基于无人机与激光扫描的地形测绘技术优化研究

普 琼[1]，赤列桑布[2]

（1. 西藏地热地质大队地矿有限公司，西藏 拉萨 850000；
2. 西藏地质一队地矿有限公司，西藏 拉萨 850000）

摘 要 地形测绘在工程建设、资源调查和灾害治理中承担基础数据供给功能，复杂测区对数据精度、采集效率和三维表达提出更高要求。本研究围绕无人机航测与激光扫描融合应用展开，结合数据采集、坐标配准、点云处理和精度检核等环节，分析传统作业在环境适应、数据融合及成果应用中的不足。研究结果表明，依托航测影像的广域覆盖和激光点云的细部刻画，能够增强地形模型完整性、成果精度稳定性和工程应用适配度，为地形测绘技术优化提供可行路径参考。

关键词 无人机航测；激光扫描；地形测绘；点云处理；精度检核

中图分类号：P217；P231 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.009

0 引言

地形测绘逐渐从单点测量向多源感知、三维建模和动态复核转变，传统人工测量在山区、矿区、河道岸坡等场景中常受通行条件、作业周期和安全风险制约。无人机低空航测能够快速获取测区影像，激光扫描能够记录地表起伏和空间细节，二者进入同一测绘流程后，数据获取方式、成果表达形式和质量控制方法均发生变化，面对工程建设和自然资源管理对高精度地形资料的需求，联合测绘技术仍需在采集方案、点云处理和成果检核层面持续优化。

1 基于无人机与激光扫描的地形测绘技术基础

1.1 无人机航测的地形数据获取优势

无人机航测依托低空飞行平台进入测区，能够在较短作业周期内获取连续影像资料，适用于道路沿线、施工场地、河道岸坡、矿山边界等范围较大、通行条件受限的地形测绘场景。相较于传统人工测量，无人机作业对地面通行条件依赖较低，能够在保证安全距离的情况下完成地貌影像采集，并凭借航线规划、影像重叠控制、像控点布设和空三处理，生成正射影像、三维实景模型及地形底图[1]。此类数据成果具有覆盖面广、地物边界清晰、外业效率较高等特点，可为地貌判读、范围核定、地形变化识别和后续模型构建提供基础资料。

1.2 激光扫描的三维点云表达特征

激光扫描以主动测距为基础，借助激光脉冲获取目标点三维坐标，能够形成高密度点云数据，对地表起伏、坡面形态、沟谷边界、建筑轮廓和局部高差具有较强表达能力。与影像数据侧重纹理和颜色信息不同，点云数据更突出空间位置和高程关系，能够直接支撑数字高程模型生成、断面提取、体积计算和形变对比。复杂测区中，激光扫描对细部结构的刻画更为稳定，尤其在边坡、基坑、矿山采场和地质灾害隐患点等场景中，能够记录人工测点难以连续覆盖的空间变化，为地形测绘成果从平面表达转向三维分析提供数据基础。

2 基于无人机与激光扫描的地形测绘中的主要问题

2.1 复杂环境下数据采集稳定性不足

复杂测区往往存在高差突变、植被覆盖、地物遮挡和气象条件变化，原始数据采集容易受到现场环境牵制，无人机航测在低空飞行中对风速、光照和地表纹理较为敏感，山体阴影、反光水面、裸露岩面等区域可能造成影像模糊、匹配点不足或局部畸变；激光扫描在边坡背面、沟谷转折和建筑遮挡位置容易形成点云盲区，局部点密度不均还会影响后续空间表达[2]。采集端数据一旦出现缺口，后续模型生成即便依靠软件补算，也难以完全恢复真实地形细节，尤其在边界线、

作者简介：普琼（1995-），男，本科，助理工程师，研究方向：测绘工程。

坡脚线和微地貌变化位置，数据缺失会进一步削弱成果判读的可靠性。

2.2 多源数据坐标配准与融合难度较高

无人机影像成果和激光点云成果来源不同，数据结构、采集视角、空间密度和坐标表达存在差异，直接叠加往往难以达成稳定一致。无人机数据通常经历影像匹配、空三加密和正射纠正，激光扫描则依靠扫描站拼接、姿态记录和点云坐标生成，两类数据在边界轮廓、高程表达和局部细节上容易出现偏移；配准环节一旦控制不严，同名点选择、坐标基准转换和尺度校正中的误差会向后续成果传递，造成地物边缘错位、断面位置偏差和三维模型局部断裂，进而影响数字高程模型、正射影像和点云模型之间的对应关系。

2.3 点云噪声清理与地面信息提取不精准

激光扫描形成的原始点云并不等同于可直接使用的地形数据，测区内植被、车辆、施工材料、临时设施和建筑附属结构都会混入点云之中，反射异常还可能产生离群点和重叠点[3]。地形测绘关注真实地表高程，非地面点未能准确剔除时，数字高程模型容易出现局部抬高，等高线和断面成果也会随之失真。复杂地形中，低矮植被与裸露地面、高陡坡面与阴影区域的点云特征相近，单纯依赖自动滤波容易误分，人工修正量随之增加，处理尺度不统一还会造成相邻区域地面模型衔接不平顺。

3 基于无人机与激光扫描的地形测绘技术优化路径

3.1 面向复杂测区优化数据采集方案

复杂测区的数据采集适宜从踏勘分区开始，将测区划分为开阔采集区、遮挡补测区、高差突变区和重点复核区，并对应确定无人机航线、激光扫描站点、控制点位置和安全作业边界。无人机航测需结合地形起伏调整飞行高度和影像重叠度，航向重叠度宜控制在80%以上，旁向重叠度宜控制在70%以上，高差变化明显区域可采用分层航线或仿地飞行，保证影像比例尺和地面分辨率保持相对稳定。激光扫描部分需围绕坡脚、沟谷转折、建筑遮挡、植被密集位置设置补充站点，相邻站点之间保留30%以上重叠区域，重点区域点云密度可适当加密，避免坡面背侧、边界转角和局部凹陷位置形成数据断带。外业采集过程中还需同步记录风速、光照、仪器姿态、控制点编号、飞行架次、扫描站号和异常区域位置，采集记录与原始数据保持一致，遇到影像模糊、点云空洞或控制点遮挡等情况及时补拍补扫，使后续配准、模型生成和质量追溯具有清晰依据。

3.2 依托统一基准规范多源数据融合流程

多源数据融合的关键在于先统一空间基准，再进入影像成果和点云成果的配准处理，避免不同数据源在坐标、高程和尺度上各自成体系，无人机影像、激光点云、像控点和检查点数据进入处理前，需采用同一坐标系统和高程基准，文件命名、点号编码、采集时间、设备来源和处理版本也要保持清晰对应，减少后续融合阶段的数据口径混乱。影像成果可先完成空三加密、正射纠正和初步三维建模，激光点云则完成站点拼接、粗差剔除和坐标转换，再依托像控点、明显地物角点、道路边线、坡顶坡脚线等同名特征进行空间配准，控制点残差宜保持在项目精度限差以内[4]。配准完成后需对测区边缘、高差突变区、遮挡补测区和地物交界位置开展局部复核，发现边界错位、高程突变或模型断裂时，回到控制点、特征点和原始点云中核查误差来源，并对融合后的正射影像、点云模型、数字高程模型建立同一数据版本，保证后续断面提取、等高线生成和成果检核使用同一基准。

3.3 强化点云分类处理与地面模型生成

点云分类处理需要把原始扫描数据转化为可用于地形表达的地面信息，处理流程宜从去噪、抽稀、分块和分类开始，再进入地面点提取与模型生成，原始点云中的离群点、重叠点、反射异常点需先行清理，植被、车辆、施工材料、临时设施和建筑附属结构等非地面点则依据高度突变、邻域关系、坡度变化和空间连续性进行分类剔除，地物密集区域不宜采用单一阈值整体处理[5]。自动滤波后不宜直接生成数字高程模型，复杂边坡、沟谷底部、低矮植被覆盖区和地表破碎区还需结合断面线、坡脚线、实景影像和局部人工复核进行校正，避免裸露地面被误删或植被点被保留。地面点确认后，可按测绘成果需求生成数字高程模型、等高线和典型断面，模型网格间距需结合测图比例尺、点云密度和工程精度要求确定，常规工程测绘可控制在0.5 m～1 m范围内，局部高差变化明显区域适当加密，并对相邻分块模型接边处进行平顺性检查，防止分区处理造成地形面错台。

3.4 完善精度检核与成果质量控制机制

精度检核需要贯穿成果生成后的复核环节，不能只依赖软件模型的视觉完整性判断质量，检查点布设宜覆盖测区中心、边缘、高差突变位置、植被遮挡区和工程关注部位。平面坐标、高程、边界线、断面线和模型连续性均需纳入核查范围，检查点数量可按测区规模和成果等级确定，通常不集中在开阔平坦区域，关键地貌转折点和施工控制位置应增加复核点。误差分析

可采用均方根误差评价平面和高程偏差，计算公式为：

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta_i)^2}{n}} \quad (1)$$

式（1）中，$RMSE$ 表示均方根误差，Δ_i 表示第 i 个检查点实测值与模型值之间的差值，n 表示检查点数量。平面误差和高程误差需分别统计，避免用单一综合值掩盖局部超限问题。成果质量控制还需对应应用需求展开，施工复核重点核对坐标和高程偏差，土方核算重点核对模型面连续性，边坡监测重点核对多期数据基准一致性，发现超限区域后需回查采集记录、配准过程和点云分类结果，并对修正后的成果重新编号归档，保证最终提交的正射影像、点云模型、数字高程模型和断面成果保持一致。

4 基于无人机与激光扫描的地形测绘技术优化应用案例

4.1 项目测区概况

贵州水城独家寨崩塌调查区处于岩溶山地环境，测区高差变化明显，坡面破碎，危岩体分布位置较高，局部区域受植被、陡坎和坡脚堆积体遮挡，传统地面测量难以连续获取完整地形信息。工程调查需掌握山体轮廓、坡面裂隙、危岩边界和堆积区形态，并形成可用于三维建模、断面提取和地表形态识别的空间数据[6]。面对陡坡通行困难、测点布设受限和局部遮挡较多等问题，项目采用机载 LiDAR 与地面三维激光扫描组合方式开展测绘，为后续点云融合和地形模型生成提供基础。

4.2 复杂地形条件下的联合测绘方案实施

针对测区陡坡多、遮挡强、人工测点难以连续布设的情况，项目将机载 LiDAR 作为大范围地形采集手段，沿山体走向和坡面展开航线布设，获取山体整体轮廓、坡顶边界、坡面起伏和堆积区范围等点云信息，并结合地形高差变化控制飞行高度和扫描覆盖范围。地面三维激光扫描则布设在坡脚、沟谷转折、危岩体近距离观测区和机载点云遮挡区，重点补充裂隙发育部位、陡坎边缘和坡面凹陷位置的细部数据，使空中扫描形成整体框架，地面扫描补足局部盲区。数据处理阶段统一坐标基准和高程系统，对机载点云与地面点云进行拼接、去噪、分类和着色修复，再结合坡面连续性、地物边界和典型断面检查融合质量，为三维地形模型生成提供稳定数据。

4.3 应用效果分析

联合测绘成果进入应用分析阶段后，重点围绕数据完整性、模型精细度和成果适用性展开判断。机载 LiDAR 获取山体轮廓、坡面起伏和堆积区范围，地面三维激光扫描补充陡坎、裂隙及坡脚遮挡区细部信息，两类点云融合后形成连续性较强的三维模型，可支撑危岩边界判读、典型断面提取和地表形态分析，具体应用效果见表 1。

表 1 无人机与激光扫描联合测绘应用效果分析表

分析指标	联合测绘表现	应用效果
数据完整性	机载 LiDAR 获取整体地形，地面扫描补充遮挡区	测区空间信息更完整
细部表达	点云融合后保留坡面起伏、裂隙边界和堆积体形态	三维模型细节更清晰
作业安全	减少人工进入高陡坡面和破碎坡体	外业风险降低
成果应用	支撑断面提取、边界判读和地表形态分析	工程分析依据更稳定

5 结束语

在地形测绘中，无人机与激光扫描的协同应用，能够让复杂测区的地貌轮廓、细部结构和高程变化得到更完整呈现。面向工程建设、风险调查和资源管理等场景，测绘技术优化需要持续围绕数据基准、点云质量、精度检核和成果适配展开，使测绘成果真正进入现场判断和工程决策链条。

参考文献：

[1] 王苏，潘楼，马雨衍．无人机航测技术在地形测绘中的精度优化研究 [J]. 新发现，2025(23):94-96.
[2] 王泽阳．无人机航测及地理信息技术在地形测绘中的应用 [J]. 大众标准化，2025(18):169-171.
[3] 叶彬彬，戴矽妍．无人机航测及地理信息技术在地形测绘中的应用 [J]. 电子技术，2023,52(08):145-147.
[4] 宋利奎．无人机航测及地理信息技术在地形测绘中的应用 [J]. 中国金属通报，2023(03):204-206.
[5] 韦朝振．无人机航测技术在地形测量中的应用探讨 [J]. 装备维修技术，2021(04):41-42.
[6] 党杰，董吉，何松标，等．机载 LiDAR 与地面三维激光扫描在贵州水城独家寨崩塌地质灾害风险调查中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报，2022,33(04):106-113.