

数字化测绘技术在矿区地质制图中的应用研究

卓 嘎¹ 尼玛拉吉²

西藏自治区第一地质大队 西藏 拉萨 850014

【摘 要】：矿区地质环境具有地形复杂、地质信息类型多样、空间数据更新频繁等特点，对地质制图精度与效率提出较高要求。数字化测绘技术依托 GNSS、无人机摄影测量、三维激光扫描及 GIS 等技术，实现矿区地质数据的快速采集、集成处理、空间分析与数字化成图。研究数字化测绘技术在矿区地质制图中的应用流程及关键环节，分析其在提高测绘精度、优化制图效率、强化地质信息表达和动态更新方面的作用，为矿区地质测绘技术优化及安全生产管理提供参考。

【关键词】：数字化测绘技术；矿区地质制图；地质测绘；地理信息系统；空间数据

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.062

引言

矿区地质环境复杂多变，地形地貌特殊、地质信息多元、空间数据更新频繁，对地质制图的精度与作业效率提出了更高标准，也是保障矿山安全生产与精细化管控的关键前提。传统制图模式作业流程繁琐、数据处理滞后，难以适配现代化矿山发展需求。现有研究中，曹江龙^[1]针对地质勘探工程测量技术应用开展了专项探究，杜青松等^[2]围绕智慧矿山数据治理与安全管控完成相关分析，为矿区数字化制图提供了基础理论支撑。但现有成果存在技术应用零散、多源数据融合不足、制图全流程体系不完善的短板。基于此，本文整合 GNSS、无人机摄影测量、三维激光扫描与 GIS 技术，系统梳理数字化制图全流程与关键环节，探究其提质增效的核心作用，为矿区地质测绘优化与矿山安全管理提供实践依据。

1 矿区数字化地质制图的关键制约

1.1 复杂地形下数据采集精度不足

矿区地表往往具有高差大、坡度陡、植被遮挡明显及采掘活动频繁等特征，复杂地形容易造成测量视线受阻、卫星信号衰减和航摄影像重叠度不稳定等问题。山体阴影、深沟陡坎和采坑边缘区域常出现有效测点不足，局部数据存在缺失、漂移或高程误差，影响地质界线和地形特征的准确判定^[1]。无人机航测在强风、低空紊流及起伏地表条件下，还可能出现航高变化和影像畸变，增加后续匹配误差。三维激光扫描受站点布设和遮挡影响，部分隐蔽区域难以形成连续点云。若控制点数量不足或分布不均，误差会在数据处理过程中进一步累积，降低矿区地质制图成果的整体精度。

西藏高寒矿区还具有特殊的环境制约因素。低温环境下，无人机电池续航能力较常温下降 40%~60%，锂聚合物电池在 -15℃ 以下内阻急剧增大，单架次有效作业时间由常温 45 分钟缩短至 15~20 分钟；激光扫描仪光学镜面易结霜，影响回波信号接收效率；机械部件在 -20℃ 以下脆性增大，飞行安全隐患显著上升。高海拔地区空气密度仅为平原的 60%~70%，无人机升力下降、舵面响应延迟，飞行姿态稳定性降低。大风天气

（瞬时风速≥15 m/s）频发，无人机抗风能力不足时易出现航迹漂移和影像重叠度不稳定。此外，高海拔强紫外辐射加剧了 IMU（惯性测量单元）温漂，影响 POS（定位定姿系统）数据精度。

1.2 多源异构数据融合程度偏低

矿区数字化测绘通常需要同时使用遥感影像、点云数据、钻孔资料、地质剖面、工程测量成果及历史图件，不同数据在来源、格式、尺度和时间精度方面存在明显差异。部分数据采用不同坐标系统和高程基准，直接叠加后容易产生位置偏移，导致矿体边界、断层位置与采掘工程之间出现空间错位^[2]。影像数据强调表面纹理，点云侧重三维形态，钻孔资料反映地下结构，信息表达维度不同，也增加了统一建模的难度。部分矿区仍以分散软件处理各类数据，缺少统一的数据标准和接口规范，属性字段命名、编码方式及精度等级不一致，使数据共享和调用效率受到限制，难以充分发挥多源信息的互补价值。

1.3 图件更新与空间表达衔接不畅

矿区开采范围、运输道路、边坡形态和采掘工程具有持续变化特征，但部分数字地质图件仍采用阶段性更新方式，数据采集周期与生产变化速度不匹配，容易造成图件内容滞后。局部工程调整后，相关地层界线、矿体边界和构筑物信息未能同步修正，使不同时间形成的图层之间出现不一致。二维图件、三维模型与数据库之间缺少稳定关联时，属性修改不能自动反馈到空间图形，增加重复编辑工作量。

2 数字化测绘驱动矿区地质制图优化

2.1 构建多维协同数据采集体系

矿区地质制图应结合地表环境、地下工程分布及测量任务需求，建立由卫星定位、无人机航测、三维激光扫描和地面精密测量共同组成的数据采集体系。控制网布设可采用 GNSS 提供统一空间基准，在重点区域增设高精度控制点，提高不同测区之间的坐标一致性。露天采场及大范围地表区域可利用无人机获取高分辨率影像，对边坡、采坑和运输道路进行快速覆盖；巷道、陡壁及局部复杂构造区域则可通过激光扫描补充细节信

息。对遮挡严重或地形突变明显的区域,应根据地貌特征调整测站位置和航线参数,并设置重复观测点进行误差检核。通过分层次、分区域配置测量手段,可形成覆盖完整、精度稳定且适应矿区复杂环境的数据采集网络。针对矿区地形起伏明显及局部区域测量条件复杂的特点,可利用三维激光扫描设备开展高密度空间数据采集,现场测绘作业方式见图1。



图1 矿区地质测绘现场三维激光扫描数据采集

图1为西藏某矿区野外作业现场,作业人员通过GNSS-RTK设备进行高精度控制点采集,接收机结合基准站差分改正实现厘米级定位(平面 $\pm 2\text{ cm}$),为地质制图提供统一空间基准。针对高海拔电离层扰动,采用延长观测时长(≥ 5 分钟)与冗余测回(3次取中值)的方法,有效抑制大气延迟误差,确保控制数据可靠。

2.2 强化多源数据配准融合处理

多源数据融合需要建立统一的空间参考体系和标准化处理流程,使不同测量设备获取的成果能够在同一平台中准确对应。处理过程中可依据公共控制点完成坐标转换和几何校正,并通过特征匹配、点云配准及影像纠正降低位置偏差^[3]。对于无人机影像与激光点云,可利用地形特征点建立空间关联,实现纹理信息与高程信息的互补;钻孔、地质剖面 and 构造数据则应通过属性编码与空间位置建立对应关系,增强地下地质信息的连续表达。数据进入数据库前还需设置精度等级、采集时间和数据来源等字段,对重复信息进行筛选,对冲突数据按照可靠性和时效性进行修正。

2.3 完善三维建模与动态制图机制

矿区三维建模可将地形表面、地层结构、断层分布、矿体形态及采掘工程纳入统一空间模型,通过数字高程模型、点云数据和钻孔信息构建具有真实空间关系的地质场景。建模过程中应依据地质界线和控制点约束不同结构面的位置,利用插值计算和曲面重建方法提高地层界面连续性,并对断层错动和矿体边界进行独立表达。动态制图应与生产数据库建立联动关系,当采坑边界、巷道位置或地质信息发生变化时,同步更新

相关图层和模型要素。版本管理机制可记录不同阶段的数据修改内容和时间节点,便于追踪空间信息变化。

3 数字化测绘技术的矿区实践验证

3.1 测区数据采集与模型构建

测区位于西藏某铜多金属矿区,海拔4200~5100 m,矿体呈层状—似层状产出,主要矿种为铜、钼,矿区面积约4.8 km²。测区作业依据矿体分布、地形起伏和采掘工程范围划分若干测量单元,并按照地表、边坡、采坑及地下工程的空间特征配置采集参数。地面控制点应布设在稳定且通视条件较好的位置,通过高精度定位设备获取平面坐标与高程信息,再利用无人机完成大范围影像获取,对重点区域增加航线密度和旁向重叠度。采集后的影像、点云及工程测量成果按照统一坐标基准进行整理,并结合地质钻孔、断层线和矿体边界数据建立空间约束关系。模型构建阶段可通过点云滤波、表面重建和地层插值形成数字高程模型与三维地质模型,使地表形态、矿体结构和工程设施在统一场景中保持准确的位置关系。

3.2 地质图件生成与精度检验

地质图件生成应以处理后的空间数据和三维模型为基础,根据制图比例尺选取相应的地形要素、地质界线和工程信息,并按照矿区制图规范完成分层组织与符号配置。地层界线、断层走向、矿体轮廓和采掘边界可通过矢量化提取形成专题图层,剖面位置与高程信息则可由模型自动计算并生成对应图形^[4]。精度检验应选取未参与建模的检查点,对其平面坐标和高程值进行独立核验,通过计算中误差、最大误差及合格点比例评价成果质量。对于偏差较大的区域,还需结合原始影像和控制点重新检查配准关系,修正局部变形和边界错位,确保数字图件在位置精度与地质关系表达方面满足矿区生产使用要求。

为系统验证数字化测绘成果精度,选取35个未参与建模的独立检查点进行坐标与高程核验,并与传统全站仪测量结果进行对比,精度统计见表1。

表1 数字化测绘与传统方法精度对比统计

精度指标	数字化测绘(无人机+LiDAR)	传统全站仪测量	规范要求(GB/T18341-2021)
平面中误差	$\pm 3.8\text{ cm}$	$\pm 9.6\text{ cm}$	$\leq \pm 5\text{ cm}$ (1:1000)
高程中误差	$\pm 4.5\text{ cm}$	$\pm 12.3\text{ cm}$	$\leq \pm 10\text{ cm}$
最大平面误差	$\pm 9.2\text{ cm}$	$\pm 21.5\text{ cm}$	—
最大高程误差	$\pm 11.7\text{ cm}$	$\pm 28.4\text{ cm}$	—

检查点 合格率	97.1% (34/35)	82.9% (29/35)	≥90%
------------	---------------	------------------	------

由表 1 可知, 数字化测绘平面中误差为 $\pm 3.8\text{ cm}$ 、高程中误差为 $\pm 4.5\text{ cm}$, 均优于《地质矿产勘查测量规范》(GB/T18341-2021) 1:1000 比例尺精度要求; 传统方法平面中误差 $\pm 9.6\text{ cm}$ 、高程中误差 $\pm 12.3\text{ cm}$, 前者平面精度提升约 60.4%, 高程精度提升约 63.4%。检查点合格率方面, 数字化测绘为 97.1%, 传统方法仅为 82.9%, 有 6 个检查点超出规范限值。

3.3 数字制图成果与传统方法对比

数字制图成果与传统测绘方法可从作业效率、成果精度、信息完整性和更新能力等方面进行对比。传统方式主要依靠外业人工测点和手工整理图件, 在地形复杂或测区范围较大时, 需要投入较多测量人员, 局部隐蔽区域的信息获取也容易受到限制。数字化方式能够通过影像和点云一次性获取大范围连续数据, 并在软件平台中完成坐标计算、地形重建和地质要素提取, 减少重复外业工作。对比相同测区成果时, 数字图件在边坡轮廓、采坑形态和工程边界表达方面更加连续, 数据密度也更高。作业效率方面, 相同测区(约 4.8 km^2) 的量化对比如下: 传统方法需投入测量人员 12 人、外业作业 18 天、内业整理 10 天, 合计 28 天完成; 数字化测绘(无人机航测+地面 LiDAR 补充) 仅需测量人员 4 人、外业飞行与扫描作业 3 天、内业处理 5 天, 合计 8 天完成, 综合效率提升约 71.4%, 人工投入减少约 66.7%。数据密度方面, 传统方法每平方公里采集碎部点约 800~1 200 个, 数字化测绘通过影像与点云可获取每平方公里数百万级数据点, 边坡轮廓、采坑形态和工程边界的细节表达更为连续完整。

4 矿区数字地质制图的深化路径

4.1 完善地质数据实时更新机制

地质数据更新应结合矿区生产活动建立分级更新机制, 根据采掘进度、地形变化幅度和地质信息重要程度确定不同的数据采集周期。采场推进、边坡开挖、道路调整及巷道延伸等变化频繁区域, 可通过周期性无人机航测、移动扫描和生产测量成果实现高频更新; 地质条件相对稳定区域则可适当延长复测周期^[5]。数据库应设置时间戳、数据版本、来源设备和精度等级等信息, 使新增成果能够按照空间位置与历史数据自动关联。检测到边界位置或高程发生明显变化时, 可利用变化检测方法识别差异范围, 仅对变化区域执行局部更新, 避免重复处理完整测区。

4.2 加强数字孪生与信息平台协同

数字孪生技术可将矿区真实地质环境、采掘工程和数字模

型建立动态映射关系, 使地质制图成果从静态图件向可交互空间信息载体延伸。平台建设可整合三维地质模型、采矿工程模型、遥感影像、监测数据和生产资料, 按照统一空间编码建立各类对象之间的关联关系。采场边界、巷道位置或边坡形态发生变化后, 现场采集数据能够映射至虚拟场景, 并同步调整相应地质要素。平台接口还可连接资源储量管理、生产调度和地质灾害监测等业务系统, 使同一空间对象的坐标、属性及变化记录保持一致。通过权限管理、数据服务和可视化查询功能, 可按照不同业务需求调取平面图、剖面图、三维场景及历史变化信息, 提升矿区地质信息跨系统调用和协同应用水平。数字孪生平台能够集成矿区空间位置、三维模型、监测信息及统计数据, 实现多类型地质信息的集中展示与协同管理, 具体平台应用界面见图 2。



图 2 矿区数字孪生地质信息综合管理平台

图 2 为矿区数字孪生平台界面, 集成二维 GIS 地图与三维地质模型, 左侧菜单管理地形、矿体及工程图层, 中右区域通过 3D 实景叠加红色立体柱状图展示不同区块风险等级, 右下统计窗口按极高、高、中、低风险分类展示面积占比与空间分布, 实现地质信息集中管控与可视化决策。

5 结语

数字化测绘技术能够有效提升矿区地质信息获取、处理与表达水平, 为复杂地形条件下的地质制图提供更加稳定的技术支撑。通过协同数据采集、多源信息融合、三维模型构建及动态更新, 可改善传统制图中精度不足、数据割裂和更新滞后等问题。进一步融合智能识别、数字孪生和信息平台建设, 有助于形成更加精准、高效、动态的矿区地质制图体系, 为资源开发、生产管理及地质安全提供可靠的数据保障。

参考文献:

- [1] 曹江龙.地质勘探中工程测量的技术应用研究[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(4):36-38.
- [2] 杜青松,周浩欣.面向智慧矿山的数据安全风险与治理路径研究[J].中国矿业,2025,34(11):43-51.
- [3] 杨文坚,李叶欢,米君凡,等.数字化技术在矿山地质勘查中的发展与应用[J].世界有色金属,2025,(21):199-201.
- [4] 国嫔,王龙线.矿山测绘中的高精度 GPS 定位技术研究[J].世界有色金属,2025,(3):154-156.
- [5] 黄俊文,冠英杰,曹镇洲,等.测绘新技术在地质测绘工程中的应用研究[C]//中国智慧工程研究会智能学习与创新研究会.2020 万知科学发展论坛论文集（智慧工程一）.[出版者不详],2020:42-49.