

10.16638/j.cnki.1671-7988.2020.18.011

自动紧急制动系统 (AEB) 测试评价方法 研究进展综述*

周文帅¹, 李妍¹, 王润民^{2*}, 朱宇², 樊昌国³

(1.长安大学信息工程学院, 陕西 西安 710018; 2.长安大学交通运输部认定自动驾驶封闭场地测试基地(西安), 陕西 西安 710018; 3.中汽研汽车试验场股份有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要: 面对复杂的交通环境, 自动紧急制动系统(AEB)是保障自动驾驶汽车行驶安全的重要功能, 大量的测试和评价是判定其安全的基础, 因此制定合理且适用于AEB系统的测试评价方法至关重要。文章梳理和分析了国内外部分现行AEB的测试评价规程, 对其中涉及的AEB测试方法进行了对比分析; 然后, 分析了Euro NCAP和IIHS分别发布的AEB性能评价方法; 最后, 梳理了目前业界AEB测试评价方法的研究现状, 总结出一种可行的AEB测试评价路径, 即从真实交通数据构建AEB测试场景, 然后构建AEB测试方法, 建立相应的评价指标, 最后进行实车或虚拟测试, 验证其有效性和准确性。这为后续AEB安全测试评价技术的研究提供了基础。

关键词: 测试评价; 自动紧急制动系统; 行驶安全; 场景构建; 实车测试; 虚拟测试

中图分类号: U467.3 文献标识码: A 文章编号: 1671-7988(2020)18-34-08

Review of Research on Test and Evaluation Methods of Automatic Emergency Braking System (AEB)*

Zhou Wenshuai¹, Li Yan¹, Wang Runmin^{2*}, Zhu Yu², Fan Changguo³

(1.School of Information Engineering, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710018; 2.National Closed Field Test Base of Autonomous Driving, Ministry of Transport (Xi'an), Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710018; 3.CATARC Automotive Proving Ground Co., Ltd., Jiangsu Yancheng 224000)

Abstract: Facing the complicated traffic environment, the Automatic Emergency Braking System(AEB) is an important function to guarantee the driving safety of Autonomous vehicles. A large number of tests and evaluations are the basis for determining their safety. Unlike the traditional test and evaluation methods, building typical traffic scenarios for people-car-road-environment is a feasible means for AEB safety testing. This paper sorts out and analyzes some of the current AEB test evaluation procedures at home and abroad, and compares and analyzes the AEB test methods involved. Then, this paper analyzes the AEB evaluation methods issued by Euro NCAP and IIHS. Finally, this paper sorts out the current research status of AEB test evaluation methods, and summarizes a feasible AEB test path, that is, construct AEB test scenarios from real traffic data, then construct AEB test methods, establish corresponding evaluation indicators, and finally conduct real vehicle or virtual tests to verify its effectiveness and accuracy. This provides a basis for the follow-up AEB safety test and evaluation technology research.

Keywords: Test and evaluation; Automatic Emergency Braking System; Driving safety; Scene construction; Real vehicle test; Virtual testing

引言

随着汽车数量的不断增长, 交通事故也随之增多。世界卫生组织 2018 年发布的《2018 年全球道路安全状况报告》显示, 近年来, 全球道路交通死亡人数继续上升, 每年造成约 135 万人死亡, 道路交通事故给各国造成的费用估计约达国内生产总值的 3%^[1]。据世界卫生组织调查研究发现, 造成道路交通死伤的一个主要风险是车速过快, 如果将平均车速降低 5%, 致命交通事故将减少 30%^[2]。所以减少道路交通事故中车辆与车辆或车辆与行人之间的碰撞事故, 成为当前世界上很多国家研究的重点和热点。

自动紧急制动系统 (Automatic Emergency Braking System, AEB) 是一项在车辆自主检测到前方存在碰撞危险时, 能够自动启动行车制动, 从而降低车辆行驶速度, 并尽可能避免发生碰撞的主动安全系统^{[3][4]}, 目前受到了国家政府、主机厂、零部件厂商以及科研院所越来越多的重视。

科学完善的测试评价是高级自动驾驶辅助系统研发的重要组成部分, 也是汽车安全运行的必要前提^[5]。对于 AEB 的技术进步和应用推广, 必须有一套完善的测试评价方法作为支撑, 所以围绕对 AEB 开发和测试的需求, 欧盟、美国、中国等国家或地区的标准法规制定部门及相关检测机构都出台了相应的 AEB 测试评价规范, 并且部分科研机构也通过研究分析给出了相应的 AEB 测试场景与测试方法。

本文基于国内外标准法规制定部门及业界相关研究报告及文献资料, 系统性梳理了 AEB 测试评价规程的研究现状, 分析了现有 AEB 测试规程中存在的测试场景不完整、测试方法简单、评价指标不足等缺点, 提出了 AEB 测试评价方法的展望。同时梳理了目前业界对于 AEB 测试评价方法的研究, 归类出基于场景构建和基于实际测试的 AEB 测试评价方法, 最后总结出一种从真实交通数据构建 AEB 测试场景, 然后构建 AEB 测试方法, 建立相应的评价指标, 最后进行实车或虚拟测试的 AEB 测试评价链。

1 面向 C2C 的 AEB 测试方法

车对车 (C2C) 的碰撞是道路上最常见的交通事故之一。

作者简介: 周文帅 (1995-), 男, 硕士, 就读于长安大学信息工程学院, 主要研究方向为智能汽车测试技术。**通讯作者:** 王润民 (1989-), 男, 高级工程师, 博士, 长安大学交通运输部认定自动驾驶封闭场地测试基地 (西安), 主要研究方向为无人车测试理论与技术。**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (自动驾驶电动汽车封闭测试环境构建与场地测试技术研究 (2018YFB0105104))。

为了验证 AEB 系统的可靠性, 一些国家的标准法规制定部门基于多种车车碰撞避免测试场景制定了相应的 AEB 测试评价标准。

1.1 Euro-NCAP 测试标准

Euro-NCAP (欧盟新车评定委员会) 于 2014 年正式引入了基于车车测试场景的 AEB 测试评价标准, 具体包含 CCRs (前车静止)、CCRm (前车匀速行驶)、CCRB (前车制动) 三种测试场景, 如图 1、图 2、图 3 所示。Euro-NCAP 颁布的 AEB 测试评价方法主要针对 M₁ 类乘用车型, 选用与 M₁ 类乘用车相同视觉、雷达、发射率属性的充气物体作为目标车辆, 外部覆盖绘有车辆特征的 PVC 材料。测试中, 要求测试车辆与目标车辆处于一条中心线, 目标车辆 (GVT) 在测试车辆前方 100 米, 重叠率按照 25% 为步长增加, 且范围为 -50%-50% (重叠率是指目标车辆横向偏移的车身位置相对于自车车宽的比率, 目标车辆和自车的中轴线重合时, 重叠率定义为 100%)。周围不设置其他干扰车辆或者其他和 GVT 类似的障碍物。被测车从 GVT 后方以 5km/h 的步长、25% 重叠率的步长增加改变测试速度与重叠率开展新一轮测试。其中城市内被测车速度范围为 10-50km/h, 郊区速度范围为 30-80km/h^[6]。

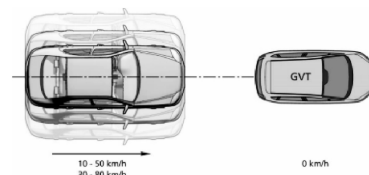


图 1 CCRs 测试场景

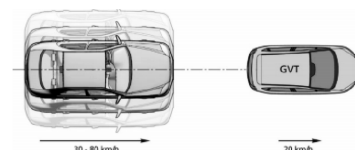


图 2 CCRm 测试场景

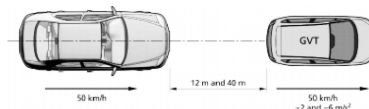


图 3 CCRb 测试场景

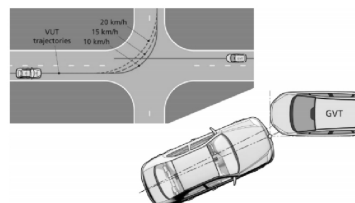


图 4 CCFtap 测试场景

此外,在最新的 2019 版 Euro-NCAP 中增加了 CCFtap (车前对车前交叉路径)测试场景,如图 4 所示,CFtap 方案 VUT 速度分别为 10、15 和 20 km/h 的组合,以及 GVT 速度为 30、45 和 55 km/h 的组合^[7],为车车交叉路口碰撞避免测试场景的设计提供了基础。

1.2 NHTSA 测试评价规程

美国高速公路安全管理局(NHTSA)在 2014 年发布了一篇关于 AEB 调查报告,并讲述了 AEB 系统的测试方法草案。美国交通部 2015 年宣布 NHTSA 计划将 AEB 系统测试加入到新车评定认证方法,在 NHTSA 颁布的 AEB 测试方法草案中包含了自车靠近前方静止车辆、自车靠近前方低速行驶车辆、自车靠近前方减速行驶车辆和铁板误作用试验共四类测试项目,如表 1 所示。目前评价规程仅针对最大总质量为 4540kg 以下的乘用车,对每个测试场景需要重复进行 7 次试验^{[8][9]}。

表 1 NHTSA 2014AEB 测试项目

测试场景	测试速度 mph(km/h)		初始间距 ft(m)	施加制动间距 ft(m)
	测试车辆	目标车辆		
自车靠近静止前车 LVS_25_0	25 (40)	0	>18 (>5.7)	40 (12)
自车靠近低速行驶前车 LVM_45_20	45 (72)	20 (32)	>183 (>56)	37 (11)
自车靠近低速行驶前车 LVM_25_10	25 (40)	10 (16)	>34 (>11)	22 (7)
自车靠近减速行驶前车 LVD1_35_35	35 (56)	35 (56)	45 (14)	32 (10)
自车靠近减速行驶前车 LVD2_25_25	25 (40)	25 (40)	328 (100)	40 (12)
铁板实验 STP_45	45 (72)	-----	>337 (>106)	73 (22)
铁板实验 STP_25	25 (40)	-----	>187 (>57)	40 (12)

1.3 中国新车评价规程

中国新车评价规程(CNCAP)在 2017 年颁布的 2018 版 C-NCAP 管理规则中也正式引入了车辆 AEB 试验,其根据中国道路交通事故数据库分析研究,设计了典型中国道路 AEB 测试场景,如图 5 所示,明确了试验场地要求、天气要求和测试车辆状态。其中,车车测试场景的 AEB 测试评价条款,包含了相邻车道车辆制动试验测试场景和铁板误作用试验测试场景,另外基于中国道路的特点,对于测试车辆的初始速度也进行了相应设置^[10],如表 2 所示。

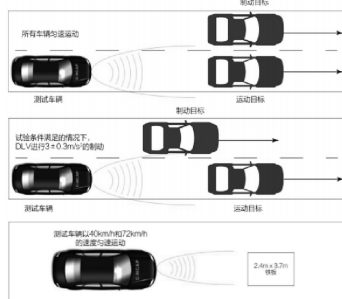


图 5 中国新车评价规程 AEB 测试场景

表 2 C-NCAP 规程中 AEB 测试场景车速

测试场景		测试速度 km/h			
CCRs	AEB	20	30	40	
	FCW	35	45	55	75
CCR	AEB	40	45	65	
	FCW	50	60	75	
CCRB	AEB	50 (12m, 4m/s ²)		50 (12m, 4m/s ²)	
	FCW	50 (40m, 4m/s ²)		50 (40m, 4m/s ²)	
误作用	相邻车道车辆制动试验	40			
	铁板实验	40	72		

1.4 小结

目前,对于车对车的追尾碰撞测试规程较为完善,ENCAP 颁布的规程为各国提供了测试评价基础,美国和中国等国家根据本国实际道路交通事故数据库分析研究,也都颁布了适用于本国的 AEB 测试规程。美国颁布的 AEB 测试草案相较于 ENCAP 增加了铁板误作用试验。中国的 CNCAP 相较于 ENCAP 增加了相邻车道车辆制动试验和铁板误作用试验,并对测试车辆的初始速度也有了相应的调整。除此之外,目前缺少对于车辆变道侧碰、平面交叉路口横碰等 AEB 测试场景及相关测试标准,同时还缺少多车环境下 AEB 的测试规程。

2 面向 VRU 的 AEB 测试方法

在道路交通事故数据库中车辆与弱势道路使用者(VRU,包括行人、骑车者)发生冲突的危险工况也占了相当大的一部分比例,业界针对 AEB 中车辆有效避撞弱势道路使用者的测试方法展开了深入研究,形成了一系列测试标准

2.1 Euro-NCAP 测试标准

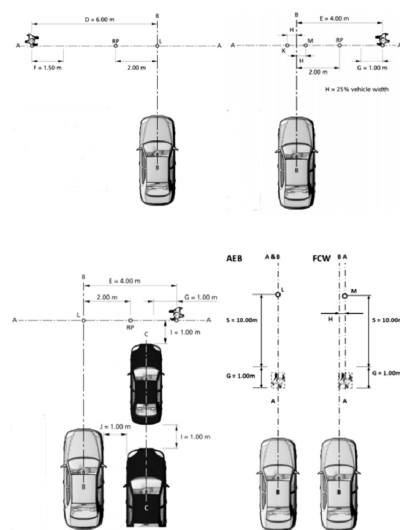


图 6 面向行人的 AEB 测试场景

Euro-NCAP 在 2016 年也正式引入了 AEB 面向 VRU 的测试评价方法。面向行人测试方法共包含了如图 6 所示的 6

种测试场景：1) 车辆与远端穿行的行人发生碰撞且碰撞位置在车辆前端结构的 50%处 (CVFA-50)；2) 车辆与近端穿行的行人发生碰撞且碰撞位置在车辆前端结构的 25%/75%处 (CVNA-25/ CVNA-75)；3) 车辆与有车辆遮挡的情况下近端穿行的儿童发生碰撞且碰撞位置在车辆前端结构的 50%处 (CPNC-50)；4) 车辆与同向行驶的行人发生碰撞且碰撞位置在车辆前端结构的 25%/50%处 (CPLA-25/CPLA-50)^[11]。

面向自行车测试方法共包含了如图 7 所示的 3 种测试场景：1) 车辆与近端穿行的自行车发生碰撞且碰撞位置在车辆前端结构的 50%处 (CBNA-50)；2) 车辆与同向行驶的自行车发生碰撞且碰撞位置在车辆前端结构的 25%/50%处 (CBLA-25/CBLA-50)。

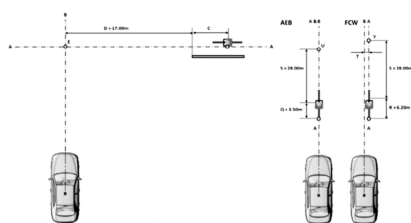


图 7 面向二轮车的 AEB 测试场景

每个测试场景对应的测试速度如表 3 和表 4 所示。

表 3 面向行人的 AEB 测试速度

AEB 行人碰撞测试					
测试场景	测试类型	VUT 速度	目标物速度	碰撞位置	光照情况
FPFA-50	AEB	20-60km/h	8km/h	50%	白天/夜晚
CPNA-25			5km/h	25%	
CPNA-75				75%	
CPNV-50				50%	白天
CPLA-50				50%	白天/夜晚
CPLA-25	FCW	50-80km/h		25%	

表 4 面向二轮车的 AEB 测试速度

AEB 自行车碰撞测试			
测试场景	CBNA-50	CBLA-50	CBLA-25
测试类型	AEB		FCW
VUT 速度	20-60km/h	25-60km/h	50-80km/h
目标物速度	15km/h		20km/h
碰撞位置	50%		25%
光照情况	白天		

2.2 中国新车评价规程

表 5 中国新车评价规程 AEB 行人测试速度

测试场景	行人速度	车辆速度
CVFA-25	6.5km/h	20km/h-60km/h (10km/h 间隔)
CVFA-50	6.5km/h	
CVNA-25	5km/h	
CVNA-75	5km/h	

CNCAP 颁布的 2018 版 CNCAP 管理规则中，也引入了面向行人的 AEB 测试评价方法，相比于 ENCAP 中 AEB 行人测试方法，考虑到中国行人特点，行人的测试速度降低到

6.5km/h，并增加了 CVFA-25 的测试场景，删除了 CVNC 的测试场景^[10]，如表 5 所示。

2.3 小结

在面向弱势道路使用者的 AEB 测试方法中，目前 ENCAP 从车辆前方碰撞结构的角度提出了较为完整的面向行人和自行车 AEB 测试规程，从多角度和多测试速度对 AEB 进行了测试。CNCAP 基于中国行人和道路交通特点，设计了适用于中国的 AEB 测试规则，相较于 ENCAP 的行人测试，CNCAP 调整了行人的初始速度，但是缺少面向二轮车的 AEB 测试方法。除此之外，目前面向行人的 AEB 测试方法仅为单人，针对多人的 AEB 测试方法还需要更多的研究。

3 AEB 性能评价方法现状

3.1 Euro-NCAP 评价标准

Euro-NCAP 发布的 AEB 的测试评价规程包含了市区驾驶环境 (AEB City) 及郊区驾驶环境 (AEB Inter-Urban) 下的两类试验，并各自有不同的评分方法，分属于成人乘员保护和辅助安全下的内容^[12]。

市区驾驶环境是测试车辆低速行驶时 AEB 系统在 CCRs 工况下的工作情况，市区驾驶环境的测试评价包含 AEB 系统功能测试和人机界面测试 (Human Machine Interaction, HMI) 两部分。测试速度的范围为 10-50km/h，测试车辆以 5km/h 的步长增加，具体测试过程如图 8 所示：

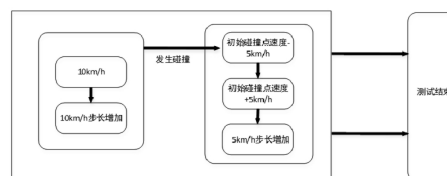


图 8 AEB City 测试过程

AEB 速度测试得分 = $\sum \{ (\text{测试速度} - \text{碰撞时刻速度}) / \text{测试速度} \} \times \text{各速度分值}$ ；

AEB 百分比 = AEB 速度测试得分 / 14；

HMI 要求每次上电 AEB 系统默认开启，不能一个单独的按钮开启/关闭 AEB，必须通过多层菜单并至少三个连续步骤才能关闭 AEB。满足上述所有要求得满分 2 分，否则为 0 分。

HMI 百分比 = HMI 得分 / 2；

AEB City 总分 = (AEB 百分比 \times 2.5) + (HMI 百分比 \times 0.5)。

表 6 AEB City 各测试速度分值表

测试速度	分值	测试速度	分值
10km/h	1	35km/h	2
15km/h	2	40km/h	1
20km/h	2	45km/h	1
25km/h	2	50km/h	1
30km/h	2	总计	14

AEB City 各测试速度分值如表 6 所示。

效区驾驶环境包含 CCRs、CCRM 和 CCRb 三种测试场景,可同时评价 AEB 系统及 FCW 系统,其中 CCRs 工况只进行 FCW 测试。获得效区驾驶环境评分的前提条件是 AEB 系统或 FCW 系统可以在 80 km/h 的车速下正常工作。

3.2 IIHS 评价标准

美国公路安全保险协会(Insurance Institute for Highway Safety, IIHS)自 2013 起将前方碰撞预警(Front Crash Warning)系统评价纳入新车评价规程中。前方防碰撞系统评价分为优秀、高级和初级 3 个等级^{[13]-[14]}。

前防碰撞系统的评分取决于测试车辆在测试过程中能否完全避免碰撞或在测试中车速的降低量。IIHS 规定测试车辆在不同车速(低速 19.3 km/h 和中速 40.2 km/h)的测试工况下进行测试,评分准则根据测试车辆在前防碰撞系统的作用下车辆速度降低量来给予相应的分值,车辆速度降低的越多,表明车辆前防碰撞系统性能越优,发生碰撞的危险性或严重程度越低,因此测试车辆在此工况下得分越高。FCW 系统功能评价依据在 5~7 次测试试验中,只要具有碰撞提醒功能便可获得一个分值。前方防碰撞系统评价分值最高为 6 分,分值评价准则如表 7 所列。

表 7 IIHS 前方防碰撞功能测试分值表

测试项目	速度降低程度 km/h	分值	最终评价级别
以 19.3km/h 测试	<8	0	1——初级 2,3,4——高级 5,6——优秀
	8~15	1	
	>=15	2	
以 40.2km/h 测试	<8	0	
	8~15	1	
	15~35	2	
	>=35	3	
前防碰撞预警	N/A	1	

3.3 小结

目前,仅有 Euro-NCAP 发布有现行的 AEB 评价方法,其针对车车的 AEB 评价给出了每个测试场景的具体评分准则,但是评价参数较为单一,多为车辆是否避撞和碰撞时的相对速度。其他国家或地区的标准化组织对于 AEB 评价方法的研究还有待制定,同时目前的 AEB 评价方法多为车车测试,难以全面的评价 AEB 系统的性能表现,针对面向弱势道路使用者的 AEB 评价方法还需进一步研究。

4 AEB 的测试评价研究现状分析

除了上述一些国家的标准法规制定部门及相关检测机构颁布的 AEB 测试评价规程,国内外一些学者对 AEB 的测试评价方法也都进行了大量的研究。

4.1 基于场景构建的 AEB 测试评价方法

部分学者基于事故深度调查数据和自然驾驶数据,针对驾驶行为与道路、环境和其他交通参与者之间的关系进行分

析研究,构建测试场景,设计相应的自动驾驶功能测试评价方法。

如 Ulrich Sander 等人通过分析德国深度事故数据库(GIDAS),聚类分析定义了 AEB 测试场景,并研究车辆碰撞中变量类型和特征对聚类结果的影响,在提取德国的 AEB 路口测试场景的基础上,建立了 AEB 路口的测试评价方法^[15]。

德国 APROSYS 项目组成员通过对德国交通事故深入研究数据库中乘用车或多用途汽车与行人发生碰撞的数据分析研究,总结得出了 3 种类型的 AEB 行人测试场景,设计了相应场景的 AEB 测试方法:(1)车辆在白天和夜晚的光照条件下以 50±20km/h 的速度直行,与以 5.4km/h 的速度横穿马路的行人发生碰撞;(2)车辆在白天以 45±25km/h 的速度直行,与以 5.4km/h 的速度横穿马路的行人发生碰撞;(3)车辆在白天和夜晚的光照条件下以 20±10km/h 的速度转弯,与以 5.4km/h 的速度行走的行人发生碰撞^[16]。

胡林等基于 419 例汽车与二轮车的碰撞事故数据,通过聚类分析和在不同参数特征下的事故伤亡程度和事故样本数,获得了各类场景中两轮车运动状态、汽车车速和两轮车车速的详细参数特征,提供了针对我国道路特征的面向二轮车的 AEB 测试方法^[17]。

徐向阳等基于国家车辆事故深度调查体系(NAIS)中 499 例真实交通事故数据,通过基于多元 Logistic 回归的事故严重程度影响因素分析,得到光照条件、路口类型、信号灯类型与路口机动车事故的严重程度显著相关,并根据提取的测试场景特征要素,采用层次聚类算法挖掘得到了典型危险场景,建立了 8 类适应于中国交通状况的 AEB 路口测试场景,为国内 AEB 路口测试规程提供了支持^[18],如表 8 所示。

表 8 涉及车车的 AEB 路口测试场景

场景类型	第 1 类	第 2 类	第 8 类
比例 (%)	12.42	21.84	10.62
天气类型	晴或多云	晴或多云	雨天
光照条件	夜间有路灯	日间	日间
路口类型	十字路口	丁字路口	十字路口
信号灯类型	直行+转弯	没有信号灯	没有信号灯
测试车运动类型	直行	直行	直行
测试车速度(km/h)	45	50	40
目标车速度(km/h)	25	20	25
目标车类型	乘用车	乘用车	乘用车

石娟等基于中国交通事故深入研究(CIDAS)的 198 起速度小于 80km/h 且车辆直行的事故。通过对车辆速度、行人速度、碰撞位置、行人运动方向、行人身高和行人年龄等参数的分析,总结了 3 种典型 AEB 行人的测试场景,提供了详细的测试方法:(1)行人近端穿行工况:行人速度 5km/h,碰撞位置为车辆前端 25%和 75%;(2)行人远端穿行工况:

行人速度 6.5km/h，碰撞位置为车辆前端 25%；（3）行人沿路行走工况：行人沿路行走，速度 4.5km/h，碰撞位置为 R 点。以上场景具有相同的测试速度区间 20-60km/h，测试速度递增步长为 10km/h^[19]。

胥峰等通过对中国交通事故深入研究（CIDAS）统计的 150 例汽车与二轮车碰撞事故工况样本参数信息进行系统聚类分析，提取出了用于评价面向骑行者的 AEB 的测试场景，根据是否碰撞和 TTC（碰撞时间），制动减速度等为评价参数，建立了面向骑行者的自动紧急制动系统测试评价方法，并利用 Prescan 和 Simulink 软件联合仿真分析验证了 AEB 典型场景和测试方法的有效性^{[20][21]}，如表 9 所示。

表 9 骑行人的 AEB 测试场景

编号	照明	道路特征	本车行驶状态	行人运动状态	车辆速度 km/h	骑行者速度 km/h
1	好	十字路口	直线	左侧过马路	20~60	25
2	不好					
3	好	十字路口	直线	右侧过马路	20~50	20
4	不好					
5	好	十字路口	左转弯	沿道路直线	20~40	20
6			右转弯			
7	好	非十字路口	直线	沿道路直线	30~70	25
8	不好					

李霖等基于采集的危险工况，针对中国道路环境下骑车人引发交通事故占交通事故总数的比例较大的情况，通过聚类分析和卡方检验，建立了 7 类典型危险场景，通过设计测试车辆和目标车辆的速度，建立了涉及骑车人的典型 AEB 测试方法，并利用 Prescan 进行虚拟测试，得到了涉及骑车人的典型危险工况场景库^[22]。

吴斌等基于自然驾驶数据，通过车辆的制动减速度、制动减速度梯度、横向加速度、驾驶员方向盘转速等 4 个参数，对自然驾驶数据进行危险场景的筛选，得到共 780 例危险工况，同时建立了紧急制动反应时间、最大制动减速度和最大制动减速度梯度等概率分布模型，可用于测试和评价兼容中国驾驶员驾驶特征的 AEB 系统^{[23][24]}。

苏江平等开展了基于自然驾驶数据下的行人交通冲突典型场景的挖掘研究，利用系统聚类方法得到中国行人交通冲突的特征，提取获得包含时间、道路特征、行人运动状态、车辆速度及行人速度 5 个变量的 4 类典型 AEB 测试场景，并设计其测试方法，其中车辆速度主要分布在 18~37 km/h，行人速度在 4~12 km/h^[25]，如表 10 所示。

表 10 AEB 行人典型场景

场景类型	时间	道路特征	行人运动状态	车辆速度 km/h	行人速度 km/h	行人与车距离 m
1	白天	路口	左侧过马路	22~36	5~10	14~29
2	白天	路口	右侧过马路	18~23	4~9	11~17
3	白天	非路口	沿道路	18~25	6~9	10~19
4	晚上	非路口	沿道路	24~37	4~12	12~22

4.2 基于实际测试的 AEB 测试评价方法

部分学者基于实车测试和虚拟测试，针对目前现有 AEB 测试规程的不足，设计具有针对性的 AEB 测试工况，同时选取相应评价指标，为各国 AEB 测试评价方法的标准法规制定部门提供支持。

如季中豪等基于对实车自动紧急制动和前向碰撞预警功能的测试数据，研究了 AEB 的测试评价方法。提出了增加碰撞点偏置、夜间环境、儿童和自行车目标物、弯道等不同的测试场景，可以更好地测试 AEB 系统识别目标的能力和系统响应的时机，并在评价参数方面，增加了根据试验中 AEB 系统的碰撞时间（TTC）、制动减速度峰值、制动停止后距离等参数，可以更全面地评价 AEB 系统的表现^[26]。

胡远志等利用 4 种基于安全距离和 1 种基于碰撞时间（TTC）的 AEB 控制策略，建立了前车静止和前车紧急制动 2 种 AEB 工况：（1）测试车辆以 10 km/h 的梯度从 10km/h 递增到 80km/h，前车静止；（2）测试车辆以 50 km/h 的车速，前车相距测试车辆 12m 和 40m，以 6m/s² 和 2m/s² 的减速度进行急减速。选择自动制动结束时的己车与前车的距离来表示 AEB 系统的避撞效果作为评价参数，对比 5 中 AEB 控制策略在不同工况下的表现^[27]。

田思波等先研究了现有 AEB 功能的典型基础测试方法，在此基础上对 AEB 功能的测试和评价方法进行了分析，提出了跟车行驶时前方车辆遇到静止车辆后切出的 AEB 工况，如图 9 和表 11 所示。采用加速度、开始制动相对距离、制动停车相对距离三个参数作为评价指标，对现有的和提出的 AEB 工况进行了测试评价^[28]。



图 9 跟车行驶时前方车辆遇到静止车辆后切出

表 11 测试场景参数

自车车速	20km/h~80km/h
目标车 1 车速	20km/h~80km/h
重叠率	25%~100%
自车跟车 THW	2s~4s
目标车 1 切出时 THW	1s~3s

张慧等通过对单车道前后两车交通场景进行了理论分析，选取考虑加速度的碰撞时距参数 ETTC 作为评价当前场景的紧急程度，计算公式如下所示：

$$v_{rel}ETTC + \frac{1}{2}a_{rel}ETTC^2 + d_{rel} = 0 \quad (1)$$

$$ETTC = \frac{-v_{rel} - \sqrt{v_{rel}^2 - 2a_{rel}d}}{a_{rel}} \quad (2)$$

其中 v_{rel} 为相对速度， a_{rel} 为相对加速度， d_{rel} 为相对距离。提出了三种适用于 AEB 系统性能评价的新测试工况，

分别为: CCRb- (Car-to-Car Rear brake minus)、CCRa (Car-to-Car Rear acceleration) 和 CCRb+ (Car-to-Car Rear brake plus)。针对当前 AEB 系统场地测试方法中遇到的突出问题, 有针对性地提出了基于 Euro-NCAP 实车场地测试规程的改进方案, 包括(1) 增加毫米波雷达识别成功率和避撞成功率两个参数为 AEB 系统性能的评价量;(2) 增加避撞后的最小车间距为评价性能优劣的参考。最后利用装备有 AEB 系统的车辆模型, 针对三种不同探测距离的雷达, 对所提出的测试工况、评价参数, 在虚拟仿真环境中进行了验证。一方面测试了新建测试工况的有效性, 另一方面也探讨了雷达探测距离对 AEB 系统性能的影响^[29]。

4.3 小结

在 AEB 的测试评价研究中, 基于场景构建的 AEB 测试评价方法和基于实际测试的 AEB 测试评价方法均发挥了较大的作用。但两种测试评价方法也表现出不用的优缺点, 基于场景构建的 AEB 测试评价方法理论依据较为充分, 场景参数依据实际交通数据, 信息完整度和准确度较高, 但缺乏实车测试验证。基于实际测试的 AEB 测试评价方法, 主要依据现有测试规程的 AEB 测试场景, 通过研究分析其存在的不足, 提出新的测试场景和评价指标, 主观性较强, 但缺乏实际交通数据的理论支持。因此, 我们应当充分利用两者的优点, 研究从真实交通数据构建 AEB 测试场景, 然后构建 AEB 测试方法, 建立评价指标, 进行实际的测试, 验证其有效性和准确性。这将是开展 AEB 测试评价研究的有效途径。

5 总结

避免道路交通事故及降低人员伤亡程度是 AEB 发展的重要目标, 科学完善的测试评价是 AEB 安全运行的必要前提。本文详细梳理和分析了国内外部分现行的 AEB 测试评价规程, 并对其进行了对比分析和总结。同时梳理了目前业界对于 AEB 测试评价的研究, 总结出一种从真实交通数据构建 AEB 测试场景, 然后基于构建的 AEB 场景进行实车测试, 设计相应的评价指标, 验证其有效性和准确性, 这将是开展 AEB 测试评价研究的有效途径, 将对提高 AEB 的开发和测试效率具有重大的意义。

参考文献

- [1] WHO.Global status report on road safety: time for action[R].Geneva: World Health Organization, 2015.
- [2] Searson D J,Anderson R W G, Hutchinson T P. Integrated assessment of pedestrian head impact protection in testing secondary safety and autonomous emergency braking[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 63(feb):1-8.
- [3] 李霖,朱西产,董小飞,马志雄.自主紧急制动系统避撞策略的研究[J].汽车工程,2015,37(02):168-174.
- [4] Wada T,Tsuru N,Isaji K,et al. Characterization of Expert Drivers' last-second Braking and Its Application to a Collision Avoidance System[J].Intelligent Transportation Systems,IEEE Transactions, 2010,11(2):413-422.
- [5] 李克强,戴一凡,李升波,等.智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J].汽车安全与节能学报, 2017, 8(1):1-14.
- [6] Yim B,Yun D, Kim H, et al. The research of AEB performance test method bases on Euro-NCAP and analysis of domestic traffic accident cases[J].韩国汽车工程学会学术大会, 2017.
- [7] Euro NCAP. Test protocol-AEB systems, Version 3.0.2[S]. Brussels: Euro NCAP, 2019.
- [8] National Highway Traffic Safety Administration, Objective Tests for Automatic Crash Imminent Braking(CIB)Systems Final Report, September 2011.
- [9] Automatic Emergency Braking, aeb. U.S. DOT to add automatic emergency braking to list of recommended advanced safety technologies in 5-Star Rating system[J].
- [10] 中国汽车技术研究中心.C-NCAP 管理规则(2018 年版)[S],中国汽车技术研究中心,2017.
- [11] Euro NCAP Test Protocol-AEB VRU Systems [S]. Version 1.0.1. Belgium : Euro-NCAP,2015.
- [12] Euro NCAP. Test protocol-AEB systems, Version 1.0[S]. Brussels: Euro NCAP, 2013.
- [13] 孙勇,郭魁元,高明秋.自主紧急制动系统在新车评价规程中的现状与发展[J].汽车技术,2016(02):1-6.
- [14] <http://www.iihs.org/iihs/ratings/ratings-info/front-crash-prevention-tests>.
- [15] Ulrich Sander, Nils Lubbe. The potential of clustering methods to define intersection test scenarios: Assessing real-life performance of AEB[J]. Accident Analysis & Prevention,2018:1-11.
- [16] Edwards M, Nathanson A, Carroll J, et al. Assessment of Integrated Pedestrian Protection Systems with Autonomous Emergency Braking(AEB)and Passive Safety Components.[J].Journal of Crash Prevention & Injury Control, 2015, 16(sup1): S2-S11.
- [17] 胡林,易平,黄晶,张新,雷正保.基于真实事故案例的自动紧急制动系统两轮车测试场景研究[J].汽车工程,2018,40(12):1435-1446
- [18] 徐向阳,周兆辉,胡文浩,肖凌云,李文娟,王书翰.基于事故数据挖掘的 AEB 路口测试场景[J/OL].北京航空航天大学学报: 1-12 [2020-04-29].<https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0548>.
- [19] 石娟,颜燕,郭魁元,等.行人自动紧急制动系统测试评价方法研究[J].时代汽车,2017(2):39-41.
- [20] 胥峰.面向弱势道路使用者的自动紧急制动系统测试方法研究[D].吉林大学,2019.

(下转第 49 页)

度,把握 HMI 项目的计划与实际执行情况;其二,把握 HMI 输出质量,对输出方案的执行情况进行决策,以判断每个阶段输出物是否满足进入下一个阶段的条件。

3.4 重视项目开发经验总结

在项目阶段性总结,对输入输出资料归档并进行深度加工处理;在项目收尾工作中,要求做好变更记录与输入资料整理,归纳总结开发资料;重视上市后用户反馈,汽车上市后要关注和搜集产品用户的体验的真实反馈。

4 总结

本文基于 HMI 整车项目开发实践,明确了 HMI 开发流程、阐述了 HMI 开发模式与主要阶段,介绍各主要阶段的主

要任务。通过理论与实际相结合深入分析开发流程中每个环节,提出问题并给出相应的优化前方案。通过上述问题分析总结,给从事 HMI 设计工作者,以及研发企业单位较系统的认识。

参考文献

- [1] Kramer F,Kramer M.核心因素质量、时间和成本对产品开发成本所具有的重要意义[J].工程设计学,1994(创刊号):1-6.
- [2] 李照辉,周茂萍,高科技新产品开发流程研究[J].中国高新技术企业,2011,(21).7-8.
- [3] 李亚英,张由婷,朱顺成,汪洪亮.基于显示行业代工模式的项目管理流程优化研究[J].管理观察,2019,(25):18-19.
- [4] 胥峰,周建光,李兵,韩飞,王晓亮.面向骑行者的 AEB 测试方法研究[J].汽车实用技术,2020(03):152-156.
- [5] 李霖,朱西产,刘颖,等.涉及骑车人的典型交通危险场景.同济大学学报(自然科学版),2014,42(7):1082~1087.
- [6] 吴斌,朱西产,沈剑平.基于自然驾驶数据的驾驶员紧急制动行为特征[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(11):1514-1519+1535.
- [7] 吴斌,朱西产,沈剑平,李霖.基于自然驾驶数据的危险评估算法研究[J].汽车工程,2017,39(08):907-914.
- [8] 苏江平,陈君毅,王宏雁,陈伟,王鲲.基于中国危险工况的行人交通冲突典型场景提取与分析[J].交通与运输(学术版),2017(01):209-214.
- [9] 季中豪,周景岩,杨天栋,张慧,杨路鹏.基于实车测试的 AEB 系统测试评价方法研究[J/OL].汽车技术:1-8[2020-04-29].https://doi.org/10.19620/j.cnki.1000-3703.20191019.
- [10] 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(02):136-142.
- [11] 田思波,何鋈,郭润清,樊晓旭,童宝锋.自动驾驶汽车自动紧急避撞测试与评价方法研究[J].汽车实用技术,2019(14):42-46.
- [12] 张慧.自主紧急制动系统测试评价方法研究[D].河北工业大学,2017.

(上接第 40 页)