

# 测绘航空摄影在数字矿山建设中的应用

佟兆安

河北省地质矿产勘查开发局第二地质大队（河北省矿山环境修复治理技术中心） 河北 唐山 100083

**摘要：**当前数字矿山已成为矿业转型升级的核心方向，其建设需多维度、高质量的空间数据支撑。本文聚焦测绘航空摄影技术在数字矿山建设中的应用展开研究。该技术以航空平台为载体，具备高效、高精度、全面、时效性的特点，可分为垂直、倾斜、侧视摄影三类。数字矿山建设需高精度基础数据、动态监测及全场景覆盖，而该技术能满足这些需求，在矿山地形测绘与三维建模、资源储量监测与评估、开采进度管控与规划优化、安全风险监测与预警四大环节发挥关键作用，为数字矿山构建“地上-地下”一体化空间框架，提升运营效率与安全水平，对推动矿山数字化、精细化发展具有重要意义。

**关键词：**测绘航空摄影；数字矿山建设；具体应用

**引言：**传统地面测绘存在效率低、复杂地形覆盖难等局限，难以满足数字矿山对数据精准性与时效性的需求。测绘航空摄影技术凭借高效覆盖、厘米级精度、全场景数据获取能力，为数字矿山建设提供新路径。本文从技术概述入手，分析数字矿山建设需求，深入探讨该技术在矿山地形建模、资源监测、进度管控及安全预警中的应用，旨在为数字矿山建设提供技术参考，助力矿业实现智能化发展。

## 1 测绘航空摄影技术概述

### 1.1 技术原理与特点

测绘航空摄影技术以航空平台为载体，依托光学或电子成像设备获取地面影像，核心原理是基于摄影测量学的几何投影规律，通过对影像的解析与处理，反演地面三维空间信息。其技术流程涵盖影像获取、预处理、定向建模与数据输出，其中空中三角测量技术是关键环节，通过对多张重叠影像的同名点匹配，构建地面控制点网络，实现影像坐标向大地坐标的转换，确保地理空间信息的准确性。该技术具有四大显著特点：（1）高效性，借助航空平台可快速覆盖大面积区域，相比传统地面测绘，大幅缩短数据采集周期；（2）高精度，通过专业成像设备与定位技术（如GNSS、IMU），可实现厘米级至亚米级的测量精度，满足矿山精细化建设需求；（3）全面性，能获取地表纹理、地形起伏等多维度信息，为后续三维建模提供完整数据支撑；（4）时效性，可根据矿山建设需求灵活安排飞行任务，及时捕捉地面动态变化，为动态监测提供数据保障。

### 1.2 技术分类与适用场景

根据摄影角度与成像方式的差异，测绘航空摄影技术可分为以下三大类。（1）垂直摄影的镜头主光轴与地

面垂直（偏差不超过 $3^\circ$ ），获取的影像具有比例尺均匀、地物轮廓清晰的特点，适用于大范围地形测绘、地形图制作等场景，是数字矿山基础地理信息采集的主要技术手段；（2）倾斜摄影通过多台相机从不同角度（通常为垂直+4个倾斜方向）同步成像，能获取地物侧面纹理与空间关系，可实现矿山地表建（构）筑物、复杂地形的精细化建模，满足矿山三维可视化场景构建需求；（3）侧视摄影的镜头主光轴与地面平行或呈大角度倾斜，主要用于获取狭长区域（如矿山运输巷道、边坡）的连续影像，适用于线性地物的动态监测与信息提取<sup>[1]</sup>。

## 2 数字矿山建设的内容与需求

### 2.1 数字矿山建设的主要内容

数字矿山建设以数字化、智能化为核心，主要涵盖以下三大内容。（1）数据采集与处理，需系统性获取矿山地形地貌、地质构造、资源分布等多维度基础数据，通过标准化预处理流程，消除数据噪声、统一数据格式，构建高质量、可复用的矿山数据库，为后续应用提供数据支撑。（2）三维建模与可视化，基于采集的多源数据，运用专业建模技术构建矿山全场景三维模型，整合地表、地下巷道、开采区域等要素，并借助可视化技术实现模型的动态展示与交互操作，直观呈现矿山空间结构与资源分布状态。（3）生产管理与决策支持系统，搭建覆盖矿山开采、运输、安全监管等全流程的管理平台，通过数据集成与分析，实现生产流程的实时监控、资源利用的精准核算，同时为矿山规划调整、风险预警、应急决策提供科学的数据依据，提升矿山运营效率与管理水平。

### 2.2 数字矿山建设对测绘航空摄影技术的需求

数字矿山建设对测绘航空摄影技术的需求主要体现在

在以下三方面。(1)高精度基础数据获取需求,矿山三维建模、资源评估等环节需精准的地形、地物空间信息,需该技术提供大范围、高分辨率的影像数据,确保基础数据的准确性与完整性。(2)动态监测需求,矿山开采过程中地形地貌、资源储量会持续变化,需技术具备快速作业能力,定期捕捉矿山动态信息,满足开采进度跟踪、环境变化监测等实时性需求。(3)全场景数据覆盖需求,矿山常包含复杂地形区域,传统测绘手段难以全面覆盖,需该技术凭借空中作业优势,实现对矿山全域的无死角数据采集,为数字矿山全场景构建提供完整的数据保障<sup>[2]</sup>。

### 3 测绘航空摄影在数字矿山建设中的具体应用

#### 3.1 矿山地形测绘与三维建模

在数字矿山基础数据构建阶段,测绘航空摄影技术是地形测绘与三维建模的核心支撑。作业时,技术人员依矿山范围与地形复杂度规划飞行航线,确定飞行高度及60%-80%航向重叠度、30%-50%旁向重叠度等参数,保障影像连续性与完整性。搭载高分辨率光学或多光谱设备的固定翼飞机、无人机,按预设航线采集矿山全域影像,覆盖地表起伏、地貌、建(构)筑物、植被等要素。所获影像比例尺统一、细节清晰(可辨米级至厘米级地物),无需人工逐点测量,通过专业软件即可提取地形高程、坡度坡向及地物轮廓参数,为测绘提供高精度数据源,大幅降低传统地面测绘的劳动强度与时间成本。

在三维建模环节,该技术借助多视角影像匹配与空中三角测量深度处理数据。先对影像预处理,包括畸变校正、辐射定标、影像拼接,消除设备误差与环境干扰;再用特征点匹配算法识别不同影像同名点,结合GNSS与IMU获取的外方位元素,构建矿山地表三维点云模型(点云密度可按需调整,高密度点云能还原微小起伏)。随后将影像纹理映射到点云模型表面实现真实感渲染,形成涵盖开采区、排土场、运输道路、工业场地、尾矿库的全域三维可视化模型。该模型可直观呈现矿山空间结构,还能通过数据接口与地下巷道、矿体分布、通风系统等地下数据融合,构建“地上-地下”一体化三维场景,作为数字矿山基础空间框架,为规划设计、生产管理、应急演练提供精准空间参考,解决传统二维地图立体形态不直观、空间关系模糊的问题,提升空间信息利用效率与决策科学性。

#### 3.2 矿山资源储量监测与评估

资源储量的精准掌握与动态管控是数字矿山可持续开采、避免浪费的关键,测绘航空摄影技术贯穿资源勘探、开采、核实全流程。在资源监测阶段,技术人员

依矿山资源赋存特点(矿体走向、埋藏深度)与开采节奏,制定定期影像采集计划,及时捕捉资源分布变化。航空平台搭载的多光谱或高光谱成像仪,不仅获取地物几何信息,还能通过分析不同波段光谱反射率,识别矿体与围岩光谱差异,辅助确定矿体边界。将不同时期影像导入专业软件,经比对与解译提取矿体边界变化量、开采区域面积与深度,结合GIS空间分析功能(体积计算、缓冲区分析),计算资源储量变化,实现对开采量、剩余储量的动态跟踪,避免传统人工估算的误差。

在资源评估过程中,高分辨率影像与光谱数据支撑多维度分析。一方面,通过影像解译识别资源赋存区域地质构造(岩层走向、断层分布、节理发育),断层可能致矿体破碎错动,节理发育影响开采稳定性,这些信息为分析开采条件、判断可采性提供直接数据支撑;另一方面,通过多期影像时序对比构建资源储量变化曲线,监测开采中储量消耗速率,结合矿山生产能力与市场需求,预测开采周期,为制定长期资源开发计划(年度开采量规划)、优化开采方案提供科学依据<sup>[3]</sup>。在开采后储量核实环节,该技术可快速获取开采区域现状影像与三维模型,与开采前数据对比计算实际开采量与剩余储量,形成精准核实报告,既满足矿山内部管理需求,也可作为资源监管部门核查合规性、征收资源税的依据,确保储量统计真实准确,避免“超采”“漏报”。

#### 3.3 矿山开采进度管控与规划优化

在数字矿山开采运营阶段,实现开采进度精准管控、避免计划与实际脱节,及优化开采规划、降本提效,是矿山管理的核心难点,测绘航空摄影技术凭借实时性与可视化优势成为高效解决方案。在进度管控方面,技术人员依矿山月度或季度开采计划,确定需监测关键区域,通过无人机实现高频次、灵活化影像采集。采集的影像经快速解译提取开采工作面位置、开采范围(当月新增面积)、开采深度(台阶下降高度)、排土场堆存量等关键指标,导入生产管理系统后,与计划进度指标(计划开采量、台阶推进度)自动对比分析。系统生成进度偏差报表,清晰显示区域“进度超前”或“滞后”情况(如某台阶实际推进度比计划慢5米),并标注偏差原因(设备故障停工、地质条件影响效率),为生产调度提供直观依据,便于及时调整人力、设备配置,确保进度回归计划轨道。

在开采规划优化方面,该技术构建的三维模型可作为虚拟仿真平台,实现“先模拟、后实施”的科学决策。技术人员先将矿山资源数据(矿体品位分布)、地形数据、设备参数(挖掘机作业半径、卡车运输能力)

导入三维模型，构建完整开采仿真环境；再依不同规划目标（最大化资源利用率、最小化运输成本、最低环境影响）设计多套方案（如方案一“从上至下分层开采”，方案二“分区开采、集中运输”）。通过仿真平台模拟各方案开采过程，分析资源利用率（高品位矿体回收率）、生产成本（运输距离与油耗）、环境影响（植被破坏面积）等指标，经数据对比筛选最优方案。开采中基于航空影像获取的地形变化数据（如某区域因开采高程下降），可动态调整规划参数：若开采台阶坡度超安全阈值（露天矿台阶边坡角通常不超45°），则优化台阶高度与坡面角度；若排土场达设计容量，提前规划新排土区域。该技术还能监测巷道开挖（通过地表沉降间接反映）、地面运输道路建设、选矿厂扩建等配套工程进度，确保各项工程协同推进，避免某环节滞后影响整体效率，实现开采运营精细化管理。

### 3.4 矿山安全风险监测与预警

矿山安全生产是数字矿山建设核心目标，边坡失稳、排土场滑坡、尾矿库溃坝等事故易造成重大伤亡与损失，测绘航空摄影技术凭借大范围、非接触式监测优势，在安全风险监测与预警环节构建“事前监测-事中预警-事后评估”全流程防护体系。在风险监测方面，技术人员针对高风险区域（露天矿边坡、排土场、尾矿库坝体、地表塌陷区），制定高频次、常态化监测计划。航空平台搭载的激光雷达、高分辨率相机，通过影像差分技术（如DInSAR）与三维点云对比，获取监测区域地形变形数据（影像差分算毫米级至厘米级位移量，点云对比直观呈现变形分布，如某边坡局部5厘米横向位移）。持续监测可建立高风险区域变形时间序列，分析变形速率（日均位移量）与趋势（位移是否持续增大），精准识别隐患（如某排土场坝体日均位移从1毫米增至5毫米，表明稳定性下降，存在滑坡风险）。

在安全预警方面，该技术通过数据集成与模型构建实现自动化预警。先将航空摄影获取的变形数据与地面

传感器（边坡应力、尾矿库水位传感器）实时数据融合，导入安全风险监测平台；再依不同区域安全标准设定变形阈值。当监测平台发现某区域变形接近或超阈值，自动触发预警机制，通过短信、平台弹窗向安全管理部门发送信号，标注预警区域（西边坡3号台阶）、级别（黄色、红色预警）、当前变形数据及建议措施。通过多期影像历史数据积累，分析高风险区域变形规律（雨季变形增大、开采扰动致变形加剧），结合地质条件（岩层岩性、地下水分布）构建风险预测模型，预测风险发生概率与影响范围，为制定安全防护措施（加固边坡、修建排水）、编制应急预案提供数据支撑。事故发生后，该技术可快速获取事故区域影像与三维模型，评估影响范围、损失程度（设备掩埋数量），为救援与恢复重建提供精准参考，最大限度降低损失，为数字矿山构建全方位、立体化安全防护体系提供保障<sup>[4]</sup>。

结束语：测绘航空摄影技术为数字矿山建设提供了全方位技术支撑，从基础地形建模到资源动态监测，从开采进度优化到安全风险预警，有效解决了传统技术在数据获取与应用中的痛点，显著提升了矿山建设的精细化与智能化水平。随着该技术与智能算法、多源数据融合技术的结合，其应用潜力将进一步释放。本研究可为矿山企业应用该技术提供借鉴，推动矿业行业向绿色、智能、可持续方向转型，助力实现矿业高质量发展目标。

### 参考文献

- [1]何建文.测绘航空摄影在数字矿山建设中的应用研究[J].中国金属通报,2023(7):237-239.
- [2]王云飞,马全良,张婷.数字遥感技术在矿山工程地质测绘中的应用探讨[J].世界有色金属,2025(3):181-183.
- [3]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(1):81-83+70.
- [4]韦元皓.航空摄影测量技术在露天矿山动态监测中的应用[J].中国金属通报,2025(7):154-156.