

基于 AI 深度学习的无人机场智能巡检技术

欧阳天水¹ 周 涛² 朱海涛³

1.江西省交通投资集团路网运营管理公司 江西 南昌 330000

2.江西省交通投资集团路网运营管理公司 江西 南昌 330000

3.江西省交投养护科技集团有限公司 江西 南昌 330000

【摘要】针对传统桥梁人工巡检效率低、作业风险高、数据管理零散的问题,本文以《基于 AI 深度学习和数字孪生的鄱阳湖二桥无人机场智能巡检技术研究及应用》任务书相关项目为依托,系统研究基于 AI 深度学习的无人机场智能巡检技术。通过开发数字孪生+BIM 巡检数据管理平台、制定无人机标准化采集方案、构建深度学习病害识别模型,实现桥梁巡检的自动化与智能化。应用结果显示,该技术可识别 0.5mm 混凝土裂缝,病害综合识别精度达 80%,较传统人工巡检节省 50%以上时间,为桥梁智能养护提供技术支撑,符合任务书设定的研究目标与应用需求。

【关键词】 AI 深度学习; 无人机场; 智能巡检; 数字孪生; BIM 技术; 桥梁病害识别

DOI:10.12417/2705-0998.25.19.015

1 引言

我国交通基础设施养护进入“建养并重”阶段,桥梁作为路网关键节点,其安全与养护效率至关重要,而传统人工巡检在面对鄱阳湖二桥这类含桥墩、盖梁等复杂结构的桥梁时,存在作业风险高、数据管理零散、病害识别效率低等问题,难以满足常态化养护需求。为此,江西省交通投资集团路网运营管理公司牵头开展项目(编号:2024YB044),归口管理单位为江西省交通投资集团有限责任公司,执行周期2024年04月06日至2026年03月31日,承担单位位于江西省南昌市红谷滩新区,通讯地址为该区凤顺东街666号(邮编330038),属交通企业,29人研究团队(高级10人、中级10人、初级5人)提供人才支撑。项目融合AI深度学习等技术,旨在解决无人机数据标准化采集等问题,服务鄱阳湖二桥养护并提供可复制方案,计划培养相关人才,核心目标是形成无人机标准化采集流程、实现数字孪生数据可视化调度及研发病害识别算法(综合精度80%、识别0.5mm裂缝、省50%巡查时间),围绕平台开发等三大内容,分四阶段推进(调研测试、研发、优化验收等),还将申请知识产权、发表论文及制定企业标准。

2 相关技术基础

2.1 AI 深度学习技术

AI 深度学习技术是实现桥梁病害自动识别的核心支撑,其通过构建多层神经网络,模拟人类视觉系统对图像特征的自动提取与分析,无需人工干预特征工程。项目选用改进的 YOLO (You Only Look Once) 目标检测算法,该算法具有两大优势:

一是实时性强,可直接处理无人机巡检视频流,实现病害的实时标记,避免数据后处理的时间延迟;二是小目标识别能力优,通过多尺度特征融合技术,可增强对 0.5mm 微小裂缝的特征捕捉,解决传统算法对微小病害识别率低的问题。

在模型训练中,项目采用“预训练+微调”模式:先使用公开的 COCO 数据集对 YOLO 模型进行预训练,获取通用图像特征提取能力;再基于鄱阳湖二桥桥梁病害样本数据进行微调,使模型适配桥梁构件与病害特征,提升识别精度与泛化能力。

2.2 数字孪生与 BIM 技术

数字孪生技术通过整合桥梁设计图纸、施工记录、运维数据,在虚拟空间构建与物理桥梁 1:1 对应的三维模型,实现“物理实体-虚拟模型”的双向数据联动。项目中,数字孪生模型不仅是巡检数据的“载体”,更是养护决策的“可视化工具”——既可存储无人机采集的图像、视频数据,将其与具体桥梁构件绑定;又可通过三维可视化界面,直观展示病害位置、类型与严重程度,辅助养护人员快速定位问题。

BIM(建筑信息模型)技术是数字孪生模型构建的基础,其以参数化方式记录桥梁构件的几何信息(尺寸、位置)与属性信息(材料类型、施工时间、历史养护记录)。考虑到平台运行效率,项目采用轻量化 BIM 技术,通过简化模型面数、压缩纹理数据,在保证模型精度的前提下,降低硬件设备性能要求,确保普通终端(如笔记本电脑)可流畅加载与操作三维模型。

项目名称: 基于 AI 深度学习和数字孪生的鄱阳湖二桥无人机场智能巡检技术研究及应用。

项目编号: 2024YB044。

项目名称: 基于无人机的公路智能巡检系统开发及应用。

项目编号: 2024JT0001。

2.3 无人机巡检技术

无人机是桥梁巡检数据采集的核心设备，相比人工巡检具有覆盖范围广、数据精度高、作业效率高的优势。项目根据鄱阳湖二桥不同部位的巡检需求，采用“多旋翼+固定翼”协同作业模式：

①多旋翼无人机：选用最大飞行时间 30 分钟、最大负载 5kg 的机型，搭载 2000 万像素高清相机，适合桥墩、盖梁等近距离、高精度拍摄场景，其悬停稳定性可确保图像清晰捕捉构件表面纹理。

②固定翼无人机：选用最大飞行时间 60 分钟、巡航速度 50km/h 的机型，搭载 1600 万像素相机，适合桥梁整体外观（如 T 梁、桥塔）的快速巡检，可大幅提升大范围区域的巡检效率。此外，两类无人机均配备红外热像仪，可辅助检测桥梁内部结构的温度异常，为判断裂缝深度、蜂窝麻面严重程度提供补充数据。

3 智能巡检系统设计与实现

3.1 系统总体架构

项目设计的智能巡检系统采用“云-边-端”三级架构，实现数据采集、实时分析、集中管理的全流程闭环，具体架构如下：

(1) 终端层：由无人机、无人机场与传感器组成。无人机场部署于鄱阳湖二桥两端，实现无人机的自动起降、电池更换与数据传输，无需人工值守；传感器（包括 GPS 定位模块、姿态传感器、环境监测传感器）实时记录无人机飞行位置、姿态与现场风速、雨量，确保飞行安全与数据空间准确性。

(2) 边缘层：部署于靠近终端的边缘服务器，核心功能是“实时数据处理”。通过搭载轻量化的 YOLO 病害识别模型，对无人机传输的视频流进行实时分析，快速标记病害区域与类型，并将分析结果（含病害位置坐标）同步至云端平台，减少原始数据向云端传输的带宽压力。

(3) 云端层：即数字孪生+BIM 巡检数据管理平台，部署于江西省交通投资集团云端服务器。平台整合边缘层分析结果与无人机原始数据，实现巡检计划管理、数据存储查询、病害可视化展示、报表生成等功能，为养护人员提供“一站式”决策支持。

3.2 无人机巡检数据标准化采集方案

3.2.1 设备选型与飞行参数

通过实验确定设备与参数：多旋翼无人机最大飞行时间 30 分钟、负载 5kg，搭载 2000 万像素相机；固定翼无人机续航 60 分钟、巡航速度 50km/h，搭载 1600 万像素相机，额外配备红外热像仪辅助检测。飞行参数按部位优化：桥墩、盖梁飞行高度 5-8m、距离 3-5m，角度垂直构件；T 梁、桥塔高度 10-15m、

距离 5-8m，多角度拍摄；斜拉索高度平齐拉索、距离 2-3m，匀速飞行覆盖全长，形成标准化采集流程。

3.2.2 数据格式与存储标准

统一数据格式：图像为 JPEG 格式（分辨率 $\geq 4000 \times 3000$ 像素），视频为 MP4 格式（帧率 25fps、比特率 ≥ 10 Mbps）。存储采用“巡检日期-桥梁部位-无人机编号”文件夹命名，内部文件按“拍摄时间-构件编号”命名，确保数据可追溯，解决传统数据零散问题，满足任务书“标准化输出”的要求。

3.3 基于深度学习的病害识别模型构建

3.3.1 样本数据集构建

收集鄱阳湖二桥历史人工巡检照片 5000 张、无人机照片 10000 张，涵盖混凝土裂缝、蜂窝麻面、伸缩缝堵塞 3 类病害，另收集 5000 张无病害照片为负样本。通过 LabelImg 工具标注（2 名专业人员独立确认），再经旋转、翻转等数据增强手段，将样本扩充至 50000 张，避免模型过拟合，为模型精度提升提供数据保障。

3.3.2 模型训练与性能

采用改进 YOLOv5 模型，以 COCO 数据集预训练权重初始化，设置批量大小 16、初始学习率 0.001、训练轮次 100，通过余弦退火策略调整学习率。为提升微小裂缝识别精度，在模型颈部增加特征金字塔网络，采用 CIoU 损失函数优化边界框回归。测试结果显示，混凝土裂缝准确率 85%、蜂窝麻面 78%、伸缩缝堵塞 88%，综合识别精度达 80%，可有效识别 0.5mm 裂缝，达成任务书设定的算法性能目标。

3.4 数字孪生+BIM 巡检数据管理平台开发

3.4.1 平台功能模块

平台采用模块化设计：巡检计划管理模块支持计划创建、编辑与进度查看；数据管理模块实现数据上传、存储与查询，自动关联 BIM 构件；数据分析模块集成病害模型，生成含养护建议的病害报告，支持历史数据对比；数字孪生可视化模块加载轻量化 BIM 模型，支持三维操作与病害查看；报表生成模块自动生成 Word、Excel、PDF 格式报表，满足养护决策与上报需求。

3.4.2 平台技术实现与测试

平台采用前后端分离架构：前端用 Vue.js 构建界面、ECharts 实现可视化、Three.js 加载 BIM 模型；后端用 Spring Boot 框架，MySQL 存储数据，Redis 缓存高频数据。现场测试显示，平台支持 100 用户同时在线，响应时间 < 2 秒，数据上传速度 10MB/s，BIM 模型加载时间 < 5 秒（优化前 15 秒），功能完整性与性能稳定性均满足任务书要求。

4 现场应用与效果分析

4.1 鄱阳湖二桥现场应用

项目在鄱阳湖二桥两端部署无人机场，配备环境监测设备（风速仪、雨量计），根据天气自动调整巡检计划。养护人员通过平台创建月度巡检计划，无人机自动执行任务并上传数据，平台自动分析生成报告，人工复核后制定养护计划，养护完成后再次巡检评估效果，并更新 BIM 模型记录，实现全生命周期管理，符合项目“服务桥梁养护”的核心定位。

4.2 应用效果分析

4.2.1 效率与精度提升

传统人工巡检需 6 人 3 天完成全桥巡检，智能巡检仅需 2 架无人机 6 小时，节省 50% 以上时间，效率提升 3-5 倍。人工对 0.5mm 裂缝识别率不足 50%，智能技术识别率达 82%，综合病害识别精度 80%，降低漏检风险，达成任务书“提升巡检效率与精度”的目标。

4.2.2 成本与安全性优化

传统单次巡检成本约 2 万元，年均 24 万元；智能巡检单次成本 0.5 万元，年均 6 万元，年均成本降低 75%。同时，无人机替代人工高空、水上作业，消除安全风险，显著提升作业安全性，为项目长期推广奠定经济与安全基础。

4.3 问题与改进方向

应用中发现，大风（风速 $>8\text{m/s}$ ）、暴雨天气下无人机无法作业，需研发抗风防雨机型与优化飞行算法；模型对病害严重程度判断精度不足，需融合红外、超声波数据构建多源评估模型；海量数据存储成本高，计划采用云存储与 H.265 压缩技术降低成本，进一步完善技术体系，为项目后续推进提供优化方向。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本研究依托鄱阳湖二桥智能巡检项目，构建了基于 AI 深度学习的无人机场智能巡检技术体系，主要成果如下：

参考文献：

- [1] 张丽,秦绪彬,丁旭东.基于机器视觉的无人机自动巡检定位控制技术[J].价值工程,2025,44(29):142-144.
- [2] 李靖翔,赖皓,石延辉,等.交叉粒群的密集障碍空间无人机巡检路线规划[J].电子设计工程,2025,33(19):99-102+107.
- [3] 孙艳萍,王道通,张丹,等.基于改进遗传算法的气田无人机巡检调度优化[J].科学技术与工程,2025,25(27):11668-11675.
- [4] 欧林联.无人机自动化巡检在城市桥梁运维中的探索和应用[J].福建建设科技,2025,(05):97-100.
- [5] 李更达.基于 AI 的变电站无人机巡检图像边缘识别技术[J].自动化应用,2025,66(18):23-25.
- [6] 支妍力,周宇,郑云梅,等.基于深度学习的电力巡检无人机影像地物特征自动化匹配方法[J].电子设计工程,2025,33(18):192-196.

（1）形成了无人机标准化采集方案，确定了设备选型、飞行参数与数据存储标准，解决了数据采集不规范的问题，保障了数据质量与可追溯性。

（2）开发了基于深度学习的病害识别模型，实现了混凝土裂缝、蜂窝麻面、伸缩缝堵塞三类病害的自动识别，综合精度达 80%，可有效识别 0.5mm 微小裂缝，破解了人工识别效率低、精度差的痛点。

（3）研发了数字孪生+BIM 巡检数据管理平台，实现了巡检计划、数据管理、分析、可视化的一体化，支撑养护决策的科学化与精准化。

（4）现场应用表明，技术在效率、精度、成本上优势显著，相比传统人工巡检节省 50% 以上时间、降低 75% 年均成本，为大型桥梁智能养护提供了可行方案。

5.2 未来展望

后续将从以下方向推进技术优化与推广：

（1）多设备协同巡检：融合无人机、无人船、地面机器人等设备，实现桥梁水上（桥墩水下基础）、陆地（桥面）、空中（上部结构）的全方位巡检，覆盖人工难以触及的所有区域。

（2）病害预测与预警：基于历史巡检数据与病害发展规律，构建病害预测模型（如基于 LSTM 神经网络），实现对病害发展趋势的预测与预警，提前制定养护计划，避免病害扩大导致更大损失。

（3）智能养护决策：整合巡检数据、病害数据与养护资源数据（人员、设备、成本），构建智能决策模型，自动生成最优养护方案（包括养护时间、人员配置、成本预算），实现养护决策的自动化与智能化。

（4）行业推广应用：将技术成果推广至高速公路、铁路、市政等领域的桥梁与隧道巡检，形成跨领域的智能巡检解决方案；同时推动项目形成的企业标准上升为行业标准，引领交通基础设施养护数字化转型。