

基于边缘计算的多传感器融合电动车预警系统实时性优化研究

毛丽青 程斌 吴倩

南昌交通学院, 江西南昌, 330100;

摘要: 针对传统电动车预警系统依赖云端计算导致的实时性差、响应延迟高, 以及单一传感器数据可靠性不足等问题, 提出一种基于边缘计算的多传感器融合电动车预警系统优化方案。首先, 构建“感知层-边缘层-云端层”三级系统架构, 将数据处理任务下沉至边缘节点, 减少数据传输延迟; 其次, 设计多传感器数据预处理机制, 通过卡尔曼滤波消除噪声干扰, 并采用时间戳对齐策略解决数据异步问题; 然后, 提出改进的加权证据理论融合算法, 结合边缘节点算力动态分配机制, 实现多源数据的高效融合与实时决策; 最后, 搭建实验平台进行性能测试, 结果表明, 优化后的系统端到端延迟降低至 82ms, 预警准确率提升至 94.3%, 相比传统云端架构系统, 实时性与可靠性均得到显著提升, 能够有效满足电动车行驶过程中的安全预警需求。

关键词: 边缘计算; 多传感器融合; 电动车; 预警系统; 实时性优化; 加权证据理论

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.028

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着新能源汽车产业的快速发展, 电动车保有量逐年攀升, 其行驶安全问题也日益受到社会关注。据交通运输部统计, 2024 年我国电动车相关交通事故中, 因环境感知不足、危险识别延迟导致的事故占比高达 62%, 远超传统燃油车。传统电动车预警系统多采用单一传感器(如摄像头或毫米波雷达)结合云端计算的架构, 存在两大核心缺陷: 一是单一传感器易受恶劣天气(雨、雾、强光)和复杂路况干扰, 数据可靠性低, 导致预警误报率与漏报率居高不下; 二是数据全部上传至云端处理, 受网络带宽与传输延迟影响, 系统响应时间通常超过 200ms, 难以满足紧急情况下的安全预警需求。

边缘计算技术的出现为解决上述问题提供了新的思路。边缘计算将数据处理能力下沉至网络边缘, 靠近数据产生源头, 能够显著减少数据传输距离与延迟; 而多传感器融合技术通过整合不同类型传感器的优势, 可提升环境感知的全面性与可靠性。因此, 研究基于边缘计算的多传感器融合电动车预警系统实时性优化, 对于提升电动车行驶安全、推动新能源汽车智能化发展具有重要的理论价值与实际意义。

1.2 国内外研究现状

在电动车预警系统领域, 国外研究起步较早。特斯

拉 Autopilot 系统采用摄像头与毫米波雷达融合方案, 通过车载计算单元实现局部数据处理, 但该系统依赖单一车载节点, 算力有限, 复杂场景下实时性不足; 宝马集团提出基于 5G 的车路协同预警方案, 将部分数据处理任务分配至路侧单元, 但未针对多传感器数据的异步性与冗余性进行优化, 数据传输成本较高。

国内方面, 清华大学团队设计了基于云端协同的多传感器融合系统, 通过改进粒子滤波算法提升融合精度, 但云端处理导致系统延迟超过 150ms; 华为技术有限公司提出边缘计算节点部署方案, 优化了数据传输效率, 但在多传感器数据融合策略与边缘节点算力分配的协同优化方面研究不足。

综合来看, 现有研究多单独关注边缘计算部署或多传感器融合算法, 缺乏将二者深度结合的实时性优化方案, 尤其在边缘节点算力动态分配、多源数据异步处理等关键问题上尚未形成有效解决策略。

1.3 研究内容与技术路线

本文的核心研究内容包括: (1) 构建基于边缘计算的多传感器融合预警系统架构, 明确感知层、边缘层与云端层的功能划分; (2) 设计多传感器数据预处理与同步机制, 解决数据噪声与异步问题; (3) 提出融合边缘算力分配的多传感器数据融合算法, 优化系统实时性与决策精度; (4) 搭建实验平台, 验证优化方案的有效性。

技术路线如下：首先，分析电动车预警系统的实时性需求与多传感器数据特征；其次，完成系统架构设计与关键技术选型；然后，针对数据处理与融合过程中的实时性瓶颈，提出优化策略并进行算法实现；最后，通过对比实验验证系统性能，总结研究成果并指出未来方向。

2 相关技术基础

2.1 边缘计算技术

边缘计算是一种将计算资源部署在网络边缘（如车载终端、路侧单元）的分布式计算模式，其核心优势在于“就近处理”。与传统云端计算相比，边缘计算可将数据传输距离缩短至数百米以内，显著降低传输延迟；同时，边缘节点对本地数据的过滤与预处理，能够减少上传至云端的数据量，降低网络带宽占用。

边缘计算节点的算力资源通常有限，因此需要采用轻量化的操作系统（如 ROS 2 Foxy）与任务调度算法。本文选用 NVIDIA Jetson Xavier NX 作为边缘计算节点，其搭载的 GPU 支持并行计算，可满足多传感器数据实时处理的需求。

2.2 多传感器融合技术

多传感器融合技术根据融合层次可分为数据层融合、特征层融合与决策层融合。数据层融合直接对原始数据进行整合，精度最高但对数据一致性要求严格；决策层融合基于各传感器的独立决策结果进行融合，鲁棒性强但精度较低；特征层融合提取各传感器数据的关键

特征后进行整合，兼顾精度与鲁棒性，是电动车预警系统的理想选择。

常用的融合算法包括 D-S 证据理论、贝叶斯估计、神经网络等。其中，D-S 证据理论无需先验概率，能够有效处理不确定信息，但传统 D-S 算法在证据冲突时易出现决策偏差，需要进行改进以适应多传感器复杂数据场景。

2.3 实时性优化关键技术

系统实时性优化涉及数据传输、任务调度与算法效率三个核心环节。数据传输优化可通过数据压缩、优先级划分实现；任务调度优化需结合边缘节点算力，采用动态负载均衡策略；算法效率优化则通过简化计算模型、并行计算等方式提升数据处理速度。三者协同作用，才能最大化提升系统实时性。

3 系统架构设计

3.1 系统总体架构

本文设计的基于边缘计算的多传感器融合电动车预警系统采用“感知层-边缘层-云端层”三级架构，架构图如图 1 所示。

感知层：由激光雷达、毫米波雷达、摄像头、超声波传感器及车载传感器（加速度计、陀螺仪）组成，负责采集车辆周围环境数据（障碍物位置、速度、距离）与车辆状态数据（行驶速度、转向角度）。各传感器的性能参数如表 1 所示。

表 1 传感器性能参数

| 传感器类型 | 探测范围 | 采样频率 | 精度 | 适用场景 |
|--------|----------|-------|-------|----------|
| 激光雷达 | 0.5-100m | 10Hz | ±3cm | 障碍物距离测量 |
| 毫米波雷达 | 1-150m | 20Hz | ±0.5m | 高速移动目标检测 |
| 摄像头 | 0.3-50m | 30fps | ±1% | 目标识别与分类 |
| 超声波传感器 | 0.1-5m | 15Hz | ±0.1m | 近距离障碍物检测 |

边缘层：由车载边缘节点与路侧边缘节点组成，是系统的核心处理层。车载边缘节点负责接收本地传感器数据，进行预处理、特征提取与初步融合；路侧边缘节点通过 V2X（车与万物）通信接收周边车辆与交通环境数据，与车载节点数据进行协同融合，生成预警决策。边缘层采用分布式任务调度机制，根据各节点算力负载动态分配处理任务。

云端层：采用阿里云服务器，负责接收边缘层上传

的融合结果与系统运行日志，进行全局数据统计、模型训练与更新，并将优化后的模型参数下发至边缘节点。云端层不参与实时决策，仅提供后台支持与长期优化。

3.2 硬件选型与部署

根据系统功能需求，硬件选型如下：（1）感知层：选用 Velodyne 16 线激光雷达、大陆 ARS548 毫米波雷达、IMX390 高清摄像头及 HC-SR04 超声波传感器；（2）

边缘层：车载边缘节点选用 NVIDIA Jetson Xavier NX（8GB 内存，15TOPS 算力），路侧边缘节点选用 Intel Core i7-12700K（16 核，32GB 内存）；（3）通信模块：采用 5G 模组（华为巴龙 5000）实现边缘节点间及边缘与云端的通信，传输速率可达 1Gbps。

硬件部署时，将激光雷达与毫米波雷达安装于车辆前保险杠，摄像头安装于挡风玻璃上方，超声波传感器分布于车身四周，确保无探测盲区；车载边缘节点安装于后备箱，通过 CAN 总线与车载传感器连接，通过以太网与路侧节点通信。

3.3 软件架构设计

系统软件基于 ROS 2（机器人操作系统）构建，采用模块化设计，主要包括数据采集模块、预处理模块、融合模块、预警模块与通信模块，各模块功能如下：

- （1）数据采集模块：通过 ROS 2 话题机制接收各传感器数据，将原始数据封装为统一格式并添加时间戳；
- （2）预处理模块：对采集的数据进行噪声过滤、数据同步与降维处理；
- （3）融合模块：采用改进的 D-S 证据理论算法，融合多源特征数据，输出目标状态与危险等级；
- （4）预警模块：根据融合结果与车辆行驶状态，判断是否触发预警，并通过声光信号提示驾驶员；
- （5）通信模块：实现边缘节点间及边缘与云端的双向数据传输，支持数据压缩与优先级传输。

4 实时性优化策略

4.1 多传感器数据预处理与同步优化

4.1.1 数据噪声过滤

不同传感器的数据噪声特征不同：激光雷达数据受环境光影响较大，存在随机噪声；毫米波雷达数据在多目标场景下易出现杂波；摄像头数据受光照影响易产生椒盐噪声。针对上述问题，本文采用分层滤波策略：

- （1）激光雷达数据：采用卡尔曼滤波算法，通过建立位置-速度状态模型，预测下一时刻目标位置，结合观测值修正预测结果，消除随机噪声；
- （2）毫米波雷达数据：采用恒虚警率（CFAR）检测算法，抑制杂波干扰，保留有效目标数据；
- （3）摄像头数据：采用中值滤波消除椒盐噪声，再通过高斯滤波平滑图像，提升后续目标识别精度。

4.1.2 数据同步处理

各传感器采样频率不同（如摄像头 30fps，激光雷

达 10Hz），导致数据到达边缘节点的时间存在差异，若直接融合易出现决策偏差。本文采用时间戳对齐与插值补全策略实现数据同步：

- （1）时间戳对齐：为每个传感器数据添加高精度时间戳（基于 GPS 授时，精度达 1ms），建立统一的时间基准；
- （2）插值补全：以采样频率最高的摄像头数据为基准，对激光雷达、毫米波雷达等低频数据采用线性插值法补全缺失时刻的数据，确保同一时间戳下有多源传感器数据可供融合。实验表明，该策略可将数据同步误差控制在 5ms 以内。

4.2 边缘节点任务调度优化

边缘节点算力有限，多传感器数据并行处理时易出现负载不均衡，导致部分任务延迟增加。本文提出基于优先级的动态任务调度算法，核心思想是根据任务实时性需求与边缘节点算力状态，动态分配计算资源。

4.2.1 任务优先级划分

将边缘层任务分为三个优先级：高优先级（目标检测与危险评估，延迟要求<50ms）、中优先级（特征提取与数据融合，延迟要求<80ms）、低优先级（数据存储与日志上传，延迟要求<200ms）。高优先级任务优先占用算力资源，确保预警决策的实时性。

4.2.2 动态算力分配

采用负载均衡模型实时监测边缘节点的 CPU 与 GPU 利用率，当某一节点负载超过 70%时，将低优先级任务迁移至负载较低的路侧边缘节点；对于高优先级任务，采用 GPU 并行计算加速处理。例如，将摄像头图像的目标识别任务分配至 GPU，激光雷达数据的滤波处理分配至 CPU，实现算力的高效利用。实验表明，该调度算法可将边缘节点任务平均延迟降低 35%。

4.3 改进的多传感器融合算法

针对传统 D-S 证据理论在多传感器证据冲突时决策偏差的问题，结合边缘算力分配情况，本文提出加权证据理论融合算法，步骤如下：

4.3.1 证据权重计算

考虑传感器可靠性与边缘节点处理精度两个因素计算证据权重：（1）传感器可靠性权重：通过历史数据统计各传感器的识别准确率，准确率越高，权重越大；

（2）处理精度权重：根据边缘节点处理该传感器数据的延迟与误差，延迟越小、误差越低，权重越大。设传感器可靠性权重为 ω_1 ，处理精度权重为 ω_2 ，总权重

$\omega=\alpha\omega_1+(1-\alpha)\omega_2$ ，其中 α 为权重系数（经实验验证 $\alpha=0.6$ 时效果最优）。

4.3.2 证据冲突处理

引入冲突系数 K 判断证据间的冲突程度，当 $K>0.5$ 时，认为存在严重冲突，采用加权平均法修正证据后再进行融合；当 $K\leq 0.5$ 时，直接采用 D-S 组合规则进行融合。修正公式如下：

$m'(A)=\omega_1m_1(A)+\omega_2m_2(A)+\dots+\omega_nm_n(A)$ ，其中 $m'(A)$ 为修正后的基本概率分配， $m_i(A)$ 为第 i 个传感器的基本概率分配。

4.3.3 融合结果输出

将各传感器的特征数据（如目标距离、速度、类型）转化为证据，通过上述改进算法融合后，输出目标的综合置信度，根据置信度判断危险等级（高风险：置信度 >0.8 ，中风险： $0.5\leq$ 置信度 ≤ 0.8 ，低风险：置信度 <0.5 ），为预警决策提供依据。

5 实验验证与结果分析

5.1 实验环境搭建

搭建模拟实验平台与实车实验平台，从实验室与实际场景两个维度验证系统性能。

（1）模拟实验平台：基于 MATLAB 与 ROS 2 构建仿真环境，模拟城市道路、高速公路、雨雾天气等不同场景，生成多传感器仿真数据，对比优化前后系统的延迟与准确率；（2）实车实验平台：选取比亚迪汉 EV 作为实验车辆，搭载本文设计的硬件系统，在城市道路（拥堵路段、交叉路口）与高速公路（匀速行驶、紧急变道）场景下进行测试，记录系统响应时间与预警效果。

5.2 实验指标定义

选取以下 4 个核心指标评估系统性能：（1）端到端延迟：从传感器采集数据到系统发出预警信号的总时间；（2）预警准确率：正确预警次数占总预警次数的比例；（3）误报率：无危险时触发预警的次数占总检测次数的比例；（4）漏报率：存在危险时未触发预警的次数占总危险次数的比例。

5.3 实验结果与分析

5.3.1 模拟实验结果

在模拟环境中，分别测试传统云端架构系统（对照组）与本文优化系统（实验组）的性能，结果如表 2 所示。

表 2 模拟实验性能对比

| 系统类型 | 端到端延迟 (ms) | 预警准确率 (%) | 误报率 (%) | 漏报率 (%) |
|--------|------------|-----------|---------|---------|
| 传统云端架构 | 215±18 | 82.6 | 9.3 | 8.1 |
| 本文优化系统 | 82±10 | 94.3 | 3.2 | 2.5 |

由表 2 可知，本文优化系统的端到端延迟较传统系统降低 61.9%，主要原因是边缘计算减少了数据传输延迟，任务调度优化提升了处理效率；预警准确率提升 11.7%，误报率与漏报率分别降低 6.1%与 5.6%，得益于多传感器数据预处理与改进融合算法的协同作用，提升

了数据可靠性与决策精度。

5.3.2 实车实验结果

在实车实验中，选取 100 个典型危险场景（如前车急刹、行人横穿马路、侧方车辆变道），测试系统的实际表现，结果如表 3 所示。

表 3 实车实验性能对比

| 系统类型 | 平均响应时间 (ms) | 正确预警次数 | 误报次数 | 漏报次数 |
|--------|-------------|--------|------|------|
| 传统云端架构 | 198±22 | 81 | 10 | 9 |
| 本文优化系统 | 76±8 | 93 | 4 | 3 |

实车实验结果与模拟实验一致，本文优化系统的平均响应时间控制在 80ms 以内，远低于传统系统，能够为驾驶员提供充足的反应时间（通常驾驶员紧急反应时间约 1s）；正确预警次数提升 12 次，误报与漏报次数显著减少，表明系统在实际复杂场景中具有较高的可靠性。

5.3.3 稳定性测试

对优化系统进行 72 小时连续稳定性测试，记录系统运行状态与性能波动。结果显示，系统平均 CPU 利用率为 65%，GPU 利用率为 70%，无明显负载过高现象；端到端延迟波动范围为 72-90ms，预警准确率稳定在 93%-95%，表明系统具有良好的稳定性与鲁棒性。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文针对传统电动车预警系统实时性差、可靠性不足的问题,提出基于边缘计算的多传感器融合实时性优化方案,主要成果如下:

构建了“感知层-边缘层-云端层”三级系统架构,将实时数据处理任务下沉至边缘节点,减少数据传输延迟,云端仅负责非实时的全局管理与模型优化,实现“边缘实时处理+云端长期优化”的协同模式。

设计了分层滤波与时间戳对齐的预处理策略,有效消除多传感器数据噪声,将数据同步误差控制在 5ms 以内,为后续融合提供高质量数据。

提出基于优先级的动态任务调度算法与改进加权证据理论融合算法,前者通过算力动态分配降低任务延迟,后者通过证据权重优化解决冲突问题,提升决策精度。

实验验证表明,优化后的系统端到端延迟降低至 82ms 以下,预警准确率提升至 94.3%,误报率与漏报率分别降至 3.2%与 2.5%,显著优于传统云端架构系统,能够有效满足电动车安全预警的实时性与可靠性需求。

6.2 不足与展望

本文研究仍存在一定不足:(1)边缘节点的算力分配策略未考虑能量消耗,长时间高负载运行可能影响电动车续航;(2)多传感器融合算法未充分利用深度学习技术,复杂场景下的目标识别精度仍有提升空间。

未来研究方向包括:(1)结合强化学习算法,设计能耗感知的边缘节点任务调度策略,在实时性与能耗之间实现平衡;(2)引入轻量化神经网络(如 YOLOv8-tiny)与注意力机制,构建端到端的多传感器融合模型,进一步提升复杂场景下的预警精度;(3)拓展 V2X 通信范围,实现多车协同预警,构建全局安全预警网络。

参考文献

- [1]周聪. 基于多传感器融合的换梁机监测系统研究[J/OL]. 铁道建筑技术,1-4[2025-12-10]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3368.TU.20251121.1022.002>.
- [2]王正. 智能网联汽车多传感器融合控制研究[J]. 汽车测试报告,2025,(16):34-36.
- [3]曹峰,田锋. 基于多传感器融合的重载智能驾驶车辆感知系统优化[J]. 智慧中国,2025,(03):26-27.
- [4]赵振明. 基于多传感器融合的设备状态智能监测系统设计与实现[J]. 电子技术,2025,54(03):20-22.
- [5]冀建宇,许瑞琛,王鹏. 基于多传感器融合的机场不停航施工安全风险监测研究[J]. 中国民航飞行学院学报,2025,36(02):70-74+80.
- [6]王军,马中华. 构建“数智引领、系统治理、源头监管”全周期管理模式溧阳精细化管理预防电动自行车交通事故[J]. 汽车与安全,2024,(08):106-107.
- [7]Beñat A ,Iker G ,Fernando J I , et al. Dynamic control for LMD processes using sensor fusion and edge computing[J]. Procedia CIRP,2022,111308-312. DOI:10.1016/J.PROCIR.2022.08.026.
- [8]张余明,电动车电池安全的单点预警系统、集中和远程监控系统. 广西壮族自治区,桂林航天工业学院,2021-11-16.
- [9]薛旭阳. 汽车停车开门事故预警系统研究与开发[D]. 重庆交通大学,2018.
- [10]金文斌,邹小平,白泉,等. 基于超声波传感器阵列的轿车开门预警系统[J]. 传感器世界,2017,23(08):25-31. DOI:10.16204/j.cnki.sw.2017.08.004.

作者简介:毛丽青,1982年9月,女,汉族,江西南昌,讲师,研究方面:算法研究、人工智能。

基金项目:本文系南昌交通学院大学生创新创业训练计划项目(S202513431018)资助