工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

无人机航测技术在工程土石方量计算中的应用与精度验证

吕济涛
中国水利水电第十一工程局有限公司　河南省郑州市　450000

DOI：10.32629/ems.v8i10.22556

［摘　要］为全面提升工程土石方量测量效率与精准度，本文就无人机航测技术在土石方量计算中的应用及精度验证进行研究。通过梳理无人机航测技术原理与核心计算方法，规范外业数据采集、内业建模、工程量计算全流程作业工艺，依托实际工程项目开展对照试验，以传统 RTK 方格网测量数据为真值，完成航测成果的精度校验。试验结果表明，无人机航测土石方量计算相对误差可控制在工程规范允许范围内，精度满足土建、市政场地平整等常规工程施工及验收要求。研究证实，无人机航测技术兼具高效性、经济性与全覆盖优势，可有效弥补传统测量技术短板，能够广泛应用于各类工程土石方计量工作，为工程造价核算与施工管控提供可靠数据支撑。

［关键词］无人机航测；土石方量计算；DEM 建模；精度验证；工程测量

引言

各类项目建设初期都需要计算工程整体土石方量，可以说该项计算是工程建设前期设计、施工管控及竣工结算的核心基础性工作，计算精度与效率对工程预算编制、施工方案优化及项目整体造价管控成效具有很大的影响。当前传统土石方测量多采用全站仪、RTK 人工采样配合方格网、断面计算法，存在作业周期长、人力成本高、复杂地形采样盲区多等问题，难以适配现代化工程精细化、动态化的测量需求。无人机航测技术凭借机动灵活、数据采集密度高、全覆盖无盲区的优势，被广泛应用于工程测绘领域，逐步替代传统人工测量模式。为明确该技术在土石方计量中的实际应用价值与精度稳定性，本文结合实际工程场景，系统研究无人机航测土石方计算作业流程，通过对照试验完成精度验证，剖析核心误差来源，为该技术的标准化工程应用提供实践依据与技术参考。

1 无人机航测技术概述

无人机航测属于一种新型测绘技术，主要是依托轻型无人机搭载的高清航摄相机、GNSS 定位模块与惯性测量单元，快速获取测区全域高清影像数据，并借助配套专业内业软件处理地形数据与三维建模。整套系统主要由飞行平台、航摄设备、地面控制系统、数据处理系统四部分组成，各模块协同完成自动化航线飞行、影像采集、数据传输与地形还原工作。与以往传统人工测绘方式相比而言，该技术不受地形地貌限制，可高效覆盖陡坡、坑洼、高危施工区域，数据采样密度远高于人工测量[1]。同时，无人机航测作业流程简洁、人力投入少，可快速生成 DOM 正射影像与 DEM 数字高程模型，为土石方量精准计算提供全域、高精度的地形数据支撑，适配各类土建、市政、矿山工程的测绘作业需求。

2 无人机航测土石方量计算方法

就目前而言，工程土石方量计算方式主要分为传统人工计算法与无人机航测计算法两大类，两种方法的原理、操作难度、精度与适配场景存在明显差异。传统方法以方格网法、断面法、等高线法为主，依赖人工采样数据计算，操作繁琐、容错率低，复杂地形计算误差较大。而无人机航测技术主要采用 DEM 差分法，通过采集施工前原始地形与施工后现状地形两期影像数据，构建高精度数字高程模型，通过两期模型高程差值自动测算填挖方量，具备自动化程度高、全域计算、误差均匀的优势[2]。为直观对比各类计算方法的实用性，现将主流土石方计算方法的核心参数与适配场景整理如下表 1：

表 1　传统人工计算法与无人机航测计算法对比分析表

计算方法	核心原理	优势	局限性	适配场景
方格网法	将测区划分为方格网格，根据网格顶点高程计算土方量	计算逻辑简单、数据直观	人工工作量大、复杂地形精度低	平坦场地平整工程

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

断面法	截取地形断面，通过断面面积与间距推算土方量	适配线性工程、计算效率较高	断面间隔影响精度、采样局限性大	道路、沟渠线性工程
DEM 差分法（航测）	两期 DEM 模型高程差值自动差分计算	全域覆盖、自动化高、精度均匀	依赖建模精度、受地表杂物干扰	各类场地、复杂地形工程

通过对比可知，无人机航测 DEM 差分法的综合适配性最优，可突破传统方法的地形与人工限制，是现阶段土石方精细化计算的最优技术方案。

3 无人机航测土石方量计算作业流程

3.1 作业前期准备工作

基于无人机航测技术计算工程土石方量之前，施工单位应组织专业人员进行现场踏勘，并结合各方面实际情况合理设计施工方案，同时做好各类设备校对工作、合理布设像控点。一方面，作业前需实地核查测区范围、地形起伏、障碍物分布及周边环境，规避高压线路、高大建筑等飞行风险，结合工程精度要求制定专属航测方案。并根据测区面积设定飞行高度、航向与旁向重叠度，常规工程优先选择晴天无风时段作业，保障影像采集质量[3]。另一方面，全面调试无人机、航摄相机及 RTK 设备，校准相机参数与定位精度，排查设备故障。最后按照规范均匀布设像控点，避开植被、杂物遮挡区域，采用 RTK 精准采集像控点三维坐标，为后续空三加密与模型矫正提供精准基准数据，从源头控制测量误差。

3.2 外业航测数据采集

为获取原始地形影像，测绘人员需及时采集外业数据，采集数据是否精准直接决定后续建模与土方计算精度。一般而言，设备调试与点位布设完成后，工作人员就应该将规划航线导入地面控制系统，设置飞行速度、拍摄间隔、飞行边界等参数，启动全自动航线飞行作业。同时，无人机按照预设航线匀速飞行，自动完成测区全覆盖影像拍摄，全程保持稳定飞行姿态，保障影像清晰度与重叠度达标。飞行过程中实时监控设备状态、信号强度与拍摄进度，及时排查飞行异常、影像漏拍、模糊等问题[4]。测区边角、低洼坑地、陡坡等特殊区域需人工补拍，消除数据采集盲区。需要注意，单次飞行完成后应及时导出影像数据，初步筛查有效影像，剔除曝光异常、模糊抖动、重叠度不足的无效数据，确保原始影像数据完整、合规，为内业处理提供高质量素材。

3.3 内业数据处理与建模

外业数据采集完成后，便可利用专业航测处理软件处理内业数据处理与三维建模，具体流程包含预处理影像、测量空中三角、处理点云与生成模型。首先是筛选整理影像，剔除无效影像后导入软件，完成影像畸变矫正与预处理。随后开展空中三角测量，通过软件自动匹配影像特征点，生成密集点云数据，导入外业采集的像控点坐标完成点位矫正与空三加密，优化整体点位精度[5]。之后进一步精细化去噪处理生成的原始点云，剔除植被、施工杂物、飞鸟等干扰噪点，保留真实地形点位数据。最后基于精准点云数据构建测区三维实景模型，生成数字正射影像 DOM 与数字高程模型 DEM，并人工修模模型中的局部畸变、地形失真区域，保障 DEM 模型能够真实还原测区原始地形地貌，为土石方量精准计算提供核心数据模型。

3.4 土石方量计算

土石方量的具体计算离不开施工前后两期高精度 DEM 模型，通常采用差分法实施自动化计算，核心原理为通过两期地形高程差值，结合测区面积测算填挖方总量，核心计算公式如下：

$$V = \sum_{i=1}^{n} (H_{1i} - H_{2i}) \times S$$

式中：V 为土石方总方量（m^3）；H_{1i} 为施工前原始地形高程（m）；H_{2i} 为施工后现状地形高程（m）；S 为单个网格单元面积（m^2）；n 为网格单元总数。

具体计算过程中需注意，计算人员应在软件中精准划定测区计算边界，剔除施工范围外的无效区域，统一两期 DEM 模型的坐标系统与分辨率参数。系统自动逐网格计算高程差值，正值为挖方量、负值为填方量，最终汇总生成总填方量、总挖方量与净土方量[6]。并且，计算完成后通过调整网格精度、复核边界范围进行多次校核，规避模型误差、边界偏差导致的计算偏差，确保土石方量计算结果精准、可靠，符合工程计量标准。

4 工程试验与精度验证

4.1 试验工程概况

某市政场地平整工程总面积约 8200m^2，场地整体地势起伏平缓，局部存在低洼坑地与少量杂草植被，施工内容以场地土方回填、平整压实为主。该工程对土石方计量精度要求较高，需精准核算工程量用于造价结算。测区无高大障碍物与高危作业区域，适合开展无人机航测与传统人工对照试验，试验数据具备真实性与代表性，可有效验证航测技术的工程应用精度。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

4.2 试验方案设计

为验证无人机航测技术在工程土石方量计算中的可靠性与精度准确性，本文采用对照试验模式，以工程通用的 RTK 方格网测量法计算结果为真值，无人机航测 DEM 差分法结果为试验值，开展精度对比分析。整个测绘期间，试验统一坐标系统与高程基准，保证两组试验数据的基准一致性。

与此同时，航测作业统一设置飞行高度 120m、航向重叠度 85%、旁向重叠度 80%，规范像控点布设与数据处理流程。传统人工测量按照工程规范布设方格网，网格间距 5m，均匀采集各方格顶点高程数据，通过方格网法计算土石方量。试验完成后，由专业人员对比两组数据的绝对误差、相对误差，分析航测成果精度是否满足《工程测量规范》要求，同时总结地形条件对航测精度的影响规律，保障试验结果客观有效。

4.3 试验数据采集与处理

整体试验数据采集分为无人机航测数据采集与传统人工测量数据采集两部分。无人机航测过程中，采集了测区施工前、施工后两期影像，并严格按照标准化流程开展外业作业，布设 8 个均匀分布的像控点，保障模型矫正精度。同时，内业通过航测软件完成影像处理、空三加密、点云去噪与 DEM 模型构建，最终计算得出航测法土石方量数据。

人工测量环节采用 RTK 设备逐点采集方格网高程数据，精准记录各点位坐标与高程信息,核对无误后导入计算软件，采用方格网法完成土石方量核算。为规避偶然误差，两组试验均进行三次重复测量计算，取平均值作为最终试验数据，确保数据真实稳定，为后续精度分析提供可靠依据。

4.4 精度验证与结果分析

为最大限度降低测量误差，本次试验通过多组重复试验获取数据，以人工测量真值为基准，计算无人机航测结果的绝对误差与相对误差，精度对比结果如下表 2 所示：

表 2　工程土石方量测量结果分析表

试验组别	人工测量方量（m^3）	航测计算方量（m^3）	绝对误差（m^3）	相对误差（%）
1	5286.3	5258.7	27.6	0.52
2	5291.5	5262.4	29.1	0.55
3	5288.9	5260.1	28.8	0.54

由表 2 当中的数据可看出，无人机航测土石方量计算相对误差最大值为 0.55%，整体误差稳定在 0.6%以内，远低于工程规范要求的 2%允许误差标准。结果表明，无人机航测技术计算精度可靠，能够满足常规市政、土建工程土石方计量与验收要求，相较于传统人工测量，数据稳定性更强，可替代传统测量方式开展工程土石方量核算工作。

4.5 误差来源系统分析

根据上述试验数据可知，无人机航测土石方计算误差多是来源于分为外业、内业与环境。外业误差主要源于飞行姿态轻微偏移、影像重叠度细微偏差、像控点布设与采集误差，天气光照不均也会造成影像质量差异,影响特征点匹配精度。内业误差包含影像匹配误差、点云降噪过度或不足、模型人工修模偏差，DEM 分辨率设置不当也会导致地形数据失真。环境误差主要为测区地表植被、施工杂物遮挡真实地形，造成高程数据采集偏差，是复杂地形误差的主要来源。整体而言，航测误差多为可控系统误差，通过规范作业流程、优化参数设置可有效降低，保障计量精度。

结束语

综上所述，无人机航测技术是一种非常科学有效的工程土石方量计算方法，本文结合实际工程对照试验，验证了该技术在土石方量计算中的可行性与精准性。试验证明，无人机航测计算误差符合工程规范标准，且具备高效、低成本、全覆盖的显著优势，可有效解决传统测量技术的作业短板。本文明确了航测全流程误差来源，梳理了标准化作业工艺，可为同类工程测绘作业提供参考。后续可针对山地、基坑等复杂工况开展深化研究，进一步优化精度控制方案，推动无人机航测技术在工程测绘领域的标准化、规模化应用。

[参考文献]

[1]向亚文.基于无人机全覆盖测绘的上水库土石方调度管理[J].无人机，2026，(9):136-138.

[2]吕娟，张云枫，谢飞，等.基于无人机配合方格网法的土石方量计算探究[J].科技创新与应用，2026，16(19):153-156.

[3]王允华，谢欣鹏，张庆轩.基于无人机倾斜影像匹配点云的土方量算方法研究[J].测绘与空间地理信息，2025，48(12):173-175+182.

[4]王利伟，王祥，刘坡.复杂山区线性工程土石方量计算和智能调配应用研究[J].市政技术，2025，43(11):101-113.

[5]王桂一.无人机摄影测量在矿山土石方采剥量计算中的应用[J].中国金属通报，2025，(10):146-148.

[6]朱鹏宇.北斗无人机地形测绘及土石方精准计算技术[J].路基工程，2025，(2):183-188.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.