

# 水利工程监理中无人机巡检技术的适用性及精度优化研究

张 龙

新疆昆仑工程咨询管理集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘 要：**本文聚焦水利工程监理中无人机巡检技术，先分析其技术原理及与水利工程监理需求的适配性优势，接着从适用场景、技术可行性、经济性与效率方面评估适用性。随后识别精度误差源并分类，包括硬件、软件、环境与操作误差。最后提出硬件优化、软件算法改进、巡检流程标准化、误差补偿与后处理等精度优化策略，为水利工程监理中无人机巡检技术的精准应用提供参考。

**关键词：**水利工程监理；无人机巡检；适用性分析；精度优化

引言：水利工程监理对保障工程质量、进度与安全意义重大，传统巡检方式存在效率低、覆盖范围有限等问题。随着科技发展，无人机巡检技术凭借其独特优势，逐渐在水利工程监理领域崭露头角，其融合多学科技术，能高效立体监测目标区域。深入研究无人机巡检技术在水利工程监理中的适用性及精度优化策略，对提升监理水平、推动水利工程高质量发展具有关键作用。

## 1 无人机巡检技术基础与水利工程监理需求分析

### 1.1 无人机巡检技术原理

无人机巡检技术以无人驾驶飞行器为核心载体，集成全球定位系统、惯性导航系统、高清摄像设备、红外热成像仪等多模块组件，通过地面控制系统实现自主或半自主飞行作业。其工作流程涵盖航线规划、升空采集、数据传输、终端处理四大环节，其中航线规划模块依据预设坐标点生成最优飞行路径，确保覆盖目标区域无遗漏；飞行过程中，定位系统实时反馈位置信息，误差控制在厘米级；搭载设备按设定频率采集图像、视频及环境参数，数据经4G/5G或卫星链路传输至地面终端；终端通过专业软件进行图像拼接、三维建模及特征识别，将原始数据转化为可直接用于分析的成果<sup>[1]</sup>。

### 1.2 水利工程监理核心任务与巡检需求

水利工程监理核心任务包括施工质量管控、进度跟踪、安全隐患排查及工程资料核验，其中巡检是落实各项任务的关键手段。质量管控需核查堤坝、渠道、闸门等结构尺寸偏差、混凝土强度及表面缺陷；进度跟踪要实时掌握施工部位完成量与计划的匹配度；安全排查需识别边坡滑塌、裂缝扩张、渗漏等隐患；资料核验则要求巡检数据与施工记录一致性核对。传统巡检存在诸多局限，堤坝背水坡、渠道深挖段等区域人工难以抵达，

徒步巡检效率低下，单日仅能覆盖1-2公里范围；人工记录易出现数据遗漏或误差，且无法快速生成可视化成果。监理工作需高频次、全方位、高精度的巡检数据支撑，以实现对工程全生命周期的有效管控。

### 1.3 无人机技术的适配性优势

无人机技术在水利工程监理中的适配性优势体现在覆盖范围、作业效率、数据质量等多方面。覆盖范围上，无人机可突破地形限制，轻松抵达堤坝边坡、水库深处、渠道高陡段等人工巡检盲区，实现对工程全域无死角覆盖，尤其适用于大型水库、长距离渠道等跨度大的工程。作业效率方面，搭载高清设备的无人机每小时可巡检5-8公里，是人工巡检效率的5-8倍，且可全天候作业，不受恶劣天气影响，大幅缩短巡检周期。数据质量上，无人机搭载的专业设备可采集高清图像、红外数据及三维坐标信息，分辨率可达0.1米，能精准捕捉0.2毫米以上的裂缝缺陷；数据实时传输至终端后，可快速生成三维模型、缺陷标注图等成果，为监理决策提供直观依据。

## 2 水利工程监理中无人机巡检适用性评估

### 2.1 适用场景分类与需求匹配

水利工程监理中无人机巡检适用场景可按工程类型及监理阶段分类，不同场景与巡检需求高度匹配。按工程类型划分，水库工程适用于坝体表面缺陷巡检、库区岸坡稳定性监测及水位线变化跟踪，可精准捕捉坝体裂缝、渗漏点及岸坡滑塌迹象，匹配质量与安全监理需求；渠道工程适用于渠堤压实度核查、衬砌平整度检测及交叉建筑物衔接质量检查，通过三维建模对比设计尺寸，满足施工质量管控需求；水闸工程可聚焦闸门结构变形、启闭设备运行状态及周边防渗设施完好性巡检，

结合红外成像检测设备发热异常,契合安全监理要求<sup>[2]</sup>。按监理阶段划分,施工阶段可跟踪作业面进度、核查工序质量;验收阶段可全面采集工程实体数据与设计图纸比对;运维阶段可定期监测结构老化及隐患发展,各场景均能精准匹配对应监理环节的核心需求。

## 2.2 技术可行性分析

无人机巡检在水利工程监理中的技术可行性已通过多项工程实践验证。硬件层面,现有工业级无人机续航时间可达2-4小时,搭载燃油动力的机型续航更久,可满足大型水利工程长距离巡检需求;负载能力提升至5-20公斤,能同时搭载高清相机、红外热像仪、激光雷达等多设备,实现多维度数据采集。定位技术方面,差分全球定位系统结合惯性导航系统,可将飞行定位误差控制在2-5厘米,满足工程测量级精度要求;部分高端机型配备视觉导航模块,在卫星信号弱的库区峡谷等区域仍能稳定飞行。数据处理技术成熟,专业软件可在1-2小时内完成10平方公里区域的图像拼接,生成三维点云模型及正射影像图,自动识别裂缝、沉降等缺陷,识别准确率达90%以上。

## 2.3 经济性与效率对比

无人机巡检在水利工程监理中,较传统巡检优势显著。效率上,传统人工巡检10公里渠道工程,需3-5人组成小组,耗时2-3天完成全覆盖,后期整理数据、绘制图表,整个流程要5-7天;无人机巡检仅需1名操作人员和1台无人机,单日可完成巡检,数据自动处理生成成果,整体流程压缩至1-2天,综合效率提升5-7倍。经济性上,人工巡检10公里渠道单次人工成本约4500-7500元,全年达5.4-9万元;无人机巡检初期投入15-20万元,年均成本3-4万元,较传统年均节省2.4-5万元,长期应用经济性更优。

## 3 水利工程监理中无人机巡检精度误差源识别与分类

### 3.1 硬件误差

硬件误差是无人机巡检精度的基础影响因素,主要源于核心设备的性能局限与装配偏差。定位模块误差表现为全球定位系统接收机的噪声误差,常温环境下民用接收机噪声误差约0.5-1米,差分定位模式下虽可降低,但受卫星信号强度影响仍存在0.1-0.3米波动;惯性导航系统的漂移误差随飞行时间累积,连续飞行1小时后漂移误差可达0.5-1米。成像设备误差包括镜头畸变与传感器分辨率限制,广角镜头易产生桶形畸变,边缘区域畸变误差达2%-5%,导致拍摄目标尺寸测量偏差;传感器像素不足会降低图像清晰度,当拍摄距离超过50米时,1200万像素相机难以清晰捕捉0.2毫米以下裂缝,造成缺陷识

别误差。动力系统误差表现为螺旋桨转速不稳定导致的飞行姿态波动,转速波动幅度超过5%时,无人机易出现上下抖动,使拍摄角度偏移1-3度,影响三维建模的坐标精度<sup>[3]</sup>。

### 3.2 软件误差

软件误差贯穿数据处理全流程,由算法缺陷与参数设置不合理引发。航线规划软件误差体现在路径生成算法的坐标转换偏差,采用不同坐标系转换时,若参数校正不精准,易产生0.3-0.5米的位置偏移,导致部分区域漏检或重复巡检。图像拼接软件误差表现为特征点匹配算法的误匹配问题,当巡检区域存在大量相似纹理(如混凝土坝面)时,特征点误匹配率可达5%-8%,造成拼接处出现明显错位,三维建模误差增加0.2-0.4米。缺陷识别软件误差源于机器学习模型的训练偏差,模型对少见缺陷(如细微渗漏)的识别准确率不足70%,易出现漏判;阈值设置不当会导致裂缝宽度测量误差,阈值偏高时会将窄裂缝误判为正常,阈值偏低则会产生虚假缺陷标注。数据后处理软件的坐标校正算法若未结合现场控制点,会使最终成果精度降低10%-15%。

### 3.3 环境与操作误差

环境与操作误差受外部条件及人员技能影响,具有较强随机性。环境误差中,风力影响最为显著,3-5级风力会使无人机产生0.5-1米的横向偏移,导致拍摄位置偏离预设航线,图像重叠度不足;强光照条件下会产生反光现象,使混凝土表面裂缝难以识别,阴雨天则会降低图像对比度,缺陷特征模糊。温度变化会影响硬件性能,高温环境下电池续航缩短10%-20%,可能导致巡检中断;低温环境下传感器灵敏度下降,测量精度降低5%-8%。操作误差包括起飞前参数设置与飞行中操控偏差,参数设置时若未校准气压高度,会产生0.2-0.3米的高度误差;飞行中手动操控干预过多,易导致飞行姿态不稳定,拍摄角度波动超过3度,影响数据一致性。

## 4 水利工程监理中无人机巡检精度优化策略研究

### 4.1 硬件优化方案

硬件优化通过设备升级与配置调整提升基础精度,针对核心误差源制定靶向方案。定位系统优化采用“差分全球定位系统+实时动态定位”双模式配置,选用工业级高精度接收机,将噪声误差控制在0.1米以内,同时配备多频天线增强卫星信号接收能力,在峡谷等信号薄弱区域仍能保持定位稳定性;惯性导航系统选用光纤惯性测量单元,将漂移误差降低至每小时0.1-0.2米,减少长时间飞行的误差累积。成像设备优化更换为低畸变工业镜头,畸变率控制在1%以下,配备2000万像素以上CMOS

传感器,提升远距离拍摄清晰度,50米距离可清晰捕捉0.1毫米裂缝;针对特殊场景加装激光雷达设备,通过点云数据补充光学成像不足,提升三维建模精度。动力系统优化采用无刷电机搭配高精度调速器,将转速波动幅度控制在2%以内,配备冗余动力模块,确保飞行姿态稳定,减少拍摄角度偏移。

#### 4.2 软件算法改进

软件算法改进聚焦数据处理各环节,通过技术升级降低算法层面误差。航线规划算法引入自适应路径生成技术,结合工程地形数据自动调整飞行高度与速度,采用WGS84与地方坐标系双校准模式,坐标转换误差控制在0.1米以内;增加避障算法优化,通过实时环境感知调整航线,避免漏检与重复巡检。图像拼接算法采用深度学习特征点匹配模型,针对水利工程纹理特征优化训练数据集,误匹配率降低至2%以下;引入全景拼接融合技术,消除拼接处错位,三维建模误差缩小至0.1-0.2米。缺陷识别算法构建多特征融合识别模型,整合灰度、纹理、形状等特征,对细微渗漏等少见缺陷识别准确率提升至85%以上;采用动态阈值调整技术,根据拍摄环境自动优化参数,裂缝宽度测量误差控制在0.05毫米以内。数据后处理算法增加多源数据融合模块,结合现场控制点与激光雷达数据进行联合校正,提升成果精度15%-20%。

#### 4.3 巡检流程标准化

巡检流程标准化通过规范操作环节减少人为误差,形成全流程质量管控体系。前期准备阶段制定设备核查清单,每次巡检前检查无人机电池容量、定位模块信号、成像设备参数,确保设备性能达标;根据工程类型编制专项巡检方案,明确巡检范围、飞行高度、拍摄重叠度等关键参数,水库工程飞行高度控制在50-80米,图像重叠度不低于80%。飞行作业阶段执行“双人操作”制度,一人负责操控飞行,一人负责数据监测,严格按照预设航线飞行,避免随意调整姿态;实时记录飞行过程中的环境数据,包括风力、温度、光照强度,为后期误差分析提供依据<sup>[4]</sup>。数据处理阶段建立三级审核机制,一级审核检查数据完整性,二级审核校验建模精度,三级审核评估缺陷识别结果;明确数据归档标准,将巡检报

告、原始数据、成果图件分类存档,确保可追溯性。后期反馈阶段建立误差分析台账,定期总结巡检数据与人工复核结果的偏差,持续优化流程参数。

#### 4.4 误差补偿与后处理技术

误差补偿技术针对不同误差源制定专项补偿模型,硬件误差采用实时校准补偿,通过传感器数据反馈动态修正定位与成像误差,定位模块每10秒自动校准一次,成像设备根据拍摄距离调整焦距补偿;软件误差采用算法补偿,在数据处理中引入误差修正因子,结合历史数据建立误差预测模型,提前补偿系统偏差。后处理技术采用多维度数据校正方法,结合地面控制点进行坐标校正,每个巡检区域至少布设3个控制点,确保校正精度;利用激光雷达点云数据与光学图像融合处理,弥补单一数据类型不足,提升三维建模的细节还原度。针对环境误差开发自适应修正模块,根据风力、光照等环境参数调整数据处理算法,风力超过3级时启用风场误差修正模型,降低飞行偏移影响;建立误差数据库,整合不同工程、不同环境下的误差数据,通过机器学习优化补偿参数,使整体巡检精度提升25%-30%。

#### 结束语

水利工程监理中无人机巡检技术展现出显著优势与广阔前景。通过对其适用性的系统评估,明确了其在不同工程类型与监理阶段的适用场景。精准识别精度误差源并针对性提出优化策略,有效提升了巡检精度。未来,随着技术持续进步,无人机巡检有望在水利工程监理中发挥更大作用,为水利工程建设与运维提供更可靠、高效的技术支撑。

#### 参考文献

- [1]朱义刚,杨帆,陈功,等.水利工程监理中无人机技术应用的研究[J].水上安全,2025(18):13-15.
- [2]许小斌,杨有宏,杨康,等."BIM+"在水利工程监理中的应用方案研究[J].价值工程,2024,43(27):102-105.
- [3]王磊.数字化技术在水利工程监理中的作用与前景[J].中文信息,2024(10):82-83.
- [4]严来升.倾斜摄影测量在水利工程中的应用与展望[J].空中美语,2021(7):877-878.