

面向改扩建工程的无人机 AI 一体化巡检系统构建研究

刘志宏^{1*}, 黄向阳²

¹ 阔通数智安全顾问（杭州）有限公司 浙江杭州

² 浙江雷博人力资源开发有限公司 浙江杭州

【摘要】随着交通基础设施数字化转型的加速推进，传统“人巡+事后处置”模式已难以应对高速公路改扩建工程中复杂多变、穿插交叉的安全管理需求。本文聚焦甬金高速改扩建金华段项目，探索构建集“无人机自动巡检+AI 智能识别+远程指挥联动”为一体的智慧巡检系统，通过全过程智能感知与闭环响应机制，提升施工期安全监管的精准性与时效性，为行业提供可复制、可推广的智能管控范式。

【关键词】改扩建工程；无人机 AI；一体化；系统构建；策略研究

【收稿日期】2025年8月15日

【出刊日期】2025年9月6日

【DOI】10.12208/j.aics.20250053

Research on the development of an integrated UAV AI inspection system for reconstruction and expansion projects

Zhihong Liu^{1*}, Xiangyang Huang²

¹Mintong Shuzhi Safety Consultant (Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang

²Zhejiang Leibo Human Resources Development Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang

【Abstract】With the accelerated digital transformation of transportation infrastructure, the traditional "manual patrol + post-incident response" model can no longer meet the complex, dynamic, and intersecting safety management requirements of expressway reconstruction and expansion projects. This paper focuses on the Yongjin Expressway reconstruction and expansion project (Jinhua section) to explore the development of an intelligent inspection system that integrates UAV autonomous patrol, AI intelligent recognition, and remote command coordination. Through full-process intelligent perception and a closed-loop response mechanism, the system enhances the accuracy and timeliness of construction safety supervision, providing a replicable and scalable intelligent management paradigm for the industry.

【Keywords】Reconstruction and expansion projects; UAV AI; Integration; System development; Strategy research

在国家大力推进基础设施智能化建设及“数字交通”战略背景下，公路改扩建工程正面临安全风险高、施工场景复杂、监管成本大等多重挑战。尤其在“边通车、边施工”的环境下，传统人工巡检方式不仅效率低、覆盖不全，还存在人员暴露于高风险区域的隐患。随着人工智能与无人机技术的迅猛发展，构建“无人机+AI”一体化智能巡检系统成为破解难题的新路径。该系统通过自主飞行、图像识别与数据联动，实现对施工现场的高频次、全天候隐患排查与预警响应，助力实现安全管理从“人防”向“智防”的根本转型。本研究正是在此背景下开展，旨在服务重大基础设施改扩建工程的安全治理需求。

*通讯作者：刘志宏

1 面向改扩建工程的无人机 AI 一体化巡检系统构建意义

在公路改扩建工程中，施工区域跨度大、结构类型复杂、作业交叉频繁，传统人工巡检模式难以及时、全面掌握现场动态，存在效率低、反应慢、盲区多等问题。构建面向改扩建工程的无人机 AI 一体化巡检系统，不仅能够实现对重点区域的自动化、高精度、高频次巡视，还可借助 AI 智能识别技术对施工安全隐患进行快速判别和实时预警，极大提升了隐患排查的系统性与响应的主动性。该系统的部署有助于建立“空天地一体化”的智能监管模式，推动施工安全管理从依赖人力转向依托数据驱动，实现风险的动态感知与闭环管控，赋能

改扩建工程向本质安全和高效运维的方向迈进, 具有重大的现实意义与推广价值。

2 面向改扩建工程的无人机AI一体化巡检系统构建难点

2.1 场景复杂多变制约算法精度

在公路改扩建工程中, 施工环境普遍呈现结构分布密集、作业种类繁多、交通与施工并行等特点, 导致现场巡检场景高度复杂、多变性强。这对AI识别算法提出了极高要求, 尤其是在光照条件、视角遮挡、工况干扰等不确定因素影响下, 常规模型难以稳定输出高置信度的识别结果。此外, 同一场景中存在如未戴安全帽、设备倾倒、人员违规操作等多重隐患类型, 要求系统具备多目标识别、动态感知与语义理解等高级能力, 进一步提升了算法开发的技术门槛。

2.2 多源异构数据加剧融合难度

改扩建项目产生的数据呈现明显的多源异构特征, 既包含无人机采集的图像与视频数据, 又融合来自地面传感器、施工日志、交通运行状态等多维信息。不同数据在时效性、格式、精度和空间分辨率方面差异显著, 若无高效的数据融合机制, 将影响系统对现场全貌的智能理解与精准预警能力。特别是在实现跨平台信息协同与高效数据流转的过程中, 如何建立稳定的数据标准、构建高效的数据接口与融合架构, 成为巡检系统可靠运行的关键难点。

2.3 远程协同调度依赖体系支撑

系统的远程调度与集中控制能力依赖于完整的软硬件基础设施支撑, 包括高性能指挥平台、低延时网络传输能力、边缘计算终端等关键组件。当前多数工程现场尚未普遍具备部署分布式智能节点与互联互通的数据网络的能力, 这使得无人机作业的远程任务下发、飞行路径规划、实时画面回传等关键环节在复杂地理环境下易受干扰。同时, 多无人机编队协同作业的路径优化、航线避障及任务分配等算法设计亦尚需针对工程特性进行定制开发。

2.4 闭环联动处置亟待机制重塑

尽管AI系统可实现对隐患的自动识别, 但要真正实现从“发现问题”到“解决问题”的闭环联动, 仍需完善跨部门协同、任务响应、责任追溯等管理机制。目前, 隐患下发、整改单回传、复查确认等环节存在标准不统一、信息孤岛、响应不及时等问题, 导致风险处置过程缺乏系统性和追责有效性。若无规范的联动流程与制度化响应链条, 再先进的技术识别能力也难以真正落地转化为现场管理成效。因此, 构建具备统一标准、

流程清晰、执行闭环的智能响应体系, 已成为一体化系统推广应用中的核心挑战。

3 面向改扩建工程的无人机AI一体化巡检系统构建策略

3.1 多点布设机场实现全域覆盖

在系统布设策略上, 应优先推进基于航程、覆盖半径、施工节奏等因素的多点机场部署, 实现全域飞行任务的高效编排。通过合理选取具有代表性、节点性和风险集中的区域设立无人机起降基站, 并结合“蛙跳式”航线设计, 确保施工区域的空间连续性与时段覆盖均衡性。各机场需具备自动起降、环境感知、自主充电等功能, 支撑无人机高频次、多层次的日常巡检任务。多点部署不仅提升了作业频度和覆盖广度, 还能有效应对因施工推进带来的场景变化, 保障系统在不同时期的巡检效能稳定性与适应性。

比如, 在“甬金高速公路改扩建金华段”项目中, 工作人员需要基于工程地理特征与作业分区布设10个高性能无人机机场点位, 采用分段覆盖与任务重叠方式提升系统整体巡检密度与飞行稳定性。项目全线桥梁210座、施工交叉面广, 存在高频次设备调动、材料堆放不规范等安全隐患, 因此在机场布设策略上特别强调风险区优先、节点段增强原则。工作人员利用作业强度分析模型确定高风险聚集区, 确保这些区域由至少两座机场交叉覆盖。同时, 系统在每日8:30、10:00、13:00和16:00定时执行四轮飞行任务, 每轮飞行中9架无人机依据既定航线执行左侧和右侧分段巡检, 飞行时间控制在一小时内, 保证作业密度与电量安全。各机场设有自动充电设备, 配备轻量化Matrice 3D无人机与智能环境监测系统, 提升自我调度和夜间飞行能力。通过多点部署与定时调度策略的结合, 项目实现了巡检区域的高覆盖率、作业效率的最大化与动态施工环境下的高适应性响应。

3.2 专属模型训练增强智能识别

在算法模型开发方面, 应面向典型施工场景构建针对性强的识别模型, 以满足不同隐患类型在图像特征、发生频率、干扰背景等方面的需求。通过系统采集历史图像数据、标注隐患类型、训练深度学习模型, 可逐步形成适配“边施工、边通车”特征的专属算法体系。模型优化过程中需持续迭代更新数据集, 引入注意力机制、多尺度分析与融合增强模块, 以提升在复杂背景下的判别能力和稳定性。同时, 在部署端实现模型的轻量化压缩与边缘推理部署, 以保证识别速度与实时性不受制于硬件资源, 提升系统整体运行效率。

比如,在“甬金高速公路改扩建金华段”项目中,工作人员需要开发适应复杂施工场景的AI模型识别系统,以实现高精度、多类型隐患自动识别与动态更新能力。在前期筹备阶段,技术团队通过人工巡查手段采集并标注包括人员未佩戴安全帽、围挡倾斜、临边作业未设防护栏、配电箱摆放不当等20余类施工隐患图像数据,构建高质量训练样本集。随后通过深度卷积神经网络模型对这些样本进行训练,引入YOLO算法进行目标检测,结合多尺度特征融合和语义增强模块,提升对遮挡物后目标及小目标的识别精度。为确保系统稳定性,工作人员将模型进行轻量化压缩后部署于边缘计算设备,实现本地快速推理。通过持续运行与实时回传的图像数据反馈,模型具备自我更新与二次训练机制。目前系统在高风险施工区域平均识别响应时间控制在3秒以内,关键隐患识别准确率超过97%。该专属模型的持续演进,不仅提升了AI巡检系统在典型复杂场景下的适应性,还有效构建了风险识别的前端预警机制。

3.3 云端协同联动打造任务闭环

在任务联动机制构建方面,应围绕云端统一管控平台建立“任务下发—过程监控—结果汇总—闭环处置”的操作链条。平台需具备远程任务调度、航线规划、画面直播、识别结果上传等功能模块,实现各机场之间的数据汇聚与智能分发。系统应通过接口对接既有安监平台、责任方反馈渠道与应急响应系统,形成自动化任务链的协同执行。通过云边协同机制,将AI识别结果快速转化为响应指令,实现闭环式的风险排查与处置流程,提升管理链条的信息通透性和处置效率,推动现场风险管理由事后响应向过程控制转变。

比如,在“甬金高速公路改扩建金华段”项目中,工作人员需要依托云端无人机管理平台,构建一套实时、高效、闭环的智能任务协同系统。该平台集成飞行任务调度、航线规划、视频回传、AI识别结果汇总与联动预警功能,形成了“数据采集—智能识别—任务追踪—整改验证”的闭环操作链。工作人员在平台中可远程创建飞行任务,设定机场名称、任务频次、巡检时间段及对应航线。无人机启动后,通过平台实时直播的方式将现场画面上传,系统自动抓取图像中疑似隐患区域并同步调用AI模型识别模块进行判别。一旦识别出未戴安全帽、围挡倾倒等风险事件,系统将在30秒内生成“隐患报告”,并将报告通过短信及智慧安监平台推送至对应施工责任人。

3.4 标准规范引领推动体系建设

在体系化建设方面,应注重以标准化引导系统功

能完善和流程规范统一,构建涵盖设备部署、航线设计、隐患识别、任务调度、结果反馈等环节的技术规程与管理手册。技术标准需明确关键节点的数据格式、接口协议、判识规则与联动条件,保障系统跨平台运行与各方协同的兼容性。同时,推动建立专项考核机制与能力评估体系,以检验系统构建的运行成效与应用成熟度。制度层面需加强组织协调机制,明晰多方职责与响应时效要求,为系统推广提供制度性支撑与可持续保障,助力智能巡检体系在工程实践中高效运行与规模复制。

比如,在“甬金高速公路改扩建金华段”项目中,工作人员需要围绕无人机+AI一体化巡检系统的长期运行与行业复制,系统推进标准化建设路径,编制《公路工程施工安全管理无人机巡检技术规程》团体标准文件,构建制度化技术支撑体系。标准制定工作按月分阶段推进,明确2025年3月底提交立项文件,4月完成现场调研与作业流程分析,6月组织技术评审大纲,8月编写征求意见稿初稿,10月完成技术评估与反馈修订,12月底形成最终送审稿。规程涵盖机场布设参数、飞行路径容差设定、AI识别模型性能指标、安全数据回传格式、隐患等级分类及整改闭环流程等关键技术条目,确保在不同工况条件下具有通用性与指导性。

4 结语

综上所述,本文主要研究了面向公路改扩建工程的无人机AI一体化巡检系统的构建路径与实践策略。通过对工程复杂场景下的技术瓶颈与实施难点进行系统分析,明确了在多点部署、模型训练、云端联动与标准引导等方面的关键技术要素与管理机制。研究表明,该系统不仅在空间覆盖效率、隐患识别精准度及响应闭环能力上显著优于传统巡检方式,也为大型线性工程的智能安全管理提供了可行范式。无人机与人工智能深度融合所形成的感知-判断-处置全链条机制,已逐步展现出对施工动态风险管控的强适配性和实用价值。通过标准化、系统化的建设思路,智能巡检体系正日益成为支撑交通基础设施高质量建设的核心保障力量。

参考文献

- [1] 邱墩. 基于5G和AI技术的高速公路智慧养护应用研究[J]. 北方交通,2022(5):68-70.
- [2] 孟繁和,吕婷,宣林川,等. 警用无人机高速公路大范围巡逻系统设计与应用[J]. 软件,2022,43(4):18-21.
- [3] 关迎春. 无人机、卫星地图在高速公路路政管理中的展望[J]. 装饰装修天地,2019(1):338.

- [4] 朱洪亮. 浅谈高速公路警用无人机 5G 立体巡防管理平台[J]. It 经理世界, 2022(8):157-161.
- [5] 复亚助力高速公路实现无人机自动巡逻巡检[J]. 智能城市, 2018(24):169-170.
- [6] 湖北交投智能检测股份有限公司. 基于人工智能 AI 的高速公路绿化工程巡检方法和系统:CN202411639568.8 [P]. 2025-02-14.
- [7] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 基于 AI 与定量参数约束的公路选线优化方法和系统:CN20241116597 7.9[P]. 2024-12-27.
- [8] 中交第三公路工程局有限公司工程总承包分公司. 一种基于 AI 识别技术的桥梁安全巡检装置:CN202110432 278.6[P]. 2021-08-06.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS