作灵活而被广泛应用于地形测绘和岩体变形监测等领域。

危岩体非接触识别技术大致可以分为两大类:一种是基于非接触数据直接识别边坡的危岩体,如大体积的孤石、块石或与边坡突出部位的危岩体等,这种识别方法适合识别地形较为均一和结构特征较为明显的危岩体;另一种则是先从非接触数据中提取控制危岩体稳定的因素(例如结构面的地质信息),再根据这些信息通过危岩体控制理论进行危岩体的可动性、稳定性分析,进而实现危岩体的排查。这些识别方法对于危岩体灾害的防治、工程建设等方面具有积极的推动作用。然而,非接触识别技术在其应用过程中仍然面临一些挑战,如在复杂地形、植被覆盖情况下的识别困难、数据处理和分析的复杂性问题,需要对其进行进一步的研究和改进。

笔者依托卡拉水电站左岸边坡开挖工程,以无人机摄影测量技术为基础,提出了一套快速识别水电站高边坡危岩体的方法。该方法的具体步骤为:(1)通过合理的航线规划使无人机适应高陡边坡的复杂地形,借助 ContextCapture 软件处理拍摄到的、具有高分辨率的影像数据集,重构边坡高分辨率数值模型并进一步输出边坡的数值表面模型(DSM)和三维点云;(2)根据点云提供的地形信息和空间特征对点云进行解译,然后利用结构面识别算法获取边坡的主要结构面信息;(3)随后通过 SAD 算法分析坡度角的分布,初步识别潜在的危岩体分布区域;(4)结合块体稳定性分析的运动学方法和结构面识别结果实现对危岩体的准确识别。笔者采用该方法对卡拉水电站左岸边坡的危岩体进行了识别,所取得的结果表明:该方法能够快速识别出高边坡危岩体的分布情况,有助于对高陡边坡危岩体灾害的风险防控和危岩体防治措施的优化。

1.1 卡拉水电站坝址区高边坡危岩体

卡拉水电站位于四川省凉山彝族自治州木里藏族自治县境内的雅砻江干流河段上,是雅砻江

干流中游两河口~卡拉河段水电开发规划一库七级中的第七级水电站。工程场址位于卡拉乡下田镇村上游约 4 km 处,上距杨房沟水电站 33 km,下距锦屏一级水电站 60 km。高边坡稳定问题是卡拉水电站坝址区的主要工程地质问题。利用无人机对其左岸坝肩边坡施测具有以下主要特点:左岸边坡高陡,坡角为 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,岩层反倾;坡表卸荷倾倒强烈、岩体破碎;边坡高高程部位坡表 10~20 m 范围内的岩体向坡外倾倒,岩层倾角变缓且整体松动,局部出现架空现象,岩体呈碎裂状结构。由于该边坡浅表部卸荷倾倒强烈,加之岩体破碎、结构面发育、岩块结合松弛,天然条件下存在局部失稳问题。预计产生的落石风险对其施工期安全和长期运行安全影响较大,急需采取有效的工程措施予以处理。

1.2 左岸边坡的地质条件

卡拉水电站坝址区属松潘-甘孜地槽褶皱系之雅江褶皱带的南部,研究区地壳活动较强烈,区域稳定性差;近场区断裂均为早、中更新世活动断裂。坝址出露的构造形迹主要为 II~IV 级结构面、层面节理及其它构造节理。虽然坝址左右两岸均不同程度地发育危岩,但尤以左岸最为发育,而右岸为顺向坡,其边坡的整体稳定性较好。边坡岩体的岩性不均一,软硬相间,主要由层状硬质岩(变质砂岩、炭质板岩和大理岩)和较软岩(含炭质板岩)反复相间而成,使得边坡岩体变形不协调,是造成左岸边坡卸荷倾倒的主要因素。此外,通过勘探平洞揭露:左岸边坡强卸荷深度较大,最大深度可达 81 m;左岸山顶高程在 3 000 m 以上,相对高差达千余米,大多基岩裸露,局部上覆第四系坡积层,厚 1.0~5.0 m。边坡母岩为 T_{3z}^{2-13} 薄层~中厚层砂质板岩夹变质砂岩(2-13 亚段),呈弱~强风化,产状为 $N30^{\circ}W/NE\angle 20^{\circ}\sim 25^{\circ}$,岩层较缓且倾向坡内。因坝址区边坡岩性组合中夹有较软弱的砂质板岩、炭质板岩,左岸陡倾坡内的岩层易发生弯曲变形,导致整个边坡浅表部均有不同程度地倾倒。

由于边坡危岩体分布广泛,且因边坡高陡,采用人工识别的方法不仅耗时长,而且风险较大;而采取对危岩体的非接触识别方法能够有效提高危岩体的识别效率且风险较低。笔者在文中介绍了一种以无人机航空摄影技术为主要数据来源的高

边坡危岩体识别方法,以及该方法在卡拉水电站左岸高边坡工程中的应用。

2 数据的获取与解译

2.1 数据的获取

无人机摄影测量技术作为一种非接触测量方法,是一种利用无人机进行空中摄影、通过图像处理和测量技术实现对地表、建筑物等目标进行高精度测量和三维重建的技术,近年来在岩体工程中得到了广泛的运用,尤其是在地形测绘和变形监测等领域,可以为边坡稳定性分析、灾害预警和防治提供可靠的数据支持。相较于普通的近景摄影测量,无人机更适合地形起伏多变的高陡山区或大范围的地形测绘。其原理是通过手动或自动的无人机航线规划获取在空间上有较大的重叠性多视角航拍图像序列,然后利用运动恢复结构技术(SfM)将无人机航拍的图像序列进行排序并对具有重叠区域的图像特征进行连接,采用光束平差的方法实现地形数据的三维建模。

所述的无人机摄影测量技术的流程主要分为航线规划与航拍、图像处理、三维建模三部分。(1)规划好无人机的飞行路径、设置好拍摄参数后,利用无人机搭载高分辨率相机对卡拉水电站坝址左岸边坡进行航拍。航线的规划需要保证航拍的图像覆盖度和重叠度满足后续数据处理的要求。(2)随后利用图像处理软件,如 ContextCapture 软件对航拍图像进行预处理,包括图像去畸变、配准、色彩校正等操作,以提高后续处理的精度和可靠性。(3)利用三维重建软件对预处理后的航拍图像进行立体匹配和三维模型构建,该处理过程同样可以在 ContextCapture 软件完成,而重建过程则需要匹配不同位置、角度拍摄的图像,获取地表特征的三维坐标信息,重建出边坡的三维模型。通过与设置已知的地面控制点坐标进行点云注册,实现真实边坡的数字建模。该模型可以为后续的边坡稳定性分析、危岩体灾害预警和防治规划等工程实践提供科学依据。

2.2 数据解译

如何从生成的边坡三维模型中有效地提取边坡地质信息是近年来地质学和工程领域中的重要研究方向。通过对高精度的边坡三维模型进行处理与分析,可以提取出边坡的特征,如结构面产状、结构面大小、地形坡度、地形走向等信息。对

于地形信息的提取,目前已有许多成熟的技术。笔者在研究中借助 ArcGIS 软件,从边坡 DSM 数据中解算出地形坡度和地形倾向信息。其计算的原理主要是根据相邻栅格单元的高程变化,拟合地形的走向与倾向计算出各单元的坡度值(s)和方位角(e)。通过坡度值和方位角可以初步判别出边坡的高陡和地层反倾向的区域,其亦为主要的危岩体分布区。

危岩体的识别是一个复杂且不确定性较大的项目,通常判断与识别危岩体主要是看岩体的控制性结构面的完备程度(岩体切割状态)、结构面张开程度、控制性结构面倾角以及地形坡度;此外,降雨、人工爆破和地震等都是影响岩体稳定性最主要的外界因素。而从广泛使用的赤平投影分析看:危岩体的稳定性主要与结构面的空间位置和发育程度相关。因此,提取岩体结构面的产状信息是危岩体自动识别的关键步骤。

由于直接从三维模型中提取边坡的地质信息较为困难。笔者在研究中的思路是将边坡三维模型转化为三维点云后,再从点云中提取包括结构面信息在内的边坡的地质信息。目前,对于如何识别离散点云中的结构面并提取结构面中的有效信息已经有了诸多算法可供参考,例如,葛云峰提出的改进区域生长法,其通过设置平整性检测阈值与区域生长阈值,然后进行岩体结构面识别的方法^[7];刘昌军提出的基于点云处理, k -means 模糊聚类、自动平面拟合等实现结构面自动识别的方法^[8];国外学者 Riquelme 提出的基于最近邻点搜索(KNN)估算点云的曲率,再通过 DB-SCAN 密度聚类自动提取结构面产状等地质信息。这些方法为如何从无人机点云中提取结构面信息铺平了研究途径。

笔者采用了模糊聚类算法从点云中识别结构面,该方法包括以下四个步骤:利用高分辨率点云建立不规则的三角网模型(TIN),构建边坡模型,然后利用不同结构面组的三角面片法向量的差异进行模糊聚类,对重建的边坡模型完成结构面的聚类分组,再进一步利用区域生长算法实现对单个结构面的分割,最后对分离的结构面进行平面拟合,获取拟合平面的法向量 $n(x, y, z)$ 。识别结果表明:模型有三组主要结构面。其中两组 NW 向结构面 J_{31} 和 J_{32} 倾角较陡和一组 NE 向结

构面 J_3 ,且 J_3 与 J_1 、 J_2 倾向几乎垂直,容易切割出不稳定块体。由于 J_1 、 J_2 结构面倾向较为接近,可能在块体内部形成贯通性裂隙。

3 危岩体的识别

3.1 基于 SAD 的潜在危岩体识别

在大范围的潜在落石源区识别中,采用坡度阈值角进行识别是最为快速的方法。它是由 Strahler 于 1950 年提出的。在地貌单元分布较为均匀(即均质形态区中),假设各个地貌单元的坡度角分布基本符合高斯分布且其离散程度较低。通过坡度角分布将研究区划分为若干均质形态区获取坡度角阈值,被称为 SAD(Slope Angle Distribution)方法。其核心思想是利用高分辨率数字高程模型提取坡度角阈值划分地貌单元,即将地形坡度 f_{SAD} 分解成若干个高斯分布 f_i 的和:

$$f_{SAD}(s) = f_1(s) + f_2(s) + \dots + f_i(s) \quad (1)$$

通常可以将 f_{SAD} 分解为 4 个高斯分布,分别对应平原、缓坡、陡坡和悬崖四个系统单元。在地形较为陡峭时,悬崖单元的离散性很大,而将其分解为 2 个高斯分布的和时,其拟合效果较好,因此, f_{SAD} 也可以被分解为 5 个高斯分布。此时的最后两个单元被视为悬崖单元。卡拉水电站左岸边坡即是如此。

在选择坡度阈值角时,若在非常陡峭的地形条件下进行 SAD 分析,可能会包含两个悬崖单元,而选择较低的悬崖单元与陡坡单元的交点用于获取阈值 m_a ,则该阈值可以作为坡度阈值角。但卡拉水电站左岸边坡不仅高陡且有大部分地形栅格有植被或第四系沉积物覆盖,若将整个陡坡单元划分为危岩体潜在分布区,则会高估潜在危岩体的分布范围。因此,危岩体潜在分布区被定义为高于陡坡单元坡度角均值 $m_{ss} = 53^\circ$ 且表面裸露的区域。

3.2 耦合运动学分析的危岩体识别

显然,仅仅依靠边坡阈值角这一单一的判别准则不足以准确地识别危岩体。而采用 SAD 方法获取的潜在危岩体分布区虽然不完全是危岩体分布区,并且有可能错判、漏判危岩体,但其可以用于粗略地搜寻危岩体的发育区域。而从三维点云中提取结构面的地质信息,再依据结构面的空间组合关系分析岩体的稳定性,将不稳定的块体

视为危岩体则是一种较为准确的方法。运动学分析是通过结构面空间特征分析危险滑动面,其根据岩体失稳的初始运动方式可以将岩体失稳类型简单地划分为平面滑动、楔形体破坏和弯曲倾倒三种破坏模式。因此,基于结构面地质信息,分别按三种破坏模式对结构面或结构面组合与地形面的空间关系进行排查,进而通过赤平投影图解法分析岩体的稳定性。

准确的结构面识别则需要高精度、高密度的点云,而高精度、高密度的点云会导致算法运行缓慢。对于卡拉水电站大坝边坡,其包含的三维点坐标超过 10 亿组,从而给算法和计算机内存均造成了不小的压力。而通过边坡阈值角可以识别出潜在的危岩体区域。若对每一个潜在的危岩体区域都只选择一部分点云进行识别,再将所提取到的结构面组信息视为该区域的控制结构面,然后采用运动学分析方法分析每一地形栅格的稳定性将大大加快危岩体的辨识效率。笔者在此次研究中采用了这种 SAD 方法与运动学分析的耦合方法对危岩体边坡进行识别。

在识别出危岩体地形栅格后,为了进一步划分危岩体的失稳风险 F ,笔者对可能失稳的地形栅格按坡度角进行了归一化。其归一化的公式为:

$$\begin{cases} \forall s \in [0; m_{ss}] \Rightarrow F = 0.6 \\ \forall s \in [m_{ss}; 90] \Rightarrow F = \frac{F(s) - F(m_{ss})}{F(90) - F(m_{ss})} \end{cases} \quad (2)$$

式中: F 为失稳风险; m_{ss} 为坡度角均值。

笔者采用运动学仅对岩体稳定性最主要的因素——结构面产状进行了分析,而没有考虑其他的影响因素,因此,直接将可能发生滑动的地形栅格视为危岩体其包含的区域过大;同时,影响危岩体稳定性的因素并不是相互独立的,往往是相互作用对危岩体的稳定性产生影响,因此,采用地形栅格按坡度角进行归一化的方法比较简单,对评价指标的选择应当是建立在对工程地质条件充分研究的基础上,分析评价指标的相互作用对危岩体稳定性的影响程度。对比已经查明的危岩体,最终确定将风险指标 $F > 0.6$ 的区域视为危岩体比较符合实际情况,同时亦便于在施工现场快速排查危岩体。

4 结语

笔者基于无人机航空摄影技术提出了 SAD 方法与运动学分析相结合的危岩体识别技术,并采用该技术对卡拉水电站左岸边坡的危岩体进行了识别。根据现场勘察资料与危岩体的分布特征,得出了下述结论与建议:

(1)通过无人机航空摄影技术重建了卡拉水电站左岸边坡的三维地形,并进一步将其转化为 DSM 和三维点云数据用于边坡地质信息的提取。

(2)对 DSM 数据进行的分析结果表明:坡度角的 SAD 可以分解为五个特征地形单元,包括平原、缓坡、陡坡、悬崖 1 和悬崖 2;而危岩体潜在分布区被定义为高于陡坡单元坡度角均值 $m_{ss} = 53^\circ$ 且其表面裸露的区域。

(3)结合运动学分析方法对三维点云数据的结构面进行识别后,将卡拉水电站左岸边坡风险指标 $F > 0.6$ 的区域视为危岩体,使用该指标便于在施工现场快速排查危岩体。

参考文献:

- [1] 朱承金,王述红,任艺鹏,等. 无人机摄影测量边坡结构面及块体稳定分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2019,40(11):1636-1640,1647.
- [2] 王栋,邹杨,张广泽,等. 无人机技术在超高位危岩勘查中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2018,45(6):754-759.

(上接第 97 页)

少了起重设备吊装的时间,能够更大空间地利用起重设备,较好地保障大口径 PCCP 管安装的质量,与传统安装工法相比,其施工效率高,人力成本减少,所取得的经验可为类似工程借鉴。

参考文献:

- [1] 刘臣国. PCCP 管道安装施工工艺与方法探讨[J]. 山东工业技术,2017,36(7):114.
- [2] 张芳芝. 水利工程中 PCCP 管道安装工程施工与质量控制[J]. 运输经理世界,2021,58(19):151-153.
- [3] 沈兴东. PCCP 管道安装施工中应注意的问题[J]. 水利科技与经济,2014,20(4):144-145.

- [3] 闫志港. 基于无人机的岩体结构面识别精度提升方法研究[J]. 工程勘察,2023,51(10):52-56.
- [4] 杨泽,李保天,宋盛渊,等. 基于无人机点云与改进 RS 表征法的结构面粗糙度定量分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2023,55(11):72-81.
- [5] 王培涛,覃拓,黄正均,等. 基于三维点云的岩体结构面信息快速识别方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(3):503-519.
- [6] 李胜,熊自明,刘一鸣,等. 基于改进 DBSCAN 算法的岩体结构面智能识别方法[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2022,5(2):49-58.
- [7] 葛云峰,夏丁,唐辉明,等. 基于三级激光扫描技术的岩体结构面智能识别与信息提取[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(12):3050-3061.
- [8] 刘昌军,张顺福,丁留谦,等. 基于激光扫描的高边坡危岩体识别及锚固方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(10):2139-2146.

作者简介:

- 胡祺杰(1997-),男,四川成都人,卡拉水电站总包部大坝工区技术部副主任,助理工程师,学士,从事水电水利工程建设施工技术与管理工;
- 汪旭(1997-),男,四川夹江人,卡拉水电站总包部大坝工区技术部主任,助理工程师,学士,从事水电水利工程建设施工技术与管理工;
- 刘昊松(1998-),男,黑龙江宾县人,助理工程师,学士,从事水电水利工程建设施工技术与管理工。

(编辑:李燕辉)

- [4] 朱兴广. 大管径 PCCP 管道内拉法安装施工技术[J]. 水利技术监督,2014,22(6):66-69.
- [5] 张霖. 大直径 PCCP 管道安装内拉设备优化改造[J]. 居舍,2019,39(31):193.

作者简介:

- 王飞(1989-),男,四川成都人,项目副总工程师,工程师,从事市政工程施工技术与管理工作;
- 倪彬(1996-),男,贵州瓮安人,助理工程师,从事市政工程施工技术与管理工作;
- 王俊(1998-),男,陕西西安人,助理工程师,从事市政工程施工技术与管理工作。

(编辑:李燕辉)