

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.04.001

引用格式:孔令智,田毕江,熊昌安,等.汽车驾驶模拟器的应用研究综述[J].公路与汽运,2025,41(4):1-9.

Citation:KONG Lingzhi, TIAN Bijiang, XIONG Chang'an, et al. A review of the development and application of automotive driving simulators[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(4): 1-9.

汽车驾驶模拟器的应用研究综述^{*}

孔令智, 田毕江, 熊昌安, 杨文臣

(云南省交通规划设计研究院股份有限公司 公路与桥梁高效养护及安全耐久国家工程研究中心, 云南 昆明 650200)

摘要:为系统梳理驾驶模拟器技术的演进路径与应用趋势,揭示其跨学科研究特征及核心应用领域,采用文献计量学方法,以 Web of Science 核心合集和知网论文集为数据源,采集 2015—2025 年 3 月发表的 1 367 篇相关文献,运用 VOSviewer 可视化工具对 4 540 个关键词进行共现网络分析,构建应用研究关系图谱与热点分布矩阵。研究发现,驾驶模拟器技术主要形成三大应用集群,分别为驾驶人行为研究聚焦认知负荷、分心驾驶及危险感知等维度,汽车技术开发重点探索自动驾驶人机交互界面、车辆动力学建模与交通流仿真,道路安全研究致力于碰撞风险评估与主动安全系统验证;驾驶模拟器在复杂人-车-路系统研究中具有独特优势,其技术发展呈现人机共驾交互范式革新、车路协同技术验证平台构建及多源数据融合分析能力提升的特征,可为智能交通系统研究提供可扩展的数字化试验环境。

关键词:汽车;汽车驾驶模拟器;发展历程;未来应用;VOSviewer 可视化工具

中图分类号:U467.13

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)04-0001-09

汽车驾驶模拟的研发与应用已有 50 多年的历史,20 世纪 70 年代,德国大众汽车公司开发出世界上第一台驾驶模拟器^[1]。由于汽车驾驶模拟器集成了计算机图像技术、机械电子控制技术,能构建人-车-路-环境混合仿真环境,可以在保证驾驶人安全的基础上有效保留驾驶人驾驶行为特点,分析驾驶人的驾驶行为和汽车的运动状态,利用驾驶模拟器分析人-车-路-环境的交互关系逐渐成为道路交通研究的重要方向^[2]。随着近几年智能交通技术的快速发展,驾驶模拟器逐渐应用于车辆智能控制、道路交通设施、智能交通系统、驾驶人行为特征评价等研究^[3],成为智能交通系统、智慧道路工程和自动驾驶车辆等领域的辅助性研究工具。具体而言,利用虚拟场景下驾驶模拟试验获取驾驶人在特定场景或驾驶条件下的生理、心理数据,识别驾驶人的危险驾驶行为,研究驾驶行为和驾驶安全之间的关系,并对驾驶行为进行评价;利用驾驶模拟器对新型车辆技术的有效性、安全性进行评价,为新型车辆技术的发展提供理论基础;驾驶模拟器还可作为道路线形评价、道路设施效果测试和事故黑点的研究工具,研究交

通安全与道路之间的关系,分析道路上潜在危险因素。采用驾驶模拟器进行研究可以解决实车试验难以获得可重复的试验交通场景的缺陷,同时缩短试验周期,降低成本并保证驾驶人的安全。本文采用 VOSviewer 文献计量软件收集近 10 年与驾驶模拟器有关的研究成果,综述驾驶模拟器的演化进程、研究进展及应用领域,为交通运输领域驾驶模拟器应用研究提供参考。

1 驾驶模拟器的发展

驾驶模拟器主要由道路场景系统、车辆操作系统、车辆运动系统、数据收集系统组成^[4]。世界上第一台驾驶模拟器由德国大众汽车公司开发,其结构简单,仅由一个场景显示屏和一个三自由度的驾驶座构成^[5]。20 世纪 80 年代初,瑞士国家道路与交通研究所开发出具有 4 个自由度的驾驶模拟器,其驾驶舱能在运动平台上进行纵向、横向、侧倾和俯仰模拟运动^[1,6];美国联邦公路管理局(Federal Highway Administration,FHWA)开发了一种座椅固定式驾驶模拟器(Highway Driving Simulator,

* 基金项目: 云南交通运输厅科技项目(2022-107); 云南交投科技研发项目(YCIC-YF-2023-03)

HYSIM),主要用于道路交通中人因分析;英国利兹大学也开发出座椅固定式驾驶模拟器^[7]。1985年,德国奔驰汽车公司开发出具有6个自由度的驾驶模拟器,在4个自由度的基础上多了垂直和纵向自由度,1993年升级之后可实现横向运动^[8]。20世纪90年代,为适应汽车技术发展和研究的需求,各大汽车厂商开发出自己的驾驶模拟器,如福特和克莱斯勒汽车公司开发出固定底座的模拟器,并投入汽车技术开发研究中。

进入21世纪,智能技术成为汽车技术的发展热点。爱荷华大学联合FHWA于2003年开发出NADS-1驾驶模拟器,其硬件方面包含车辆驾驶舱和道路视景系统两部分,试验者可从各方向接受道路视景系统提供的视景和声音^[9];通过系统中传感器及数据采集设备可获取车辆行驶中车辆的各种性能数据及驾驶人的各项生理数据^[10-11]。该模拟器具有13个自由度,能进行复杂的人-车-路-环境综合交互试验,可广泛应用于驾驶人行为特征、车辆技术开发、道路安全研究、车辆技术安全性验证、车路协同研究和智能车辆技术开发等^[12]。

2 驾驶模拟器的分类

根据驾驶模拟器的使用目的可将驾驶模拟器分为研究型和训练型两类。研究型驾驶模拟器被各大科研机构和汽车生产企业广泛采用,应用于驾驶人行为特性、道路设计和车辆技术研究等领域;训练型驾驶模拟器通常用于训练驾驶人和驾驶技能^[13]。根据驾驶模拟器的规模和开发成本,研究型驾驶模拟器分为大型、中型、小型三类^[14-16]。

2.1 大型驾驶模拟器

大型驾驶模拟器包含一个具有6~8个自由度的运动平台,并安装大型圆形穹顶用于覆盖整个驾驶模拟舱,可利用平台模拟车辆行驶过程中的速度、加速度、侧倾角度和振动。驾驶舱内安装真实的小汽车车身或卡车车头,通过舱内球形视景系统提供全方位的道路场景。少部分先进的大型模拟器的显示屏可以旋转,能模拟更真实的道路环境。驾驶人在操作大型驾驶模拟器时,可根据显示的场景信息做出相应操作,同时计算机采集驾驶人的操作信息,并计算实时的汽车运动状态和行驶轨迹,输入虚拟场景系统中,作为驾驶人的操作反馈和车辆运动反馈。图1为同济大学开发的具有8个自由度的大型驾驶模拟器。



图1 大型驾驶模拟器

2.2 中型驾驶模拟器

相较于大型驾驶模拟器,中型驾驶模拟器缺少车-视一体的模拟舱。其驾驶舱采用真实车辆,视景系统利用三通道及以上的投影系统将场景投影到驾驶舱前的弧形屏幕上,实现与视觉的交互。中型驾驶模拟器多采用自由度较小(0~3个自由度)的运动平台,运动范围有限,能给予驾驶人的运动反馈较少。但由于中型驾驶模拟器的建设和使用成本较低,场景还原度和沉浸感较强,能获取较真实的驾驶人数据和车辆数据,在不涉及车辆与环境的物理交互的研究中应用较广泛,主要用于驾驶行为分析、道路场景设计、车路技术开发等研究和试验。图2为中型驾驶模拟器。



图2 中型驾驶模拟器

2.3 小型驾驶模拟器

相较于大型和中型驾驶模拟器,小型驾驶模拟器做了极大简化,它采用固定座椅代替驾驶舱,道路视景由单个或多个显示屏提供,视觉方位较有限,使用体验与实车驾驶有较大差距,沉浸感差。采用多个显示器扩大视觉范围时,因无法消除显示器边缘,会对驾驶人的视觉感知造成影响。图3为小型驾驶模拟器。



图3 小型驾驶模拟器

3 相关文献关键词统计分析

以驾驶模拟器和驾驶模拟为检索主题,以 web of science 核心合集和知网论文集为数据源,采集 2015—2025 年 3 月发表的 1 367 篇相关文献,利用 VOSviewer 文献计量软件对 4 540 个关键词进行统计分析。图 4 为驾驶模拟器研究热点密度与

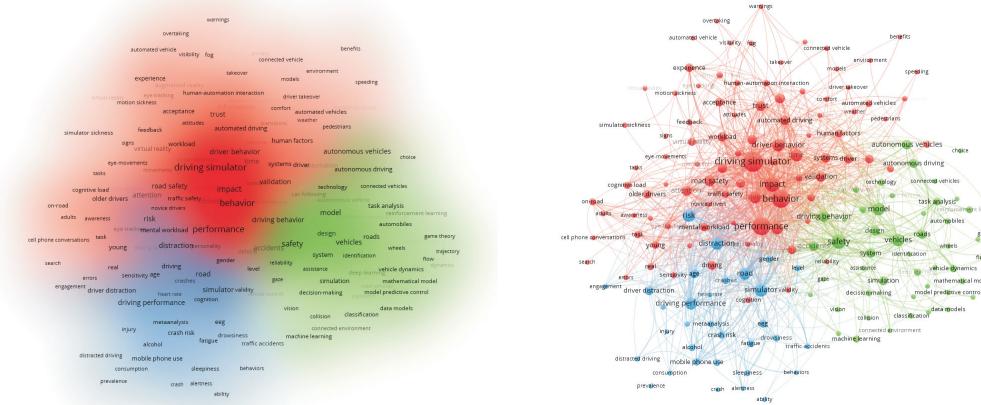


图 4 驾驶模拟器研究热点密度与关系示意图

表 1 2015—2025 年 3 月驾驶模拟器技术应用中出现频率最高的 20 个关键词

序号	关键词	中文	词频	序号	关键词	中文	词频
1	Driving simulator	驾驶模拟器	533	11	Distraction	分心	88
2	Driving behavior	驾驶行为	325	12	Time	时间	87
3	Performance	性能	222	13	Road	道路	85
4	Impact	影响	146	14	Driving performance	驾驶表现	83
5	Attention	注意力	146	15	Speed	速度	80
6	Safety	安全	141	16	Road safety	道路安全	66
7	Drivers	驾驶人	135	17	Trust	信任	59
8	Risk	风险	98	18	Information	信息	54
9	Vehicles	车辆	93	19	Validation	有效性	53
10	Model	模型	91	20	Fatigue	疲劳	52

驾驶行为研究方面包含的高频关键词有 Attention(注意力)、Drivers(驾驶人)和 Distraction(分心)等。驾驶行为研究主要利用驾驶模拟器研究各类驾驶人在不同驾驶条件和驾驶环境下的生理、心理变化。随着智能交通技术和自动驾驶汽车的发展,驾驶行为研究内容越发复杂,需要综合智能车辆技术和智慧道路的发展情况。

汽车技术开发研究方面出现频率较高的关键词有 Vehicles(车辆)、Trust(信任)和 Validation(有效性)等。驾驶模拟器是汽车技术开发的重要工具,应

关系图,其中节点代表关键词,以关键词对应节点的大小表现关键词出现频率高低,相同颜色的节点表示节点间具有强的关联性。表 1 为驾驶模拟器技术应用中出现频率排名前 20 的关键词。从图 4 和表 1 来看,驾驶模拟器的研究热点集中在驾驶行为研究、汽车技术研究和道路交通安全研究三方面。

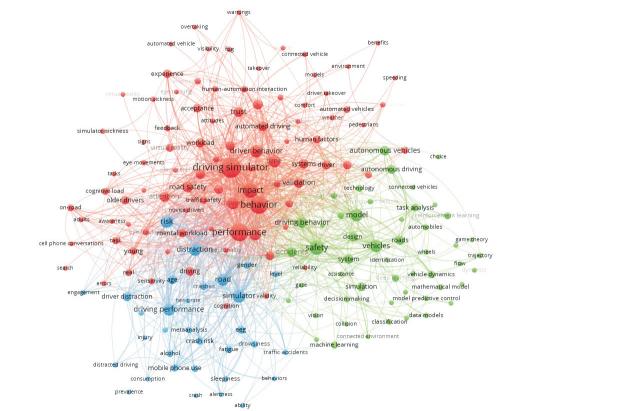


图 4 驾驶模拟器研究热点密度与关系示意图

表 1 2015—2025 年 3 月驾驶模拟器技术应用中出现频率最高的 20 个关键词

用于对汽车技术的有效性验证和驾驶人对汽车技术的接受度。

道路安全研究方面出现频率较高的关键词有 Road(道路)、Speed(速度)和 Road safety(道路安全)等。主要利用驾驶模拟器研究道路环境对驾驶安全的影响,研究人-车-路的交互关系。

4 驾驶模拟器技术应用分析

4.1 驾驶行为研究

驾驶人是引发交通事故的主要原因,解析风险

场景下驾驶人行为特性已成为当下的研究热点。相比于实车试验的危险性、场景的不确定性及不可重复性,采用驾驶模拟器进行试验可保证驾驶人的安全和可控的数据采集^[17-19]。大多数的驾驶行为研究基于特定的研究目标,通过选取对应评价指标搭建试验所需虚拟场景,利用传感器获得车辆数据和

驾驶人生理、心理数据,结合驾驶人的主观评价对驾驶人行为特性进行综合解析(图 5)^[20]。常采用统计学方法研究不同行为参数之间的关系,探究不同场景下驾驶行为变化规律。分析指标主要包括均值、方差、相关性和显著性^[21]。表 2、表 3 为各类方法的适用情况。

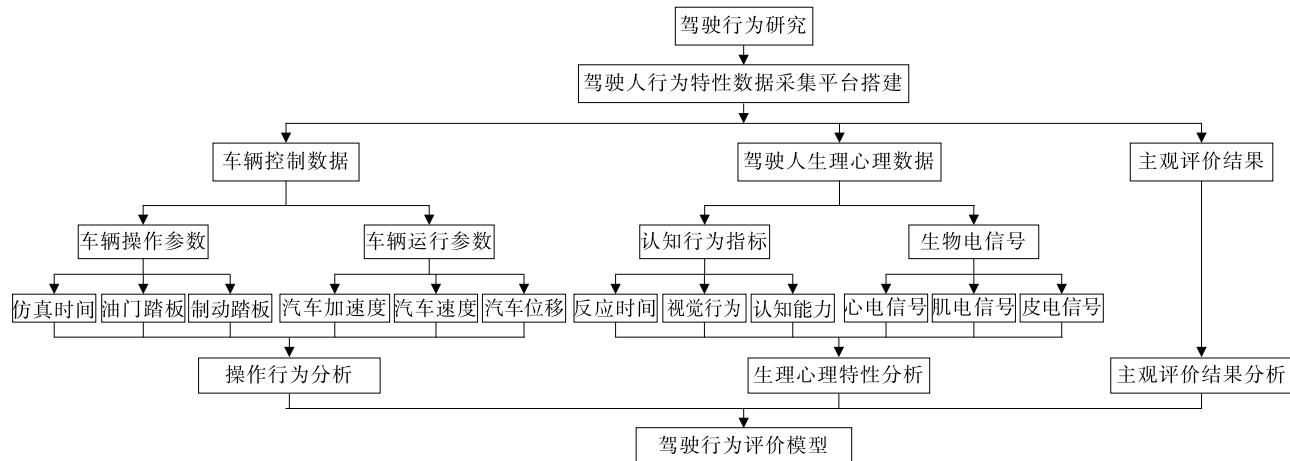


图 5 驾驶模拟器在驾驶行为研究中的应用分析

表 2 均值和相关系数差异性检验方法选择

差异显著性	样本均值	相关系数
Z 检验	样本量大(大于 30)	相关系数来自不同组样本
T 检验	样本量小(小于 30)	相关系数来自同一组样本

表 3 样本方差差异显著性检验方法选择

方差差异显著性	单个因变量	多个因变量
单次测量	F 检验	多元方差分析
多次重复测量	重复测量方差分析	多元重复测量方差分析

现有基于驾驶模拟试验的驾驶行为研究分为两类:一是外部条件对驾驶人驾驶行为的影响;二是驾驶人自身特性对驾驶行为的影响。第一类研究主要利用驾驶模拟器开展特定条件下驾驶行为分析,如不良天气条件、特定地区(如高原、山区等)或道路场景(如高速公路、城市道路等)、智能交通条件(如低等级自动驾驶车辆、车路协同等)、文化背景等^[22-27]。文献[28-29]利用驾驶模拟器构建多种不良天气情景,研究驾驶人应对不同天气条件的行为变化,结果表明,驾驶人将更多的注意力和精力用来处理道路情况而非天气情况,且在不良天气条件下驾驶人有无驾驶经验会对车速产生影响。文献[30]

对不良天气下驾驶人驾驶行为展开研究,分析了 CV-VSL(Connected Vehicle-Variable Speed Limit)警告对驾驶行为的影响。文献[31]通过模拟驾驶试验研究不同道路标记对驾驶人速度选择的影响,试验中被测试者在 2 种不同道路标记场景中进行模拟试验,结果显示 2 种道路标记都会使车速降低。文献[32]对不同文化背景的驾驶人进行试验研究,招募中国和德国共 41 位驾驶人,利用驾驶模拟器在 3 种不同冲突场景下进行试验,发现中国驾驶人的反应时间比德国驾驶人长,但中国驾驶人的行车速度比德国驾驶人快。可见,在各国对驾驶行为的研究中,驾驶模拟器都是重要研究工具。

第二类研究中驾驶人自身特性是研究重点,大多以驾驶人的不良驾驶行为为研究对象^[24,33-34],如疲劳驾驶、饮酒驾驶、使用手机等,或对驾驶人进行分类并研究不同类别驾驶人的驾驶行为,如老年人、新手驾驶人、不同性别的驾驶人等^[35-38]。文献[36]对造成驾驶人危险驾驶行为的因素进行分析,发现疲劳驾驶时驾驶人更易出现违规行为,分心也会对驾驶人行为造成影响,但驾驶人受影响的程度受驾驶人群体影响,不同性别和受教育水平等对驾驶人行为的影响存在差异。使用手机通常被认为是造成分心驾驶的主要来源,文献[39]针对 41 名被测试者,分析了不同性别驾驶人在交叉口使用手机对驾

驶行为的影响。

驾驶模拟器以其优秀的安全性和试验场景的可控性被广泛应用于驾驶行为研究,采用驾驶模拟器搭建逼真的虚拟场景,招募被测试者进行驾驶模拟试验,已成为驾驶行为研究的主流方法。

4.2 汽车技术开发研究

汽车智能技术已成为汽车技术进步的主要方向,智能技术的发展提高了道路交通的安全性。汽车智能技术主要包括车辆安全技术、驾驶人操作辅助系统和无人驾驶技术。由于通过试验测试新的汽车智能技术的成本和风险较高,无法仅通过实车试验进行测试,驾驶模拟器在智能车辆技术研发中得到更多应用^[17,40]。随着汽车辅助驾驶系统的开发和应用,汽车安全技术与汽车辅助系统之间的关系越来越紧密,目前驾驶模拟器主要应用于汽车主动安全技术和驾驶辅助系统的研究与开发(见图 6)。

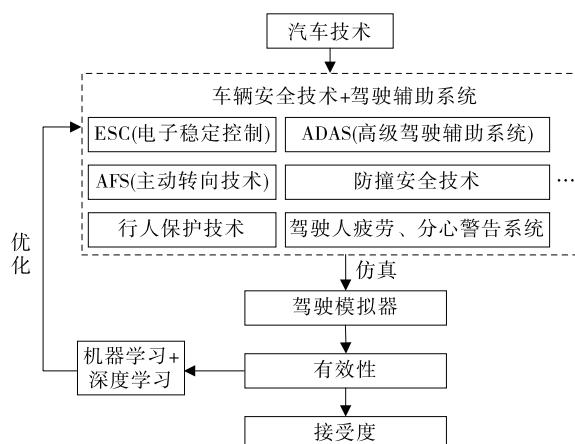


图 6 驾驶模拟器在车辆技术开发研究中的应用

现有车辆主动安全技术主要有汽车电子稳定系统(ESC)与主动转向技术(AFS)、驾驶人疲劳和分心识别警告系统及行人避撞技术等^[41],倾向于采用驾驶模拟器对汽车主动安全技术进行研究。文献[42]利用驾驶模拟器搭建卡车碰撞场景验证卡车 ESC 系统的有效性,发现 ESC 系统可有效减少打滑和控制损失。文献[43]利用驾驶模拟器对 ESC 算法进行仿真,并对车辆稳定性进行评估和改进。文献[44]采用人机共驾控制器(HMCDC)验证直接横摆力矩控制(DYC)和 AFS 技术,发现该系统可有效提高车辆的动态稳定性。

不少研究人员利用机器学习算法和深度学习算法研发新的驾驶辅助系统,并利用驾驶模拟器检验其有效性。文献[45]提出一种识别车辆与路边障碍

的距离和驾驶人疲劳状态的听觉警告系统(AWS),并利用驾驶模拟器验证了该驾驶辅助系统面对路边标志和障碍时的有效性。文献[46]提出一种自动紧急制动-行人纵向避撞系统(AEB-P),并设计 4 种场景进行模拟试验,证明了该驾驶辅助系统对减少车辆与行人碰撞的有效性。文献[47]提出一种基于深度强化学习的主动避碰人机协同驾驶方案(L-HMC),并在驾驶模拟器上利用实车动力学模型验证了该驾驶辅助系统的有效性。

驾驶模拟器除在开发新的汽车技术并验证其有效性方面被广泛应用外,在研究新的汽车应用技术是否被驾驶人接受方面也受到大量关注。文献[48]分析不同驾驶人对手动驾驶和自动驾驶的接受度,发现相较于老年驾驶人,年轻驾驶人对自动驾驶表现出更高的享受性和接受度。文献[49]利用驾驶模拟器让年轻驾驶人和老年驾驶人体验高级驾驶辅助系统,发现对高级驾驶辅助系统的体验可增加驾驶人对自动驾驶的信任和接受度,且老年驾驶人的满意度比年轻驾驶人高。

综上所述,在最新的研究中,驾驶模拟器更多地应用于汽车主动安全技术和驾驶辅助系统的综合开发研究。

4.3 道路安全研究

由道路引起的交通事故是交通安全领域的研究热点之一,但直接研究道路环境和条件与交通事故的关系存在不可控风险。为保证研究的安全性和可控性,减少试验风险和成本,将驾驶模拟器作为主要研究工具。在道路交通安全研究中,驾驶模拟器被广泛用于事故成因及道路线形、道路景观和道路标志标线对驾驶安全的影响分析等方面(见图 7)^[50-56]。

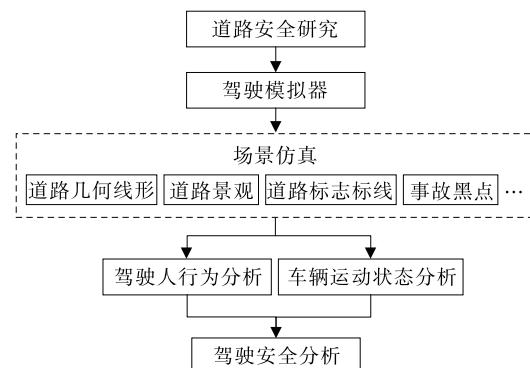


图 7 驾驶模拟器在道路安全研究中的应用

文献[29]考虑道路几何线形和视距,结合驾驶人特征、时间和天气条件对车速的影响,通过问卷调

查,结合模拟驾驶试验,研究不同天气、道路条件和驾驶人群体组合下驾驶人对车速的选择,结果表明,不良天气对驾驶人车速选择的影响最大,平均车速下降 40%,弯道也会迫使驾驶人减速,但减速多少与年龄之间的相关性不显著。文献[31]利用驾驶模拟器研究城市道路和乡村道路上路面标记对驾驶人感知的影响,发现路面标记可有效降低车速,在有路面标记的道路上行驶,驾驶人的危险驾驶行为减少。文献[54]研究道路几何线形对交通事故严重度的影响,考虑到使用驾驶模拟器的过程中试验设计、数据获取及参与者特征均会对研究结果产生负面影响,提出一种利用驾驶模拟器研究道路几何条件对驾驶人行为影响的研究方法,利用驾驶模拟器分析了道路几何条件对驾驶人行为的影响。为分析道路事故黑点的成因,文献[56]选取克罗地亚乡村道路上危险弯道,在驾驶模拟器上进行场景重现,发现对于半径小于 200 m 的道路水平曲线,采用道路标线结合道路警告标志能显著降低车速,使车辆横向移动更平稳。总之,驾驶模拟器已成为道路交通安全研究中常用试验工具。

5 讨论

由于驾驶模拟试验的可控性,驾驶模拟器在危险交通场景、事故多发道路和不良驾驶行为及智能车路技术研究等方面作用巨大^[57],已成为驾驶行为研究、车辆技术研究及道路安全研究的重要工具^[58]。随着智能交通技术和自动驾驶技术的发展,上述三方面的研究呈现综合发展态势。主要体现在:

(1) 目前已开发了多种不同用途的驾驶辅助系统,但投入使用的无人驾驶技术大多处于 2 级和 3 级,无法做到完全的自动驾驶,在研究智能车技术的安全性和有效性的同时,还须考虑驾驶人与智能车之间的交互关系和驾驶人对智能车的感受度及驾驶人使用汽车辅助技术的感受和效果^[49,59-64]。未来可利用驾驶模拟器人-车在环试验的优势,进行综合考虑智能车辆技术和驾驶人行为的研究,促进智能车技术的发展和推广。

(2) 未来的道路交通环境更加复杂,会长期存在自动驾驶汽车和人工驾驶汽车混行的情况,对智能车的技术发展提出了更高的要求。智能车的普及依赖大量车-车和车-路环境的模拟试验,驾驶模拟器可应用于智能交通系统研究,提供可控的道路和车流环境,基于驾驶模拟器的研究框架和基于驾驶

模拟器的车联网技术测试平台的开发具有动态性和可重复性,可为相关领域的研究人员提供参考^[65]。未来可采用分布式驾驶模拟器实现多个驾驶人同时进行模拟试验,更加真实地还原道路交通中车-车交互和车-路交互^[66-70],研究无人驾驶车辆和人工驾驶车辆混行状况,推动智能交通的发展。

6 结语

汽车驾驶模拟器的研究和应用将是未来智慧交通技术和自动驾驶技术发展的重要助力,自动驾驶、车路协同和智能交通等新兴技术呈现融合发展趋势。如何利用驾驶模拟器开发复杂人-机混行环境下智能交通系统、人机交互和智能车辆将成为未来研究主流,驾驶模拟器也将成为各类智能算法开发和验证的重要仿真及评估平台。

参考文献:

- [1] RICHTER B. Driving simulator studies: the influence of vehicle parameters on safety in critical situations[C]//SAE Technical Paper Series. SAE International, 1974:741105.
- [2] WALDRAFF W, FINSTERWALDER R. MASTER-Project overview for the development of a modular vehicle simulator[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. Montreal, Canada. Reston, Virginia: AIAA, 2001:4056.
- [3] BROUGHTON K L M, SWITZER F, SCOTT D. Car following decisions under three visibility conditions and two speeds tested with a driving simulator[J]. Accident Analysis & Prevention, 2007, 39(1):106-116.
- [4] LEE W S, KIM J H, CHO J H. A driving simulator as a virtual reality tool[C]//Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146). Leuven, Belgium: IEEE, 1998:676264.
- [5] NORDMARK S. Driving simulators, trends and experiences[C]//RTS'94 Driving Simulation Conference, Palais des Congres Porte Maillot, Paris, France, 1994.
- [6] NORDMARK S. VTI driving simulator: mathematical model of a four-wheeled vehicle for simulation in real time[M]. Statens Väg-och Trafikinstitut. VTI Rapport 267A, 1984.
- [7] FINDLEY L J, FABRIZIO M J, KNIGHT H, et al. Driving simulator performance in patients with sleep apnea[J]. American Review of Respiratory Disease,

- 1989,140(2):529-530.
- [8] STEWART D A platform with six degrees of freedom[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1965, 180(1):371-386.
- [9] SWITKES J P, ROSSETTER E J, COE I A, et al. Handwheel force feedback for lanekeeping assistance: combined dynamics and stability[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2006, 128 (3): 532-542.
- [10] 吴晓瑞,吴志周.汽车驾驶模拟器在交通安全中的应用综述[J].交通信息与安全,2015,33(2):10-19.
- [11] CHEN L D, PAPELIS Y, WATSON G D, et al. Nads at the university of Iowa:a tool for driving safety research[C]//Proceedings of the 1st Human-Centered Transportation Simulation Conference, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, 2001.
- [12] 田顺,谷亚蒙,魏朗,等.驾驶模拟器的发展历程及最新应用实例[J].汽车技术,2018(4):35-42.
- [13] 张微微.驾驶模拟器方向盘实时力感模拟的研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [14] UNDERWOOD G, CRUNDALL D, CHAPMAN P. Driving simulator validation with hazard perception[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2011, 14(6):435-446.
- [15] MAYHEW D R, SIMPSON H M, WOOD K M, et al. On-road and simulated driving: concurrent and discriminant validation[J]. Journal of Safety Research, 2011, 42(4):267-275.
- [16] RISTO M, MARTENS M H. Driver headway choice: a comparison between driving simulator and real-road driving[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2014, 25:1-9.
- [17] WYNNE R A, BEANLAND V, SALMON P M. Systematic review of driving simulator validation studies[J]. Safety Science, 2019, 117:138-151.
- [18] ZHANG Y N, GUO Z Y, SUN Z. Driving simulator validity of driving behavior in work zones[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020:4629132.
- [19] ALI Y, SHARMA A, HAQUE M M, et al. The impact of the connected environment on driving behavior and safety: a driving simulator study[J]. Accident Analysis & Prevention, 2020, 144:105643.
- [20] 葛慧敏,郑明强,吕能超,等.驾驶分心综述[J].交通运输工程学报,2021,21(2):38-55.
- [21] 向往,闫学东,王江锋.驾驶模拟器在驾驶行为和心理影响因素研究方面的应用[J].山东科学,2013, 26(6):69-76+100.
- [22] MA C X, HAO W, XIANG W, et al. The impact of aggressive driving behavior on driver-injury severity at highway-rail grade crossings accidents[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 2018:1-10.
- [23] 周帅,张萌,娄胜利,等.团雾环境下驾驶员视觉特征与交通参数关系研究[J].公路与汽运,2023(6):33-37+51.
- [24] FORSTER Y, HERGETH S, NAUJOKS F, et al. Learning to use automation: behavioral changes in interaction with automated driving systems[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2019, 62:599-614.
- [25] YADAV A K, VELAGA N R. Investigating the effects of driving environment and driver characteristics on drivers' compliance with speed limits [J]. Traffic Injury Prevention, 2021, 22(3):201-206.
- [26] JEIHANI M, BANERJEE S. Drivers' behavior analysis under reduced visibility conditions using a driving simulator[J]. Journal of Traffic and Logistics Engineering, 2018, 6(2):48-52.
- [27] FRIDMAN L, BROWN D E, GLAZER M, et al. MIT advanced vehicle technology study: large-scale naturalistic driving study of driver behavior and interaction with automation[J]. IEEE Access, 2019, 7:102021-102038.
- [28] TU H, LI Z, LI H, et al. Driving simulator fidelity and emergency driving behavior [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2015, 2518(1):113-121.
- [29] ZOLALI M, MIRBAHA B, LAYEGH M, et al. A behavioral model of drivers' mean speed influenced by weather conditions, road geometry, and driver characteristics using a driving simulator study[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1):5542905.
- [30] YANG G C, AHMED M M, GAWEESH S M. Impact of variable speed limit in a connected vehicle environment on truck driver behavior under adverse weather conditions: driving simulator study[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(7):132-142.
- [31] HUSSAIN Q, PIRDAVANI A, ARIEN C, et al. The impact of perceptual countermeasures on driving behaviour in rural-urban transition road segments: a driving simulator study[J]. Advances in Transportation Studies, 2018, 46:83-96.
- [32] WANG W H, CHENG Q, LI C G, et al. A cross-cultural analysis of driving behavior under critical situa-

- tions: a driving simulator study [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 62: 483-493.
- [33] MCDONALD A D, ALAMBEIGI H, ENGSTRÖM J, et al. Toward computational simulations of behavior during automated driving takeovers: a review of the empirical and modeling literatures [J]. *Human Factors*, 2019, 61(4): 642-688.
- [34] TAHERI S M, MATSUSHITA K, SASAKI M. Development of a driving simulator with analyzing driver's characteristics based on a virtual reality head mounted display [J]. *Journal of Transportation Technologies*, 2017, 7(3): 351-366.
- [35] MICHAELS J, CHAUMILLON R, NGUYEN-TRI D, et al. Driving simulator scenarios and measures to faithfully evaluate risky driving behavior: a comparative study of different driver age groups [J]. *PLoS One*, 2017, 12(10): e0185909.
- [36] FOUNTAS G, PANTANGI S S, HULME K F, et al. The effects of driver fatigue, gender, and distracted driving on perceived and observed aggressive driving behavior: a correlated grouped random parameters bivariate probit approach [J]. *Analytic Methods in Accident Research*, 2019, 22: 100091.
- [37] OUIMET M C, PRADHAN A K, SIMONS-MORTON B G, et al. The effect of male teenage passengers on male teenage drivers: findings from a driving simulator study [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, 58: 132-139.
- [38] CAMENGA D R, BANZ B C, CROWLEY M, et al. Simulated and self-reported driving among young adults with and without prenatal cocaine exposure [J]. *Traffic Injury Prevention*, 2021, 22 (Sup1): S172-S177.
- [39] LI X M, OVIEDO-TRESPALACIOS O, RAKOTO-NIRAINY A. Drivers' gap acceptance behaviours at intersections: a driving simulator study to understand the impact of mobile phone visual-manual interactions [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 138: 105486.
- [40] ADNAN N, MD NORDIN S, BIN BAHRUDDIN M A, et al. How trust can drive forward the user acceptance to the technology? in-vehicle technology for autonomous vehicle [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 118: 819-836.
- [41] 魏朗, 田顺, SCHWARZ C, 等. 驾驶模拟技术在汽车智能技术研发中的应用综述 [J]. 公路交通科技, 2017, 34(12): 140-150+158.
- [42] MARKKULA G, BENDERIUS O, WOLFF K, et al. Effects of experience and electronic stability control on low friction collision avoidance in a truck driving simulator [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, 50: 1266-1277.
- [43] MONTANI M, FAVILLI T, BERZI L, et al. ESC on in-wheel motors driven electric vehicle: handling and stability performances assessment [C]//2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). Madrid, Spain. IEEE, 2020: 1-6.
- [44] WU J, CHENG S, LIU B, et al. A human-machine-cooperative-driving controller based on AFS and DYC for vehicle dynamic stability [J]. *Energies*, 2017, 10(11): 1737.
- [45] KANG M W, MOMTAZ S U. Assessment of driver compliance on roadside safety signs with auditory warning sounds generated from pavement surface: a driving simulator study [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2018, 5(1): 1-13.
- [46] YANG W, ZHANG X, LEI Q, et al. Research on longitudinal active collision avoidance of autonomous emergency braking pedestrian system (AEB-P) [J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(21): E4671.
- [47] LI J X, YAO L, XU X, et al. Deep reinforcement learning for pedestrian collision avoidance and human-machine cooperative driving [J]. *Information Sciences*, 2020, 532: 110-124.
- [48] HARTWICH F, BEGGIATO M, KREMS J F. Driving comfort, enjoyment and acceptance of automated driving—effects of drivers' age and driving style familiarity [J]. *Ergonomics*, 2018, 61(8): 1017-1032.
- [49] HARTWICH F, WITZLACK C, BEGGIATO M, et al. The first impression counts: a combined driving simulator and test track study on the development of trust and acceptance of highly automated driving [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 65: 522-535.
- [50] BOBERMIN M P, SILVA M M, FERREIRA S. Driving simulators to evaluate road geometric design effects on driver behaviour: a systematic review [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 150: 105923.
- [51] FERREIRA D H, BOLAND J W, PHILLIPS J L, et al. The impact of therapeutic opioid agonists on

- driving-related psychomotor skills assessed by a driving simulator or an on-road driving task: a systematic review[J]. *Palliat Med*, 2018, 32(4): 786-803.
- [52] KANG H B. Various approaches for driver and driving behavior monitoring: a review[C]//2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. Sydney, Australia: IEEE, 2013.
- [53] VAN DER HORST R, DE RIDDER S. Influence of roadside infrastructure on driving behavior[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2007, 2018(1): 36-44.
- [54] BOBERMIN M P, SILVA M M, FERREIRA S, et al. Driving simulator for evaluating the effects of road geometric design on driver behavior[J]. *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, 2019, 3(2): 46-51.
- [55] CALVI A. Investigating the effectiveness of perceptual treatments on a crest vertical curve: a driving simulator study[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2018, 58: 1074-1086.
- [56] BABIĆ D, BRIJS T. Low-cost road marking measures for increasing safety in horizontal curves: a driving simulator study[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 153: 106013.
- [57] COUTURE M, VINCENT C, GÉLINAS I, et al. Advantages of training with an adaptive driving device on a driving simulator compared to training only on the road[J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2021, 16(3): 309-316.
- [58] DE WINTER J C F, VAN LEEUWEN P M, HAPPEE R. Advantages and disadvantages of driving simulators: a discussion[J]. *Proceedings of the Measuring Behavior Conference*, 2012: 47-50.
- [59] KUN A L. Human-machine interaction for vehicles: review and outlook[J]. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, 2017, 11(4): 201-293.
- [60] DUNN N, DINGUS T, SOCCOLICH S. Understanding the impact of technology: do advanced driver assistance and semi-automated vehicle systems lead to improper driving behavior[R]. AAA Foundation for Traffic Safety, 2019.
- [61] MOLNAR L J, RYAN L H, PRADHAN A K, et al. Understanding trust and acceptance of automated vehicles: an exploratory simulator study of transfer of control between automated and manual driving[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2018, 58: 319-328.
- [62] WÖRLE J, METZ B, OTHERSEN I, et al. Sleep in highly automated driving: takeover performance after waking up[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 144: 105617.
- [63] DU N, ZHOU F, PULVER E M, et al. Examining the effects of emotional valence and arousal on takeover performance in conditionally automated driving[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 112: 78-87.
- [64] MORRA L, LAMBERTI F, PRATTICO F G, et al. Building trust in autonomous vehicles: role of virtual reality driving simulators in HMI design[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(10): 9438-9450.
- [65] ZHAO X H, CHEN H L, LI H J, et al. Development and application of connected vehicle technology test platform based on driving simulator: case study[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 161: 106330.
- [66] SHORINWA O, YU J, HALSTED T, et al. Distributed multi-target tracking for autonomous vehicle fleets[C]// 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Paris, France: IEEE, 2020: 3495-3501.
- [67] LUO Y G, XIANG Y, CAO K, et al. A dynamic automated lane change maneuver based on vehicle-to-vehicle communication[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 62: 87-102.
- [68] WANG Y F, YIN K Y. Study of overtaking method of intelligent vehicle under vehicle road coordination[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1983(1): 012095.
- [69] YANG G C, AHMED M, GAWEESH S, et al. Connected vehicle real-time traveler information messages for freeway speed harmonization under adverse weather conditions: trajectory level analysis using driving simulator[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 146: 105707.
- [70] YOU X, LU J H, XUE J Y. Safety early warning and control system of expressway confluence zone based on vehicle-road cooperation[C]// 2022 14th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). Changsha, China: IEEE, 2022: 236-241.