

基于前车偏置场景的 AEB 系统性能测试与分析^{*}苏占领^{1,2}, 谭龙^{1,2}, 徐建勋^{1,2}, 周祥祥¹, 刘冰玉³

(1.国家智能网联汽车质量检验中心(重庆), 重庆 401329;2.汽车主动安全测试技术重庆市工业和信息化重点实验室, 重庆 401329;3.通用技术集团国测时栅科技有限公司, 重庆 401329)

摘要:针对 2 台采用不同感知方案的乘用车自动紧急制动(AEB)系统,在前车低速场景下进行 100%正碰和 50%偏置的性能测试,在 C-NCAP 的性能评价指标外,引入预警时刻 T_{TC} 、与前车最小间距和最大减速度对其性能和舒适性进行分析。结果表明,在 100%正碰场景下,毫米波雷达和摄像头融合感知方案在性能表现上与单毫米波雷达感知方案差异较小,但在目标识别较难的 50%偏置场景下,融合感知方案的性能表现优于单毫米波雷达感知方案。

关键词:汽车;自动紧急制动(AEB)系统;感知方案;前车偏置场景;预警时刻;与前车最小间距;最大减速度

中图分类号:U463.6

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)01-0001-04

根据中国汽车工业协会的统计,2021 年,中国乘用车产销分别完成 2 608.2 万辆和 2 627.5 万辆,同比分别增长 3.4%和 3.8%,结束了 2018 年以来连续 3 年的下降局面。随着乘用车产销量的增加,先进驾驶辅助系统(ADAS)在乘用车上的应用越来越普遍。自动紧急制动(AEB)系统是最具代表性的主动安全 ADAS 技术^[1]。

目前乘用车 AEB 技术越来越成熟,随着其配置成本的下降,AEB 在乘用车上的配置率越来越高。当车辆、行人或其他障碍物出现在正在行驶的车辆前方,由于驾驶员未进行制动或制动较晚将发生碰撞危险时,通过 AEB 系统能避免碰撞危险的发生,大幅降低道路碰撞事故率,有效提升车辆、驾驶员和乘客的安全性^[2-3]。由于感知、决策和执行方案的差异,AEB 系统在乘用车上的性能表现各有优劣。在现有试验技术条件下,通过封闭场地试验对各车型 AEB 系统的性能进行试验和评价十分重要^[4]。本文通过构建 C-NCAP 前车低速重叠率为 100%(正碰)、50%(50%偏置)的前车运动(CCRm)场景,对 2 台采用不同感知方案的乘用车的 AEB 系统性能和舒适性进行分析评价。

1 AEB 系统的构成和工作原理

AEB 系统的功能结构主要包括传感器、控制器和执行器(见图 1)。乘用车 AEB 系统的传感器大

多采用毫米波雷达和单目摄像头,毫米波雷达可通过发送和接收电磁波对障碍物的位置、相对距离、相对速度进行计算,摄像头可根据所捕获障碍物的像素的尺寸比例来计算与障碍物的相对距离。在采集到障碍物数据信息后,AEB 系统控制器根据车间安全时距等算法进行数据处理和运算,判定障碍物是否构成碰撞风险。目前 AEB 系统控制器大多集成在传感器中,有些自动驾驶车辆开始将控制器集成在域控制器中。经 AEB 系统控制器运算,若车辆存在碰撞风险,AEB 系统执行器则对驾驶员进行声音和光学预警,并通过车身电子稳定性控制系统或电控刹车助力系统进行紧急制动,避免或缓解碰撞的发生,保障车辆和人员的安全^[5-6]。



图 1 AEB 系统的组成

2 AEB 系统的性能试验

2.1 试验场景及试验设备

选取 2 台配置不同感知方案的乘用车作为试验

^{*} 基金项目:国家重点研发计划“新能源汽车”重点专项(2018YFB0105100)

车辆(记为M车和N车)在重庆机动车强检试验场进行试验,其AEB系统感知方案见表1,其中两车所配置的毫米波雷达型号相同。

表1 试验车辆感知方案

样车编号	传感器数量/个	感知方案
M车	1	毫米波雷达
N车	2	毫米波雷达+单目摄像头

依据C-NCAP试验规程,选取车速为40 km/h的CCRM工况进行场地试验(见图2)。该工况下前车以20 km/h匀速行驶,试验车辆速度为40 km/h,试验车辆与前车重叠部分分别占前车整体尺寸的100%和50%(重叠率分别为100%和50%),即若试验车辆在追赶前车的过程中没有任何制动,试验车辆将与前车发生100%正碰和50%偏置碰撞。

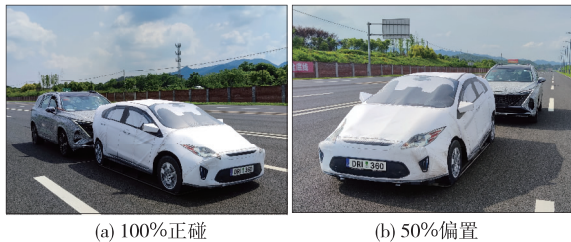


图2 100%正碰和50%偏置的前车低速场景

为避免试验结果的偶然性,在100%正碰和50%偏置场景下分别对M车、N车的AEB系统进行5次重复试验。试验设备主要有GST移动平台目标车、AB Dynamics组合驾驶系统(包括SR60转向控制器和AR油门控制器)、OxTS组合惯性导航系统RT3002陀螺仪、AVAD3声光采集器(见图3)。

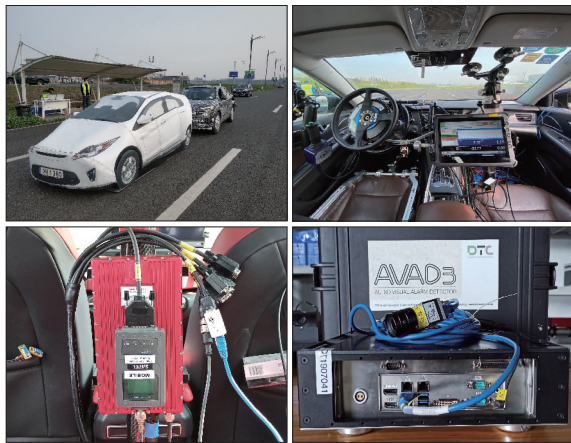


图3 AEB系统性能试验设备

2.2 试验结果

依据C-NCAP的评价规程,在前车低速CCRM

场景中,若试验车辆能避免与前车发生碰撞即可获得满分,若发生碰撞则按碰撞时试验车辆降速量的多少进行线性插值计算得分。在5次重复试验中,M车和N车的AEB系统都能在100%正碰、50%偏置工况下避免与前车发生碰撞,都可获得满分。然而在实际场地试验过程中,M车和N车的AEB系统性能表现存在优劣。

为进一步对M车和N车的AEB系统性能进行分析,引入AEB系统碰撞预警时刻 T_{TC} 、与前车最小间距、最大减速度等性能参数。其中: T_{TC} 用于评价AEB系统碰撞预警对驾驶员提醒的早晚是否合理;与前车最小间距用于判断试验车辆是否与前车发生碰撞,并评价AEB系统的刹车距离是否合适;最大减速度用于评价AEB系统执行制动的剧烈程度^[7]。以上3个参数值的大小对试验车辆AEB系统性能优劣有直接影响。试验中各参数值见表2。

表2 重复试验中各性能参数值

工况	次数	预警时刻 T_{TC}/s		与前车最小 间距/m		最大减速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	
		M车	N车	M车	N车	M车	N车
重叠率 100%	1	2.57	2.64	0.98	1.14	9.53	9.28
	2	2.55	2.63	1.01	1.11	9.47	9.40
	3	2.55	2.61	0.96	1.08	9.44	9.36
	4	2.56	2.64	0.94	1.06	9.61	9.41
	5	2.57	2.62	0.97	1.12	9.45	9.27
重叠率 50%	1	1.75	2.53	0.25	0.98	10.71	9.42
	2	1.73	2.52	0.18	1.06	10.69	9.51
	3	1.75	2.52	0.22	1.01	10.78	9.54
	4	1.75	2.53	0.17	0.95	10.62	9.40
	5	1.74	2.51	0.20	1.04	10.76	9.57

根据《EuroNCAP欧洲新车安全评价规程》(2020版)、《i-VISTA中国智能汽车指数管理办法》(2020版)及GB/T 39901—2021《乘用车自动紧急制动系统(AEBS)性能要求及试验方法》等,结合大量试验数据,对于前车低速前行场景,AEB系统的预警时刻 T_{TC} 不小于2.0 s较合适,同时为避免报警较早影响正常驾驶, T_{TC} 不宜超过4.0 s;为避免碰撞的发生,试验车辆与前车最小间距不可为负值,同时考虑到其值较大易引起误触发,其值较小将会对驾驶员产生强烈刺激,与前车最小间距宜控制在0.6~2.0 m;为减轻紧急制动剧烈的不适感,AEB系统执行紧急制动过程中最大减速度不宜超过 $10 m/s^2$ 。

3 AEB系统性能测试与分析

3.1 AEB系统性能试验分析

如表2所示,在重复试验中M车和N车的AEB系统性能表现较稳定,不存在异常数据点,但两车AEB系统的性能表现在不同重叠率下存在明显差异。在重叠率为100%的工况下,M车和N车的AEB系统性能表现较好,差异较小;在重叠率为50%的工况下,M车和N车的AEB系统性能存在明显优劣。鉴于5次重复试验结果均较稳定,以第3次试验结果(见图4~6)对两车AEB系统性能进行分析。

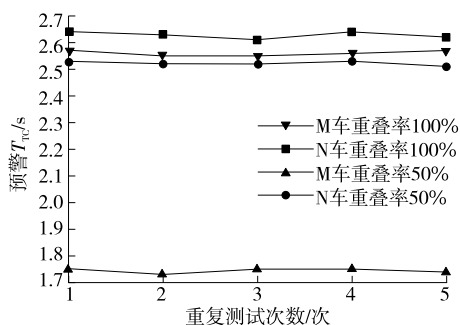


图4 预警时刻 T_{TC} 重复试验结果

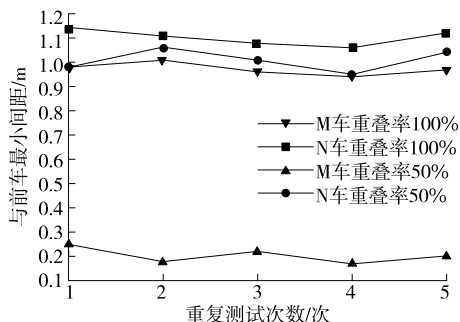


图5 与前车最小间距重复试验结果

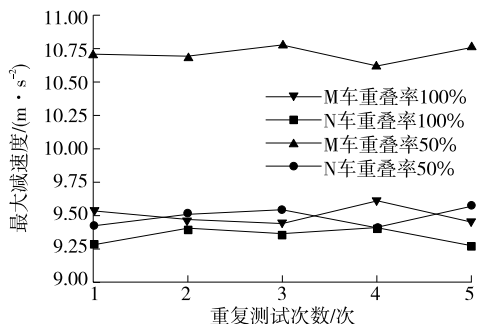


图6 最大减速度重复试验结果

由图4~6可知:1)在重叠率为100%的场景下,M车和N车的AEB系统在识别到前车后,分别

在 T_{TC} 为 2.55 s 和 2.61 s 的时刻发出碰撞预警提醒驾驶员,并通过紧急制动实现避撞,制动过程中与匀速行驶的前车的最小间距分别为 0.96 m 和 1.08 m,最大减速度分别为 $9.44 m/s^2$ 和 $9.36 m/s^2$ 。两车在避免发生碰撞的前提下,在制动过程中 T_{TC} 、与前车最小间距和最大减速度都较合适,两车AEB系统性能表现较好。2)在重叠率为50%的场景下,M车和N车的AEB系统发出碰撞预警的时刻分别为 1.75 s 和 2.52 s,通过紧急制动实现避撞过程中与前车最小间距为 0.22 m 和 1.01 m,最大减速度分别为 $10.78 m/s^2$ 和 $9.54 m/s^2$ 。在该场景下,尽管M车和N车都能实现避撞,但N车AEB系统的性能明显优于M车。与N车相比,M车的AEB系统在紧急制动过程中加速度较大,与前车间距过小,其制动动作十分剧烈,对驾驶员的心理和精神刺激严重。此外,M车的AEB系统发出碰撞预警较晚,在相对速度为 20 km/h 的工况下,与前车相距 14.58 m 时才进行碰撞预警。考虑到普通人在听到预警声音后进行制动的反应时间约为 0.8 s,该试验样车液压制动系统的作用滞后时间约为 0.2 s,在碰撞预警较晚的情况下,所预留的介入时间不足,驾驶员无法及时进行转向或制动操作来避免AEB系统非必要的作用,增加了AEB系统的触发频次,增大了AEB系统制动执行器的压力。

为进一步分析M车和N车AEB系统在重叠率为50%工况下的性能差异,对两车在紧急制动过程中的减速度进行分析。如图7所示,M车的AEB系统稳定探测到前车较晚,在较晚发出碰撞预警后,直接执行减速度为 $4.34 m/s^2$ 的紧急制动,随后因对前车探测不稳定,制动动作退出;待AEB系统再次稳定识别前车后,由于两车纵向间距过小,为避免碰撞的发生,M车的AEB系统进行较剧烈的紧急制动(减速度为 $10.78 m/s^2$)。如图8所示,N车的AEB系统在稳定探测到前车并进行碰撞预警后,首先采取点刹(减速度为 $1.92 m/s^2$)的方式提醒驾驶员,然后进行一级制动(减速度为 $4.25 m/s^2$)并持续作用 0.43 s,最后在出现碰撞风险后在一级制动的基础上进行二级制动(减速度为 $9.54 m/s^2$),实现与前车的避撞。

相较于M车的AEB系统因对前车探测不稳定,在紧急制动退出后又执行减速度为 $10.78 m/s^2$ 的剧烈制动,N车的AEB系统预警较早,在驾驶员没有介入后,以“阶梯形”的制动方式使整车减速度

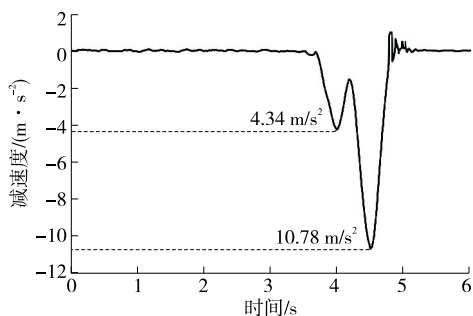


图7 M车 AEB 系统减速度变化曲线

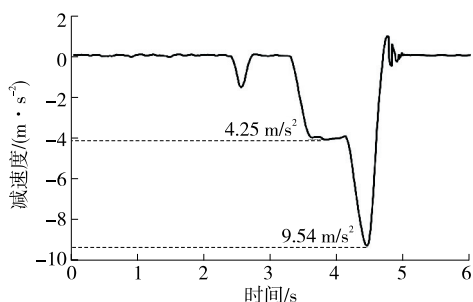


图8 N车 AEB 系统减速度变化曲线

以递进的形式逐步增大,并在二级制动前维持 0.43 s 的一级制动,该方式有利于驾驶员对减速度变化的适应,较大幅度改善 AEB 系统紧急制动所带来的不舒适感。综上,N 车 AEB 系统的性能和舒适性都优于 M 车。

3.2 AEB 系统不同感知方案的分析

比较 M 车和 N 车 AEB 系统的感知方案(见表 1),虽然两车均配置了同一型号的毫米波雷达,但 M 车 AEB 系统传感器仅配置了毫米波雷达,N 车则采用单目摄像头和毫米波雷达的感知融合方案。作为乘用车 AEB 系统配置较普遍的传感器,毫米波雷达和摄像头各有优劣。摄像头对各类目标物的形状和高度具有较好的识别能力,但其测距精度较差,光照和天气等外界环境因素对其影响较大。毫米波雷达兼具光电雷达和微波雷达的特点,其对目标物测距精度高、探测距离远,但无法识别目标物的高度和形状^[8-9]。

根据 M 车和 N 车的试验结果,在较“简单”的重叠率为 100% 的场景下,M 车和 N 车 AEB 系统的单毫米波雷达方案和融合方案的性能表现都较好,差异较小。但在有“难度”的重叠率为 50% 的场景下,N 车融合方案在 AEB 性能和舒适性的表现明显优于 M 车的单毫米波雷达方案。相较于单毫米波雷达,摄像头和毫米波雷达融合方案能将两者

的优势实现互补,特别是在重叠率为 50% 的场景中,为避免对车道外目标物的误识别和 AEB 的误触发,毫米波雷达的探测角度一般设置较小。融合感知方案中,摄像头能弥补毫米波雷达的不足,可以对本车道内偏置的车辆进行稳定识别,并通过目标融合算法增强传感器识别的置信度^[10-11],提高对前方目标物的探测精度和稳定性,帮助 AEB 系统更准确地对目标物的相对速度、相对距离、安全时距及有无碰撞风险等进行计算和判断,提高 AEB 系统的性能和舒适性。

4 结论

结合 2 台乘用车 AEB 系统的试验结果,对紧急制动过程 and 不同感知方案进行分析与研究,得出以下主要结论:

(1) 在 C-NCAP 的评价指标的基础上,引入预警时刻 T_{TC} 、与前车最小间距和最大减速度等参数可进一步对试验车辆 AEB 系统的性能进行分析与评价。

(2) 在重叠率为 100% 的正碰场景下,AEB 系统毫米波雷达和摄像头融合感知方案在性能上与单毫米波雷达感知方案表现一致;在目标识别较难的 50% 偏置的场景下,融合感知方案在 T_{TC} 、刹车距离、减速度和目标识别稳定性等方面表现较好,性能优于单毫米波雷达感知方案。

参考文献:

- [1] 张诗波,何治剑,廖静倩,等.基于 NAIS 的 AEB 系统路口测试场景研究[J].交通信息与安全,2021,39(1): 87-96.
- [2] 蔡博,陈韬,回春,等.商用车 AEB 系统测试场景构建及仿真研究[J].公路与汽运,2021(1):9-12.
- [3] 孙航,孙悦,解瀚光.基于 CIDAS 数据库的先进驾驶辅助系统安全效果研究[J].中国汽车,2019,29(11): 46-51.
- [4] 周文帅,李妍,王润民,等.自动紧急制动系统(AEB)测试评价方法研究进展综述[J].汽车实用技术,2020,45(18):34-40+49.
- [5] 牛成勇,苏占领,吴昆伦,等.汽车前撞预警系统传感器测距精度测试与研究[J].汽车工程学报,2019,9(5): 373-379.
- [6] 黄城,冀杰,陈琼红,等.考虑舒适性的 AEB 避撞算法及仿真验证[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2021,35(4):39-48.

(下转第 26 页)

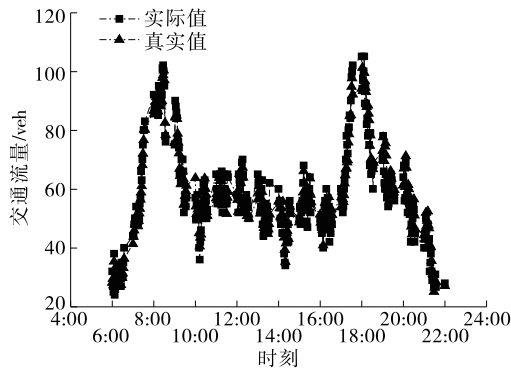


图 14 13 日交通流趋势图

由图 13、图 14 可知:预测值的变化规律与实际值具有较好的一致性。但由于交通流的不确定性、非线性特征,在交通流波动较大的时段拟合效果较差。

为进一步验证模型的预测性能,引入 δ_{MAE} 、 δ_{MAPE} 和 δ_{RMSE} 进行评价。计算公式见式(4)~(6),计算结果见表 3。

$$\delta_{MAE} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l |Q_i - u_i| \times 100 \quad (4)$$

$$\delta_{MAPE} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \left| \frac{Q_i - u_i}{Q_i} \right| \times 100 \quad (5)$$

$$\delta_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{l} \times \sum_{i=1}^l \left(\frac{Q_i - u_i}{Q_i} \right)^2} \times 100 \quad (6)$$

式中: l 为观测次数; Q_i 为真实交通流量; u_i 为预测交通流量。

表 3 ARIMA 模型预测精度验算结果 单位: %

时间	δ_{MAE}	δ_{MAPE}	δ_{RMSE}
12 日	43.8	7.99	5.62
13 日	48.8	8.80	6.04

由表 3 可知:12 日、13 日交叉口交通流预测值的 3 个评价指标均小于 10%,说明 ARIMA(1,1,0) 模型具有较好的预测效果和较强的适用性; δ_{MAE} 为 43.8%、48.8%,模型预测精度还有待提高。

3 结语

本文通过 Python 可视化工具及 ARIMA 模型构建能实时、在线进行交叉口短时交通流可视化预测的系统。该系统将交通流时序以非量化、直观的形式进行处理,实现交通流时间规律的可视化。ARIMA 模型有效提取了交通流时序特征,预测精度较高,对于高速公路、城市快速路等场景下短时交通流预测具有可移植性。未来可通过深度学习进行实验与分析,对不同车道的交通流特性进行深入分析,进一步精细化研究交通流预测。

参考文献:

- [1] 赵宏,翟冬梅,石朝辉.短时交通流预测模型综述[J].都市快轨交通,2019,32(4):50-54.
- [2] 张伟斌,张帅,郭海峰,等.基于交通因子状态网络的城市交叉口交通流预测[J].中国公路学报,2021,34(12):217-228.
- [3] 张艺铭,陈明明,石磊,等.基于 IGWO-BP 算法的轨道交通短时客流预测[J].交通信息与安全,2021,39(3):85-92.
- [4] 田保慧,郭彬.基于时空特征分析的短时交通流预测模型[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(3):105-109+182.
- [5] 陈喜群,周凌霄,曹震.基于图卷积网络的路网短时交通流预测研究[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(4):49-55.
- [6] HOU Q Z, LENG J Q, MA G S, et al. An adaptive hybrid model for short-term urban traffic flow prediction [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 527: 121065.
- [7] 钟颖,邵毅明,吴文文,等.基于 XGBoost 的短时交通流预测模型[J].科学技术与工程,2019,19(30):337-342.

收稿日期:2022-04-08

(上接第 4 页)

- [7] 黄超智,龙军,周金应,等.基于 JT/T 1242-2019 的 AEB 测试研究[J].公路与汽运,2020(3):1-6.
- [8] 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.
- [9] 石晏丞,李军.汽车自动驾驶领域的传感器融合技术[J].装备机械,2021(3):1-6+12.

- [10] 牛成勇,苏占领,吴昆仑,等.危险品运输车主动防撞系统性能测试分析[J].华东交通大学学报,2019,36(4):32-38.
- [11] 牛成勇,曾杰,徐建勋,等.汽车装备自动紧急制动系统后的性能测试评价[J].河北工业大学学报,2018,47(5):75-81.

收稿日期:2022-08-16