

低空无人机航空摄影测量在矿山监测中的应用

王彦军

宁夏禾宇空间测绘有限公司，中国·宁夏 银川 750004

摘要：低空无人机航空摄影测量技术凭借高分辨率、高灵活性、低成本及快速响应等优势，在矿山监测领域展现出显著的应用价值。本文系统阐述了低空无人机航空摄影测量的技术原理与工作流程，深入分析其在矿山地形测绘、开采进度监测、边坡变形预警、环境治理评估等方面的具体应用路径。通过探讨该技术在数据精度控制、复杂环境适应性及多源数据融合等方面的关键问题，结合实际案例验证了其在提升矿山监测效率、保障生产安全及促进生态修复中的作用。研究表明，低空无人机航空摄影测量技术可实现矿山监测的智能化与动态化，为矿山资源合理开发、安全生产管理及可持续发展提供科学的数据支撑。

关键词：低空无人机；航空摄影测量；矿山监测；环境评估

Application of low-altitude drone aerial photogrammetry in mine monitoring

Wang Yanjun

Ningxia Heyu Space Surveying and Mapping Co., Ltd. China Yinchuan Ningxia 750004

Abstract: Low altitude unmanned aerial vehicle aerial photogrammetry technology has shown significant application value in the field of mining monitoring due to its advantages of high resolution, high flexibility, low cost, and fast response. This article systematically elaborates on the technical principles and workflow of low altitude unmanned aerial vehicle aerial photogrammetry, and deeply analyzes its specific application paths in mining terrain mapping, mining progress monitoring, slope deformation warning, environmental governance assessment, and other aspects. By exploring the key issues of this technology in data accuracy control, adaptability to complex environments, and multi-source data fusion, combined with practical cases, its role in improving mining monitoring efficiency, ensuring production safety, and promoting ecological restoration has been verified. Research has shown that low altitude drone aerial photogrammetry technology can achieve intelligent and dynamic monitoring of mines, providing scientific data support for the rational development of mining resources, safe production management, and sustainable development.

Keywords: Low-altitude UAV; Aerial surveying; Mine monitoring; Environmental assessment

1 低空无人机航空摄影测量技术原理与系统构成

1.1 技术原理

低空无人机航空摄影测量技术是以空中三角测量为基础，利用多视角影像的匹配联合解算，完成对目标区域的三维空间信息重构，其基本原理是利用无人机平台按照预定航线获取矿山区域的序列影像，根据影像中的同名点的几何关系，通过光束法平差等方法求解影像的外方位元素，建立区域的整体空间坐标系，然后利用地面控制点的坐标约束，将影像坐标转换成实际的地理坐标，从而得到满足精度要求的测绘成果。

相比于传统的航空摄影测量来说，低空无人机摄影测量有其独特的优势，第一是高分辨率，无人机搭载的单反

相机或者工业相机可以获取到厘米级分辨率的影像，可以清楚地看到矿山的小型构筑物，边坡裂缝等细节信息，第二是灵活的作业模式，无人机可以在 50-300 米的高度飞行，不受矿山复杂地形的影响，可以针对矿山的重点区域，比如采场，尾矿库等进行精细的拍摄，第三是快速获取数据的能力，一架次的无人机可以在 1-2 小时的时间内对 10 平方公里的区域进行拍摄，数据处理时间短，可以满足矿山动态监测的时效性要求。

1.2 系统构成

低空无人机航空摄影测量系统包括硬件和软件两部分，构成“数据采集 - 处理 - 分析 - 应用”完整的链路。

硬件系统包含无人机平台、传感器、飞控系统以及地面站。无人机平台按照矿山监测需求，可以选多旋翼或

者固定翼，多旋翼无人机比如四旋翼、六旋翼，具备垂直起降、悬停的能力，适合小范围、高精度的监测；固定翼无人机续航时间较长，可达 1-2 小时，覆盖范围较广，适合 10-50 平方公里的大范围测绘，比较适合大型矿山的大范围测绘。传感器是数据采集的关键，主要设备有：光学相机，用来获取纹理信息，适合地形测绘和环境监测；LiDAR 传感器，依靠激光点云直接得到三维坐标，在植被覆盖区域或者夜间作业时有优势；热红外相机，可以监测矿山的热源点，像自燃区之类的地方，利于安全生产管理。飞控系统完成无人机自主飞行控制任务，依靠 GPS/北斗定位，IMU 惯性测量单元达成精准的航迹跟踪，保证影像采集的重叠度，航向重叠度在 70~80%，旁向重叠度 60~70%，符合后期处理要求，地面站可对无人机的状态实施即时监控，执行航线规划与应急操作，保证作业安全。

软件系统包含数据处理与分析平台，数据处理软件借助空中三角测量对影像执行联合解算，进而形成密集点云，之后利用建模算法创建 DSM 与 DOM，还可以实现三维模型的自动化生成，专业分析软件可针对测绘成果展开空间分析，比如提取矿山边界线，测算开采量，监测植被覆盖度变化等，部分较为先进的系统已经整合了机器学习算法，可以做到对矿渣堆积区，边坡裂缝等特征的自动识别，从而进一步改善数据处理效率。

2 低空无人机航空摄影测量在矿山监测中的核心应用

2.1 矿山地形测绘与三维建模

矿山地形测绘属于资源开发规划，安全生产管理的基础工作，传统全站仪，GPSRTK 等手段要逐一测量，效率不高，难以包含危险区域，低空无人机航空摄影测量凭借高分辨影像和三维重建技术，可以迅速形成矿山区域的高精度地形图和三维模型，给矿山设计赋予直观的数据支撑。

露天矿测绘中，无人机按照预先设定好的航线进行影像采集之后，经过数据处理，可以形成 1:500-1:2000 比例尺的地形图，平面精度达到 0.1-0.5 米，高程精度是 0.2-0.8 米，这符合矿山生产设计时的精度需求，采用三维建模技术创建起来的矿山三维模型，能够清楚地显示采场台阶，运输道路，排土场等要素的空间分布状况，给矿山开采方案改进，运输线路规划给予可视化的依据，以某大型露天煤矿监测为例，利用固定翼无人机拍摄到的影像来生成三维模型，通过模型量算得到采场边坡角，台阶高度这些参数，和设计数值对比之后，发觉局部边坡角存在超出，于是马上指示改变开采计划，免除边坡崩塌的危险。

针对地下矿及采空区监测，无人机可搭载 LiDAR 传感器实施穿透式测量，在植被茂密处或者复杂地形环境下依然可以得到精确的地形数据，通过对采空区上方地表开展周期性测绘，并借助时序分析找出地表沉降漏斗的所在位置及其范围，从而给采空区治理给予数据支撑，某个铁矿采空区监测项目当中，利用多旋翼无人机搭载 LiDAR 系统，每隔一个季度便获取一次数据，经过对比分析之后得知采空区上方地表的沉降量达到 32 厘米，于是立刻着手开展填充治理工程，避免了地面塌陷事故的发生。

2.2 矿山开采进度与范围监测

矿山开采进度和范围的动态监测是保证资源合理开发、防止超界开采的重要手段，传统的做法依靠人工记录和定期核查，容易产生数据滞后和误差，低空无人机航空摄影测量借助多期影像对比分析，可以做到对开采边界、开采量的准确量化，给生产管理和监督给予客观依照。

开采边界方面，在不同时间 DOM 数据之间进行叠加处理时，能自动找出矿山开采边界的轨迹，辨认出超界开采的地方，在某个关于金属矿的监测项目当中，借助无人机得到 2023 年 3 月份和 9 月份所拍摄的照片，经过边界提取和对比之后，东南方位开采区域的边界越过了许可范围大约 0.3 平方公里，有关监管单位按照这一信息马上干涉纠正并追查违规者。

开采量估算的时候，通过算出多期 DSM 的体积差别，便可以算出开采量，做法就是把早期 DSM 当作基准面，再减去后期 DSM 的高程数值，这样就能得到开采区域的高度变化量，然后乘以水平面积就得出了开采量，同传统的爆破量统计办法比较起来，无人机测量所得到的结果误差能控制在百分之五以内，而且能够覆盖全部采场区域，不会出现局部漏算的情况，某石灰石矿采用这项技术以后，每月开采量的统计速度提升了百分之八十，数据的准确度也得到了很大的改善。

2.3 矿山边坡变形监测

矿山边坡，其稳定状况直接牵扯到生产安全问题，边坡一旦失稳就会造成设备损坏，人员伤亡之类的严重事故，低空无人机航空摄影测量凭借时序影像分析能够做到边坡变形的高精度监测，给预警体系创建给予数据支撑。

边坡变形监测的技术路径是：第一，无人机定时获取边坡区域的高分辨率影像，生成多期三维点云或者 DSM，第二，用点云配准手段或者 DSM 差分技术，算出两期数据里同名点的坐标差别，得到边坡的变形量，包含水平位移和垂直位移，第三，借助插值分析形成变形等值线图，

找出变形集中区域和趋向,为了提高精度,在边坡区域布置一些控制点,像反光标靶之类的东西,用来消除坐标系差别和系统误差,使得变形监测精度可以做到毫米级到厘米级。

某露天铜矿边坡监测项目中,研究团队每两周得到一次数据,监测持续6个月,发现边坡中下部区域有明显的变形,最大水平位移达到45毫米,垂直位移28毫米,而且变形速度越来越快,结合地质勘察数据,判断这个区域有滑坡危险,矿山于是提前把设备和人员撤离,又用锚索加固边坡,避免了滑坡事故,而且,分析变形时序曲线,可以形成边坡变形和开采活动,降雨等要素之间的联系模型,给边坡稳定预测赋予理论根基。

3 低空无人机航空摄影测量应用的关键技术与挑战

3.1 数据精度控制技术

数据精度是矿山监测结果可靠性的关键保证,无人机性能、环境状况、处理手段等诸多因素都会对其产生影响,必须依靠系统性举措来加以控制。

硬件选型与参数优化方面,要按照监测需求挑选无人机和传感器,高精度监测像边坡变形之类的就用工业级无人机,大疆 Matrice350RTK,再配2000万像素以上的相机,保证影像分辨率符合变形识别的要求,大范围测绘就选固定翼无人机,兼顾效率和精度,航线规划要顾及地形起伏,用仿地飞行模式,根据前期DSM调整飞行高度,防止高度改变造成影像分辨率不一致,还要设定好重叠度,航向至少75%,旁向至少65%,保证同名点匹配准确。

像控点布设与测量方面,像控点是连接影像坐标与地理坐标的桥梁,其精度决定着整体成果的优劣,像控点应布置于视野开阔且不易移动之处,像控点利用全站仪或者GPSRTK开展测量,平面及高程精度须达厘米级,就小范围监测而言,像控点至少要有6个,而大范围监测时,像控点的密度为每平方公里4-5个,务必做到均匀分布。

数据处理误差修正方面,要重视空中三角测量的残差控制,针对残差过大的影像重新测量或者剔除掉,山区等地形复杂之处可以采取分区处理办法,以此来减轻地形起伏给整体精度带来的影响,而且,利用POS数据可缩减像控点数目,不过,POS数据得做事后差分处理,去除漂移误差。

3.2 复杂环境适应性技术

矿山环境具有地形复杂、粉尘多、电磁干扰强等特点挑战无人机作业稳定性与数据质量,需优化技术方案

地形复杂处(深凹露天矿、峡谷型矿山),无人机易受信号遮挡造成GPS失锁,需用“GPS+惯导”组合导航,以保证航迹精度,规划航线时,要避开陡崖附近飞行,留出50米以上安全距离,设置返航点及应急迫降区,某深凹铁矿监测期间,无人机借助惯导系统,在GPS信号丢失时段依然稳定飞行,从而获取了采场底部的影像数据。

粉尘、烟雾环境下,空气中有颗粒物散射光线,影像对比度低、细节看不清,这时可以选晴天无风时工作,减少粉尘干扰,处理数据时用图像增强算法改善影像,对长期有粉尘的地方,用多光谱相机,它近红外波段粉尘影响小,仍能识别地物。

在电磁干扰环境下,无人机的通信信号容易受到干扰,数据传输中断或者失控,要选用抗干扰能力强的数传系统,缩短飞行距离,保证地面站与无人机之间的通信稳定,在作业前做好电磁兼容性测试,防止因为干扰造成故障。

3.3 多源数据融合与智能分析

矿山监测需综合多类型、多时期数据的全面分析与深度挖掘,关键在于多源数据融合与智能化分析以提升监测效率

多源数据融合方面,无人机获取的影像、点云数据可以同传统的测量数据、物联网传感器数据融合起来,把无人机DSM同地面沉降监测点的数据融合起来,就能优化沉降模型的精确度,把边坡变形数据同雨量数据联系起来分析,就可以找到降雨给边坡稳定性带来的影响规律。

智能化分析上,依靠深度学习的图像识别技术能自动提取矿山特点,用语义分割算法识别采场,排土场,道路等区域,正确率超过90%,靠目标检测算法自动识别边坡裂缝,矿渣堆积异常等隐患,响应时间比人工分析快80%,融合时序数据的机器学习模型可以预估边坡变形走向,给预警决定给予支撑。

4 结语

低空无人机航空摄影测量技术依靠高分辨率数据获取、快速三维建模以及多期对比分析,给矿山监测赋予了高效、准确又全面的解决途径,通过本文研究显示,这种技术在矿山地形测绘方面可以做到1:500比例尺地形图的迅速生成,精度符合生产需求,在开采进度监测当中,凭借多期数据对比可以精确地衡量开采范围和开采量,从而给生产管理给予客观依照,在边坡变形监测上,联系时序分析能够达成毫米级到厘米级精度的变形预警,切实保障安全生产,就环境监测而言,借助多光谱数据和NDVI分析,可以全方位地评判植被恢复和水土保持成效,助力矿山生态改良。同时通过破

解数据精度把控、复杂环境下适应性、不同源数据融合等诸多技术难关, 该技术应用限制被打破, 在许多矿山监测项目中得到验证, 且应用可行且高效, 据实践证明, 低空无人机航空摄影测量技术能大幅提升矿山监测效率, 减轻人工压力与安全威胁, 是矿山数字化、智能化管控的重要保障。

参考文献:

[1] 赵富军. 无人机航空摄影测量在矿山测量中的技术应用[J]. 世界有色金属, 2025, (05): 169-171.

[2] 张晓伟. 无人机航空摄影测量技术在矿山测量中的应用[J]. 世界有色金属, 2024, (20): 150-152.

[3] 潘斌. 无人机航空摄影测量技术在矿山测量中的应用探讨[J]. 世界有色金属, 2024, (08): 150-152.

[4] 付佳琪. 无人机航空摄影测量在河北某矿山地形测绘中的应用及精度控制[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2024, (01): 81-83+70.

[5] 周维, 梁晨葵. 无人机航空摄影测量技术在矿山测量中的应用及优化[J]. 世界有色金属, 2024, (01): 139-141.

作者简介: 王彦军 (1987.01-) 男, 汉族, 宁夏固原人, 本科, 工程师, 主要研究方向: 测绘, 航空摄影测量。