

商用车前向碰撞预警系统测试方法研究^①

王博通，马文博，秦孔建，郭魁元，郭胤良
中国汽车技术研究中心有限公司

【摘要】本文基于中国商用车事故原因、前向碰撞预警系统(FCWS)原理和相关国内外技术标准,提出FCWS典型测试场景和关键评价指标,基于自动驾驶测试系统、中国特色二轮车目标物等硬件实现了FCWS典型场景的搭建,通过数据采集软件二次开发实现了关键评价指标自动化提取。研究形成了符合中国交通场景特征和法规需求的FCWS测试方法,并通过实车道路试验验证了测试方法有效性。同时,验证试验结果表明FCWS对静止车辆、匀速车辆和紧急制动车辆都有较好的预警效果,但对行人和二轮车横穿场景识别效果有待提升。本文完善了FCWS测评方法,为中国FCWS系统研发和标准修订提供了参考。

【关键词】商用车, FCWS, 测试方法, 实车测试, 中国交通环境

Research on Test Method of Commercial Vehicle Forward Collision Warning Systems

Wang Botong, Ma Wenbo, Qin Kongjian, Guo Kuiyuan, Guo Yinliang

China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd.

Abstract: Based on analysis of commercial vehicle accidents in China, the technical standards and work principle of Forward Collision Warning System (FCWS), this research has formed a FCWS test method that meets the characteristics of China's traffic scenarios and regulatory requirements, and verified the effectiveness of the test method through real vehicle road tests. At the same time, the verification test results show that FCWS has a good early warning effect on stationary vehicles, constant speed vehicles and emergency braking vehicles, but the recognition effect on pedestrian and two wheeled vehicle crossing scenes needs to be improved. This paper improves the FCWS evaluation method and provides a reference for the development of China's FCWS system and the revision of standards.

Key words: commercial vehicle, FCWS, test and evaluation method, real vehicle test, Chinese traffic environment

引言

商用车关联交通事故往往具有致死率高、后果严重的特点,以官方统计的2017年交通事故数据为例,重型货车参与的交通事故致死率高达58%,而在9起单次死亡10人以上的重特大道路交通事故中,重型货车参与的占4起^[1]。美国国家公路交通安全管理局研究结果表明,驾驶员在事故发生前3s驾驶状态正常并采取正确的驾驶措施,可避免30%交通事故的发生^[2]。根据中国交通事故深入研究(China In-Depth Accident Study, CIDAS)相关成果,在7103起商用车事故中,92.5%的事故可以通过前向碰撞预警系统(Front Collision Warning System, FCWS)提醒驾驶员加以避免或减轻危害^[3]。因此,装配FCWS对于提升商用车运行安全性十分重要,交通运输部规定,2020年9月1日起所有营运货车和牵引车辆应全部加装FCWS^[4,5]。

在FCWS功能和性能开发方面,Adell、Ben-Yaacov和Birrell等人提出FCWS功能和性能核心开发目标是为驾驶员提供更快的反应时间和合适的车头时距,从而减少紧急情况的发生^[6-8]。因此,国内外专家大都基于车头时距、相对距离、相对速度和自车速度等信息研究FCWS的预警

算法,提出了安全距离模型^[9]、强化碰撞时间模型^[10]和主客观结合的感知风险模型^[11]。部分算法侧重计算及时性,计算参数较少,导致其只适用于简单的跟车环境,对实际复杂道路工况适用性较差;部分算法计算参数较多,计算及时性和标定难度较大,在实际道路工况响应情况比较严重。因此,需要一套科学完整的测试方法对FCW算法进行评价。

在FCWS测试方法方面,目前2018版和2021版中国新车评价规程(C-NCAP)均发布了FCWS测试方法,但是测试方法主要针对乘用车测试,在商用车特色场景方面相对不足,GB/T 33577—2017《智能运输系统 车辆前向碰撞预警系统 性能要求和测试规程》^[12]提出FCWS性能要求和测试规程,该标准比较系统地提出了FCWS测试的典型场景和性能要求,但对行人和二轮车目标物的测试相对不足。检测机构、FCWS供应商、汽车企业进行在进行FCWS研发性测试时,存在测试场景种类、场景测试方法不统一,测试系统性和规范性不足等问题。因此,目前国内虽然已有针对商用车FCWS的标准,但针对商用车FCWS测试技术的相关研究仍有待完善。本文从FCWS工作原理和国内外法规要求分析出发,提出了FCWS典型测试场景和关键指标,基于自动驾驶测试系统、中国特色二轮车目标物等硬件设备实现了FCWS典型场景搭建,并通过DeWesoft等数据采

集软件二次开发实现关键指标的记录和提取，研究形成了符合中国测试需求和法规要求的 FCWS 测试方法，并进行了实车验证，为商用车 FCWS 开发和测试标准的制定提供了建议。

1 FCWS 工作原理和标准现状

FCWS 主要由环境感知单元、逻辑决策单元和控制执行单元组成；环境感知单元主要通过传感器探测车外周围交通环境和采集车内车辆信息，是逻辑决策单元的数据来源。传感器类型包括摄像头和雷达两种；由于各种传感器优劣不同，FCWS 的感知方法一般有毫米波雷达识别、摄像头和毫米波雷达融合识别等。

FCWS 的逻辑决策单元主要比较车头时距（THW）、碰撞时间（TTC）或与目标物距离等系统设定的安全阈值，确定车辆的安全状态，进而判断是否发出报警。

逻辑决策单元设计的核心为解决“报警难题”，即 FCWS 的安全阈值^[13]。一方面，充足的安全阈值可以确保驾驶员有足够的反应时间并采取正确的驾驶操作。另一方面，过大的安全阈值在实际道路环境中，会造成大量的误响应，导致功能的可用度较差。安全阈值的计算主要有基于 TTC 的安全模型、基于 THW 的安全距离模型、基于汽车制动过程的安全距离模型和驾驶员预瞄基础上的安全距离模型等^[13,14]。

控制执行单元主要指车辆通过人机界面（HMI）控制将预警信息传递给驾驶员，报警的有效性主要受报警形式的影响。Scott 等人比对了听觉、视觉和触觉三种报警方式的预警差异，试验结果表明，驾驶员反应时间从短到长依次为触觉、听觉和视觉^[15]。由于触觉成本较高，集成难度较大，目前 FCWS 供应商主要提供视觉和听觉的不同组合形式，在报警的两个阶段提醒驾驶员。FCWS 的工作原理如图 1 所示。

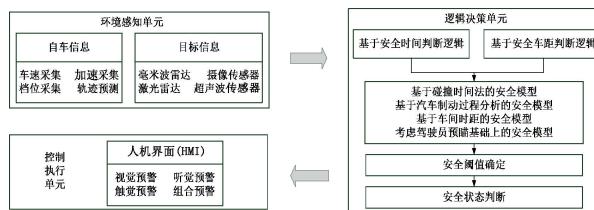


图 1 FCWS 工作原理

根据 FCWS 工作原理分析，一方面，逻辑决策单元的设计核心为安全阈值的确定，对于同一个安全阈值，在行驶环境（直道或弯道）、目标的分类（移动或静止、行人、二轮车、车辆）、驾驶员状态（正常或异常）等这些因素不同时，其适用程度也不同，因此，测试方案应包括不同场景下 FCWS 的性能测试和安全阈值要求；另一方面，控制执行单元的设计核心为报警方式的确认，所以，测试方案应包括报警方式对 FCWS 报警效果的影响。

目前关于 FCWS 的标准研究已建成涵盖国际标准、国家标准和行业标准的标准体系，见表 1。

表 1 FCWS 标准研究现状

标准号	类型	发布年份	标准特点与不足
GB/T 33577—2017 ^[12]	国家标准	2017	作为国家标准，比较系统地规定了 FCWS 的测试场景，但标准场景对目前 FCWS 典型场景覆盖度不够，同时只规定技术指标，缺少相应试验方法
JT/T 883—2014 ^[16]	行业标准	2014	结合车道偏离预警，从整体上规定了对营运车辆预警系统的要求，但定义的测试场景较为单一
ISO 15623:2012 ^[17]	国际标准	2012	比较系统地规定了 FCWS 测试场景，但由于标准制定时间较早，无法涵盖目前 FCWS 遇到的典型场景

可以看出，目前 FCWS 相关标准的发布时间较早，无法涵盖目前 FCWS 遇到的典型场景，如行人和二轮车识别场景等，同时，目前 FCWS 标准侧重规定技术指标，对测试方法规定较少，造成测试方法不一。

2 FCWS 测试方法

2.1 FCWS 典型测试场景和关键指标

基于上述 FCWS 工作原理和相关国内外标准分析，设计提出以下测试场景和关键指标，如图 2、图 3 所示。

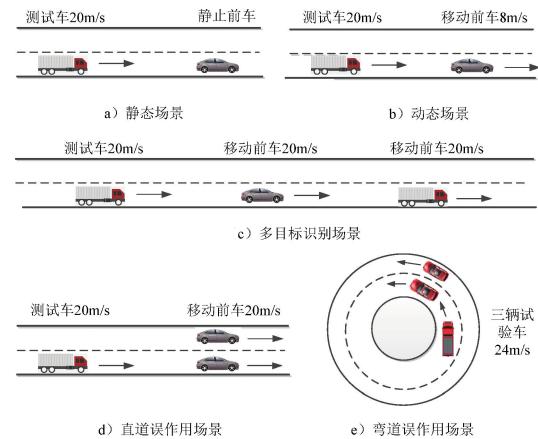


图 2 FCWS 测试场景示意图

注：目标物为车。

2.1.1 静态目标报警

该场景主要用于对单一静止前车的辨识能力。前车静止停在车道中间，朝向与测试车行进方向相同。测试车以额定速度 20m/s 在车道中心向前车行驶，被测车辆应在 TTC 最小为 2.1s 时发出预警，如图 2a 所示。

2.1.2 动态目标报警

该场景主要用于评价 FCWS 对不同种类和态势的单一动态目标的辨识能力。场景中动态目标分为 5 种情况。

1) 前车以 8m/s 匀速行驶。目标车辆与自车在同一直

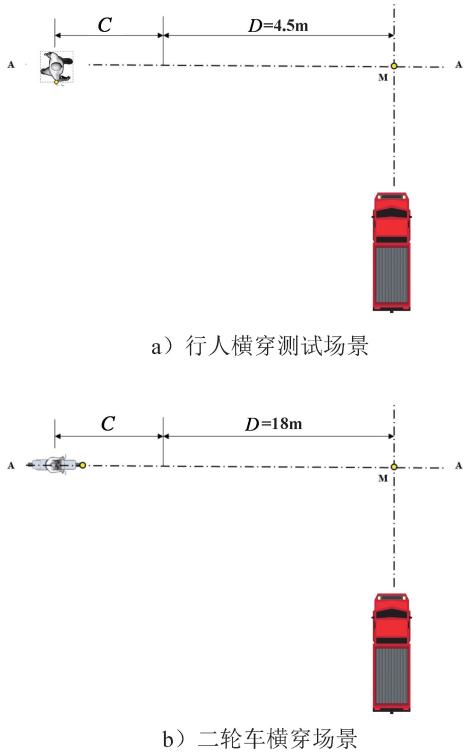


图 3 FCWS 测试场景示意图

注：目标物为行人和二轮车。

线车道上行驶，前车控制在 8m/s，测试车控制在 20m/s，如图 2b 所示。被测车辆应在距离最小为 20.39m 时发出预警。

2) 前车以 9m/s 匀速行驶。目标车辆与自行车在同一直线车道中心上行驶，前车控制在 9m/s，测试车控制在 20m/s。被测车辆应在 TTC 最小为 2.0s 时发出预警。

3) 前车以 0.3g 减速度减速。前车和测试车的车速控制在 20m/s，距离控制在 30m，前车以 0.3g 的减速度进行制动，测试车发出预警后试验结束。测试车应在 TTC 最小为 2.4s 时对减速前车发出预警。

4) 行人横穿。行人速度 8km/h，测试车速度 60km/h。如图 3a 所示，图中 C 为加速段，D 为匀速段。车辆应在 TTC 为 2s 前发出预警。

5) 二轮车横穿。二轮车速度为 20km/h，测试车速度为 30km/h。如图 3b 所示，图中 C 为加速段，D 为匀速段。车辆应在 TTC 为 2s 前发出预警。

2.1.3 纵向多目标报警

主要用于评价 FCWS 在纵向多车场景下对距离较近前车的辨识能力。两辆前车和测试车以 20m/s 的速度同向行驶。两前车的车头时距应为 0.6s，测试车和距离较近的前车的车头时距应大于 1.5s。距离较远的前车应为牵引车辆，较近的前车为常规乘用车。测试车加速至系统发出报警，然后测试车减速至与距离较近的前车的车头时距重新大于 1.5s；最后，距离较近的前车减速，距离较远的前车仍匀速，如图 2c 所示。被测车辆应在加速至未与距离较近的前车发生碰撞时发出报警，同时在距离较近的前车减速时发出报警。

2.1.4 侧向目标辨识能力测试

主要用于评价 FCWS 在直道和弯道场景下对侧向目标的

辨识能力。对于直道场景，测试车和两前车以 20m/s 的速度在车道中央同向行驶，两前车分别处于测试车车道和相邻车道，首先相邻车道前车刹车，测试车超过前车后，同车道前车刹车，如图 2d 所示。被测车辆应在同车道前车减速时发出报警，同时在相邻车道前车减速时不发出报警。

对于弯道场景，根据测试车车型，测试车和两前车以 24m/s 的速度在车道中央同向行驶，两前车分别处于测试车车道和相邻车道。三车进入半径为 250m 的弯道后，首先相邻车道前车刹车，测试车超过前车后，同车道前车刹车，如图 2e 所示。被测车辆应在同车道前车减速时发出报警，同时在相邻车道前车减速时不发出报警。

2.1.5 报警探测范围测试

该场景主要用于对 FCWS 的探测范围进行测量。前车停止在车道中间，方向与测试车行进方向相同，前车以安全速度接近前车，分别确定 FCWS 最远探测距离、最近探测距离、探测宽度、探测高度和探测角度等，各指标应满足表 2 所列要求。

表 2 报警探测范围要求

指标	要求
最远探测距离 d_{\max}	$d_{\max} \geq V_{\max} \times 1.5 + V_{\max}^2 / 7.2$ ；其中， V_{\max} 为车辆最高速度
最近探测距离 d_{\min}	$d_{\min} \leq 2 \text{ m}$
探测宽度 w_{\max}	在探测距离为 d_{\max} 时， w_{\max} 大于等于车道宽度，在探测距离为 7.5m 时， w_{\max} 大于等于车辆宽度
最大探测高度 h_{\max}	$h_{\max} \geq 1.1 \text{ m}$
最小探测高度 h_{\min}	$h_{\min} \leq 0.2 \text{ m}$

2.1.6 报警稳定性测试

重复静态目标场景 7 次，记录每次报警的速度、报警距离和报警时的 TTC，报警距离误差应在 $\pm 15\%$ 范围内。

2.1.7 FCWS 有无测试

该场景主要用于对 FCWS 的功能进行测试，在将 FCWS 功能关闭的情况下，测试静态和动态场景，研究驾驶员的驾驶行为。

2.1.8 FCWS 报警形式测试

主要用于对 FCWS 的报警形式进行测试，分别在只有声觉报警、只有视觉报警和声音、视觉都报警三种情况下进行静态场景试验。

2.2 FCWS 测试设备、测试场地和数据采集

基于上述场景和关键指标，设计 FCWS 测试设备、测试场地和数据采集方式^[16,17]。

1) 测试设备。测试设备包括自动驾驶测量系统（制动及加速机器人、转向机器人和控制器），惯性 GPS 组合测试系统（RT-3002G 陀螺仪，RT-range）、ADAC 导轨车、DeWeSoft 数据采集系统（数据采集器、传声器、摄像头、平板电脑）和气球车，如图 4 所示。

2) 测试场地。对于 FCWS 测试，需要 2~2.5km 长的虚



图 4 测试设备

线双车道直道和 250m 半径的弯道。

3) 数据采集。为实现测试设备的控制、数据采集和数据同步,通过搭建的软件环境,可实时采集和存储以下数据:车辆横纵向速度,横纵向加速度、与前车的 TTC,与前车的纵向距离,与前车的相对速度、FCWS 声觉及视觉报警时刻等。

3 性能验证试验结果分析

采用某款国产牵引车辆作为测试车辆,根据第三部分设计的测试方案进行测试。测试车辆采用毫米波雷达和摄像头融合方案进行 FCWS 目标探测,采用视觉和声觉组合方式进行 FCWS 预警。测试现场和测试轨迹如图 5 所示。



图 5 某款国产牵引车辆测试现场和测试轨迹

3.1 FCWS 功能分析

分别打开和关闭 FCWS 功能,进行静态场景试验,结果如图 6 和图 7 所示。

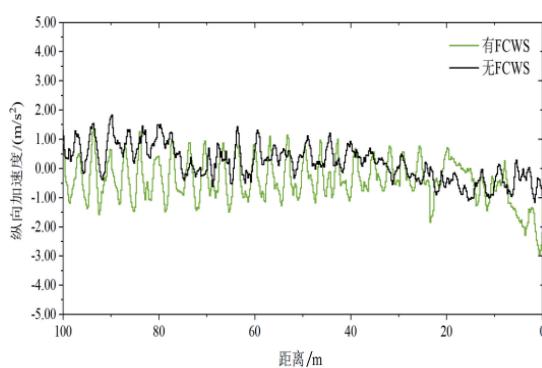


图 6 静态场景下纵向加速度变化

由图 6 可知,当打开和关闭 FCWS 时,驾驶员所驾驶的车辆在纵向加速度方面无明显差异。原因是在实车测试中,

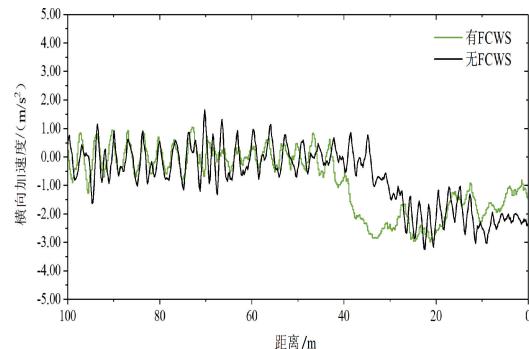


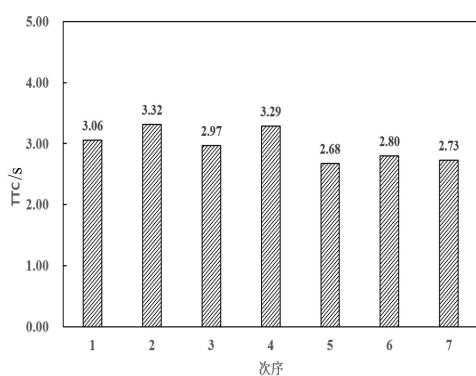
图 7 静态场景下横向加速度变化

当驾驶员在面对静态目标时,首要选择避让静态目标,而不是减速制动,驾驶行为与数据相吻合。进而研究驾驶员的避让行为,由图 7 可知,驾驶员面对静态目标物时都选择避让,因此横向加速度数值都由正转负,并且数值显著增大。与关闭 FCWS 功能相比,打开 FCWS 预警提醒的车辆使驾驶员在更早的时刻选择避让,并且横向加速度更小,说明 FCWS 可以有效提醒驾驶员,减少制动过晚、猛打方向盘的情况发生,提升驾驶舒适性。

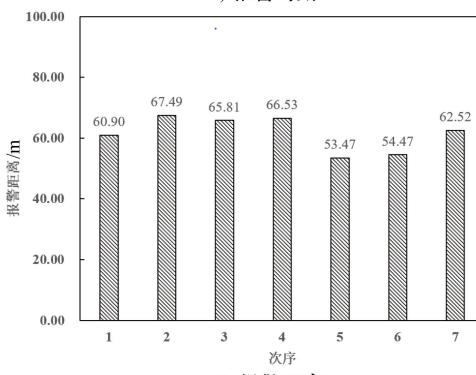
3.2 不同场景下 FCWS 对驾驶行为的影响

3.2.1 报警稳定性分析

静态场景下连续进行 7 次试验,用来研究 FCWS 静态场景报警时刻及报警距离。结果如图 8 所示。



a) 报警时刻



b) 报警距离

图 8 静态场景下 FCWS 的报警时刻及报警距离分布

由图 8 可知,FCWS 对静态目标的报警 TTC 比较稳定,基本稳定在 3.0s 左右。对于报警稳定性,FCWS 的报警距离

一般可以满足标准 GB/T 33577—2017《智能运输系统 车辆前向碰撞预警系统 性能要求和测试规程》中关于报警距离误差应在 $\pm 15\%$ 范围内，而不能达到标准要求的 $\pm 2\text{m}$ 以内的要求。因此，本测试方案将报警稳定性要求确定为误差应在 $\pm 15\%$ 范围内。

3.2.2 动态匀速场景下报警影响分析

在前车速度为 8m/s 的场景下研究 FCWS 的动态匀速报警功能，结果如图 9 所示。

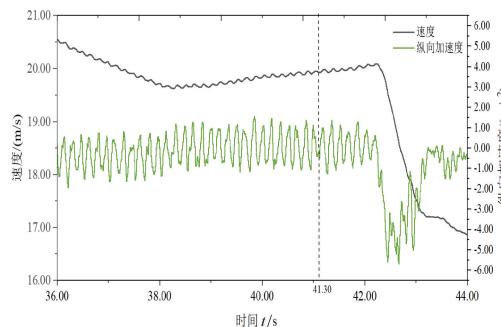


图 9 动态匀速场景下 FCWS 报警后驾驶行为分析

在动态匀速试验中，FCWS 在 TTC 为 2.58s 时发出报警，报警时两车相距 30.71m 。符合测试方案要求。由图 9 可知，当 FCWS 在 $t = 41.30\text{s}$ 时发出报警后，车辆在 $t = 42.24\text{s}$ 时开始减速，减速度最大为 5.64m/s^2 ，说明驾驶员在动态匀速场景中，当接收到 FCWS 报警后，更倾向于进行初步制动，然后进行避让。

3.2.3 动态减速场景下报警特性分析

在前车以 0.3g 的减速度减速的场景下进行 FCWS 报警特性分析，结果如图 10 所示。

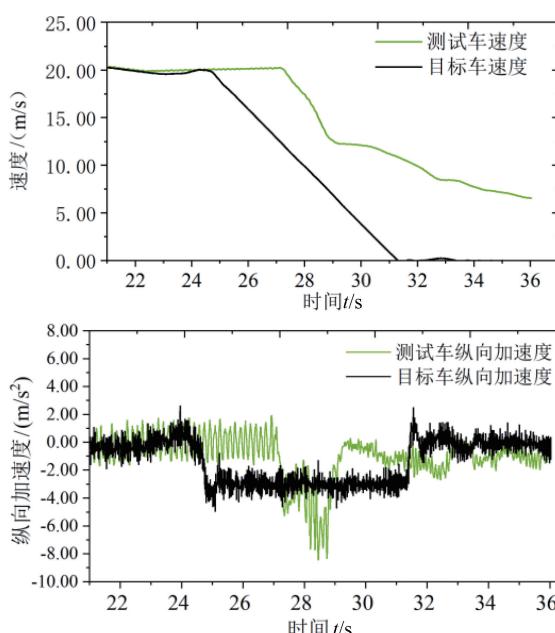


图 10 动态减速场景下车速和纵向加速度变化

由图 10 可知，前车在 $t = 24.71\text{s}$ 时开始以 0.3g 的减速度减速，车辆在 $t = 26.29\text{s}$ 发出报警，报警时的 TTC 为 2.82s ，满足测试方案要求。测试车在 $t = 27.17\text{s}$ 开始减速。

减速度最大为 8.94m/s^2 。说明在动态减速场景中，驾驶员在 FCWS 发出报警后，倾向首先进行 2s 左右的制动，再进行避让。

3.2.4 行人和二轮车场景下报警特性分析

在行人和二轮车场景下进行 FCWS 报警特性分析，结果见表 3。

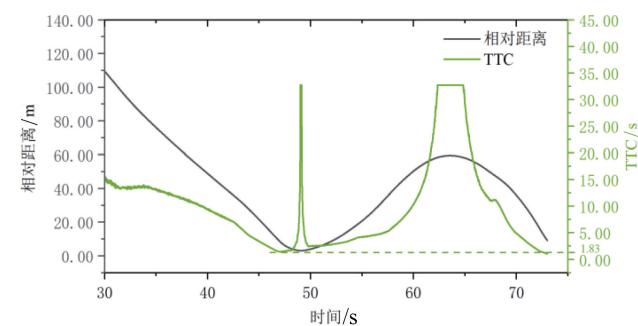
表 3 行人和二轮车场景下 FCWS 报警特性

场景	行人横穿	二轮车横穿
测试车速度/(km/h)	60	60
目标物速度/(km/h)	8	20
报警 TTC/s	2.05	1.95
报警距离/m	34.39	32.77
是否避免碰撞	是	是
避撞措施	制动+转向	制动+转向

由表 3 可知，测试车在 65m 时探测到行人存在，并在 TTC 为 2.05s 时，发出预警，报警时与目标物距离为 34.71m 。当驾驶员接收到预警时，采用减速和转向动作，成功避免了碰撞。在二轮车横穿场景中，测试车在 TTC 为 1.95s 时对二轮车发出预警，并成功实现避撞。值得注意的是，在两种场景中，测试车均通过制动+转向的措施实现避撞，在实际道路环境中，紧急转向可能引发更大的交通事故，而只通过制动在实验中无法实现避撞，因此，FCWS 应与自动紧急制动系统（AEBS）、紧急转向辅助系统（ESAS）和盲区检测系统（BSDS）等功能组合使用，从而实现上述场景的安全避撞。

3.2.5 纵向多目标场景下报警特性分析

在纵向多目标场景下进行 FCWS 报警特性分析，结果如图 11 所示。



由图 11 可知，在纵向多目标情景中，测试车可以准确识别距离自身最近的前车，符合测试方案要求。在加速阶段，当 TTC 为 1.83s 时，测试车发出报警。在减速阶段，在 TTC 为 2.75s 时发出报警。说明测试车可以不受前方商用车的影响，准确识别距离最近的车辆，并在合适的时刻发出报警。

3.2.6 其他测试场景结果

其他场景的测试结果见表 4。

表 4 剩余场景测试结果

测试场景	测试结果
探测最大距离 d_{\max} /m	199.51
探测最小距离 d_{\min} /m	0.35
探测距离为 d_2 时探测最大高度/m	1.45
探测距离为 d_2 时探测最小高度/m	0.11
探测距离为 d_{\max} 时探测最大宽度/m	4.05
探测距离为 d_2 时探测最大宽度/m	3.21
直道场景下侧向目标辨识测试	成功识别
弯道场景下侧向目标辨识测试	成功识别

3.3 不同报警形式对报警效果影响分析

当 FCWS 的环境感知单元和逻辑决策单元满足测试要求，在合适的时刻探测到目标并发出报警，控制执行单元的不同报警方式对驾驶行为的影响如图 12 所示。

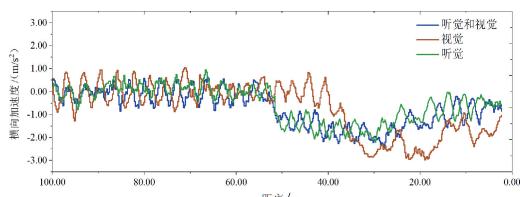


图 12 FCWS 不同报警方式下的驾驶行为分析

- [1] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报 [R]. 北京: 公安部交通管理局, 2017.
- [2] SUETOMI T, KIDO K. Driver Behavior Under a Collision Warning System -A Driving Simulator Study [C]//SAE International Congress & Exposition. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1997.
- [3] 代兵, 刘福聚, 王文霞. G1 京哈高速公路交通事故特征分析及事故防护对策研究 [J]. 道路交通科学与技术, 2016, (1): 34-38.
- [4] 交通运输部公路科学研究院. 营运货车安全技术条件 第1部分: 载货汽车 (JT/T 1178.1—2018) 释义 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [5] 交通运输部公路科学研究院. 营运货车安全技术条件 第2部分: 牵引车辆与挂车 (JT/T 1178.2—2018) 释义 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [6] ADELL E, VARHELYI A, FONTANA M D. The Effects of A Driver Assistance System for Safe Speed and Safe Distance-A Real-Life Field Study [J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2011, 19 (1): 145-155.
- [7] BEN-YAACOV A, MALTZ M, SHINAR D. Effects of An In-Vehicle Collision Avoidance Warning System on Short-

由图 12 可知, 与视觉+声觉组合方案相比, 只接收视觉报警的驾驶员在更晚时间采取避让行为, 并且避让行为的幅度更大。这是因为驾驶员在接近目标物的过程中, 不会时刻注视仪表盘, 驾驶员接收视觉报警存在一定滞后性, 当车速为 20m/s 时, 滞后距离约 15m。只有听觉报警的驾驶行为与视觉+声觉组合方案的驾驶行为表现相近, 表明在驾驶过程中, FCWS 发出的听觉报警可立即被驾驶员接收, 并采取避让动作。

4 结论

本文结合中国交通环境、FCWS 运行原理、国内外标准要求等制定了适用于中国特殊交通环境的 FCWS 测试方案, 并进行了实车道路测试。结论如下。

1) FCWS 系统可以有效识别静态车辆、匀速车辆和紧急制动车辆, 但对行人和二轮车的识别有待提升, 当车辆探测到目标物时, 只能通过与 AEBS、ESAS 和 BSDS 等功能结合作用, 才能实现安全避撞。

2) FCWS 报警方式中, 声觉比视觉具有更好的报警效果, 驾驶员接收视觉报警存在一定滞后性, 当车速为 20m/s 时, 滞后距离约 15m。

在商用车实际运行过程中, 装配的主动安全功能通过整体协作实现车辆安全性的提升。因此, 在下一步测试过程中, FCWS 应与 AEBS、ESAS 和 BSDS 进行组合测试, 综合衡量车辆的避撞性能。除此之外, 由于时间和条件限制, 实车测试的样车型号较少, 下一步计划采用更多车型的试验数据进一步验证本文中的测试方案, 以期能够提高商用车主动避免碰撞的能力, 提高道路运输的安全性。

参 考 文 献

- and Long-Term Driving Performance [J]. Human Factors 2002, 44 (2): 335-342.
- [8] BIRRELL S A, FOWKES M, JENNINGS P A. Effect of Using an In-Vehicle Smart Driving Aid on Real-World Driver Performance [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15 (4): 1801-1810.
- [9] SEILER P, SONG B, HEDRICK J K. Development of a Collision Avoidance System [J]. Automotive Engineering, 1998, 106 (9): 24-28
- [10] RONG C, SHERONY R, GABLER H C. Comparison of Time to Collision and Enhanced Time to Collision at Brake Application during Normal Driving [C]//SAE 2016 World Congress and Exhibition. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2016.
- [11] KONDŌH T, YAMAMURA T, KITAZAKI S, et al. Identification of Visual Cues and Quantification of Drivers' Perception of Proximity Risk to the Lead Vehicle in Car-Following Situations [J]. Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 2008, 1 (2): 170-180.
- [12] 全国智能运输系统标准化技术委员会, 全国汽车标准化技术委员会. 智能运输系统 车辆前向碰撞预警系统 性能要求和测试规程: [S] GB/T 33577—2017. 北京: 中国标准出版社, 2017.

- [13] 郑望晓, 刘建平, 郑阳, 等. 前向碰撞预警系统报警策略分析 [J]. 汽车实用技术, 2019 (2): 139-142.
- [14] 孟鑫. 汽车前向避撞预警系统的研究 [D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2018.
- [15] SCOTT J J, GRAY R. A Comparison of Tactile, Visual, and Auditory Warnings for Rear-End Collision Prevention in Simulated Driving [J]. The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2008, 50 (2): 264-275.
- [16] 交通运输部公路科学研究院. 营运车辆行驶危险预警系统技术要求和实验方法 (JT/T883—2014) 释义 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014.
- [17] International Organization for Standardization. Intelligent Transport Systems-Forward vehicle collision warning systems-Performance requirements and test procedures: ISO 15623: 2012 [S]. 2012
- [18] 林国庆, 逮超, 韩龙飞, 等. 汽车自动紧急制动系统行人测试与评价方法 [J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11 (3): 296-304
- [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.