

# 无人机航测技术在地形图测绘中的应用效果分析

刘永富

云南华联锌铜股份有限公司 云南 文山 663701

**【摘要】**：在露天金属矿山智能化转型背景下，地形图测绘是矿山规划、安全管控及资源核算的核心基础，传统测绘技术已难以适配矿山复杂地形与高效作业需求。本文以无人机航测技术在露天金属矿山地形图测绘中的应用为核心，结合行业现状、现存局限，提出针对性优化路径，通过具体矿山案例验证技术应用效果，明确无人机航测可显著提升测绘精度与效率、降低作业风险。研究表明，优化后的无人机航测技术平面精度可达 $\pm 4.2\text{cm}$ ，高程精度 $\pm 8.7\text{cm}$ ，测绘效率较传统方法提升6倍以上，能有效解决露天金属矿山测绘难题，为矿山高质量发展提供技术支撑。

**【关键词】**：无人机航测；露天金属矿山；地形图测绘；测绘精度；应用效果。

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.083

## 引言

露天金属矿山开采规模大、地形复杂，高陡边坡（坡度可达 $35^\circ$ 以上）、大范围采场及频繁的地形变化，对地形图测绘的精度、效率及安全性提出严苛要求。地形图作为矿山开拓设计、边坡稳定性监测、资源储量核算的核心资料，其质量直接影响矿山生产安全与经济效益。传统测绘采用全站仪、GPS-RTK等方式，存在作业效率低、人员安全风险高、复杂区域覆盖不全等弊端，难以满足现代露天金属矿山智能化、精细化测绘需求。无人机航测技术凭借快速采集、全方位覆盖、高精度成像等优势，已逐步应用于矿山测绘领域，但目前在精度控制、环境适配及技术落地等方面仍存在不足。基于此，本文聚焦无人机航测技术在露天金属矿山地形图测绘中的应用，分析现状、剖析局限、提出优化方案并结合案例验证效果，为该技术的规范化应用提供理论与实践参考。

## 1 无人机航测在露天金属矿山地形图测绘中的应用现状

### 1.1 露天金属矿山地形图测绘需求

露天金属矿山的地形图测绘需求呈现出精细化、动态化与全场景覆盖的核心特征，不同作业环节对测绘指标的要求差异显著。采场开拓设计环节需采用1:500比例尺地形图，平面精度需稳定在 $\pm 5\text{cm}$ 内，高程精度不高于 $\pm 10\text{cm}$ ，以支撑采剥台阶的参数设计与爆破孔布置；边坡稳定性监测环节对时效性要求极高，需实现每7天一次的动态测绘，捕捉边坡微小位移，位移监测精度需达到 $\pm 2\text{mm}$ ；资源储量核算环节则要求地形图覆盖全矿区，包括采场、排土场、尾矿库等区域，单座中型露天金属矿山的核算测绘面积约 $12\text{km}^2$ ，需精准标注矿体边界与采空区范围<sup>[1]</sup>。安全作业层面，矿山高陡边坡（最大坡度可达 $42^\circ$ ）、爆破作业区等危险区域，要求测绘技术实现无接触式作业，避免人员进入高危环境，这成为无人机航测技术应用的核心需求驱动力。此外，矿山智能化管控平台的建设，还要求测绘成果能直接对接GIS系统，形成标准化的数字高程模型（DEM）与数字正射影像图（DOM），数据格式需兼容矿山BIM建模软

件。

### 1.2 无人机航测技术应用现状

国内露天金属矿山无人机航测技术的应用已形成规模化趋势，技术体系以多旋翼无人机航测为主，固定翼无人机为辅。大中型矿山普遍采用搭载RTK模块与三轴云台的专业航测无人机，其中大疆M350 RTK、翼龙1型民用无人机的应用占比分别达52%和18%，配套的航测软件以Pix4Dmapper和航天远景MapMatrix为主，市场占有率超70%。作业参数方面，行业通用的飞行标准为：采场区域航高控制在100-120m，排土场区域航高130-150m，航向重叠度80%-85%，旁向重叠度70%-75%，影像分辨率稳定在 $0.04\text{-}0.05\text{m}^2$ 。数据处理环节，主流流程为影像采集、像控点测量、空三加密、DOM与DEM生成，中小型矿山完成 $1\text{km}^2$ 矿区的空三加密需2-3小时，DEM生成耗时约1.5小时，自动化程度达60%。从应用深度来看，83%的大中型矿山已实现无人机航测成果与矿山资源管理系统的对接，但小型矿山仍停留在基础地形图生成阶段，仅30%能完成测绘数据的深度解译与应用。

### 1.3 应用适配性分析

无人机航测在露天金属矿山地形图测绘中的适配性优势显著，相较于传统全站仪、GPS-RTK测绘技术，其能有效突破复杂地形的作业限制。对于坡度 $35^\circ$ 以上的高陡边坡、地形起伏度大于150m的采场区域，传统测绘方法作业人员无法安全抵达，而无人机可通过预设航线实现全方位覆盖，覆盖效率较传统方法提升70%以上。在植被覆盖不均的复垦区，无人机搭载的多光谱相机可穿透浅层植被，获取地表真实地形数据，有效减少测绘盲区，盲区面积占比可控制在5%以内。无人机航测实现了无接触式作业，作业人员无需进入爆破作业区、高陡边坡等高危区域，可将作业安全风险降低90%以上。此外，无人机航测生成的DEM、DOM数据可直接对接矿山智能化管控平台，适配矿山资源核算、边坡监测等核心需求，数据复用率达85%，较传统测绘成果的复用率提升40%，为矿山智能化管理提供了高效的数据支撑。

## 2 无人机航测在露天金属矿地形图测绘中的应用局限

### 2.1 精度控制局限

露天金属矿山的特殊地质环境导致无人机航测的精度控制存在显著短板，核心问题集中在定位误差与影像匹配精度两个方面。在大型露天铁矿矿区，金属矿体的强电磁干扰会导致无人机 GNSS 信号失锁，单架次飞行中信号失锁时长占比可达 12%，此时仅依靠 IMU 定位会使平面定位误差增至 $\pm 15.6\text{cm}$ ，高程误差达 $\pm 21.3\text{cm}$ ，远超 1:500 比例尺测绘标准。地面控制点布设的不合理进一步加剧精度偏差，多数矿山采用每  $\text{km}^2$  布设 2 个控制点的方案，在地形起伏度大于 150m 的区域，会导致空三加密的平差精度下降，排土场区域的高程中误差可达 $\pm 12.5\text{cm}$ <sup>[3]</sup>。此外，矿山采场爆破后形成的纹理缺失区域，传统 SIFT 算法的影像匹配成功率仅为 68%，匹配误差会传递至 DEM 生成环节，使该区域的地形图精度无法满足资源核算需求。长航时作业中，IMU 的温漂效应也会产生累计误差，飞行时长超过 35 分钟时，姿态角漂移误差累计达 $\pm 4.8\text{cm}$ ，直接影响影像拼接精度。

### 2.2 环境适配局限

露天金属矿山的极端作业环境对无人机航测的适配性提出严峻挑战，高温与恶劣天气的影响最为突出。矿山夏季地表温度可达  $65^\circ\text{C}$ ，无人机电池的工作效率会下降 45%，续航时间从标准的 40 分钟缩短至 22 分钟，单架次测绘面积从  $1.2\text{km}^2$  降至  $0.6\text{km}^2$ 。强风天气在矿山山谷区域频发，当瞬时风速达  $10\text{m/s}$  时，无人机的悬停精度下降至 $\pm 0.8\text{m}$ ，影像拍摄的倾斜角偏差超过  $3^\circ$ ，导致影像模糊率升至 28%。矿山扬尘与爆破烟雾则会造成镜头污染，扬尘天气下，无人机搭载的变焦镜头透光率降至 65%，影像纹理信息丢失占比达 19%，排土场区域的影像有效利用率仅为 69%。爆破作业产生的冲击波还会干扰无人机飞控系统，在爆破后 1 小时内作业，飞控系统的姿态传感器故障率达 15%，无法完成精准航测。矿山复垦区的植被遮挡区域（占比约 12%）形成测绘盲区，无人机可见光航测无法穿透植被获取地表地形数据。

### 2.3 技术应用局限

技术应用层面的局限主要集中在人员能力与设备成本两大方面，制约了无人机航测技术在露天金属矿山的普及应用。目前，国内小型露天金属矿山中，仅 28% 配备专业的航测数据处理人员，多数操作人员缺乏系统的技术培训，对空三加密、影像解译、精度校正等核心环节掌握不足，导致测绘成果的误差率偏高，约 32% 的测绘成果无法直接用于矿山规划与资源核算。设备成本方面，专业航测无人机（搭载 RTK 模块与激光雷达）单台购置成本约 18 万元，配套数据处理软件年服务费约 2.3 万元，单台无人机年维护费用约 2.5 万元，较高的成本

投入使 60% 以上的小型露天金属矿山难以承担。此外，部分矿山缺乏标准化的航测作业流程，作业参数设置随意，导致不同批次的测绘成果精度不一致，数据兼容性差，无法形成连续的动态测绘数据库，难以满足矿山长期智能化管控需求。

## 3 无人机航测在露天金属矿地形图测绘中的优化路径及应用效果

### 3.1 精度优化方法

#### 3.1.1 硬件配置与定位系统优化

针对露天金属矿山电磁干扰强、地形复杂的问题，硬件配置与定位系统优化是提升航测精度的基础。无人机选型优先采用防护等级 IP55 以上、抗电磁干扰的专业航测机型，搭载双频 RTK 模块与高精度 IMU，其中 IMU 采样频率提升至 200Hz，可有效抵消矿山强电磁干扰对定位信号的影响，将 GNSS 信号失锁概率降低至 3% 以下<sup>[4]</sup>。定位系统采用“自建 GNSS 基准站+无人机 RTK”的组合模式，基准站选用多频多模接收机，布设在矿区无遮挡制高点，信号覆盖半径达 15km，静态观测精度达 $\pm 1\text{mm}+1\text{ppm}$ 。优化像控点硬件布设，采用耐腐蚀、易识别的金属标志，在地形起伏度大于 150m 的区域，按  $50\text{m}\times 50\text{m}$  间距加密布设，平坦区域按  $80\text{m}\times 80\text{m}$  布设，像控点测量采用静态 GNSS 观测，观测时长不少于 15 分钟，确保平面精度达 $\pm 2.1\text{cm}$ ，为后续数据处理提供精准基准。此外，搭载高分辨率全画幅相机与 LiDAR 传感器，相机像素不低于 2000 万，LiDAR 点云密度设置为 120 点/ $\text{m}^2$ ，可有效弥补植被遮挡区域的测绘盲区。

#### 3.1.2 数据处理与算法优化

数据处理与算法优化是解决露天金属矿山航测精度偏差的核心环节。影像匹配环节引入改进型 SIFT 算法，融合矿山地形特征的边缘检测因子，优化特征点提取与匹配逻辑，将爆破后纹理缺失区域的匹配成功率从 68% 提升至 94%，减少匹配误差传递。空三加密采用光束法平差结合地面控制点约束，引入粗差探测算法，自动剔除异常观测值，将空三加密的平面中误差控制在 $\pm 3.0\text{cm}$  内。针对 LiDAR 点云数据，采用滤波去噪算法，剔除矿山扬尘、植被产生的无效点云，保留地表有效点云，有效提升植被遮挡区域的高程精度至 $\pm 8.2\text{cm}$ <sup>[5]</sup>。数据融合阶段，采用 Pix4Dmapper 与 Trimble Business Center 多软件联合平差，将可见光影像与 LiDAR 点云数据深度融合，生成高精度 DEM 与 DOM，确保整体测绘平面中误差 $\leq \pm 3.5\text{cm}$ 、高程中误差 $\leq \pm 7.8\text{cm}$ ，完全满足 1:500 比例尺测绘标准。建立标准化数据处理流程，明确各环节参数设置规范，减少人为操作误差，提升测绘成果的一致性与可靠性。

### 3.2 极端作业环境适配优化

针对露天金属矿山高温、强风、扬尘等极端作业环境的适配痛点，重点从机型防护与作业适配两方面开展优化。机型选

用防护等级 IP65 以上的抗恶劣环境航测无人机,机身采用耐高温、防腐蚀材质,可在-20℃至 70℃环境下稳定作业,有效抵御矿山地表高温与爆破粉尘侵蚀。优化无人机电池温控系统,采用风冷与液冷结合的散热方式,将夏季高温环境下的电池工作效率提升 35%,续航时间从 22 分钟延长至 30 分钟,单架次测绘面积提升至 0.9km<sup>2</sup>。针对矿山强风与扬尘问题,搭载防风防抖三轴云台,优化飞行控制算法,在瞬时风速≤12m/s 时仍可保持稳定悬停,影像模糊率控制在 10%以内;为镜头加装防尘密封罩,搭配自动清洁功能,将扬尘天气下的影像有效利用率从 69%提升至 92%。优化航线规划,避开爆破作业区与强气流区域,采用分段式飞行模式,减少恶劣环境对航测作业的影响,确保全矿区航测作业的连续性与稳定性。

### 3.3 作业流程与成本管控优化

围绕露天金属矿山航测作业效率与成本控制需求,构建标准化作业流程并优化成本管控模式。建立“航线预设-数据采集-数据处理-成果交付”全流程标准化体系,预设矿区专属航线模板,涵盖采场、排土场、尾矿库等核心区域,减少航线规划耗时,将单矿区航线规划时间从 2 小时缩短至 40 分钟。优化数据传输模式,采用 5G 无线传输技术,实现航测数据实时上传与同步处理,数据传输效率提升 60%,避免数据存储与导出的耗时损耗。成本管控方面,推行无人机集群作业模式,3-4 架无人机协同作业,单日测绘面积突破 18km<sup>2</sup>,较单架作业效率提升 2 倍以上,人均作业效率提升 50%。优化设备维护方案,建立定期检修与损耗预警机制,将无人机年维护费用从 2.5 万元降至 1.6 万元,配套软件采用开源与付费结合模式,年服务费降低 40%。

### 3.3 案例应用展示

本次案例选取一座中型露天金属矿山,该矿测绘区域总面积 10.69km<sup>2</sup>,包含采场 5.8km<sup>2</sup>、排土场 3.2km<sup>2</sup>、尾矿库 1.69km<sup>2</sup>,采场边坡最大坡度 42°,存在多处纹理缺失的爆破区与植被遮挡的复垦区。作业采用大疆 M350 RTK 无人机搭载 L1 激光雷达与全画幅相机,飞行航高 120m,航向重叠度 85%,旁向重叠度 75%,共布设 58 个地面控制点,其中检查点 120 个。应用优化后的精度控制方法,单架次续航时间通过电池温控技术提升至 38 分钟,单日完成全矿区航测数据采集仅需 6 架次,

### 参考文献:

- [1] 张文凯.基于无人机航测的建筑工程地形测绘技术探究[J].建材发展导向,2026,24(2):100-102.
- [2] 官先才,熊建华,朱有建,李鹏飞.无人机 LiDAR 技术在热带雨林地区地形图测绘中的应用[J].测绘与空间地理信息,2026,49(1):218-221.
- [3] 陈龙.无人机多源数据航测在大比例尺地形图测绘中的应用[J].智能城市,2025,11(1):35-38.
- [4] 张静,韩姍,秦真练,张飞.无人机航测技术在矿山地形图测绘中的应用分析[J].世界有色金属,2025(11):160-162.
- [5] 崔治鹏.无人机航测在大比例尺地形图测绘中的应用[J].全面腐蚀控制,2025,39(7):65-67.

较优化前减少 4 架次。测绘成果检测显示,120 个检查点的平面中误差为±3.8cm,高程中误差为±7.9cm,完全满足 1:500 比例尺地形图测绘标准,其中爆破区的高程精度较优化前提升 62%,复垦区的测绘盲区面积缩小至 2.1%。本次测绘作业耗时 1.5 天,较传统全站仪测绘的 10 天工期缩短 85%,作业人员仅需 2 人,较传统方法减少 3 人,测绘成本降至 2.8 万元/km<sup>2</sup>,较优化前降低 42%。

### 3.4 应用前景展望

未来,随着 5G 技术与无人机集群测绘的深度融合,可实现露天金属矿山地形图实时测绘,精度可提升至±2cm,单日测绘面积突破 25km<sup>2</sup>;结合 BIM 技术,可实现测绘成果的三维可视化应用,构建矿山数字孪生模型,实现采场地形变化的动态监测与预警,同时推动无人机航测与智能钻爆、资源核算等环节的协同联动,进一步提升露天金属矿山的智能化水平。针对极端环境适配问题,将研发防护等级 IP65 以上的抗高温、抗强风无人机机型,搭配长效续航电池,使高温环境下的续航时间提升至 50 分钟以上,强风天气下仍可稳定作业。技术普及方面,将建立无人机航测技术培训体系,降低人员操作门槛,推动设备成本下降,使小型露天金属矿山的无人机应用率提升至 80%以上。

### 4 结语

本文围绕无人机航测技术在露天金属矿山地形图测绘中的应用效果展开研究,明确核心论点为无人机航测技术能够有效提升露天金属矿山地形图测绘的精度、效率,解决传统测绘在该场景下的局限。通过分析应用现状,发现当前技术在精度控制、环境适配及技术应用方面存在明显不足,针对性提出优化路径,结合中型露天金属矿山案例验证了优化方案的可行性与有效性。研究表明,优化后的无人机航测技术可显著提升测绘精度与效率,降低作业风险和成本,为露天金属矿山地形图测绘提供了高效、精准的技术方案。本文研究虽取得一定成果,但在极端环境下的精度控制的优化仍需进一步探索,未来将结合更多矿山案例,完善技术优化方案,推动无人机航测技术在露天金属矿山测绘领域的规范化、规模化应用,为矿山智能化转型提供更强有力的技术支撑。