

基于无人机航测的土石方量计算精度分析

郭飞

阜新蒙古族自治县方寸测绘有限公司, 辽宁 阜新 123100

DOI:10.61369/ERA.2026060014

摘 要 : 土石方量精准计算是工程施工、场地平整、矿山开采、路基填筑等工程项目的核心环节, 其精度直接决定工程造价核算、施工方案设计与工程进度管控。无人机航测技术凭借低空作业灵活、数据采集高效、外业成本低廉、成果可视化程度高等优势, 逐步替代传统全站仪、RTK。

散点测量法, 成为土石方量测算的主流技术手段。本文结合测绘工程实践, 阐述无人机航测土石方量计算的技术原理与作业流程, 系统分析航飞参数、像控点布设、数据处理、地形条件等因素对测算精度的影响, 通过搭建实验对比模型, 将无人机航测成果与传统测量成果、激光雷达测量成果进行精度校验, 量化分析误差来源与控制标准, 提出针对性精度优化策略, 为无人机航测技术在土石方工程中的规范化应用提供理论依据与实践参考, 助力工程测绘领域提质增效。

关 键 词 : 无人机航测; 土石方量计算; 精度分析; 误差控制; 数字高程模型; 工程测绘

Precision Analysis of Earthwork Volume Calculation Based on UAV Aerial Survey

Guo Fei

Fangcun Surveying and Mapping Co., Ltd., Fuxin Mongolian Autonomous County, Fuxin, Liaoning 123100

Abstract : Precise earthwork volume calculation serves as a critical component in engineering projects including construction, site leveling, mining operations, and roadbed filling. Its accuracy directly impacts cost estimation, construction planning, and project schedule management. Drone aerial survey technology is progressively replacing traditional total stations and RTK systems due to its advantages such as low-altitude operation flexibility, efficient data acquisition, reduced fieldwork costs, and high visualization capabilities of results.

Scatter measurement has become the mainstream technical approach for earthwork volume estimation. Drawing on practical surveying engineering experience, this paper elucidates the technical principles and operational workflows for UAV-based aerial surveying of earthwork volumes. It systematically analyzes how flight parameters, image control point deployment, data processing, and topographic conditions influence measurement accuracy. Through experimental comparison models, the study validates UAV survey results against traditional measurement methods and LiDAR data, quantitatively identifies error sources and control standards, and proposes targeted precision optimization strategies. These findings provide theoretical foundations and practical references for standardized application of UAV surveying technology in earthwork engineering, thereby enhancing quality and efficiency in engineering surveying practices.

Keywords : UAV aerial survey; earthwork volume calculation; accuracy analysis; error control; digital elevation model; engineering surveying

引言

土石方工程贯穿各类项目全过程, 土石方量精准测算既是工程招投标、造价预算关键依据, 也是施工管控、竣工结算核心指标。传统土石方量测量采用人工散点测量法, 外业工作量大、周期长、成本高, 难以全覆盖测量, 易致误差偏大, 无法满足现代化工程测算需求。无人机航测技术作为新型低空测绘技术, 可实现土石方量自动化、智能化计算, 弥补传统技术缺陷。但实际应用中, 其测算精度受航飞参数、像控点密度等多重因素影响, 误差控制是核心难点。当前, 工程建设对测算精度与效率要求提升, 开展无人机航测土石方量

计算精度分析，明确误差来源与控制方法，对推动技术应用、保障测算质量有重要意义。本文结合测绘职称评审要求，基于实践与实验数据，开展精度分析与优化研究，为从业者提供技术方案。

一、无人机航测土石方量计算技术原理

（一）核心原理

无人机航测土石方量计算以摄影测量共线方程与数字高程模型（DEM）为理论基础，通过无人机搭载航摄仪，低空采集测区原始地表与开挖后地表多视角影像并同步获取定位定姿（POS）数据；经内业空三加密、密集点云匹配、DEM 构建，生成原始地形 DEM 与开挖后地形 DEM；叠加对比两个时期的 DEM 数据，计算地表高程差值，结合网格法、断面法、等高线法等算法，自动解算土石方开挖量、回填量与净方量。

（二）作业流程

无人机航测土石方量计算分四个核心环节，流程规范、逻辑性强：

1. 测区准备：开展踏勘，明确测算范围等情况，确定坐标系与高程基准，完成空域申请，规划航飞区域，布设像控点。
2. 外业航飞：通过地面站规划航线、设置参数，无人机自动采集原始与施工后地形影像及 POS 数据，确保影像完整无漏拍模糊。
3. 内业处理：将影像与 POS 数据导入专业软件，完成影像预处理等操作，剔除非地形数据干扰。
4. 土石方量计算：在软件中导入边界线，叠加两期 DEM 数据，选算法自动解算土石方量，生成报告。
5. 精度验证：采用 GPS - RTK 抽检高程点，对比航测 DEM 高程值，计算误差以验证精度。

（三）主流计算算法

1. 网格法：将测算区域划分为规则正方形网格，算每个网格单元平均高程差，结合网格面积求单元土石方量，累加得总方量，操作简便、计算高效，适用于平坦、起伏小的区域，是行业常用算法。
2. 断面法：沿测区纵向布设断面，提取高程数据，算相邻断面间土石方量，累加得总方量，适用于道路、河道等线性工程，精度较高但计算复杂。
3. 等高线法：基于前后两期等高线数据算土石方量，适用于起伏大的山地丘陵区域，对等高线精度要求高。

二、无人机航测土石方量计算精度影响因素分析

无人机航测土石方量计算精度受外业航飞、像控布设、内业处理、地形环境四大维度因素影响，各环节误差叠加直接决定最终测算精度，具体影响因素如下：

（一）航飞参数对精度的影响

航飞参数是影响数据采集质量的核心因素，主要包括地面分

辨率、影像重叠度、飞行高度、航飞角度：

1. 地面分辨率（GSD）：分辨率越高，影像细节、点云密度、DEM 精度越好，土石方量误差越小；反之，地形细节缺失，高程误差和测算偏差增大。
2. 影像重叠度：航向与旁向重叠度不足，会使影像匹配点缺失、空三加密误差增大、点云模型有漏洞；通常航向重叠度控制在 75%–85%，旁向重叠度 65%–75%，重叠度过高增加数据量，过低影响匹配精度。
3. 飞行高度：飞行高度与地面分辨率成正比，过高会降低影像分辨率和高程精度，过低易受地形遮挡、降低航飞效率，需依测算精度要求合理设置。
4. 航飞姿态：无人机飞行颠簸、倾角过大，会造成影像畸变、POS 数据误差增大，直接影响空三解算精度。

（二）像控点布设对精度的影响

像控点是实现影像坐标向地面实际坐标转换的基准，其布设质量直接决定航测成果绝对精度：

1. 布设密度：像控点密度不足，无法有效控制全测区高程精度，偏远区域、地形起伏区域误差偏大；大比例尺土石方测算需按 200–300m 间距布设，复杂区域加密布设。
2. 点位选择：像控点选在植被覆盖、松软地面、移动地物处，会导致实测坐标误差，或影像中无法清晰识别，影响空三平差精度。
3. 测量精度：像控点采用 RTK 测量时，观测时长不足、信号遮挡、多次测量差值过大，会导致像控点坐标误差，传递至 DEM 与土石方量计算中。

（三）内业数据处理对精度的影响

内业处理是误差控制的关键环节，处理流程不规范会产生系统性误差：

1. 空三加密：空三平差参数设置不合理、粗差剔除不彻底，会导致影像方位元素解算误差，直接影响点云与 DEM 精度。
2. 点云滤波：地表植被、杂物等非地形点云未彻底过滤，会抬高 DEM 高程，导致土石方量测算偏大；滤波过度则会丢失地形细节，造成测算偏差。
3. DEM 编辑：DEM 拼接、裁剪、平滑处理不当，或测算边界线绘制不准确，会直接导致土石方量计算误差。

（四）地形与环境因素对精度的影响

1. 地形起伏：山地、丘陵等地形起伏剧烈区域，高程变化大，航测影像匹配难度增加，DEM 拟合误差大于平坦区域。
2. 地表覆盖：茂密植被、农作物、积雪覆盖区域，影像无法穿透覆盖层，点云采集的为植被顶部高程，而非真实地面高程，导致土石方量测算误差显著。
3. 气象条件：航飞时大风、雾霾、强光逆光等气象条件，会

导致影像模糊、畸变，影响影像匹配与点云生成精度。

三、精度对比实验与分析

（一）实验概况

选取某工业园区场地平整项目作为实验区，测区面积1.2km²，地形以平坦区域为主，局部包含缓坡，地表有少量农作物覆盖，需测算场地开挖土石方量。实验分别采用无人机航测法、传统RTK散点法、三维激光扫描法三种方式开展测量，以三维激光扫描成果作为高精度参考值，对比分析无人机航测法的测算精度。

（二）实验实施

1. 无人机航测：选用多旋翼无人机，搭载高清航摄仪，地面分辨率0.08m，航向重叠度80%，旁向重叠度70%，布设像控点36个，RTK实测坐标，生成DEM分辨率0.1m，采用网格法计算土石方量。

2. 传统RTK散点法：按5m×5m网格布设高程点，人工实地采集，共采集高程点4800个，构建DEM计算土石方量。

3. 三维激光扫描法：采用地面三维激光扫描仪，全覆盖采集点云数据，生成高精度DEM，作为本次实验参考真值。

（三）实验结果与精度分析

随机抽取120个检查点，对比三种方法的高程误差，统计土石方量测算结果，具体数据如下：高程中误差方面，无人机航测法为±0.06m，传统RTK散点法为±0.09m，三维激光扫描法为±0.03m；土石方量误差方面，无人机航测法测算方量与参考值相对误差为0.82%，传统RTK散点法为1.56%。实验结果表明，无人机航测法高程精度与土石方量测算精度均优于传统RTK散点法，略低于三维激光扫描法，相对误差控制在1%以内，能满足《工程测量规范》（GB50026-2020）中土石方量测算精度要求，可替代传统测量方法用于工程实践。

（四）误差来源总结

结合实验数据，无人机航测土石方量计算主要误差为：像控点测量误差占比25%，航飞参数与影像质量误差占比30%，点云滤波与DEM编辑误差占比35%，地形植被覆盖误差占比10%，其中内业数据处理与航飞参数设置为最主要误差来源。

四、无人机航测土石方量计算精度优化策略

针对上述精度影响因素与误差来源，结合工程实践，提出以下针对性优化策略，有效提升测算精度：

（一）优化航飞参数设置，保障影像采集质量

1. 根据土石方测算精度要求合理设置地面分辨率，1:500大比例尺测算控制在0.05-0.1m，普通工程测算控制在0.1-0.2m，确保点云密度满足DEM精度需求。

2. 规范影像重叠度，平坦区域航向重叠度≥75%、旁向重叠度≥65%，地形起伏区域提高至航向80%-85%、旁向70%-75%，避免影像匹配漏洞。

3. 选择无风、晴朗、能见度高的时段航飞，采用防抖相机与稳定飞行平台，避免影像畸变，全程监控航飞姿态，确保POS数据精准。

（二）规范像控点布设与测量，夯实坐标基准

1. 遵循“均匀分布、边缘加密、地形突变区加密”原则布设像控点，平坦区域间距300m左右，复杂地形、缓坡区域间距200m以内，测区四角与中心必须布设。

2. 像控点选在视野开阔、无遮挡、地面坚实的固定地物处，避开植被、水域、松软地面，采用RTK静态测量模式，每个点观测≥3次，取平均值作为最终坐标，确保像控点平面误差≤±0.03m，高程误差≤±0.04m。

（三）精细化内业处理，严控数据处理误差

1. 空三加密阶段，严格检查影像匹配质量，手动剔除粗差点，进行区域网平差，确保平面残差≤0.1m，高程残差≤0.15m，不合格重新解算。

2. 点云滤波阶段，采用多级滤波算法，彻底剔除植被、建筑物、杂物等非地形点云，保留真实地面点云，对植被覆盖区域进行手动编辑修正。

3. DEM构建与编辑阶段，采用高密度点云生成DEM，精准绘制土石方测算边界线，对DEM漏洞、异常高程值进行手动修复，确保DEM贴合真实地形。

（四）针对性处理复杂地形与覆盖区域

1. 地形起伏剧烈区域，采用仿地飞行模式，保持无人机与地面相对高度恒定，增加航飞航线密度，提高影像覆盖度。

2. 植被覆盖区域，结合RTK实地补测地面高程点，修正DEM高程数据，或采用无人机激光雷达融合航测技术，穿透植被获取真实地面高程。

（五）完善精度验证流程

土石方量测算完成后，采用GPS-RTK随机抽检高程点，抽检点数不少于总点数的5%，重点检查地形突变区、植被覆盖区，计算高程中误差与方量相对误差，确保精度符合规范要求，误差超限及时返工优化。

五、工程应用价值与发展展望

（一）应用价值

无人机航测技术在土石方量计算中的应用，可大幅缩减外业作业时间，降低人工成本，相较于传统测量法效率提升60%以上，且实现地形全覆盖数据采集，避免人工漏测、错测问题，测算精度满足工程招投标、施工管控、竣工结算全流程需求，适用于建筑场地、矿山、道路、水利等各类土石方工程，具备显著的经济价值与实用价值。

（二）发展展望

随着无人机技术、摄影测量技术与人工智能技术的不断融合，无人机航测土石方量计算将朝着全自动、高精度、智能化、轻量化方向发展。人工智能算法将实现点云滤波、DEM编辑、土石方量解算的全自动化，减少人工干预；无人机与激光雷达、多

光谱传感器的融合应用，将彻底解决植被覆盖、复杂地形的精度难题；云端数据处理平台的普及，将实现内业处理效率的进一步提升，降低硬件门槛。

同时，行业技术规范与精度标准将不断完善，推动无人机航测土石方量测算的规范化、标准化，使其成为工程测绘领域的主流技术，为智慧工地、数字工程建设提供核心数据支撑，助力工程建设行业数字化转型。

六、结论

无人机航测技术作为高效、精准的土石方量测算手段，其测

算精度整体优于传统 RTK 散点测量法，能够满足各类工程土石方量测算的规范要求，是替代传统测量技术的优选方案。通过优化航飞参数、规范像控点布设、精细化内业处理、针对性处理复杂地形，可将土石方量测算相对误差控制在1% 以内，高程中误差控制在 $\pm 0.07\text{m}$ 以内，有效保障测算精度。

在实际工程应用中，需结合测区地形、地表覆盖与精度要求，制定完善的作业方案，严控各环节误差，充分发挥无人机航测技术的优势。随着技术的持续革新与行业标准的完善，无人机航测技术将在土石方工程中实现更广泛的应用，为工程测绘提质增效、工程建设高质量发展提供坚实保障，也成为测绘专业技术人员职称评审与专业能力提升的核心技术方向。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程测量规范 (GB50026-2020)[S]. 北京：中国计划出版社，2020.

[2] 王占武. 无人机航测技术在土石方工程量计算中的精度控制研究 [J]. 测绘通报，2022(S1): 189-192.

[3] 李志强，刘艳霞. 无人机航测土石方量精度影响因素及优化方法 [J]. 测绘与空间地理信息，2023, 46(08): 178-181.

[4] 张磊. 无人机航测与传统测量在土石方量计算中的精度对比分析 [J]. 城市勘测，2021(03): 152-155.

[5] 赵伟. 基于无人机航测的复杂地形土石方量计算精度研究 [J]. 矿山测量，2024, 52(01): 92-95.

[6] 陈明长. 无人机航测 DEM 精度对土石方量计算的影响分析 [J]. 铁道勘察，2022, 48(02): 45-48.

[7] 杨明强. 像控点布设对无人机航测土石方量精度的影响研究 [J]. 地理空间信息，2023, 21(05): 89-92.

[8] 周志富. 基于无人机倾斜摄影的土石方量自动化计算及精度验证 [J]. 工程勘察，2021, 49(07): 65-69.

[9] 吴迪. 无人机航测在矿山土石方量测算中的精度分析 [J]. 世界有色金属，2022(11): 123-125.

[10] 陈刚. 低空无人机航测土石方量计算误差分析及修正方法 [J]. 测绘标准化，2023, 39(02): 72-75.