

纯电动客车域控制系统方法研究

黄玉鹏, 杨传开, 李文皓, 刘康, 张刚

(中通客车股份有限公司, 山东聊城 252000)

摘要:为提高纯电动客车的安全性和稳定性,本文提出一种集成整车控制与高级辅助驾驶功能的域控制系统。该系统采用域控制器替代传统整车控制器和辅助驾驶控制器,优化了电子电气架构,并基于毫米波雷达和前视摄像头实现环境感知、数据融合及功能决策。测试结果表明,域控制系统在简化控制架构、提高数据传递效率、降低成本的同时,可显著提升功能安全等级。

关键词:域控制系统; 整车控制器; ADAS 系统; 数据融合

中图分类号:U463.6 文献标志码:A DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.05.004

Research on Domain Control System Methods for Pure Electric Bus

HUANG Yupeng, YANG Chuankai, LI Wenhao, LIU Kang, ZHANG Gang

(Zhongtong Bus Holding Co., Ltd., Liaocheng 252000, China)

Abstract: To enhance the safety and stability of pure electric buses, this paper proposes a domain control system integrating vehicle control and advanced driving assistance functions. The system utilizes domain controllers to replace traditional vehicle controllers and assisted driving controllers, optimizing the electronic and electrical architecture. It enables environmental perception, data fusion, and functional decision-making based on millimeter-wave radar and forward-facing cameras. The test results show that the domain control system significantly improves the functional safety level while simplifying the control architecture, enhancing data transmission efficiency, and reducing costs.

Key words: domain control system; vehicle controller; ADAS system; data fusion

JT/T 1094—2016《营运客车安全技术条件》^[1]规定,车长大于9 m的营运客车应装备符合JT/T 883^[2]规定的车道偏离预警系统,还应装备自动紧急制动系统^[3];此外,JT/T 1242—2019《营运车辆自动紧急制动系统性能要求和测试规程》^[4]也进一步明确,车长大于11 m的客车必须配备自动紧急制动系统^[5-8]。

对于客车驾驶员而言,长距离行驶容易疲劳,同时感知能力也会随之下降。在这种状态下,当其他车辆靠近时,驾驶员往往难以准确预判车体之间的相对距离、速度及加速度,极易导致车辆刮碰,甚至可能引发严重的交通事故。目前,纯电动客车采用高级驾驶辅助系统(Advanced Driving Assistance System, ADAS)来实现高级辅助驾驶功能^[9],例如:前方碰撞

预警、行人碰撞预警、车道偏离预警、限速识别预警、车距监测预警、智能节能控制、碰撞缓解、自动紧急制动(Autonomous Emergency Braking, AEB)和自适应巡航(Adaptive Cruise Control, ACC)等^[10-12]。然而,整车控制功能需要通过整车控制器(Vehicle Control Unit, VCU)实现。ADAS 和 VCU 两个控制器之间进行数据传输和分析不仅会导致时间延迟,还可能在数据处理过程中产生偏差,难以形成精确的处理结果。这种技术路线不仅不利于客车规避其他车辆,还会造成控制器资源冗余浪费,增加成本和系统复杂度,难以满足既定的功能安全等级要求。

为解决上述问题,本文介绍一种客车域控制系统。该系统通过采用域控制器(Vehicle Access and

收稿日期:2025-01-25。

第一作者:黄玉鹏(1993—),男,硕士,工程师,主要从事纯电动客车整车控制策略研究工作。E-mail:huangyupeng152@163.com。

Control Unit, VACU)取代纯电动客车 VCU 和辅助驾驶控制器,实现整车控制和高级辅助驾驶功能,简化控制架构并减少电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU)数量。在成本方面,单个 VACU 可使成本降低 700 元以上;在信号传输效率方面,VACU 可将数据传输与处理的延迟降低 20% 以上。这不仅大大提高了车辆功能安全等级,还能对客车驾驶过程中车体自身及路面状况进行高精度检测,可有效规避行人,避免发生严重交通事故。

1 域控制系统选型方案

基于纯电动客车整车需求,综合考虑控制器算力、AUTOSARCP/AP/ROS2 协议兼容性、防护等级、通信接口、在线标定、OTA(Over-The-Air)升级、故障率和成本需求等因素,本文选取 3 款典型产品进行对比。对比结果见表 1。

表 1 域控制系统产品指标及权重

权重	指标	控制器 A	控制器 B	VACU
	算力(DMIPS)	600	640	640
	通信接口	CAN×3, Ethernet×1	CAN×6, Ethernet×2	CAN×6, Ethernet×1
	防护等级	IP67	IP67	IP68
(40%)	协议支持	AUTOSAR CP	AUTOSAR CP/ROS2	AUTOSAR AP/ROS2
	刷写方式	串口	CAN 和串口	CAN 和串口
	在线标定	不支持	支持	支持
	OTA 升级	不支持	支持	支持
(20%)	成熟度	每 1 000 小时 故障率/次	0.8	0.6
			0.5	
(40%)	成本	采购成本/万元	0.35	0.52
			0.40	

目标车型的定位为高端经济型产品,其权重分配为功能(40%)、成熟度(20%)、成本(40%)。综合考虑整车需求,选取 VACU 作为研究对象,以实现整车和 ADAS 控制功能。

2 域控制系统介绍

域控制系统基于毫米波雷达和前视摄像头完成

环境感知、数据采集、数据融合、决策和执行等操作,以实现 AEB 和 ACC 等高级辅助驾驶功能。此外,域控制系统还可根据驾驶员的操作(油门、刹车、挡位)来协调电机、电池及其他附件系统,实现纯电动客车整车控制功能。下面将从 VACU 硬件、VACU 软件及域控制系统网络架构三个方面具体介绍域控制系统。

2.1 VACU 硬件

本文介绍的 VACU 与市场其他主流域控制器相比,主芯片和 SBC(System Basis Chip)芯片的算力具有显著优势,通信接口可满足整车需求,并支持功能拓展。其核心配置如下:

1) 主芯片:采用 32 位 Infineon TC275T 汽车级微控制单元(Microcontroller Unit, MCU),主频 200 MHz, Flash 4 M, SRAM 472 K, 支持浮点数运算,且 MCU 按照 ISO 26262 标准开发和记录,支持 ASIL-D 的安全要求,并兼容 AUTOSAR V3.2 和 V4.x 标准。

2) SBC 芯片:采用 Infineon TLF35584QVVS2 汽车级芯片,性能更加稳定。

3) 通信接口:采用 6 路 CAN 总线,方便与其他零部件通信,并支持可扩展应用。其中,CANA 支持特定帧唤醒,CANC 支持 CANFD 功能;15 路 12 位精度模拟量输入和 25 路高低可配的数字量输入;16 路底边驱动和 12 路高边驱动,支持车载以太网通信。

2.2 VACU 软件

VACU 软件基于 V 字型流程和 AUTOSAR 软件架构开发,开发内容包括底层和应用层。底层分为服务层、ECU 抽象层和微控制器抽象层,涉及的开发模块包括系统上下电、bootloader、单片机底层驱动模块、硬件外设驱动模块和操作系统。应用层软件使用 Simulink/Stateflow 开发,包括 VACU settings、CCP 配置、硬线输入模块、CANC 接收模块、CAND 接收模块、前视摄像头和毫米波雷达 CANA 接收模块、整车控制算法模块、感知融合算法模块、目标选择及 ADAS 控制算法模块、高低边驱动模块、CANC 发送模块、CAND 发送模块、DM1 故障诊断模块。本文介绍的 VACU 无需手写代码,而是通过 MATLAB 进行模型搭建,一键生成应用层程序。这种便捷的方式显著提高了开发效率,同时降低了时间成本和人员培训成本。

VACU 的应用层软件模块功能具体如下:

- 1) VACU settings: 用于设置 4 路 CAN 通道的初始化、通道配置和波特率等参数。
- 2) CCP 配置: 用于 CCP 标定的配置。
- 3) 硬线输入模块: 用于硬件使能信号的接收处理。
- 4) CANC 接收模块: 用于 CANC 通道报文的接收。
- 5) CAND 接收模块: 用于 CAND 通道报文的接收。
- 6) CANA 接收模块: 用于前视摄像头和毫米波雷达的 CAN 报文接收。
- 7) 整车控制算法模块: 根据硬线使能信号和 CAN 报文信号开发整车控制算法。
- 8) 感知融合算法模块: 根据接收的前视摄像头和毫米波雷达报文信息进行感知融合计算。
- 9) 目标选择及 ADAS 控制算法模块: 融合计算后进行目标障碍物的选择和 ADAS 控制功能开发。
- 10) 高低边驱动模块: 使用硬线高低电平驱动继电器或其他部件工作。
- 11) CANC 发送模块: 用于 CANC 通道报文的发送。
- 12) CAND 发送模块: 用于 CAND 通道报文的发送。
- 13) DM1 故障诊断模块: 用于 DM1 故障诊断及发送。

2.3 域控制系统网络架构

纯电动客车 VACU 通过 3 条总线 (CANA、CANC、CAND) 实现整车控制协调与高级辅助驾驶功能, 其 CAN 网络架构如图 1 所示。VACU 通过 CAN 网络总线与传感器模块、执行器模块和视频采集模块连接。其中, CANA 接收前视摄像头和毫米波雷达传感器的信息, 经过数据采集、感知融合、目标筛选、计算及决策等一系列处理后, 将相关信息通过 CANC 发送给仪表进行状态显示, 并同时发送给电子制动系统 (Electronic Brake Systems, EBS) 或电子稳定控制系统 (Electronic Stability Control, ESC) 进行自动紧急制动, 从而实现 ADAS 功能。同时, VACU 通过 CANC 和 CAND 实现整车动力系统能量管理、动力模式管理和电气附件控制等功能。这些功能包括踏板解析、散热管理、扭矩计算、扭矩使能、扭矩限制、扭矩梯度、上下电管理、气泵 DA/AC 管理、助力 DC/AC 管理、DC/DC 管理、故障管理、瞬时电耗与平均电耗计算及总里程百公里电耗计算等。VACU 的这种架构适用于纯电动客车、插电式混合动力客车、燃料电池客车等主流车型, 并能够实现上述控制功能。

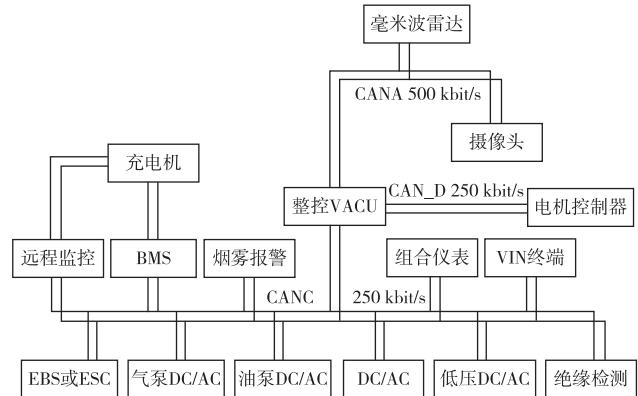


图 1 CAN 网络架构

3 域控制系统应用

本文域控制系统包括 VACU、传感器模块、视频采集模块和决策执行模块。其中, 传感器模块采集车体周围障碍物信息, 视频采集模块采集路段数据, 并将这些信息传输至 VACU。VACU 对障碍物信息和路段数据进行数据融合与决策处理, 生成相应的指令信号, 并将其传输至执行模块。执行模块根据指令完成图 2 所示的功能。本文以 VACU 的 AEB 功能为例, 详细说明其实现过程。

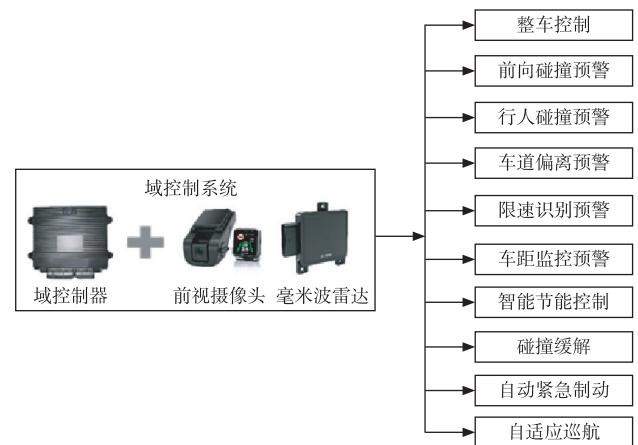


图 2 域控制系统功能

3.1 数据采集

数据采集模块包括传感器模块和视频采集模块。传感器模块基于毫米波雷达实现, 毫米波雷达能够检测目标障碍物信息, 具有检测距离远、可靠性高、不受光线影响等优势, 但对行人的分辨率较低, 因此需要与前视摄像头进行数据融合。传感器模块用于采集

车体周围障碍物信息,包括车体与障碍物的距离、障碍物类型及障碍物与车体的相对速度,并将这些信息传输至VACU。视频采集模块依靠前视摄像头实现,前视摄像头用于检测车辆与目标障碍物的相对车距、相对速度,并具备车道线和限速牌识别功能。此外,前视摄像头还可根据碰撞时间发出报警提示。视频采集模块用于采集路段数据,并将路段数据传输至VACU。

3.1.1 数据融合

毫米波雷达和前视摄像头的检测数据分别通过处理模块进行预处理和特征提取,生成初步的目标检测结果。但由于毫米波雷达和摄像头通常安装在不同位置,且二者坐标系和数据采样频率也不相同,为确保数据的准确性,需进行时空同步处理。

在空间同步方面,首先将毫米波雷达的坐标系转换到摄像头的坐标系;然后依据三角形投影相似原理,将该点从摄像头坐标系转换到图像平面坐标系;最后通过摄像头内部参数标定,将目标数据从图像坐标系转换到像素坐标系,从而完成雷达和摄像头的空间融合。在时间同步方面,通过插值或其他时间同步算法,将两个传感器的数据对齐到统一的时间轴上。

完成空间坐标转换和时间对齐后,进行障碍物目标匹配。利用重叠率(Intersection over Union, IoU)计算目标匹配的准确性。IoU是用于衡量两个目标区域重叠程度的指标,其计算公式为两个目标区域交集面积除以并集面积。IoU值越大,表示两个目标的重叠程度越高,即匹配度越高。如果IoU值大于设定阈值,则认为目标匹配成功;反之,认为目标匹配失败。具体数据融合流程如图3所示。

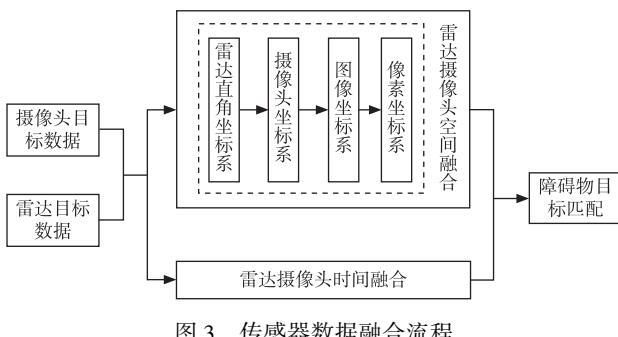


图3 传感器数据融合流程

3.1.2 AEB功能决策和执行

融合后的数据包含了障碍物类型、障碍物的横纵

向相对距离及车辆与障碍物的相对速度等信息。将这些数据输入到AEB系统中,用于计算碰撞时间。系统将根据预设的阈值,对计算得到的碰撞时间进行评估,并根据评估结果决定是否需要触发预警或执行紧急制动。

$$T = D_{\text{rel}} / V_{\text{rel}}$$

式中: T 为碰撞时间; D_{rel} 为车与障碍物的相对距离; V_{rel} 为车与障碍物的相对速度。

1) 前碰撞预警触发。当VACU判断融合数据中的障碍物类型为物体时,若车与障碍物的距离小于1.8 m且碰撞时间小于4 s,VCAU会向仪表发送前碰撞预警信号,仪表随即进行显示;当障碍物信息为空或碰撞时间大于4.5 s时,VCAU停止向仪表发送碰撞预警信号,仪表不再进行显示。

2) 行人碰撞预警控制模块。当VACU判断融合数据中的障碍物类型为行人时,若车与障碍物的距离小于2 m且碰撞时间小于4.2 s,VCAU向仪表发送行人碰撞预警信号,仪表随即进行显示;当障碍物类型不是行人或碰撞时间大于4.5 s时,VCAU停止向仪表发送行人碰撞预警信号,仪表不再进行显示。

3) 一级碰撞缓解触发。当VACU判断融合数据中的障碍物类型为有效障碍物,碰撞时间小于4.4 s且大于3.6 s,同时检测到转向盘的转向角度小于60°时,VCAU进行一级碰撞缓解控制,并向EBS或者ESC发送加速度为-1 m/s²的指令,此时油门不再起作用。当碰撞时间大于4.4 s,且转向角度大于80°时,退出一级碰撞缓解控制。

4) 二级碰撞缓解触发。当VACU判断融合数据中的障碍物为有效障碍物,碰撞时间小于3.6 s且大于2.7 s,同时检测到转向盘的转向角度小于70°时,VCAU进行二级碰撞缓解控制,并向EBS或者ESC发送加速度为-2.5 m/s²的指令,此时油门不再起作用。当碰撞时间大于3.6 s,且转向角度大于90°时,退出二级碰撞缓解控制。

5) 三级碰撞缓解触发。当VACU判断融合数据中的障碍物为有效障碍物,碰撞时间小于2.7 s,同时检测到转向盘的转向角度小于80°时,VACU进行三级碰撞缓解控制,并向EBS或者ESC发送加速度为-5 m/s²的指令,此时油门不再起作用。在该状态下,

待车速降为零即开始计时,1 s 后退出三级碰撞缓解控制。

3.2 AEB 紧急制动功能验证

为评估域控制系统的数据传递效率及稳定性,本文采用控制器 A、控制器 B 及 VACU 三种控制器,搭配相同的前视摄像头和雷达,构建统一的域控制系统。测试方法为:通过缩短报文周期来提高 CAN 总线负载率。当整车负载率达到 70% 后,验证控制器 AEB 功能的误触发情况,测量从接收到障碍物距离信息到减速度报文发出的反应时间,以及在 10 ms 发送周期下,减速度报文的实际周期。经过 2 000 轮特定场景试验,结果见表 2。

表 2 控制器试验数据对比

产品	制动平均	报文平均	AEB
	反应时间/ms	周期/ms	误触发率/%
控制器 A	32.0	10.7	0.200
控制器 B	30.4	10.5	0.101
VACU	30.2	10.4	0.097

数据传递效率和抗干扰性可根据制动平均反应时间和报文平均周期进行判断。制动平均反应时间越短且报文平均周期越接近 10 ms, 则说明控制器数据传递效率越高且抗干扰能力越强。从表 2 可知,VACU 的数据传递效率和抗干扰能力最佳,AEB 误触发率最低。

本文在多种车型(8 m、10 m、12 m 城市客车及 9 m 旅行客车)上对域控制系统的 AEB 功能进行了实车测试。测试结果显示,各车型刹停后,其与目标障碍物的距离均在 1.3~1.4 m 之间。本文选取具有代表性的高载荷 12 m 城市客车进行功能分析。

对 12 m 城市客车进行 AEB 功能测试的具体方法如下:前车作为障碍物保持静止,被测客车以 40 km/h 的速度靠近前车,两车初始距离为 60 m。车辆整个阶段的车速与加速度变化曲线如图 4 所示,客车经历了保持车速阶段和逐级增强的碰撞预警触发阶段。在 2.21 s 时,一级碰撞预警触发,VACU 发出减速指令,加速度为 -1 m/s^2 ;在 3.19 s 时,二级碰撞预警触发,VACU 发出减速指令,加速度为 -2.5 m/s^2 ;在 4.3 s 时,三级碰撞预警触发,VACU 发出减速指

令,加速度为 -5 m/s^2 ,1.1 s 后车速迅速降至 0。待车速降至 0 后开始计时,1 s 后三级碰撞预警解除,加速度变为 0。在此期间,两车的相对速度和相对距离如图 5 所示,两车的相对距离持续减小,直至车速为 0 时,12 m 客车与前车最小距离为 1.3 m。测试结果表明,车辆在行驶过程中,域控制系统不仅能准确识别障碍物,还能按照设置的控制逻辑在安全距离内完成刹停,符合 AEB 功能需求。

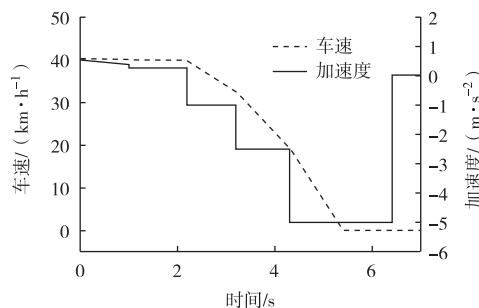


图 4 车速和加速度对应变化图

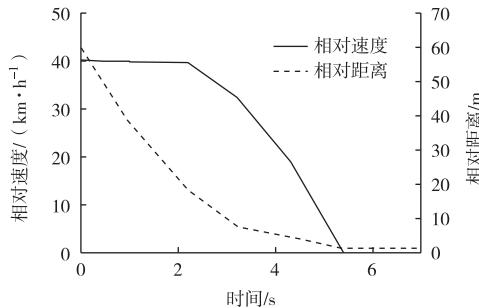


图 5 相对速度和相对距离变化曲线

4 结束语

本文介绍了一种由 VACU、前视摄像头和毫米波雷达组成的域控制系统。该系统不仅实现了车体外部数据的高效分析与驾驶控制的深度融合,还通过优化电子电器架构,有效降低了成本,提高了数据处理精度和车辆安全性,实现了整车控制功能和 ADAS 功能。本文以 AEB 紧急制动功能为例进行了试车验证,结果表明,车辆在行驶过程中能够有效识别障碍物,并在安全距离内主动刹停,证实了域控制系统符合功能安全要求。同时,域控制系统的发展前景广阔,其在实现整车控制功能的基础上,还可拓展至智能座舱域的人机交互、动力域的能量管理提升、热管理控制域的能效优化等领域。

(下转第 46 页)

4 结束语

本文基于客车骨架有限元模型的仿真结果,首先校核各典型工况下的客车骨架模态、刚度和强度,评估客车骨架的刚度及强度裕量。然后通过 Hypermesh 软件的 Optistruct 求解器对客车骨架的结构梁进行灵敏度分析,评估梁截面厚度对刚度、强度的影响程度。最后根据灵敏度分析结果和客车工程设计经验,提出客车骨架梁截面厚度的优化方案,实现客车骨架减重约 65.24 kg,且改进后的客车骨架的模态、强度、刚度均满足要求。应用该改进方案的客车通过了路试验证并已批量投入使用,市场反应良好。

参考文献:

- [1] 谢素明,王庆艳,陈秉智,等.客车车体碰撞吸能结构优化设计方法研究[J].现代制造工程,2007(5):113-115.
- [2] 周美施,尹怀仙,张铁柱,等.基于动态峰值力的客车骨架轻量化研究[J].现代制造工程,2017(5):59-64.
- [3] 吴胜军,袁威,梁治千,等.某混合动力客车骨架的轻量化设计[J].现代制造工程,2022(3):48-53.

(上接第 25 页)

参考文献:

- [1] 交通运输部运输服务司.营运客车安全技术条件:JT/T 1094—2016[S].北京:人民交通出版社,2016:1-23.
- [2] 全国道路运输标准化技术委员会.营运车辆行驶危险预警系统技术要求和试验方法:JT/T 883—2014[S].北京:人民交通出版社,2014:1-10.
- [3] 谢张军,朱江华,刘卫星,等.客车 AEBS 性能水平国内外对比分析[J].客车技术与研究,2021,43(3):60-62.
- [4] 全国智能运输系统标准化技术委员会.营运车辆自动紧急制动系统性能要求和测试规程:JT/T 1242—2019[S].北京:人民交通出版社,2019:1-13.
- [5] 周莉,文健峰,杨杰君,等.基于 NSGA-II 的 ADAS 传感器配置优选方法及应用[J].客车技术与研究,2022,44(1):21-24.

- [4] 姜立标,张静远.基于多目标优化的某型大客车骨架轻量化研究[J].机械设计与制造工程,2020,49(3):85-91.
- [5] 陈龑,建平,胡小舟,等.基于模态分析的某客车车身 NVH 性能优化[J].现代制造工程,2013(6):51-54.
- [6] 罗建国,谢红清,付爱军. GL6466 轻型客车车身结构轻量化优化研究[J].汽车技术,2011(10):21-24.
- [7] 柴冬梅,张伟,侯晓婷,等.某大型全铝全承载城市客车车体骨架设计开发[J].汽车技术,2017(9):48-52.
- [8] TAN X J, CAO B, LIU W C, et al. Odd mechanical metamaterials with simultaneously expanding or contracting under both compression and tension [J]. Thin-Walled Structures, 2024 (203):112225.
- [9] 韩明轩,张洪信,赵清海,等.碰撞载荷工况下某城市客车车架拓扑优化设计[J].现代制造工程,2021(10):91-95.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部.客车装载质量计算方法:GB 12428—2023[S].北京:中国标准出版社,2023:1-12.
- [11] 国家发展和改革委员会.客车车身骨架应力和形变测量方法:GB/T 6792—2009[S].北京:中国标准出版社,2010:1-20.

- [6] 陈尊煌,冯作居,欧敏辉.一种 AEBS 毫米波雷达的测试方法及其应用[J].客车技术与研究,2020,42(3):57-59.
- [7] 杨斌,袁胜学,王朝新.浅谈自动紧急制动(AEB)技术的研究现状及趋势[J].商用汽车,2022(9):91-93.
- [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] 孙运玺,王晰聰,刘德利,等.基于雷达模拟器的 ADAS 仿真测试研究与应用[J].汽车电器,2024(4):71-73.
- [10] 梁伟强,洪福斌. ADAS 技术与市场现状综述[J].科技与创新,2021(7):6-9.
- [11] 李雪早.高级驾驶辅助系统(ADAS)功能介绍[J].汽车维护与修理,2023(15):69-75.
- [12] 孙德生.基于 ADAS 的汽车倒车防碰撞系统设计与研究[J].电子技术应用,2021,47(1):28-30.