

基于驾驶模拟技术的道路行车安全性研究综述*

张 驰^{1▲} 魏东东² 兰富安³ 白 皓⁴ 黄 军³

(1. 长安大学公路学院 西安 710064;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031;

3. 四川乐西高速公路有限责任公司 成都 610000;

4. 四川高速公路建设开发集团有限公司 成都 610000)

摘 要: 对驾驶模拟技术在道路行车安全领域的研究及应用现状和存在的问题进行了分析。在广泛调研国内外相关文献的基础上,对驾驶模拟器进行了分类,并总结了国内外主要代表性科研型驾驶模拟器的发展历程,分析了典型驾驶模拟器的自由度、主要特征和应用领域。以“人-车-路-环境-事故”为主线,从不良驾驶行为特性分析、车辆主动安全技术研究、道路与交通设计、车辆驾驶环境以及道路行车事故研究5个方面,系统地梳理了驾驶模拟技术在国内外道路行车安全领域的应用研究现状、存在问题以及应用展望。在不良驾驶行为特性分析方面,重点研究了运用驾驶行为特性开展分心驾驶行为和疲劳驾驶行为的识别;在车辆主动安全技术研究方面,综述了运用驾驶行为开展车辆底盘一体化控制技术、安全辅助驾驶控制技术和自动驾驶接管行为的评价研究;在道路与交通设计方面,综述了道路几何和标志标线等的设计评价;在车辆驾驶环境方面,综述了不良气象、路侧景观和交通冲突等驾驶环境对驾驶行为的影响;在道路行车事故研究方面,总结了道路行车事故再现和事故影响因素分析等内容。此外,对驾驶模拟技术进行了应用展望,主要包括特殊人群的驾驶行为特性、智能网联汽车系统的测试及验证、混合交通流环境下的行车安全问题。对未来应对驾驶模拟器的有效性评价、不适性以及二次开发等问题进行探讨,以便更好地促进驾驶模拟技术的发展。

关键词: 交通安全;驾驶模拟;综述;行车安全;驾驶行为

中图分类号: U491

文献标识码: A

doi:10.3963/j.jssn.1674-4861.2022.04.001

A Review on Road Driving Safety Based on Driving Simulation Technologies

ZHANG Chi^{1▲} WEI Dongdong² LAN Fu'an³ BAI Hao⁴ HUANG Jun³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

3. Sichuan Lexi Expressway Co., Ltd, Chengdu 610000, China;

4. Sichuan Expressway Construction and Development Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: The current status and problems of the studies and applications of driving simulation technologies in the field of road traffic safety are analyzed. On the basis of extensive relevant literatures in China and abroad, the driving simulators are classified. The development history of the typical driving simulators for scientific research is summarized, and the degrees of freedom, main features, and application areas of them are analyzed. With a main line of “human-vehicle-road-environment-accident”, the current situations of the application studies, problems, and prospects are systematically analyzed from five aspects including risky driving behaviors, active safety technologies, road and traffic design, driving environment, and road traffic accidents. For the studies of risky driving behaviors, the identification of distracted and fatigue driving behaviors are analyzed with the application of driving characteristics. For the studies of active safety technologies, the vehicle chassis integrated control technology, safety-assisted

收稿日期:2021-11-26

* 国家重点研发计划项目(2020YFC1512005)、四川省交通运输科技项目(2019-ZL-12、2022-ZL-04)资助

▲ 第一作者(通信作者)简介:张 驰(1981—),博士,教授.研究方向:道路交通安全、道路数字化研究.

E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

driving control technology, and evaluation of take-over behaviors of automated driving are summarized. For the studies of road traffic design, the evaluation of geometric road design and traffic signs are analyzed. For the studies of driving environment, the effects of adverse weather, roadside views, and traffic conflicts are summarized. For the studies of road traffic accidents, the reproduction of accidents and influencing factors of traffic safety are analyzed. In addition, an application prospect of driving simulation technology is presented, mainly including driving behaviors of special groups, system testing of intelligent networked vehicles, and driving safety under the environment of mixed traffic flow. In order to better promote the development of driving simulation technology, the efficiency evaluation, discomfort, and secondary development of driving simulators will be studied in the future.

Keywords: traffic safety; driving simulation; overview; driving safety; driving behaviors

0 引言

驾驶模拟技术,又称为驾驶仿真技术,是指采用高科技手段,比如三维即时成像、动力学仿真、大视场显示等关键技术,构造出1种逼真的人工虚拟驾驶环境,体验者能够在该虚拟环境中感受到接近真实效果的驾驶体验。驾驶模拟技术作为1种重要的研究手段,自20世纪70年代兴起以来,逐渐在交通、汽车等诸多领域获得广泛应用;近年来,道路安全科研工作者逐渐使用驾驶模拟技术来研究道路的行车安全性问题,并且大量研究成果已经证实:驾驶模拟技术是1种研究道路行车安全性问题的有效工具^[1]。

驾驶模拟技术之所以能够替代实车实验,而被广泛应用于道路行车安全性问题的研究中,主要是因为实车实验存在以下几个问题:①在现实环境中进行实车实验,车辆和驾驶员的安全均无法得到有效保证,②实车实验的周期长且成本高;③在实车实验中,一些相同条件下的交通场景和交通流数据无法重复获取等。驾驶模拟技术凭借其因素可控性强、安全性高、特殊场景的可重复性高、场地固定、场景可设置,以及经济性好等优势,可以很好地解决实车实验中存在的这些问题,进而有助于开展更为有效地针对性研究^[2]。

1 驾驶模拟器的发展历程

驾驶模拟器(driving simulator, DS)是1种由硬件系统和软件系统构成的驾驶仿真平台,见图1。其中,硬件系统主要包括驾驶操作系统(转向盘、油门、离合、制动踏板等)、驾驶舱运动系统(较高自由度运动平台)、软件系统载体(主机)等设备;软件系统主要包括声光视景系统、虚拟现实系统及数据采集系统等^[3]。驾驶模拟器就是通过将车辆驾驶系统与虚拟现实技术结合起来,利用计算机仿真技术创造出1种带有声响视景效果和运动仿真的虚拟驾驶环

境,试验者在虚拟驾驶环境中通过操作驾驶模拟器的硬件系统来进行人机交互,进而产生1种实车驾驶的沉浸感,借此来感受和认识现实环境中的实车驾驶体验。



图1 驾驶模拟器

Fig. 1 Driving simulator

驾驶模拟器的类型较多,按照不同模拟对象,可分为飞行器驾驶模拟器、汽车驾驶模拟器和列车驾驶模拟器;按照不同自由度,可分为零自由度驾驶模拟器、低自由度驾驶模拟器和高自由度驾驶模拟器;按照不同用途,可分为训练型驾驶模拟器和科研型驾驶模拟器^[4]。其中,训练型驾驶模拟器主要用于汽车驾驶培训、交通安全教育等方面,而科研型驾驶模拟器作为道路交通科研机构 and 各大车企的重要研发手段,主要运用于“人-车-路-环境”交通特性研究、驾驶行为特性分析、车辆安全新技术研发等方面。本文关于驾驶模拟技术在道路行车安全领域的应用研究中,所用到的驾驶模拟器均为科研型驾驶模拟器。

随着计算机仿真技术的快速发展,高仿真度科研型驾驶模拟器作为研究道路行车安全性问题的重要手段,越来越受到国内外学者的广泛关注及应用,以德国、瑞典、日本、美国等为代表的发达国家较早开展了科研型驾驶模拟器的研发与应用^[5]。表1列举了国外主要代表性科研型驾驶模拟器的研发及应用信息。

表 1 国外主要代表性科研型驾驶模拟器
Tab. 1 Major representative driving simulators abroad

研发机构	研发时间	自由度	主要特征	应用领域
德国大众	20世纪 70年代初	3	世界第1台真正意义上的驾驶模拟器,可实现侧倾、横摆、俯仰3个方向的运动	车辆系统测试及验证、车辆新技术研发等
瑞典国家道路和运输研究所	1984年	4	模拟器可实现侧倾、横摆、俯仰和侧向4个方向的运动	车辆的操控、人机界面的测试以及驾驶行为研究等
德国戴姆勒-奔驰	1985年	6	模拟器由液压驱动,可实现侧倾、横摆、俯仰、横向、纵向和垂直6个方向的运动	车辆产品开发、驾驶行为及车辆反应研究等方面
日本马自达	1991年	6	采用高性能计算机仿真系统和图形处理硬件系统,可提供非常复杂逼真的驾驶场景	车辆性能测试等方面
日本汽车研究所	1996年	6	模拟器由液压驱动,可实现侧倾、横摆、俯仰、横向、纵向和垂直6个方向的运动	车辆系统测试及验证等方面
美国爱荷华大学	2003年	13	模拟器配备8个LED屏幕,可提供360°交通场景,再开发潜力强	道路交通设计、车辆系统的安全性验证以及驾驶行为特性研究等方面
英国利兹大学	2006年	8	平台内置5个眼睛跟踪仪,250°视景屏幕,8通道的视觉信道以60 Hz频率更新	道路安全设计、驾驶分心、交通安全中的人因理论、自动驾驶等方面的研究
日本丰田	2008年	12	高4.5 m、直径1.7 m,内部可放置实车,360°球面屏幕可以呈现出逼真的驾驶场景	不良驾驶行为的安全性研究等方面
德国戴姆勒-奔驰	2010年	7	直径约7.5 m、高约4.5 m,采用电力驱动,但很难实现横、纵2个方向的运动交互	车辆主动安全技术、辅助驾驶技术等方面的研究
日本FORUM8公司	2014年	8	模拟器可支持与CarSim、TruckSim等仿真软件配套使用	道路安全、车辆开发、驾驶员因素等方面的研究
德国大众	2015年	6	模拟器具有前进和转向功能,可实现车体的横向、纵向、横摆、俯仰、侧倾和垂直运动	模拟车路的纵向协同交互
德国VI-grade公司& 米兰理工大学	2021年	9	动态驾驶模拟器DiM400采用绳索驱动系统,允许更大的运动范围,驾驶员能在更长的时间内承受更高的加速度,还允许在实际构建道路使用者与基础设施之前验证它们之间的相互作用	车辆动力学、油耗优化、高级驾驶员辅助系统(ADAS)功能验证和自动驾驶等研究

由表1可见:国外科研型驾驶模拟器研发较早,且主要以各大汽车公司为研发主体。科研型驾驶模拟器在20世纪兴起之后,逐渐得到了广泛应用,早期的驾驶模拟器主要由液压驱动,且自由度相对较低,其中以6自由度驾驶模拟器在科研机构 and 各大汽车公司的应用最为广泛,主要用于车辆系统的测试及验证、车辆性能的优化及产品开发等方面。进入21世纪,随着计算机仿真技术、电力驱动及伺服技术的发展,驾驶模拟器的仿真水平和制动能力不断改进,驾驶模拟器由较低自由度、液压驱动向较高自由度、电力驱动的方向发展,使得驾驶模拟的虚拟场景与现实驾驶环境的吻合度越来越高,驾驶模拟器的应用范围不断扩展,主要用于危险性驾驶行为、车辆主动安全技术、道路安全设计等方面的研究。

中国科研型驾驶模拟器的研发与应用起步较晚,经历了从国外引进到自主研发的过程。中国先后引进了捷克发明的点光源平板投影式驾驶模拟器和美国研发的放电银幕被动式驾驶模拟器;直到1970年初,中国才自主研发出点光源转盘机电式驾驶模

拟器;进入20世纪80年代后,中国的驾驶模拟器开始迅猛发展,部分高等院校积极参与研发,并获得了一些初级产品;20世纪90年代以来,随着计算机仿真技术和图像处理技术的快速发展,中国逐渐具备了自主研发科研型驾驶模拟器的能力,其中以吉林大学、昆明理工大学和同济大学等为代表的科研高校已经自主研发出高仿真度的科研型驾驶模拟器^[6]。表2列举了中国主要高校代表性科研型驾驶模拟器的研发及应用信息。

2 道路行车安全应用

道路行车安全是由人、车、路、环境等要素共同决定的,行车事故的发生从根本上来讲是由于各要素间失去平衡所致。导致行车事故的原因有主观和客观之分,其中主观原因一般是指人的因素,尤其是驾驶人的驾驶行为特性等;客观原因主要包括道路交通条件、驾驶环境以及车辆技术状况等。本文基于驾驶模拟技术的道路行车安全性研究涉及人、车辆、道路、环境、事故这5个方面,研究内容主要包括

表2 中国部分高校代表性科研型驾驶模拟器
Tab. 2 Representative driving simulators in some universities in China

研发机构	研发时间	自由度	主要特征	应用领域
吉林大学	1996年	6	具有较高的可扩展性和逼真的“人-车”交互界面,由液压驱动,能够实现“人-硬件”在环试验	道路交通安全评价、车辆安全系统设计、交通法规合理性的检验等方面
昆明理工大学	1999年	3	KMRTDS具有先进的车辆模型和逼真复杂的视景系统,允许与多台模拟器协同工作,对车辆具有选择性监视功能	道路安全性验证、驾驶行为特性研究等方面
武汉理工大学	2004年	3	具有很强的驾驶交互性和真实感、高清晰和高逼真的视景、模块化的设计,能够满足不同用户的需求	驾驶行为特性分析、道路交通安全评价、道路交通事故致因分析、汽车安全辅助驾驶产品的评价、汽车自动驾驶仿真研究以及交通诱导研究等方面
清华大学	2009年	6	可模拟不同车型、不同路况和多种驾驶环境,能给人带来6D驾驶体验;还可与眼动仪、肌电、脑电等设备联合使用	先进汽车设计技术、汽车智能安全技术、行车安全与事故再现、驾驶行为机理的研究等方面
同济大学	2011年	8	平面操作空间20 m×5 m,内置5个刷新频率为60 Hz的投影仪,驾驶场景由250°曲面屏提供,电力驱动,代表我国驾驶模拟器发展的顶尖水平	道路交通安全设计、车辆安全技术研究、驾驶行为特性分析等方面
东南大学	2018年	6	具备眼动轨迹分析、心电检测、脑电信息分析、皮肤电反应检测等驾驶人生理、心理参数检测分析功能	城市交通安全、城市交通设施智能建管、城市交通系统智能控制等研究方面

驾驶行为特性分析、车辆主动安全技术研究、道路与交通设计、车辆驾驶环境以及道路行车事故研究。研究框架见图2。

2.1 不良驾驶行为特性

从广义上来讲,不良驾驶行为是指驾驶员在驾驶车辆过程中出现的一些操作不规范、不安全、甚至违法的行为。不良驾驶行为特性分析主要关注道路行车安全中的人为因素,包括驾驶人和其他交通参与者(如行人、非机动车骑乘人等),而驾驶人作为道路交通的主要参与者,是道路行车安全研究的重点,特别是驾驶人的不良驾驶行为特性与道路行车安全性之间的关系研究。在道路行车安全性研究中,常见的不良驾驶行为主要包括分心驾驶、疲劳驾驶、超

限行驶、激进驾驶,以及酒后驾驶等驾驶行为;研究发现,相较于其他不良驾驶行为,分心驾驶和疲劳驾驶对于道路行车事故的预测和分析具有重要作用^[7]。因此,本研究将选取分心驾驶和疲劳驾驶这2种典型的不良驾驶行为,开展基于驾驶模拟技术的不良驾驶行为特性分析。

1) 分心驾驶是指车辆在行驶过程中,驾驶员的注意力从驾驶主任务转移到诸如喝水、吃东西、打电话等驾驶次任务的1类不良驾驶行为;由于实车实验存在很大的安全隐患,所以目前国内外普遍利用驾驶模拟技术来研究驾驶分心对道路行车安全性的影响。Kaber等^[8]通过驾驶模拟实验分别研究了视觉分心、认知分心和综合分心对驾驶行为特性的影响,

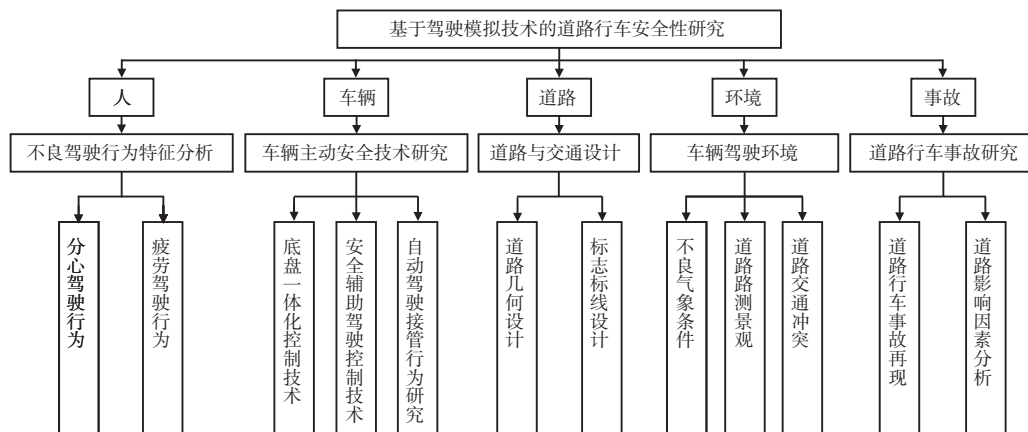


图2 研究框架

Fig. 2 Research framework

发现综合分心对驾驶人注意力资源的占用最多,而视觉分心则会导致车头时距的增大,车辆轨迹的偏移,进而影响对车辆的正常操作;Baldwin等^[9]通过驾驶模拟研究发现驾驶员在不同状态下行驶时,分心驾驶行为会导致转向盘的回转角比专心驾驶时明显要小。咸化彩^[10]研究发现分心驾驶会使车辆转向盘的转向熵及转角方差出现不同程度的增大;朱彤等^[11]研究了驾驶次任务对驾驶人状态和交通运行质量的影响,研究发现,驾驶次任务不仅会对行车安全产生影响,还会导致道路最大交通流量降低、道路拥堵区域增多、排队加剧等。

2) 疲劳驾驶是导致严重道路行车事故的重要原因之一,国内外研究者普遍利用驾驶模拟技术开展疲劳驾驶的相关研究,通过收集驾驶人在疲劳状态下的各类特征指标,建立疲劳驾驶的识别算法,进而为预防疲劳驾驶安全隐患提供理论支撑。King等^[12]通过驾驶模拟实验采集到驾驶人在疲劳状态下的车辆运动参数,并建立相应的监测模型,发现其检查准确率高达87%;Baulk^[13]研究发现驾驶人在没有得到充分休息的情况下,其驾驶反应时间与车辆位置的横向偏移具有较强的相关性,并且提出驾驶人反应时间可作为评判疲劳驾驶的客观标准。李平凡等^[14]对驾驶人在午餐前后的疲劳状态特征变化规律进行了研究,结果表明:驾驶人午餐后的速度判断能力和深度知觉能力均会下降,驾驶反应时间会延长,从而导致获取道路环境信息的难度和驾驶危险性因素的增加;刘建蓓等^[15]以心跳间隔变化率为指标利用驾驶模拟技术对驾驶人在高原环境下的疲劳状态特征进行了研究,发现驾驶人的平均心跳间隔会随着海拔的增加而减小,驾驶人出现疲劳的时间点会提前,并且小型车驾驶人比大型车驾驶人更易出现疲劳;屈肖蕾等^[16]采集到驾驶员的大量面部视频数据,利用这些数据对驾驶员的疲劳等级进行了划分,并筛选得到最佳的指标组合,建立了准确率高达87.7%的驾驶人疲劳在线监测算法。

国内外利用驾驶模拟技术在不良驾驶行为特性分析方面均进行了相关的研究,研究内容主要以分心、疲劳等不良驾驶行为特性分析和不良驾驶行为对车辆行驶特性的影响分析为主。利用驾驶模拟技术分析驾驶人的分心、疲劳等不良驾驶行为特性时,可以采集到大量有关车辆运动学及不良驾驶行为特性方面的数据信息,这些数据信息为研究不良驾驶行为对道路行车安全的影响提供了客观依据;通过对相关数据信息进行挖掘分析发现,不同种类和方

式的不良驾驶行为通过影响车辆的行驶状态,进而影响驾驶人的行车安全。目前虽然已经开展了关于不良驾驶行为特性指标获取和识别算法精度提升方面的研究,但识别算法的实际有效性还没有得到充分验证;因此,未来可就如何利用驾驶模拟技术建立有效的不良驾驶行为(如驾驶分心、驾驶疲劳等)检测识别算法展开研究。

2.2 车辆主动安全技术

车辆安全技术有主动安全技术和被动安全技术之分,其中,被动安全技术是指在车辆发生行车事故过程中或发生事故后,采用各种保护措施,避免或减轻驾乘人员伤害程度的安全技术,侧重于事中控制或事后减轻,主要措施有安全气囊、安全带、吸能式防撞护栏等;而主动安全技术主要突出事前预防,所以又被称为预防性安全技术,是指基于先进的预防性措施,在车辆遭遇危险状况时,能够主动帮助驾驶人避免事故发生的技术,主要包括底盘一体化控制技术、安全辅助驾驶控制技术、人-车安全监控及干预技术等^[17]。驾驶模拟技术凭借其因素可控性、安全性等优势而被广泛用于各类车辆主动安全技术的功效验证和安全性评价中,其中最为常见的有底盘一体化控制技术和安全辅助驾驶控制技术。

底盘一体化控制技术通过对车辆的各底盘电子系统(如汽车电子稳定控制系统(electronic stability controller, ESC)和自适应前照明系统(adaptive front-lighting system, AFS))进行集成、协调和优化,使车辆获得最佳的整体运动性能,进而减少车辆失控率,降低行车事故率。车辆ESC和AFS等技术的验证一直是车辆主动安全研究的重点,而驾驶模拟技术在相关的研究验证工作中扮演着重要角色。通过驾驶模拟实验,Soudbakhsh^[18]研究发现基于ESC技术的避撞系统在复杂场景中具有较好的避撞效果;Katzourakis等^[19]对车辆操作接近稳定性极限状态下的转向品质问题进行了研究,研究成果可进一步与ESC技术或AFS技术联合使用,实现对驾驶员的主动安全提示。杨建森^[20]通过将固定底座的驾驶模拟器与一些硬件设备联合使用,形成了硬件、驾驶员及环境三者之间可以交互的验证装置,实现了对ESC硬件与控制器算法的有效性验证。

安全辅助驾驶控制技术通过实时采集道路驾驶环境和车辆行驶状况等信息,来识别车辆在行驶过程中的潜在危险,一旦发现危险,车辆会自动进行控制以避免行车事故的发生或者减轻事故的严重程度。国内外学者利用驾驶模拟技术在车辆安全辅助

驾驶控制方面进行了大量研究,并取得了一些研究成果。Boyle等^[21]就驾驶人对自动导航技术适应度的差异性进行了研究,并分析了危险状况下驾驶人的应对策略,研究成果能够提高驾驶员的安全行为能力,促进自动导航技术的更新换代;Hajek等^[22]基于驾驶员负荷,对自适应主动导航技术的负荷识别能力进行了改进,研究发现改进后的自适应主动导航技术深受驾驶员的喜爱。高振海等^[23]对驾驶员在虚拟驾驶环境中的制动时刻数据进行了研究,并分析了驾驶员在跟车行驶过程中的制动行为影响因素;丁洁云等^[24]对驾驶人的换道意图进行了识别,并使用简易驾驶模拟装置对其进行确认,但由于驾驶模拟器自身存在的局限性,研究结果有待进一步验证。

基于车辆主动安全技术的发展,自动驾驶车辆的行车安全性研究也获得了一定突破;目前,自动驾驶车辆的接管行为已经成为研究的热点。接管行为是指当自动驾驶车辆达到系统极限状态或者面临难以应对的行驶状况时,会及时向驾驶人发出接管车辆的请求,驾驶人收到接管请求后,在安全时间内重新接管车辆的控制权并驾驶车辆。近年来,国内外学者利用驾驶模拟技术对自动驾驶的接管反应时间进行了大量研究。Eriksson等^[25]通过驾驶模拟实验对高速公路出口预期接管情况下的接管反应时间进行了研究,发现预期接管的反应时间往往较长,并且指出仅依靠接管时间均值来设计接管过程,不足以保证自动驾驶车辆的行车安全性;Dogan等^[26]利用驾驶模拟技术研究了不同驾驶次任务(如看电影、打电话等)对自动驾驶车辆接管行为的影响,研究发现不同驾驶次任务对接管反应时间的影响并无显著差异,但对车辆的横向和纵向控制存在不同的影响。王彦峰等^[27]基于驾驶模拟器研究了驾驶次任务沉浸等级对自动驾驶中接管反应时间的影响,研究发现驾驶人在相同的驾驶次任务条件下,自动驾驶接管正确时间和反应时间都会随着驾驶次任务沉浸等级的升高而降低。

国内外研究者利用驾驶模拟技术在车辆主动安全技术和自动驾驶车辆的行车安全性等方面均有大量的研究,研究内容主要集中在车辆主动安全技术的主客观评价、车辆安全系统的实际功效验证、自动驾驶车辆的接管行为等方面。随着汽车工业的不断发展,车辆主动安全将会是汽车行业未来发展的1个重要方向,而驾驶模拟技术作为1种有效的研发手段,未来会继续在车辆主动安全技术的研究中发挥重要作用。但值得关注和改进的是,目前针对车

辆主动安全技术的测试及验证,均倾向于选用构造简单的底座固定式驾驶模拟器,这类驾驶模拟器的功能有限且模拟效果欠佳,未来可通过增设激振装置等措施对驾驶模拟器加以改造,以提高其自由度,进而达到增强驾驶模拟逼真度的目的。

2.3 道路与交通设计

传统的道路与交通设计主要依据相关法律法规、标准规范和技术指南等执行,由于受技术条件的限制,设计人员对道路未来运营后的安全性缺乏足够的考虑和预测评估。驾驶模拟技术的应用给道路与交通设计的安全性预测及评估提供了可能,利用驾驶模拟技术可以实现道路与交通的可视化设计,通过对现实道路进行较为真实地仿真,使设计者在早期就能够从道路使用者的角度,对道路与交通设计的合理性及安全性做出评价,并对不同的设计方案进行比选,以发现设计中存在的问题,达到防患于未然的效果,因此,研究者越来越倾向于利用驾驶模拟技术来分析和解决道路与交通设计中出现的问题,且大量的研究成果已经证实:先进的驾驶模拟技术是研究和解决道路与交通设计中安全问题的有效手段。

随着计算机仿真技术的快速发展,利用先进的驾驶模拟技术可以将车辆运动、数据采集、声音、视角等系统集成为一体,构造出1种逼真的虚拟驾驶环境和接近真实的车辆运动感,再通过眼动仪等心理、生理设备联合使用,采集并测试驾驶员的驾驶行为特性,进而展开有针对性的研究。Davidse^[28]利用驾驶模拟技术研究了不同形式的道路交叉口对老龄驾驶人驾驶行为和工作强度的影响;Richard等^[29]研究了路侧交通基础设施对车辆横向偏移和驾驶人速度选择的影响;Wang等^[30]通过驾驶模拟实验获取了山区高速公路在各种线形组合下的驾驶数据,通过对这些数据进行分析,实现对山区高速公路不同道路线形组合的安全性评价,并得到了相应的安全评价阈值。张敏等^[31]对驾驶员在平纵线形组合路段上的错觉进行了研究,发现相比于凹形曲线路段,驾驶员更容易在凸形曲线路段上产生错觉,且最容易在不设超高的平曲线路段上产生错觉;魏文海^[32]研究了缩减车道宽度对驾驶行为的影响,研究发现:缩减车道宽度会使车辆的行驶速度显著降低,也会对车辆的横向位置产生显著的负效应。

标志标线是交通设计的关键内容之一,它能够向驾驶人提示道路交通的基本使用信息,进而管制和引导驾驶人及车辆能够有序使用道路。标志标线

位置设计的科学性、形态的视认性以及信息的有效性,不仅与驾驶员的主观认知感受紧密联系,还跟道路的行车安全密切相关^[2]。利用驾驶模拟实验可以详细记录驾驶人与标志标线进行信息交互时的主观反应和驾驶行为变化,通过定性和定量分析驾驶人对标志标线设置情况的主观感受,为标志标线设计的安全性评价提供有效的依据。例如,通过驾驶模拟Lee等^[33]研究发现可变限速板和交通警告标志的设置对减少行车速度的波动和缓解交通的拥堵具有一定的效果。Yan等^[34]进一步对可变信息板的放置位置进行了研究,研究发现可变信息板置于交叉口上游150~200 m处时效果会更好,而且显示图像的可变信息板比仅显示文字的会更加有效。郭凤香等^[35]通过在某路段的隧道内布设倒伏示警柱,在爬坡路段与混行路段上增设附加车道,研究了车辆在这3种路段上的平均速度与平均横向位置,结果表明:在隧道内布设倒伏示警柱后,车辆能够保持较好速度和横向位置;在爬坡路段上增设附加车道后,主线路上的行车速度会提高;在混行路段上增设附加车道后,行车速度能够保持稳定或者提高,并且可以降低与对向来车发生冲突的可能性。韩凤春等^[36]利用驾驶模拟器及相关设备,进行了道路交叉出口处交通标志的设置优化仿真实验,针对交叉出口处交通标志的不同组合,对驾驶人的正确识别率、注视累积时长等关键评价指标进行了比较。

综上所述,在道路与交通设计方面,国内外研究者利用驾驶模拟技术均进行了大量研究,研究对象基本涵盖道路与交通设计的各个方面,研究内容主要集中在道路与交通设计要素和道路行车安全性之间的关系,并且研究中较多考虑了驾驶人对道路与交通设计的适应性与反馈性问题。但值得注意的是,道路与交通设计的真实效果因其变化多样性和复杂性而不能完全被复制,并且驾驶模拟实验的参与者存在着个体差异性,对真实道路和虚拟道路的适应性及感受能力存在较大区别;因此,通过驾驶模拟实验得到的研究结果,其准确性和有效性尚待进一步验证。未来可针对驾驶模拟技术的有效性评价和参数标定等进行专项研究,以提升驾驶模拟技术的有效性和适用性,使其能够更好地适用于中国道路与交通设计的安全性问题研究。

2.4 车辆驾驶环境

车辆驾驶环境是1种物的环境,包括天气状况、路侧景观、交通冲突、光线明暗、地物地貌等类型,它通过影响驾驶员的驾驶行为而对道路的行车安全性

产生影响。目前,国内外在道路行车安全性问题的研究中,涉及到的车辆驾驶环境类型主要有不良气象条件、路侧景观和交通冲突等。

1) 不良气象条件对行车安全性的影响是道路交通安全领域研究的重点之一。Snowden等^[37]通过驾驶模拟实验研究发现车辆在浓雾环境条件下行驶时,驾驶员感知到的速度比实际速度要低。Mueller等^[38]的研究结果表明不同驾龄的驾驶员在雾天环境下都会降速行驶,但老手驾驶员的行车速度会下降的更快,最终行车速度会基本趋于一致。张驰等^[39]研究发现不同的路面能见度、道路曲率半径、行车速度均会对车辆横向偏移产生显著影响,且影响程度依次为:能见度>曲率半径>行车速度。赵晓华等^[40]的研究结果表明驾驶员在不良气象条件下低速跟驰行驶时,对车辆间距和车辆行驶稳定性的控制能力会有所降低,并且不易察觉前车的加速行为,导致与前车的距离增大,交通流的顺畅性降低。

2) 在道路路侧景观方面,国内外研究者利用驾驶模拟技术在道路景观元素、类型及复杂程度对驾驶人安全感知、行车状态等的影响方面做了大量研究。Yamakoshi等^[41]研究发现驾驶员长时间行驶在景观单一的道路上,会很容易产生驾驶疲劳,但长时间使用驾驶模拟器也会使驾驶员产生疲劳感,Bella^[42]通过驾驶模拟实验获得车辆在不同路侧景观下的横向位置和行驶速度,分析了不同路侧景观对驾驶行为的影响。荀双杰等^[43]研究了不同路侧景观对行车稳定性的影响,发现驾驶员在全封闭的空间景观条件下行驶时,行车稳定性最好,而在全开放的空间景观条件下行驶时,行车稳定性最差。李南初^[44]研究了路侧树木高度、间距、颜色搭配等对驾驶员驾驶行为和景观感受的影响。

3) 道路交通冲突也属于车辆驾驶环境的1种类型,可以理解为当驾驶人明显感觉到存在事故危险时,立即采取积极有效的避险措施的交通遭遇事件,道路交通冲突经常会发生在高速公路互通式立交的合流区、交织区等区域。交通冲突技术是指利用既定的判断规则,对道路交通冲突的整个过程及严重程度进行识别和判断的技术,利用交通冲突技术可以在较短时间内获得大量的冲突数据,而利用驾驶模拟技术可以较好地模拟道路交通的实际运行情况,研究者们将二者结合起来,对道路合流区、交织区的交通冲突展开研究^[45]。Li等^[46]建立了包含加速车道长度、匝道小时交通量的线性回归预测模型,对互通式立交合流区的行车安全水平进一步量化;

Ulak等^[47]利用驾驶仿真技术构建了1个T形交叉口虚拟场景,研究了驾驶员经验差异、驾龄对行车安全的影响。沈强儒等^[48]对小间距互通式立交区域进行了安全性评价,并给出了相应的行车安全改善措施。戴俊晨^[49]研究了互通交织区的车流运行特征和冲突机理,利用驾驶模拟实验获取了交织区的交通冲突样本,并对其进行安全性评价。

综上所述可知:国内外研究者利用驾驶模拟技术在车辆驾驶环境方面做了大量的研究工作,研究对象涵盖现实世界中常见的不良天气、路侧景观等基本环境类型,研究内容主要体现在车辆驾驶环境对驾驶行为的影响。然而,现实世界中的车辆驾驶环境是复杂多样且动态变化的,不光有天气的变化无常、地势的高低起伏、光线的明暗相间,还有道路交通的冲突拥堵、道路构造物和路侧景观的种类繁多,以及车流密度和车辆类型的随机变化等等。利用驾驶模拟技术构建出的虚拟驾驶场景,不能完全呈现出真实驾驶环境的变化多样性,现实世界中车辆驾驶环境的复杂程度还不能够完全被复制,尤其是不同环境类型组合之间的交互变化等。未来可针对驾驶模拟器的二次开发进行专题研究,以提升虚拟驾驶环境的逼真度,使驾驶模拟技术可以更好地用于以车辆驾驶环境为影响因素的道路行车安全性研究中。

2.5 道路行车事故

道路行车事故再现是指依据事故调查资料(包括事故留下的痕迹,事故目击者的证言等)对道路行车事故发生的全过程进行推断的过程^[50]。利用驾驶模拟技术再现道路行车事故,就是依据调查得到的事故数据资料,通过人机交互的方式再现行车事故发生的全过程,对事故发生前后的驾驶行为变化进行分析。Yan等^[51]利用驾驶模拟器构建了8个道路交叉口的行车事故场景,将行车事故类型、事故前后驾驶员的驾驶行为与实际事故数据进行对比,发现驾驶模拟技术可用来评价交叉口的行车安全性。Guzek等^[52]通过驾驶模拟实验研究发现:相比于白班工作者,夜班工作者下班后驾驶汽车会更容易发生道路行车事故。蒋阳等^[53]根据事故现场采集到的真实信息,利用驾驶模拟技术对3起不同类型行车事故的碰撞过程进行再现分析,确定出事故发生前各参与方的形态。张瑞臻等^[54]对1起摩托车-行人碰撞事故进行驾驶仿真再现分析,并用行人的特征伤情和其他相关资料对仿真结果的准确性进行了验证,较为完整地还原了碰撞瞬时摩托车与行人的关键形态。

通过驾驶模拟技术,除了可以再现道路行车事故发生的整个过程,还能够采集到事故发生前后各参与方的行车状态参数,通过分析这些状态参数,可以总结出引发道路行车事故的主要原因及其影响因素。Banks等^[55]对比分析了不同性别驾驶员预测事故风险准确度的差异性,发现在睡眠时间同样不足的情况下,女驾驶员对事故风险的预测准确度比男驾驶员高,但在睡眠时间同样不足且轻度饮酒的情况下,男女驾驶员均不能准确预测事故风险。侯莉莉等^[56]对车辆碰撞事故发生前的行车状况、碰撞点、碰撞后的形态进行再现分析,确定出车辆碰撞时的行驶速度,得出碰撞事故发生的原因。袁泉等^[57]对北京市的88例人车碰撞事故数据进行了分析研究,总结归纳出典型碰撞事故的道路场景、形态和特点,然后根据典型参数及工况,建立了人车碰撞的虚拟事故场景,开展人车碰撞事故的驾驶模拟实验,通过实验获得了影响碰撞事故发生的因素和驾驶员面对事故时所采取应急措施。

目前,驾驶模拟技术凭借其“安全性”、危险场景的可设置性,以及费用低等优势,广泛应用于道路行车事故的再现分析和影响因素分析研究中。利用驾驶模拟技术对道路行车事故进行再现分析,能够真正让驾驶人全景感知行车事故发生的整个过程,弄清楚事故发生的起因、演变过程以及事故后果等,而不是仅停留在道路行车事故的后果层面。然而,驾驶员使用驾驶模拟器时的“安全感”、虚拟事故场景的逼真度、虚拟事故出现的随机性,以及事故发生的诱因还原度等,这些问题会对驾驶模拟实验的有效性产生影响,进而影响到研究结果的可信度。未来研究重点为增强虚拟驾驶场景的逼真度和还原度,提升驾驶模拟实验的有效性,使驾驶人能够更好地感知事故发生的全部过程。

3 问题与展望

3.1 存在问题

驾驶模拟器已经成为研究道路行车安全性问题的重要工具,未来会继续给道路行车安全领域中人、车、路、环境等事故要素的研究提供更加有利的条件。但同时,驾驶模拟技术仍存在以下3个问题有待进一步探讨和研究。

1) 有效性评价。有效性是指利用驾驶模拟器模拟道路驾驶环境和驾驶行为时能够达到的有效真实程度。驾驶模拟器的有效性可分为绝对有效性和相对有效性,其中绝对有效性又称为物理有效性,要

求驾驶模拟场景与真实场景在尺寸、车速等物理属性上能够保持一致;而相对有效性则要求驾驶员在驾驶模拟场景中的驾驶行为与真实道路环境中的保持一致^[58]。因此,驾驶模拟器的有效性评价同样也可分为绝对有效性评价和相对有效性评价,其中绝对有效性评价是对驾驶模拟器的物理属性进行评价,而相对有效性评价则是对驾驶行为进行评价,这2类有效性评价是通过对比分析实车实验和驾驶模拟实验而进行的。

目前,已有相关研究对驾驶模拟器在基本条件下、复杂条件下和风险环境下的应用有效性进行了评价,并构建了有效性的评价体系。然而,驾驶模拟器的有效性评价应该是1个多级的综合性评价体系,随着应用范围的不断扩大,驾驶模拟器的评价体系有待进一步完善和细化,而且还需通过实车实验不断进行修正,以尽早建成模块化和标准化的有效性评价体系。

2) 不舒适性。“眩晕感”一直是困扰驾驶模拟技术应用的首要问题,尤其是长时间的使用会让驾驶人产生疲劳、眩晕、恶心等不适感;驾驶模拟器的不舒适性严重影响了驾驶体验真实度和沉浸感,并且在不同驾驶模拟器和不同试验者之间均存在显著差异^[59]。究其原因,主要是由于硬件设备的信息处理能力受到限制,即控制回路信息反馈的滞后和延迟降低了车载系统的可控性与稳定性,导致驾驶模拟器计算系统不能及时准确地对模拟器和实际车辆的动态特性进行匹配和建模;如果要最大程度地减少造成实验者不适的各因素影响,驾驶模拟器至少要能输出具备120 Hz刷新率和4 K分辨率的画面;为此可以从驾驶模拟器的运动系统、视觉系统、座舱环境等方面进行改进,研发出真正具有高沉浸感的驾驶模拟器。

3) 二次开发。目前,道路行车安全问题的研究工作主要依靠驾驶模拟器而开展,但驾驶模拟器自身存在着一定的局限性,无法真实有效地模拟一些特殊的交通场景,比如城市机-非混合交通流场景、不同类型车辆驾驶环境组合而成的交互变化场景等,因而无法满足一些有特殊要求的行车安全研究工作,需要对驾驶模拟器进行二次开发,通过与一些特殊的仪器设备、软件程序等联合使用,以提升驾驶模拟场景的高逼真度、高还原度等,达到提升实验效果的目的。

3.2 应用展望

未来,驾驶模拟技术将在以下3个方面的道路

行车安全研究工作中发挥重要作用。

1) 特殊人群(老年人、残疾人等)的驾驶行为研究。人口老龄化已经是我国社会当前面临的严峻考验,当前的职业驾驶群体在未来步入老年后,生活出行仍然会一定程度地依赖汽车驾驶。由于我国机动化时代起步较晚,交通模式和文化背景有别于其他国家,关于老年驾驶员交通安全问题的研究一直滞后于发达国家。因此,在人口老龄化背景下开展基于驾驶模拟技术的道路交通安全问题研究,将会补充和完善我国交通法规、交通设计等诸多方面的不足,对提高老年驾驶员的行车安全具有一定的理论价值和现实意义。

近年来,我国针对单眼视力障碍和上肢残疾人士做了一系列汽车驾驶相关的规定,这对于保障残疾人权益、增进残疾人社会参与感具有重要意义。针对残疾人开展基于驾驶模拟技术的交通安全问题研究,是保障残疾人权益的重要手段,具有十分重要社会价值和现实意义。

2) 智能网联汽车系统的测试及验证。智能网联汽车(connected-automated vehicle, CAV)是车联网和智能车的有机联合,通过融合车用无线通信技术(vehicle to everything, V2X)与自动驾驶技术,实现车辆与外界驾驶环境的协同控制和信息共享,以实现车辆行驶安全、高效、有序和节能的目的^[60]。智能网联汽车要确保车辆在所有复杂驾驶场景中均是安全可靠的,为实现这一目标,智能网联汽车必须在更广的驾驶场景范围内对系统进行安全性测试与验证;然而,目前仅依靠真实的道路测试根本无法获得足够的验证,而且测试与验证的周期十分漫长,无法确定出测试与验证需要的具体时间及里程。

驾驶模拟技术可以很好地解决智能网联汽车系统测试及验证存在的这些问题,利用驾驶模拟技术可以将大部分的测试及验证工作转移到虚拟世界中去完成。通过推动智能网联汽车转向虚拟场景和模拟车辆测试,不仅可以显著增加测试的范围和广度,还可以实现对测试场景的模拟和并行回放,降低了整个测试与验证过程的成本和时间,进而加速并改进系统的整个测试和验证过程。因此,未来可通过驾驶模拟技术解决智能网联汽车系统的测试与验证难题。

3) 混合交通流环境下的行车安全问题研究。“机非混行”的城市道路环境是典型的混合交通流环境,城市道路的行车安全问题研究主要以分析道路交通冲突和道路行车事故为主;我国每年因行车事故造成的人员伤亡情况依旧很严重,究其原因,主要

在于机非混行的城市道路环境、交通设计与驾驶行为的不匹配、交通安全法律意识的淡薄等^[2]。利用驾驶模拟技术对城市道路交通环境、交通特性与驾驶员行为之间的关系进行研究,分析道路行车事故中车辆行驶状态和驾驶人反应变化,达到对道路安全中人、车、路、环境之间复杂关系的进一步理解,从而有助于提升城市道路设计和交通规划的安全性,同时有利于指定更加有效的城市道路交通安全措施。

4 结束语

驾驶模拟技术具有安全性高、因素可控性强、经济性好、场景的可重复性好等优势,成为研究道路行车安全性问题的重要手段。本文从驾驶模拟器的发展里程出发,归纳总结了国内外主要代表性科研型驾驶模拟器的相关信息;接着以“人-车-路-环境-事故”为主线,分别从不良驾驶行为特性分析、车辆主动安全技术研究、道路与交通设计、车辆驾驶环境以及道路行车事故研究5个方面,对驾驶模拟技术在道路行车安全领域内的应用研究现状进行了综述,并从特殊人群的驾驶行为研究、智能网联汽车系统的测试及验证、混合交通流环境下的行车安全问题研究3个方面进行了应用展望。然而,驾驶模拟技术当前仍然存在一系列问题需要进一步研究解决,比如,驾驶模拟器的有效性评价、不适性,以及二次开发等问题。这些问题的探讨与研究,能够更好地促进驾驶模拟技术的发展,提升其在道路行车安全研究中的应用水平,为道路行车安全问题的解决提供更加有效的研究工具。

参考文献

References

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通工程学术研究综述·2016[J]. 中国公路学报, 2016, 29(6): 1-161.
Editorial office of "China Journal of Highway and Transport". Summary of academic research on china transportation engineering · 2016[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(6): 1-161. (in Chinese)
- [2] 魏 朗, 田 顺, Chris SCHWARZ, 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.
WEI L, TIAN S, CHRIS SCHWARZ, et al. Overview of the application of driving simulation technology in the research and development of automobile intelligent technology[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(12): 140-150+158. (in Chinese)
- [3] 程海涛. 基于虚拟现实的直升机驾驶模拟器开发[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
CHENG H T. Development of a helicopter driving simulator based on virtual reality[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [4] SLOB J J. State-of-the-art driving simulators, a literature survey, DCT 2008. 107[R]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2008.
- [5] 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.
TIAN S, GU Y M, WEI L, et al. The development history and latest application examples of driving simulators[J]. Automobile Technology, 2018(4): 35-42. (in Chinese)
- [6] 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.
WU X R, WU Z Z. Application of vehicle driving simulator in traffic safety[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2015, 33(2): 10-19. (in Chinese)
- [7] 王婧雯. 机动车驾驶人典型不良驾驶行为分析及干预方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
WANG J W. Analysis of typical risk driving behaviors of motorists and research on intervention methods[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [8] KABER D B, LIANG Y, ZHANG Y, et al. Driver performance effects of simultaneous visual and cognitive distraction and adaptation behavior[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology & Behaviour, 2012, 15(5): 491-501.
- [9] BALDWIN C L, ROBERTS D M, DANIELA B, et al. Detecting and quantifying mind wandering during simulated driving[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2017(11): 406.
- [10] 咸化彩. 次任务驾驶安全性评价指标及评价模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
XIAN H C. Research on evaluation index and evaluation model of sub-task driving safety[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [11] 朱 彤, 胡月琦, 朱诗慧, 等. 驾驶人注意分散的认知模拟与交通流特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(2): 87-93.
ZHU D, HU Y Q, ZHU S H, et al. Cognition simulation and traffic flow characteristics analysis in driving distraction[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(2): 87-93. (in Chinese)
- [12] KING L M, NGUYEN H T, LAL S K. Early driver fatigue detection from electroencephalography signals using artificial neural networks[C]. 28th Annual International Conference of Engineering in Medicine and Biology Society. New York: IEEE, 2006.
- [13] BAULK S D. Chasing the silver bullet: Measuring driver fatigue using simple and complex tasks [J]. Accident Analysis & Prevention, 2008(40): 396-402.

- [14] 李平凡,王殿海,刘东波,等. 基于驾驶人生理心理参数的午餐后驾驶疲劳分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011,31(4):81-86.
LI P F, WANG D H, LIU D B, et al. Analysis on driving fatigue before and after lunch based on indices of physiology and psychology[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011, 31(4):81-86. (in Chinese)
- [15] 刘建蓓,马小龙,张志伟,等. 基于心电分析的青藏高原驾驶人疲劳特性[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(4): 151-158.
LIU J B, MA X L, ZHANG Z W, et al. Fatigue characteristics of driver in Qinghai-Tibet Plateau based on electrocardiogram analysis[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(4): 151-158. (in Chinese)
- [16] 屈肖蕾,成波,林庆峰,等. 基于驾驶员转向操作特性的疲劳驾驶检测[J]. 汽车工程, 2013, 35(9): 803-807+831.
QU X L, CHENG B, LIN Q F, et al. Fatigue driving detection based on driver's steering operation characteristics[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(9): 803-807+831. (in Chinese)
- [17] 彭金栓,徐磊,邵毅明. 汽车主动安全技术现状及发展趋势[J]. 公路与汽运, 2014(1):1-4.
PENG J S, XU L, SHAO Y M. Current status and development trend of automobile active safety technology[J]. Highways & Automotive Applications, 2014(1): 1-4. (in Chinese)
- [18] SOUDBAKHSH D. Development of a novel steering control collision avoidance system[D]. Washington, D. C.: The George Washington University, 2011.
- [19] KATZOURAKIS D I, VELENIS E, HOLWEG E, et al. Haptic steering support for driving near the vehicle's handling limits: Test-track case[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(4): 1781-1789.
- [20] 杨建森. 面向主动安全的汽车底盘集成控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
YANG J S. Research on integrated control strategy of vehicle chassis oriented to active safety[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [21] BOYLE L N, MOECKLI J. Use patterns among early adopters of adaptive cruise control[J]. Human Factors, 2012, 54(5): 722-733.
- [22] HAJEK W, GAPONOVA I, FLEISCHER K H, et al. Workload-adaptive cruise control: A new generation of advanced driver assistance systems[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2013, 20(3): 108-120.
- [23] 高振海,吴涛,赵会. 车辆虚拟跟随避撞中驾驶人制动时刻模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(5): 1233-1239.
GAO Z H, WU T, ZHAO H. Model of the driver's braking moment in vehicle virtual following collision avoidance[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2014, 44(5): 1233-1239. (in Chinese)
- [24] 丁洁云,党睿娜,王建强,等. 驾驶人换道决策分析及意图识别算法设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(7): 769-774.
DING J Y, DANG R N, WANG J Q, et al. Driver's lane change decision analysis and intention recognition algorithm design[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015, 55(7): 769-774. (in Chinese)
- [25] ERIKSSON A, STANTON N A. Takeover time in highly automated vehicles: Noncritical transitions to and from manual control[J]. Human factors, 2017, 59(4): 689-705.
- [26] DOGAN E, HONNET V, MASFRAND S, et al. Effects of non-driving-related tasks on takeover performance in different take-over situations in conditionally automated driving[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2019(62): 494-504.
- [27] 王彦峰,陈浩林,赵晓华,等. 驾驶任务沉浸等级对接管行为的影响分析[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(1): 135-143.
WANG Y F, CHEN H L, ZHAO X H, et al. A study on the impact of immersion levels of non-driving-related tasks on takeover behavior[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(1): 135-143. (in Chinese)
- [28] DAVIDSE R J. Assisting the older driver: Intersection design and in-car devices to improve the safety of the older driver [D]. Groningen: University of Groningen, 2007.
- [29] RICHARD V D H, DE RIDDERS. Influence of roadside infrastructure on driving behavior: Driving simulator study[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2018(1): 36-44.
- [30] WANG X, WANG T, TARKO A, et al. The influence of combined alignments on lateral acceleration on mountainous freeways: A driving simulator study[J]. Accident Analysis & Prevention, 2015(76): 110-117.
- [31] 张敏,张驰,杨琼. 道路平、纵线形组合路段错视觉评价[J]. 中国科技论文, 2015, 10(16): 1900-1906.
ZHANG M, ZHANG C, YANG Q. Evaluation on drivers' misperception of horizontal road combined with vertical curves[J]. China Sciencepaper, 2015, 10(16): 1900-1906. (in Chinese)
- [32] 魏文海. 多因素交互作用下缩减车道对驾驶行为的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(4): 117-126.
WEI W H. Influence of lane reduction on driving behavior characteristics under multi-factor interaction[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(4): 117-126. (in Chinese)
- [33] LEE C, ABDELATY M. Testing effects of warning messages and variable speed limits on driver behavior using driving simulator[J]. Transportation Research Record: Journal of the

- Transportation Research Board, 2008, 2069(1):55-64.
- [34] YAN X, WU J. Effectiveness of variable message signs on driving behavior based on a driving simulation experiment[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014(2):1-9.
- [35] 郭凤香,熊坚,秦雅琴,等.山区公路交通安全保障措施模拟评价[J].*交通运输工程学报*, 2011, 11(5):120-126.
GUO F X, XIONG J, QIN Y Q, et al. Simulation evaluation of safeguard measure for traffic safety on montane highway[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2011, 11(5):120-126. (in Chinese)
- [36] 韩凤春,马牧亭,马晓东,等.基于驾驶模拟的平面交叉口出口交通标志设置方法研究[J].*公路交通科技*, 2016, 12(11):217-220.
HAN F C, MA M T, MA X D, et al. Research on setting method of intersection exit traffic signs based on driving simulation[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016, 12(11):217-220. (in Chinese)
- [37] SNOWDEN R J, STIMPSON N, RUDDLE R A. Speed perception fogs up as visibility drops[J]. *Nature*, 1998, 392(6675):450.
- [38] MUELLER A S, TRICK L M. Driving in fog: The effects of driving experience and visibility on speed compensation and hazard avoidance[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2012, 48(9):472-479.
- [39] 张驰,贺亚龙,黄星,等.雾天不同能见度条件下高速公路限速建议值研究[J].*交通信息与安全*, 2018, 36(5):25-33.
ZHANG C, HE Y L, HUANG X, et al. A study on speed limit of different visibility on expressways under foggy weather[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2018, 36(5):25-33. (in Chinese)
- [40] 赵晓华,任贵超,陈晨,等.基于驾驶模拟技术的不良气象条件对驾驶员跟驰行为的综合影响研究[J].*重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(6):90-95.
ZHAO X H, REN G C, CHEN C, et al. Research on the comprehensive influence of bad weather on driver following behavior based on driving simulation technology[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition)*, 2019, 38(6):90-95. (in Chinese)
- [41] YAMAKOSHI T, ROLFE P, YAMAKOSHI Y, et al. A novel physiological index for driver's activation state derived from simulated monotonous driving studies[J]. *Transportation Research part C: Emerging technologies*, 2009, 17(1):69-80.
- [42] BELLA F. Driver perception of roadside configurations on two-lane rural roads: Effects on speed and lateral placement[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013(50):251-262.
- [43] 荀双杰,熊坚,陈瑶,等.不同公路景观对行驶轨迹和车辆转向的影响[J].*公路与汽运*, 2016, 32(5):53-56.
XUN S J, XIONG J, CHEN Y, et al. The influence of different highway landscapes on driving trajectory and vehicle steering[J]. *Highway and Motor Transport*, 2016, 32(5):53-56. (in Chinese)
- [44] 李南初.基于驾驶模拟实验的景观因素对驾驶行为的影响研究[D].成都:西南交通大学, 2017.
LI N C. Research on the influence of landscape factors on driving behavior based on driving simulation experiment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [45] 朱顺应,蒋若曦,王红,等.机动车交通冲突技术研究综述[J].*中国公路学报*, 2020, 33(2):15-33.
ZHU S Y, JIANG R X, WANG H, et al. Review of research on traffic conflict techniques[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(2):15-33. (in Chinese)
- [46] LI S, XIANG Q, MA Y, et al. Crash risk prediction modeling based on the traffic conflict technique and a microscopic simulation for freeway interchange merging areas[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(11):1157.
- [47] ULAK M B, OZGUVEN E E, MOSES R, et al. Assessment of traffic performance measures and safety based on driver age and experience: A microsimulation based analysis for an unsignalized T-intersection[J]. *Journal of traffic and transportation engineering(English edition)*, 2019, 6(5):455-469.
- [48] 沈强儒,杨少伟,赵一飞,等.基于交通冲突小间距互通式立交区域安全性评价方法[J].*系统工程理论与实践*, 2015, 35(1):160-167.
SHEN Q R, YANG S W, ZHAO Y F, et al. Assessment method of small spacing interchange based on the traffic conflict[J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2015, 35(1):160-167. (in Chinese)
- [49] 戴骏晨.基于交通冲突技术的高速公路互通立交交织区交通安全评价[D].南京:东南大学, 2016.
DAI J C. Evaluation of weaving section in freeway interchange with respect to traffic safety based on traffic conflict technique[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [50] 张勇刚.道路交通事故再现及预防关键技术研究[D].广州:华南理工大学, 2015.
ZHANG Y G. Study on the key technologies of traffic accident reconstruction and precaution[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [51] YAN X, ABDEL-ATY M, RADWAN E, et al. Validating a driving simulator using surrogate safety measures[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2008, 40(1):274-288.
- [52] GUZEK M, LOZIA Z, ZDANOWICZ P, et al. Research on behaviour of drivers in accident situation conducted in driving simulator[J]. *Journal of KONES*, 2009(16):173-183.
- [53] 蒋阳,李平飞,杨建军.基于Pc-Crash的道路交通碰撞事故再现分析[J].*成都大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(3):

(下转第25页)

- 83277-83285.
- [43] SHI J, QIAO F, LI Q, et al. Application and evaluation of the reinforcement learning approach to eco-driving at intersections under infrastructure-to-vehicle communications[J]. *Transportation Research Record*, 2018, 2672(25):89-98.
- [44] WANG Z, WU G, BARTH M J. Cooperative eco-driving at signalized intersections in a partially connected and automated vehicle environment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(5):2029-2038.
- [45] KAMALANATHSHARMA R K, RAKHA H A. Leveraging connected vehicle technology and telematics to enhance vehicle fuel efficiency in the vicinity of signalized intersections[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2016, 20(1):33-44.
- [46] LEE W H, LI J Y. An eco-driving advisory system for continuous signalized intersections by vehicular ad hoc network[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2018(3):1-12.
- [47] JOHANSSON I, JIN J, MA X, et al. Look-ahead speed planning for heavy-duty vehicle platoons using traffic information[J]. *Transportation Research Procedia*, 2017 (22) : 561-569.
- [48] LI S, LI R, WANG J, et al. Stabilizing periodic control of automated vehicle platoon with minimized fuel consumption[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, 3(1):259-271.
- [49] WANG Z, WU G, BARTH M J. A review on cooperative adaptive cruise control (CACC) systems: Architectures, controls, and applications[C]. 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui: IEEE, 2018.
- [50] 王琼, 郭戈. 车队速度滚动时域动态规划及非线性控制[J]. *自动化学报*, 2019, 45(5):888-896.
- WANG Q, GUO G. Platoon speed receding horizon dynamic programming and nonlinear control[J]. *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 2019, 45(5):888-896. (in Chinese)
- [51] HSU C Y, YANG C S, YU L C, et al. Development of a cloud-based service framework for energy conservation in a sustainable intelligent transportation system[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015(164):454-461.
- [52] LEE W H, CHIU C Y. Design and implementation of a smart traffic signal control system for smart city applications[J]. *Sensors*, 2020, 20(2):508.

(上接第12页)

- 285-288.
- JIANG Y, LI P F, YANG J J. Application of pc-crash in different types of collision accident reconstruction[J]. *Journal of Chengdu University (Natural Science)*, 2016, 35(3):285-288. (in Chinese)
- [54] 张瑞臻, 刘盛雄, 杨建伟, 等. 摩托车-行人事故中碰撞瞬间形态分析重建[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2020, 34(10):225-230.
- ZHANG R Z, LIU S X, YANG J W, et al. Formal analysis and reconstruction of collision in motorcycle-pedestrian collision accident[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2020, 34(10):225-230. (in Chinese)
- [55] BANKS S, CATCHESIDE P, LACK L, et al. Low levels of alcohol impair driving simulator performance and reduce perception of crash risk in partially sleep deprived subjects[J]. *SLEEP*, 2004, (27):1063-1067.
- [56] 侯莉莉, 方沂. 基于PC-CRASH的道路交通事故分析及再现研究[J]. *天津职业技术师范大学学报*, 2013, 23(1):46-49.
- HOU L L, FANG Y. Analysis and represent research of vehicle collision road traffic accident based on the pc-crash[J]. *Journal of Tianjin University of Technology and Education*, 2013, 23(1):46-49. (in Chinese)
- [57] 袁泉, 胡孟夏, 李一兵. 基于真实事故数据的人车碰撞事故场景设计与驾驶模拟实验[J]. *汽车安全与节能学报*, 2012, 3(1):19-25.
- YUAN Q, HU M X, LI Y B. Scenario design and driving simulation experiment of vehicle-to-pedestrian accidents based on real accident data[J]. *Automotive Safety and Energy*, 2012, 3(1):19-25. (in Chinese)
- [58] 陈亮. 基于驾驶人交通特性的汽车驾驶模拟器系统有效性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- CHEN L. Research on the validation of vehicle driving simulator based on driver's traffic characteristics[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [59] 赵蕾蕾, 李翀, 季林红, 等. 基于虚拟现实的自动驾驶模式中晕动受试者的脑电特征[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2020, 60(12):993-998.
- ZHAO L L, LI C, JI L H, et al. EEG characteristics of motion sickness subjects in automatic driving mode based on virtual reality tests[J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Technol)*, 2020, 60(12):993-998. (in Chinese)
- [60] 马兴. 智能网联汽车技术的发展研究[J]. *无线互联科技*, 2021, 18(23):88-89.
- MA X. Study on development of intelligent connected vehicle technology[J]. *Wireless Internet Technology*, 2021, 18(23):88-89. (in Chinese)