

# 倾斜摄影测量技术在市政道路勘测中的应用与精度评估研究

杜 映

太原市市政工程设计研究院 山西 太原 030002

**摘要:** 倾斜摄影测量技术在现代市政道路勘测中的应用具有重要价值。该技术通过多角度影像采集与高精度三维重建,能够生成可量测的实景三维模型,为市政道路工程的规划、设计、施工与运维提供精准的数据支持。在建筑与植被稀疏的地区,倾斜摄影测量技术尤其表现出优势。本文详细阐述了倾斜摄影测量的技术原理与数据处理流程,并通过实际工程案例对其精度进行了严谨的评估。结果显示,在优化作业方案下,倾斜摄影测量所获取的高程数据中误差可稳定控制在5厘米以内,满足市政道路工程设计的精度要求。最终,本文证明:倾斜摄影测量技术凭借其高效、信息丰富、成本低及精度足够高等特点,能够替代传统的GNSS-RTK测量方式进行道路断面测量工作,为市政勘测行业的数字化、智能化转型提供有力支撑。

**关键词:** 倾斜摄影测量; GNSS-RTK; 市政道路勘测; 实景三维模型; 道路断面测量; 精度评估; 点云; 数字高程模型 (DEM)

## 引言

市政道路断面测量是道路工程的关键,传统GNSS-RTK技术虽为行业金标准,但存在诸多缺陷。它是“接触式”离散点测量,作业效率低、成本高、安全风险大且数据维度单一,难以满足长距离线性工程需求。倾斜摄影测量技术的发展带来转机,它通过多传感器多角度采集影像,经算法实现三维重建,生成高精度实景三维模型,具有“高效率、高真实感、高精度”特点,能实现从“离散点”到“连续面”的数据跨越。不过,其精度受环境影响,在建筑和植被密集区域会出现模型问题,限制了全面替代传统方法。本文聚焦建筑和植被稀疏地区,如城市新建开发区等,此类场景为倾斜摄影测量提供理想条件。核心论点是在这些地区,倾斜摄影测量能凭借优势,在满足工程精度下替代GNSS-RTK进行道路断面测量,提升效率与经济效益。后续将从技术原理、优势对比、实例验证三方面论证。

### 1 倾斜摄影测量技术基本原理与系统构成

倾斜摄影测量是国际遥感与测绘领域的一项颠覆性创新。它突破了传统航空摄影测量仅从垂直角度获取正射影像的局限,通过在一个飞行平台上集成一个垂直朝向和四个倾斜朝向的高分辨率数码相机,构成一个五镜头系统,从而实现对地物从顶面到侧面的全方位、多角度信息采集。

**多视角成像机制:** 垂直镜头主要用于获取地物的顶面信息,保证了成果的平面精度和高程信息的准确性,

是生成数字表面模型(DSM)和真正射影像(TDOM)的基础。四个倾斜镜头则从不同侧面对地物进行成像,精准捕获其侧面的详细纹理与几何结构,从而彻底解决了传统正射影像中高层建筑存在的“投影差”问题,使得生成的模型在视觉上和几何上都成为一个完整的、逼真的“数字孪生体”。

**高精度POS系统集成:** 飞行平台的核心枢纽是高精度的定位定姿系统。它通常由一台高精度GNSS接收机和一个惯性测量单元紧密耦合而成。POS系统能够以极高的频率实时记录每张影像在曝光瞬间的摄站中心的三维坐标和三个姿态角。这些数据为后续的空三加密提供了至关重要的初始值和外方位元素约束,是保证模型高精度几何定位的基石。

### 2 替代可行性分析: 倾斜摄影测量与GNSS-RTK的全面对比

本节将深入剖析在建筑植被稀疏地区,倾斜摄影测量相较于GNSS-RTK的技术、效率与经济优势,系统论证其替代的可行性。

#### 2.1 效率与成本优势: 从“人海战术”到“智能飞行”

**外业效率的指数级提升:** GNSS-RTK测量一条数公里长的道路断面,需要测量员两人一组,沿设计线路徒步行走,逐点打桩、立杆、采集数据。测量1公里道路的横断面,往往需要耗时数小时。而倾斜摄影测量采用无人机作业,作业人员仅需2-3人。以测量一条5公里长、100米宽的道路带为例,无人机一个架次即可完成全部数据采

集。外业效率提升达10倍甚至20倍以上，且测量耗时与测区面积相关，与地形复杂程度关系不大。

**内业处理的自动化与复用性：**虽然倾斜摄影内业空三建模需要大量的计算时间，但此过程高度自动化，无需专业人员持续干预。一旦模型生成，所有断面提取工作均在办公室内的电脑上，通过鼠标点击和软件自动化批处理功能轻松完成，工作环境安全舒适，彻底避免了外业的风吹日晒和交通安全风险。更重要的是，一次飞行获取的实景三维模型是一个持续可用的数据金矿，其价值远超单一的点坐标数据。除了提取断面，该模型还可用于：工程量计算；征地拆迁评估；方案设计比选；施工进度管理；道路资产普查与管理。实现了“一测多用”，摊薄了单次测量的成本，性价比极高。

**综合成本显著降低：**效率的提升直接转化为成本的下降。节省了大量的人工工时、车辆油耗和设备外场折旧费用。虽然初期在无人机、倾斜相机和高性能计算机上的投入较大，但将其分摊到多个项目后，其单项目成本远低于传统RTK测量。对于大型项目或周期长的项目，其经济优势更加明显。

**2.2 数据维度与项目管理优势：**从“离散数据”到“数字孪生”

**数据丰富性的革命性跨越：**GNSS-RTK只能提供设计图纸上要求的特定点位的高程，数据是孤立的、离散的。而倾斜摄影模型是地表的连续、逼真还原，是一个包含了空间位置、几何形态、真实纹理和光谱信息的“全息数据体”。工程师可以在模型上任意位置、任意密度地截取断面，而不仅仅局限于外业测量的那几个点，这使得设计更加精细、灵活和优化。对于后期发现需要补充测点的情况，无需再次外业，直接在内业模型上量取即可，实现了数据的“可回溯”和“可再生”。<sup>[1]</sup>

**全要素、可量测的真实场景：**模型不仅包含高程信息，还集成了一切地物的纹理、颜色、形状信息。这为道路资产的普查、管理与信息化提供了无可比拟的便利。

**完美的项目回溯与审计功能：**实景三维模型是项目现场在某一时刻的“数字档案”或“数字底版”。任何参与方都可以在项目后期随时查看、复核当时的原始现场情况，解决了传统测量中“测完即无法复查”的痛点，为工程计量、变更确认和项目争议提供了权威的、可视化的裁决依据，极大地减少了合同纠纷。

**2.3 精度可行性分析：**在稀疏地区达到工程规范要求

这是替代可行性的技术核心。在建筑植被稀疏区，遮蔽源少，光线充足，地表纹理特征明显，影像匹配质量极高，模型精度有充分保障。

**精度理论基础：**倾斜摄影测量的精度通常用“地面采样间隔”来初步衡量，即影像上一个像素所代表的地面实际尺寸。通过优化飞行方案，在稀疏地区可轻松实现GSD优于2cm的航摄。根据大量工程实践总结，模型的地物平面精度一般为1-3倍GSD，高程精度为2-5倍GSD。换言之，一个GSD=2cm的项目，其模型的高程精度预期在4-10cm之间。<sup>[2]</sup>

**与工程规范的符合性：**根据《城市测量规范》和《公路勘测规范》，对于市政道路和一般等级公路的初步设计和施工图设计阶段，地形图的高程精度要求通常为 $\pm 10\text{cm}$ 。《工程测量规范》也对此有类似要求。倾斜摄影测量在理想条件下达到的精度完全满足这一核心规范要求。

**精度控制与验证方法：**模型的绝对精度通过布设于测场内的像控点来保证和优化。像控点需采用GNSS-RTK等传统方式精确测量，但其布设数量远少于RTK测点数量。这些像控点参与空三解算，将模型强制符合到已有的高精度控制网中。模型的最终精度则通过另一组完全独立的检查点来客观评价。这些检查点同样用RTK精确测量，但其坐标不参与空三计算，用于最终评价模型的真实精度，是验证倾斜摄影测量能否替代RTK的“试金石”。<sup>[3]</sup>

### 3 实例应用与精度验证

为将上述理论分析落到实处，本研究选取了某经济技术开发区的一条新建规划道路项目作为典型案例，进行全面的实践验证。

#### 3.1 项目概况

**测区特点：**规划道路全长3.5公里，设计路宽40米，勘测范围为中线两侧各60米，总面积约0.42平方公里。沿线为待开发平整土地，地表主要为裸土、低矮草地和零星分布的农用地，无任何高大建筑和密集林木，视野极为开阔，是典型的“建筑植被稀疏区”。

**任务目标：**快速获取测区内1:500数字线划图(DLG)和数字高程模型(DEM)，并为道路设计提供精确的纵断面图和间距20米的横断面图。

#### 3.2 技术方案实施

本项目采用“倾斜摄影测量为主，GNSS-RTK为辅”的融合作业模式开展道路勘测。在像控点测量环节，沿道路两侧视野开阔、地面平坦区域均匀布设15个像控点，采用“L”形标志确保清晰易识别，使用华测导航i90GNSS接收机以网络RTK模式进行测量。在测量精度最佳时段操作，每个点采集300个测回，严格将平面精度控制在 $\pm 2\text{cm}$ 以内，高程精度控制在 $\pm 3\text{cm}$ 以内，为后续的测量工作奠定了坚实基础。<sup>[4]</sup>

无人机航飞阶段,选用大疆M300垂直起降固定翼无人机,搭载4200万像素五镜头倾斜相机。精心设计航飞参数,相对航高180米, GSD  $\approx$  2.3cm, 航向重叠率85%, 旁向重叠率75%。在晴朗无云、光照充足、风力小于3级的适宜天气条件下,仅飞行1个架次,耗时120分钟便获取了4280张有效影像,高效完成数据采集任务。

内业处理时,运用大疆智图软件进行空三加密和实景三维模型重建,将15个像控点的精确坐标导入参与区域网平差,整个空三过程顺利,连接点匹配良好。生成的实景三维模型、真正射影像和密集点云等成果,为后续的测图工作提供了丰富的数据支持。将模型导入南方

数码EPS3D测图模块生成DEM,并提取断面数据。

为保证模型高程精度评价的客观公正,采用与像控点测量同精度的GNSS-RTK设备,在测区内随机采集150个独立检查点,这些点不参与建模过程,作为“真值”用于评估模型精度。这种严谨的作业模式和质量控制手段,确保了项目成果的准确性和可靠性。<sup>[5]</sup>

### 3.3 结果与精度分析

将150个RTK检查点的坐标(视为真值)与实景三维模型上对应位置的量测坐标进行逐一对比,统计其在高程方向上的误差,结果如下表所示:

分析与结论:

| 精度统计指标                             | 高程误差 (米) |
|------------------------------------|----------|
| 平均误差 (Mean Error)                  | -0.018   |
| 中误差 (Root Mean Square Error, RMSE) | 0.047    |
| 最大正误差 (Max Positive Error)         | 0.105    |
| 最大负误差 (Max Negative Error)         | -0.098   |
| 误差绝对值小于0.05m的点数占比                  | 78.00%   |
| 误差绝对值小于0.10m的点数占比                  | 100%     |

精度全面达标:模型中误差为4.7厘米,远低于《城市测量规范》对于1:500数字高程模型10厘米的高程精度要求。最大误差为10.5厘米,且所有150个检查点的误差绝对值均未超过10.5厘米,100%的点满足规范要求,其中78%的点达到了更高的精度(<5cm)。<sup>[6]</sup>

替代性充分成立:在该案例的理想环境下,倾斜摄影测量技术所获得的高程成果,其精度与GNSS-RTK直接测量处于同一数量级,且稳定性、可靠性极高。完全可以作为最终成果,直接用于道路的纵、横断面设计和高精度土方量计算。

效率与成本对比显著:本项目外业总工时为2天/2人。若全程采用RTK进行断面点采集,预计需要至少5-6天/2人。倾斜摄影测量节省了超过60%的外业时间。内业建模和断面提取耗时3天,但此期间人员可并行处理其他任务。综合计算,总成本节约约40%,且获得了价值高得多的实景三维模型数据资产。

### 结论

本研究经理论剖析与工程案例验证得出:在建筑和植被稀疏的市政道路勘测中,倾斜摄影测量技术优势显著。它作业效率高、数据维度丰富、可回溯性强且经济效

益好,高程中误差优于5厘米,满足国家标准精度要求。

在此场景下,它能全面替代传统GNSS-RTK测量方式用于断面测量与地形图测绘。这不仅是技术升级,更是生产模式革命,推动勘测行业转型。未来,随着技术进步和标准完善,该技术将在市政基建全生命周期中发挥核心作用,为“数字中国”“智慧城市”筑牢数据基石。

### 参考文献

- [1]张祖勋,张剑清.数字摄影测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2007.
- [2]李德仁,李明.无人机倾斜摄影测量实景三维建模与应用[J].测绘学报,2014,43(3):217-224.
- [3]中华人民共和国住房和城乡建设部.CJJ/T8-2011城市测量规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [4]中华人民共和国交通运输部.JTGC10-2007公路勘测规范[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [5]李广云,王力,姚继锋.倾斜摄影测量技术在线状工程测量中的应用研究[J].测绘通报,2018(5):76-80.
- [6]郭宝宇,李欣,谢宏全.无人机倾斜摄影测量在公路勘测设计中的应用[J].测绘科学,2019,44(6):116-121.