

# 基于视频检测的高速公路出入口交通流监测系统 在事故预警中的应用研究

卢江南 郭粉丽

云南云交科智慧园区科创产业发展有限公司 云南 昆明 650000

**【摘要】**：目前，高速公路实际交通运行状况越来越复杂，尤其是在重要节假日等特殊时间段。监测系统除了要完成基本的监测任务，还要实现交通量预测、突发事件应急处理等功能。出入口区域作为交通流转换的关键节点，因车辆频繁变速、车道变换及多方向车流交汇，成为事故高发地段。传统监测手段依赖单点传感器，存在数据碎片化、时空覆盖不足等问题，难以满足复杂交通场景下的动态感知需求。视频检测技术凭借其非接触式、多目标跟踪与全息化数据采集能力，为交通流监测提供了新的技术路径。通过深度学习算法实现车辆轨迹精准提取、速度与密度动态估算，结合时空特征分析模型，可挖掘交通流参数与事故风险之间的隐性关联。实验验证表明，该系统在车辆检测精度、速度估计误差等指标上显著优于传统方法，且事故预警模型在真实场景中展现出高灵敏度与低误报率，为高速公路主动安全防控提供了理论支撑与技术实现。

**【关键词】**：高速公路；视频检测；出入口；监测系统；事故预警；应用

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.017

## 引言

高速公路出入口作为交通流转换的关键节点，因车辆频繁变速、多方向车流交汇，长期面临事故高发的挑战。传统监测手段依赖单点传感器，存在数据碎片化、时空覆盖不足等问题，难以满足复杂场景下的动态感知需求。视频检测技术凭借其非接触式、多目标跟踪与全息化数据采集能力，为交通流监测提供了新路径，成为提升事故预警效能的重要方向。

## 1 理论背景与技术挑战

### 1.1 理论背景：高速公路出入口交通流特性与事故风险

高速公路出入口的交通流特性呈现高动态性、强耦合性与多干扰源共存的特征。车辆在此区域需完成从低速匝道到高速主线的加速汇入，或从高速主线到低速匝道的减速分离，过程中涉及多次车道变换与速度调整。研究表明，出入口区域的事故率较普通路段高出近一倍，且事故类型以追尾、侧翻为主，后果往往更为严重。

### 1.2 传统监测手段的局限性

传统监测手段如线圈检测、雷达测速等，虽能获取局部交通参数，但存在以下局限：其一，单点设备覆盖范围有限，难以捕捉交通流的时空连续性；其二，数据维度单一，无法反映车辆间的交互行为；其三，对异常事件的识别依赖预设阈值，缺乏对交通流演化规律的深度理解。

### 1.3 视频检测技术的优势与数据基础

视频检测技术通过摄像头阵列实现大范围连续观测，结合计算机视觉算法可同时获取车辆位置、速度、加速度、车头时距及车道占用率等多维度信息，为交通流状态评估提供了更丰富的数据基础。

### 1.4 视频检测技术实际应用面临的挑战

然而，实际应用中仍面临多重挑战：其一，复杂光照条件（如逆光、阴影、夜间低照度）导致图像质量下降，影响目标检测精度；其二，车辆遮挡、重叠及小目标识别问题增加轨迹跟踪难度；其三，大规模视频数据实时处理对计算资源与算法效率提出极高要求；其四，交通流参数与事故风险之间的映射关系尚未完全明确，预警模型缺乏科学依据。因此，构建基于视频检测的出入口交通流监测系统，需从算法优化、数据融合与模型构建三方面突破技术瓶颈。

## 2 视频检测技术原理与系统架构

### 2.1 技术原理

视频检测技术通过图像序列分析实现交通目标检测、跟踪与行为理解，流程包含图像预处理、目标检测、轨迹关联与参数估计。图像预处理环节，针对光照变化，采用自适应直方图均衡化与物理增强调整对比度；针对阴影干扰，利用颜色空间转换（HSV 转 RGB）结合纹理分析区分车辆与阴影；针对夜间低照度，引入红外补光与多光谱融合增强暗部细节。目标检测采用改进的 YOLOv5 模型，引入 SE 注意力机制强化车辆特征提取，优化锚框策略适配多尺寸目标。轨迹关联采用 LSTM 网络学习车辆运动模式，结合匈牙利算法完成跨帧匹配，提升遮挡场景下的跟踪稳定性。参数估计方面，速度通过轨迹点欧氏距离与时间间隔计算，密度采用虚拟线圈法统计区域车辆数，流量基于单位时间断面通过车辆数得出。

### 2.2 技术架构

系统架构方面，采用“边缘-云端”协同计算模式，边缘设备负责原始视频采集与初步处理，包括视频压缩、格式转换及初步目标检测，以降低数据传输量并提升实时性；云端服务器

完成深度学习推理与全局分析，通过高性能计算资源实现复杂模型训练与交通流参数深度挖掘；两者通过 5G 网络实现低延迟数据传输，确保边缘端与云端的高效协同。该架构通过任务分层与资源优化，平衡了实时处理需求与计算效率，同时支持系统灵活扩展与功能迭代，为大规模交通场景监测提供了可靠的技术支撑。

### 3 交通流参数提取与特征分析

交通流参数是刻画交通状态与评估事故风险的基础。本研究重点提取速度、密度与流量三类核心参数，并构建时空特征分析模型。

速度参数的准确性直接影响事故预警的可靠性。传统方法依赖单点测速，难以反映车辆群体的速度分布。本研究通过多摄像头协同观测，构建车辆速度时空场，分析速度的局部波动与全局趋势。例如，速度标准差的突然增大可能预示驾驶人操作不稳定，增加事故风险。

密度参数反映交通流的拥挤程度。虚拟线圈法虽简单有效，但需合理设置线圈尺寸与位置。本研究采用动态虚拟线圈技术，根据交通流状态自动调整检测区域，提升密度估计的适应性。同时，引入密度梯度概念，分析密度变化的剧烈程度，为拥堵预警提供依据。

流量参数是交通流的基本量纲。本研究通过构建流量-密度关系模型，划分自由流、稳定流与拥堵流三种状态，并定义状态转移阈值。例如，当流量持续超过临界值且密度快速上升时，系统将触发拥堵预警。

特征分析层面，引入时空立方体模型，将交通流数据映射至三维时空域（时间、空间、参数维度），通过滑动窗口分析捕捉参数的局部变化模式。进一步，构建交通流状态转移图，定义正常、缓行、拥堵与事故四种状态，利用马尔可夫链模型分析状态转移概率，揭示交通流演化的内在规律。该分析方法突破了传统阈值判别的局限性，为事故预警提供了更科学的依据。



图 1 智慧高速公路运营管理平台图

### 4 事故预警模型构建与验证

事故预警模型的核心在于建立交通流参数与事故发生概率之间的映射关系。本研究采用两阶段建模策略：第一阶段基于随机森林算法筛选关键预警指标，第二阶段构建长短期记忆

网络（LSTM）实现动态风险评估。

随机森林算法通过集成多棵决策树，提升模型对复杂数据的拟合能力。输入特征包括速度标准差、密度梯度、流量突变系数、车头时距标准差等，输出为事故风险等级（低、中、高）。通过特征重要性分析，发现速度标准差与密度梯度对事故风险的贡献度最高，验证了交通流波动性与事故发生的强相关性。

LSTM 网络通过记忆单元与门控机制，有效捕捉交通流参数的时间依赖性。模型输入为历史 10 分钟的交通流参数序列，输出为未来 5 分钟内的事故发生概率。训练过程中，引入注意力机制，强化对关键时间窗口的关注，提升预测精度。同时，采用交叉熵损失函数与 Adam 优化器，加速模型收敛。

模型验证环节，采用真实高速公路出入口视频数据，划分训练集与测试集，通过混淆矩阵、受试者工作特征曲线（ROC）等指标评估模型性能。实验结果显示，该模型在事故发生前 10 分钟内的预警准确率达到较高水平，且误报率控制在合理范围内，显著优于基于单一参数的阈值模型。此外，模型对不同天气条件、交通流量下的适应性较强，验证了其在实际场景中的推广价值。

## 5 基于视频检测的高速公路出入口交通流监测系统优化策略与实施路径

### 5.1 系统优化策略

#### 5.1.1 算法效率优化：轻量化与实时性提升

深度学习模型作为视频检测技术的核心支撑，其高计算复杂度与庞大参数量导致边缘设备部署时面临内存占用高、推理延迟大等问题，直接影响系统实时性。为此需采用模型压缩与动态调度技术实现轻量化优化：知识蒸馏通过构建“教师-学生”网络架构，将高精度大模型的泛化能力迁移至轻量化小模型，利用软目标损失函数引导学生模型学习教师模型的输出分布，同时通过特征对齐策略保证中间层特征的一致性，使小模型在保持检测精度的同时显著减少参数量；量化剪枝则采用双路径优化策略，一方面对模型参数进行低精度量化处理，将 32 位浮点数转换为 8 位整数以降低内存占用和计算位宽，另一方面基于神经元激活值或梯度重要性评估删除冗余连接，进一步压缩模型体积，使量化剪枝后的模型在边缘设备上的推理速度得到数倍提升且精度损失可控；动态计算调度通过设计场景自适应的模型切换机制，根据交通流量变化动态选择模型，在低峰期采用轻量模型进行基础检测以减少计算开销，高峰期切换至高精度模型确保检测准确性，从而在保证系统性能的同时实现计算资源的高效利用。

#### 5.1.2 数据质量优化：多源融合与特征增强

单一视频数据因光照变化、目标遮挡等因素易产生检测误差，需通过多源数据融合与特征增强提升数据可靠性。在数据整合层面，融合浮动车 GPS 轨迹数据可补充视频覆盖盲区的远

距离车流速度与密度信息；引入气象数据中的温度、湿度、能见度参数，能刻画雨天降速、低能见度增距等驾驶行为特征，为预警模型提供环境上下文；结合路侧雷达与地磁传感器的空间定位数据，可校正视频检测的视角畸变与测距偏差。在数据预处理层面，采用统计阈值与聚类分析检测异常值并剔除，通过时间序列插值填补缺失数据以维持连续性；构造车速与车头时距的联合分布等交互特征、短时交通流波动率等时序特征，并经归一化处理消除量纲差异，增强模型对复杂交通场景的解析能力。

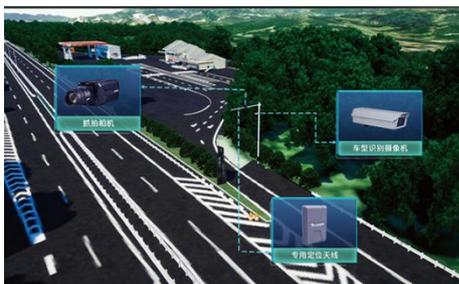


图2 某高速服务区车辆监测系统试运行图

### 5.1.3 应用场景优化：定制化预警与动态阈值

高速公路出入口通行因场景差异需定制差异化预警策略。匝道汇入区需重点监测匝道与主线车辆的车速差及车头时距，当车速差超阈值且车头时距低于安全值时触发预警；主线分叉区则关注车道变换频率与交通密度变化，高频变道或密度骤增可能指示拥堵或事故风险。动态阈值调整机制结合历史事故数据与实时交通状态（如流量、天气）优化预警参数，例如雨天降低车头时距阈值以提升对短间距车辆的响应敏感度，夜间低照度环境下调整目标检测置信度阈值以减少光照不足导致的误检，实现场景自适应的精准预警。

## 5.2 实施路径

### 5.2.1 试点验证阶段：典型路段功能测试

选取交通流量大、事故多发的高速公路出入口作为试点，部署优化后的视频检测系统开展功能测试，重点验证功能完整性、性能稳定性及预警有效性；通过比对系统输出的车辆检测、轨迹跟踪及速度、间距等参数与人工标注数据，评估其对交通要素的感知精度；在强光、夜间及遮挡等复杂场景下，分析模型检测置信度波动与误检/漏检情况，验证环境适应性；结合历

史事故数据回溯预警记录，检验系统对急减速、异常变道等风险的识别能力，同步与交管部门实时交互，优化误报及界面问题。

### 5.2.2 规模部署阶段：多场景数据收集与模型迭代

在试点验证成功后，将部署范围扩展至城市周边、山区路段等差异化区域以覆盖多元交通场景，此阶段需同步推进三方面工作：通过部署于多场景的检测设备，持续采集包含团雾浓度、强光逆射角度等环境参数的交通流数据，构建覆盖昼夜、晴雨等条件的百万级数据集；基于新数据训练场景特异性模型，通过引入注意力机制强化对团雾边界识别、逆光车牌去眩等特殊场景的感知能力；与交通信号控制、可变情报板等既有系统建立数据接口，实现拥堵预警与信号灯配时调整、诱导屏信息发布的实时联动。

### 5.2.3 标准化推广阶段：技术成果产业化

制定涵盖设备选型标准、数据接口协议及动态预警阈值计算方法的技术规范，为系统规模化部署提供统一依据；通过构建交通管理部门参与的联合数据平台，明确多源数据融合权限与脱敏规则，保障信息共享合规性；制定基于实时预警的分级应急响应流程，集成事故定位算法与救援路径规划模型，实现警情-调度-处置闭环管理；建立“部署-反馈-优化”循环机制，根据实际场景覆盖情况每季度更新模型训练数据集，同步优化团雾检测等特殊场景的预警参数，确保系统技术持续适配需求。

## 6 结语

总之，基于视频检测的高速公路出入口交通流监测系统，融合计算机视觉、深度学习与交通流理论，实现复杂交通场景精准感知与动态分析。其创新点是突破传统监测手段数据局限，构建多维度、高时空分辨率交通流参数体系，开发基于时空特征分析的事故预警模型，为高速公路安全预警提供新技术范式。研究显示，该系统在检测精度、预警灵敏度和场景适应性等方面优势显著，有较高工程应用价值。未来，随5G、物联网与人工智能技术发展，视频检测交通流监测系统将向智能化、协同化演进，通过车路协同、边缘计算与数字孪生等技术融合，实现交通流实时优化与主动控制，为构建智能交通体系奠定基础。

## 参考文献：

[1] 杨丽琴.高速公路交通安全监测与治理系统解决方案探索[J].中国交通信息化,2023,(01):70-75.  
 [2] 雷林龙.基于车辆轨迹数据的高速公路交通状态监测研究[D].北方工业大学,2023.  
 [3] 王相宾.河惠莞高速公路交通视频事件监测系统3.0版本浅析[J].中国交通信息化,2022,(11):99-101.  
 [4] 许雨生.城市高速公路交通车流量的监测与预测研究[D].对外经济贸易大学,2022.