

港口 U 型堆场集卡闯红灯监测系统设计与实现

易俊峰, 杨文斌, 张 海, 王家喜, 黄经森

(广西钦州保税港区宏港码头有限公司, 广西 钦州 535008)

摘要:当前国内部分自动化集装箱堆场采用 U 型结构设计, 该类堆场中轨道吊与集卡的协同作业效率, 直接影响码头整体运营效能。针对码头 U 型堆场轨道吊作业期间集卡闯红灯易引发设备碰撞、作业中断等安全问题, 以及传统人工监管存在的实时性差、取证困难等弊端, 设计了一套适配港口海洋性作业环境的轨道吊集卡闯红灯监测系统。该系统以 GMOS 电警抓拍单元为核心, 结合视频检测、车牌识别、网络传输技术, 构建前端采集、中间传输、后端管理的三级架构, 实现闯红灯行为的精准抓拍、车牌自动识别、实时报警及数据全生命周期管理。系统在钦州宏港码头 42 台轨道吊堆场完成部署与测试, 结果表明, 车辆捕获率达 99% 以上, 车牌识别准确率满足港口作业要求, 闯红灯抓拍符合国家相关技术规范, 有效降低了堆场作业安全风险, 提升了集卡管控的智能化水平。该系统的落地为自动化码头 U 型堆场的车辆通行安全管控提供了工程化解决方案。

关键词: U 型堆场; 集卡; 闯红灯监测; 车牌识别; 港口智能化

中图分类号: TB273

文章编号: 1000-0682(2026)04-0050-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.009

Design and implementation of a port U-shaped yard container truck red light violation monitoring system

YI Junfeng, YANG Wenbin, ZHANG Hai, WANG Jiaxi, HUANG Jingsen

(Guangxi Qinzhou Bonded Port Honggang Terminal Co., Ltd., Guangxi Qinzhou 535008, China)

Abstract: Some automated container yards in China currently adopt a U-shaped design. In these yards, the collaborative efficiency between rail-mounted gantry cranes and yard trucks directly affects the overall operational efficiency of the terminal. In response to safety issues such as yard trucks running red lights during rail-mounted crane operations, which can easily cause equipment collisions and work interruptions, as well as drawbacks of traditional manual supervision, such as poor real-time performance and difficulty in evidence collection, a monitoring system for rail-mounted crane yard trucks running red lights, suitable for the port maritime operational environment, has been designed. This system uses the GMOS electronic police capture unit as the core, combined with video detection, license plate recognition, and network transmission technologies, constructing a three-tier architecture of front-end acquisition, intermediate transmission, and back-end management. It enables precise capture of red light violations, automatic license plate recognition, real-time alarms, and full lifecycle data management. The system was deployed and tested in the yard of 42 rail-mounted gantry cranes at Qinzhou Honggang Port. The results show that the vehicle capture rate exceeds 99%, the license plate recognition accuracy meets port operation requirements, and the red light captures comply with relevant national technical standards, effectively reducing yard operational safety risks and improving the intelligence level of yard truck management. The implementation of this system provides an engineering solution for vehicle traffic safety management in automated U-shaped terminal yards.

Keywords: U-shaped yard; terminal tractor; red light violation monitoring; license plate recognition; port intelligence

收稿日期: 2026-05-09

第一作者: 易俊峰(2000—), 男, 壮族, 广西河池人, 本科, 助理工程师, 研究方向为港口自动化设备。E-mail: 2052999619@qq.com

0 引言

随着我国港口自动化、智能化建设持续推进,西南陆海新通道核心节点钦州保税港区物流吞吐量逐年增长。自动化集装箱堆场 U 型堆场作为集装箱装卸的核心作业区域,普遍采用轨道吊+集卡协同作业模式:集卡完成装卸作业后,由轨道吊门框内专用回车道驶出;轨道吊在车道上方开展吊箱、移箱作业时,控制系统输出红灯信号禁止车辆通行,作业结束后切换为绿灯放行。

实际作业过程中,部分集卡存在抢行、闯红灯现象,极易引发集卡与轨道吊碰撞,不仅会造成设备损坏、作业中断,还存在显著的人身安全隐患。



图 1 U 型堆集卡回车道

1 系统需求分析

宏港码头 U 型堆场轨道吊作业区共部署 42 台轨道吊,分为电气房侧和非电气房侧两种布局形式,集卡车道为单方向驶出通道,系统设计需充分贴合堆场的实际作业场景、设备布局和环境特点,同时满足功能、技术和环境三方面的核心需求。

1.1 业务需求

系统需对集卡通行状态进行实时监测,轨道吊作业红灯期间,对越过停止线的集卡实施全过程抓拍,清晰记录车辆未到停止线、越过停止线、继续前行三个关键状态,满足违法取证标准。可自动识别集卡车牌号码与颜色,兼容民用及专用号牌等多种类型,识别信息与抓拍图像关联存储,实现违法车辆精准溯源。系统检测到闯红灯行为后,立即向中控室推送包含违法时间、位置、车牌、抓拍图像的报警信息,完成实时预警。对图像、车牌、报警等数据进行长期保存,支持按车牌、时间、作业区域等多条件快速检索,便于管理人员核查、统计与责任认定。系统需与码头现有 PLC 控制系统、智慧安防系统兼容,从 PLC 获取红绿灯开关量信号,并将闯红灯事件同步至安防系统报警界面。硬件设备接入码头 GiNMS 综合网络管理系统,实现设备运行状态监

测、故障告警、链路分析,降低现场运维工作量。

1.2 技术要求

集卡车辆捕获率稳定在 99% 以上,车牌识别准确率完全适配港口作业管理需求,可精准识别数字、字母及省市简称等各类字符。闯红灯抓拍图像严格遵循《GA/T496—2014》《GA/T832—2014》技术规范,确保抓拍质量达标。车辆检测、轨迹跟踪、闯红灯判定及报警推送全程响应流畅,无明显延迟,可满足现场实时管控需求。前后端采用 TCP/IP 协议进行通信,保障图像、视频及文本数据传输稳定完整,无丢包、卡顿等异常情况。系统具备较强可扩展性,硬件预留充足接口,软件采用模块化设计,可支持后续轨道吊作业区扩展及功能升级。

1.3 环境需求

码头为典型海洋性气候,硬件需满足:工作温度 $-10^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$,适应 100% 湿度且防凝露;抗盐雾腐蚀,镜头防雾,保证大雾天成像质量;具备抗震结构,适应轨道吊作业震动;户外设备防护等级 $\geq \text{IP65}$,防尘防水。电气方面需稳定采集 PLC220 VAC 红绿灯信号,采用 485 通讯传输,现场布线规范、抗干扰、防水防腐。

2 系统总体设计

2.1 设计原则

系统设计严格遵循实用性、可靠性、兼容性、可扩展性四大原则,全部选用工业级硬件,充分贴合码头设备管理及电气安装规范,可直接兼容码头现有 PLC、智慧安防及 GiNMS 系统,无需进行大规模改造。硬件采用模块化设计,预留标准化接口,便于日常维护、部件更换及系统扩容。

2.2 系统整体架构

该系统采用三级架构设计,具体分为前端子系统、传输子系统与后端管理系统。三个子系统既保持各自的独立性,又能相互配合、协同运作,从而实现集卡闯红灯监测全流程的有效管控。

(1)前端子系统:部署在轨道吊作业区现场,是系统的数据采集核心,由 GMOS 电警抓拍单元、补光单元、红绿灯信号检测器、终端服务器等设备组成,主要完成高清视频采集、车辆检测、闯红灯抓拍、车牌识别、现场数据暂存等功能,并将处理后的信息上传至后端平台。

(2)传输子系统:主要由二层工业交换机、网络线缆等设备组成,搭建专属工业以太网传输网络。在实际应用中,该子系统可实现前端采集子系统与

后端管理子系统之间图片、视频、文本信息的双向高效传输,同时为现场各类终端设备提供稳定可靠的网络通讯支持。

(3)后端管理子系统:部署于码头中控机房,由平台服务器、监控主机、显示器等设备构成,搭载专用闯红灯管理软件,核心负责数据汇聚、存储、报警

管理、数据检索、数据分析及系统联动等工作,是整个监测系统的管理与控制核心。

2.3 系统拓扑结构

根据宏港码头 42 台轨道吊的布局特点,非电气房侧系统采用“现场设备—电气房处理—中控机房管理”的层级部署方式,系统拓扑图如图 2 所示。

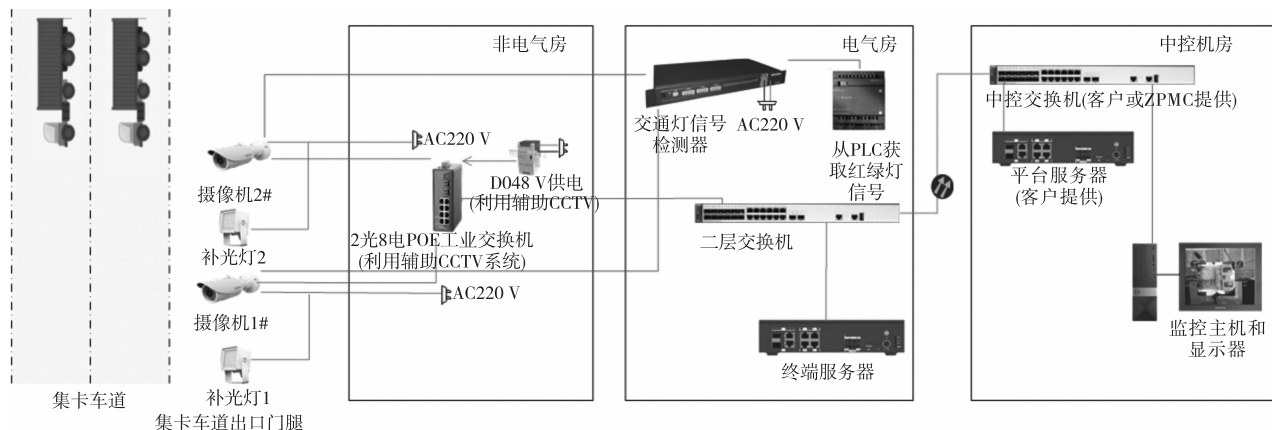


图 2 轨道吊集卡闯红灯监测系统拓扑图

2.4 系统核心工作流程

系统核心工作流程为图像采集—车辆检测—轨迹追踪—红灯判定—违法抓拍—车牌识别—数据传输—报警存储(具体流程见图 3),整个监测过程由前端设备自动完成,无需人工干预。

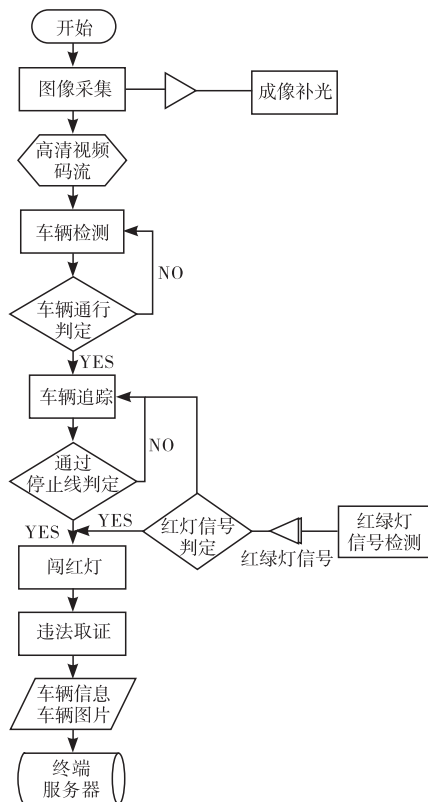


图 3 轨道吊集卡闯红灯监测系统核心工作流程图

图像采集与补光:GMOS 电警抓拍单元实时采集集卡车道的高清视频码流,补光单元根据环境光照强度自动开启或关闭,保证白天、夜间及低光环境下的图像采集质量。

车辆检测与通行判定:系统对视频画面进行实时分析,划定视频检测区域和 2 条触发线,当检测到有集卡进入检测区域时,判定为车辆通行,启动车辆轨迹追踪。

红绿灯信号检测:红绿灯信号检测器实时从 PLC 获取红绿灯状态信号,并同步至抓拍单元,为闯红灯判定提供依据。

闯红灯判定与违法抓拍:若红灯信号亮起时,集卡依次越过触发线 1 和触发线 2,系统判定为闯红灯违法行为,分别在集卡未到停止线、越过停止线、继续前行三个位置抓拍 3 张高清图片,记录违法完整过程。

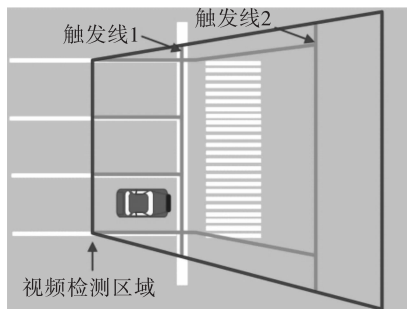


图 4 闯过红灯车辆触发抓拍位置 1

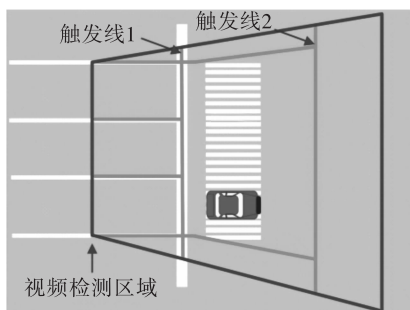


图 5 闯过红灯车辆触发抓拍位置 2

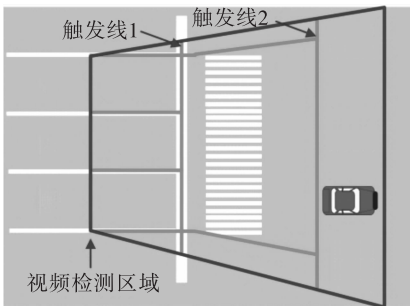


图 6 闯过红灯车辆触发抓拍位置 3

车牌识别环节:系统会对抓拍得到的图片进行处理,自动识别出集卡的车牌号码及车牌颜色。若首次识别未能成功获取车牌信息,系统会先对该抓拍图片进行缓存,待通过轨迹追踪确认该车辆确实存在闯红灯行为后,再对缓存图片重新进行车牌识别操作。

数据传输与暂存:前端终端服务器将抓拍图片、车牌信息、违法时间、作业区域等信息关联,以同一个 ID 号进行暂存,并通过 TCP/IP 协议将数据上传至后端管理平台。

报警与存储:后端管理平台接收到数据后,立即触发报警并弹出报警弹窗,同时将所有数据存入数据库,完成数据的长期存储,方便后续检索和分析。

3 系统硬件设计

系统硬件设计以适应港口环境、满足功能需求、保证运行稳定为核心,分为前端抓拍检测单元、现场处理与传输单元、后端管理单元和交通灯配套硬件四部分。

3.1 前端抓拍检测单元

前端抓拍检测单元是系统的现场感知核心,部署在集卡车道出口门腿处,直接面对港口户外环境,主要包括 GMOS 电警抓拍单元、补光单元和红绿灯信号检测器。

3.1.1 GMOS 电警抓拍单元

该系统选用搭载深度学习硬件平台的 GMOS

电警抓拍摄像机作为核心采集设备,该设备采用高分辨率 GMOS 图像传感器,具备高清视频采集、智能视频分析、车牌识别、违章检测等功能,其核心优势在于:

(1)抗干扰能力强:通过深度学习算法对目标进行精准识别,可有效排除动物、树枝、落叶、光影变化等干扰物,仅对集卡进行检测和追踪,误报率低;

(2)识别功能丰富:系统内置车牌识别、车身颜色识别及车型识别模块,可支持多种类型车牌与颜色的识别,经现场测试,车辆捕获率能够稳定保持在 99% 及以上;

(3)环境适应性好:防护等级达 IP67,具备防盐雾、防凝露、抗震功能,可在港口 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下正常工作;

(4)抓拍性能优异:最高支持 200 万像素高清抓拍,快门速度可调,可清晰抓拍高速行驶的集卡,无拖影、模糊现象。

3.1.2 补光单元

补光单元采用 LED 补光灯,与 GMOS 抓拍摄像机配套使用,具备光感自动控制功能,当环境光照强度低于设定阈值时可自动开启补光。补光角度与亮度均可灵活调节,既能保证夜间、阴雨天等低光环境下的图像采集清晰度,又能避免强光干扰驾驶员视线,保障作业安全。

3.1.3 红绿灯信号检测器

红绿灯信号检测器选用工业级信号采集设备,支持 220 VAC 开关量信号采集,通过 485 通讯协议与 PLC、GMOS 抓拍摄像机进行数据交互,可实时采集并传输红绿灯状态信号,采集精度高、响应速度快,为闯红灯行为判定提供准确可靠的信号支撑。设备部署于电气房内,有效规避户外恶劣环境影响,保障长期稳定运行。

3.2 现场处理与传输单元

现场处理与传输单元部署在轨道吊电气房内,主要包括终端服务器和二层工业交换机,完成现场数据的处理、暂存和网络传输。

(1)终端服务器:选用工业级嵌入式服务器,具备数据处理、存储和网络通讯功能,可对前端抓拍设备的采集数据进行现场判断和暂存,将闯红灯违法数据进行关联打包,同时实现与后端平台的实时数据交互;

(2)二层工业交换机:为前端抓拍摄像机、补光灯、终端服务器、红绿灯信号检测器等设备提供网络接入,实现现场设备的互联互通,并通过光纤将数据

传输至中控机房,保证数据传输的稳定性和高速性。

3.3 后端管理单元

后端管理单元部署在码头中控机房,作为系统管理核心,主要包含平台服务器与监控终端两部分。

(1)平台服务器:选用机架式工业服务器,配置大容量硬盘与高性能处理器,搭载闯红灯管理软件及数据库,负责前端各类数据的汇聚、存储、分析与管理工作。同时,系统可实现与码头智慧安防系统、GiNMS 设备管理系统的无缝联动;服务器采用双机热备模式,可有效防止数据丢失,保障系统 7×24 小时连续稳定运行。

(2)监控终端:由监控主机、高清显示器、键鼠等设备组成,可实现集卡车道实时视频预览、闯红灯报警信息展示、抓拍图片查看、数据检索等功能,是管理人员操作系统、掌握现场情况的核心交互界面。

3.4 交通灯配套硬件

为保证集卡驾驶员和系统抓拍设备均能清晰识别红绿灯状态,对轨道吊作业区的交通灯进行配套升级,设置两级红绿灯:

(1)一级红绿灯:安装在距离停止线约 10 米处,高度 2.5 米,正反面均显示红绿灯状态,保证集卡驾驶员清晰可见,同时便于抓拍设备抓拍到红绿灯状态与集卡的同框画面;

(2)二级红绿灯:安装在轨道吊门腿上,高度约 6 米,保证超车道集卡和后方排队集卡均能清晰识别红绿灯状态,避免因视线遮挡导致的闯红灯行为。

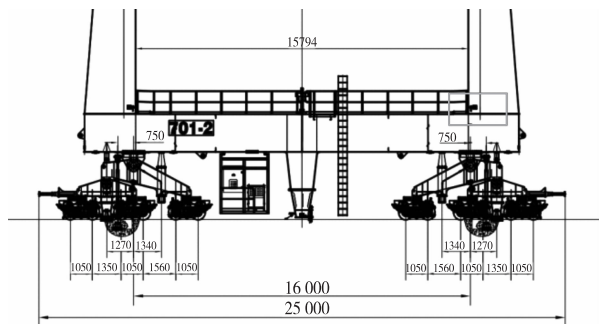


图 7 轨道吊集卡闯红灯监测系统硬件现场安装示意图

注:图 7 展示了 GMOS 抓拍摄像机、补光灯、两级红绿灯的安装位置和尺寸参数,摄像机高度 5.5

米,与红绿灯水平距离 15 米,一级红绿灯高度 2.5 米,距离停止线 10 米,二级红绿灯高度 6 米,安装在门腿正中。

4 系统实现与现场测试

4.1 系统现场实现

该系统在宏港码头 42 台轨道吊 U 型堆场作业区完成现场部署与实现,共安装 84 台 GMOS 电警抓拍摄像机、84 台 LED 补光灯、42 台红绿灯信号检测器、42 台终端服务器、21 台二层工业交换机,中控机房部署 2 台平台服务器(双机热备)和 4 台监控终端,所有设备均接入码头工业以太网和 GiNMS 设备管理系统,系统与码头现有 PLC 控制系统、智慧安防系统完成联动调试,实现了数据的互通和功能的协同。

系统现场部署完成后,我们对整套系统硬件设备进行了全面的安装校准,同时逐一对各软件模块开展功能调试,确保各项功能均达到预设设计标准。具体调试内容包括:精准校准摄像机拍摄角度,结合现场实际环境优化角度设置,保障拍摄覆盖无死角;合理划定检测区域与触发线,根据现场作业场景明确监测范围及触发条件;优化车牌识别算法,通过多组现场实际场景样本测试,提升识别准确率与响应速度;全面测试报警信息推送功能,验证信息推送的及时性与准确性,确保报警信号可快速传递至相关负责人。经调试,系统各项功能均满足前期设计要求,可正常投入现场使用。

4.2 现场测试方案

为验证系统的功能完整性、性能指标和环境适应性,在宏港码头 U 型堆场轨道吊作业区开展现场测试,测试时间为连续 30 天,覆盖白天、夜间、阴雨天、大雾天等不同环境,测试内容包括功能测试、性能测试和环境适应性测试三部分。

4.2.1 功能测试

功能测试主要验证系统的闯红灯抓拍、车牌识别、实时报警、数据检索、系统联动等核心功能的完整性和准确性,测试结果如表 1 所示。

表 1 系统功能测试结果

测试项目	测试内容	测试结果	判定结果
闯红灯抓拍	红灯状态下模拟集卡闯红灯,检查抓拍图片的完整性和清晰度	抓拍 3 张高清图片,反映完整违法过程,符合国标	合格
车牌识别	测试不同类型、不同颜色车牌的识别准确率	可识别所有预设车牌类型,识别效果良好	合格

续表 1

测试项目	测试内容	测试结果	判定结果
实时报警	模拟闯红灯行为, 检查报警信息推送的实时性和完整性	报警响应无延迟, 信息完整, 弹窗展示正常	合格
数据检索	按不同条件检索违法记录, 检查检索结果的准确性和快速性	检索结果准确, 响应时间 < 1 s	合格
数据分析	检查数据统计分析的维度和可视化展示效果	多维度分析, 可视化效果良好, 支持报告导出	合格
PLC 系统联动	检查红绿灯信号采集的准确性	信号采集实时、准确, 无延迟	合格
智慧安防系统联动	检查闯红灯报警事件同步展示效果	报警事件同步展示, 信息完整	合格

测试结果表明, 系统各项核心功能均能正常实现, 功能完整性和准确性满足宏港码头的作业管理要求。



图 8 闯红灯监测系统测试

4.2.2 性能测试

性能测试主要验证系统的车辆捕获率、车牌识别准确率、数据传输稳定性等关键性能指标, 测试期间共监测通行集卡 1286 辆次, 其中模拟闯红灯集卡 200 辆次, 测试结果如表 2 所示。

表 2 系统性能测试结果

性能指标	测试要求	实际测试结果	判定结果
车辆捕获率	≥99%	99.6%	合格
车牌识别准确率	≥95%	98.2%	合格
报警响应时间	<3 s	<1 s	合格
数据传输丢包率	<0.1%	0%	合格
系统连续运行时间	7 × 24 h	连续 30 天无故障	合格

本次测试结果表明, 系统各项关键性能指标均优于预设设计标准。其中, 车辆捕获率与车牌识别准确率两项核心指标, 经现场多时段、多场景实测验证, 完全适配港口日常作业管理需求; 数据传输过程稳定可靠, 未出现丢包、延迟等异常情况, 结合港口作业连续性特点, 系统可稳定实现 7 × 24 小时连续无故障运行, 为港口作业安全管控提供持续可靠的技术支撑。

5 结论

针对自动化集装箱码头 U 型堆场轨道吊作业期间, 集卡闯红灯行为带来的安全管控难题, 结合码头海洋性作业环境 (高湿、多盐雾、易出现强逆光等) 及现场实际作业需求, 设计并实现了一套集卡闯红灯监测系统。该系统核心采用 GMOS 电警抓拍技术与车牌识别算法相结合的方式, 搭建前端采集、数据传输、后端管理三级架构。硬件选型遵循标准化原则, 结合堆场作业区域地形特点完成规范安装; 软件设计采用模块化思路, 融入智能化识别技术, 最终实现集卡闯红灯行为精准抓拍、车牌信息自动识别、违规行为实时报警、相关数据存储与快速检索, 以及与码头现有调度、安防等多系统联动的功能, 基本满足现场安全管控实际需求。

系统在宏港码头 42 台轨道吊作业区的现场应用结果表明, 车辆捕获率达 99.6%, 车牌识别准确率达 98.2%, 闯红灯抓拍符合国家相关技术规范, 系统可在港口高温、高湿、盐雾、震动等特殊环境下 7 × 24 小时连续稳定运行, 提升了码头堆场作业的安全性和管理的智能化、精细化水平。

参考文献:

- [1] 郑瑞旭, 张炎生. 基于 STM32 的智能交通灯控制系统设计[J]. 机电工程技术, 2021, 50(05): 109 - 111.
- [2] 苏德福, 陈彬晖, 林诗雨, 等. 基于模糊车流量估计的智能交通系统 SOPC 设计[J]. 电视技术, 2023, 47(5): 41 - 44.
- [3] Oliveira L F P, Luz P D G, Manera L T. Development of a wireless traffic light controller system, with real-time traffic monitoring and green wave coordination applied to smart cities[J]. IEEE, 2020.
- [4] Krishna B H, Patra P S K, Kalpana G. Real time traffic light controlling system using morphological operators and Fuzzy logic[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 1964(6): 062061.

(下转第 70 页)

参考文献:

- ### 参考文献:
- [1] 李品文,孙文磊,陈俊,等. 基于 AR 的机器人远程手势遥操作系统开发[J]. 现代电子技术,2025,48(12): 148-156.
 - [2] 蒋煜瑶,刘文刚. AR 交互数字媒体技术在展示空间设计中的应用[J]. 信息技术,2025(2):122-129.
 - [3] ZHANG H,LEE R,WU J,et al. Interactable mobile computing framework for augmented reality glasses[C]. International Conference on Optics,Electronics,and Communication Engineering(OECE 2024),2024:143.
 - [4] Chakravarthula P. Present and future of everyday-use augmented reality eyeglasses[J]. IEEE Computer Graphics and Applications,2025,45(1):56-66.
 - [5] 胡俊伟,何海洋,雷英佳,等. 双臂协作机器人的增强现实人机交互遥操作系统[J]. 传感器与微系统,2025,44(11):87-92.
 - [6] 张钊荣,陈文娟,智婷,等. AR/VR 等近眼显示系统中的晕动症问题[J]. 激光与光电子学进展,2025,62(12):28-44.
 - [7] 王畅,潘宇,林浩岳,等. 基于 K210 单片机的声源定位追踪系统[J]. 物联网技术,2025,15(4):14-17+20.
 - [8] 陈志刚,高冰. 基于 STM32 单片机的无刷直流电机自动化控制系统[J]. 电子设计工程,2025,33(3):58-62.
 - [9] 于大国,邓文斌. 基于角锥棱镜与双 PSD 的深孔直线度检测[J]. 机械设计与研究,2026,42(1):192-199.
 - [10] 何非. 基于双单向通信的跨网络数据传输设备实现[J]. 成都信息工程大学学报,2025,40(6):766-771.
 - [11] 许广文,赵炎,王艳霞,等. 基于 ESP32 的负荷测量仪的设计与应用[J]. 工业仪表与自动化装置,2025(3):60-64+74.
 - [12] 雷光政,乔建华,吴言,等. 改进 YOLOv2 的轻量化嵌入式人脸检测算法及实现[J]. 太原科技大学学报,2025,46(5):426-432.
 - [13] 王芳,李慧涛,王凯,等. 改进 PP-YOLOv2 的水下侧扫声呐图像多目标识别[J]. 南开大学学报(自然科学版),2024,57(3):1-7.
 - [14] 秦垵忻,王炜昕,王砚生. 基于改进 MFCC 特征提取和 DNN 网络的机器人语音识别方法研究[J]. 计算机测量与控制,2025,33(2):246-253.
 - [15] 李瑞琪,李燕,杜水婷,等. 基于人工神经网络的电力变压器声纹识别技术[J]. 沈阳工业大学学报,2024,46(4):380-387.
 - [16] 符恬恬,郑斌琪,李成娟,等. 基于 PCA 和非线性映射改进的 MFCC 特征提取方法[J]. 电子测量技术,2025,48(10):93-99.

(上接第 37 页)

- [6] 杨飞. 基于改进 GWO 的电力故障自动诊断模型设计[J]. 电子设计工程, 2026, 34(9): 62-66.
- [7] 张伟, 李绍铭, 赵乾致. 基于 STM32 干式变压器智能温控器设计[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(09): 111-112+115.
- [8] 孙珂, 姚晓君. 变压器电阻式温度计原理及故障处理[J]. 科技创新与应用, 2020(35): 91-92.
- [9] 王宇, 王宇. 基于改进 PSO 算法的变压器顶层油温预测[J]. 电工技术, 2023(19): 45-48+51.
- [10] 吴宇浩, 朱文忠, 陈艺月, 等. 基于特征选择和 RS-LSTM 的变压器故障诊断方法[J]. 现代电子技术, 2025, 48(20): 147-154.
- [11] 李泽波. 油浸式变压器在线监测与预警系统的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2024.

(上接第 55 页)

- [5] 陈浩健,蔡俊东. 基于单片机的智能交通灯控制系统设计实现[J]. 电子制作, 2025, 33(22):64-67.
- [6] 刘思萌,文峰. 交通灯配时与车辆诱导协同控制技术[J]. 沈阳理工大学学报, 2025, 44(4):43-49.
- [7] 李肖,李慧. 基于 MCGS 与 PLC 的智能交通灯控制系统设计[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(5):136-137.
- [8] 秦侨,杨超,杨海涛,等. 结合模糊控制的深度强化学
- (1):165-169.
- [9] 陈富强. 基于计算机视觉的交通灯识别系统设计[J]. 装备制造技术, 2024(2):108-111.
- [10] 张燕,任安虎,陈洋. 基于机器视觉的智能交通控制系统设计[J]. 信息技术, 2025, 49(2):55-60.
- [11] 尹延龙,丁瑞好,董铮. 基于树莓派的交通灯实时控制系统设计[J]. 电子制作, 2024, 32(2):89-93.