

多感知融合的后装汽车防碰撞系统研究

崔文申¹, 周忠圆¹, 崔行航¹, 韩兴¹, 李博²

¹东北林业大学土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨

²东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年4月3日; 录用日期: 2025年5月2日; 发布日期: 2025年5月13日

摘要

设计了一种多感知融合的外加装汽车防碰撞装置。针对当前存量车辆主动安全配置的普遍缺失, 导致复杂交通场景下碰撞风险居高不下。本文提出一种基于多传感器融合的后装防碰撞系统, 通过有限度的车辆改装实现主动安全功能升级。系统采用毫米波雷达与视觉传感器的异构数据互补策略, 在Haar-like特征检测框架中引入卡尔曼滤波算法, 并构建碰撞时间和安全车距的复合型安全模型。硬件层面设计非侵入式改装方案: 毫米波雷达嵌入前保险杠非承力区域, 视觉模块利用后视镜基座实现无损安装, 控制单元通过车载诊断接口(OBD-II)获取车辆状态信息, 并经由CAN总线协议触发分级制动响应。研究成果为汽车后市场安全升级提供了兼具工程可行性与经济性的技术路径。

关键词

后装防碰撞系统, 多传感器融合, 复合型安全模型, 分级制动

Research on Rear-Mounted Vehicle Collision Prevention System Based on Multi-Sensing Fusion

Wenshen Cui¹, Zhongyuan Zhou¹, Xinghang Cui¹, Xing Han¹, Bo Li²

¹College of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

²College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: Apr. 3rd, 2025; accepted: May 2nd, 2025; published: May 13th, 2025

Abstract

An external anti-collision device with multi-sensing fusion was designed. In view of the general lack of active safety configuration of current vehicles, the collision risk remains high in complex traffic

文章引用: 崔文申, 周忠圆, 崔行航, 韩兴, 李博. 多感知融合的后装汽车防碰撞系统研究[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(5): 514-523. DOI: 10.12677/csa.2025.155123

scenarios. A rear-mounted anti-collision system based on multi-sensor fusion is proposed in this paper. Active safety functions can be upgraded through limited vehicle modification. The system adopts the heterogeneous data complementary strategy of millimeter wave radar and vision sensor, introduces Kalman filter algorithm into the Haar-like feature detection framework, and constructs the composite safety model of collision time and safety distance. Hardware level design of non-invasive modification scheme: millimeter wave radar embedded in the front bumper non-bearing area, vision module using the rearview mirror base to achieve non-destructive installation, control unit through the on-board diagnostic interface (OBD-II) to obtain vehicle status information, and through the CAN bus protocol to trigger a staged braking response. The research results provide a technical path of engineering feasibility and economy for the safety upgrade of automotive after-market.

Keywords

Rear Installation Anti-Collision System, Multi-Sensor Fusion, Compound Security Model, Stage Braking

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

随着“交通强国”战略的深入推进，智能驾驶技术在提高车辆安全性和减少交通事故方面发挥着重要作用。《“十四五”全国道路交通安全规划》提出，要“强化车辆主动安全技术研发，降低因人为失误导致的交通事故死亡率”。然而，当前市场上大部分存量车辆缺乏主动安全配置，尤其在复杂交通场景下，碰撞风险依然较高。尽管新型智能汽车普遍装备了先进的防撞系统，传统车辆的安全升级仍是亟待解决的问题。

针对这一挑战，《智能汽车创新发展战略(2021~2035年)》明确提出，要提升存量车辆的安全性能，推动后装安全技术的应用。当前，后装市场存在单一传感器误报率较高、改装成本过高等问题。为此，本研究提出了一种基于多传感器融合技术的后装防撞系统。该系统通过有限度的车辆改装，结合毫米波雷达与视觉传感器的多感知融合策略，提升现有车辆的主动安全功能。系统采用非侵入式安装方式，不仅保证安全性，还具备较高的经济性和工程可行性，为存量车辆的安全升级提供了可行的技术路径。

2. 国内外相关研究概述

2017年，重庆理工大学的胡远志和吕章洁等人对比了5种AEB算法对避免纵向碰撞仿真验证制动效果，这5种算法中，以即碰时间的TTC算法的纵向避撞性能最优[1]。2019年吉林大学张庆采用基于毫米波雷达和摄像头视觉的数据融合算法，对乘用车自动紧急制动系统(AEB)的控制策略进行了相关研究[2]。

2021年Guoyan Xu和Niu Huan等人采用多传感器检测前方车辆的距离和速度信息，设计了一种预测合并到自我车道的预测模型[3]。2021年，北京交通大学的辛佳庚和杨复钰提出了一种基于融合算法的控制策略，以解决安全距离算法和碰撞时间算法(TTC)在保障安全性和舒适性方面的不足[4]。2023年，长安大学的王梦缘和惠飞等人在AEB系统基础上，采用TTC碰撞时间模型进行控制，加入BP神经网络算法，能够具备更优的防撞功能[5]。2024年胡永坤，殷晨波等人设计了基于激光雷达和多传感器数据

融合的塔机防碰撞系统，为塔机防碰撞领域提供了一种高效、可靠的智能解决方案[6]。2024年 Vinoth, K., P. Sasikumar 提出了一种基于深度 Q 网络(DQN)的自动驾驶车辆多传感器融合与分割方法，以实现多目标跟踪，提高了自动驾驶车辆在复杂环境下的导航安全性和准确性[7]。

3. 设计原理

3.1. 系统概述

基于上述背景，多传感器融合利用已比较全面，而针对当前存量车辆中普遍缺乏主动安全配置，尤其是在复杂交通场景下碰撞风险较高的问题，本文提出了一种基于多传感器融合的外加装汽车防碰撞系统。该系统通过毫米波雷达与视觉传感器的异构数据互补策略，在 Haar-like 特征检测框架中引入卡尔曼滤波算法，并构建了融合了碰撞时间(TTC)和安全车距两个关键指标的复合型安全模型，对危险目标进行分级，并根据危险等级触发不同的安全响应措施。通过有限度的车辆改装，实现了现有车辆的主动安全功能升级，极大提升了车辆的安全性。

3.2. 系统硬件设计

为实现基于多传感器融合的汽车防碰撞系统，本文提出了一种非侵入式的硬件设计方案，旨在通过对现有车辆的最小改动实现主动安全功能的升级。硬件系统的设计核心在于传感器的选择与集成、数据处理单元的布置以及系统与车辆的交互方式，确保系统能够稳定、实时地工作。本系统的硬件架构包括传感器模块、数据处理单元、控制与执行以及电源管理模块四大部分。

3.2.1. 传感器模块

系统的核心感知能力依赖于毫米波雷达和视觉传感器的融合。所使用的两种传感器有其独特的优势，结合使用可以弥补各自的不足，提供更全面的环境感知。

毫米波雷达模块：毫米波雷达负责在各种气候条件下稳定工作，能够穿透雨雾等障碍物，确保全天候的感知能力。毫米波雷达的安装位置为车辆前保险杠的非承力区域，利用该区域的设计免了对车辆结构的侵入性改动，同时确保了雷达的有效探测范围。

视觉传感器模块：视觉传感器主要用于识别和分析图像信息，提供高精度的目标检测和识别能力。该模块安装在车辆的后视镜基座位置，利用该位置的无损安装方式，避免对车辆外观和结构造成破坏。视觉传感器能够在良好光照条件下提供高分辨率图像数据，精确识别前方障碍物、行人以及其他动态物体。

3.2.2. 数据处理单元

系统采用 STM32 系列单片机作为控制单元，负责整个系统的运算和协调。STM32 具有高处理速度、低功耗和高集成度等特点，能够高效地处理毫米波雷达和视觉传感器采集的数据。单片机还可以通过与其他硬件模块的接口，实现与车辆电子系统的交互。通过这种方式，系统能够实时获取车辆的状态信息，并根据不同的碰撞风险级别启动适当的应急反应。

本系统结合了毫米波雷达与视觉传感器的数据，通过数据融合提升目标检测的准确性和系统的鲁棒性。毫米波雷达提供了目标的距离和速度信息，而视觉传感器则提供了目标的图像数据。系统基于 Haar-like 特征检测框架进行目标的初步检测，并引入运动目标跟踪算法，实现动态目标的实时追踪。通过这两种技术的结合，系统能够识别并跟踪前方的运动目标，提高了对高速运动物体的检测能力，尤其是在复杂的交通场景下。

3.2.3. 控制与执行单元

为了能够对潜在碰撞进行实时反应，系统设计了控制与执行单元，该单元负责接收数据处理单元的

指令，并控制制动执行模块进行反应。

控制单元通过车载诊断接口(OBD-II)实时监测车辆的状态信息，包括速度、刹车状态、发动机运行状况等。这些信息对于碰撞预警和紧急制动的决策至关重要。OBD-II 接口允许控制单元与车辆的原始电子系统进行数据交换，确保系统能够及时作出响应。

为了实现系统与车辆制动系统的联动，本文采用了 CAN 总线协议。CAN 总线可以在多种电子控制单元之间进行高速、稳定的通信，确保系统在面对突发情况时能够迅速向车辆制动系统发送制动信号。根据危险目标的等级，控制单元会触发分级制动响应，确保车辆能够在最短时间内减速或停止，从而避免碰撞事故的发生。

3.3. 系统工作流程

本系统通过结合毫米波雷达和视觉传感器的数据，采用多传感器融合技术，针对复杂环境中的实时碰撞风险进行全面监测、评估和响应。系统的工作流程可分为四个主要阶段：数据采集与融合、碰撞预测与预警、分级制动与响应以及系统反馈与监控。每个阶段均基于传感器数据、实时计算和控制策略的协调配合，确保能够准确、及时地识别潜在风险并作出反应。如图 1 为项目技术路线图。

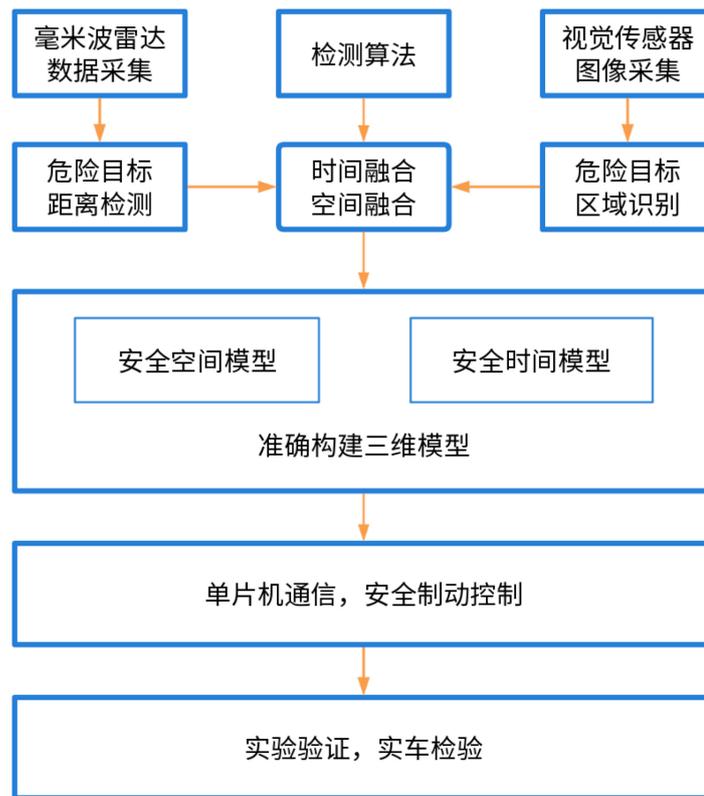


Figure 1. Technology route map

图 1. 技术路线图

3.3.1. 数据采集与融合

系统通过毫米波雷达和视觉传感器两个主要模块，实时采集环境数据并进行融合处理。毫米波雷达负责测量车辆与障碍物之间的相对距离和速度，适应各种天气和光照条件，提供精准的障碍物探测数据；而视觉传感器则捕捉道路和周围环境的图像信息，通过 Haar-like 特征检测框架识别人、其他车辆及其

他潜在障碍物。如图 2 为检测仿真示意图。

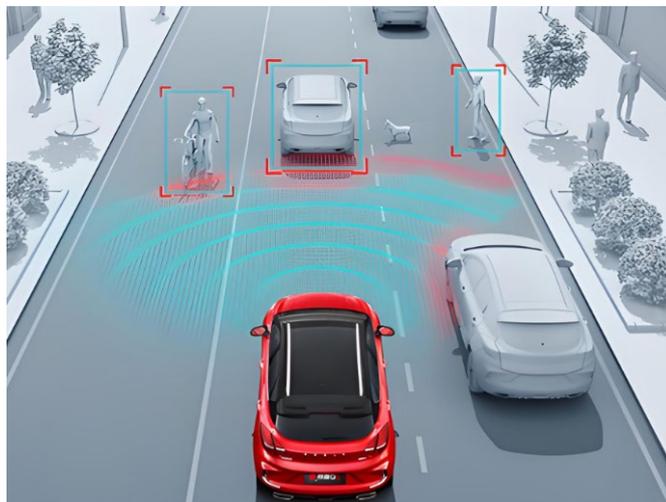


Figure 2. Detection simulation diagram
图 2. 检测仿真示意图

通过卡尔曼滤波融合算法[8], 系统将来自两个传感器的异构数据进行加权融合, 消除单一传感器的噪声, 生成精准的实时障碍物位置、速度与加速度数据。这些数据成为后续碰撞预测和安全车距判断的基础。

3.3.2. 碰撞预测与预警

为了在复杂的交通环境中实现及时且准确的碰撞预测与预警, 本系统结合了碰撞时间模型与安全车距模型的复合型安全模型。该模型同时考虑了时间和空间两个维度, 通过实时监测、计算并评估碰撞风险。根据碰撞风险的高低, 系统可以发出不同级别的预警, 提醒驾驶员及时采取措施。

(1) 碰撞时间模型

TTC 模型是防碰撞系统中用来计算车辆与前方障碍物发生碰撞时间的重要算法。通过实时计算相对速度和距离, *TTC* 能够有效预测碰撞发生的时间, 并根据该时间评估碰撞风险。

TTC 计算公式为:

$$TTC = \frac{D}{V_{rel}}$$

D 为车辆与前方障碍物的当前距离;

V_{rel} 为车辆与障碍物之间的相对速度, 计算公式为:

$$V_{rel} = V_{ego} - V_{obs}$$

V_{ego} 为车辆的速度;

V_{obs} 为前方障碍物的速度。

当 *TTC* 值小于预设的阈值 TTC_e (通常为 2 秒), 系统认为碰撞风险较高。

为了提高 *TTC* 模型的准确性, 考虑到实际行车中车辆的运动状态通常较为复杂, 传统的 *TTC* 模型无法很好地应对相对速度接近零的情况。因此, 我们在 *TTC* 模型中引入了二阶 *TTC* 公式, 来解决这一问题。具体公式如下:

$$TTC_2 = \frac{D}{V_{rel} + a_{rel} \times \Delta t}$$

其中, a_{rel} 为车辆与障碍物之间的相对加速度, Δt 时间增量。通过考虑相对加速度, 二阶 TTC 公式能够更加精确地反映车辆在不同情况下的碰撞时间, 尤其是在前方障碍物突然变化速度的场景中。

(2) 安全车距模型

安全车距模型根据当前车辆的速度、反应时间和最大制动加速度来动态计算出安全车距, 确保车辆与障碍物之间保持足够的距离, 以便提供足够的反应时间来避免碰撞。系统通过以下公式计算安全车距:

$$D_{safe} = v \times t_{reaction} + \frac{v^2}{2a_{max}}$$

D_{safe} 为安全车距;

v 为当前车速;

$t_{reaction}$ 为驾驶员反应时间, 设定为 1.5 秒;

a_{max} 为车辆的最大制动加速度。

(3) 复合型安全模型

将 TTC_2 和安全车距模型结合, 形成一个复合型安全模型。复合型安全模型结合了碰撞时间(TTC)和安全车距两大核心元素, 用于全面评估当前交通状态下的碰撞风险。模型的目标是通过实时获取车辆与障碍物之间的相对速度、距离及加速度等信息, 动态评估碰撞的风险, 并据此触发不同级别的安全响应。该模型通过实时计算 TTC 值, 预测车辆与前方障碍物的碰撞时间, 并通过计算当前车速和刹车能力, 确保车辆与前方障碍物保持足够的安全距离。此外还根据环境的变化(如路面摩擦、天气状况等), 动态调整模型的参数, 以确保系统的灵活性与适应性。

系统根据 TTC 和安全车距 S 的实时计算结果判断当前的碰撞风险, 并采取不同级别的预警响应。为了增强碰撞预警的精度, 安全车距模型考虑了三个关键的车距计算值, 分别为: 安全预警车距 S_1 、部分制动车距 S_2 和完全制动车距 S_3 。以上三个关键的安全车距值推导如下。

安全预警车距 S_1 是指在车辆的当前状态下, 根据目标与本车的相对速度和位置, 计算出的一种预警距离。如果车辆与目标的距离小于该预警车距, 系统会发出预警提醒驾驶员注意潜在风险。假设目标车辆与本车之间的相对速度为 V_{rel} , 车辆的当前速度为 V , 目标车的速度为 V_t 。

预警车距的计算公式为:

$$S_1 = \frac{V \times t_{reactin}}{2} + \frac{V^2}{2 \times a_{max}} + k \times V_{rel} \times t_{reaction}$$

其中, $t_{reaction}$ 为驾驶员的反应时间, k 为调节因子, 用于调整相对速度对预警车距的影响。该公式考虑了车辆的反应时间、车辆的制动性能以及目标与本车之间的相对速度。

部分制动安全车距 S_2 是指在车辆进行部分制动时, 车辆与前方障碍物之间应保持的最小安全距离。假设在部分制动情况下, 车辆的加速度为 a_2 , 与最大制动加速度 a_{max} 相比要小得多。该车距的推导基于匀减速运动模型, 部分制动时的制动距离为:

$$S_2 = \frac{V^2}{2 \times a_2}$$

在车辆减速时, 部分制动安全车距的大小取决于车辆的当前速度和部分制动时的加速度。

完全制动安全车距是指在遇到紧急情况时, 车辆通过完全制动所需保持的最小距离。该车距的推导同样基于匀减速运动模型, 假设车辆当前的速度为 V , 并且车辆的最大制动加速度为 a_{max} 。

根据匀减速运动的基本公式，车辆从当前速度 V 减速至零所需的距离为：

$$S_3 = \frac{V^2}{2 \times a_{\max}}$$

在完全制动的情况下，车辆需要最小距离与车辆的当前速度的平方成正比，且与最大制动加速度成反比。

当 TTC 值小于预设的阈值 TTC_e 时，再通过实时计算的车距值与三个关键的车距计算值比较确定危险等级，危险等级共三等。如果 TTC 小于设定的安全阈值，表示存在碰撞风险，此时会进一步评估目标的危险等级；如果 TTC 大于阈值，则认为目标安全，不需要执行后续判断。通过这种方式，可以有效减少不必要的计算，提升系统的效率。

其次，通过目标车与本车的相关信息，计算当前状态下，在完全制动情况下本车应与目标车保持的最小安全车距 S_3 。将两车当前的实际距离 S 与计算得到的安全车距进行比较。如果实际距离 S 小于 S_3 ，则判定目标的危险等级为 3 级，意味着目标距离过近，存在严重碰撞风险。

如果实际距离大于安全车距 S_3 ，则会继续计算部分制动时应保持的安全车距 S_2 。在这种情况下，若 S 实际距离小于计算得出的 S_2 ，则目标的危险等级为 2 级，表示存在一定的碰撞风险，需要进行部分制动。如果实际距离大于部分制动安全车距，则进一步计算安全预警车距 S_1 ，并与当前的实际距离进行比较。如果实际距离小于 S_1 ，则目标的危险等级为 1 级，表示处于较低风险范围，系统会发出预警；如果实际距离大于预警车距，则判定目标为安全目标，不需进一步干预。危险等级判别流程如图 3 所示。

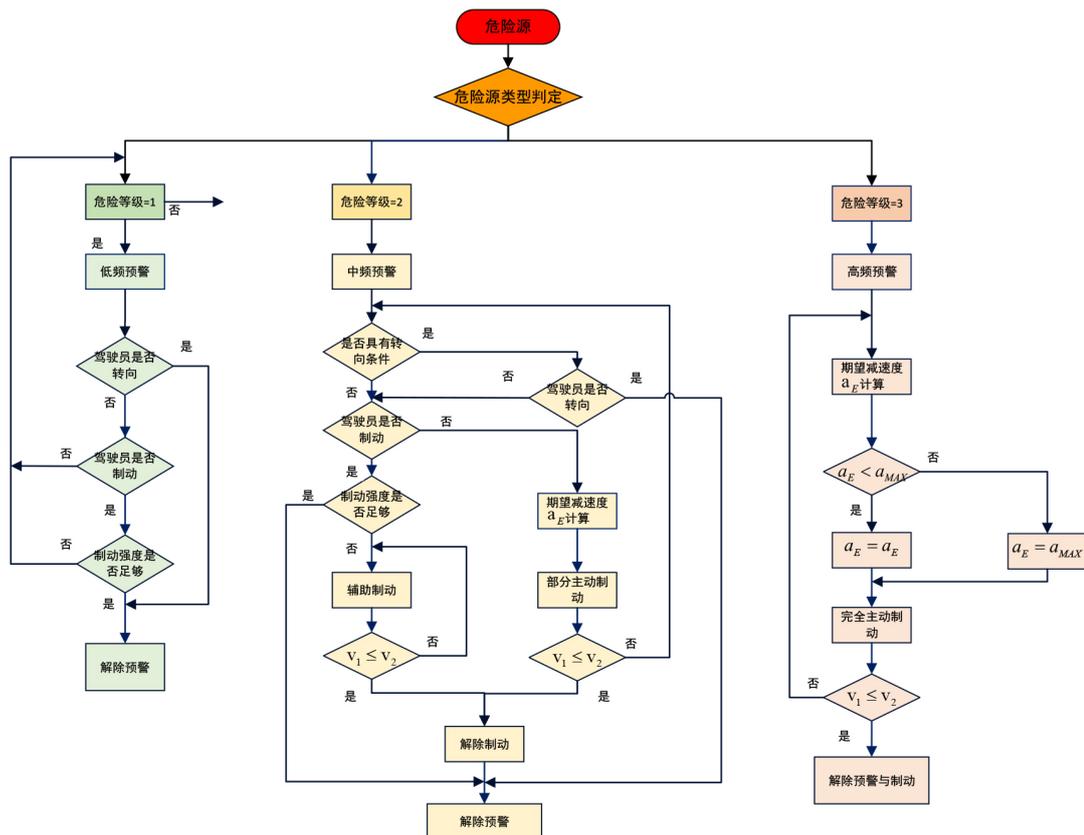


Figure 3. Risk classification flow chart
图 3. 危险等级判别流程图

3.3.3. 碰撞预测与预警

在碰撞预测与预警之后，系统根据碰撞风险的不同级别，采用分级制动响应策略，确保在不同危险等级下采取合适的措施。分级制动与响应策略根据驾驶员行为、碰撞时间(TTC)、安全车距等信息，动态调整制动强度。系统的目标是最大限度地减少碰撞的伤害。

(1) 分级制动响应

根据判别流程的控制策略，系统将碰撞风险分为三种等级，并根据每个等级取不同的制动措施。在不同碰撞风险等级下，系统可以智能调节制动强度并做出相应的响应。在低风险情况下，系统轻微干预以提醒驾驶员；在高风险情况下，系统会接管制动过程，并提供最大制动力度进行紧急停车。通过这种分级的制动响应，系统最大限度减少了碰撞的风险与伤害。

当 $TTC > TTC_e$ 或 $TTC < TTC_e$ 但 $S > S_1$ 时，系统判定为安全；当 $TTC < TTC_e$ 且 $S_2 < S < S_1$ 时，系统判断有碰撞风险但风险较低，仅会发出低频预警；当 $TTC < TTC_e$ 且 $S_3 < S < S_2$ 时，系统发出中频预警，根据驾驶员反应采取部分自主制动；当 $TTC < TTC_e$ 且 $S < S_3$ 时，碰撞风险高，发出高频预警，计算期望加速度 a_E ，采取完全自主制动。

(2) 驾驶员反应与系统介入

系统通过监测驾驶员的反应动态调整制动强度。当驾驶员已进行转向操作，尤其在中等或高风险情况下，系统会避免过度制动以防车辆失控。通过监控驾驶员的制动操作，系统判断其是否采取了足够的制动措施；若未采取足够制动，系统会增强制动力度，确保车辆及时减速。如果驾驶员的制动强度不足，系统将根据预期减速度进一步加大制动力，确保车辆在安全时间内停车。如图 4 为控制策略流程图。

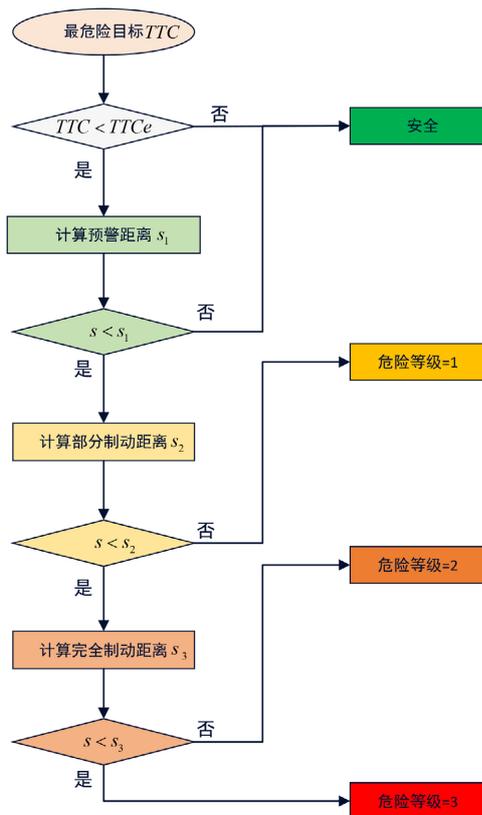


Figure 4. Control strategy flow chart
图 4. 控制策略流程图

4. 实质性技术特点和显著进步

4.1. 实质性技术特点

本研究提出的后装电动汽车防碰撞系统在技术上具有多项创新，系统结合了毫米波雷达和视觉传感器，通过卡尔曼滤波算法融合两者的数据，克服了单一传感器在复杂环境下的局限性。创新的复合型安全模型结合了 TTC 模型和安全车距模型，在多维度上评估碰撞风险，显著提升碰撞预测的准确性和响应速度。

系统设计了智能分级制动响应，根据碰撞风险等级自动调整制动强度，从预警至部分制动到紧急制动，确保在碰撞风险增加时有效减缓车速，减少损伤。并且后装设计保证了对现有车辆的广泛适配，提供了一个经济高效、易于实施的解决方案，提升了现有汽车的主动安全性能。

4.2. 显著进步

本系统通过智能分级制动与碰撞预测机制，显著提高了存量车辆的主动安全性。系统能够根据不同碰撞风险自动调整制动强度，减少碰撞伤害，提高车辆的可靠性和可用性。作为一种汽车后装安全系统，系统提供了低成本的安全技术升级，适用于现有车辆，推动了智能安全技术的普及。这一进步不仅增强了消费者对智能驾驶的信任，也促进了智能交通的进一步发展。

5. 应用前景

本系统作为后装防碰撞解决方案是针对目前缺乏高级主动安全系统的现有车辆。许多现有车辆未配备碰撞预警和自动制动系统，这使得驾驶员在复杂交通环境中面临较高的风险。通过本系统的后装安装，能够为这些车辆提供及时的碰撞预测、预警以及分级制动响应，大幅提升驾驶安全性。

随着消费者对车辆安全性的需求不断增加，通过迭代创新，本系统能够使现有车辆逐步适应未来智能网联时代，提升车辆的智能化水平。这不仅有助于减少交通事故的发生率，还能推动智能交通技术的普及，为未来智能出行奠定基础。

6. 结语

基于多传感器融合技术的后装汽车防碰撞系统是一项具有重要意义的创新解决方案。通过毫米波雷达与视觉传感器的融合，系统实现了精准的碰撞预测与预警，以及智能分级制动响应，显著提升了现有车辆的安全性。该系统不仅为没有高级安全系统的现有车辆提供了低成本智能安全升级，还有效减少了复杂交通环境中的碰撞风险，提升了驾驶员的行车安全。

基金项目

东北林业大学校级创新项目资助(202410225639)。

参考文献

- [1] 胡远志, 吕章洁, 刘西. 基于 PreScan 的 AEB 系统纵向避撞算法及仿真验证[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(2): 136-142.
- [2] 张庆. 基于多传感器数据融合的乘用车 AEB 控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [3] Xu, G., Xiong, Y., Niu, H., Yu, G. and Zhou, B. (2021) Collision-Warning System Integrated with Merging Behaviour Prediction Model Based on Multi-Sensor Fusion. *International Journal of Vehicle Design*, **86**, 143-161. <https://doi.org/10.1504/ijvd.2021.122257>
- [4] 辛佳庚, 杨复钰, 张宝迪, 等. 基于融合算法的电动汽车 AEB 控制策略[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(6): 77-

86+93.

- [5] 王梦缘, 惠飞, 薛硕硕, 等. 基于 AEB 的车辆防碰撞控制及仿真测试[C]//中国科学技术协会, 交通运输部, 中国工程院, 湖北省人民政府. 2023 世界交通运输大会(WTC2023)论文集(下册). 2023: 232-239.
- [6] 胡永坤, 殷晨波, 乔文华, 等. 基于激光雷达和多传感器数据融合的塔机防碰撞系统[J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(9): 117-121.
- [7] Vinoth, K. and Sasikumar, P. (2024) Multi-Sensor Fusion and Segmentation for Autonomous Vehicle Multi-Object Tracking Using Deep Q Networks. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 31130. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82356-0>
- [8] 唐启涛, 戴小鹏, 罗莉霞. 卡尔曼滤波下多源传感器数据互补-加权迭代融合算法[J]. 传感技术学报, 2024, 37(8): 1460-1465.