

无人机巡检与AI图像识别在黄河水利工程安全评估中的应用

苏峰

滨州黄河河务局 山东 滨州 256600

摘要:黄河水利工程作为流域防洪减灾、调控水资源的核心设施,其安全关乎沿岸数亿群众生命财产。因黄河水沙复杂、工程分布广,传统人工巡检效率低、精度欠佳、覆盖不足。本文提出无人机巡检与AI图像识别融合的安全评估方案,用工业级无人机搭载多传感器采全域数据,结合改进YOLO模型精准识别病害,构建一体化体系。实践显示,该方案在堤防段应用成效显著,能早发现、处置隐患,为安全管理提供高效支撑。

关键词:无人机巡检;AI图像识别;黄河水利工程;安全评估

引言:黄河水利工程作为流域防洪减灾、调控水资源的核心设施,其安全状况直接关系到沿岸数亿群众的生命财产安全。在此背景下,本文聚焦无人机巡检与AI图像识别技术的融合应用,提出一套针对黄河水利工程的安全评估创新方案,旨在通过技术赋能破解传统模式的瓶颈,为工程安全管理提供高效、智能的新路径。

1 无人机巡检与AI图像识别技术概述

1.1 无人机巡检技术

无人机巡检依托工业级飞行平台,实现水利工程立体化监测,突破人工巡检限制。黄河水利工程所用无人机多为多旋翼或固定翼,载荷5至20公斤,可搭载多种传感器。采用预设航线与实时遥控结合飞行,能完成不同场景巡检,飞行高度灵活,低可至5米捕捉细节,高可至50米全域覆盖。数据传输用4G/5G与卫星通信双备份,恶劣天气也能实时回传。相比人工巡检,续60至90分钟,单架次可完成10公里堤防全覆盖,大幅提升作业效率。

1.2 AI图像识别技术

AI图像识别技术以深度学习算法为核心,通过对水利工程图像数据的特征提取与模式匹配实现病害自动识别。针对黄河水利工程场景,主流采用基于YOLO系列的改进模型,通过引入坐标注意力机制强化裂缝、渗漏等细长型病害的特征捕捉能力。技术流程涵盖数据预处理、模型训练与推理应用三个阶段,数据预处理阶段通过高斯滤波去噪、图像增强等操作提升风沙、逆光环境下的图像质量;模型训练阶段利用黄河工程历史病害图像数据集,通过迁移学习与增量训练优化参数,解决病害样本不平衡问题;推理应用阶段则实现病害的实时定位、分类与量化分析,可自动计算裂缝长度、渗漏面积等关键参数,输出精度达厘米级。该技术摆脱人工判读

的主观依赖,实现病害识别的标准化与自动化^[1]。

1.3 技术融合优势

无人机巡检与AI图像识别的技术融合,构建起“数据采集-智能分析”的闭环体系,形成1+1大于2的应用效果。无人机的立体化采集能力为AI模型提供海量、多元的数据源,高清可见光图像捕捉工程表面缺陷,红外热像仪精准识别隐蔽渗漏区域,激光雷达数据则支撑三维建模与沉降量测算,多源数据融合提升AI识别的全面性。AI技术则为无人机巡检数据赋予智能分析能力,将原本需要人工逐图判读的海量数据转化为结构化的病害信息,自动生成包含病害位置、类型、严重程度的分析报告,避免人工漏检问题。融合应用实现巡检流程的全程自动化,从飞行规划、数据采集到病害识别、结果输出无需人工干预,同时通过定期巡检数据的对比分析,可实现病害发展趋势的动态追踪,为工程安全评估提供全周期数据支撑。

2 黄河水利工程安全评估需求分析

2.1 黄河水利工程类型与典型病害

黄河水利工程体系庞大,主要涵盖堤防、涵闸、泵站、分洪工程等类型,不同工程因结构特性与功能需求,面临的典型病害存在显著差异。堤防作为黄河防洪的第一道防线,长期受水流冲刷、泥沙淤积与冻融循环影响,易出现纵向裂缝、横向裂缝、龟纹裂等裂缝类病害,以及管涌、流土、散浸等渗漏类病害,部分老堤段还存在不均匀沉降与塌陷问题。涵闸工程作为水量调控的关键设施,常见病害包括闸门变形、止水带破损、闸室混凝土裂缝,以及启闭设备锈蚀、地基渗漏等,这些病害直接影响闸门密封性与操作安全性。泵站工程则以电机设备故障、混凝土基座裂缝、进水流道淤积为主要

隐患。这些病害若未及时发现处理,可能引发工程结构失稳,甚至导致溃堤、决闸等严重事故,因此精准识别各类病害是安全评估的核心需求。

2.2 安全评估指标体系

黄河水利工程安全评估指标体系需结合工程类型、结构特性与运行环境,构建多维度、可量化的评价标准。核心指标包括病害特征指标、结构安全指标、运行状态指标与环境影响指标四大类。病害特征指标聚焦病害本身属性,涵盖类型、数量、分布密度、严重程度等,如裂缝按长度分为轻微(<1 米)、一般(1-5米)、严重(>5 米)三个等级;结构安全指标基于工程力学特性设定,包括堤防抗滑稳定性、涵闸承载能力、混凝土强度等;运行状态指标关注工程功能发挥,如闸门启闭灵活性、泵站出水量达标率;环境影响指标则考虑黄河特殊环境,包括水沙含量、水流冲刷强度、冻融循环频率等^[2]。各指标按重要性赋予权重,其中病害严重程度与结构安全指标权重占比超60%,确保评估结果聚焦核心安全风险。

3 传统评估方法的局限性

3.1 人工检测覆盖范围有限

传统人工检测模式以徒步巡检与仪器测量为主要手段,受自然环境与工程规模限制,覆盖范围存在明显短板。黄河下游堤防总长度超1400公里,部分堤段穿越沙漠、滩区等偏远区域,交通条件极差,人工徒步巡检每日仅能完成2至3公里,全段巡检需投入大量人力与时间。对于涵闸内部、堤防陡坡等特殊区域,人工难以抵达,只能通过望远镜观察,无法实现近距离检测,导致隐蔽区域成为评估盲区。在汛期或暴雨等恶劣天气下,为保障人员安全,人工巡检往往被迫中断,无法及时掌握工程病害发展情况。这种有限的覆盖能力,使得传统方法难以实现工程全域、全时段的安全监测,易出现病害漏查问题。

3.2 主观判断导致结果偏差

传统评估方法高度依赖检测人员的经验与专业能力,主观判断易导致评估结果出现显著偏差。病害识别方面,不同检测人员对裂缝宽度、渗漏程度的判断标准存在差异,部分细微病害可能因经验不足被忽略,而相似外观的非病害区域可能被误判为隐患。数据记录环节以人工手写或拍照存档为主,缺乏标准化记录规范,同一病害的描述可能出现差异,影响后续评估分析的准确性。评估结论输出阶段,基于经验的定性判断多于量化分析,如“裂缝较严重”“渗漏需关注”等模糊表述,难以精准反映工程安全状态。这种主观性偏差使得不同

批次、不同人员的评估结果缺乏可比性,无法为工程安全管理提供一致、可靠的决策依据。

3.3 难以实现动态监测与趋势分析

传统评估方法以定期巡检为主要形式,检测周期通常为每月或每季度一次,属于典型的“静态快照式”评估,难以满足工程病害动态发展的监测需求。黄河水利工程病害多呈现渐进式发展特征,如裂缝可能从细微状态在短期内因水流冲刷迅速扩展,而传统定期巡检无法捕捉这种动态变化过程,只能发现已发展到一定程度的病害,错失早期处置时机。趋势分析方面,传统方法的评估数据分散存储于纸质档案或独立电子文档中,缺乏系统化的数据管理与分析工具,难以对不同时期的病害数据进行有效对比,无法精准判断病害发展速率与演变规律。这种静态评估模式使得工程安全管理始终处于“被动应对”状态,难以实现基于趋势预测的主动防控^[3]。

4 黄河水利工程安全评估体系与一体化系统构建

4.1 安全评估指标体系设计

基于无人机与AI技术的安全评估指标体系,在传统指标基础上强化量化性与关联性,形成“核心指标+辅助指标”的层级结构。核心指标聚焦AI技术可精准识别的关键风险点,包括裂缝(长度、宽度、走向)、渗漏(面积、位置、水温差异)、沉降(沉降量、沉降速率)、结构变形(变形量、变形区域)等,均设定明确的量化标准与阈值范围。辅助指标涵盖工程基础信息与环境数据,如工程建设年限、结构类型、历史病害记录、近期水文条件等,为核心指标评估提供背景支撑。指标权重采用层次分析法与熵权法结合确定,通过专家打分与数据客观分析双重保障权重合理性,其中裂缝宽度、渗漏面积等可直接量化的核心指标权重占比达70%,确保评估结果聚焦技术可验证的安全风险,同时兼顾工程实际情况与环境影响因素。

4.2 安全评估模型开发

安全评估模型采用“病害识别结果-指标量化评分-综合风险评级”的三级架构,实现从数据到结论的智能化转化。第一级为病害识别模块,通过改进YOLOv8模型输出各类病害的位置、类型与量化参数,自动匹配对应指标评分标准;第二级为指标评分模块,采用模糊综合评价法,结合指标权重计算单指标得分与子系统得分,如堤防工程子系统包含结构安全、病害状态两个子模块;第三级为风险评级模块,基于综合得分将工程安全状态划分为四级:安全(85分以上)、关注(70-85分)、预警(50-70分)、危险(50分以下),并针对不同等级输出明确的处置建议。模型融入工程力学机理与历史灾害

数据,通过机器学习优化评分规则,确保评估结果既符合技术标准,又贴合黄河工程实际风险特征。

4.3 一体化系统集成

一体化系统采用“无人机端+边缘计算端+云端平台”的三级架构,实现巡检与评估全流程无缝衔接。无人机端负责按预设航线完成多源数据采集,通过机载边缘计算模块实现初步数据预处理与实时病害检测,确保紧急隐患可即时反馈;云端平台作为核心枢纽,集成数据管理、模型推理、评估分析、可视化展示四大功能。数据管理模块实现无人机采集数据与历史工程数据的统一存储与分类管理;模型推理模块部署改进后的AI识别与评估模型,支持批量数据处理与实时推理;评估分析模块自动生成评估报告与病害发展趋势图;可视化展示模块通过三维地图直观呈现工程全貌与病害分布,支持管理人员快速定位风险区域^[4]。系统预留与黄河水利工程管理信息系统的数据接口,实现评估结果与日常管理工作的深度融合,提升决策支撑的实用性。

5 案例验证与应用成效分析

5.1 案例区域概况

选取黄河下游某重点堤防段作为验证案例,该堤防段全长18公里,建成于1996年,2012年进行过加固改造,主要承担防洪与输水双重功能。区域内包含2座中型涵闸,堤段穿越滩区与城郊结合部,部分区域因水流冲刷形成陡岸,历史上曾发生过局部散浸与裂缝病害,传统人工巡检需投入8人/组,每月巡检一次,单次耗时约7天,存在3处涵闸内部及2处陡坡区域难以全面检测的问题。

5.2 应用实施过程

采用载荷12公斤的六旋翼工业无人机,搭载2000万像素可见光相机、高清红外热像仪及激光雷达,按“迎水坡-堤顶-背水坡-涵闸”分区规划航线,堤防段飞行高度设为12米,涵闸区域降至6米,确保图像分辨率达0.05米/像素。数据采集完成后,通过一体化系统进行预处理与AI识别,利用改进YOLOv8模型完成病害检测,结合历史数据与环境参数通过评估模型生成风险报告,整个流程耗时仅12小时。

5.3 应用结果与成效

本次应用共识别出各类病害11处,其中裂缝5处(含

人工未发现的2处细微横向裂缝,长度分别为0.8米和1.2米)、渗漏点3处、涵闸止水带破损2处、堤坡冲刷1处,经水利工程专家现场复核,识别准确率达93%。与传统模式相比,巡检效率提升12倍,人工成本降低82%,原本的5处检测盲区实现全覆盖。基于评估结果制定的维修方案实施后,该堤防段在2024年汛期成功抵御了3次超警戒水位洪水,未出现新增病害,验证了技术方案的可靠性与实用性。

5.4 经济效益与社会效益

经济效益方面,该堤防段采用新技术后,年巡检成本从传统的28万元降至6万元,加之隐患早期处置避免的大修费用,年节约资金超150万元。社会效益方面,通过动态监测与精准评估,大幅提升了工程防洪安全保障能力,有效保护了沿岸12万群众的生命财产安全,减少了洪水灾害可能造成的经济损失;同时降低了人工巡检的安全风险,避免了恶劣环境下的人员伤亡隐患。

结束语

无人机巡检与AI图像识别技术的融合应用,为黄河水利工程安全评估提供了全新解决方案,有效破解了传统模式的诸多瓶颈。通过立体化数据采集、智能化病害识别与系统化风险评估,实现了工程安全监测从“被动应对”向“主动防控”的转变,显著提升了评估效率与精度。未来,需进一步优化极端天气下的技术适配能力,融合地质雷达、光纤传感等技术构建多维度监测网络;同时深化AI模型与工程力学机理的结合,推动技术向“预测性维护”升级,为智慧黄河建设提供更坚实的技术支撑,守护黄河安澜。

参考文献

- [1]李孔辉.黄河水利工程中堤坝加固技术的应用与效果评估[J].中国图片(中英文),2024(32):51-52.
- [2]杨磊.利用无人机技术进行水利工程巡检的有效性分析[J].水上安全,2024(21):13-15.
- [3]李轲,刘钊,陈中志,等.无人机航摄与背景差分法在库岸边坡智能巡检中的应用[J].吉林水利,2025(6):48-53.
- [4]魏海东,徐世媚,黄耀英,等.大坝安全巡检无人机最优图像采集工况试验研究[J].水利水运工程学报,2024(3):158-165.