

文章编号:1005-0523(2019)04-0032-07

危险品运输车主动防撞系统性能测试分析

牛成勇^{1,2,3}, 苏占领^{1,2}, 吴昆仑^{1,2}, 胡雄^{1,3}, 徐建勋^{1,3}

(1.重庆车辆检测研究院国家客车质量监督检验中心,重庆 401122;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 401122;3.自动驾驶系统及智能网联汽车技术研发与测试应用重庆市工程研究中心,重庆 401122)

摘要:在分析基于单线激光雷达的汽车主动防撞系统(AACS)原理的基础之上,依据欧盟标准 ECE R131 及国家标准 GB/T 33577-2017,针对某危险品运输车匹配的 AACS 性能进行了测试与评价。测试结果表明,当危险品运输车在遇到前向碰撞和后向追尾情况下,主动防撞预警系统可有效提醒驾驶员或同时采取自动紧急制动措施以避免追尾或碰撞,同时指出了目前基于单线激光雷达的 AACS 存在的一些问题并提出相关建议。

关键词:危险品运输车;主动防撞预警系统(AACS);单线激光雷达;测试评价;安全

中图分类号:U492.3+36;U463.6

文献标志码:A

汽车主动防撞系统(active anti-collision system, AACS)通过视觉(单目、双目、多目摄像头)或雷达(毫米波雷达、激光雷达等)环境感知系统实时监测前后方车辆,判断两者之间的距离、方位及相对速度等信息,当系统探测到前后方区域存在潜在碰撞或追尾危险时,及时对驾驶员进行提醒、警告或同时进行自动紧急制动措施进行风险规避^[1-4]。

危险品运输车辆具有重量大、尺寸长、质心高及运输物品危险性高等特点,导致其在制动性能方面(如制动距离、制动稳定性等)较差、碰撞或被追尾后危害性极大。在实际行车过程中,由于各种原因驾驶员可能无法获取足量、合适、及时的信息,或由于经验与知识所限不能对所获信息作出正确的分析和判断,而身临危险境地又得不到有效及时的提示与警告时,就容易发生事故^[5]。一旦在道路上出现危险情况,极易波及正常行驶的车辆或行人,造成群死群伤恶性交通事故;因此,需要高度重视危险品运输车的主动安全技术的研发与配备,尤其是主动防撞预警系统技术。针对危险品运输车辆 AACS 的性能进行测试研究具有重要的现实意义^[6]。

1 基于单线激光雷达的 AACS 工作原理

1.1 车载单线激光雷达

单线激光雷达,本质上是由高同频脉冲激光测距仪和一维旋转扫描组成^[7],其特点主要有:

- 1) 与多线激光雷达相比,结构较为简单(一路发射与一路接收),使用方便;
- 2) 扫描速度快、角度分辨率高、可靠性较高;
- 3) 体积小、重量轻、功耗低;
- 4) 与多线激光雷达相比,成本较低。

汽车 AACS 关键技术在于车辆测距,测距精度的高低直接关系到系统预警时间及紧急制动时刻的安全裕度,影响车辆与行人安全。目前,激光测距方法大体上可分为激光飞行时间法(time of fly, TOF)和三角法。

收稿日期:2018-12-21

基金项目:重庆市质量技术监督局科研项目(CQZJKY2017009);重庆市技术创新与应用示范专项产业类重点研发项目(cstc2018jszx-cydzX0064)

作者简介:牛成勇(1990—),男,高级工程师,主要研究方向为汽车主动安全测试技术、自动驾驶及智能网联汽车测试。

TOF 又可细分为两类:一类是基于脉冲测距技术的脉冲调制方式;另一类是基于相位测距技术通过对激光连续波进行强度的调制方式^[8]。

1.2 危险品运输车辆 AACS 功能组成

危险品运输车辆 AACS 其主要包括自动紧急制动系统(advanced emergency braking system, AEBS)和后防撞预警系统(rear collision warning system, RCWS),如图 1 所示。其中,前向激光测距雷达布置方式为“一主两副”式,如图 2 所示。

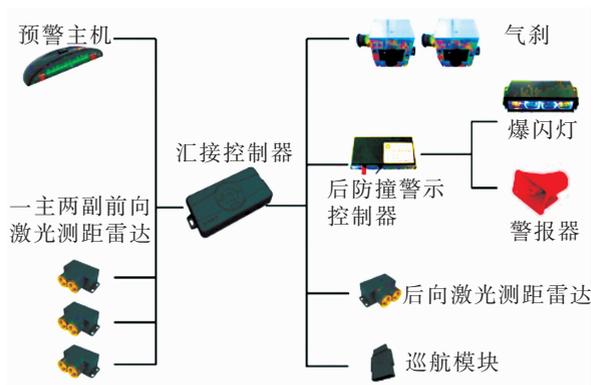


图 1 危险品运输车 AACS 组成示意图

Fig.1 Framework diagram of AACS for hazardous material transportation vehicle

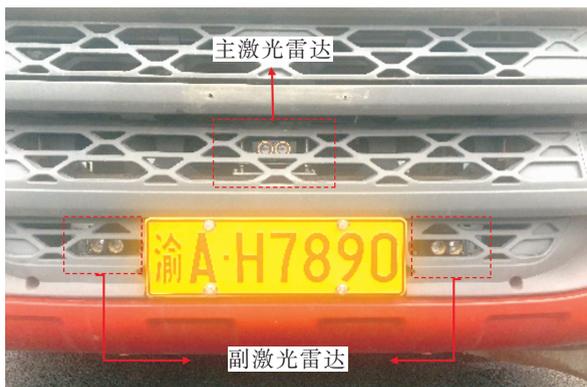


图 2 危险品运输车前向激光测距雷达布置图

Fig.2 Configuration of forward ranging LiDAR of AACS for hazardous material transportation vehicle

自动紧急制动系统(AEBS)是一种主动安全技术,利用传感器(雷达、摄像头等)来监测前面车辆、检测与目标车辆之间的相对速度和距离,计算即将发生的情况,先进行报警,在驾驶员没有进行主动刹车的情况下将刹车信号传递给 ABS(或 EBS)控制系统,进行自动刹车,可以有效降低追尾事故发生概率或减轻碰撞激烈程度^[9]。

后防撞预警系统(RCWS)是一种有效预防后方车辆追尾的主动安全技术,主要利用毫米波雷达或激光雷达实时监测后方区域(尤其是盲区)的车辆,当探测到后方车距过近时,采取预警提示(报警喇叭、爆闪灯方式)提醒驾驶员尽快驶离以避免被追尾。

2 危险品运输车 AACS 性能测评方法

根据试验车辆的特殊性,危险品运输车 ACWS 性能测试评价方法参考欧盟标准 ECE R131《关于就自动紧急制动系统(AEBS)方面批准机动车辆的统一规定》及国家标准 GB/T 33577-2017《智能运输系统 前向碰撞预警系统性能要求及测试规程》中的相关要求分别对汽车主动防撞系统中的 AEBS 及 RCWS 性能进行测试。

2.1 测试规程

AEBS 性能试验评价主要侧重于两个方面:① AEBS 预警及触发试验(依据 ECE R131 标准),如图 3 所示;② 误作用试验(依据 GB/T 33577-2017 标准),如图 4 所示。综合考察 AEBS 在危险状态下的预警、自动紧急制动能力及系统的目标辨别能力,即纵向辨别能力、横向辨别能力。

RCWS 性能试验评价主要侧重于碰撞时间(time to collision, TTC)试验,如图 5 所示,测试场景为自车制动(car-to-car rear braking, CCRb)试验(依据 GB/T 33577-2017),主要考察系统对后方车辆的纵向辨别及响应能力。

2.1.1 AEBS 预警及触发试验

ECE R131 标准所要求的 AEBS 预警及触发试验包括前车静止(car-to-car rear stationary, CCRs)试验和前车慢行(car-to-car rear moving, CCRm)试验。CCRs 试验是指测试车辆以 80 km/h 的车速从远处接近静止目标(假车);CCRm 试验是指测试车辆以 80 km/h 的车速从远处接近以 12 km/h 车速缓行的目标假车。整



图3 AEBS 预警及触发试验场景

Fig.3 Warning and activation test scenario of AEBS

个试验过程中,除遇紧急情况外,试验驾驶员不得采取任何操作以免解除 AEBS 功能,造成试验失败^[9]。

CCRs 和 CCRm 测试场景的合格指标如下:

1) 报警模式(安全带预警、触觉、声音或视觉等报警方式)及降速量要求如表 1 所述。值得一提的是,紧急制动时刻以车辆制动减速度达到 4 m/s^2 为标志。

2) 在系统报警阶段,车辆速度减少量 $\leq \max \{15 \text{ km/h}, 0.3V_{\text{总减速度}}\}$ 。

3) 对于 CCRs 试验场景,系统报警应在紧急制动之后;对于 CCRm 试验场景,在紧急制动阶段,系统应保证测试车辆与前方缓行目标车辆不发生碰撞。

4) 在 $TTC \leq 3.0 \text{ s}$ 时,系统不应处于紧急制动阶段。

表 1 报警模式及速度降低量要求

Tab.1 Requirement of alarm mode and velocity reduction

| 目标车辆 | 报警模式时序 | 降速量 |
|------|--|-------------|
| 静止目标 | 至少 1 种紧急制动前不小于 1.4 s 至少 2 种紧急制动前不小于 0.8 s | 不小于 20 km/h |
| 移动目标 | 至少 1 种紧急制动前不小于 1.4 s 至少 2 种紧急制动前不小于 0.8 s | 无碰撞 |

2.1.2 AEBS 误作用试验(功能性测试)

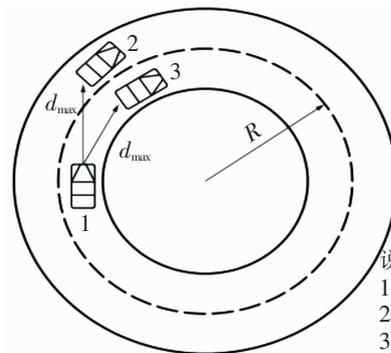
为充分且有效验证危险品运输车 AEBS 是否存在误响应,按照 GB/T 33577-2017 要求,主要采取弯道辨别能力试验:在 $R=250 \text{ m}$ 的弯道内,目标车辆 3 外侧车道内有一辆前车 2 正在稳定行驶,然后车 2 减速至明显低于自车 1 和车 3 的速度,最后车 3 减速,如图 4 所示。

合格指标:车 1 超过车 2 的过程中,系统不应报警;车 3 减速至车 1 能发出碰撞报警并减速的速度时,车 1 报警并采取制动。

2.1.3 RCWS 预警试验

自车制动(CCRb)试验:自车(测试车辆)与目标车辆均以 72 km/h 的速度以 30 m 的车间距稳速行驶(至少保持 7 s);自车分别以 $1, 3, 5 \text{ m/s}^2$ 的减速度制动减速,如图 5 所示。整个试验过程中,除遇紧急情况外,试验驾驶员不得采取任何操作以免解除 AEBS 功能,造成试验失败。

合格指标:在 $2.4 \text{ s} \leq TTC \leq 4 \text{ s}$ 情况下,自车 RCWS 发出报警(警报器或爆闪灯)。

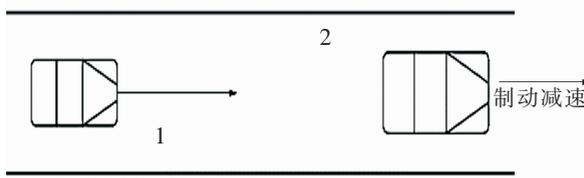


说明:

1 为自车;
2 为相邻车道前车;
3 为目标车辆。

图4 AEBS 误作用试验

Fig.4 Failure detection test scenario of AEBS



说明:1 为目标车辆;2 为自车。

图5 RCWS 预警试验场景

Fig.5 Warning test scenario of RCWS

2.2 测试设备及测试车辆信息

危险品运输车 AACS 性能测试设备:① 驾驶机器人,包括转向机器人和制动油门组合机器人,可实现测试车辆和目标车辆的转向、加速及制动的精准控制;② 惯导系统+双车通信模块+GPS 差分基站,保障定位精度、纵横方向控制及车间信息通讯;③ 标准 EVT 目标假车,保证摄像头、雷达等环境感知系统的识别有效性。

仪器测试精度:① 速度精度:0.05 km/h;② 加速度精度:0.01 m/s²;③ 定位精度:0.02 m。

3 危险品运输车 AACS 性能测试结果与分析

按照相关测试评价规程,针对基于单线激光雷达的危险品运输车 AACS 性能进行测试与分析。为保证测试结果的可靠性与重复性,每个测试场景至少重复进行 3 次试验且试验数据的标准差 ≤ 0.1 。值得一提的是,ECE R13 和 GB/T 33577-2017 均未对试验次数作明确要求。

3.1 AEBS 预警及触发试验

3.1.1 CCRs 测试场景试验结果

危险品运输车 AEBS 在 CCRs 测试场景下的预警及降速量测试结果如表 2 所示。

表 2 CCRs 场景测试结果
Tab.2 Test results of CCRs scenarios

| 试验次数 | 声音报警 | | 声音+光学报警(显示屏) | 报警阶段(总)降速量/(km/h) |
|------|-------|---------|--------------|-------------------|
| | TTC/s | 紧急制动前/s | 紧急制动前/s | |
| 1 | 2.88 | 1.65 | 1.18 | 5.5(31.5) |
| 2 | 2.75 | 1.72 | 1.32 | 5.9(32.2) |
| 3 | 2.91 | 1.69 | 1.23 | 5.4(30.8) |
| 标准差 | 0.070 | 0.029 | 0.058 | 0.216(0.572) |

从表 2 的测试结果可以看出,在 3 次重复测试试验中,基于单线激光雷达的 AEBS,测试车辆在 80 km/h 的速度下,以最大 47.8 km/h 的速度与静止目标假车发生碰撞(降速量为 32.2 km/h),且其报警时序及模式均满足法规标准要求。除此之外,3 次测试数据的标准差较小,即其数据一致性及稳定性较好,足以体现基于单线激光雷达的 AEBS 在封闭测试场地、光线适宜、无其他干扰情况下的稳定性及可靠性。

测试车辆在 CCRs 测试场景下的请求制动策略分析:AEBS 首先请求制动系统执行较小的、约 3.5 m/s² 的一级减速度;若此时驾驶员未介入(未踩下制动踏板)或介入后车辆减速度仍不能避免碰撞,则在某一时刻系统将再次请求制动系统执行二级制动,使车辆减速度达到最大值(约 7.4 m/s²),直至车辆制动减速至停止,如图 6 所示。在前车静止的测试场景下,由于 AEBS 环境感知系统(不管是雷达,还是摄像头)对静止目标识别效率低,造成系统探测到目标存在时,本车与前方车辆的距离相对于其他场景下探测到的车距较小。AEBS 采取二级制动的的原因主要是在有效提醒驾驶员的

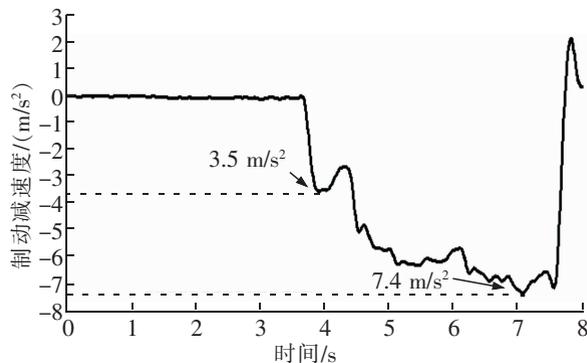


图 6 AEBS 二级制动曲线(CCRs 场景)
Fig.6 Two-stage braking curve of AEBS (CCR test scenario)

前提下,及时以高强度制动,确保安全、避免碰撞。

3.1.2 CCRm 测试场景试验结果

危险品运输车 AEBS 在 CCRm 测试场景下的预警及降速量测试结果如表 3 所示。

表 3 CCRm 场景测试结果
Tab.3 Test results of CCRm scenarios

| 试验次数 | 声音报警 | | 声音+光学报警(显示屏) | 报警阶段(总)降速量/(km/h) |
|------|-------|---------|--------------|-------------------|
| | TTC/s | 紧急制动前/s | 紧急制动前/s | |
| 1 | 3.66 | 2.14 | 1.61 | 4.7(未碰撞) |
| 2 | 3.72 | 2.10 | 1.72 | 5.0(未碰撞) |
| 3 | 3.51 | 2.06 | 1.56 | 4.6(未碰撞) |
| 标准差 | 0.088 | 0.033 | 0.067 | 0.170 |

根据表 3 所列测试数据可知,测试车辆在 CCRm 场景下的 AEBS 性能指标满足标准要求,在此不再赘述。

测试车辆在 CCRm 测试场景下的请求制动策略分析:AEBS(基于单线激光雷达)首先请求制动系统执行较小的、约 3.4 m/s^2 的一级减速度;然后根据其控制逻辑算法执行二级制动;若此时驾驶员仍未踩下制动踏板,则在某一时刻 AEBS 将再次请求制动系统执行三级制动,使车辆减速度达到最大值,直至车辆制动减速至停止,如图 7 所示。在前车缓行的测试场景下,由于环境感知系统识别前方目标的难度明显小于静止目标且测距精度也高于后者,加之,预警时间早于 CCRs 场景;因此,AEBS 采取三级制动的原因主要是在确保安全、避免碰撞的前提下,保证“制动舒适性”。

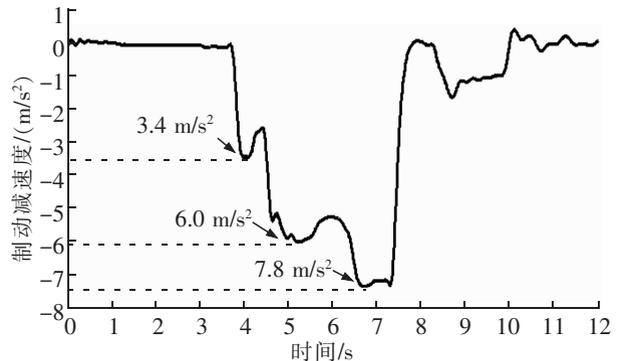


图 7 AEBS 三级制动曲线(CCRm 场景)
Fig.7 Three-stage braking curve of AEBS (CCRm test scenario)

3.2 AEBS 误作用试验

按照如图 5 所示的测试场景对对危险品运输车所匹配对应的 AEBS 分别进行 3 次误作用测试,测试结果如表 4 所示。

表 4 AEBS 误作用测试结果
Tab.4 Test results of failure detection response

| 试验次数 | 干扰车辆 2 制动 | 目标车辆 3 制动 |
|------|-----------|---------------------------------------|
| 1 | 系统未报警✓ | 系统报警($TTC=2.85 \text{ s}$)、制动(未碰撞)✓ |
| 2 | 系统未报警✓ | 系统报警($TTC=2.46 \text{ s}$)、制动(未碰撞)✓ |
| 3 | 系统未报警✓ | 系统报警($TTC=2.91 \text{ s}$)、制动(未碰撞)✓ |

从表 4 的测试可以看出,基于单线激光雷的 AEBS 能实现对纵横向车辆的有效分辨,未出现虚警及误制动情况,并且对非车目标辨识能力较强。

3.3 RCWS 预警试验

危险品运输车 RCWS 在自车制动(CCRb)场景下进行后防撞预警测试(每一种制动减速度工况分别进行7次),其预警 TTC 测试结果如图8所示。其中,测试车辆分别以 1,3,5 m/s² 的制动减速度制动。

由图8的TTC响应折线图可知,随着测试车辆的制动减速度增大,RCWS后防撞预警系统的TTC响应数据波动越大,即激光雷达对后方车辆的识别效率、测距精度随之降低,甚至出现 $TTC=1.25\text{ s}$ (不满足 $2.4\text{ s} \leq TTC \leq 4\text{ s}$ 要求)。进一步讲,单线激光雷达对目标的运动状态适应性差、环境适应性较差,易受视野、夜晚暗光、雨雪天气等因素影响而导致“漏检”,预警功能失效。对于单线激光雷达功能短板,可考虑用毫米波雷达的全天候工作能力和摄像头的图像识别能力来补足,即采用“多传感器融合”方案以提高鲁棒性、识别有效性与可靠度。多传感器融合的关键在于“融合算法”的选择,在多目标关联后,可利用贝叶斯融合准则提高对目标参数的估计精度;通过多传感器之间的相互印证和置信度融合来减少虚警率,提高目标检测的置信度。

由于AACS的关键在于“测距”,测距技术能够为其提供深度信息支持,保障行车安全;因此,基于单线激光雷达的AEBS及RCWS需不断优化测距方案以提升系统预警可靠性与稳定性,确保安全裕度。实测的危化品运输车所配备的AACS采用“三角法”测距,类似于双目视觉测距,其在近距离下,探测精度较高,而在远距离探测时,探测误差会呈几何量级增长。因此,建议采用“调幅连续波测距法”,其基于相位测距技术通过对激光连续波进行强度的调制方式,间接获取光的飞行时间,反推出飞行距离,探测距离及测距精度均优于“三角法”测距。

4 结论

本文借鉴欧盟标准ECE R131及国家标准GB/T 33577-2017,针对某危险品运输车匹配的AACS(包括AEBS+RCWS)性能进行了测评与评价,测试结果表明,基于单线激光雷达的AEBS(自动紧急制动系统)在封闭测试场地下具有较高的稳定性及可靠性且制动执行策略与TTC(碰撞时间)、感知系统识别效率、测距精度等因素具有相关性;在无其他干扰环境下,单线激光雷达能有效识别纵横向车辆状态并采取相应措施;基于单线激光雷达的RCWS(后防撞预警系统)对后方车辆的识别效率、测距精度随着本车制动减速度的增加而降低,甚至出现预警时间过晚、“漏检”等情况。

建议采取以下措施:优化激光雷达测距算法;采用调幅连续波测距法以提高测距精度,保证探测的可靠性;采用多传感器融合方案以提高系统环境适应性、识别可靠度。

参考文献:

- [1] 牛成勇,徐建勋,曾杰,等. 客车前撞预警系统性能测试与评价[J]. 汽车技术,2018(5):16-19.
- [2] 周俊静,段建民,杨光祖. 基于雷达测距的车辆识别与跟踪方法[J]. 汽车工程,2014,36(11):1415-1420
- [3] 黄如林,梁华为,陈佳佳,等. 基于激光雷达的无人驾驶汽车动态障碍物检测、跟踪与识别方法[J]. 机器人,2016,38(4):437-443.
- [4] 郭紫阳. 基于机器视觉的前碰撞预警系统车辆检测方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.

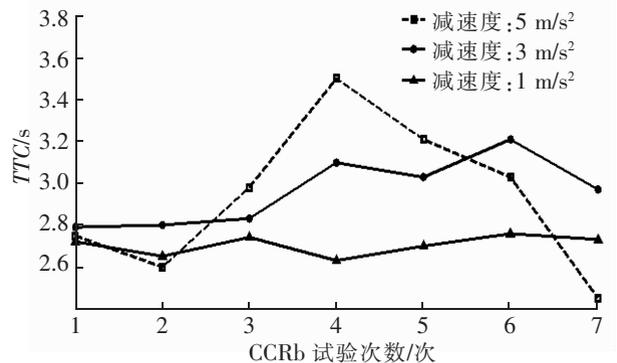


图8 CCRb 工况下 RCWS 预警 TTC 数据曲线
Fig.8 TTC response data of RCWS under CCRb test scenario

- [5] 于影霞,曾致桓,龙丹. 基于事故树分析的货运驾驶员失误研究[J]. 华东交通大学学报,2018,35(1):55-62.
- [6] 牛成勇,游国平,徐建勋,等. 带挂牵引车电子稳定控制系统测试分析与评价研究[J]. 辽宁工业大学学报:自然科学版,2019,39(1):1-5.
- [7] 杨光祖. 基于多种激光雷达数据融合的障碍检测技术的研究[D]. 北京:北京工业大学,2013.
- [8] 段建民,李龙杰,郑凯华. 基于车载4线激光雷达的前方道路可行驶区域检测[J]. 汽车技术,2016(2):55-62.
- [9] 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.

Test and Analysis on Performance of Active Anti-collision System for Hazardous Material Transportation Vehicle

Niu Chengyong^{1,2,3}, Su Zhanling^{1,2}, Wu Kunlun^{1,2}, Hu Xiong^{1,3}, Xu Jianxun^{1,3}

(1.Chongqing Vehicle Test & Research Institute, National Bus and Coach Quality Supervision and Test Center, Chongqing 401122, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Industry and Information for Automotive Active Safety Testing Technology, Chongqing 401122, China; 3. Chongqing Test & Research Engineering Center for AD System and ICV Technology, Chongqing 401122, China)

Abstract: Through the analysis of vehicle ACWS principle on the basis of single-line laser radar, the AACS performance of hazardous material transportation vehicle was tested and evaluated in accordance with EU (European Union) standard ECE R131 and national standard GB/T 33577-2017. The test results show that AACS can effectively remind the driver or take automatic emergency braking measures at the same time to avoid the forward or rear-end collision when the hazardous material transportation vehicle has the risk of the forward or rear-end collision. Meanwhile, the existing problems in AACS based on single-line LiDAR were pointed out and relevant feasible suggestions were proposed.

Key words: hazardous material transportation vehicle; active anti-collision system (AACS); single-line LiDAR; test evaluation; safety