

三维激光扫描技术在矿山测绘的应用研究

赵志东

包钢（集团）三合明矿业有限责任公司 内蒙古 包头 014511

摘要：矿山测绘是矿山安全生产与资源高效开发的基础性保障工作，其精度与效率直接影响采矿设计、生产调度及地质灾害防控等关键环节。传统测绘手段在复杂矿山环境中面临通视困难、作业风险高、数据密度低等固有局限。三维激光扫描技术以非接触、高精度、高密度、全数字化等显著优势，为矿山测绘带来了从“点线面”到“海量点云”的数据革命。本文系统阐述了三维激光扫描的技术原理、平台分类及数据特性，深入分析了该技术在采空区测量、边坡稳定性监测、井巷工程验收、储量动态计算及数字矿山建设等矿山测绘核心领域中的应用路径，并从数据采集策略优化、多站拼接精度控制、点云智能处理及多源数据融合等方面提出了技术应用优化的关键举措，旨在为三维激光扫描技术在矿山测绘中的深入推广与科学应用提供系统参考。

关键词：三维激光扫描；矿山测绘；点云数据；边坡监测；采空区测量

引言

矿山测绘贯穿于地质勘探、规划设计、基建施工、生产运营和闭坑治理的全生命周期，其核心任务包括矿区地形测量、井巷工程标定、采掘进度验收、矿量动态计算以及边坡与地表沉降监测等。长期以来，全站仪、经纬仪和常规 GPS 等传统测绘手段在矿山测绘中占据主导地位，但矿山环境的特殊性——井下空间狭窄、光线不足，露天矿高陡边坡危险、通视条件差，以及开采区域的持续动态变化——使得传统方法在作业效率、数据完整性和人员安全方面均面临严峻挑战。三维激光扫描技术（又称激光雷达，LiDAR）的出现，从根本上改变了矿山测绘的数据获取模式。它以激光为信息载体，以高频率脉冲扫描方式获取目标表面海量的三维坐标信息，具有作用距离远、采样速率快、穿透性强、无需反射棱镜、不受光照条件限制等突出优势。自 21 世纪初引入矿山领域以来，该技术已在国内外矿山测绘实践中展现出巨大的应用潜力。本文立足于三维激光扫描技术的原理与特点，系统梳理其在矿山测绘各类场景中的应用路径与方法体系，并就关键技术问题和优化策略进行深入探讨，以期矿山测绘技术升级提供理论指导。

1 三维激光扫描技术的原理、平台与数据特征

1.1 技术基本原理

三维激光扫描技术基于激光测距原理工作。扫描仪向目标物体发射激光脉冲，通过测量激光脉冲从发射到反射返回的时间差或相位差，计算扫描中心到目标点的距离；同时记录每束激光发射时的水平角和垂直角，结

合仪器内部的精密时钟和姿态传感器，实时解算每个反射点的三维空间坐标（X，Y，Z）。对于脉冲式测距，距离计算公式为 $D = c \cdot \Delta t / 2$ （ c 为光速， Δt 为脉冲往返时间）；相位式测距则通过测量调制波的相位偏移来计算距离，精度更高但作用距离相对较短^[1]。扫描过程中，仪器在水平和垂直两个方向上进行连续旋转扫描，以预设的角度分辨率逐点采集数据，最终形成覆盖目标表面的密集三维点云。

1.2 主要平台类型与适用场景

按搭载平台分类，应用于矿山测绘的三维激光扫描系统主要有三种类型。地面三维激光扫描仪是矿山测绘中应用最广的类型，采用架站式作业，精度高（测距精度可达毫米级）、点云密度大，适用于露天矿边坡精细建模、井巷高精度断面测量、硐室与采空区三维扫描等任务。机载激光雷达（ALS）搭载于无人机或有人机，具有空中俯瞰式扫描、作业效率高的特点，适用于矿区大面积地形测绘、排土场和尾矿库的周期性监测，其对植被的穿透能力还可有效获取林下真实地表高程。移动式激光扫描系统（如车载 SLAM 或背负式扫描仪）依托即时定位与地图构建算法，在 GPS 信号拒止的井下环境实现连续扫描，特别适用于巷道快速建模和采掘进度跟踪。

1.3 矿山点云数据的独特性

矿山测绘获取的点云数据具有鲜明的特点。一是数据量巨大，一次扫描可能产生数百万至数千万个点，井巷和采空区的完整建模往往需要多站拼接，数据总量可

达数十亿点。二是空间分布极不均匀,在目标表面起伏剧烈的区域点云密集,而在光滑或远距离区域则相对稀疏。三是噪声来源复杂,井下粉尘、水雾和漫反射均会引入异常点。四是矿山的动态性要求点云数据需具备时间戳信息,以支持多期数据的差分对比和变化检测。理解这些数据特征,是合理设计扫描方案、选择处理算法和提取应用信息的前提。

2 三维激光扫描技术在矿山测绘中的核心应用领域

2.1 采空区三维形态测量与体积计算

采空区是地下矿山开采后形成的地下空洞,其几何形态和空间位置是影响矿山安全和资源回采率的关键因素。采空区往往具有形状不规则、内部结构复杂、通视条件差且存在垮塌风险等特点,传统的人工测量方法不仅效率低下,而且存在极高的安全隐患。三维激光扫描技术通过预先设置的专用钻孔或通达巷道,将扫描仪探头下放至采空区内部,采用多站扫描方式获取采空区完整的三维点云数据。经过配准、去噪和建模处理后,可精确生成采空区的三维表面模型,据此计算空区体积、顶板暴露面积及边界形态^[2]。这些数据可用于评估采空区稳定性、设计充填方案、估算残留矿量以及预测地表塌陷范围,为采空区的综合治理提供精确的几何依据。

2.2 露天矿边坡稳定性监测与滑坡预警

露天矿边坡的稳定性直接关系到矿山生产安全和人员设备安全。传统的边坡监测主要依靠布设表面位移观测点和深部测斜孔,但点式监测难以全面捕捉边坡的变形场分布和局部失稳前兆。三维激光扫描技术为解决这一问题提供了有效途径:通过对边坡进行定期(每周或每月)重复扫描,获取多期点云数据,采用点云对比和 DEM 差分分析方法,识别变形加速区域和局部崩塌前兆;结合边坡地质结构面信息,圈定潜在滑移体的边界和规模,为滑坡预警提供可靠的时空判断依据。在数据采集层面,地基三维激光扫描仪可以从固定观测墩或安全距离外对边坡进行全面扫描,无需人员进入危险区域;对于高陡边坡和难以架站的区域,机载 LiDAR 可作为有效的补充手段。

2.3 井巷工程验收与断面测量

在井巷掘进和支护施工中,超挖、欠挖和支护厚度是重要的质量控制指标。三维激光扫描技术能够快速获取巷道全断面的高密度点云数据,通过与设计轴线进行空间对比分析,自动计算任一里程处的超欠挖量和净空断面面积。相比于传统采用断面收敛仪进行逐断面测量的方式,激光扫描可一次性获取整条巷道的连续断面信

息,效率提升数倍以上,且成果直观、可追溯。在支护质量检测方面,通过扫描安装完成的喷混或衬砌表面,可自动识别厚度不足区域和空洞位置,为补强处理提供精确指导。同时,该技术在矿山井下的贯通测量中亦具有重要价值,可精确测定贯通点的空间偏差。

2.4 矿量动态计算与采掘计划调整

矿山生产过程中,矿石和废石的体积量是采矿计划调整和成本核算的核心依据。传统矿量计算依赖于生产勘探钻孔推断和采掘台班报表估算,误差较大且存在滞后性。基于三维激光扫描的矿量计算方法,对采场或爆堆进行定期全面扫描,重建每次爆破后的矿堆或采空区的三维表面模型,结合已知的原始地形或矿体模型,通过 DEM 差分计算出每次采掘或爆破的挖方量和爆堆松散体积^[3]。结合矿石体重值和松散系数,可较为准确地核算出矿量和贫化损失指标。这种“以实测定量”的方法显著提高了矿量统计的准确性,为采矿设计和生产调度提供了实时可靠的数据支撑。

2.5 数字矿山底座建设与三维可视化

数字矿山是矿山信息化和智能化发展的基础框架,而高精度的三维空间数据底座是其核心支撑。三维激光扫描技术为数字矿山提供了快速构建矿区三维实景模型的能力。通过整合露天矿的地表扫描、井下的巷道扫描和选矿厂区的建筑物扫描数据,建立覆盖全矿区的统一坐标框架下的三维点云模型和表面网格模型。该模型不仅包含几何信息,还可通过影像纹理映射和属性数据挂接,承载地质资料、设备信息和监测数据,形成矿山的“数字孪生”基础平台。在该平台上,管理者可以进行地下与地上空间的一体化浏览、采掘工程的时空推演、通风与运输模拟分析,极大地提升了矿山规划与管理的信息化水平。

3 应用中的关键问题与技术优化策略

3.1 点云数据采集方案的优化设计

高质量的采集是后续处理和应用的前提。在露天矿边坡监测场景中,应根据边坡的高度、坡度和走向,合理规划扫描测站的布设位置,确保扫描覆盖范围无盲区,相邻测站之间的点云重叠度不低于 30%。对于高陡边坡,应适当增加扫描分辨率,确保微小结构面和变形特征可被识别。在井下采空区和巷道扫描中,由于空间受限,需要合理设计扫描路径和测站密度,避免因遮挡产生的数据空洞;对于空区内部,宜采用半球式多站扫描以保证空间全覆盖。在每次扫描作业前,应现场布设并测量不少于 3 个控制标靶,用于后续点云拼接和坐标

转换。扫描参数的选择（如扫描分辨率、质量等级）应根据精度要求和作业时间综合权衡。

3.2 多站点云配准与精度控制

大范围矿山测绘往往需要多站扫描拼接，而配准精度直接影响最终成果的可靠性。点云配准可分为基于标靶的配准和基于特征的配准两种方式。基于标靶的配准利用预先布设的球形或棋盘格标靶，通过识别标靶中心进行坐标系转换，精度高、操作规范，适用于对精度要求严格的验收测量。基于特征的配准利用点云中的几何特征（如平面、棱线）进行迭代最近点（ICP）算法匹配，适用于无法布设标靶的危险或狭窄区域^[4]。在实际应用中，推荐采用“标靶为主、特征为辅”的组合策略——在总体控制采用标靶配准，局部补充采用特征配准。配准完成后，须采用同名点检查法和闭合差统计法进行精度评定，确保配准中误差控制在项目要求的允许范围内。

3.3 点云数据的去噪与滤波处理

矿山环境中采集的原始点云包含大量噪声和离群点，包括粉尘散射点、设备干扰点、植被点以及扫描边缘的飞点等。针对不同噪声来源，应采取差异化的处理策略。对于远离目标主体的离散离群点，可通过统计滤波或半径滤波剔除；对于井下粉尘引起的弥散噪声，宜采用基于密度的聚类滤波方法进行分离；对于露天矿边坡表面的植被点，需要采用渐进式形态学滤波或布料模拟滤波算法，将植被点与地面点分离，保留地表真实形态。滤波参数的选择需根据实际地形特征调整，避免过度滤波损失关键地形信息。处理过程中应保留原始数据的可回溯性，以便对不同滤波策略的效果进行对比验证。

3.4 多源数据融合与信息提取

三维激光扫描点云数据与无人机影像、地质勘探数据、微震监测数据等的深度融合，能够显著提升矿山测绘成果的应用价值。其融合路径包括：将点云三维模型与无人机影像纹理融合，生成矿区真彩色三维实景模型；将采空区点云模型与地质钻孔数据叠加，建立空区与围岩的地质属性关联；将多期边坡点云差分结果与降雨、爆破振动数据关联分析，识别变形的主要诱发因素。在数据融合的框架下，通过点云分类与特征提取算

法，可实现岩体结构面的自动识别、裂缝走向的智能追踪以及危险区域的自动圈定，逐步将人工解译为主的工作模式向自动化、智能化方向推进。

3.5 数据处理效率与标准化管理

面对矿山测绘中海量的点云数据，处理效率是制约技术推广的瓶颈之一。应从软硬件两个层面提升效率：硬件方面，采用高性能计算工作站和 GPU 并行加速技术，加快点云配准、滤波和建模的计算速度；软件方面，建立标准化的数据处理流程和参数模板，对同类矿区、同类场景采用统一的技术参数，减少重复试验和调试时间。更重要的是，应建立矿山点云数据的标准化管理体系，统一数据格式、坐标系、精度等级和归档目录，制定点云数据采集、处理和应用的技术规程，使三维激光扫描真正融入矿山常规测绘作业体系，而非作为临时性的科研工具使用。

4 结语

三维激光扫描凭借高精度、非接触等优势，正重塑矿山测绘范式。本文阐述其原理、平台及数据特性，分析在采空区测量、边坡监测、井巷验收、矿量计算及数字矿山建设中的应用。提出从采集设计、配准控制、智能去噪、多源融合及标准化管理等维度优化技术，以释放潜能。该应用不仅是装备更新，更意味着获取方式由“离散点式”向“连续面式”转变，工作模式由“测图为主”向“三维建模与动态监测核心”转变，价值定位由“独立成图”向“全生命周期空间数据底座”转变。未来，随着智能处理算法、实时 SLAM 技术及 BIM/GIS 深度融合，该技术将在矿山安全生产和智能化建设中发挥更重要作用，提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 张祖勋, 张剑清, 詹总谦. 三维激光扫描点云处理与工程应用进展 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2022, 47(10): 1573-1585.
- [2] 李德仁, 龚健雅, 邵振峰. 从数字矿山到智慧矿山: 空间信息技术的引领作用 [J]. 测绘学报, 2023, 52(1): 1-11.
- [3] 刘先林, 张继贤, 王瑞幺. 激光雷达测图技术现状与矿山应用前景 [J]. 遥感学报, 2022, 26(8): 1513-1524.
- [4] 吴立新, 刘善军, 汪云甲. 矿山地质灾害三维激光监测技术方法与应用 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2015-2028.