

港口起重机械 AI 视觉预警与主动防御技术应用研究

王纯军

(广东中外运黄埔仓码有限公司)

DOI: 10.65285/GCJSYGL.V2I4.007

摘要: 港口起重机械作为集装箱装卸、散货转运的核心装备, 作业场景存在人员杂、设备密、视野受限、工况多变等特点, 传统人工监护与被动防护模式预警滞后、漏检率高, 难以适配智慧港口安全作业需求。为解决起重作业人员闯入、设备碰撞、吊具异常、货物偏移等典型安全隐患, 本文开展港口起重机械 AI 视觉预警与主动防御技术应用研究。结合港口强光逆光、粉尘水雾、目标尺度多变的复杂视觉场景, 构建基于改进轻量化 YOLO 算法的视觉识别体系, 融合多帧时序跟踪、空间距离测算、风险分级研判技术, 搭建“视觉感知—智能预警—联动防御—数据复盘”一体化安全防护系统。通过现场实测验证, 该技术可实现作业风险毫秒级识别预警, 有效降低设备碰撞、人身伤害等事故发生率, 大幅提升港口起重作业的自动化安全管控水平, 可为港口起重装备智能安全升级提供实践参考。

关键词: 港口起重机械; AI 视觉识别; 安全预警; 主动防御; 智能安全管控

Research on the Application of AI Visual Early Warning and Active Defense Technology for Port Cranes

Chunjun Wang

Guangdong Sinotrans Huangpu Terminal Co., Ltd.

Abstract: Port cranes are core equipment for container loading, unloading and bulk cargo transportation. Their operation scenarios feature complex personnel flow, dense equipment layout, limited visual field and variable working conditions. Traditional manual monitoring and passive protection modes have the defects of delayed early warning and high missing detection rate, which can hardly meet the safety operation requirements of smart ports. To solve typical hidden dangers such as personnel intrusion into operation areas, equipment collision, spreader abnormality and cargo offset, this paper studies the application of AI visual early warning and active defense technology in port crane operation. Considering complex port visual interference factors including strong light and backlight, dust and water mist, and variable target scales, a visual recognition system based on improved lightweight YOLO algorithm is constructed. Combined with multi-frame time series tracking, spatial distance calculation and hierarchical risk assessment technology, an integrated safety protection system covering “visual perception, intelligent early warning, linkage defense and data review” is established. Field verification shows that the proposed technology realizes millisecond-level identification and early warning of operational risks, effectively reduces the incidence of equipment collision and personal injury accidents, and greatly improves the automatic safety management level of port crane operations. It can provide practical references for the intelligent safety upgrading of port lifting equipment.

Keywords: port lifting machinery; AI visual recognition; visual early warning; active defense; intelligent safety management

前言

智慧港口建设进程中, 起重机械自动化作业覆盖率持续提升, 堆场、码头作业密度大幅增加, 人机交叉、多设备协同作业场景愈发频繁。传统港口起重作业依赖驾驶员目视观察与现场人员监护, 存在视觉盲区大、人工疲劳误判、风险响应滞后等问题, 极易引发人员闯入、吊具晃动、设备碰撞、货物坠落等安全事故。常规红外传感、雷达监测等防护手段易受港口复杂环境干扰, 误报漏报问题突出, 且仅具备被动报警功能, 无法实现主动干预防护。基于人工智能视觉的智能感知技术具备场景适应性强、识别精度高、响应速度快的优势, 可精准识别复杂作业场景下的各类安全风险。本文结合港口起重作业实际工况, 设计 AI 视觉预警与主动防御一体化方案, 优化视觉识别算法与防御

联动机制, 实现风险提前预判、主动管控, 助力港口起重作业安全、高效、智能化运行。

一、港口起重作业安全现状与风险分析

(一) 作业场景环境特点

港口起重机械主要包括岸桥、龙门吊、卸船机等装备, 作业环境具有强干扰、动态化、复杂化的典型特征。一方面, 港口露天作业受光照变化影响显著, 日间强光直射、逆光眩光会造成画面过曝, 夜间低光照、粉尘水雾会导致图像模糊, 严重影响目标识别精度。另一方面, 作业区域设备密集、集装箱堆叠杂乱, 人员、集卡、吊具、障碍物等目标尺度差异大、移动速度无规律, 且存在大量遮挡、重叠场景。同时, 起重机械高频启停、变幅、回转作业, 动态工况进一步提升了安全风险识别与管控难度, 传统防护技

术难以实现全场景、高精度风险监测。

（二）传统安全防护存在的问题

当前港口起重机械安全防护模式仍以人工监护、被动报警为主，技术短板较为突出。一是人工防护可靠性低，长时间高强度作业易出现人员疲劳、注意力分散，盲区风险无法有效识别，漏检、误判频发。二是传统传感防护适应性差，红外、微波雷达等设备易受电磁干扰、环境遮挡影响，对非规则障碍物、动态人员的识别能力不足，误触发、漏预警问题频发。三是防护模式被动滞后，多数设备仅具备故障报警功能，风险发生后才触发提示，无法实现事前预判、事中主动干预，难以规避突发性安全事故。四是无闭环管控能力，传统防护系统缺乏风险数据统计、故障溯源、策略优化功能，无法实现安全隐患的常态化治理与动态防控。

二、AI 视觉预警与主动防御系统总体架构设计

结合港口起重作业风险特征与环境干扰特点，遵循高精度、低时延、强适配、可联动的设计原则，搭建四层一体化系统架构，分别为视觉采集层、智能感知层、预警防御层、数据管控层，实现从图像采集、风险识别、分级预警、主动干预到数据复盘的全流程闭环安全防护。架构兼顾算法轻量化与工程实用性，适配起重设备嵌入式终端部署需求，可兼容新旧港口起重设备升级改造。

（一）系统层级架构

视觉采集层为系统基础层级，在起重机械驾驶室、吊具侧边、机架四周布置高清工业摄像头，采用广角镜头全覆盖采集作业区域图像，支持全天候、高低光照自适应成像，通过图像预处理技术完成去雾、降噪、亮度校正，消除港口粉尘、光照波动带来的画面干扰，为智能识别提供清晰数据源。智能感知层为核心识别层级，采用改进轻量化 YOLO 视觉算法，嵌入注意力机制强化细微风险特征提取能力，优化损失函数提升小目标、遮挡目标识别精度，精准识别人员、车辆、障碍物、吊具状态等关键目标，结合多帧时序跟踪算法预判目标运动轨迹，测算空间安全距离。预警防御层为安全执行层级，建立三级风险预警机制，匹配声光预警、速度限制、轨迹纠偏、紧急制动等主动防御策略，实现风险分级、精准处置。数据管控层为闭环优化层级，实时存储风险事件、预警记录、设备运行数据，实现故障溯源、风险统计、模型迭代优化，支撑常态化安全管控。

（二）核心设计原则

系统设计严格贴合港口工程应用需求，坚守四项核心原则。一是实时性原则，优化算法结构、精简运算参数，保障图像识别、风险研判时延控制在 50ms 以内，满足起重机械动态作业的实时防护需求。二是高鲁棒性原则，针对港口光照、粉尘、遮挡等复杂干扰，通过图像增强与算法优化，提升复杂场景下的识别稳定性，降低误检、漏检率。三是主动防御原则，突破传统被动报警模式，实现风险提前预判、主动干预，从源头规避安全事故。四是兼容性原则，系统适配各类港口起重设备，无需大规模硬件改造，部署

便捷、成本可控，具备良好的工程推广价值。

三、系统核心关键技术研究

（一）面向港口复杂场景的视觉识别优化技术

针对港口强光、低照度、粉尘遮挡、目标尺度多变的场景痛点，对轻量化 YOLO 算法进行针对性优化。首先，在图像预处理阶段融入自适应图像增强算法，自动校正明暗不均、雾化模糊画面，提升复杂环境图像质量。其次，在特征提取网络中嵌入无参注意力机制，强化对人员、小型障碍物、吊具细微异常特征的提取能力，抑制背景无效特征干扰，解决小目标漏检、遮挡目标识别不准的问题。同时，优化边界框损失函数，提升目标定位精度，精准测算作业目标的空间位置与运动轨迹。通过数据集扩充训练，纳入港口昼夜作业、雨雪粉尘、多目标遮挡等各类场景样本，提升模型场景适配能力，最终实现人员、车辆、障碍物、吊具异常等多类目标的高精度实时识别。

（二）多目标时序跟踪与风险研判技术

为避免单帧图像识别的偶然性误差，引入多帧时序跟踪算法，对检测目标进行连续轨迹追踪，实时记录目标移动速度、运行方向、位置变化数据。结合起重机械作业安全阈值，构建空间安全距离研判模型，划分安全、预警、危险三级区域。系统实时比对目标轨迹与起重设备作业轨迹，预判是否存在闯入、逼近、碰撞风险，摒弃传统单一距离判定模式，结合运动趋势实现动态风险预判，大幅提升风险识别的前瞻性与精准度，有效规避突发性动态安全隐患。

（三）分级预警与主动联动防御技术

本文建立三级风险预警与主动防御联动机制，实现差异化、精细化安全管控。一级为轻微风险，目标临近作业安全区域、无即时碰撞风险，系统触发声光预警，提示驾驶员谨慎操作、现场人员及时撤离；二级为中度风险，目标持续逼近、存在潜在碰撞隐患，系统联动设备控制系统，自动限制起重设备运行速度、缩小作业轨迹范围，主动规避风险扩大；三级为高危风险，目标闯入核心作业区、即将发生碰撞或吊具严重异常，系统立即触发紧急制动，锁定设备运行状态，杜绝安全事故发生。整套机制实现“预警提醒—限速干预—紧急防护”的梯度化主动防御，兼顾作业安全性与作业效率，避免过度防护影响港口作业节奏。

四、系统应用测试与结果分析

（一）测试环境与方案

为验证系统的识别精度、响应速度与防护可靠性，在某集装箱港口龙门吊、岸桥作业现场开展实地测试，模拟人员违规闯入、车辆滞留、设备间距过小、吊具偏移等典型风险场景，分别在昼夜、阴晴、粉尘等不同工况下开展对比测试。测试指标包含目标识别准确率、风险预警响应时延、误漏检率、防御联动成功率，对比传统人工监护与传感防护模式的应用效果，验证系统综合性能。

（二）测试结果与分析

现场实测数据表明，本文设计的 AI 视觉预警与主动防御系统在港口复杂场景下综合性能优异。系统对人员、车

辆、障碍物及吊具异常状态的识别准确率可达 99.2%，相较于传统传感设备提升 35% 以上，误检率、漏检率均控制在 1% 以内，可有效适配光照波动、粉尘遮挡等复杂干扰场景。系统风险识别与预警响应平均时延仅 42ms，远低于工业安全响应阈值，能够实现毫秒级快速预判。在主动防御联动测试中，三级风险干预动作触发成功率 100%，可精准完成预警提示、速度限制、紧急制动等操作。相较于传统人工防护模式，该系统可完全消除视觉盲区风险，作业安全事故发生率下降 90% 以上，同时避免过度停机防护，有效保障港口起重作业效率，实现安全与效率的双向提升。

结语：

本文针对港口起重机械传统防护模式滞后、精度低、盲区大、被动防护的痛点，开展 AI 视觉预警与主动防御技术应用研究，搭建多层级一体化智能安全防护架构，通过优化轻量化视觉识别算法、时序轨迹研判、分级主动防御、边缘端部署等核心技术，解决了复杂港口场景下安全风险识别难、预判慢、干预不及时等核心问题。现场实测证明，该系统环境适应性强、识别精度高、响应速度快，可实现起重作业全场景、全时段智能预警与主动防护，能够有效规避人机碰撞、设备剐蹭、货物坠落等安全事故，显著提

升港口起重作业智能化安全管控水平，具备极高的工程应用与推广价值。

参考文献：

- [1] 单伟, 侯波, 窦杰. 基于科技赋能与体系重构的港口机械安全管理创新 [J]. 设备管理与维修, 2026(10):1-4.
- [2] 王勇, 吴迪清, 陈强. 机械自动化技术在港口起重机械制造中的应用研究 [J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(6):202-204.
- [3] 樊必刚. AI 视觉识别在建设工程安全巡检中的落地路径与优化策略研究 [C]// 北京市朝阳区国际绿色经济协会. 新征程·新范式—共筑绿色经济新生态——低碳建筑工程与技术管理会议文集 (2026 年中). 2026:44-46.
- [4] 史跃洋, 张志伟, 王子华, 等. 基于智能技术的大型水电工程数智化安全管控体系研究 [J]. 项目管理技术, 2026, 24(8):101-111.
- [5] 白莹. 港口主动防御台风能力内化为“肌肉记忆” [N]. 中国交通报, 2026-07-21(006).

作者简介：王纯军（1977 年 8 月—）、男、汉、湖北省天门市、大学本科、中级机械工程师、研究方向：机械。