

水利工程测绘中无人机倾斜摄影技术的精度提升路径研究

徐万顺

宁夏河海工程咨询管理有限公司 宁夏银川 756500

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16070

[摘要] 无人机倾斜摄影技术已成为水利工程测绘的重要手段之一，其在提高数据获取效率与空间精度方面展现出显著优势。当前测绘实践中仍存在精度受限、影像畸变和数据处理复杂等问题。本文围绕精度提升路径展开研究，综合分析影响倾斜摄影精度的关键因素，提出优化飞行参数配置、改进影像处理算法与引入高精度控制点等方法，并结合典型工程案例进行验证，为提升水利工程测绘精度提供理论基础与实践参考。

[关键词] 无人机倾斜摄影；水利工程；测绘精度；控制点布设；影像处理

引言：

无人机倾斜摄影因其灵活高效、视角丰富等特点，正逐步取代传统测绘手段，广泛应用于水利工程测绘之中。由于地形复杂、水域反光以及设备参数差异等因素，测绘成果的精度仍面临诸多挑战。精度关系到测绘数据的可靠性，也直接影响到水利工程设计与管理的科学性。本文聚焦于如何系统提升倾斜摄影技术在水利工程中的测绘精度，探索一条从技术、流程到应用全方位优化的路径。

一、水利工程测绘中倾斜摄影技术的应用现状与挑战

在当前水利工程测绘实践中，无人机倾斜摄影技术凭借其独特的多视角成像能力和高效的空信息获取方式，逐渐成为主流测绘手段。相比传统的地面测量或单镜头航测，倾斜摄影能够在一次飞行中获取目标区域多个方向的影像数据，特别适用于水利枢纽、大型渠道、蓄水池等结构复杂、地形起伏较大的工程区域。集成 GNSS/IMU 定位系统与高分辨率相机，倾斜摄影在短时间内完成大面积数据采集，并能快速生成真实感强、三维细节丰富的实景模型，为水利工程的设计、施工和管理提供精准的地理信息支撑。

尽管技术发展迅速，倾斜摄影在实际应用中仍存在一系列制约精度提升的因素。飞行环境的不确定性，如强风干扰、水体反光、光照不均等，对图像匹配与三维建模带来挑战。水利工程区域通常地物复杂、水面面积大，水面对可见光的强反射会导致影像曝光过度或纹理丢失，从而影响空三加密与模型重建的准确性。影像畸变矫正、姿态角误差、相机标

定不准确等因素也会引入系统误差。在地面控制点 (GCP) 数量不足或布设不合理的情况下，倾斜摄影生成的模型精度难以达到工程级测绘标准。这些问题在高精度需求的水利工程中尤为突出，需要从数据采集到后期处理全流程加以优化。

当前的技术瓶颈也反映在数据处理的算法层面。由于倾斜摄影所获取的是多视角、多倾斜角度的影像，传统的单目影像处理算法在特征提取与匹配方面面临精度与效率的双重挑战。面对不同尺度和纹理复杂度的地物，常规匹配算法容易出现误匹配、错解问题，进而影响模型整体的空间几何精度。在大范围工程区域的数据处理中，点云融合、纹理重建和三维网格生成等环节对软硬件算力提出更高要求。缺乏适用于水利场景的专用优化算法，使得数据后处理流程冗长，且最终成果质量易受干扰。无人机倾斜摄影虽已广泛应用于水利工程测绘，但其在精度保障方面仍需从软硬件配置、外业作业流程、控制点布设及算法优化等多维度进行系统性提升。

二、影响无人机倾斜摄影精度的关键因素分析

无人机倾斜摄影技术的测绘精度受多种复杂因素共同影响，尤其在水利工程这一高精度、高复杂度的应用场景下，任何一个环节出现偏差都可能导致模型成果误差累积。飞行平台稳定性是影响精度的首要前提。无人机在飞行过程中受风速、气压、飞控系统精度等因素干扰，容易导致相机姿态角变化频繁，进而影响影像重叠率和空三加密的稳定性。倾斜摄影通常依赖五镜头或多镜头系统进行多角度采集，相机

间的时间同步、几何校准、焦距一致性等参数必须高度统一,否则会造成影像投影误差,加大模型扭曲风险。GNSS/IMU系统的精度直接决定外方位元素的计算质量,低精度或漂移严重的定位数据将直接影响空中三角测量精度,最终体现在正射影像图(DOM)和三维实景模型(3D模型)的空间坐标误差上。

地面控制点的布设质量在整体精度控制中起到决定性作用。倾斜摄影虽具有一定的空三自约束能力,但在高精度测绘中仍离不开合理布设的GCP。控制点的数量、分布密度、布设位置及测量精度均直接影响模型的整体几何纠正效果。在水利工程环境中,受限于现场条件复杂,如水面区域无法设置实物控制点、部分区域视线遮挡严重,导致控制点分布不均或缺失,空三解算中无法形成稳定的几何网络。即便部分区域控制点布设充足,如其测量精度达不到RTK或全站仪级别,也会在平差过程中引入系统误差,影响最终成果的可靠性。误将地物变化区作为控制点区域、或采用非持久性标志点,也会对多期数据精度统一性构成挑战,增加模型变形风险。

后期数据处理流程中的影像匹配算法与三维重建技术也是影响倾斜摄影精度的关键技术环节。当前主流的SfM(结构光恢复)与MVS(多视图立体重建)算法多基于纹理特征进行图像配准,对于影像纹理单一或重复图案较多的水体区域识别能力有限,容易出现匹配失败或误匹配问题。在大尺度水利工程项目中,不同高差区域间影像融合难度较大,空三加密精度下降。倾斜摄影模型通常需融合多视角影像与点云数据,在点云滤波、稀疏重建、密集重建等阶段若缺乏精细化参数调整,将影响模型密度与细节还原能力。数据处理软件的算法优化程度、自动化程度和误差控制策略,对最终模型的精度与实用性构成直接影响。因此,无人机倾斜摄影在水利工程测绘中的高精度实现,需从飞行平台、定位系统、控制点布设到后期算法处理形成完整闭环,才能确保数据成果满足工程需求。

三、提升倾斜摄影测绘精度的技术路径与方法

提升无人机倾斜摄影在水利工程测绘中的精度,需从系统设计、外业操作到数据处理各个环节进行技术性优化。飞行参数配置是确保数据基础质量的关键,包括飞行高度、航

向重叠度、旁向重叠度及倾斜角度的科学设定。适当降低飞行高度可以提升图像分辨率,但应提高重叠度来保障图像匹配稳定性。高精度IMU与RTK/PPK一体化导航系统的应用,可显著提升影像外方位元素的精确度,降低对控制点依赖,保障空三加密结果的空间一致性。经过多传感器融合技术,将可见光与多光谱、激光雷达等数据进行互补采集,也能增强三维建模的完整性与精度控制。

在实际作业中,地面控制点与检查点的科学布设仍是提升测绘精度不可或缺的重要手段。点位应分布均匀、覆盖测区边界及中央区域,应避开水面、阴影区等不稳定区域。控制点需使用高精度GNSS RTK设备测量,其平面和高程误差应控制在厘米级以内,以确保其能在空三解算中发挥约束作用。当测区受限于布点条件时,可采用视觉辅助定位技术或构建虚拟控制点作为补充,以增强模型几何网络的稳定性。在多期测绘任务中,建议采用稳定标志物作为永久控制点,配合时间序列影像分析,实现多时相数据的统一配准,保证数据的可比性与更新精度。

后处理流程中,倾斜摄影影像的数据解译与三维重建算法是控制精度的核心技术路径。需采用针对倾斜影像优化的SfM-MVS算法框架,提升特征点提取的准确率与密集匹配的稳定性。引入深度学习图像增强与特征识别模型,可进一步提升低纹理区域的匹配效果,有效应对水利工程中常见的反光水体、光影变换等问题。在点云处理阶段,运用噪声滤除、误差校正与多源数据融合策略,有助于提升模型表面拟合精度。在网格重建与纹理映射环节,应依据实际地物特性选取最优重建参数,避免过度简化或错误拟合。整体上,经过多技术融合与流程优化构建一套适应水利工程场景的倾斜摄影精度提升解决方案,能够有效满足高精度、高效率的测绘需求。

四、高精度控制点布设在测绘精度提升中的作用研究

高精度控制点的布设在无人机倾斜摄影测绘中起着至关重要的作用,尤其在水利工程这样对空间定位精度要求极高的场景下,其关键性更加凸显。控制点作为空中三角测量的约束基础,直接影响影像的空间配准效果,还决定了后续正射影像图与三维模型的整体几何精度。高精度控制点通常经过GNSS RTK或静态测量方式获取,其三维坐标精度可控制在厘米级甚至亚厘米级,从而为影像重建提供坚实的地面参考

系。在倾斜摄影过程中,五镜头系统获取的多视角影像需要依托这些控制点进行误差调整和配准校正,否则即使影像重叠度高、质量良好,模型仍会出现整体偏移、旋转甚至局部扭曲现象。

在水利工程复杂地形中进行高精度控制点布设,需要充分考虑点位的空间分布与地物条件的适应性。合理的控制点应覆盖测区的边缘、中心、高差变化区域以及关键结构物所在位置,并尽可能形成空间均衡分布,以增强空三平差解的稳定性与精度可靠性。点位布设不宜过密或集中,否则会导致几何网络冗余且约束力分布不均,反而影响最终成果一致性。在大面积水面区域,传统控制点难以布设,可借助水上浮标定位系统、岸边延伸点法或无人船测点方式替代,保障整个区域的精度控制连续性。在多时相测绘任务中,建议采用永久性控制点进行标记与保护,配合时间序列分析技术,实现数据间的一致配准,提高工程监测中的动态变化精度判别能力。

高精度控制点在数据处理阶段也发挥着重要的模型纠偏与精度评估功能。空三加密中,控制点引导影像的投影位置与姿态参数拟合,可有效减少系统误差与非线性变形。在精度评定中,将部分控制点作为独立检查点使用,可客观反映模型的实际几何精度水平,为工程验收与质量评估提供数据支撑。调整控制点权重与数量,可以实现对不同精度等级成果的控制与适配,特别是在需提交工程级测绘产品(如1:500比例尺DOM或三维管网模型)时,更需严格遵循相关规范要求与控制点设计与使用。综上,控制点是倾斜摄影测绘精度提升的核心手段,更是实现高可靠性水利工程空间信息表达的重要基础,必须在实际应用中予以科学规划与精细化实施。

五、典型水利工程案例验证与路径优化建议

在某水库扩容与坝体加固工程中,应用无人机倾斜摄影技术开展测绘作业,布设高精度地面控制点、优化飞行参数及选用专业数据处理软件,实现了对坝体结构、溢洪道、围堰等关键部位的三维高精度建模。项目采用五镜头倾斜摄影系统,飞行高度为120米,航向重叠度达到85%,旁向重叠度80%,控制点利用GNSS RTK进行精确测量并均匀布设于测区边缘与核心区。影像数据空三加密与稠密点云生

成,获得了高分辨率DOM与三维模型,验证平面精度达5cm以内,高程精度控制在7cm以内,完全满足1:500比例尺测图标准,为后续坝体结构安全评估与施工部署提供了精准的数据支撑。

在实际作业过程中也暴露出部分精度控制难点,为优化倾斜摄影技术的应用路径提供了现实依据。在库区周边水面反光较强区域,部分影像出现纹理模糊,影响了特征匹配与点云质量。为解决此问题,项目组引入多时相航拍策略,选择不同时间段光照条件进行多批次影像采集,影像融合提升低纹理区域的重建能力。增加边界区域的控制点密度,并利用人工检查点进行辅助验证,有效控制了边界变形。在数据处理阶段,引入基于深度学习的影像特征增强模块,提升了复杂地物区域的三维重建质量。案例表明,针对不同地貌特征与环境因素,采用差异化采集策略与多源数据融合技术,能够显著优化倾斜摄影精度表现。

结语:

本文围绕水利工程测绘中无人机倾斜摄影技术的精度提升路径进行了系统探讨,明确了该技术在提升测绘效率与空间表达能力方面的重要价值。分析影响测绘精度的关键因素,提出了包括高精度控制点布设、飞行参数优化、多源数据融合与算法改进等在内的综合技术路径。结合典型水利工程案例的实践验证,进一步印证了上述方法在提升三维模型精度与实用性方面的可行性与有效性。未来应加强软硬件系统协同优化,不断拓展倾斜摄影技术在复杂水利场景下的精度控制与智能化应用能力。

[参考文献]

- [1]李强,王伟.无人机倾斜摄影测量精度分析与优化[J].测绘与空间地理信息,2021,44(6):83-86.
- [2]陈涛,朱敏.倾斜摄影在水利工程测绘中的应用研究[J].水利科技与经济,2020,26(5):45-48.
- [3]杨磊,高峰.基于高精度控制点的倾斜摄影测量精度控制方法[J].测绘科学,2022,47(2):101-105.
- [4]刘晨,胡斌.多视角倾斜影像三维重建精度影响因素分析[J].测绘工程,2019,28(3):72-75.
- [5]孙杰,马超.倾斜摄影测量在大范围水利工程中的应用与问题分析[J].中国水利,2023,34(8):112-116.