

无人机倾斜摄影测量技术在矿山的数字化应用

赵 浩, 雷永康, 王亚伟, 胡兴旺, 贾皓

商洛西北有色七一三总队有限公司, 陕西 商洛

收稿日期: 2024年12月31日; 录用日期: 2025年2月26日; 发布日期: 2025年3月18日

摘要

随着矿业数字化进程的加速, 无人机倾斜摄影测量技术在矿山领域的应用愈发深入。本研究聚焦于该技术在矿山的实际应用, 通过对多源数据的采集与处理, 构建了高精度的矿山三维模型。在矿山地形测绘方面, 其测量精度可达厘米级, 相比传统测量方法效率提升数倍, 为开采规划提供了精确地形数据; 在地质灾害监测中, 能够及时捕捉到毫米级的山体变形, 有效预防滑坡等灾害; 于开采进度管控上, 实现了对开采面变化的实时追踪与精准分析, 助力资源合理开发。研究成果表明, 无人机倾斜摄影测量技术显著提升了矿山数字化管理水平, 为矿山安全生产与高效运营提供了有力支撑, 具有广阔的应用前景与推广价值, 有望成为现代矿山数字化建设的关键技术手段之一, 推动矿业领域的技术革新与发展。

关键词

无人机, 倾斜摄影测量, 矿山, 数字化应用, 三维模型

The Digital Application of Unmanned Aerial Vehicle Oblique Photogrammetry Technology in Mines

Hao Zhao, Yongkang Lei, Yawei Wang, Xingwang Hu, Hao Jia

Shangluo Northwest Nonferrous 713 Corps Co., Ltd., Shangluo Shaanxi

Received: Dec. 31st, 2024; accepted: Feb. 26th, 2025; published: Mar. 18th, 2025

Abstract

With the acceleration of digitalization in mining, the application of unmanned aerial vehicle oblique photogrammetry technology in the mining field is becoming increasingly profound. This study focuses on the practical application of this technology in mines. By collecting and processing multi-source data, a high-precision 3D model of the mine is constructed. In terms of mining terrain

文章引用: 赵浩, 雷永康, 王亚伟, 胡兴旺, 贾皓. 无人机倾斜摄影测量技术在矿山的数字化应用[J]. 矿山工程, 2025, 13(2): 337-345. DOI: 10.12677/me.2025.132037

mapping, its measurement accuracy can reach centimeter level, which is several times more efficient than traditional measurement methods and provides accurate terrain data for mining planning; In geological hazard monitoring, it is possible to capture millimeter level mountain deformation in a timely manner, effectively preventing disasters such as landslides; In terms of mining progress control, real-time tracking and accurate analysis of changes in the mining face have been achieved, which helps to promote the rational development of resources. The research results indicate that unmanned aerial vehicle (UAV) oblique photogrammetry technology has significantly improved the level of digital management in mines, providing strong support for safe production and efficient operation of mines. It has broad application prospects and promotion value, and is expected to become one of the key technical means for modern mining digital construction, promoting technological innovation and development in the mining industry.

Keywords

UAV, Oblique Photogrammetry, Mining, Digital Applications, Three-Dimensional Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 无人机矿山测绘的工作概述

1.1. 提供矿山生产的基础数据

在无人机高精度倾斜摄影测量技术的辅助下，矿山的基础数据获取变得更加迅速和准确。矿山生产所依赖的地貌、地质状况、矿区布局等基础数据的精准掌握，为后续的采矿规划、资源评估和环境监测提供了坚实的数据支撑。借助无人机搭载的高分辨率 CCD 数码相机等测绘遥感设备，可以在短时间内收集到高质量的影像资料，通过后期数据处理，产生具有高度精度要求的 DEM、DOM、DLG 等多种测绘产品[1]。此外，无人机倾斜摄影测量技术还可以有效避免地形复杂、地势险峻情况下的人员安全风险，显著减少传统踏勘作业所需的物力和人力投入，改善工作效率和安全性[2]。

在实践中，通过科学设计的航测方案可以优化数据采集工作，通过先进的数据处理软件对收集的影像和点云数据进行精确拼接和分析，生成高质量的三维模型。不仅促进了资源评估的准确进行，还显著提高了矿区环境监控和灾害预警的有效性[3]。

综上所述，无人机在矿山生产中的测绘应用，不仅显著提升了数据获取的速度和质量，降低了成本和风险，还极大地促进了矿山信息化、智能化水平的提升。通过高精度的空中测绘手段，获取精细化的矿山地形与地质数据，为矿山的科学管理与可持续发展奠定了坚实的基础。

在地质矿产勘查的实际应用中，无人机搭载的倾斜摄影测量技术已被证明能够突破复杂地形条件的限制，提供高效、精确的测绘数据，显著提升勘查工作的效率及质量[1][3]。因此，无人机矿山测绘是推动矿山测绘工作现代化、信息化的关键技术之一。这也将有助于国家能源结构的转型升级，为我国矿业的可持续发展提供了有力的技术支持。

1.2. 助力数字矿山建设

数字矿山建设的核心在于信息技术的深入应用，实现矿山生产全过程的数字化、智能化管理。传统的矿山建设主要依托手工作业和机械化作业，对地质数据的收集和分析依赖耗时的人工测量，不仅效率低下，而且数据准确性难以保证。而无人机遥感技术正好为数字矿山建设提供了高效的数据收集手段。

通过实时更新的地理信息系统(GIS)和三维地质建模，矿山生产管理者能够掌握矿区的最新动态，对生产过程进行实时监控。生成的高分辨率立体影像和精细化的地形图提供了对矿区空间结构深层次理解的可能，为采矿决策和工程设计提供了有力的数据支撑。此类具体而详细的三维数据有助于揭示采矿作业中的潜在问题，比如不合理的设备布局、采矿效率不高的区域，以及矿山安全隐患等，提升矿山的整体运营水平[4] [5]。

总之，无人机遥感技术在数字化矿山建设中的应用，标志着矿山测绘工作从传统走向现代化的重要转变。这不仅体现在提高生产效率和加强环境监测的直接效益上，更在使用信息技术赋能传统产业，推动行业的整体升级和转型上展现出深远的意义。随着无人机技术的不断进步和普及，其在数字矿山建设中的应用也将变得更加广泛和深入[2]。

2. 无人机高精度倾斜摄影测量的优势

2.1. 可以直观地反映山地周围的地形

在数据采集方面，无人机高精度倾斜摄影测量技术具有直接得到高分辨率影像的能力，使得矿山环境的地形图测绘变得直观、快速而精确。相较于传统地面测量，无人机能够在不接触地面的情况下，完成大范围区域的数据采集工作，极大程度上缩短了测绘工作的时间，并降低了操作风险。

在数据处理方面，倾斜摄影测量技术所获取的图像具有极高的空间分辨率，这保证了测量数据在小范围内也能达到较高的精度。对测绘成果的分析表明，无人机测绘在反映山地周围地形上的细节方面，相较于传统地面测量手段有着不可比拟的优势。不仅能清晰展示地形起伏和自然环境条件，还能辨识出微小地形结构，这对于矿山勘查、规划与管理具有极为重要的实际意义[1]。

以无人机倾斜摄影技术进行地形测绘还具有成本效益高的特点[2]。由于无人机作业无需地面控制点，只需在飞行前后期设置少量的基准点用于校正，因此能显著减少人力物力的投入[6]。

此外，借助先进的无人机和高清相机设备，可以对所测区域进行多角度、多层次地拍摄，产生的影像能够全面覆盖矿山地形，这些资料经过相应的软件处理，能够快速生成地形图和三维模型，提供连续、动态的地表信息[7]。无人机测绘技术在矿山地形勘查中的应用，已成为现代矿山测量领域的重要发展方向[1] [2]。

2.2. 灵活操作

无人机倾斜摄影测量技术由于其操作的灵活性，在山区地形非金属矿的测量中显示出独特的优势。尤其在复杂多变的山区环境下，使用无人机进行数据采集，避免了地面测量团队需要面对的种种难题如陡峭的坡度、密集的植被覆盖以及不稳定的地表条件。通过无人机的高空作业，可以实现对矿区范围内各类地理信息的快速、准确获取。与此同时，无人机操作的敏捷性使得可以在较短时间内对宽广的区域进行全方位的覆盖。在进行非金属矿的体积测算时，无人机搭载的高精度传感器可以对矿体进行精确的测量，实现对矿体体积变化的快速响应和实时监控[3]。

在具体操作过程中，利用多目标点定位和实时动态调节技术，无人机能根据地形起伏和障碍物的存在自动调整拍摄角度和高度，最大限度地减少了遮挡和死角，确保了测量数据的完整性和可靠性。其搭载的摄影设备不仅能够捕捉到地表的细微变化，而且能够以较低的成本快速生成高质量的数字地形模型(DTM)和数字表面模型(DSM)，为后续的分析和规划提供了强有力的数据支撑[3] [7]。

综上所述，无人机倾斜摄影测量不仅以其灵活性突破了地面测量团队难以克服的自然条件限制，而且在持续监测和快速反应等方面展现出巨大潜力，对于提高矿山测绘的工作效率、降低作业成本以及推动矿山数字化转型具有非常重要的意义。

2.3. 高数据精度

无人机高精度倾斜摄影测量技术在数据精度方面的优势源自其独特的数据采集机制和后期处理算法。倾斜摄影测量技术能够从多个角度获取矿山地形的图像数据，通过后期数据处理融合和点云生成技术，形成高精度的三维模型。在具体实施过程中，使用的无人机搭载高解析度摄像头，能够在保持飞行稳定的条件下，捕捉到地面上每一个细节，分辨率可达到 5 cm/pixel。此外，为了保证数据质量，通常会进行多次飞行拍摄，以覆盖矿山的各个部分，并确保在不同时间和光照条件下获得最佳的影像数据。

数据处理方面，采用先进的算法进行影像的稳定性校正、几何纠正和色彩平衡，使得不同角度和时间获取的数据能够无缝对接。三维点云处理软件根据拍摄的图片，通过复杂的算法转化为高密度、高质量的点云数据，进而生成精准的三维模型。在模型构建过程中，不仅考虑了地面的精准地貌，还模拟了矿山内部的结构变化，对于采矿活动的影响和施工安全都具有重要的参考价值。

通过无人机测量的数据还可应用于地质灾害监测、体积测算和变化检测等方面。例如，在矿区地质灾害的预警监测中，可通过对比连续时段内的三维模型变化，精确评估塌陷、滑坡等地质灾害的风险等级。在计算矿山开采体积时，高精度的三维模型能够以毫米级别的误差输出准确的体积数据，为矿产资源管理提供了重要依据。

综上所述，无人机倾斜摄影测量在数据精度方面展现出领先的技术优势，这不仅使得矿山测绘的工作效率和安全性大大提升，还为矿山的可持续发展提供精准的数据支持。随着测量技术的不断进步和应用软件的持续优化，无人机在矿山测绘领域的应用潜力将得到更加充分的发挥。

3. 无人机倾斜摄影测量在矿山测绘中的作用

3.1. 矿山监测

在矿山的持续监测过程中，无人机技术的应用在实现实时监控和资源保护方面显得尤为重要。采矿作业不仅影响矿区地质结构，更可能对周边生态环境带来不可逆转的破坏。因此，为了严格监控开采活动，禁止非法采矿，并预防矿产资源的过度消耗，务必采用先进的监测手段进行有效的管理[2]。由于煤矿采掘活动常在远离人烟的地区进行，传统的监管与执法难以快速响应，监督工作也相当棘手。然而，无人机技术的加入，为这一难题提供了实质性的解决方案。

运用无人机进行定期或无定期的监测，可以获得矿区的高清航摄影像，并及时发现非法采矿活动或是开采超标准的迹象。借助高精度的图像分析，监管部门能够对矿山开采区域进行实时监视，并在必要时迅速制定和实施应对措施。此外，无人机搭载的传感器还能检测到可能引发安全事故的环境变化，比如地面下沉或裂缝的形成，从而为采矿安全事故的预防提供数据支撑[2]。

每一次飞行所获取的高精度三维模型，在对矿山进行定量分析的基础上，可以及时监测到开采所带来的地貌变化，评估其对周围环境的影响程度。因此，无人机技术在矿山监测中的运用，不仅提高了监测效率和精准度，更提升了监管与预防潜在危害的能力，为矿产资源保护和可持续发展做出了重要贡献。采用先进的摄影测量设备和处理软件，可确保最终输出的三维模型具有高精度和高可靠性，这无疑将在矿山的开采、规划、监测、灾害评估及环境保护等方面展现出巨大的应用潜能[1] [8]。

3.2. 保护环境

借助无人机系统，能够在不破坏自然地形和植被的前提下完成测绘任务，对生态环境的扰动较小。借助此技术，可以对矿区边坡稳定性、植被覆盖率等生态指标进行实时监测和评估，为生态恢复提供科学依据。

通过高精度三维模型能够清晰地反映地形、植被和水体的分布情况，进一步分析矿区的植被生长状态和水体分布变化，可以有效监督和管理矿山开采活动，及时发现和纠正对生态环境可能造成的负面影响。例如，通过定期的无人机监测，可以准确计算矿山开采区域的植被覆盖变化，估算土壤侵蚀量，评估水土保持措施的实施效果。此外，无人机倾斜摄影还能监测矿区附近水体的污染扩散情况，为防污治污提供直观的数据支持[9]。

另一个显著的环保效果体现在对废弃矿山的治理上。无人机倾斜摄影测量技术通过高分辨率的三维数据精确地描绘出废弃矿山的地貌，为环境恢复治理提供了量化的基础数据。在废弃矿山的生态修复过程中，技术的应用确保了修复工作的效果可以通过三维模型进行直观的比较和评估，有助于实施更为精确和科学的修复方案[9]。

这些高精度的测量结果不仅为矿山生态环境的评估和修复提供了可靠的数据支持，也有助于政府和环境保护组织制定针对性的生态保护和修复计划。时至今日，随着无人机倾斜摄影测量技术在矿山测绘应用的不断深入，对于推动矿区环境的可持续发展起到了积极而深远的影响。

3.3. 开采规划中的应用

借助无人机系统，矿山企业能够在不干扰现场作业的条件下，收集到准确的地形数据。通过专业软件对采集的影像数据进行处理，即便是在地形复杂、植被覆盖密集的矿区，也能高效完成地面点位的定位与测量，精确描绘矿山施工设计所需的地表轮廓。系统的数据采集与分析，还将为后续的矿山运营管理与闭坑复垦打下坚实的数据基础[3] [4]。

将高性能无人机技术与矿山的前期规划阶段相结合，能够有效地缩短项目的准备时间，降低勘探成本，并最大程度地避免由于规划不足所诱发的安全事故。借助无人机测绘的大范围、高密度、高精度地形数据，有助于矿山企业在兼顾经济效益与生态保护的基础上，实现科学、合理、安全的开采计划制定[2]。

3.4. 矿山施工当中的应用

在现代矿山施工活动中，无人机搭载的高精度倾斜摄影测量技术正在成为不可或缺的工具。在开采、运输、倾倒和安全评估过程中，它提供了前所未有的数据支持和可视化手段。以往依赖于人力进行的地形测绘工作耗时且危险，通过无人机的应用大幅度提高了效率和安全性。

在矿山开采规划阶段，工程师们利用高精度三维模型精准地进行开采面积设计、路线规划和采矿设备布局。在传统方法中，此类工作通常需要数周甚至数月完成，现如今借助无人机技术可以在几天内完成。

施工过程中，无人机倾斜摄影测量技术对监测矿山动态变化有着重要作用。通过高频次的监控飞行，工程师可以实时监控矿山开采进度、堆存物料的高度变化以及排土场的实时容量。这些动态数据有助于实时调整施工计划和物料管理策略，确保资源的最优配置。

无人机还为矿山废弃土地的复垦提供了切实的技术手段。在矿区关停后，利用无人机技术对废弃地进行拍摄，并结合植被识别算法，可以对复垦后的地表植被生长状况进行监测，为环境保护和生态修复提供了科学的评估方法。

总而言之，无人机搭载的高精度倾斜摄影测量技术在矿山施工中的应用极大提升了施工效率，确保了工作的安全性并维护了生态环境。其深远的意义正在逐步得到业界的广泛认可并持续推动传统矿山测绘工作向数字化、自动化转型。未来，随着技术的进一步完善和创新，无人机将在矿山施工中发挥更加关键的作用。

4. 无人机高精度倾斜摄影测量的方法

4.1. 准备基础材料

在开展无人机倾斜摄影测量之前，务必要收集与准备一系列基础材料，以确保整个测绘过程的高效率和数据的高精度。首先，将通过对矿山测绘需求进行详尽分析，从而确定无人机设备选择、航测策略制定、数据采集和处理的详细参数设定等关键方面的基础要素。选择的无人机设备，需要搭载能够支持高精度倾斜摄影的传感器和相机，如大疆经纬 M300 RTK 无人机搭载睿铂 D2M 五目相机，其镜头需具备足够高的像素，以满足后续三维模型重建的精细需求[10]。当确定了倾斜摄影的仪器设备后，接下来要重点考虑航飞计划，包括飞行高度、航线设计、图像的重叠度以及避开矿山区域潜在的飞行障碍物。

在航飞计划布设方面，需根据已有矿山地形地貌特性以及植被覆盖状况，制定合理的航向与航线重叠比，通常需要 80% 的航向重叠与 65% 的航带重叠设计[6]。地面分辨率的设定也是一个重要环节，有效的地面分辨率设定可以提高图像的地形匹配度和模型的重建质量。同时，考虑到无人机飞行航摄期间的变数，如气候条件、矿山作业安全、权限限制以及潜在技术故障等，必须制定详细的应急响应预案，降低风险因素对航测任务的潜在影响。

在技术参数的定制过程中，需要对所采集的原始数据进行预处理，这不仅包括对原始影像数据的几何校正、色彩平衡调整和质量检查，同时还涉及到传感器的校准，以及后续三维建模所需的像片控制点的设置[2]。此外，对于实地测量与验证所需的辅助设备，如地面控制点标志、全球导航卫星系统(GNSS)接收器和惯性导航系统(INS)的配合使用，也要进行周密准备以保证测绘数据的真实性与准确性。

充足的预备工作将为利用无人机高精度倾斜摄影技术在矿山测绘中的高效实施奠定坚实的基础。通过对测绘过程中各要素的精确把握和前期准备，能够最大程度地确保数据采集的完整性和准确性，从而达到对矿山地形精确建模和监测的目的。

4.2. 无人机倾斜摄影

在无人机倾斜摄影测量中，首先需确保无人机搭载的倾斜摄影设备能够在飞行中稳定作业，以实现对矿山地形的高精度捕捉。无人机在进行航线飞行时，依托高性能的 GNSS 及 IMU 系统，能够实现实时的位置与姿态确定，这对于倾斜摄影影像的精度和后期处理至关重要。对矿山地貌进行三维重建时，无人机从不同角度采集影像：正下视影像和倾斜视角影像(通常包括前视、后视、左视和右视)。这样的多角度拍摄不仅能够提供更为全面的地面信息，还大大提高了地物特征点的匹配准确度和三维模型的质量。

在无人机完成影像采集后，所得影像数据要通过高性能的摄影测量软件进行处理。空中三角测量(AT)是这一流程中的关键步骤，可消除影像外定向中的系统误差和随机误差[10]。通过对多视影像的精密匹配，可以重建出精确的地平面点云数据，进一步生成三维表面模型。影像处理软件能有效根据影像间的重叠度自动进行点云的配准与拼接，另外，还能通过实测控制点纠正系统误差，保证了数据的高精度与高质量。

根据已有研究，无人机倾斜摄影技术在矿山测绘领域应用中，所得的三维模型的平面位置精度可达到 0 米到 0.3 米之间[3]，满足一类精度的要求。而对于非量测相机的影像，镜头畸变误差在前期的摄影机校准环节必须得到处理，这是保证倾斜摄影影像数据质量的前提[3]。在实际操作过程中，还需注意飞行高度、航速、光线条件等因素对影像质量可能产生的影响，以确保模型重建的高效性与准确性。

综上所述，高精度的无人机倾斜摄影技术为矿山勘探测绘工作带来了革命性的变化，显著降低了作业成本，提高了作业效率，并且为矿山管理提供了更为直观、详细的三维信息。

4.3. 行业中的 3D 建模

在无人机矿山测绘项目中，三维建模的过程不仅要关注模型的精度，还需要注重数据处理效率和模

型的实用性。在这一环节, Smart3DCapture 软件应用广泛, 得益于其能够处理大量影像数据, 快速生成高精度的三维模型。在实践中, 通过无人机采集的原始矿区影像数据, 首要步骤是进行影像的预处理, 诸如色彩校正、影像镶嵌以及像素的几何纠正, 以保证模型在构建过程中的真实性和连续性[3]。

接下来, 关键的密集匹配技术便发挥重要作用, 在不损失影像细节的前提下, 提炼出丰富的地表结构信息, 这一步骤直接影响到后续三维模型的质量。为此, 密集匹配算法需要能够有效地剔除噪声、填补空缺, 并且能够在山体阴影区域、植被覆盖或是各类矿物质的多样性表面间实现高精度匹配[3]。

在三维模型框架构建阶段, 团队采用三维 TIN(三角网)为基础, 构建起地形的基本骨架。TIN 三角网的密集度直接关系到后续纹理的贴图质量及整体三维模型的精细程度。在实践中需权衡计算资源与模型细节的需求, 以便找到最佳的模型密度与计算效率的平衡点。这一环节的优化, 受益于 Smart3DCapture 的高效算法与硬件加速技术, 成功应对了山区地形复杂且多变的挑战[3]。

完成基础框架后, 自然纹理映射技术则用以增强模型的真实感。它通过将采集的影像直接贴合到三维模型表面, 明确地呈现矿山表层结构与色泽细节。在这一过程中, 确保纹理图的分辨率与模型框架精度相匹配至关重要, 以免导致模型在视觉上的失真[3]。

作为行业应用中一个核心的部分, 无人机技术与三维建模的结合在确保了矿山数据采集的安全性及高效性的同时, 对整个矿业测量与监测领域产生了深刻的影响[7] [9]。三维建模技术不断发展之下, 其在矿山规划、灾害预警、环境监测等方面展现出来的应用潜力与实际效益令人瞩目, 是推动数字化矿山建设不可或缺的一环。

5. 无人机矿山测绘中的应用要点

5.1. 航测外业

通过本次在夏家店矿区进行的大面积无人机倾斜摄影测量三维建模工作, 总结出很多宝贵的经验。首先在进行矿山测绘的无人机航测外业时, 技术人员必须确保航测的数据具有高精度和高可靠性。为此, 需对无人机进行精心选择和配置, 让其搭载高性能的倾斜摄影仪等设备, 同时显著提升对无人机遥控操作的精准度和稳定性。在航测过程中, 定位系统的精确校准尤为关键, 必须使用差分全球定位系统(DGPS)或实时运动中实时动态补偿的精准定位技术, 以确保影像获取过程中的高空间分辨率和高地理定位精度[6]。

无人机在航测外业中, 会按照预先规划好的飞行航线, 对矿山区域进行全方位、无死角地数据采集。这包括高精度的激光雷达扫描以获取地表三维激光点云数据, 以及高分辨率的摄像机拍摄用于生成正射影像数据[7]。这些数据不仅能够重建矿山地貌的高分辨率三维模型, 而且可以应用于矿区地质环境评价和灾害预警, 为矿山管理和决策提供科学依据。

考虑到矿山地形和地质结构的复杂性, 航测任务的飞行高度和重叠度需事先经过严密计算和科学设计, 以保证数据完整性和后续数据处理的有效性。同时, 根据矿山区域的环境特征和天气条件, 避免了因环境因素导致的数据质量下降或数据采集的中断。在取得航测影像数据后, 还需要对影像进行校正和精确拼接, 通过这一系列处理提高数据的实用性和准确度[4]。

此外, 航测外业过程还需密切关注无人机的安全飞行问题。由于矿山地区复杂的地理环境和多变的气候条件, 无人机飞行存在着一定风险。因此, 需要严格遵守飞行安全规范, 并采取措施, 比如实时监控无人机状态、避免飞行区域的障碍物等, 以确保航测任务的顺利进行和数据质量的可信度[2]。

总而言之, 无人机航测外业在矿山测绘上提供了数据采集效率高、安全性好、数据精度高的解决方案。通过这种高效准确的数据采集方式, 能够为矿山的开发、管理和环境保护等提供强有力的技术支撑。

5.2. 内业三维建模成果输出

无人机技术的内业三维建模成果输出环节，关乎矿山监测测绘成果的质量与实用性，堪称整个测量工作的重要环节。在内业处理阶段，技术人员利用专业的三维建模软件，对采集到的高分辨率影像数据进行精准无缝拼接，构建起完整的三维地形模型。该模型精确反映了矿山的地形地貌与边坡结构，不仅包含沟渠、植被覆盖等自然特征，也可展现开采区、废弃区等人工施工区域的详细情况。

在输出精确的三维模型之前，需要用控制点数据对模型进行地理配准，保证模型在空间位置上的准确性。计算得出的地面控制点坐标要与实地测量完全匹配，确保三维模型能在真实世界中得到可靠的应用。通过这一步骤，无人机测绘的数据成果得到了客观的验证，满足后续工程规划与环境监测的高精度要求。完成后，三维模型以及相关数据需要标记清晰，以方便专业人员检索和解读^{[5] [9]}。

在模型输出环节，我们不仅仅提供了三维地形地貌图，同时，通过三维模型的细节，可以提取矿山的体积变化、边坡稳定性分析、植被复盖状况等重要信息^[9]。例如，边坡稳定性分析则有助于预防滑坡等地质灾害的发生；植被覆盖状况分析则可用于监测环境恢复情况。这些分析结果既可以单独输出，也可以综合运用于风险评估和管理决策。

此外，在三维模型的基础上，技术人员还将制作相关的正射影像图。这种影像图能够提供无畸变的、比例尺一致的矿山表面图像，有助于对矿区土地利用进行详细评估。同时正射图也是媒介，将三维模型信息与矿业管理实际需求有效结合起来^[6]。

每一份输出的三维模型和正射影像图都需要经过严格的质量控制流程，以确保其符合国家测绘标准和行业要求。整体过程不断完善优化，从而提升数据的可靠性、准确性和实用性，进一步拓展无人机矿山测绘在矿山管理和环境监测中的应用范围。最终，凭借高效的内业处理，操作人员能够输出高质量的三维建模成果，满足矿山监测和生态修复等后续各项工作的高精度要求^[6]。

5.3. 矿山方量变化及计算

在方量变化的具体计算中，首先须确保无人机倾斜摄影技术采集到的数据具有较高的分辨率和精度。无人机在飞行过程中采集到的地面影像，通过摄影测量软件进行处理，可以生成高精度的数字表面模型(DSM)和数字地形模型(DTM)。在此基础上，利用专门的GIS软件进行三维空间分析，量化矿山的体积变化^[4]。具体的计算方法包括基于体素模型的测量和基于切片模型的测量，这两种方法都能够提供体积估算，并可以相互验证，确保结果的可靠性。

在矿山方量的变化分析中，还需要综合考虑开采效率、矿产资源的利用率以及可能造成的环境影响^[6]。通过对无人机数据的持续跟踪和分析，能够及时调整开采策略，优化资源配置，同时达到环境保护的目的。矿山管理者可以基于这些精确的数据信息，合理规划未来的开采顺序和区域，以实现矿山经济效益和生态效益的双重提升。

总之，无人机航测技术不仅提高了矿山测绘的效率和安全性，也为矿山开采过程中方量变化的准确计算提供了强有力的数据支持。通过精确的测量数据，结合科学合理的分析方法，无人机航测技术为矿山资源管理和环境保护贡献了重要力量^[4]。未来，随着技术的进一步提升，无人机在矿山测绘领域的应用将更加广泛，数据精度和应用深度将持续增强。

6. 结语

在21世纪初，无人机技术应用于地理信息获取，开辟了测绘学领域的新纪元。本研究系统性地探索并实践了无人机在山区地形非金属矿矿山测绘中的应用，指明了无人机倾斜摄影测量技术的重要角色与未来发展前景。研究结果展现了该技术在提供高精度，高效率的地理信息收集方面的显著优势。不仅如

此,本研究的实证分析还为无人机技术在山区地形矿山勘探中的具体应用提供了有力证据,证实了该技术在复杂地质环境下的有效适应性与成本效益分析[2]。

由于地形复杂、地理环境恶劣,山区地形矿山测绘长期以来一直面临着大量的技术挑战和安全隐患。本研究通过对无人机高精度倾斜摄影测量技术的深入研究与现场应用,对这些挑战提出了解决方案。结果证明,相比传统的人工测量和地面测绘技术,无人机倾斜摄影具有更快的数据采集速度,更高的空间分辨率,以及更低的操作难度[3]。经过本研究的实践验证,无人机测绘技术能显著提高矿山工程测量的精准度和效率,对未来矿山开采规划的制定提供了科学依据[4]。

无人机测绘技术在矿山工程测量中不断取得的突破和进展,不仅为地形复杂区域的矿产资源勘探提供了新的方向,也极大地推动了相关领域科技水平的提升。面向未来,随着无人机技术及其配套设备的不断完善和创新,可以预见该技术在国内外矿山测绘领域将得到更广泛的应用与推广[1]。

综上所述,无人机倾斜摄影测量技术在提高山区地形非金属矿测绘精度与效率方面展现了无可比拟的优势,已成为矿山地理数据采集与监控的重要工具。其在矿山测绘领域的广泛应用,不仅能够减缓环境恶化速度、保护生态环境,还能促进矿产资源的合理利用和矿山生产的安全高效,为矿业经济的可持续发展奠定基础。未来该技术的研究与应用将继续深入,对促进矿山测绘技术的革新和地质勘探领域的科技进步具有重要意义。

参考文献

- [1] 周坚. 无人机测绘技术在地质矿产勘查中的应用[J]. 中国高新科技, 2023(10): 150-152.
- [2] 张强. 无人机低空航摄在矿山测绘中的应用研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(9): 172-174.
- [3] 徐影超. 山区地形非金属矿应用无人机倾斜摄影测量[J]. 山西建筑, 2023, 49(12): 191-193.
- [4] 黄洋, 晏迪. 无人机航测技术在矿山工程测量中的应用[J]. 中国金属通报, 2022(2): 16-18.
- [5] 马世龙, 朱小伟. 无人机测绘技术在金属矿产开采中的应用[J]. 世界有色金属, 2022, 47(17): 34-36
- [6] 张清澳. 矿山测量中无人机遥感技术的应用[J]. 世界有色金属, 2023(2): 184-186.
- [7] 晋海龙. 无人机航拍测量技术在煤矿地质中的应用研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(11): 181-183.
- [8] 余亨源. 无人机倾斜摄影测量技术在三维数字城市建模中的应用[J]. 低碳世界, 2022, 12(5): 193-195.
- [9] 杨智, 刘乐, 李郑. 无人机倾斜摄影测量技术在废弃矿山环境恢复治理中的应用[J]. 能源技术与管理, 2022, 47(2): 7-9.
- [10] 王元. 无人机倾斜摄影技术在三维不动产中的应用[J]. 经纬天地, 2022(5): 39-41.