

周志巍, 李丕毅, 忻芸. 高阶辅助驾驶域控制器硬件在环仿真测试[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(3): 179-186. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 24051202

高阶辅助驾驶域控制器硬件在环仿真测试

周志巍, 李丕毅, 忻芸

(上海交通大学职业技术学院 汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 随着汽车智能化的高速发展, 高阶辅助驾驶域控制器市场的需求量呈指数增长。现阶段受限于测试平台无法满足多源传感器配置方案、测试效率低、开发周期长等问题, 域控制器的开发进度和质量受到影响。为应对这些挑战, 根据系统的测试需求, 设计了高阶辅助驾驶域控制器硬件在环(Hardware-In-the-Loop, HIL)测试平台, 加快高阶辅助驾驶域控制器的开发进度。本文设计了AEB和FCW两种高阶辅助驾驶功能算法, 部署至HIL系统中进行平台功能测试验证, 并且提出一种将TTC算法作为前向碰撞预警算法, SeungwukMoon算法作为自动紧急制动算法的融合算法。构建了高阶辅助驾驶域控制器的硬件在环测试平台完成车辆动力学模型、测试场景和算法的闭环验证, 分析算法的测试结果验证了HIL系统对ADAS域控制器研发的有效性和可靠性。

关键词: 高阶辅助驾驶系统; 前方碰撞预警系统; 自动紧急制动系统; 硬件在环仿真平台; SeungwukMoon算法

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)03-0179-08

Research on Hardware-In-the-Loop system of high-level driver assistance domain controller

ZHOU Zhiwei, LI Piyi, XIN Yun

(School of Automotive Engineering, Shanghai Communications Polytechnic, Shanghai 201620, China)

Abstract: With the rapid development of automobile intelligence, the demand of the high level assisted driving domain controller market is exponentially increasing. At present, the development progress and quality of the domain controller are affected by the problems such as the inability of the test platform to meet the multi-source sensor configuration scheme, low test efficiency and long development cycle. In order to meet these challenges, a Hardware-In-the-Loop (HIL) test platform is designed to accelerate the development of HIL according to the testing requirements of the system. In this paper, two high-level driving assistance function algorithms, AEB and FCW, are designed for deployment to the HIL system for platform function testing and verification. In addition, a fusion algorithm is proposed, which takes TTC algorithm as the forward collision warning algorithm and SeungwukMoon algorithm as the automatic emergency braking algorithm. The hardware of the high level assisted driving domain controller is constructed to complete the closed-loop verification of the vehicle dynamics model, test scenarios and algorithms on the loop test platform, and the test results of the algorithms are analyzed to verify the effectiveness and reliability of the HIL system.

Key words: advanced driving assistance system; Forward Collision Warning system (FCW); Autonomous Emergency Brake system (AEB); Hardware-In-the-Loop simulation platform; SeungwukMoon algorithm

0 引言

自动驾驶技术是现阶段解决交通拥堵、降低交通事故发生风险的主要途径, 而高阶辅助驾驶系统(Advanced Driver Assistant System, ADAS)作为自动驾驶技术的基础和实现途径是汽车行业研究、开发和应用的主要方向^[1-2]。所以开发ADAS的研发测

试平台十分有必要。硬件在环测试是一种模拟真实驾驶环境的测试方法, 可以在实验室阶段实现ADAS规划控制功能和故障诊断的验证。相对于实车测试, 基于HIL测试能够大幅度提高测试场景的覆盖率, 同时具备测试成本低、安全性高的优点。

现阶段, 车载传感器在环的ADAS硬件在环测试中具有相当广泛的应用。Reway等学者^[3]设计一

作者简介: 周志巍(1984—), 男, 副教授, 主要研究方向: 汽车发动机传感器参数分析。Email: 13764576938@126.com; 李丕毅(1977—), 男, 副教授, 主要研究方向: 汽车发动机传感器性能分析; 忻芸(1977—), 女, 讲师, 主要研究方向: 汽车发动机传感器参数分析。

收稿日期: 2024-05-12

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

套具备前视、环视和后视摄像头在环测试、多环境模拟系统的 ADAS 测试平台,该平台融合测试场景传输真实的传感器数据至控制器实现 ADAS 功能测试。Hager 等学者^[4]提出了一种多源传感器同时在环的实验测试框架,可以实现车载摄像头、毫米波雷达和 V2X 系统感知数据的模拟、车辆 CAN 总线数据的交互,基于 dSPACE 硬件在环系统实现传感器数据注入控制器,完成闭环测试。赵文博^[5]通过车载摄像头、辅助驾驶域控制器、场景服务器等设备搭建了相机在环的测试平台。实现智能汽车在不同测试场景、不同天气条件下的 ADAS 行人避撞功能测试。

本文首先进行高阶辅助驾驶系统的 CAN 通信配置,利用 VCAR 系统上位机软件实现测试系统的软硬件集成,提出基于 AEB 和 FCW 控制策略的 2 种高阶辅助驾驶功能的算法,用于部署至 HIL 系统中进行平台功能测试验证。分析安全距离仿真模型和时间碰撞模型,提出一种将 TTC 算法作为前向碰撞预警算法、SeungwukMoon 算法作为自动紧急制动算法的融合算法。基于构建的高阶辅助驾驶域控制器的硬件在环测试平台完成车辆动力学模型、测试场景和算法的闭环验证,分析算法的测试结果以验证 HIL 系统的有效性和可靠性。

1 系统测试集成

1.1 平台上位机软件开发

ADAS 域控制器、CAN 总线通讯板卡和实时目

标主机之间的硬件连接由线束保证,而信号交互需要通过上位机软件建立控制器引脚、板卡功能通道和车辆模型接口一一映射关系。利用上位机系统软件 VCAR EM 和 VCAR EE 设计人机交互界面。系统上位机软件开发具体步骤如图 1 所示。

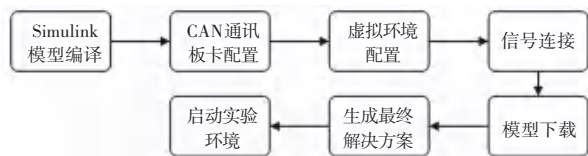


图 1 系统上位机软件开发流程

Fig. 1 Flowchart of system host computer software development process

本文使用 CAN 通讯板卡接收 ADAS 域控制器控制信号,同时车辆模型输出的实时位姿信息也通过 CAN 通讯板卡传输至场景仿真软件,因此本文主要对 CAN 通讯板卡的 CAN/CANFD、LIN 和 Flexray 通道进行参数配置。

1.2 测试平台软硬件集成

场景仿真系统搭建测试场景为车辆动力学实时仿真模型提供可视化平台,车辆动力学实时仿真模型作为硬件在环测试系统的核心,能够实时计算车辆在不同条件下的动态响应。上位机测试管理界面的开发是用户和测试平台交互的桥梁,提供了友好的操作界面,使测试人员轻松地管理和控制整个测试过程。测试系统集成如图 2 所示。

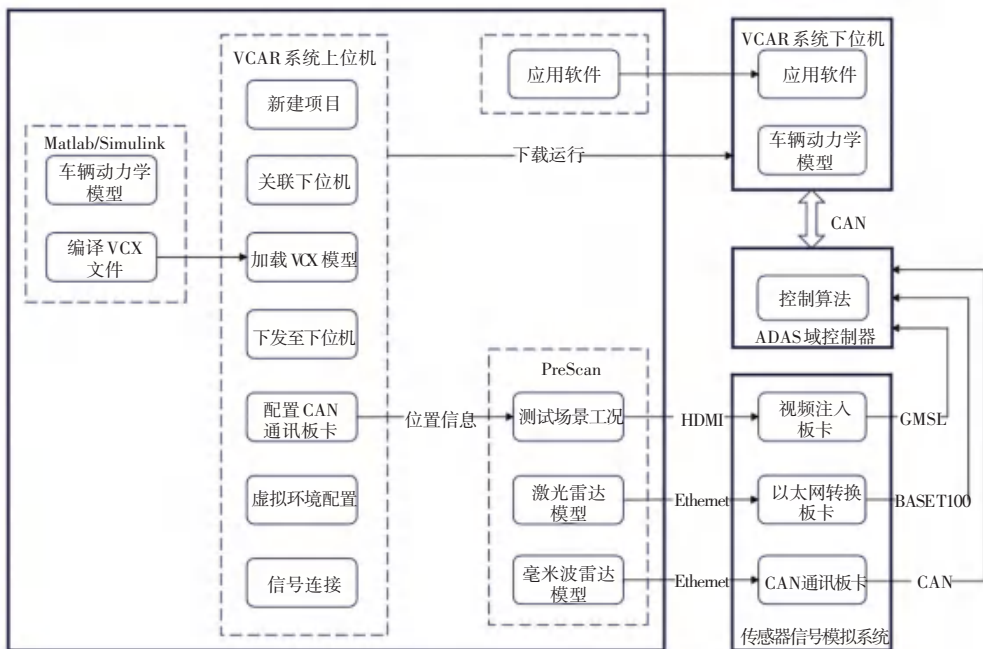


图 2 测试平台软硬件集成示意图

Fig. 2 Hardware and software integration of the test platform

场景仿真系统中的摄像头和毫米波雷达传感器模型检测和跟踪周围目标信息,通过传感器仿真系统输出真实的传感器信号值传输至 ADAS 域控制

器,作为 FCW、AEB 算法的输入。ADAS 域控制器硬件在环测试系统试验平台如图 3 所示。

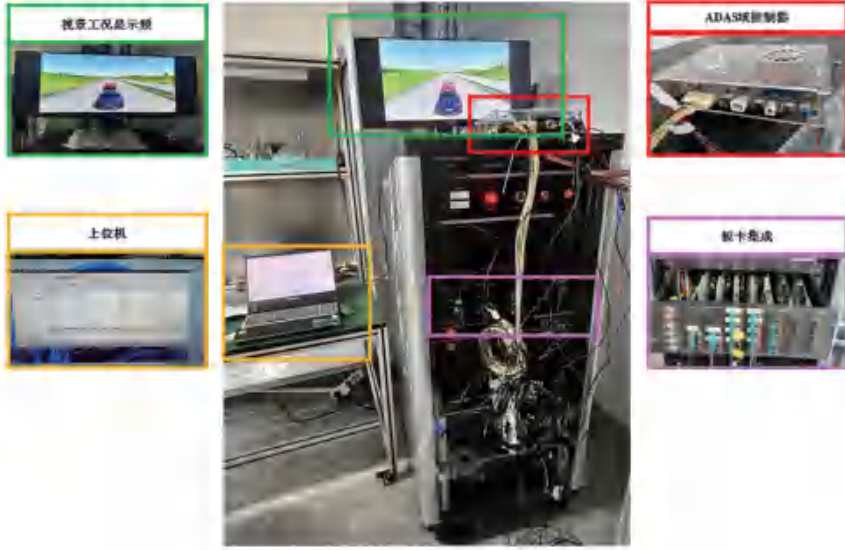


图3 ADAS域控制器硬件在环测试系统试验平台

Fig. 3 Test platform for the hardware-in-the-loop test system of an ADAS domain controller

2 高阶辅助驾驶算法选用以及优化

2.1 经典算法分析及选用

目前国内外的各大研究机构对于前方碰撞预警系统(Forward Collision Warning System, FCW),自动紧急制动系统(Autonomous Emergency Brake, AEB)控制策略的研究,主要围绕基于安全距离和基于安全时间的避撞策略展开。基于安全距离的模型主要有 Mazda 模型^[6]、Berkeley 模型^[7]和 SeungwukMoon 模型^[8]。

(1) Mazda 模型^[6]。Mazda 模型是 Doi 于 1994 年提出的避撞系统的自动制动控制算法,其计算公式为:

$$d_{br} = \frac{1}{2} \frac{v_x^2}{a_x} - \frac{(v_x - v_y)^2}{2a_y} + v_x t_1 + v_{rel} t_2 + d_0 \quad (1)$$

其中, d_{br} 表示危险制动临界距离; v_x 表示主车速度; v_y 表示目标车辆的速度; v_{rel} 表示两车相对速度; a_x 与 a_y 分别表示主车与目标车辆的加速度; t_1 表示驾驶员反应阶段的时间; t_2 表示制动协调阶段的时间; d_0 表示避免主车与前车发生碰撞的最小安全距离。

文献[9]的研究中,驾驶员反应时间 t_1 的取值为 1.36 s,制动协调阶段所占的时间比较固定,相关文献[10]分析制动协调阶段的时间为 0.2 s。 d_0 取 3 m。采用 Simulink 软件对 Mazda 危险制动临界距

离模型进行仿真,仿真结果如图 4 所示。

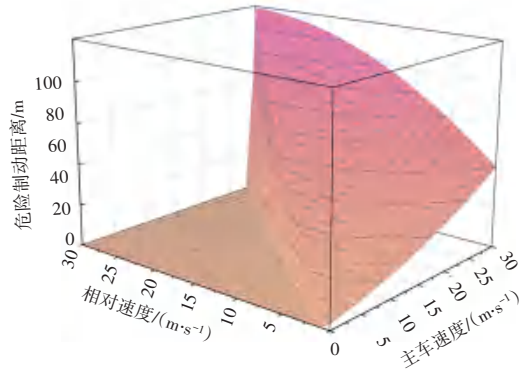


图4 Mazda危险制动距离模型

Fig. 4 Mazda hazardous braking distance model

从图 4 的仿真结果可以看出 Mazda 模型的危险制动距离较大,意味着模型较为保守,会尝试着避免所有碰撞的发生,导致预警和制动过于频繁且过早地介入,降低驾驶人员对 FCW/AEB 系统的信任度。

(2) Berkeley 模型^[7]。Berkeley 模型又称为伯克利模型,是 Peter Seiler 于 1998 年提出的自动紧急制动避撞模型,其计算公式如下:

$$d_w = \frac{1}{2} \frac{v_x^2}{a_x} - \frac{v_y^2}{2a_y} + v_x t_1 + d_0 \quad (2)$$

$$d_{br} = v_{rel}(t_1 + t_2) + \frac{1}{2} a_y (t_1 + t_2)^2 \quad (3)$$

当 $v_{rel} > v$ 时, $d_{br} = 0$ 。参数选取与前文内容保持一致,对 Berkeley 危险制动临界距离模型进行仿

真,仿真结果如图5所示。

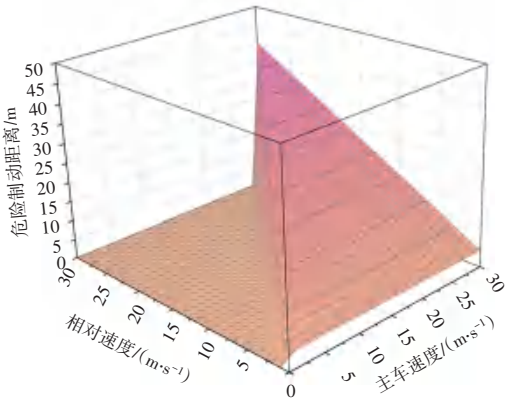


图5 Berkeley 危险制动距离模型

Fig. 5 Berkeley dangerous braking distance model

从图5的仿真结果可以看出,Berkeley模型危险制动距离与Honda模型相差无几,表明预警和自动紧急制动介入时机较晚,存在不能有效避免碰撞的风险。但Berkeley模型综合Mazda和Honda避撞模型的基础上采用分级预警的模式,提高了算法的实用性。

(3) SeungwukMoon模型^[8]。SeungwukMoon算法是经典的安全距离纵向避撞策略,定义如下:

$$d_w = d_{br} + v_x t_{hmin} \quad (4)$$

$$d_{br} = v_{rel} T_{delay} + f(\mu) \times \frac{v_{rel}(2v_x - v_{rel})}{2a_{max}} \quad (5)$$

其中, t_{hmin} 表示驾驶员所接受的最小小时距; $f(\cdot)$ 表示摩擦标定函数; μ 表示道路和轮胎摩擦系数估计值; T_{delay} 表示系统的延迟时间; a_{max} 表示最大制动减速度。

取驾驶员所接受的最小小时距 $t_{hmin} = 1$ s, $T_{delay} = 1.2$ s, $a_{max} = 6$ m/s², 对模型进行仿真可得, SeungwukMoon模型的危险制动临界距离的仿真结果如图6所示。

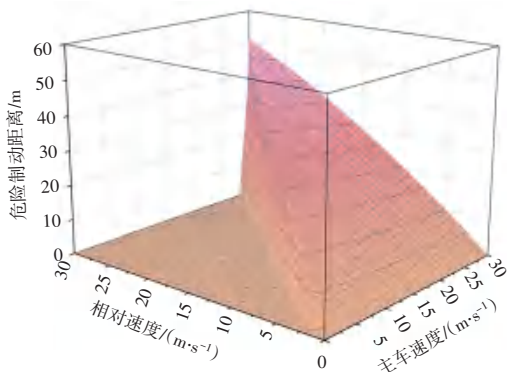


图6 SeungwukMoon 危险制动距离模型

Fig. 6 SeungwukMoon dangerous braking distance model

从图6可以看出,相较于以上2个模型,SeungwukMoon算法模型的危险制动距离适中,表明算法具有有效减轻或避免碰撞能力的同时能够兼顾不干扰驾驶员正常驾驶。同时,SeungwukMoon算法综合考虑了道路附着系数和驾驶员反应特性。

SeungwukMoon模型的危险制动距离适中,既可以有效避免碰撞,又不影响驾驶员对FCW/AEB系统的信任度。同时,SeungwukMoon算法兼顾了道路附着系数和驾驶员的反应特性,具有更强的实用性。综上,本文基于SeungwukMoon算法设计预警、避撞控制策略。

2.2 优化 SeungwukMoon 算法

以高附着路面建立的安全距离模型,在低附着路面上不能完全实现避撞功能,因此需要考虑道路附着系数对制动距离的影响,以适应不同道路条件的工况。最大制动减速度 a_{max} 与道路附着系数 μ 的关系可以表示为:

$$a_{max} \leq \mu g \quad (6)$$

其中, g 表示为重力加速度 ($g = 9.8$ m/s²)。

将式(6)带入式(5)得到优化后的SeungwukMoon算法公式定义如下:

$$d_{br} = v_{rel} T_{delay} + f(\mu) \times \frac{v_{rel}(2v_x - v_{rel})}{2\mu g} \quad (7)$$

对于系统延迟时间 T_{delay} 的设定,本文采用优序图法^[11]对驾驶员反应时间的影响指标进行权重分配,计算较为精确的驾驶员反应时间,提升模型的精确性,增强车辆纵向跟驰的安全性。

驾驶员从接收到预警信息做出反应到完成制动这一系列动作所需要的时间可看作AEB系统的延迟时间 T_{delay} ,本文以年龄、驾驶风格和危险工况这3个指标作为影响驾驶员反应时间的关键要素,文献[9]以年龄作为评价指标,利用驾驶模拟器对不同年龄段的驾驶员的制动反应时间开展试验,将年龄分为3个时间段:18~30岁、30~50岁和50~70岁,试验得出了3个年龄段相对应的反应时间分别为1.27、1.30和1.46 s。文献[10]将驾驶风格作为反应时间的评价指标,提出不同的驾驶风格影响驾驶员的反应时间的长短,并将其分成保守、适中和激进3种不同的类别,试验结果得出3种驾驶风格对应的驾驶员反应时间分别为1.30、0.93和0.67 s。文献[11]指出驾驶员在不同的危险工况下的反应时间因人而异,通过记录实际驾驶场景的数据,将危险工况分成6类,驾驶员应对每个工况所作出的反应时间见表1。

表 1 危险工况下的反应时间

Table 1 Reaction time under hazardous conditions

危险工况	时间/s
I 直线行驶遇到自行车	1.02
II 正常跟随, 前车突然减速	1.36
III 车辆转弯, 遇到自行车	1.07
IV 车辆变道, 侵占同向行驶的其他车辆的车道	1.15
V 车辆直线行驶, 遇到行人	1.06
VI 邻道同向行驶的车辆入侵车道	1.14

本文采用优序图法^[12]将年龄、驾驶风格和危险工况指标的平均反应时间的大小作为评判方式, 计算步骤如下:

步骤 1 计算指标得分表。根据 3 个影响驾驶员反应时间的指标分别计算求出每个指标的平均值, 将平均值的大小两两比较, 均值大记为 1 分, 均值相同记为 0.5 分, 均值小则记为 0 分, 指标的得分见表 2。

步骤 2 计算权重占比表。根据表 3 可知 3 个指标的分数, 将所计算的分数相加处理得到驾驶员反应时间的得分指标 (Time To Live, TTL), 对 TTL 值进行归一化处理得到各个指标的权重占比, 各项指标的权重占比具体见表 3。

表 2 指标得分

Table 2 Indicator scores

指标	平均值/s	影响驾驶员反应时间的 3 个指标		
		年龄	驾驶风格	危险工况
年龄	1.34	0.5	1.0	1.0
驾驶风格	0.97	0	0.5	0
危险工况	1.13	0	1.0	0.5

表 3 权重占比

Table 3 Weighting percentage

指标	平均值/s	TTL 值	权重/%
年龄	1.34	2.5	56
驾驶风格	0.97	0.5	11
危险工况	1.13	1.5	33

根据优序图法计算驾驶员反应时间 t_1 为 $1.34 \times 0.56 + 0.97 \times 0.11 + 1.13 \times 0.33 = 1.23$ s。由于制动协调阶段的时间为 0.2 s。因此, 整个 AEB 系统的时间延迟 T_{delay} 为 $1.23 + 0.2 = 1.43$ s。

2.3 分级预警及制动策略设计

基于时间碰撞模型的 AEB 控制策略主要围绕

TTC 算法展开。本文仅考虑主车速度大于前车速度的情况下, 两车存在碰撞的可能性, TTC 算法的公式^[13]为:

$$TTC = \begin{cases} \frac{D_{\text{rel}}}{v_{\text{rel}}}, & v_{\text{rel}} > 0, a_{\text{rel}} = 0 \\ \frac{v_{\text{rel}} - \sqrt{v_{\text{rel}}^2 - 2a_{\text{rel}}D_{\text{rel}}}}{a_{\text{rel}}}, & v_{\text{rel}} > 0, a_{\text{rel}} \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, D_{rel} 表示主车与目标车辆之间的距离, a_{rel} 表示主车与目标车辆的相对加速度。

在仅考虑报警的情况下, 且 $D_{\text{rel}} > 0; v_x > v_y > 0$, FCW 的 TTC 阈值的公式^[14]定义如下:

$$v_y t_y + \frac{1}{2} a_y t_y^2 + D_{\text{rel}} + v_y t_1 + \frac{1}{2} a_y t_1^2 + v_x t_1 + \frac{1}{2} a_{\text{driver}} t_1^2 \geq v_x t_x + \frac{1}{2} a_{\text{driver}} t_x^2 \quad (9)$$

其中, v_y 表示目标车辆的速度; t_x 与 t_y 分别表示两车行驶的时间; a_x 与 a_y 分别表示主车与目标车辆的加速度; a_{driver} 表示主车的制动减速度。为了迎合驾驶员驾驶特性, 文献[14]通过分析 100 起轻微碰撞事故的制动减速度数据, 得出驾驶员平均制动减速度为 0.41g。当目标车辆静止或者匀速行驶时, 由式(9)可计算 FCW 的 TTC 阈值, 定义公式分别如下:

$$TTC_1 = \frac{v_{\text{rel}} + \sqrt{v_{\text{rel}}^2 + 2a_{\text{driver}}D_{\text{rel}}}}{a_{\text{driver}}} + t_2 + 2t_0 \quad (10)$$

$$TTC_2 = \frac{v_{\text{rel}} + \sqrt{v_{\text{rel}}^2 + 2a_{\text{driver}}D_{\text{rel}}}}{a_{\text{driver}}} + t_2 + t_0 \quad (11)$$

其中, t_0 表示一次预警时间; TTC_1 表示一级预警时间; TTC_2 表示二级预警时间。

基于主车与目标车辆的运行状态, 考虑道路附着系数和最大制动减速度, 在 SeungwukMoon 算法的基础上引入危险系数 ω 。危险系数 ω 的计算公式^[14]为:

$$\omega = \frac{D_{\text{rel}} - d_{\text{br}}}{d_w - d_{\text{br}}} \quad (12)$$

综上, 危险系数实际上是一种基于距离的线性指标, 对于发生碰撞的潜在威胁未能做出实时评估。本文提出一种将 TTC 算法作为预警算法、SeungwukMoon 算法作为自动紧急制动算法的协同控制的融合算法。采用分级预警方式, 分为“一级预警阈值 TTC_1 ”和“二级预警阈值 TTC_2 ”。基于融合算法的控制逻辑如图 7 所示。

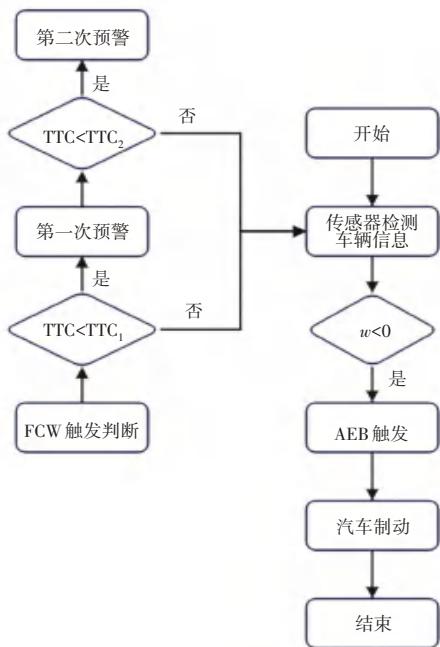


图 7 基于融合算法的控制逻辑

Fig. 7 Control logic based on fusion algorithm

3 执行控制器模型搭建

综合所述,在 Simulink 软件中建立下层执行控制器,仿真模型如图 8 所示。

4 决策算法测试

4.1 测试方案

研究表明^[15],在预警时间达到 1.4 s 时,95% 的测试人员能够对潜在的危險做出反应;当预警时间达到 2 s 时,100% 的测试人员均能做出反应。本文算法测试相关参数主要包含预警等级、制动等级、主车速度、相对速度和相对距离。

4.2 准工况测试

当传感器系统识别到前方存在一个未移动的物体时,FCW/AEB 系统会主动介入,进行快速的风险评估。一旦判定该情况符合紧急制动的标准,系统就会迅速启动,执行车辆的刹车操作。为了复现并分析这个过程,在 PreScan 仿真平台上构建相应的 CCRs 测试场景,具体场景布局如图 9 所示。

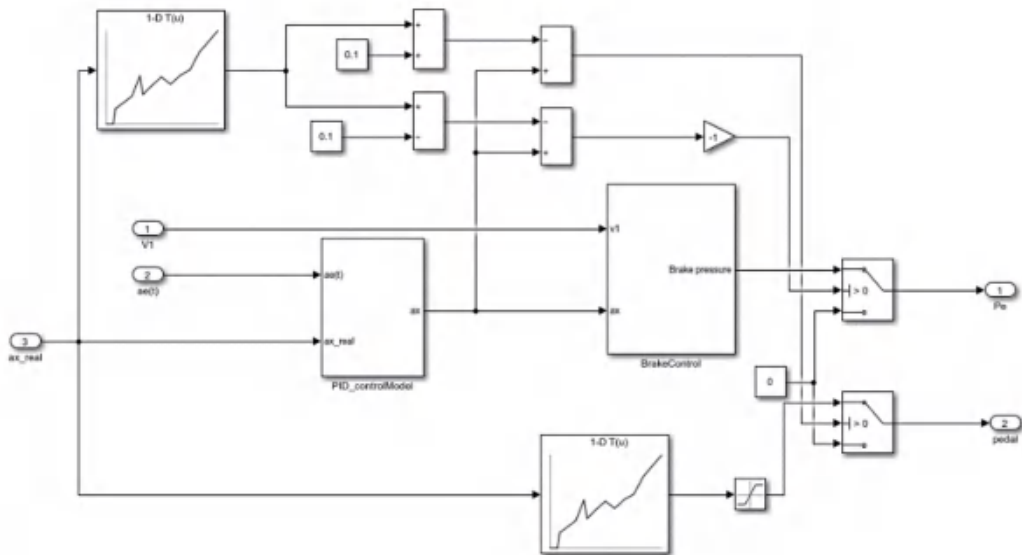


图 8 执行器控制仿真模型

Fig. 8 Actuator control simulation model

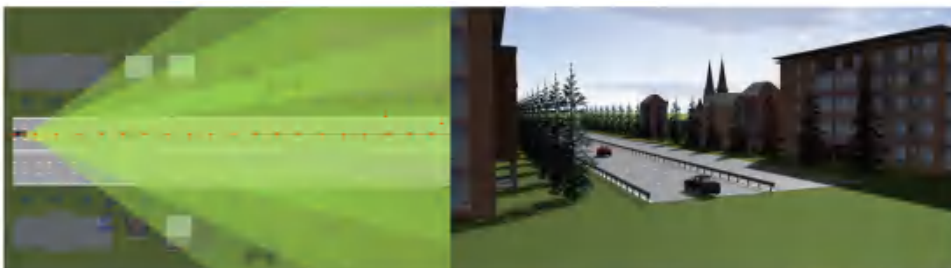


图 9 CCRs 测试工况场景仿真

Fig. 9 Simulation of CCRs test scenarios

在 CCRs 测试工况中,主车行驶 1 s 后进入一级预警状态,2 s 时进入二级预警状态,2.6 s 时 AEB 系统介入,持续预警时间约为 1.6 s,如图 10(b)、(d)所示。制动完成时,主车与目标车辆之间的最小安全距离为 2.95 m,如图 10(c)所示。相较于传

统的 AEB 算法,本文所提出的基于融合算法的 FCW/AEB 控制策略前向碰撞预警时间后移,最小安全距离更为合适。CCRs 标准测试工况的硬件在环测试结果见表 4。

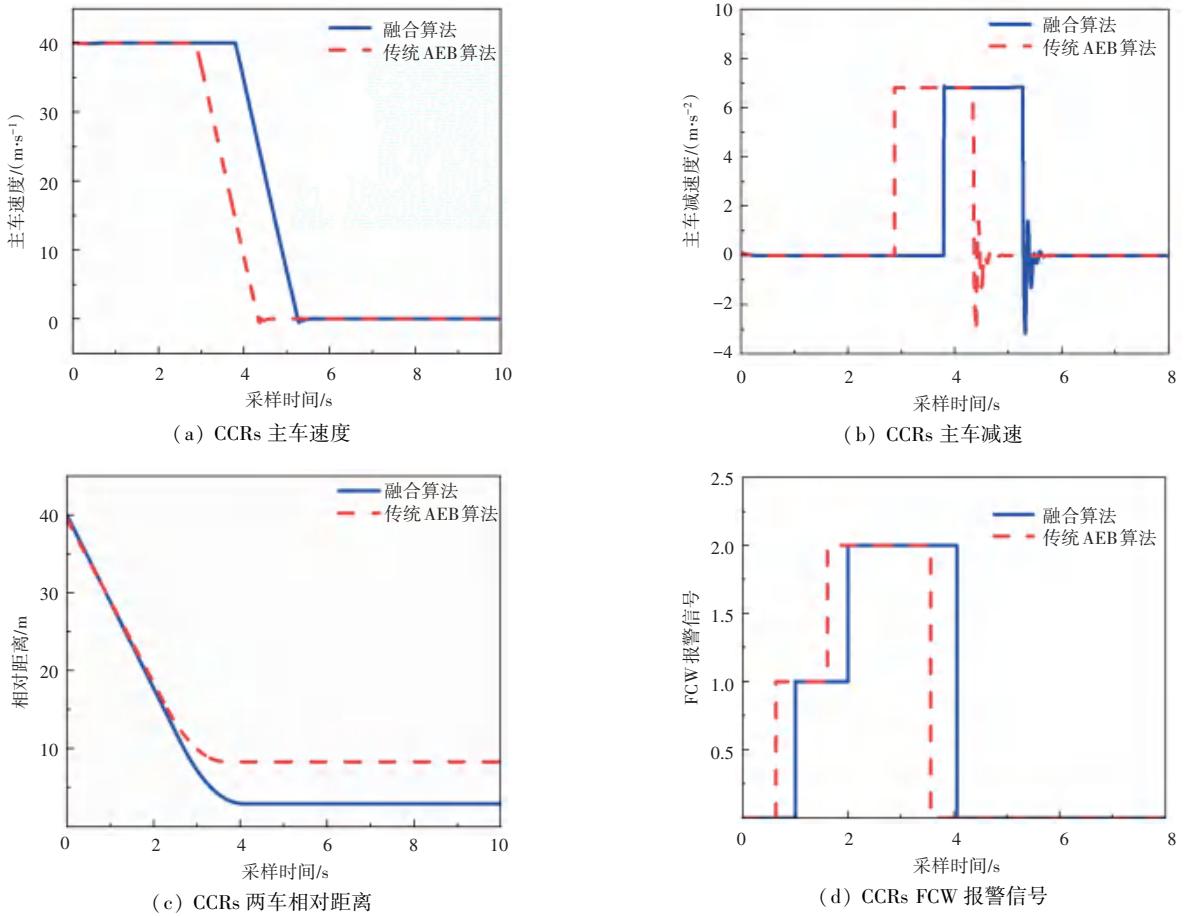


图 10 CCRs 标准测试工况硬件在环测试结果对比图

Fig. 10 Comparison of hardware-in-the-loop test results under CCRs standard test conditions

表 4 CCRs 标准测试工况的硬件在环测试结果

Table 4 Hardware-in-the-loop test results for CCRs standard test conditions

测试工况	是否触发 FCW 功能	是否触发 AEB 功能	是否碰撞	制动完成时两车的相对距离/m
CCRs	是	是	否	2.95

5 结束语

(1) 根据测试需求和技术要求,对当前主流的车辆动力学模型及场景仿真软件进行深入的优缺点评估,完成 HIL 平台搭建。

(2) 完成车辆动力学模型的参数配置,联合 Simulink 软件实现车辆输入输出的端口设计;利用欧拉角与欧拉旋转矩阵的转换,实现车辆四轮接地且具有一致的位姿变化响应。

(3) 基于 PreScan 软件进行场景建模,实现了车

辆模型、场景以及算法的闭环验证。设计了基于 FCW、AEB 两种控制系统的高阶辅助驾驶功能算法 SeungwukMoon 算法以及 TCC 预警算法,对 HIL 系统进行功能性验证。试验测试结果表明本文所搭建的高阶辅助驾驶域控制器硬件在环系统具有较高的准确度和测试效率,可支持 ADAS 相关功能验证。

本文主要完成高阶辅助驾驶域控制器的硬件在环系统搭建,受限于时间和测试设备,所研究的课题仍存在诸多不足,在日后研究和工作中可进行相关改进和优化。

(1)本文仅对基于FCW、AEB两种控制策略进行了高阶辅助驾驶功能算法对HIL系统进行功能性验证,未能搭建不同算法对测试平台进行全面验证。在后续的研究过程中,可以设计不同类型的算法对测试平台做进一步测试验证。

(2)仿真环境的场景设计未涉及实际驾驶中常见的上坡和下坡道路典型情况,限制了测试的综合性和现实性。仿真模型虽然能提供一定的预测和分析能力,但在反映真实世界的复杂性和多样性方面还有较大的提升空间。后续将对模型进行进一步的细化,扩展场景设计,从而更准确地评估车辆在各种情况下的性能表现。

参考文献

- [1] LIANG Zhihao, ZHAO Kegang, Xie Junping, et al. Ultra-fast tuning of neural network controllers with application in path tracking of autonomous vehicle[J]. ISA Transactions, 2024, 149: 394-408.
- [2] QIU Yuqi. Human-centered HMI design for level 3 automated driving takeover process [C]//Proceedings of 2023 4th International Conference on Intelligent Computing and Human-Computer Interaction (ICHCI). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 43-54.
- [3] REWAY F, HUBER W, RIBEIRO E P. Test methodology for vision-based ADAS algorithms with an automotive camera-in-the-loop [C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES 2018). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1-7.
- [4] HAGER B, ALLEN J L. Raw data injection and failure testing of camera, radar, and lidar for highly automated systems [EB/OL]. (2019-03-19). <https://doi.org/10.4271/2019-01-1378>.
- [5] 赵文博. 智能汽车行人避撞系统相机在环测试方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [6] 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.
- [7] 刘颖, 朱西产, 李佳琦. PreScan在先进驾驶辅助系统评价中的应用[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2013, 31(5): 696-699.
- [8] 何仁, 冯海鹏. 自动紧急制动(AEB)技术的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2019, 10(1): 1-15.
- [9] BROEN N L, CHIANG D P. Braking response times for 100 drivers in the avoidance of an unexpected obstacle as measured in a driving simulator [J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 1996, 40(18): 900-904.
- [10] 裴晓飞, 齐志权, 王保锋, 等. 汽车前向主动报警/避撞策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(3): 599-604.
- [11] 李霖, 朱西产, 马志雄. 驾驶员在真实交通危险工况中的制动反应时间[J]. 汽车工程, 2014, 36(10): 1225-1229.
- [12] 邹铁方, 谢荣荣. 基于聚类和优序图法事故再现结果融合方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(12): 219-229.
- [13] COELINGH E, EIDEHALL A, BENGTSSON M. Collision warning with full auto brake and pedestrian detection—a practical example of automatic emergency braking [C]//Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 155-160.
- [14] 兰凤崇, 余蒙, 李诗成, 等. 考虑预碰撞时间的自动紧急制动系统分层控制策略研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(2): 206-214.
- [15] 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.