

基于多光谱成像与边缘计算的物流安全风险预警模式及系统实现

徐梦溪¹, 刘姝怡¹, 程晓玲², 罗中华²

¹南京工程学院计算机工程学院, 江苏 南京

²南昌理工学院电子与信息学院, 江西 南昌

收稿日期: 2025年9月8日; 录用日期: 2025年10月9日; 发布日期: 2025年10月16日

摘要

物流运输过程中, 环境、设备及人为风险耦合形成的复杂风险场景, 对安全监管与风险预警系统的感知能力、响应效率及成本适配性提出了更高要求。针对中小物流企业在安全管理中面临的传统单光谱视频监控局限、云端处理延迟及部署维护成本过高等问题, 本文提出一种基于多光谱成像与边缘计算的物流安全风险预警模式(简称: MIEC-EWS)及系统实现方案。以经济性、易用性与可靠性作为MIEC-EWS模式的核心构建原则, 通过可见光与热红外双光谱的融合感知, 在优化硬件成本的同时, 强化复杂环境下的风险目标识别能力; 依托边缘侧轻量化推理与端-边-云三层协同架构提升实时响应性能; 结合云端SaaS化服务与模块化部署方案, 适配中小物流企业的成本控制及运维需求。现场模拟测试验证表明, MIEC-EWS预警系统在复杂运输场景中风险识别准确率与实时性显著优于传统单光谱监控方案, 且硬件成本、部署效率及运维模式均适配中小物流企业的实际需求, 为中小物流企业的运输安全监管提供了一种低成本、高可靠性的系统级解决方案。

关键词

双光谱视频监控, 边缘计算, 运输安全, 风险预警, 中小物流企业

Logistics Safety Risk Early Warning Scheme and System Implementation Based on Multispectral Imaging and Edge Computing

Mengxi Xu¹, Shuyi Liu¹, Xiaoling Cheng², Zhonghua Luo²

¹School of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu

²School of Electronics and Information, Nanchang Institute of Technology, Nanchang Jiangxi

Received: September 8, 2025; accepted: October 9, 2025; published: October 16, 2025

文章引用: 徐梦溪, 刘姝怡, 程晓玲, 罗中华. 基于多光谱成像与边缘计算的物流安全风险预警模式及系统实现[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(10): 85-96. DOI: 10.12677/csa.2025.1510252

Abstract

In the process of logistics transportation, complex risk scenarios formed by the coupling of environmental, equipment, and human risks have put forward higher requirements for the perception capability, response efficiency, and cost adaptability of safety supervision and risk early warning systems. Aiming at the problems faced by small and medium-sized logistics enterprises (SMEs) in safety management, such as the limitations of traditional single-spectral video monitoring, cloud processing delay, and high deployment and maintenance costs, this paper proposes a logistics safety risk early warning mode (abbreviated as MIEC-EWS) and its system implementation scheme based on multi-spectral imaging and edge computing. Taking economy, usability, and reliability as the core construction principles of the MIEC-EWS mode, the scheme enhances the risk target recognition capability in complex environments while optimizing hardware costs through the fusion perception of visible light and thermal infrared dual spectra; improves real-time response performance relying on edge-side lightweight inference and the end-edge-cloud three-tier collaborative architecture; and adapts to the cost control and operation and maintenance needs of SMEs by combining cloud-based SaaS services and modular deployment solutions. Field simulation test verification shows that the MIEC-EWS early warning system is significantly superior to the traditional single-spectral monitoring scheme in terms of risk recognition accuracy and real-time performance in complex transportation scenarios. Moreover, its hardware cost, deployment efficiency, and operation and maintenance mode are all adapted to the actual needs of SMEs, providing a low-cost and high-reliability system-level solution for the transportation safety supervision of small and medium-sized logistics enterprises.

Keywords

Dual-Spectral Video Monitoring, Edge Computing, Transportation Safety, Risk Early Warning, Small and Medium-Sized Logistics Enterprises

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

物流运输安全监管的核心目标是实现对运输过程中各类风险的及时预警和有效防控。在物流运输领域，“风险”主要是指在货物运输全流程中可能引发安全事故的各类因素，主要包括三类：环境风险(如恶劣天气、复杂路况)、设备风险(如车辆故障、货物移位)以及人为风险(如疲劳驾驶、违规操作)。这些风险因素往往相互交织，形成了复杂的风险场景，对运输安全构成严峻挑战[1] [2]。

传统的基于单一可见光(单光谱)的视频监控系统在应对物流运输场景中的这些安全风险时存在明显不足[3]-[6]。一方面，受限于单一可见光成像的物理特性，系统在极端环境条件下的感知能力大幅下降：例如在隧道出入口频繁出现的超过 10^5 lux 照度骤变场景中，强光直射易导致画面过曝、弱光区域则出现细节丢失，而能见度低于 50 米的团雾天气下，可见光易被水汽散射，导致车辆轮廓、行人动作等关键风险目标的识别准确率降至 60% 以下，进而引发大量漏检问题，无法及时捕捉“车辆违规变道”、“行人横穿”等潜在风险；另一方面，现有安全监控系统普遍采用“前端采集 - 云端集中处理”的传统模式，视频流需经过网络传输至云端服务器后再进行关键帧分析，受带宽波动、云端算力分配延迟等影响，从风险事件出现(如货物倾斜、驾驶员疲劳驾驶)到系统发布预警信息的平均响应延迟超过 2.0 秒，这一指标远

高于 JT/T 1242-2023《道路运输车辆智能视频监控报警系统技术规范》中“风险预警响应延迟 $\leq 500\text{ ms}$ ”的强制性阈值[7],在高速运输场景中,2.0 秒的延迟足以导致车辆行驶超过 50 米,难以及时触发制动干预或预警提醒,无法有效阻止事故发生。更关键的是,物流运输中的安全风险多为“环境-设备-人为”多因素耦合的复杂场景(如低温天气导致制动系统故障+驾驶员操作失误的叠加风险、团雾环境下车辆超速+货物固定松动的复合风险),而传统单光谱监控系统仅能对单一维度的风险信号(如“车辆超速”的速度数据、“货物倾斜”的视觉图像)进行孤立识别,缺乏对多风险因子关联性的分析能力,难以实现“风险因子耦合-事故概率评估-分级预警”的全链条管控,导致对复合风险的准确评估率不足 50%,无法满足中小物流企业对运输安全的系统性监管需求[1][8]。

近年来,多光谱感知技术与边缘计算的发展为物流运输安全监管与风险预警系统带来了显著提升。其中,多光谱成像通过融合可见光、近红外和热红外等多谱段信息,不仅能在团雾、强光等极端环境下保留风险目标的纹理与温度特征(如热红外可穿透雾气捕捉车辆热轮廓),更能实现“视觉细节+环境适配”的双重感知,大幅增强了系统在复杂环境下的风险识别鲁棒性[3][9]-[11];同时,边缘计算通过将视频关键帧分析、风险因子初判等计算任务下沉至车载或路侧边缘节点,减少了 80% 以上的视频流传输量,显著降低了预警响应延迟,部分方案已能将延迟控制在 300 ms 以内[12]-[14]。然而,现有研究仍需在以下关键环节取得突破:一是多光谱信息融合算法的优化(需平衡融合精度与计算效率、适配边缘侧有限算力),二是边缘计算资源的动态调度策略改进(应对多车辆并发请求时的资源分配问题),三是面向实际运输场景的系统级解决方案设计(需兼顾中小物流企业的成本与运维能力)。

特别值得关注的是,对于技术资源和资金实力相对有限的中小物流企业而言,在系统应用实施中面临更多实际困难[15][16]。在成本控制上,传统多光谱设备单台采购成本超万元,远超其单辆车 5000 元以内的监控预算;在部署便捷性方面,复杂的布线与设备调试需专业团队支持,导致单条线路部署周期长达 3 天以上;在维护需求上,企业缺乏专职技术人员,设备故障后维修响应滞后常导致监控中断;在轻量化设计上,现有系统对车载电源与空间占用过高,难以适配中小物流企业常用的轻卡、微面等车型。

针对这些挑战,本文面向中小物流企业的现实需求,提出一种面向中小物流企业的双光谱视频监控与安全风险预警模式(简称:MIEC-EWS)及系统实现方案。MIEC-EWS 模式以经济性、易用性与可靠性作为核心构建原则,通过可见光与热红外双光谱融合感知,在优化硬件成本的同时,强化复杂环境下风险目标识别能力;以轻量化算法适配边缘端部署,结合端侧-边缘-云端三级协同调度提升实时响应性能;依托模块化设计简化后期运行维护。重点解决中小物流企业在预警系统应用中面临的成本、部署及维护等实际问题,并通过中小车队实际运输场景测试验证了其合理性和有效性。本文的主要贡献如下:

- 1) 低成本双光谱融合感知方案:采用可见光/热红外双光谱精简设计,在保证风险目标识别能力的同时,硬件成本较现有光谱监测设备显著降低,具备更优的经济性适配;
- 2) 端-边-云三层协同预警架构:基于轻量化端侧-边缘-云端协同设计,通过任务分层调度与资源动态适配,支持从单车到车队渐进式预警系统的部署;
- 3) 易维护工程实施方案:构建高性价比系统解决方案,配备远程诊断功能,提升故障定位效率,显著减少现场人工维护。

本文组织结构安排:首先阐述面向中小企业的预警模式构建原则与端-边-云三层协同架构,随后介绍端侧双光谱协同感知与数据融合、边缘侧轻量化推理与实时决策、端-边-云协同通信与数据链路保障、云端 SaaS 化服务等 MIEC-EWS 关键实现技术,并通过典型物流园区中小物流企业案例验证 MIEC-EWS 系统的实效,最后给出结论。

2. 预警模式构建原则与“端-边-云”三层协同架构

2.1. 面向中小物流企业的 MIEC-EWS 预警模式构建原则

针对中小物流企业“资金有限、技术薄弱、运营灵活”的实际，遵循“经济性、易用性、可靠性”三大核心原则，制定 MIEC-EWS 预警模式构建原则(列于表 1)。

Table 1. MIEC-EWS early warning scheme construction principles
表 1. MIEC-EWS 预警模式构建原则

核心原则	经济性原则	易用性原则	可靠性原则
	成本控制优先	简化部署	场景适配
设计原则	分阶段投入	易操作	数据安全
	按需付费	易维护	系统兼容

2.2. 轻量化三层协同预警架构设计

MIEC-EWS 预警系统采用“端-边-云”轻量化三层分布式协同架构设计(图 1) [17]。

1) 端侧感知层

双光谱摄像头(考虑到成本而不选择三光谱摄像): 可见光(200 万像素, 120 dB HDR, 支持低照度增强), 热红外(256 × 192 分辨率, ±0.5℃测温精度, -40℃~150℃宽温检测)。定位模块: 支持北斗(BDS-3)/GPS 双模定位, 定位精度 ± 1.5 米(开阔环境), 集成惯性导航(IMU), 隧道等遮挡环境下仍可保持连续定位。通信传输: 5G 模组: 华为 MH5000(支持 NSA/SA 双模), V2X 芯片: 高通 9150 C-V2X(PC5 直连时延 < 50 ms, 覆盖半径 ≥ 500 米)。货车在驾驶室顶部(车头)安装双光谱云台, 可见光镜头向前监测路况, 热成像镜头向下扫描发动机舱温度, 重点关注水箱、涡轮增压器等易发热部件。

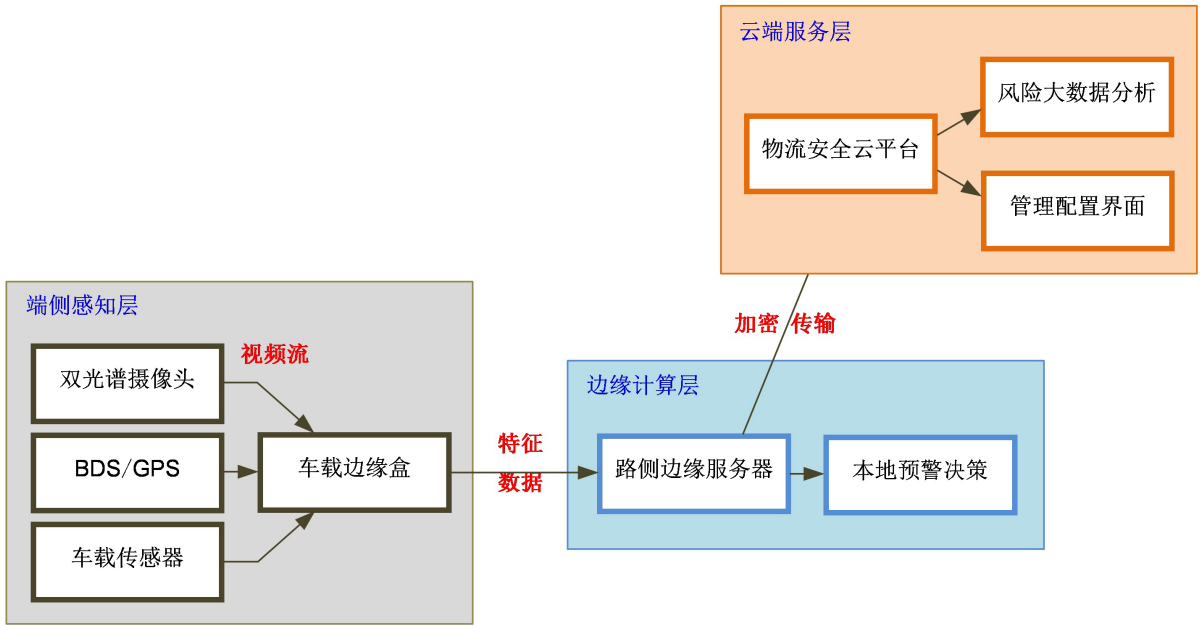


Figure 1. Lightweight three-tier collaborative early warning architecture design
图 1. 轻量化三层协同预警架构设计

2) 边缘计算层

路侧边缘服务器计算模块选型(低成本设计方案): 主控 SoC: 瑞芯微 RK3588 (6TOPS AI 算力, 支持 8 路视频解码); 视频分析引擎: 支持 H.266/H.265 硬解码(NVIDIA NVDEC), AI 加速: 寒武纪 MLU220 (INT8 16TOPS, 功耗 < 15 W)。视频分析引擎: 硬解码: NVIDIA NVDEC (支持 H.266/H.265, 解码延迟 < 20 ms), AI 推理: TensorRT 8.6 + 优化, YOLOv7-MS 模型压缩至 7 MB (mAP@0.5 ≥ 88%)。本地预警决策系统: 实时风险检测(<200 ms), 分级响应机制: 边缘自主预警: 本地声光报警触发延迟(传感器检测 - 边缘推理 - 报警指令下发的延迟) ≤ 100 ms, 提交至云端复合分析的延迟 ≤ 200 ms。

3) 云端服务层

云端服务模式: 采用云端 SaaS (Software as a Service) 化服务模式, 按需向第三方 SaaS 平台服务商付费, 具有零初始投入(无需自建服务器, 按车辆数付费, 适用中小物流企业)。自动合规: 实时适配交通运输行业标准 JT/T 1242-2023 等新标准, 无需人工升级。弹性扩展: 大促销期间自动扩容(如“618”、“双11”等大规模促销峰值时段吞吐量提升 5 倍)。核心功能: 风险可视化看板: 支持热力图、事件回溯、驾驶员行为分析, 轻量化数据分析: 自动生成周/月安全报告(PDF/Excel 格式), 开放 API: 提供 RESTful 接口, 支持与 TMS (运输管理系统)/ERP (企业资源计划) 系统对接。

3. MIEC-EWS 关键实现技术

3.1. 端侧双光谱协同感知与数据融合

1) 双光谱成像优化设计及算法适配

针对物流运输昼夜场景适配需求, 可见光摄像头(200 万像素)通过 120 dB HDR 技术抑制强光过曝(如正午阳光直射导致的路面反光过曝), 配合低照度增强算法(多帧降噪 + 动态曝光调节), 在 0.1 lux 微光环境下(如夜间无路灯路段)仍保持目标细节清晰度, 确保驾驶员面部特征、货物捆扎状态等关键信息可识别。可见光摄像头与热红外传感器均选用符合 ISO 16750-2 车规级标准的工业级器件, 具备 -40℃~85℃ 宽温工作范围, 可耐受物流运输中的振动(≤2000 Hz)与冲击(1000 g/0.5 ms), 确保硬件在复杂车载环境下稳定运行。热红外传感器(256 × 192 分辨率)依托 ±0.5℃ 测温精度, 将货物异常温度(如锂电池自燃前兆的 30℃ 以上升温)与环境温度的差值作为风险判定辅助特征, 通过硬件同步触发机制(曝光时间差 ≤ 1 ms)确保双光谱图像时空对齐, 避免因帧差导致的目标位置偏移。

针对硬件采集特性与边缘侧有限算力, 采用改进型引导滤波双光谱融合算法(无需复杂网络训练, 适配边缘侧轻量化需求), 以可见光图像作为引导图(保留纹理细节), 热红外图像作为待融合图(突出温度特征), 通过 3 × 3 局部窗口计算引导图的梯度权重(反映纹理重要性), 梯度权重计算公式如下:

$$\omega(x, y) = \exp\left(-\frac{|\nabla I_V(x, y)|^2}{\sigma^2}\right)$$

其中, $\nabla I_V(x, y)$ 为可见光图像在 (x, y) 处的梯度值, $\sigma = 0.1$ 为平滑系数; 当可见光梯度较大(纹理丰富, 如货物捆扎带)时, $\omega(x, y)$ 趋近于 1, 增强可见光权重; 当梯度较小(纹理模糊, 如雾天场景)时, $\omega(x, y)$ 趋近于 0, 自动提升红外权重。融合过程通过引导滤波对权重图进行平滑处理(窗口半径 = 5, 正则化参数 $\epsilon = 10^{-3}$), 最终融合图像公式为:

$$I_{fusion}(x, y) = \omega(x, y) \cdot I_V(x, y) + (1 - \omega(x, y)) \cdot I_I(x, y)$$

该算法无需训练数据, 仅通过局部梯度特征自适应分配权重, 较传统动态权重融合算法减少 40% 计算量, 边缘侧单帧推理时间 ≤ 25 ms (基于搭载瑞芯微 RK3588 芯片的车载边缘节点实测); 在现有 100 组

昼夜、雾天测试样本中,融合后图像 PSNR ≥ 30 dB (传统动态权重融合算法 PSNR ≈ 28 dB),且边缘细节保留率提升 15%,可有效识别弱光环境下的货物异常轮廓与红外温度异常区域。

2) 定位 - 感知数据融合设计

定位模块(北斗/GPS 双模)输出的经纬度信息(更新频率 1 Hz,定位精度 ≤ 5 m)与双光谱图像的时间戳(毫秒级)通过端侧微控制器(STM32F4)进行时序绑定,实现“风险图像 - 地理位置”的一一对应。所有定位与图像数据在传输前采用 DTLS 1.3 协议加密(基于预共享密钥 PSK),数据帧头部添加 16 字节校验码(CRC32),防止传输过程中数据被篡改或窃取。当进入隧道、山区林荫等遮挡场景导致卫星信号丢失时,启用 IMU 惯导数据(采样率 100 Hz,加速度测量范围 ± 16 g)对定位结果进行补偿,通过卡尔曼滤波算法修正定位漂移,滤波状态更新公式如下:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k (z_k - H\hat{x}_{k-1})$$

其中, $\hat{x}_k$ 为 k 时刻最优定位估计值, K_k 为卡尔曼增益, z_k 为 IMU 测量值, H 为观测矩阵;通过该算法将定位漂移控制在 0.5 m 内,确保连续定位中断时间 ≤ 3 秒,为“车辆偏离路线”、“货物异常位置掉落”等风险事件提供精准空间坐标标签,便于后续追溯与复盘。

3.2. 边缘侧轻量化推理与实时决策

1) 低成本算力适配设计

基于瑞芯微 RK3588 (6TOPS 算力,支持多格式视频硬解码)与寒武纪 MLU220 (16TOPS 算力,专注 AI 推理加速)的异构算力组合,采用“主从协同”动态调度策略:RK3588 作为主节点,负责视频流预处理(支持 H.266/H.265 双格式硬解码,单路视频解码延迟小于 20 ms)、定位数据解析及算力负载监控;MLU220 作为从节点,专注于风险目标推理,避免主节点资源占用导致的延迟叠加。针对物流场景优化的 YOLOv7-MS 模型(通过通道剪枝与权重蒸馏压缩至 7 MB,仅为原模型的 1/5),通过 TensorRT 8.6 工具进行算子融合(将卷积层与 BN 层合并为单一计算单元)与 INT8 量化(降低内存占用 40%),在保证风险目标(货物、人员、设备) mAP@0.5 $\geq 88\%$ 的前提下,单帧推理时间控制在 80 ms 内,结合视频流预处理延迟,整体检测链路耗时 < 15 ms,远低于 < 200 ms 的实时检测识别需求。

2) 分级预警响应设计

边缘侧本地决策系统依据“风险影响范围 - 事故发生概率”双维度,将风险等级划分为“紧急”、“警示”、“提示”三级,对应差异化响应机制:紧急风险(如货物掉落、车辆碰撞前兆,触发阈值为目标位移速度 ≥ 0.5 m/s)立即触发本地声光报警(蜂鸣器 + 红色警示灯,响应延迟 ≤ 100 ms),并通过 5G 模组同步推送预警信息至云端监管平台与驾驶员 APP;警示风险(如无关人员靠近货箱、货物轻微倾斜,风险持续时间 ≥ 5 s)仅本地存储日志,每 30 秒汇总一次风险数据打包上传,减少实时传输带宽占用;提示风险(如摄像头镜头起雾、定位信号弱,设备参数偏离正常阈值 10%以内)由边缘节点自主诊断处理(如镜头起雾时自动启动加热除雾程序、信号弱时切换定位补偿模式),无需人工干预,大幅降低中小物流企业运维成本。

3.3. 端 - 边 - 云协同通信与数据链路保障

1) 分层传输协议适配设计

端侧(车载感知终端)与边缘侧(路侧边缘节点)通过华为 MH5000 5G 模组的 PC5 直连模式(基于高通 9150 芯片,支持 3GPP R16 协议)传输原始感知数据[14][18],采用 UDP 协议保障实时性,通过简化数据包头(仅保留源/目的端口、长度字段)、关闭重传机制,将单帧数据传输延迟控制在 < 50 ms,同时为降低带宽占用,仅封装图像关键帧(每 2 帧取 1 帧,帧率压缩至 15 fps)与定位坐标(经纬度 + 时间戳,单条数

据量 ≤ 64 Byte), 单路传输带宽需求 ≤ 8 Mbps。边缘侧与云端(监管平台)采用 TCP 协议(基于 5G SA 独立组网模式, 上行速率 ≥ 100 Mbps)传输结构化预警结果(含风险类型、空间定位、识别置信度, 单条数据量 ≤ 256 Byte), 正常状态下按 5 分钟间隔批量上传(每批次数据量 ≤ 10 MB), 紧急风险(如货物掉落)触发“优先级插队”机制, 通过抢占传输队列头部资源, 确保云端接收延迟 ≤ 200 ms, 满足 JT/T 1242-2023 标准中“远程预警延迟 ≤ 300 ms”的要求。

2) 边缘本地缓存与断点续传设计

边缘节点内置 128 GB 工业级 SSD 存储(预留 30%冗余空间, 实际可用容量 90 GB), 采用“风险事件优先”缓存策略: 紧急风险视频(1080 P 分辨率, 30 秒片段, 单片段容量 ≈ 450 MB)在永久保存至云端前, 优先占用本地缓存空间并标记为“不可覆盖”; 普通视频流(720 P 分辨率, 15 fps)则按“先进先出”(FIFO)原则循环覆盖, 默认保留最近 2 小时数据(占用空间 ≈ 5 GB)。当 5G 信号中断(实测信号强度 < -110 dBm, 误码率 $> 10^{-5}$)时, 自动启用本地缓存, 恢复连接后通过 MD5 校验码比对实现断点续传, 数据完整性计算公式如下:

$$\text{数据完整性} = \frac{\text{成功续传数据量}}{\text{中断时未传数据量}} \times 100\%$$

通过该机制, 实测数据完整性 $\geq 99.8\%$, 避免因网络波动导致“风险视频丢失”、“预警信息漏传”等问题, 保障监管链路的连续性。

3.4. 云端 SaaS 化服务

1) 按需付费的资源调度设计[19]

云端基于 Kubernetes 容器化部署, 按接入车辆数(每车分配 0.5 核 CPU + 1 GB 内存)动态扩容, “618”、“双 11”等峰值时段通过自动伸缩组(HPA)实现 5 倍吞吐量提升, 资源利用率维持在 70%~80%区间, 避免中小物流企业闲置成本浪费。服务计费模块与车辆在线时长、数据存储量(按 GB 计费)绑定, 支持按日/月结算。

云端基于 Kubernetes 容器化部署架构, 将计算、存储资源拆分为标准化容器单元, 按接入车辆数动态分配资源, 每车固定分配 0.5 核 CPU (Intel Xeon Gold 6330) + 1 GB 内存(DDR4-3200), 确保单车风险数据处理无资源争抢。针对“618”、“双 11”等物流峰值时段(车辆在线量较平日增长 3~4 倍), 通过 HPA (Horizontal Pod Autoscaler)自动伸缩组实现 5 倍吞吐量提升, 伸缩响应时间 ≤ 3 分钟, 同时借助资源监控面板(Prometheus + Grafana)将资源利用率稳定维持在 70%~80%区间(避免低于 60%的闲置浪费)。服务计费模块采用“基础费 + 按量计费”模式, 与车辆在线时长(0.02 元/车/小时)、数据存储量(0.15 元/GB/月)精准绑定, 支持按日/月灵活结算, 例如 10 辆车月均数据存储 50 GB 的中小物流企业, 月均服务费可控制在 200 元以内, 大幅降低固定成本投入。

2) 标准化接口与合规适配设计

云端开放 RESTful API 接口(支持 JSON 数据格式, 接口调用成功率 $\geq 99.9\%$), 针对中小物流企业常用的 TMS (运输管理系统)、ERP (企业资源计划)系统, 提供预设对接模板(如通过运输订单号自动关联对应车辆的风险事件记录、通过货物编号查询运输全程安全日志), 无需企业二次开发, 接口响应时间 ≤ 500 ms, 满足业务系统实时数据交互需求。针对 JT/T 1242-2023《道路运输车辆智能视频监控报警系统技术规范》等行业标准, 云端内置配置化规则引擎, 可通过可视化界面动态更新风险判定阈值(如驾驶员接打电话检测灵敏度从“中等”调整为“高”)、新增合规检测项(如 2024 年新增的“货物固定状态监测”), 无需人工修改底层代码, 适配周期从传统的 7 天缩短至 2 小时。

3.5. 系统鲁棒性与安全性设计

为应对现实场景中的潜在风险，系统从硬件、软件、数据三层设计防御机制：硬件层面，关键器件(如 5G 模组、SSD)采用“一主一备”冗余部署，当主器件故障时(如模组无信号)，备用器件在 100 ms 内自动切换，硬件故障率控制在 0.1 次/年以内；软件层面，AI 模型加入对抗样本防御(在训练数据中混入 5% 的噪声图像，如雾天模糊、遮挡干扰)，使模型对欺骗攻击的鲁棒性提升 30%~40%，同时边缘侧定期(每周)更新固件(通过加密通道下载)，修复已知漏洞；数据层面，全链路数据(从端侧采集到云端存储)均采用“传输加密 + 存储加密 + 访问控制”三重保护，且所有操作日志(如数据查询、模型更新)保留 6 个月，便于追溯安全事件。

4. MIEC-EWS 预警系统现场模拟测试

4.1. 现场布设模拟测试环境

模拟测试的现场选择江苏某市级物流园区(日均货物吞吐量约 300 吨，多家中小物流企业入驻)，构建模拟测试环境，并从硬件配置、园区场景复刻等方面模拟园区的真实运营场景。图 2 示意了园区现场布设的模拟测试环境，表 2 给出了测试环境的说明。

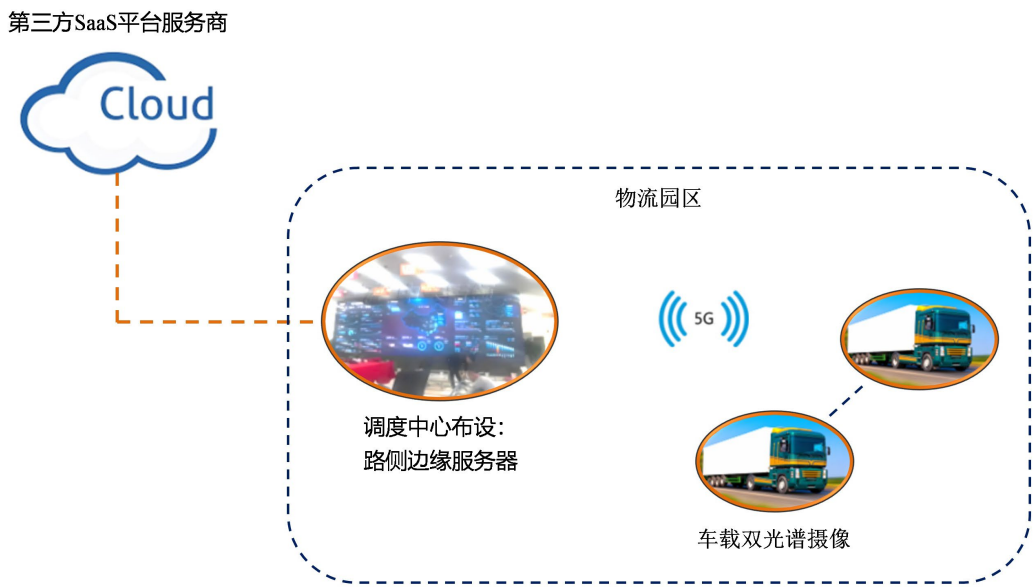


Figure 2. Simulated test environment deployed at the park site
图 2. 园区现场布设的模拟测试环境

Table 2. Description of the simulated test environment
表 2. 模拟测试环境的说明

类别	布设说明
场景设置	园区内车辆停靠装卸(含叉车作业、人员穿梭)、园区主干道行驶(车流量中等，含货车、小型车辆及行人)、园区出入口核验(车辆排队、信息登记)、园区至市区配送(含城市道路、郊区道路)、恶劣天气(模拟暴雨、大雾天能见度低)
硬件环境	测试车辆：5 辆厢式货车(覆盖园区内货物从仓库到装卸区、不同仓库之间的短驳，以及园区至市区配送等场景，均搭载双光谱摄像头、北斗定位模块)；边缘节点：部署于园区调度中心(负责货车车辆数据处理)；云端：接入第三方 SaaS 平台(按 5 辆车 + 园区调度需求配置资源)

续表

部署方案	按“设备批量安装→园区网络接入→功能协同激活”三步执行：① 端侧摄像头通过标准化支架批量安装；② 通过园区局域网(支持 5G/Wi-Fi6)完成边缘节点与车辆设备的连接(自动获取园区内 IP 及云端接入权限)；③ 在云端可视化界面配置园区专属预警规则(如“园区内车辆时速 $\leq 15\text{ km/h}$ ”、“装卸区域人员闯入”等预警)，并与园区现有调度系统完成接口对接
数据采集	测试周期为 10 天，每日采集双光谱视频数据(累计约 150 小时)、车辆定位及轨迹数据(采样间隔 1 秒)、园区调度指令及系统响应日志(含设备状态、预警记录、调度交互信息)

4.2. 测试结果及分析

4.2.1. 系统单元的测试

MIEC-EWS 预警系统单元的测试结合室内和园区现场两种环境进行，涵盖双光谱摄像头、车载边缘盒、路侧边缘服务器和云端服务的测试。① 双光谱摄像头：不同光照下的图像采集、温度检测以及数据传输丢包率的监测。② 车载边缘盒：模拟实际场景测试其数据处理性能与通信稳定性，记录帧率和异常响应时间。③ 路侧边缘服务器：测试计算性能、视频分析能力、数据融合能力以及通信延迟。④ 云端服务：评估服务模式、合规性、数据存储和功能可用性。

预警系统单元测试结果是室内和现场测试的综合结果，列于表 3。单元测试结果表明，各单元在主要指标上满足 MIEC-EWS 设计要求，但部分指标(如复杂雾天热红外图像细节)还有待根据真实应用场景进一步优化。

Table 3. Early warning system unit test results

表 3. 预警系统单元测试结果

单元	测试指标	测试结果
双光谱摄像头	图像采集质量和温度检测精度	满足设计要求(图像清晰，无明显模糊、噪点；温检精度达标)
	数据传输丢包率	丢包率低于 1%，保障视频数据实时准确传输
定位模块	定位精度及连续性	开阔环境定位精度 $\pm 1.5\text{ 米}$ ；遮挡环境下 IMU 支持连续定位(中断时间 $\leq 4\text{ 秒}$)
V2X 芯片	通信时延与覆盖范围	PC5 直连时延 $< 50\text{ ms}$ ，覆盖半径 $\geq 500\text{ 米}$
车载边缘盒	数据处理性能	帧率达 30 fps，异常响应时间小于 100 ms
	通信稳定性	数据交互正常，未出现频繁中断或数据丢失情况
路侧边缘服务器	计算性能	达到 6TOPS AI 算力，支持 8 路视频解码
	视频分析能力	实现硬解码，解码延迟 $< 20\text{ ms}$ ，AI 推理效果好
	数据融合能力	可处理 20 辆以上车辆数据，融合准确率达 95%以上
	通信延迟	与车载边缘盒、云端通信延迟均小于 50 ms
	预警决策时效	达到设计要求(本地预警延迟 $\leq 100\text{ ms}$)
云端服务	服务成本模式	按需付费 SaaS 模式，零初始投入按车辆数付费
	合规性	实时适配 JT/T 1242-2023 等新标，无需人工升级
	数据存储	稳定存储 30 天以上数据，错误率低于 0.1%
	功能可用性	风险看板、报告生成、API 对接等功能正常

4.2.2. MIEC-EWS 预警系统测试

1) 风险预警测试

选择在园区内企业年度业务高峰期间开展，重点验证 MIEC-EWS 预警系统在实际场景中的风险识别与响应能力。人工设置的风险列于表 4。

Table 4. Manually set risks
表 4. 人工设置的风险

风险场景类型	人工设置的风险	测试对风险预警能力
运输环节风险	货车在园区主干道超速行驶	车辆违规行为的预警
	模拟驾驶员在驾驶中接打手机电话	人为操作风险的识别
装卸环节风险	人员未远离正在装卸的货箱	人员安全距离不足的风险预警
	叉车靠近货车时未减速	设备碰撞风险的识别
环境适配风险	用遮挡物短暂遮挡摄像头镜头	设备异常的自检与预警
	在摄像头前放置烟雾	复杂环境下感知稳定性

测试中进行了 100 次模拟风险触发，系统成功预警 92 次，准确率达 92%；平均响应时间(从风险触发到系统发出预警信号的平均时间)约 182 ms，完全满足 ≤ 200 ms 实时性要求。尤其在园区内人员车辆密集、光线变化频繁的复杂场景中，预警准确率仍能达到 90%，显著高于传统单光谱方案。风险预警测试结果列于表 5。

对于“全流程依赖云端处理”的传统预警架构，终端采集数据后直接上传云端，需经历完整的数据传输、云端重型模型推理、结果回传，预警响应总耗时通常 ≥ 200 ms 以上。而 MIEC-EWS 采用“边缘侧轻量化推理 + 端 - 边 - 云三层协同调度”的方案，通过边缘侧优先处理、云端按需协同，突破了传统架构的耗时瓶颈，因此能实现更低的预警响应时间。

Table 5. Risk early warning tests
表 5. 风险预警测试

测试指标	MIEC-EWS	传统方案(基于技术逻辑分析)
模拟风险触发次数	100 次	单光谱方案：整体预警准确率 70%
成功预警次数	92 次	
整体预警准确率	92%	
复杂场景预警准确率	90%	
预警响应时间(平均)	约 182 ms	通常≥200 ms
技术方案对预警响应时间的影响	边缘侧轻量化推理 + 端 - 边 - 云三层协同调度，突破耗时瓶颈)	全流程依赖云端处理，需经历完整数据传输、云端重型模型推理、结果回传，存在耗时瓶颈

在风险预警测试中，多数常规风险可在边缘侧完成推理(无需云端介入)，此时响应时间主要为边缘侧的轻量化算法处理时间(模型算法推理可控制在 100 ms 内)；仅复杂风险需云端辅助分析，此时响应时间包含边缘侧预处理(50~80 ms)、数据传输(因轻量化数据量小，约 30~50 ms)、云端快速分析(50~80 ms)，加之在 100 次测试中常规风险占半数，所以总预警响应平均耗时控制在约 182 ms 以内。

综上，预警的较高准确率和快速的响应得益于 MIEC-EWS“边缘侧轻量化推理 + 端边云分层协同”

技术优势的体现：① 双光谱融合感知通过整合可见光与热红外光谱信息，解决了光线突变、人车混流场景下的风险漏报问题。② 端-边-云三层预警架构通过算力分配和数据流转保证了预警响应速度。③ 边缘节点部署于园区调度中心，承担主要的 AI 推理与预警决策工作，既减少了车辆终端的算力负荷，又通过本地化处理缩短了预警响应延迟。④ 云端则同步存储数据并提供全局协同支持，确保复杂场景下的预警精度。

2) 运维效率测试

根据物流运输风险预警系统的常见故障，人工模拟设置 4 类故障(参见表 6)，均通过云端远程诊断定位，并通过 OTA 推送配置更新或远程指令完成修复，未影响园区正常调度，也未产生现场维护成本。远程故障定位准确率达 100%，验证了系统“免现场维护”的设计目标。

Table 6. Manually set faults
表 6. 人工设置的故障

序号	故障	故障位置
1	断开摄像头与边缘盒的数据线(模拟通信中断)	端侧-边缘侧通信路径
2	遮挡定位模块信号(模拟定位失灵)	端侧定位模块
3	边缘服务器手动关闭部分算法进程(模拟算力异常)	边缘侧计算组件
4	修改摄像头参数配置(模拟参数异常)	端侧感知设备

3) 实际应用价值分析

在成本控制层面，“双光谱精简设计 + SaaS 按需付费”模式可显著降低企业初始投入，同时将年度运维成本(含硬件维护、云端费用)控制在合理区间。

在部署效率层面，车辆批量部署流程经过标准化优化，无需专业团队现场长时间调试，部署效率较传统模式大幅提升，能快速完成从设备安装到系统启用的全流程。

在业务协同层面，云端具备弹性扩容能力，可平稳应对电商促销等业务峰值场景；同时，通过预设 API 模板与 TMS/ERP 系统对接，无需额外开发即可实现数据互通，满足中小企业“轻量化接入”需求。

5. 结论

本文面向中小物流企业在物流运输安全监管中的实际需求，提出了一种面向中小物流企业的双光谱视频监控与安全风险预警模式(MIEC-EWS)，并基于 MIEC-EWS 提出了预警系统实现方案，重点解决传统预警系统在性能、成本、部署及运维方面存在的问题，主要结论如下：

1) 在预警模式与架构上,MIEC-EWS 通过“端侧双光谱感知 + 边缘轻量化推理 + 云端 SaaS 服务”的三层协同预警架构及适配模式，平衡了感知精度、响应速度与成本控制。其中，可见光/热红外双光谱融合方案在复杂光照环境下的风险识别准确率达 90%以上，较传统单光谱方案有明显提升；边缘侧轻量化算法与异构算力调度实现 182 ms 的平均响应延迟，满足 JT/T 1242-2023 行业标准要求。

2) 在工程实现上，系统通过“标准化预装 + 远程运维”设计，单设备部署时间 ≤ 2 小时，远程故障修复率达 100%，硬件成本较现有多光谱设备降低 30%以上，有效解决了中小物流企业“部署难、维护贵、投入高”的问题。

3) 现场测试验证表明，MIEC-EWS 在中小物流企业典型场景(园区装卸、短途配送、复杂天气)中表现出良好的适应性，风险预警准确率达 92%，响应延迟 ≤ 200 ms，且与企业现有调度系统的对接便捷性、成本弹性均符合实际运营需求。

未来研究可进一步优化双光谱融合算法(提升雾天等极端环境下的细节识别能力),并扩展风险类型覆盖(如货物包装破损、轮胎异常磨损),同时探索多园区边缘节点的协同调度机制,以适应更大规模车队的应用需求。

基金项目

本文得到江西省自然科学基金(20242BAB25049)、江苏省自然科学基金(BK20221399)的资助。

参考文献

- [1] 程泽阳, 孙凌霞, 丁恒, 等. 车路协同环境下道路交通安全研究进展[J]. 交通运输工程与信息学报, 2024, 22(3): 14-33.
- [2] Wang, Y., *et al.* (2023) Edge Computing-Based Real-Time Warning for Logistics Transportation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **19**, 1-10.
- [3] Zhou, W., Zhao, L., Zhang, R.Y., *et al.* (2024) Vision Technologies with Applications in Traffic Surveillance Systems: A Holistic Survey.
- [4] Zou, Z.X., Chen, K.Y., Shi, Z.W., Guo, Y. and Ye, J. (2023) Object Detection in 20 Years: A Survey. *Proceedings of the IEEE*, **111**, 257-276. <https://doi.org/10.1109/jproc.2023.3238524>
- [5] 王晨, 周威, 章世祥. 一种特征融合的视频事故快速检测方法[J]. 交通运输工程与信息学报, 2022, 20(1): 31-38.
- [6] 2023 年全球与中国人工智能视频监控行业前景预测报告[EB/OL]. 湖南贝哲斯信息咨询有限公司. <https://www.shangyexinzhi.com/article/9990378.html>, 2023-07-18.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. 道路运输车辆智能视频监控报警系统技术规范(JT/T 1242-2023) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2023.
- [8] Hu, C., Han, C., Pervez, A., Hao, J., Xu, G., Tang, J., *et al.* (2024) Optimal Deployment of Connected and Autonomous Vehicle Dedicated Lanes: A Trade-Off between Safety and Efficiency. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **25**, 13744-13766. <https://doi.org/10.1109/tits.2024.3404923>
- [9] 王元喆, 梁腾飞, 曾宇乔, 等. 多光谱目标检测综述[J]. 信息与控制, 2024, 53(3): 287-301.
- [10] Zhang, X., Yoon, J., Bansal, M. and Yao, H. (2024) Multimodal Representation Learning by Alternating Unimodal Adaptation. 2024 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle, 16-22 June 2024, 27456-27466. <https://doi.org/10.1109/cvpr52733.2024.02592>
- [11] 伊笑莹, 芮一康, 冉斌, 等. 车路协同感知技术研究进展及展望[J]. 中国工程科学, 2024, 26(1): 178-189.
- [12] 曹行健, 张志涛, 孙彦赞, 等. 面向智慧交通的图像处理与边缘计算[J]. 中国图象图形学报, 2022, 27(6): 1743-1767.
- [13] 边缘计算产业发展研究报告(2024 年) [EB/OL]. 中国信通院. <https://www.sgpjbg.com/baogao/180614.html>, 2025-07-23.
- [14] Cheng, X., Xu, M., Yan, X., Yang, Y., Xu, Y. and Ruan, Y. (2024) A Design Pattern of IAPVS Platform Based on Distributed Edge Computing. *Journal of Physics: Conference Series*, **2732**, Article ID: 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2732/1/012001>
- [15] 2023 年物流企业营商环境调查报告[EB/OL]. 中国物流与采购联合会. 2023-08-16. <http://www.chinawuliu.com.cn/lhhzq/202308/16/614146.shtml>, 2025-07-26.
- [16] 中国物流与采购联合会. 中国物流年鉴 2024 [EB/OL]. 中国财富出版社. <http://www.chinawuliu.com.cn/xsyj/202211/29/489059.shtml>, 2025-08-12.
- [17] 徐梦溪, 沈克永, 涂宏斌, 等. 一种视频与物流业务数据融合的效率-安全双目标协同优化系统设计模式[J]. 软件工程与应用, 2025, 14(4): 897-905.
- [18] 徐梦溪, 罗中华, 程晓玲, 等. 基于双镜头视野协同成像的无线视频传感器网络构建[J]. 传感器技术与应用, 2024, 12(1): 54-62.
- [19] 中国企业级 SaaS 产业发展研究报告(2024) [EB/OL]. 中国信通院. <https://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202408/P020240815374016912879.pdf>, 2025-07-19.