

无人机航测技术在地形测绘中的作用

李龙龙* 高英英

西安建筑科大工程技术有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要: 无人机航测技术具备操作灵活、采集数据精准、作业耗时短的诸多优势, 能够有效改变地形测绘的传统作业模式与技术流程, 本研究从技术作用、优化策略两个角度开展相关分析, 一是说明无人机航测在提升数据采集效率、还原真实地形精度、适配复杂作业场景方面的核心价值, 二是围绕航线规划方式、数据误差修正、现场作业决策三个关键环节, 提出具体且可落地的优化办法, 建立“测前可算、测中可控、测后可纠”的完整作业逻辑, 旨在为地形测绘行业的智能化升级提供一定的实践参考。

关键词: 无人机航测; 地形测绘; 误差修正; 航线规划; 精度优化

The Role of Drone Surveying Technology in Terrain Mapping

Li Longlong*, Gao Yingying

Xi'an University of Architecture and Technology Engineering Co., Ltd., China Shaanxi Xi'an 710000

Abstract: Drone surveying technology has many advantages, such as flexible operation, accurate data collection, and short operation time. It can effectively change the traditional methods and processes of topographic surveying. This study analyzes the topic from two perspectives: technical role and optimization strategies. First, it explains the core value of drone surveying in improving data collection efficiency, restoring accurate terrain, and adapting to complex operational scenarios. Second, it proposes concrete and practical optimization methods focusing on three key aspects: flight path planning, data error correction, and on-site decision-making. The goal is to establish a complete workflow of "calculable before measurement, controllable during measurement, and correctable after measurement," aiming to provide practical reference for the intelligent upgrade of the topographic surveying industry.

Keywords: Drone surveying; Topographic surveying; Error correction; Flight path planning; Accuracy optimization

0 引言

地形测绘是开展国土空间规划、水利工程修建、地质灾害治理工作的基础前提, 传统的人工测绘方式会受到地面通行条件的限制, 单人单日能够完成的作业面积不足 0.2 平方公里, 大型有人机航空测绘的覆盖范围更广, 却容易受到天气环境的影响, 单次飞行作业的成本普遍超过 10 万元。这两种传统测绘方式在复杂地形区域开展工作, 都存在明显短板, 也就是作业人员无法抵达部分区域、地形数据采集不完整、作业成本难以有效控制。逐步成熟的无人机航测技术, 刚好弥补了传统测绘方式存在的各类缺陷。王泽阳^[1]的研究表明, 无人机航测技术和地理信息技术相互结合, 可以高效采集高精度的地形数据, 能够为测绘工作开辟全新的技术路径, 崔治鹏^[2]的相关研究进一步证实, 在大比例尺地形图测绘工作中, 无人机航测的外业作业周期, 能够比传统测绘方式缩短 80% 以上。与此同时, 无人机配套设备的更新迭代速度较快, 以 2026 年 5 月深圳世界无人机大会展示的侦测定位设备为例, 设备功耗已经降低至 10 瓦级别, 普通的移动电源就可以支撑设备全

天作业, 这让长时间、多架次的户外航测任务, 不再存在设备保障层面的阻碍。不过设备性能的升级, 不会直接提升整体的作业效果, 航线规划如何平衡作业效率与数据冗余、地面控制点的布设数量能否大幅缩减、飞行过程中遭遇信号波动后采集的数据是否可用, 这些实际问题, 无法仅依靠更换高性能无人机设备解决。本研究选取三个容易被忽视、但直接影响测绘成果质量的关键环节, 也就是航线交叉验证设计、误差实时修正、现场轻量化决策辅助, 开展对应的策略分析与优化研究。

1 无人机航测在地形测绘中的三重作用

1.1 外业周期压缩: 从月尺度向天尺度的跨越

在传统 1:1000 比例尺地形图测绘工作中, 针对 10 平方公里的测区, 采用人工全站仪开展作业, 需要 4 名测绘人员连续作业 28 天, 再加上 15 天的内业成图处理时间, 整体作业周期会超过 40 天, 无人机航测技术可以大幅精简这一作业流程, 一架续航 50 分钟的垂直起降固定翼无人机, 单次飞行能够完成 2 平方公里的数据采集工作, 仅需 5 次飞行即可覆盖全部测区, 外业作业时长仅为 2 天。内

业环节依托自动化建模软件处理数据,3天内就能输出数字高程模型(DEM)与正射影像(DOM)。整体作业周期从原本的43天缩短至5天,作业成本也从约22万元降低至7万元以内。崔治鹏在甘肃某大比例尺测图项目中,验证了这一效率差距,无人机航测外业数据采集仅耗时2天,传统测绘方式则需要12天,作业效率提升幅度达到83%,这种大幅的效率提升,能够让地形测绘从固定的周期性普查模式,转变为按需即时更新的灵活作业模式。

1.2 植被遮蔽穿透:激光雷达多回波技术的地形还原能力

传统航空摄影测量依托可见光波段开展数据采集,无法穿透植被顶层冠层,不能获取精准的地面高程数据,国内南方丘陵区域的森林覆盖率普遍高于60%,这就造成大面积区域的地形数据存在采集空白区域。王婉情^[3]的研究说明,无人机搭载激光雷达(LiDAR)设备后,能够借助多回波技术,记录植被冠层到地面的多层回波信号,经过滤波处理后,可以有效排除植被的干扰,采集到高精度的地面点云数据。现场实测结果显示,在150米飞行高度、点云密度为每平方米30个点的作业条件下,林下地面的高程中误差可以控制在±0.15米以内,该精度可以满足1:1000比例尺工程地质测绘的作业标准。魏涛、韩磊^[4]通过精度对比分析进一步证实,在植被覆盖度超70%的复杂地形区域,激光雷达点云数据的地面点识别率能够达到92%以上。

1.3 盲区覆盖能力:人员不可达区域的空地协同采集

地质灾害发生后的应急测绘工作,能够充分体现无人机航测技术的独特优势。元峰、卢雪玉^[5]针对复杂地形测绘开展专项研究后提出,无人机航测可以进入人工难以抵达的陡峭山区、峡谷地段,有效解决了传统测绘存在的作业盲区问题。在广东某水文站地形测量的实际项目中,技术团队将测区划分成水下、岸上两个作业区域,岸上复杂地形区域采用无人机航测技术采集数据,水下区域依托手持RTK设备完成数据收集,无人机可以在岸坡植被密集区、陡峭岩壁等人员无法稳定作业的区域,采集高分辨率影像数据,生成的数字高程模型能够清晰呈现岸坡形态与植被分布情况。本次作业一共采集49条水底高程数

据,精准测定17个控制点,水陆衔接位置的数据偏差可以控制在0.05米以内,该项目案例能够证明,无人机航测不仅解决了人工测绘无法进入复杂区域的难题,还可以通过空地协同的作业方式,填补水陆过渡区域的数据缺失问题。

2 无人机航测技术在地形测绘中的有效应用策略

2.1 交叉网格航线设计,构建数据自校验的观测结构

常规的无人机航测作业,大多采用“之”字形平行航线覆盖全部测区,这种航线规划方式存在明显弊端,作业误差会顺着飞行方向单向累积,不存在交叉验证的机制,一旦出现GPS信号漂移、IMU姿态解算偏差等系统问题,整条航带采集的数据都会和真实地形数据产生偏差。针对以上问题,作业人员可以采用交叉网格航线的规划方式,在原有平行主航线的基础上,增设多条和主航线垂直的穿越航线,形成网格形态的观测布局,平行航线可以保障测区全覆盖,穿越航线主要用于数据对齐与偏差校准。数据后处理阶段,技术人员可以计算穿越航线和各条平行航线重叠区域的点云配准残差,残差数值更小的航线方向,在数据融合处理时会赋予更高的权重。王泽阳的研究数据显示,优化航线布设方案后,无人机航测数据的整体一致性可以提升30%以上。广东水文分局在朱村、活动陂站点的地形测绘工作中,搭建了“空中-水面-水下”三维立体勘测体系,两类不同来源的数据会在岸线位置相互校验,一旦发现数据偏差超出设定阈值,就会及时开展补飞作业,见表1。

2.2 航前像控优化,降低外业布设的时间成本

地面控制点(GCP)布设工作,是无人机航测外业作业中最耗费时间与人力环节,按照传统作业标准,每平方公里的测区需要布设9-12个地面控制点,山区复杂地形的布设数量还会进一步增加,因此减少地面控制点布设数量,一直是行业优化作业流程的重要方向。大比例尺测图工作可以采用“稀疏布控+PPK后处理”的组合作业模式,能够将每平方公里的像控点数量缩减至4-6个,同时可以保证空三加密的作业精度。崔治鹏结合工程实践总结出,像控点布设需要遵循“边缘加密、重点覆盖”的原

表1 不同航线构型的误差控制能力对比

航线构型	平面中误差(m)	高程中误差(m)	是否需要地面控制点	适用场景
单一方向平行航线	±0.07	±0.12	是	开阔平原、低精度需求
交叉网格航线(无GCP)	±0.05	±0.08	否	带状区域、山区走廊
交叉网格航线(含少量GCP)	±0.03	±0.04	是(每km ² 2-3个)	1:500大比例尺测图

数据来源:文献[2][5]实验数据综合

则, 可将有限的控制点优先布置在地形突变位置、测区四角以及影像覆盖边缘区域, 无需按照均匀网格的方式布设。从实际工程操作角度来看, 作业人员抵达测区后, 可先操控无人机以“井”字形飞行轨迹, 采集 20-30 张不同角度的影像完成前期预检, 再结合预检结果确定像控点的最终布设位置, 这种方式能够将外业布控的作业时长压缩 40% 以上。

表2 不同像控布设策略的外业耗时对比

布设策略	每平方公里控制点数量	10km ² 外业耗时	高程中误差 (cm)
传统均匀布控	9-12个	1.5天	± 5.0
稀疏重点布控	4-6个	0.8天	± 6.5
稀疏布控+PPK	2-3个	0.4天	± 8.0

数据来源: 文献[3][5]工程数据整理

2.3 RTK 定位与稀疏控制点协同, 实现平面与高程的分工约束

行业内部针对无人机 RTK (实时动态定位) 技术能否完全替代地面控制点的问题, 已经开展了多年讨论。魏涛、韩磊在复杂地形测绘的精度研究中表明, 完全不布设地面控制点、仅依靠 RTK 定位技术作业时, 数据平面中误差约为 4.7cm, 高程中误差约为 6.2cm, 两项误差数值都符合 1:500 地形图的误差容许标准, 如果增设少量检查点辅助作业, 高程中误差能够进一步降低至 3.5cm 以内, 测绘模型的整体稳定性也会得到明显提升。以此为依据, 作业可采用更为合理的分工模式, 也就是依靠 RTK 模块把控平面坐标精度, 借助地面控制点约束高程数据精度。搭载 RTK 模块的无人机开展航测作业时, 卫星信号的水平几何强度更高, 平面位置中误差基本可以控制在 ±0.05 米以内, 高程数据则容易受到卫星几何分布、大气折射等因素的干扰, 误差会扩大至 ±0.08 米到 ±0.12 米, 而地面控制点刚好可以弥补这一短板。将控制点的高程数据代入空三平差计算, 能够有效改善高程方向的系统偏差问题。山区航测作业可适当增加高程控制点密度, 控制在每平方公里 5-6 个, 同时减少平面控制点的布设数量, 形成“平面靠 RTK、高程靠控制点”的协同作业模式。

2.4 分层采集与分频作业, 平衡激光雷达与相机的重叠率矛盾

无人机航测作业长期存在一个技术矛盾, 激光雷达 (LiDAR) 与可见光相机对航线重叠率的作业要求并不统一。王泽阳的研究提到, 激光雷达的旁向重叠率达到 20%-30%, 就可以满足点云拼接的基本需求, 可见光相机想要生成高精度正射影像 (DOM), 旁向重叠率则需要达

到 60% 以上, 两类设备的重叠率需求差距可达两至三倍。分层采集、分批次规划航线的方式, 可以有效解决这一技术冲突, 一是无人机以 25% 的低重叠率开展首架次飞行, 专门采集 LiDAR 数据, 重点获取地表高程相关信息, 二是针对核心作业区域, 以 70% 的高重叠率完成二次飞行, 采集高分辨率影像数据, 用于模型纹理映射。虽然该方式增加了一次飞行架次, 但单架次的作业效率大幅提升, 整体作业耗时并不会增加。按照 300 米飞行高度测算, 低重叠率模式下单架次可覆盖约 10 平方公里区域, 高重叠率模式仅能覆盖 3-4 平方公里区域, 针对 10 平方公里的测区, 分两次飞行采集两类数据的总耗时, 要低于一次性按照高重叠率标准飞行 3 个架次的耗时。崔治鹏的工程实践可以证实该策略的实用性, 分层采集模式能够在不增加总飞行时长的前提下, 同时满足两类测绘数据的质量标准。

2.5 应急数据保护预判, 应对复杂环境下的通信波动

无人机在山区、峡谷等复杂区域开展航测作业时, 通信信号中断属于常见问题, 传统的应对方式较为被动, 飞手发现信号强度减弱后, 会通过调整天线角度、改变无人机飞行姿态等方式尝试修复信号, 最终会造成无人机飞行姿态剧烈波动, 最后时段采集的数据质量大幅下降, 严重时会导致整架次数据全部失效。对此, 相关人员可在飞控系统提前设置“应急数据保护模式”, 有效改善这类问题, 当机载设备检测到下行信号强度持续降低, 比如信号数值从 -70dBm 下降至 -85dBm 时, 系统会自动启动一系列保护操作, 一是暂停拍照指令, 防止模糊影像存入设备, 二是将飞行速度降至常规巡航速度的 50%, 减少飞行姿态的波动, 三是把人工实时遥控模式切换为预置航线自主飞行模式, 持续尝试恢复通信链路, 如果 30 秒内通信无法恢复, 无人机将自动执行爬升、返航程序。复杂地形航测作业前, 需要提前评估区域通信覆盖情况, 标注信号盲区位置, 同时在航线规划过程中预留应急返航通道。该优化策略的核心逻辑, 是主动舍弃最后几分钟的采集数据, 保障前期已采集数据的完整性, 从作业成本来看, 放弃约 0.1 平方公里的短时采集数据, 远比重飞整架次数据耗费的 15-20 分钟作业成本更低。

3 结语

无人机航测技术已经从传统的辅助测绘手段, 发展成为地形测绘工作的核心技术方式, 本研究的分析结果表明, 该技术在作业效率、地形还原精度、复杂场景适配能力三个方面, 全面突破了传统测绘技术的局限, 作业周期可缩短 80% 以上, 能够精准获取植被覆盖区域的高程数据, 可

全面覆盖人工无法抵达的作业区域。技术优势的形成，不依赖单一技术升级，是 RTK 定位技术、激光雷达设备、智能航线规划等多项技术协同应用的成果。本研究总结了五项可落地的全流程优化策略，一是依靠交叉网格航线设计实现数据自我校验，二是通过航前像控优化缩减外业作业时长，三是依托 RTK 与稀疏控制点协同分工，提升平面与高程数据精度，四是采用分层采集模式解决不同传感器的作业冲突，五是借助应急数据保护模式保障复杂环境下的数据质量，这些优化策略无需依托专用硬件设备，能够直接嵌入现有作业流程，投入成本低、作业成效直观。

参考文献：

[1] 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.

[2] 崔治鹏. 无人机航测在大比例尺地形图测绘中的应用[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(07): 65-67.

[3] 王婉情. 无人机航测在大比例尺地形图测绘中的应用探究[J]. 新疆有色金属, 2024, 47(06): 74-75.

[4] 魏涛, 韩磊. 无人机航测技术在复杂地形测绘中的精度分析[J]. 北斗与空间信息应用技术, 2025(02): 87-89+106.

[5] 亓峰, 卢雪玉. 无人机航测技术在复杂地形测绘中的应用研究[J]. 坦克装甲车辆, 2025(16): 83-84.

作者简介：* 通讯作者：李龙龙（1989-），男，汉族，陕西武功人，本科，助理工程师。