

文章编号: 1001-7372(2022)10-0205-21

面向智能车辆的现役道路设施行驶适应性研究综述

于 斌¹, 王书易^{*1}, 马 羊^{1,2}, 杨 倩¹, 周 雯¹, 刘晋周¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了总结面向智能车辆的现役道路设施行驶适应性, 即现役道路基础设施承载智能车辆行驶的适宜程度, 阐述自主智能驾驶定义与驾驶自动化等级分类, 在此基础上剖析不同等级间的人机功能差异, 并分别从感知层、感知-决策层、决策-控制层探讨与道路设计要素相关联的人机功能差异, 通过归纳总结智能车辆与道路几何要素、路面性能及其他道路要素(如道路标线)的相互作用机制研究, 从道路工程角度及其他道路要素方面回顾该领域的研究现状, 指出存在的问题和未来发展方向。研究结果表明: 相比传统车辆, 配置高等级自动驾驶系统的智能车辆对现役道路设施行驶适应性最高, 主动安全系统次之, 而驾驶辅助及有条件自动驾驶系统适应性不足。而目前研究主要问题包括: 难以归纳、标定不同驾驶自动化等级间的人机功能差异及其对于道路设计参数的需求设计值; 测试道路场景条件过于理想, 考虑的驾驶自动化等级单一, 试验规模和样本有限; 道路几何、路面性能以及道路标志、标线等道路要素与智能车辆间的相互作用机制研究不足, 缺乏与不同道路场景相匹配的智能车辆驾驶特征数据的获取手段。因此建议: 重视并推动与道路设计要素相关联的关键人机功能差异指标信息共享; 联合高保真且可交互的道路场景、高精度感知传感器物理模型、车辆动力学模型及微观交通流模型, 利用测试场景自动化生成、极限工况场景搜寻与泛化等技术开展智能驾驶虚拟测试, 突破现有研究的深度和广度; 探索反映不同等级智能车辆的道路行驶适应性特征指标与评价标准, 精准、有效地评估预测复杂道路场景及不利道路条件下的行驶适应性。

关键词: 交通工程; 智能车辆; 综述; 道路行驶适应性; 驾驶自动化等级; 道路几何; 道路路面

中图分类号: U491.2 文献标志码: A

Review of Driving Adaptability of Intelligent Vehicles to As-built Roadway Infrastructures

YU Bin¹, WANG Shu-yi^{*1}, MA Yang^{1,2}, YANG Qian¹, ZHOU Wen¹, LIU Jin-zhou¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China; 2. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: To summarize the driving adaptability of intelligent vehicles to as-built roadway infrastructures, i. e., the readiness of as-built roadway infrastructures for intelligent vehicles, the definition of disconnected intelligent vehicles and the classification of driving automation levels were clarified. On this basis, the differences in human versus (vs.) machine functions between varied levels were analyzed. Then, those differences in human vs. machine functions

收稿日期: 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878163); 江苏省研究生科研创新基金项目(KYCX18_0152); 江苏省交通运输科技与成果转化项目(2020Y19-1(1))

作者简介: 于 斌(1985-), 男, 江苏淮安人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: yb@seu.edu.cn.

* 通讯作者: 王书易(1993-), 男, 福建三明人, 工学博士研究生, E-mail: sywangseuer@seu.edu.cn.

associated with roadway design elements were explored from three layers: perception layer, perception-planning layer, and planning-control layer. By summarizing studies on the interaction mechanism between intelligent vehicles and road geometric elements, pavement performance, and other road-related elements (e. g., road markings), related work was reviewed from the perspective of road engineering and other road-related elements, followed by the proposed limitations and future work. Results show that compared with the human-driven traditional vehicle, the ‘Automated Driving System-dedicated’ vehicle enhances the adaptability to as-built roads with the most potential, followed by the vehicle equipped with active safety systems, while the driver assistance and partial/conditional driving automation are inadequate in adaptability. The main problems of existing studies include: It is difficult to summarize and calibrate those functional differences between varied levels and their required design values for road design parameters; Testing road scenarios are mostly in ideal conditions. The considered automation levels are limited. Experiments are limited in the scale and considered samples; The interaction mechanisms between intelligent vehicles and road geometric elements, pavement performance, and road signs & markings condition or other road-related elements were studied insufficiently. Researchers lack approaches to obtain data on the driving characteristics of intelligent vehicles corresponding to different driving scenarios. Therefore, it is suggested that: The information-sharing of critical parameters of human vs. machine functional differences associated with roadway design elements should be emphasized and promoted; Combining realistic and interactive road scenarios, high-precision physical perception sensor models, vehicle dynamics models, and microscopic traffic flow models, and utilizing technologies of the automatic generation of virtual test scenarios, and search and generalization of corner-case scenarios to conduct virtual simulations for intelligent vehicles to break through the depth and breadth of research in this field. Explore the characteristic indexes and evaluation criteria of driving adaptability of different-levels intelligent vehicles to roads, and then evaluate and predict that adaptability under complicated road scenarios and adverse roadway conditions more accurately and effectively.

Keywords: traffic engineering; intelligent vehicle; review; driving adaptability to roadway infrastructures; driving automation level; road geometry; road pavement

Received 25 Oct. 2021

Funding: National Natural Science Foundation of China (51878163); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX18_0152); Transportation Science and Technology and Achievement Transformation Project of Jiangsu Province (2020Y19-1(1))

*Corresponding author. *E-mail address:* sywangseuer@seu.edu.cn.

<https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.10.019>

0 引言

凭借日益成熟的硬件设备与智能软件理论及系统,智能驾驶技术将从微观车辆层面影响传统道路交通系统^[1],预期为提高行驶安全性与驾乘舒适性、提升交通效率与通行能力、减少车辆污染排放与道路交通基础设施建设成本提供有效解决途径^[2-4]。然而,目前智能驾驶技术智能化水平仍然处于初期阶段,且应用规模有限^[5],并未达到上述预想效果。

根据自2014年以来美国加利福尼亚州机动车管理局发布的已登记智能驾驶制造商(如Waymo、Pony.ai)年度事故报告与系统脱离报告数据显示,智能车辆行驶安全及系统可靠性问题依然严峻^[6-8]。事实上,已经发生多起涉及智能车辆的交通事故也证实了在面对极具多样性的实际驾驶场景时,其功能表现可靠性及鲁棒性还需进一步的检验。在实际驾驶场景中可能出现种类、数量繁多的极端工况^[9],如2020年6月1日,一辆开启Autopilot的特斯拉

Model 3 径直与早已侧翻在内侧车道上的白色货车相撞;2021 年 8 月 12 日,一辆启用 NOP(Navigate on Pilot)领航辅助功能的蔚来 ES8 在高速公路行驶时,与前方缓慢行驶的轻型施工作业货车发生追尾。酿成事故的直接原因主要包括^[10-12]:①智能车辆自动化系统功能缺陷,如未辨认出前方目标物类别、激活紧急制动操作失效或警告驾驶人功能失效等;②自然驾驶人过于依赖自动化系统,未关注周围道路交通环境,导致在系统被动退出后未能及时接管车辆操作。而更深层次的原因则为“新兴”的自动化系统合并甚至取代原本能够独立完成车辆操控的驾驶人(随驾驶自动化等级提升而改变,详见第 1.1、1.2 节),导致“原有”道路交通系统中驾驶人因素与道路之间的耦合作用发生改变。具体而言,现役道路基础设施以自然驾驶人与传统人工驾驶车辆构成的主体作为主要服务对象,其设计建设以驾驶人特性(如视觉特性)及操控能力作为主要依据,因此需要重新审视其与智能车辆的耦合关系。

智能驾驶技术路径包括自主智能驾驶与网联式智能驾驶^[13],前者通过自身车载传感器、计算单元、线控系统等进行与驾驶人“感知-决策-执行”行为相似的过程^[14],从而操控车辆行驶;而后者在前者基础上,利用车联网将道路交通系统中各要素的信息进行全面、有机结合^[15],助力智能驾驶技术在“感知-决策-执行”过程中的功能强化及表现升级。然而,由于网联式智能驾驶技术路线对“车端”与“路端”均提出了“智能化”高要求,现阶段车路两端难以实现以协同推进的态势发展^[16]。同时,面对数量、里程庞大的现役道路基础设施,难以预测最终实现的“网联化”覆盖规模。因此,当前亟需解决的问题是:以自主智能驾驶为主要技术形式的智能车辆是否能够适应于现役道路基础设施?

尽管自动化系统与自然驾驶人在驾驶功能层主要内容保持一致,仍然为感知层、决策层与控制层^[17],但两者在实现手段、运行模式与功能表现方面却存在较明显差异,如自动化系统利用摄像头、毫米波雷达与激光雷达等传感器接收来自道路交通环境中的障碍物、标志、标线等目标信息^[18],而驾驶人则依靠人眼、耳朵等感觉器官完成驾驶过程中的道路交通环境及事件感知。此外,在现阶段智能驾驶常见的“人机共驾”^[19]模式中,驾驶人还需应对可能发生被动接管车辆操纵控制权的安全性关键场景^[20]。本文将上述自然驾驶人与自动化系统在驾驶功能层中可能存在的实现手段、运行模式与功能

表现等差异简称为“人机功能差异”。这些差异势必对原有仅依靠驾驶人操控的车辆与仅面向传统车辆设计、建设道路的相互作用机制产生影响。然而,目前较少研究从道路工程角度,即道路几何、路面工程及其他道路要素方面进行探索。虽然相关研究发现智能车辆对现役道路设施及现行道路设计规范的适应性问题不可忽略^[21],但鲜有相关技术规范与设计指南涉及道路工程优化或考虑其对智能车辆影响的内容。美国国家公路合作研究计划中指出“应主动积极地改造建设面向智能网联车辆的道路基础设施,避免在智能网联技术实际部署时被动应对”,并将修缮道路线形、道路标线等令智能车辆“看得见路”与“简化道路线形”以支持智能车辆实际部署作为提升道路工程适应性的 2 项主要工作内容^[22]。

本文旨在总结面向智能车辆的现役道路设施行驶适应性,即现役道路基础设施承载智能车辆行驶的适宜程度^[23-25],既可以从道路几何条件、路面性能与道路标志、标线状况以及相关现行的道路设计规范对智能车辆“感知-决策-执行”相关特性的匹配程度进行评价,即分析智能车辆对现役道路设施影响;也可以直接评估在现役道路设施条件下行驶的智能车辆行为特征(如安全行驶速度、自动化系统功能脱离率等),即分析现役道路设施对智能车辆直接影响。为了掌握面向智能车辆的道路设施行驶适应性的研究现状,本文阐述自主智能驾驶定义与驾驶自动化等级分类,剖析不同等级间的人机功能差异,将其与道路设计要素相关联,聚焦道路几何、道路路面及其他道路要素方面研究进展与不足,并展望该领域未来的研究方向。

1 自主智能驾驶特征

由于智能驾驶主要功能层涉及的关键技术众多,并且不同驾驶自动化等级车辆所适用的道路场景与采用的功能评价指标各不相同,造成智能驾驶道路行驶适应性研究十分复杂。本文从道路设计角度出发,首先明确自主智能驾驶的定义及其驾驶自动化等级划分,对比分析不同等级场景下自然驾驶人或自动化系统在驾驶活动中需要承担的角色及功能特点差异,归纳并探讨其中影响道路设计的差异特征。厘清与道路设计要素相关联的差异特征及其在不同等级间的变化趋势,一方面可为后续智能驾驶道路行驶适应性研究提供参考,并对智能驾驶相关试验设计和模型构建起到重要指导作用;另一方面也可为从事智能驾驶技术开发的人员提供改进思

路与建议。

1.1 自主智能驾驶定义与驾驶自动化分级

自主智能驾驶是指搭载先进的感知传感器、控制器与执行器等装置,依靠视觉感知、雷达和全球定位及人工智能等技术,使车辆具有感知定位、决策规划和控制执行能力^[26],能够令自动化系统从辅助自然驾驶人,进步至“人机共驾”^[27],最终在不受任何人为干预的情况下实现自主安全操控的新一代车辆形式。

为了方便对自动化系统功能演变的各个阶段(从无自动化提升至完全自动化)进行统一描述,德国和美国通过各自国家公路交通安全相关管理部门,先后确定了针对自主智能驾驶自动化等级划分及定义^[28-29]。之后,国际机动车工程师学会^[30]根据自动化系统在持续性的动态驾驶任务及其接管中承担的角色,并考虑系统设计运行条件是否受限,将驾驶自动化等级进一步细分为6级(L0~L5),这也成为目前业界较为认可的自动化分级标准。在此基础上,由中国工业和信息化部发布的《汽车驾驶自动化分级》(GB/T 40429—2021)将L0修正为“应急辅助”,即主动安全系统(Active Safety System, ASS)功能特征(如:自动紧急制动、前向预警),以区别L0完全无自动化,即传统人工驾驶。大量研究表明,ASS有助于驾驶人提前感知目标物与事件,并及时做出正确响应^[31-32]。Wang等^[21]将L0中包含ASS部分称为L0⁺,而完全无自动化则称为L0⁻。该区分有利于下文探讨不同自动化等级间的功能特点与差异。

截止目前,搭载L0⁺及L1级别的先进驾驶辅助系统(Advanced Driver Assistance System, ADAS)车辆正在大量占据市场份额;L2级别的车辆(如Tesla Model 3、蔚来ES8等)正处于商业化落地发展阶段,市场渗透率和应用规模仍然较小;L3及以上级别的智能车辆由于受技术、法规及消费者接受度等因素限制,仍处于试验和区域性示范阶段,距离大规模商业化落地仍需要时间验证可靠性^[27]。因此,根据自动化系统演化、商业化及普及率发展趋势,目前业界已经默认未来一段时间道路交通系统中的自主智能驾驶将处于不同等级共存的混合状态,且以辅助驾驶(L1、L2)、低等级自动驾驶(L3)功能特征作为其驾驶行为的主要展现形式^[33]。

此外,由于目前高等级自动驾驶现实应用场景条件及技术细节尚未有定论,许多研究中对于其功能层表现(如感知传感器有效视距、自动化系统反应

时间等)的假设或限定条件有失偏颇,容易使分析结果与实际产生较大差异。因此,相关学者已经将关注对象从L4、L5转变为L0⁺~L3^[34-35],例如探索L0⁺~L3的纵、横向驾驶行为特性与L1~L3接管过程中驾驶人的人为因素。

1.2 不同驾驶自动化等级中人机功能差异

根据上述驾驶自动化等级划分依据,各等级中自然驾驶人与自动化系统在车辆行驶过程中需要或允许参与的驾驶/非驾驶活动如表1所示。可以明确,L0⁺~L4均采用人机共驾技术结构,而L0⁻对应完全由驾驶人操作阶段,L5为完全由自动化系统驾驶阶段。根据宗长富等^[36-37]对人机共驾技术的划分可知:L0⁺采用单驾双控结构;L1在车辆纵横向运动控制层面属于并联型双驾双控结构;L2~L4为串联型双驾单控结构。

如图1所示,本文按照具有相同车辆驾驶技术架构的驾驶自动化等级(图1左侧)进行整理,并总结不同等级车辆用户的代表性特征(包括自动化系统参与度、车辆用户驾驶绩效、驾驶人驾驶负荷^[21])变化趋势(图1右侧)。由图1可以看出:不同驾驶自动化等级车辆间对应的驾驶技术架构差异,其本质是自然驾驶人与自动化系统(如果有)在同一时间维度中驾驶任务控制权分配的区别。其中:串联型双驾单控结构在使用时存在控制权切换过程,L2系统发起的强制性退出需要驾驶人立刻接管;L3系统在发出接管请求后能够执行一定程度的风险减缓策略,但依然要求驾驶人及时接管;L4系统发出的接管请求则无需驾驶人响应,系统能够自行获得最小风险状态。

需要注意的是,尽管驾驶人在L2仍被要求时刻监控驾驶环境(表1),但通过现场及驾驶仿真测试结果表明,此时驾驶人更倾向于分心驾驶,接管后驾驶绩效及反应能力较L0⁻驾驶人均有所降低与减弱^[38-39]。同时,在接收到系统发出的接管信号后,由于L3系统分担了绝大部分动态驾驶任务,驾驶人需要从低驾驶负荷和低情境认知状态中恢复驾驶意愿及稳定驾驶能力^[40]。因此,驾驶人常需要较长时间完成接管,并且接管后的驾驶绩效较L0⁻显著降低^[41]。尽管在该“额外”的接管时间内,自动化系统能够提供有限的风险减缓策略(如以较小减速度制动^[30]),但可以预见,这势必直接影响自主智能驾驶的道路行驶风险及适应性。

对于L0⁺对应的单驾双控结构,ASS作为驾驶人操作控制的补充与改善,持续参与监控,有效降低

表 1 不同驾驶自动化等级车辆用户角色

Table 1 Roles of Vehicle Users in Different Driving Automation Levels

驾驶/非驾驶活动			车辆用户(x,自然驾驶人;y,自动化系统)角色 ¹													
			L0 ⁻		L0 ⁺		L1		L2		L3		L4		L5	
			x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
动态驾驶任务	持续性的车辆运动控制	横向	√	√	×	√ ²	×	×	√	×	√	×	√	×	√	
		纵向	√	√	×	×	√ ²	×	√	×	√	×	√	×	√	
	目标和事件探测与响应	道路交通环境	√	√	√	√	√ ³	√	√	×	√	×	√	×	√	
		车辆功能状态	√	√	√	√	√	√	√	√	√	×	√	×	√	
		自动化系统功能状态	×	√	√	√	√	√	√	×	√	×	√	×	√	
动态驾驶任务接管			√	√	×	√	×	√	×	√	√ ⁴	√	√	√		
非驾驶活动 ⁵			×	×	×	×	×	×	×	√	×	√	×	√		

注:¹当车辆用户参与该项驾驶/非驾驶活动时,则为“√”,否则为“×”;²当自动化系统承担持续性的纵向或横向运动控制时,自然驾驶人需要承担剩余方向的运动控制^[30],表中以自动化系统承担持续性纵向运动控制(如自适应巡航控制)为例;³自动化系统承担与运动控制相同方向的道路交通环境探测与响应^[30],表中以纵向道路交通环境为例;⁴自动化系统在发出接管请求后,需要在自然驾驶人接管前的一定时间内继续执行动态驾驶任务^[30],如最终自然驾驶人未响应则适时执行风险减缓策略;⁵非驾驶活动包括与视觉、听觉及肢体相关的非驾驶活动^[37]。

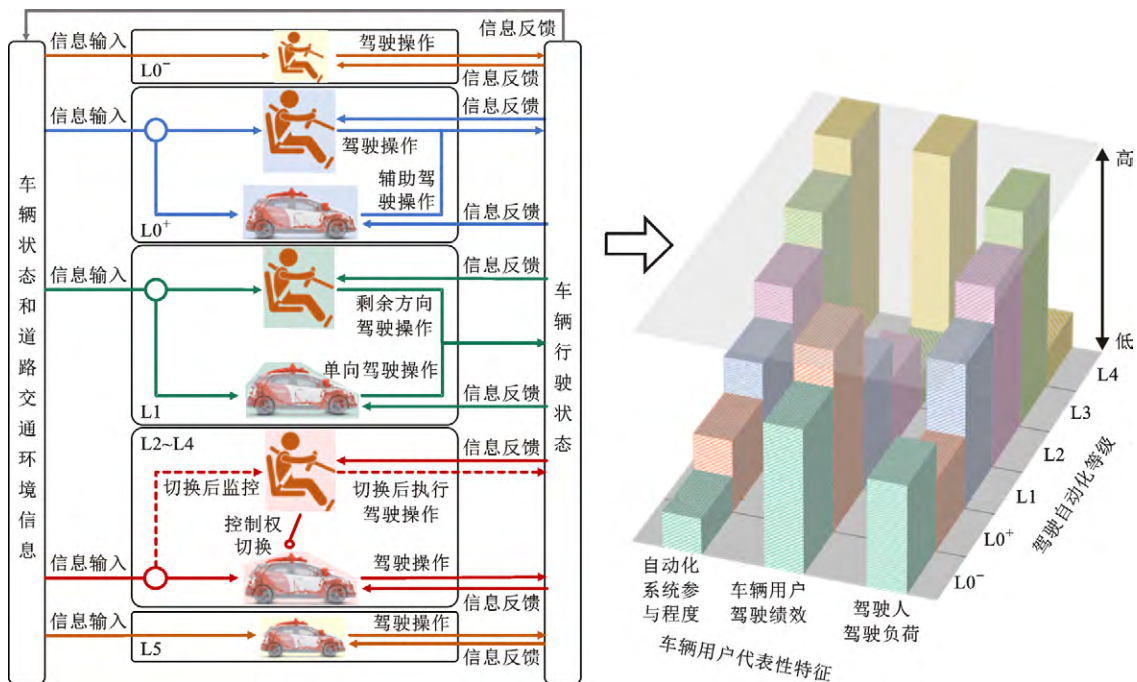


图 1 不同驾驶自动化等级车辆驾驶技术架构与车辆用户代表性特征变化趋势

Fig. 1 Driving Technology Architecture and Variation Trends of Typical Characteristics of Vehicle Users at Different Driving Automation Levels

了驾驶人的驾驶负荷^[42]。需要注意的是,不同于 L2 与 L3, L0⁺ 具有独立驾驶能力的只有驾驶人(即驾驶人持续在环),其中被降低驾驶负荷的驾驶人倾向于改善驾驶绩效^[43]。因此, L0⁺ 的安全性已受到了业界的广泛认可,且很少引发目前绝大多数现役道路基础设施(面向 L0⁻ 车辆设计建造)的适应性困扰。

L1 采用的双驾双控结构,其本质上是 L0⁺ 系统在驾驶操作性能方面的进一步提升,能够独立完成持续性的纵向或横向车辆运动控制及监控,比较典

型的功能分别为自适应巡航控制(Adaptive Cruise Control, ACC)与车道居中控制(Lane Centering Control, LCC)。其中,围绕 ACC 的纵向智能驾驶运动特性及其对道路交通系统影响的研究已经受到广泛关注^[34]。与 L0⁺ 驾驶人相比, L1 驾驶人在系统参与时,其驾驶负荷与驾驶操作程度明显下降;但在系统退出并强制要求驾驶人接管后,其驾驶负荷显著增加且驾驶绩效降低,呈现危险态势^[38]。目前较少研究考虑到 L1 系统的局限性,如不利道路条

件引起的系统强制性退出以及驾驶人驾驶绩效的不规律、易突变趋势等。因此,为了有效评估配备ACC等低等级自动化系统功能车辆的道路行驶适应性,还需更细致、更系统地进行相关研究。

针对L2、L3接管阶段,相关学者开始围绕设计何种形式接管请求以及如何选择切换时机进行探索,并量化分析多种测试场景要素对不在环驾驶人接管行为特性(如接管时间、接管后驾驶绩效)的影响机制^[37,44]。目前关注的测试场景要素除接管命令形式与切换时机外还包括:①驾驶人生理、心理状况与驾驶智能车辆经验;②非驾驶活动形式。然而,现有研究较少考虑车辆行驶速度与道路相关条件(如线形、路面与天气环境)的影响。由于映射实际驾驶状况的测试工况难以穷尽^[45]以及驾驶人特性的多样性,相关研究应该向最低可接受程度发展,并将代表性行驶速度、道路条件纳入影响因素考虑,扩展研究有效性,这有助于为面向智能驾驶的道路行驶适应性分析提供评价手段。

在各自系统设计运行条件范围内,L4与L3人机功能存在较大差异,前者驾驶人已不被要求在环^[46],即不存在系统发起的强制性切换,驾驶人可以在驾驶意愿充分恢复的情况下主动接管驾驶操作。但目前大部分研究忽略了客观存在的系统感知信息处理、数据传输及执行器响应延时^[47],容易造成因假设条件过于理想而导致的误差问题。

根据《汽车驾驶自动化分级》(GB/T 40429—2021)描述,L5与L4车辆相比,突破了系统设计运行条件限制,除受商业及法规等因素限制外,能够在任何可行驶道路环境条件执行全部系统功能。目前,业界对于是否能真正实现L5以及L5驾驶人(位)是否存在等问题尚未有定论。同时,其技术实现预计将与网联式智能技术及车路协同技术紧密结合,仅从自主智能驾驶角度考虑道路交通环境中的L5系统功能可能与现实不符。本文基于上述现实暂时认为L5系统为完全理想条件下的L4,在不涉及以系统设计运行条件作为影响因素分析时,可以将两者功能特征等同考虑。

1.3 链接道路设计要素的人机功能差异

基于不同驾驶自动化等级车辆间对应的驾驶技术架构差异,本文首先按照功能层数据流传播方向分别对驾驶人与系统执行各功能层的器官或软硬件进行归纳,如图2所示。具体来说,自动化系统首先通过多种传感器接收自车和道路交通环境的信息,完成对周围环境的探测与自车定位,并利用感知模

块对传感器数据进行分析处理,实现对目标物或事件的识别与认知;其次,基于上游感知信息融合结果,通过内置预设算法的车载计算平台,即中央处理单元,决定自车行驶轨迹并跟踪;再利用数据传输总线收发上游规划结果,决定每个执行器如电机、油门、刹车等的控制信号;最后,车辆各执行器对控制信号进行响应,并将行驶状态作为外部信号重新反馈至感知层中,实现信息数据流闭环^[17]。与自动化系统对照,自然驾驶人基于自身身体器官及机能能在相同功能层中实现的功能内容一致,但其功能表现却呈现较明显差异,如表2所示。

根据不同自动化等级车辆对应的驾驶技术架构特征,并基于上述差异总结,本文对链接道路设计要素的人机功能差异按感知层、感知-决策层、决策-功能层顺序进行阐述。

(1)感知层

感知传感器配置方案内容主要包括:数量、种类与安装位置,三者均与车辆行车视距(可获取视距)密切相关,进而影响道路几何要素设计,包括:横净距、竖曲线、圆曲线等(具体参见后文“道路几何”研究现状)。具体地,感知传感器数量、种类与安装位置决定了智能车辆的空间视场范围以及目标物能否被感知的可能性。其中,传感器种类涉及该传感器的主要技术参数信息,包括:感知距离,平面/垂直视场角,水平/垂直分辨率等。当考察车路耦合作用时,大多以自车前方道路环境作为主要兴趣区,并以该兴趣区内的动/静态障碍物及其相关交通事件作为感知目标^[48-52],因此本文主要关注车辆行驶状态下的前视感知系统硬件,包括摄像机、毫米波雷达与激光雷达。许多文献^[53-55]已对三者的主要感知任务(目标物)与结果输出、使用成本及在不利天气条件下的感知能力进行了详尽横向对比,结果发现三者在上述方面的面向对象及优缺点界限较为明确。例如,摄像机主要用于道路交通标志和标线的检测识别,毫米波雷达在不利光照条件下依然能够提供可靠的目标车辆运动信息,激光雷达则凭借分辨率优势能够提供详尽的目标物形状信息^[56]。同时,利用三者感知结果融合能够结合个体感知能力的优势,弥补劣势,对于智能车辆完成后续“感知定位-决策规划-控制执行”工作至关重要,被视为满足高等级智能驾驶感知层功能最理想的方案^[57-58]。

此外,理想条件下的高精度地图能够为智能车辆提供丰富的道路先验知识,即精细化的道路层、车

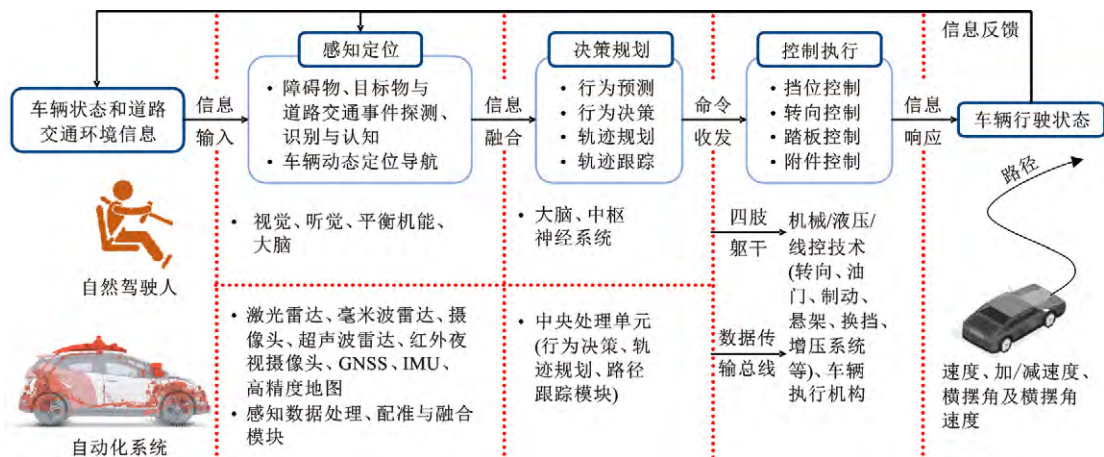


图 2 车辆用户主要功能层执行元件差异

Fig. 2 Differences in Executive Components of Vehicle Users at Primary Functional Layers

表 2 主要功能层归纳与表现差异提取

Table 2 Summary of Primary Functional Layers and Extraction of Performance Differences

功能层	功能层表现差异	
	自然驾驶人	自动化系统
感知层	静态视野范围较大(约 120°),但动态视野随行驶速度增加逐渐聚焦于视野中心线,对周围障碍物、目标物及事件感知能力降低 ^[48] ;擅长信息归纳、处理复杂或有歧义场景信息,但难以同时处理多个感知任务,表现为反应时间增加;学习性强但过程较长,有良好的纠错能力;识别准确率高,但易受不利驾驶环境条件影响	部署多种、多个传感器增加视野(约 360°)与可接收电磁波长范围,结合冗余与信息融合技术保证感知信息准确性、可靠性、鲁棒性,且视场范围不受行驶速度影响,但主要感知传感器(如摄像机、激光雷达)对不利驾驶环境敏感性高,且目前难以克服因硬件分辨率导致的远距离识别障碍物不准确等问题 ^[18] ;能够多通道同时处理多个感知任务,擅长量化测算感知信号,但对于复杂或有歧义场景模式识别能力需要较长的训练学习过程 ^[49]
决策层	擅长判断、预测障碍物、目标物意图及事件未来走向,但易受不利驾驶环境条件影响	决策规划算法能够通过演绎快速获得结果,但处理具有多种解决方案的场景需要较长的训练学习过程,难以实时评估决策规划结果可靠性水平,且算法易受异常值干扰 ^[50]
控制层	易受个体生理、心理状态、驾驶风格影响,导致形成不稳定感知、决策及控制执行结果 ^[26]	通过电信号命令执行机构,以提高车辆转向性、动力性、制动性和平顺性为目标,保证控制执行结果高度一致且可重复,特别是需要驾驶人持续保持警惕的驾驶任务 ^[51]

道网络层、车道线层与交通标志层信息数据^[59]。高精度地图可以作为一种特殊的传感器融入自动化系统,在感知功能层中辅助智能车辆实现高精度定位,并在必要时弥补感知传感器功能失效问题,降低智能车辆感知难度^[60]。具体地,高精度地图结合感知传感器接收的动态交通信息,能够确定道路几何要素、感知目标与自车的相对空间位置关系,其输出结果有利于后续决策层从行驶策略层面优化车辆行驶路径,实现车辆主动安全。然而,高精地图本身难以提供在进行车路耦合作用相关分析时不可或缺的动态交通信息先验知识(如用于行车视距估计时前方道路环境中的车辆信息),尤其对于智能车辆,其对目标物的有效感知距离受目标物本身属性(如尺寸、反射率等)及道路环境、传感器技术参数、道路几何、行驶速度等的综合影响^[61-62]。另外,与网联式智能

驾驶类似,现阶段高精地图受限于高昂采集成本、低效生产方式及地图时效性问题(即地图信息与更新的道路信息不匹配)^[60],难以预测其最终在广泛的智能车辆设计运行条件中的应用规模。因此,本文暂未将高精度地图作为链接道路设计要素的人机功能差异考虑,且该领域暂未涉及其对智能车辆在道路行驶适应性影响方面的讨论,更多关于高精度地图在智能车辆路径及运动规划领域的作用可以参考其他的综述文章^[60]。

冗余安全机制设计要求配置多数量传感器,是保证智能驾驶行驶安全性与系统可靠性的先决条件。目前,不同车企及智能驾驶技术公司的智能驾驶产品设计方案间存在技术保护与壁垒,并且对成本及安全阈值等因素考虑各不相同,间接导致面向同一自动化等级的传感器配置方案不一致,多体现

在数量差异。但业界对于传感器种类和相对车辆的安装位置已形成较为统一的认知^[21],如图3所示(以Waymo的L4测试车为例,车型为Lexus RX450h)。由图3可以看出常见传感器相对安装位置(高度)为:①摄像机安装于车内后视镜与车顶;

②毫米波雷达安装于保险杠与车前灯;③激光雷达安装于车顶与保险杠。其中,车顶激光雷达为获取更大的视场范围常采用多线束环视/机械激光雷达,而保险杠位置则使用线束较少的前向激光雷达。

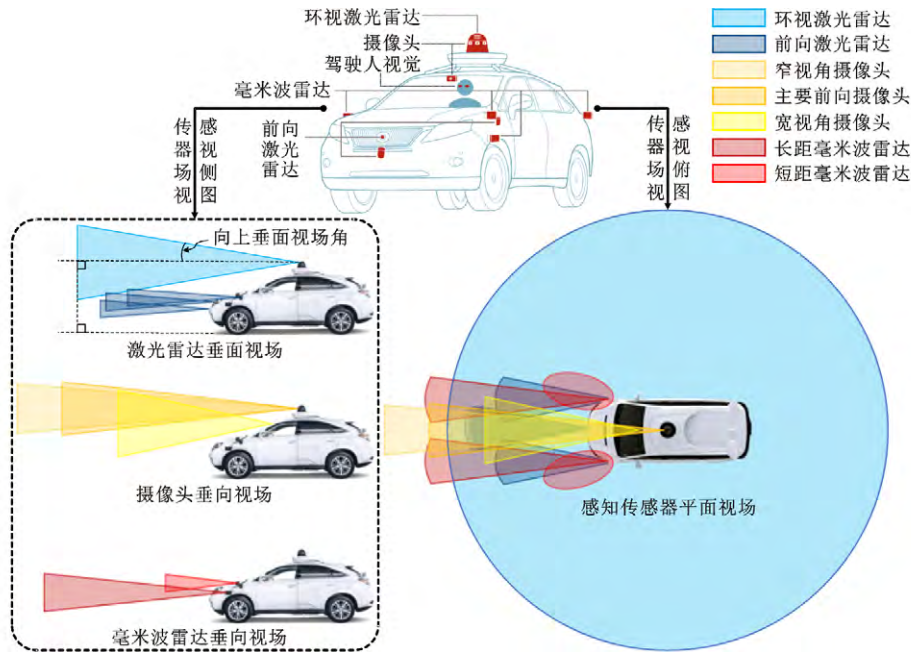


图3 智能车辆前视感知系统平面与垂面视场

Fig. 3 Horizontal and Vertical Field of View of Forward Perception Sensors on Intelligent Vehicles

本文参照 Mohammed 等^[53]列举的多种典型纵向驾驶辅助及自动化系统常用的传感器种类,将系统功能与驾驶自动化等级对应,整理不同等级采用的传感器种类,包括:①L0⁺~L2系统中的摄像机、毫米波雷达;②L3~L5系统中的摄像机、毫米波雷达、激光雷达。其中,由于Tesla一直主张的利用摄像机感知实现高等级智能驾驶技术方案暂未实现,本文不作考虑。此外,由于夜晚光照条件不足,L0⁻的行车视距受车前灯光束扩散角限制,而有源传感器(如毫米波雷达、激光雷达)能够在夜晚条件保持工作,则与车前灯光束扩散角相对应的为传感器向上垂面视场角(图3)。

在此基础上,需要关注不同等级传感器配置方案在动态行驶工况中对目标物的实际识别率(或有效感知距离)。如图4所示(图4中S为智能驾驶自车与前方目标车辆相对距离),由于激光雷达水平/垂直分辨率有限,自车搭载的激光雷达横/垂向分布线束能够抵达目标车并返回被接收的点云,随两者相对距离增大而逐渐衰减,同时该衰减特性随自车行驶速度增加或不利天气条件(如雨、雾)影响而加剧^[63]。这表明,即使目标物出现在传感器感知距离

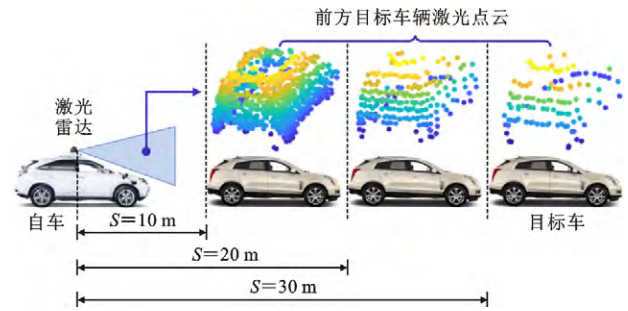


图4 不同智能驾驶自车与前方目标车相对距离下的目标车激光点云成像

Fig. 4 LiDAR Point Cloud Imaging of Target Vehicle at Different Relative Distances Between Ego Intelligent Vehicle and Target Forward Vehicle

内,感知层仍有可能因传感器接收到的目标物信息数据不足而导致感知算法无法准确识别目标物^[64]。此外,相关研究还需探索利用多传感器融合技术以应对不常见交通参与者或障碍物(如车头与车尾相距较远的半挂车、路中因事故或故障停止的车辆、车身颜色与环境背景色相似的货车等),目的是提升准确识别率,倾向最高安全边界发展。然而,这两者均属于现象类研究,依托传感器硬件水平与感知信息

融合技术呈明显相关性,需要大量的实车数据或基于高精度传感器物理模型的仿真试验数据作为支撑。现有动态行驶工况目标物识别研究,较少关注道路相关条件及目标物种类形状等特征,且未建立两者之间的联系,因此研究结果难以服务于智能驾驶行车视距的精确测算。

(2)感知-决策层

由于自然驾驶人的认知特性对应自动化系统中的感知层全部功能与决策层部分功能(包括信息获取、情景理解和短时预测),与道路几何设计要素链接的人机功能差异还体现在车辆用户的感知-反应能力,常使用感知-制动反应时间(Perception-brake Reaction Time, PbRT)^[65]表征,部分研究还通过感知-转向反应时间或感知-转向-制动反应时间进行评估^[66-67]。其中,量化 PbRT 可用于测算需求停车视距,而量化转向相关反应时间可用于判断反应视距与超车视距。

Wang 等^[21]为分析不同自动化等级特征对公路几何设计的影响,根据驾驶人、系统认知过程及控制权切换过程特征,对不同等级车辆用户在安全性关键场景中的感知反应时间及其组成成分进行划分,如图 5 所示(图 5 中相同色块代表感知反应过程中人、机相对应成分)。其中:L1、L2 系统通过将感知层输出结果与目标参数预设阈值(如碰撞时间、相对距离)比较,判断当前行驶工况是否包含于系统设计运行条件内,若超出则发出接管请求并退出,而 L3 系统则需要通过决策层算法判断是否请求接管。

如前所述,目前围绕如何量化分析 L2、L3 驾驶人感知反应时间或接管时间并建模预测已成为研究焦点,但作为现象类研究,其结果依托行驶工况、接管请求形式(听觉、触觉、视觉等)与驾驶人接管经验等呈明显相关性,需要大量试验支撑。其余等级情况类似,相关研究应该向最低可接受程度发展,期望获得包含大部分水平驾驶人个体应对结果,如 90 或 95 分位值,以求为后续道路行驶适应性研究提供可靠依据。

(3)决策-控制层

由图 2 可知,车辆纵、横向运动学变化量是控制层输出信息的响应表现,该信息为上流决策层输出的轨迹信息,包括路径信息与速度信息。

首先,路径信息中人机功能差异主要体现在横向路径方面。理想情况下,承担横向动态驾驶任务的自动化系统功能(如 LCC)将持续跟踪自车所在车道中线。与驾驶人相比,系统操作车辆轮迹横向

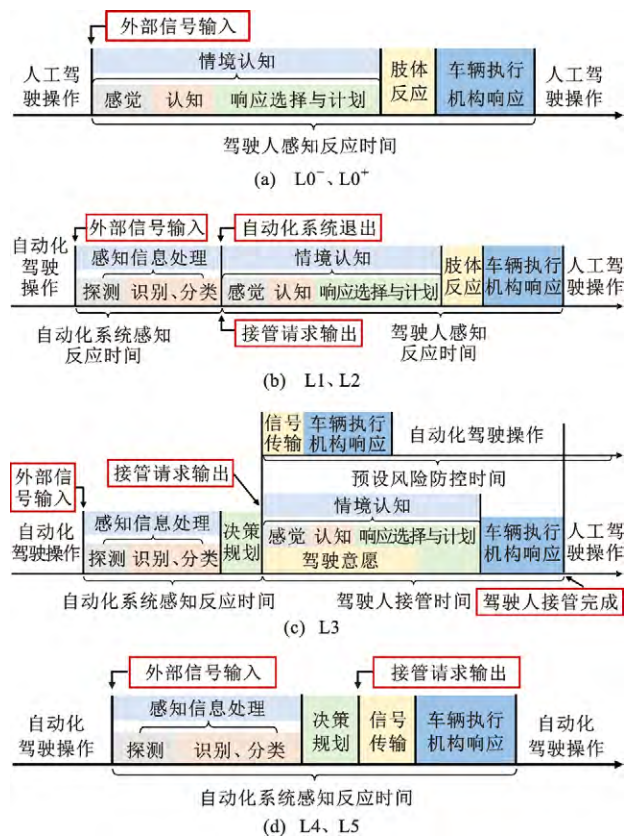


图 5 不同驾驶自动化等级车辆用户感知-制动反应时间组成成分

Fig. 5 Decomposed Perception-brake Reaction Time of Vehicle Users in Different Driving Automation Levels

分布更集中且距车道中线横向偏移极值较小^[68],车辆荷载渠化现象加剧,进而对道路路面性能造成负面影响,如疲劳、开裂、车辙等^[69](具体参见后文“道路路面”的研究现状)。Zhou 等^[70]利用高等级智能驾驶参赛车辆在直线路段的实测数据,发现单车道车辆荷载横向分布仍符合正态分布,但标准差较驾驶人操作传统车辆减小了至少 3 倍。此外,稳定且集中的横向路径信息也将引发关于缩减行车道宽度命题的关注^[71](参见后文“道路几何”的研究现状)。

纵向路径信息差异需要以多车形成的车队为整体进行考虑。在纵向动态驾驶任务中,当多辆非网联车辆利用自动化系统功能(如 ACC)形成连续跟驰车队时,期望获得更短的跟车距离,间接削减了路面材料的自愈能力,而多次重复一致的纵向路径也一定程度上加剧了路面结构的损伤积累^[72]。然而,目前 ACC 的设计开发目标旨在保障驾乘安全性与舒适性,其跟车距离与驾驶人操作结果无显著变化,甚至距离更长^[73-74]。此外,现阶段车队暂无稳定、可靠的车-路、车-车间网联技术支持,组织形式以两车车队构成为主。其中,头车为传统人工驾驶车辆,跟

随车包括 L1~L3 车辆^[75]。如前所述,由于 L1~L3 车辆中驾驶人仍然被要求在环,系统为保证驾驶安全其跟车间距(常通过稳态车间时距控制,一般取 1.5~2.2 s^[6])设定仍然趋向于保守。因此,目前预期的人机功能差异(如上述“更短的跟车距离”)暂未明显呈现于纵向路径信息中。值得注意的是:一方面,现有 ADAS 及 L3 系统功能应用场景或设计运行条件较多局限于理想条件^[71],对于在不利道路相关条件下(如车道标线磨损、道路曲率较大及车道宽度较小)的纵、横向路径跟踪功能表现,由于现场测试危险性及其成本较大,功能层有效边界尚未明确;另一方面,高等级(L4 及以上)智能车辆尚未实现商业化量产,难以获取其在道路测试过程中匹配的道路条件信息,这对真实评估系统潜在的操控功能优越性及其与驾驶人操作差异特征造成极大困难。同时,这也容易造成相关研究人员假设或限定条件过于理想化,使分析结果较实际情况更加乐观。

其次,与路径信息中人机功能差异主要体现在横向维度相反,速度信息中需要更加关注纵向方面的人机功能差异。系统凭借感知-反应能力优越性与决策层算法稳定性,期望获得满足驾驶人或乘客舒适性要求的稳定且一致的速度信息^[51],如以匀速、较小的加减速度或较小加减速度变化率行驶。其中,智能驾驶纵向速度及加、减速度特性均与道路

几何设计与路面性能密切相关^[76]。尽管较多研究开始利用实车与仿真试验探究不同等级智能驾驶纵向速度及加、减速度特性,但关注点仍然集中在直线路段的跟驰场景与重要道路交通节点位置^[77-79],如交叉口、匝道分合流端等。一方面,缺少对不利天气、复杂线形等道路相关条件下智能驾驶速度信息的收集,难以厘清与道路几何及路面条件强相关的智能驾驶真实速度信息特征;另一方面,针对驾驶人接管后的驾驶绩效(如速度稳定时间),相关研究缺少同一时间维度下的道路信息,无法为后续全面、系统分析智能驾驶道路行驶适应性研究提供可靠依据。

2 智能车辆道路设施行驶适应性研究现状

本领域现有研究着眼于链接道路设计要素的人机功能差异,从道路几何、路面性能及其他道路要素方面分析探讨道路设计要素、属性及其相关因素与智能车辆的相互作用机制,进而评价面向智能车辆的现役道路设施行驶适应性。本文通过归纳总结,分别剖析道路几何(包括:平面线形、纵断面线形、横断面设计、组合线形)、道路路面(包括:路面性能、养护管理)以及其他道路要素(如道路标线)等方面研究(图 6),以期面向智能车辆的现役道路设施行驶适应性分析提供参考建议。

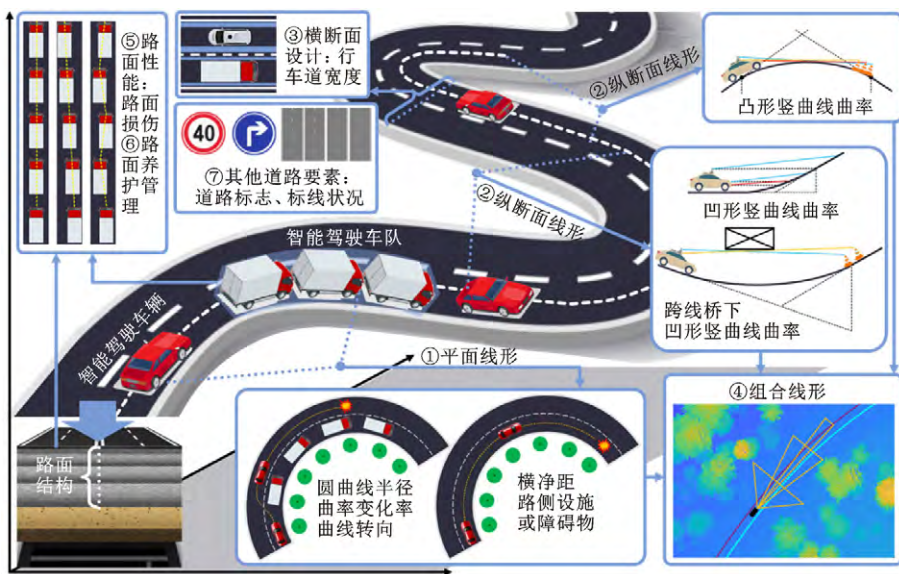


图 6 现有研究主要内容

Fig. 6 Main Contents of Current Related Work

2.1 道路几何

本文根据研究方法、研究对象和研究目标梳理了近期量化分析道路几何要素与智能车辆相互作用

机制的研究,如表 3 所示。其中,混合方法指在实测数据基础上进行的理论分析,如 Gouda 等^[23]在实际道路激光点云数据基础上,假设感知传感器视场为

表 3 道路几何要素与智能车辆影响分析研究概况

Table 3 Summary of Studies on Impact Analysis of Road Geometric Elements and Intelligent Vehicles

研究方法	研究对象			研究目标	文献
	车辆类型	人机功能差异	道路几何要素		
理论分析	L5 小客车	感知传感器配置方案、感知-制动反应时间	凸/凹形竖曲线曲率、组合线形	自动化系统功能特征对道路几何设计的影响	[24]
	L2 小客车		凸/凹形竖曲线曲率		[80]
	L0+ 货车、L5 小客车		凸形竖曲线曲率		[81]
	L0+~L5 货车		横净距、凹/凸形竖曲线曲率	自动化系统功能特征对道路几何设计的影响;行驶速度限制 ¹	[82]
	L2~L4 货车车队;小客车(未规定等级)	感知传感器配置方案、感知-制动反应时间;车队间跟车距离	圆曲线半径、行车道宽度	最小圆曲线半径、行驶速度限制	[83]
实测分析	L2 小客车	感知层、决策层、控制层 ²	圆曲线半径、曲率变化率、曲线转向	行驶速度限制	[84]
			行车道宽度	道路几何设计对自动化系统功能特征影响	[71]
			凸形竖曲线曲率		[81]
混合方法	小客车(未规定等级)	感知传感器配置方案、感知-制动反应时间	组合线形	行驶速度限制	[23]、[25]

注:1 行驶速度限制广义上指为保证自动化系统功能正常运行的最大行驶速度,狭义上可以为车辆操作控制权由系统被动切换至驾驶人时的行驶速度,在文献[84]中被称为“Automated Speed”,或为行驶视距与停车视距相同时的临界行驶速度;2 实测分析采用智能驾驶实车,人机功能差异体现于全部功能层。

截头椎体(图 7),利用计算机辅助技术自动化提取实际道路组合线形条件下的行车视距,并推导理论行驶速度限制。由表 3 可知:研究目标宏观上为解析自动化系统功能特征与道路几何设计的相互影响,微观上则聚焦于两者具体考虑的要素,如行驶速度限制、最小圆曲线半径、车辆操作控制权是否由系统被动切换至驾驶人等。

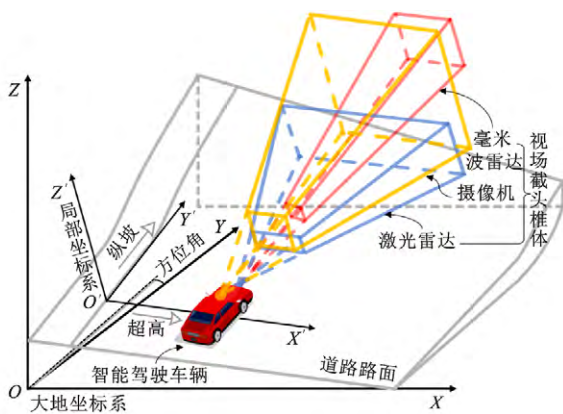


图 7 组合线形条件下感知传感器视场截头椎体示意

Fig. 7 Illustration of View Frustums of Perception Sensors on Combined Alignments

已有文献研究方法、研究对象虽然有一定差别,但在同类研究目标中的结果存在相似性。为保证道路行驶安全性,需要考虑各等级车辆可能出现的驾驶绩效最低可接受场景,如 L3 车辆操作控制权被

动切换至驾驶人。与仅依靠驾驶人操作的传统 L0⁻ 车辆相比,L4、L5 车辆配备不再强制要求驾驶人参与驾驶活动的自动化系统,L0⁺ 车辆仅为驾驶人操作提供支持,这 2 类车辆需求的平、纵几何设计指标更加“宽容”,即趋向于低标准指标,并且在现役道路行驶时能够达到更大的限制速度;与之相反,搭载仍然要求和驾驶人分时、分权控制的 L1~L3 系统车辆需求的几何指标则更“严苛”、限制速度更小,这有可能导致现役道路几何设计条件不能满足智能车辆预期行驶速度。各等级中驾驶人与自动化系统(如果有)的功能差异是上述车辆对几何设计参数有不同“需求”的内在原因。

此外,对于智能车辆与横断面设计的相互作用分析,现有研究聚焦于讨论前者是否能一定程度上缩减行车道宽度^[85]。Othman^[86]总结了现有利用定性分析方法的研究结果,认为高等级智能车辆凭借其稳定、理想的跟踪行车道中线能力,预测其能够将现有面向传统人工驾驶车辆的行车道宽度(约 3.6 m)缩减 20%~25%至 2.7 m。然而,鲜有研究通过量化分析讨论并验证相关结论。García 等^[71]利用 L2 实车开展现场测试,测试场景为城市主干道直线段,平均车道宽度为 2.70 m,其根据测试期间内自动化系统横向控制功能参与度评价被测车道宽度对试验车辆的行驶适应性,发现控制权发生被动切换

的临界车道宽度为 2.72 m。Shladover 等^[87]则开展了面向公共交通专用车道场景(车道宽度为 3.70 m)的研究,发现高等级智能驾驶(L4)的需求车道宽度可降至 3.0 m。可见,相关的定性定量研究结论与上述其他道路几何指标受不同等级影响的变化趋势具有相似性,即高等级智能驾驶有潜力缩减原有车道宽度,而低等级车辆需求车道宽度则与现状差别较小。需要注意的是,行车道宽度及其他横断面设计要素(如路肩宽度)的确定除了需要考虑单车横向运动特性外,还需从道路交通系统宏观层面(如路段、路网交通流量)考虑添加安全、效率等作为目标或约束,并讨论由于横断面设计变化对周围交通个体行驶安全及整体交通流特征等可能产生的影响。现有研究仅见 Ghiasi 等^[88]将行车道宽度作为交通流模型输入,以公路流量最优为目标探讨传统人工驾驶车辆与智能网联车辆混合流背景下的车道管理方法。由于本文主要从自车微观层面关注智能车辆与道路工程的直接相互作用,因此暂不涉及交通流属性及其他交通对象的讨论。

需要指出的是,目前研究主要以单车作为对象,或控制其处于自由流场景,鲜有考虑多车或混合流场景(见图 6“①平面线形”)。García 等^[83]通过几何解析对传统车辆和智能车辆在货车车队靠圆曲线内侧行驶时的行车视距进行解算,进而得到行驶速度限制,结果表明车队的存在将显著降低车辆行车视距,特别是对于传统车辆,而临界圆曲线半径为 2 500 m,即只有当车队在该半径行驶时才能保证周围车辆行驶视距与停车视距持平。多车场景作为真实世界典型驾驶场景,还需要对影响因素中的道路几何要素(如缓和曲线、纵坡、竖曲线等)与自动化系统功能特征(如传感器配置方案)从空间层面进行更细致的研究。另外,本文暂未涉及以道路几何设计作为约束边界条件,进行智能车辆运动轨迹、路线规划及优化研究领域的讨论。

表 3 总结了道路几何要素与智能车辆影响机制的 3 类研究方法,特点如下:

(1)理论分析。直接比较智能车辆与传统车辆在二维平面(即平、纵面)的行车视距及需求停车视距,有利于快速获取现行设计标准下的几何设计要素对应值,满足不同等级车辆行驶适应性初步评估要求。但由于分析过程中链接道路设计要素的相关人机功能差异(见第 1.3 节,如 PbRT、传感器配置方案等)设计值主要依托智能驾驶技术水平假设、已有文献试验结果及传感器产品数据资料,并且难以通过

物理、数学建模实现对不利天气、复杂空间线形条件影响的准确描述,导致该研究方法可扩展性较低。

(2)混合方法。如前所述,该方法采用当前受到广泛关注的数字化道路基础设施前沿技术,直接获取较准确的道路几何三维信息,并利用计算机辅助技术节约计算成本,高效指导智能车辆行车视距检验,并提出视距不足时的限制行驶速度。但目前可获取道路点云数据有限,受采集成本及规模限制难以考察更大范围的几何要素取值影响;此外,由于不涉及构建感知传感器物理模型与对应的感知算法,无法评估传感器真实动态感知模式、效果以及行驶工况中可能对感知结果产生影响的要素(如不利天气条件、路侧障碍物、车辆行驶速度等),因此同样具有与理论分析相类似的缺陷。

(3)实测分析。该方法利用实际智能车辆在公开道路进行试验,与前两者相比,能够获得真实反映出智能车辆与道路几何耦合关系的自动化系统功能具体变量(如 Automated Speed),记录变量实际变化情况,从而根据其在行驶路段间的一致性对行驶适应性进行有效评价。García 等^[84]考察智能驾驶实车在行驶过程中因不利道路几何条件导致车辆操作控制权被动切换的频率,提出“智能驾驶服务水平”概念,从优(A)到劣(F)共 6 级,并据此对道路行驶适应性进行评价。但该方法具有一般现场测试的普遍弊端,如测试成本高、难以保证测试过程安全、考察道路几何要素范围重复造成测试低效,以及道路场景难以定制与控制等。此外,由于仅采用特定配置的自动化系统功能及智能车辆测试,难以验证其分析结果是否可移植于其他智能车辆。因此,将该方法推广应用于行驶适应性评价的可行性还有待商榷。

由于智能驾驶功能层涉及较多端到端的计算过程,难以知晓模型内部运行过程,更无法通过构建复杂物理模型准确描述智能车辆与道路几何相互作用机制,因此在上述研究方法基础上,有必要利用基于丰富道路场景与高精度传感器物理模型、车辆动力学等模型及自动化系统功能模块的智能车辆虚拟测试手段,安全、高效、广泛地开展相关研究,有助于提升该领域研究结果有效性、试验效率,以及研究中待考察的道路场景几何要素、天气条件及智能车辆功能特征的覆盖度。基于场景的智能车辆虚拟测试方法已在智能车辆功能验证试验验证方面展现出强大的应用潜力^[89],如何根据上述要求集成各要素专业模型并打造更加逼真的测试场景,从而更好地服务于

判断智能车辆在不同道路几何条件下的行驶适应性,也将成为智能驾驶虚拟测试领域的关键需求之一。更多关于智能车辆虚拟测试的研究进展可以参考其他的综述文章^[45,89]。

此外,He 等^[90]已尝试将道路几何要素引入面向智能车辆的微观交通流模型中,期望能更好地描述智能车辆受周围行驶车辆影响在曲线、坡道线形条件下的跟驰行驶特征。还有研究人员基于安全势场理论将道路几何要素引入面向智能车辆的跟驰及换道模型中^[91-92],但上述研究仍然选取直线路段对模型进行验证,并未从交通流属性角度考虑多样的道路几何条件对智能车辆行驶特征的影响。利用上述提及的虚拟仿真平台强大集成能力,结合现有成熟的交通流仿真技术^[45],能够在上述交通流领域研究基础上,探索道路几何条件对智能车辆与其他交通对象运行关系的直接及间接作用机制。

2.2 道路路面

与道路几何相关研究类似,现有道路路面领域研究目标为探索自动化系统功能特征与道路路面的相互影响。两者具体考虑要素分别为智能车辆纵向轨迹信息(如车辆荷载横向分布形式、行驶速度限制、跟车距离)与路面损伤程度^[93](如车辙深度、疲劳损伤、不平整度等)或使用寿命及生命周期成本^[94-95]。由于路面性能及其使用寿命与重型车辆交通特征密切相关^[96-97],因此货车及货车车队是现有研究主要关注的智能车辆类型。

着眼于链接道路路面设计的决策-控制层人机功能差异,现有研究通常采用基于有限元仿真^[98]或力学-经验路面设计指南(Mechanistic-empirical Pavement Design Guide, MEPDG)^[99]的计算手段。研究主要围绕评价智能车辆占比、荷载横向分布形式对沥青路面车辙深度、疲劳损伤、路面厚度及生命周期成本的影响展开。此外,针对人机功能差异,Gungor 等^[100]将智能车辆轮迹横向位置与荷载施加间歇期纳入输入变量,模拟了智能车辆与传统车辆形成的混合流,并在损伤计算中考虑车道与车轮轴宽,改进了现有 MEPDG 方法并提出“Wander 2D”柔性路面设计框架。Steyn 等^[69]考虑功能差异中的轮迹横向分布形式、行驶速度以及车辆荷载重量与测试温度特征,建议在已有加速加载试验数据库中寻找具有相似特征组合条件的数据,服务于该领域研究。

由于智能货车的荷载横向分布现场测试数据难以获取,现有研究大多假设其分布形式为“零”偏移^[99],即渠化交通形式。该极端条件将导致路面车

辙深度、疲劳、开裂等病害急剧增加,且该负面影响规模与智能货车交通量占比成正比,显著缩短柔性路面寿命,增加所需的路面设计厚度、初期施工成本以及养护、修复成本等。有关渠化交通对路面性能负面影响的研究已开展较长时间^[69],其结果得到了广泛认可。虽然研究对象为驾驶人操控的传统车辆,但反映至车路耦合关系上与上述假设并无区别。目前仅有 Zhou 等^[70]利用理想条件下封闭路段实测数据统计智能车辆轮迹横向分布特征,基于此评估其对路面疲劳寿命与车辙深度影响;并进一步讨论因车辙深度增加引起水膜厚度积累,导致水滑的限制行驶速度,最终提出不同行驶速度条件下防止水滑发生的临界车辙深度;而 Chen 等^[101]则认为自动化系统有可能模仿驾驶人操控行为,即智能车辆与传统车辆荷载横向分布特征相同。

值得注意的是,如第 1.3 节所述,不同等级智能车辆,尤其是货车,在不同车道宽度、车道线磨损程度及天气条件下的路径跟踪功能表现不尽相同。以轮迹横向零偏移假设作为区别智能车辆与传统车辆的关键差异,势必倾向于获得最不利程度影响结果,难以有效评估前者对路面性能的真实影响。事实上,现阶段货车车队较多以 2 辆车组成,主要组织形式包括:跟随车等级分别为 L1、L2、L3,而头车均为传统车辆^[75]。然而,现有研究尚未见考虑此种车队组织形式及不同等级的讨论。此外,较多研究仅针对特定的天气情况、车辆类型、行驶速度、路面类型、结构及材料,研究结果以受智能车辆影响的路面性能相关变量(如车辙深度)的绝对值或同等条件下相对传统车辆影响的比例系数呈现。这造成了现有研究结果难以相互比较、移植性差,从而难以应用于行驶适应性评价。

另一方面,由于自动化系统决策-控制层功能特征可被人为设计及规定,研究人员受此启发,构想了多种智能货车在目标车道内可能的荷载横向分布形式,如均匀分布、双峰高斯分布、两段式均匀分布等。对比传统车辆,Chen 等^[98]发现上述分布形式均对沥青路面性能产生积极作用,其中 2 段式均匀分布形式最优。进一步,Chen 等^[101]考虑不同车辆载重,以车道内路面疲劳损伤最小为优化目标,提出智能车辆横向行驶位置优化算法。结果表明,有意识对智能车辆横向行驶位置进行控制将对改善路面寿命、节约道路生命周期成本产生正面效应。此外,研究人员将此设想扩展至车队场景,以车辆燃料成本与道路生命周期成本(包括初期施工成本、养护及修

复成本)总和最低为目标,讨论车队中车辆横向偏移距离、车辆数、跟车距离^[72]以及车队与车队间的横向偏移距离^[100]。Song等^[102]开发了计算流体力学与有限元仿真联合模型,发现较小的跟车距离与横向行驶位置的交错能够同时实现节约燃油消耗与降低疲劳损伤的双重目标。Gungor等^[72]发现通过调整车队与车队间的横向行驶位置偏移同样能显著降低道路生命周期成本。然而,现有研究通常仅考虑单车道场景,较少研究将目标场景扩展至多车道,考虑不同车道管理方案^[94](如是否设置智能驾驶专用车道、是否允许智能驾驶与传统车辆混行等)对路面性能与道路生命周期成本的影响。

需要指出的是,道路路面相关研究仍然局限于有限的试验条件(如针对特定的路面材料、风速等),并基于过于理想的智能车辆及车队相关假设条件开展仿真试验,结论有效性及应用潜力很大程度上受限于未来智能驾驶技术水平及自动化系统功能安全性设计目标,甚至需要道路基础设施与车辆、车辆与车辆间的网联技术提供可靠、及时的信息通讯支持,难以直接应用于现有智能车辆道路行驶适应性分析研究。未来需要根据涵盖更多场景的道路实测数据及智能驾驶实际应用方案验证现有研究结果,并调整仿真试验设定进行更加深入的分析。同时,智能车辆及车队横向行驶位置的调整势必对周围车辆驾驶及其他交通对象行为产生影响,如何表征周围车辆适应性行为^[103],并从交通效率、安全角度量化影响程度,将为智能车辆运动控制优化增添新的约束,从而进一步完善相关研究。

2.3 其他道路要素

研究人员除了从道路几何与道路路面展开定量化研究以外,还围绕道路标志、标线以及路侧障碍物等其他道路要素与智能车辆的相互适应性进行了讨论,但相关研究以定性分析为主,研究结果大多以非量化建议形式呈现。

如第1.3节所述,道路标志、标线作为摄像机的主要感知目标物与高精度地图提供的重要道路先验知识,其位置信息与语义信息对各等级智能车辆判断自车及周围障碍物绝对空间位置、辅助后续行为决策、轨迹规划或运动控制等系统功能(如LCC)顺利实现起到至关重要的作用。例如,当路段限速标志信息发生变化却未被识别时,仍然保持原有预设速度行驶的智能车辆将违反相应的交通法规,甚至可能引发碰撞事故;当开启ACC的智能车辆在内侧车道跟随头车进入弯道后,若车道标线信息无法

获取,由于车辆间航向角差,可能造成智能车辆误判断前方目标车辆已丢失,或将外侧车道车辆误认为目标头车,从而执行驾驶人意料外的行为决策或运动控制。Lengyel等^[104]借助智能驾驶虚拟测试软件PreScan构建了上述列举的安全性关键场景,结果发现无论此时是否由驾驶人接管车辆操作,碰撞事故发生概率与智能车辆在感知标志或标线信息失效时的行驶速度成正比。因此,大量研究人员认为相比于方便驾驶人视认,需要对面向智能车辆的道路标志、标线在其颜色、形状、字体、线型(间距)及对比度等方面提出更高的要求,保证其可识别率^[86]。而在已建成且主要面向传统人工驾驶车辆的现役道路上,全世界都不可避免地存在着大量老旧、磨损且形式多样的标志、标线。这些“低质量”的标志、标线将阻碍智能车辆“看得见路”,同时由于不同国家、地区可能采用不同语言、样式的标志,L5车辆的应用推广也将受限制。因此,研究人员建议需要在现役道路设施基础上检查并统一标志、标线设计、规格及安装位置,在路段内增加设置数量,并对其进行定期修缮与维护,防止标志信息及标线磨损或被障碍物遮挡^[105-106]。

在智能驾驶图像识别技术高频迭代发展现状下,该领域研究目标以及公开感知数据集的使用目的聚焦于提升感知算法在不同驾驶场景中对标志、标线实时的识别跟踪效率与准确度^[107-108]。但Waykole等^[109]通过综述现有标线检测及跟踪算法发现,无法获取安全性关键场景及极端工况下的感知数据集仍然是制约该领域研究人员测试算法有效性的重要原因;并且,相关研究试验场景仍然局限于理想天气条件下的直线路段,对于已有算法能否有效应对复杂道路几何条件、不同行驶速度以及不利天气、光照与路面条件(如路面有积水),仍然需要广泛且深入的调查检验。因此,从该领域研究中难以提取出可直接用于评估面向智能车辆的道路标志、标线适应性的结果信息。另外,期望能够以通用的标准评价感知算法仍处于快速发展阶段的智能车辆对不同驾驶场景中不同状况的标志、标线的适应程度是不切实际的。这也是本领域研究人员定性判断,应在不同等级智能车辆系统设计运行条件允许的道路行驶范围内,尽可能维护完善标志、标线设置的主要原因。此外,也有研究人员期望能通过将完整的标志、标线信息上传至高精度地图^[59],或利用网联技术^[110]将其直接转化为数字化信息的先验知识,跳过感知步骤,从源头解决现役道路上标志、标

线的适应性问题。

对于可能由现有路侧植被、建筑物等设施形成的路侧障碍物,现有研究仅在道路平面圆曲线条件下将其纳入考虑,理论分析受其影响的横净距是否满足不同等级智能车辆的安全行驶需求^[21](研究结果见第 2.1 节)。但他们通常假设路侧障碍物连续,并能够完全遮挡此处的智能车辆感知范围(即传感器无法透过障碍物对后方道路环境进行探测),暂未见考虑障碍物属性、布置间距、对目标物实际遮挡率等,分析其对智能车辆感知及行车视距的真实影响。如前所述,García 等^[83]将由较短跟车间隔组成的货车车队作为“路侧”障碍物,分析其对外侧行驶车辆行车视距影响。该研究场景能为探究路侧及路内障碍物及其他交通参与者适应性影响分析提供解决思路。此外,与标志、标线相关研究类似,该研究同样需要将驾驶场景向更复杂道路几何条件及不利天气条件方向延伸,即既要关注障碍物及设施自身特征对适应性影响,也要重视将其放置于复杂道路条件时引起的综合影响。凭借基于场景的虚拟测试手段将期望能有效解决上述问题(如综合影响结果并非独立影响的简单线形叠加)。

3 总结与展望

从上述文献总结中可以获取现有研究的发展状况:由于将自动化系统引入原有的道路交通复杂系统,可能改变其中各要素间的相互影响关系,促使相关研究开始从自然驾驶人与自动化系统在主要功能层的功能差异入手,分别从道路几何、道路路面及其他道路要素方面(图 8)剖析智能车辆与道路基础设施的相互作用机制,从而评价面向智能车辆的现役道路设施行驶适应性。现有研究结果不仅有助于科学合理指导智能车辆在现役道路条件安全行驶,靶向性优化现役道路设施,而且有利于推动提升未来智能道路对智能车辆匹配程度,最大程度激发智能驾驶技术的有益作用。

但是对于现有研究,仍然存在以下问题:

(1)不同等级智能驾驶功能表现及行驶特征尚未明确。由于智能驾驶技术仍处于持续发展阶段,不同自动化等级,尤其是高等级智能驾驶尚未形成被广泛认可的功能层技术方案,难以归纳、标定不同等级间的人机功能差异并凝练归纳出相关设计值,难以考察不同等级(甚至不同厂商同等级车辆间)的实际功能表现与驾驶行为特征,也对智能车辆在现役道路设施行驶适应性的研究结果通用性与可移植

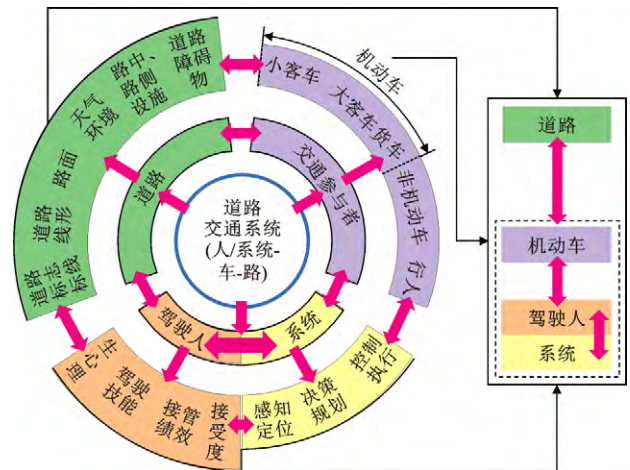


图 8 人/系统-车-路耦合的道路交通系统要素及其相互影响关系

Fig. 8 Elements of the Road-traffic System Composed by the Coupling of Human Drivers/Driving Automation Systems, Vehicles, and Roads, and Their Influence Relationship

性造成了削弱。

(2)目标道路场景局限、自动化等级普遍单一、行驶工况条件理想。现有有关人机功能差异的研究作为现象类研究,普遍受限于特定道路场景并针对单一自动化等级,且道路场景及行驶工况更多为理想条件,研究及试验规模尚处于起步阶段,难以对不同等级智能车辆功能表现所属的道路条件进行横向对比,亦或在不同的、甚至是不利道路场景中进行相同等级条件的纵向对比。

(3)由于难以获取智能驾驶功能层实际技术方案及其在不同道路线形条件下的实际功能表现与行驶特征,道路几何方面研究总体受限于现有研究方法的固有缺陷。其中,理论方法与混合方法由于假设条件过于理想,难以考察不利天气及复杂道路空间线形条件影响,无法保证研究结果的有效性与通用性;而实测方法一方面难以控制、定制现实道路相关条件,难以排除非道路条件(如其他交通参与者)对试验结果的干扰,另一方面仅采用单一品牌智能车辆,即针对特定智能驾驶功能技术方案,且试验成本与危险性均较高,难以保证目标道路场景覆盖率与研究结果的可移植性。此外,缺少从交通流属性角度考虑道路几何条件对智能车辆行驶特征的作用。

(4)道路路面方面研究具有与道路几何方面研究相类似不足。一方面,受限于现场测试条件且可获取道路路面设计资料有限,研究大多采用仿真手段,不同研究通常采用特定路面材料、结构以及目标路面性能参数,研究结果难以进行横向对比;另一方

面,针对链接路面设计的人机功能差异(如车辆荷载横向分布)的假设通常较极端或过于理想,甚至明显高估了现阶段车辆智能化水平,难以利用现有研究成果评估智能车辆对道路路面的真实影响或指导现有智能车辆决策-控制层功能设计。

(5)道路标志、标线方面研究普遍采用定性分析方法,研究结果以非量化建议形式呈现。一方面,基于智能驾驶图像识别技术高频迭代发展现状,在不同道路场景、天气条件及不同自动化等级情况下,智能车辆检测识别道路标志、标线的准确率及可靠程度尚未有定论,该领域研究结果难以应用于定量化评价现役设施对智能车辆的适应程度;另一方面,现有路侧障碍物方面研究仅限于道路平面圆曲线场景,未考虑障碍物实际特征,同时未结合智能车辆实际感知能力,分析其对智能车辆适应性的真实影响。

总体而言,现有研究受限于智能驾驶技术发展现状,缺少对智能驾驶功能表现、行驶特征数据及其相匹配道路相关数据的高效采集方法,较少考察现役道路设施对智能车辆行驶的适应程度,即道路几何、道路路面及道路标志、标线等道路要素与智能车辆行驶特征相互作用的外在表现,同时缺少针对不同等级智能驾驶进行同一研究目标维度的评价。

针对上述问题,本文总结了该领域的发展展望:

(1)合理预测、标准化各等级智能驾驶功能表现及行驶特征,并保留改进余地。及时更新与道路设计强相关的不同等级智能驾驶技术方案研究进展,在此基础上合理预测并推动技术方案中与道路设计要素相链接的关键指标信息共享,保留指标改进余地,为后续考察智能驾驶行驶特征,区分及标定不同等级智能驾驶功能特征提供可靠的数据来源与坚实的理论基础。

(2)积极采用基于场景的智能驾驶虚拟测试手段,高效获取智能驾驶行驶特征及其相匹配的道路相关数据。结合虚拟测试场景自动化生成、极限工况场景搜寻与泛化等技术的驾驶仿真与虚拟测试手段将成为不同等级智能车辆应对复杂多样的道路行驶工况的主流研究方法,并将在智能车辆道路行驶安全性测试中展示强大作用,其测试结果有极大潜力直接应用于面向智能车辆的现役道路设施行驶适应性研究及评价,并为构建智能驾驶行驶特征谱(库)提供有力支援。

(3)更深入研究智能车辆与道路几何要素相互作用机制。利用在展望(2)中提及的面向智能驾驶的虚拟测试手段,考虑不同等级智能驾驶技术方案,

结合高精度传感器物理模型、车辆动力学模型与微观交通流模型,构建囊括不同天气条件、交通流属性以及更多复杂道路线形组合的虚拟测试场景,深入研究不同等级智能车辆感知过程与车辆行驶状态响应反馈,揭示其对道路几何激励的响应机理,探索能够更加准确反映不同等级智能车辆行驶适应性的车辆运动学、动力学响应参量与评价标准(如可靠度)。在深入研究中,可以将当前热点技术如图像处理技术、激光点云处理技术、深度学习等引入智能车辆行驶特征相关数据分析过程中,构建不同道路交通环境下道路几何要素与其的相关性模型或预测模型,更加便捷、直观地对智能车辆在目标道路几何及环境条件下的行驶适应性做出评估,并靶向性对道路几何参数与智能车辆功能提出改进意见。

(4)更深入研究智能车辆与道路路面相互作用机制。由于车辆荷载对路面性能真实影响的呈现需要较长时间跨度,道路路面方面研究需要在展望(1)中提及的获取不同等级智能车辆更真实功能特征基础上,对其及不同等级混合交通流影响进行更加深入的研究,并进一步分析路面条件(如抗滑特性)对智能车辆行驶状态的反馈影响。同时,利用展望(2)提及的虚拟测试手段,设计与真实行驶工况匹配的虚拟测试场景,提取智能车辆纵、横向轨迹信息,提升对路面性能影响的仿真结果的有效性、可移植性与路面优化设计的针对性。此外,需要在虚拟测试中结合交通流仿真,考察优化横向运动控制方案后的智能车辆及车队与周围车辆交互,评估其对整体车流行驶安全与交通效率的影响,并作为约束条件或优化目标,进一步指导智能车辆横向运动控制策略的制定。

(5)量化分析智能车辆对道路标志、标线等其他道路要素的适应程度,并延伸考虑道路几何、路面等条件的综合作用。一方面,在智能车辆道路标志、标线识别检测领域相关研究中进一步提取与通用感知算法准确率、可靠性等指标相匹配的道路测试场景及标志、标线状况条件,直接用于智能车辆对其适应程度的定量化分析;另一方面,利用展望(2)提及的虚拟测试手段,调整道路标志、标线磨损程度及遮挡率等,在本领域开展覆盖更多道路几何、路面及天气条件与智能驾驶技术方案的敏感性分析。同时,还可以利用此方法考虑映射真实道路环境中障碍物特征对智能车辆行驶适应性的影响。

(6)进一步拓宽现有研究面向对象。由于以“面向智能车辆的现役道路设施行驶适应性”为主旨的

现有研究尚处于发展阶段,其研究对象仍聚焦于自主智能驾驶车辆(队)与较传统道路要素,难以应对实际复杂道路交通场景(如引入更多其他交通参与者)及未来规模化复杂智能技术(如网联式智能驾驶、智能道路等)的引入。因此,一方面,在现场测试条件受限情况下,需要在展望(2)基础上吸收更多种类动、静态场景要素,并建立上述更复杂技术仿真环境,最终可靠实现智能车辆与其实时动态交互关键技术;另一方面,在展望(3)~(5)提及的研究框架下,利用上述仿真环境结果开展相应研究(如探索网联环境下道路几何条件对智能车辆行驶直接影响,以及受道路几何条件影响的周围车辆对智能车辆行驶的间接影响),有效突破现有研究广度,并为后续面向智能车辆的综合道路交通系统适应性研究提供场景数据、研究方法及理论基础。

参考文献:

References:

- [1] 秦严严,王 昊,王 炜. 自适应巡航控制车辆跟驰模型综述[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(3): 121-130.
QIN Yan-yan, WANG Hao, WANG Wei. Review of car-following models of adaptive cruise control [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17 (3): 121-130.
- [2] VIRDI N, GRZYBOWSKA H, WALLER S T, et al. A safety assessment of mixed fleets with connected and autonomous vehicles using the surrogate safety assessment module [J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 131 (8): 95-111.
- [3] AMIRGHOLY M, SHAHABI M, OLIVER G H. Traffic automation and lane management for communicant, autonomous, and human-driven vehicles [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 111: 477-495.
- [4] ALAM A, BESSELINK B, TURRI V, et al. Heavy-duty vehicle platooning for sustainable freight transportation: A cooperative method to enhance safety and efficiency [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2015, 35 (6): 34-56.
- [5] CHEN D, SRIVASTAVA A, AHN S, et al. Traffic dynamics under speed disturbance in mixed traffic with automated and non-automated vehicles [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 113: 293-313.
- [6] XU X, WANG X, WU X, et al. Calibration and evaluation of the responsibility-sensitive safety model of autonomous car-following maneuvers using naturalistic driving study data [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 123: 102988.
- [7] BOGGS A M, ARVIN R, KHATTAK A J. Exploring the who, what, when, where, and why of automated vehicle disengagements [J]. Accident Analysis & Prevention, 2020, 136: 105406.
- [8] WANG S, LI Z. Exploring causes and effects of automated vehicle disengagement using statistical modeling and classification tree based on field test data [J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 129: 44-54.
- [9] SUN H, FENG S, YAN X, et al. Corner case generation and analysis for safety assessment of autonomous vehicles [J]. Transportation Research Record, 2021, 2675 (11): 587-600.
- [10] BOGGS A M, WALI B, KHATTAK A J. Exploratory analysis of automated vehicle crashes in California: A text analytics & hierarchical Bayesian heterogeneity-based approach [J]. Accident Analysis & Prevention, 2020, 135: 105354.
- [11] WANG S, LI Z. Exploring the mechanism of crashes with automated vehicles using statistical modeling approaches [J]. Plos One, 2019, 14 (3): 0214550.
- [12] FAVARÒ F, EURICH S, NADER N. Autonomous vehicles' disengagements: Trends, triggers, and regulatory limitations [J]. Accident Analysis & Prevention, 2018, 110: 136-148.
- [13] 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.
LI Ke-qiang, DAI Yi-fan, LI Sheng-bo, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8 (1): 1-14.
- [14] 崔明阳,黄荷叶,许 庆,等. 智能网联汽车架构、功能与应用关键技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3): 493-508.
CUI Ming-yang, HUANG He-ye, XU Qing, et al. Survey of intelligent and connected vehicle technologies: Architectures, functions and applications [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62 (3): 493-508.
- [15] RAD S R, FARAH H, TAALE H, et al. Design and operation of dedicated lanes for connected and automated vehicles on motorways: A conceptual framework and research agenda [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 117: 102664.
- [16] LI W, WU G, YAO D, et al. Stated acceptance and behavioral responses of drivers towards innovative connected vehicle applications [J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 155: 106095.
- [17] YURTSEVER E, LAMBERT J, CARBALLO A, et al. A survey of autonomous driving: Common practices and emerging technologies [J]. IEEE Access, 2019, 8: 58443-58469.
- [18] VAN BRUMMELEN J, O'BRIEN M, GRUYER D, et al. Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 89: 384-406.
- [19] RUSSELL H E B, HARBOTT L K M, NISKY I, et al. Motor learning affects car-to-driver handover in automated vehicles [J]. Science Robotics, 2016, 1 (1): 5682.
- [20] ZHANG B, WILSCHUT E S, WILLEMSSEN D M C, et al.

- Transitions to manual control from highly automated driving in non-critical truck platooning scenarios [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 64: 84-97.
- [21] WANG S, YU B, MA Y, et al. Impacts of different driving automation levels on highway geometric design from the perspective of trucks [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021: 5541878.
- [22] Texas A & M Transportation Institute. Connected road classification system (CRCS) development (NCHRP 20-24 (112)) [R]. College Station: Texas A & M Transportation Institute, 2020.
- [23] GOUDA M, MIRZA J, WEIB J, et al. Octree-based point cloud simulation to assess the readiness of highway infrastructure for autonomous vehicles [J]. *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2021, 36 (7): 922-940.
- [24] YE X, WANG X, LIU S, et al. Feasibility study of highway alignment design controls for autonomous vehicles [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 159: 106252.
- [25] GOUDA M, CHOWDHURY I, WEIB J, et al. Automated assessment of infrastructure preparedness for autonomous vehicles [J]. *Automation in Construction*, 2021, 129: 103820.
- [26] STORSÆTER A D, PITERA K, MCCORMACK E D. The automated driver as a new road user [J]. *Transport Reviews*, 2020, 41 (5): 533-555.
- [27] 唐立, 卿三东, 徐志刚, 等. 自动驾驶公众接受度研究综述 [J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(2): 131-146.
TANG Li, QING San-dong, XU Zhi-gang, et al. Research review on public acceptance of autonomous driving [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20 (2): 131-146.
- [28] GASSER T, ARZT C, AYOUBI M, ET A L. Legal consequences of an increase in vehicle automation (BAST-Report F83 (Part 1)) [R]. Bergisch Gladbach: German Federal Highway Research Institute (BASt), 2013.
- [29] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Federal automated vehicles policy (NHTSA-2016-0090) [R]. Washington DC: NHTSA, 2016.
- [30] Society of Automotive Engineers (SAE) International. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles (J3016_202104) [R]. Washington DC: SAE International, 2021.
- [31] WU X, BOYLE L N, MARSHALL D, et al. The effectiveness of auditory forward collision warning alerts [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2018, 59: 164-178.
- [32] AUST M L, ENGSTRÖM J, VISTRÖM M. Effects of forward collision warning and repeated event exposure on emergency braking [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2013, 18: 34-46.
- [33] WANG B, LI W, WEN H, et al. Modeling impacts of driving automation system on mixed traffic flow at off-ramp freeway facilities [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2021, 573: 125852.
- [34] LI T, CHEN D, ZHOU H, et al. Car-following behavior characteristics of adaptive cruise control vehicles based on empirical experiments [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 147: 67-91.
- [35] MILLER E E, BOYLE L N. Adaptations in attention allocation: Implications for takeover in an automated vehicle [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 66: 101-110.
- [36] 宗长富, 代昌华, 张东. 智能汽车的人机共驾技术研究现状和发展趋势 [J]. *中国公路学报*, 2021, 34(6): 214-237.
ZONG Chang-fu, DAI Chang-hua, ZHANG Dong. Human-machine interaction technology of intelligent vehicles: Current development trends and future directions [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34 (6): 214-237.
- [37] ZHANG B, DE WINTER J, VAROTTO S, et al. Determinants of take-over time from automated driving: A meta-analysis of 129 studies [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 64: 285-307.
- [38] YOUNG M S, STANTON N A. Back to the future: Brake reaction times for manual and automated vehicles [J]. *Ergonomics*, 2007, 50 (1): 46-58.
- [39] NAUJOKS F, HÖFLING S, PURUCKER C, et al. From partial and high automation to manual driving: Relationship between non-driving related tasks, drowsiness and take-over performance [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 121: 28-42.
- [40] MERAT N, JAMSON A H, LAI F C H, et al. Highly automated driving, secondary task performance, and driver state [J]. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2012, 54 (5): 762-771.
- [41] DE WINTER J C F, HAPPEE R, MARTENS M H, et al. Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the empirical evidence [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, 27: 196-217.
- [42] GASPAR J G, SCHWARZ C W, BROWN T L, et al. Gaze position modulates the effectiveness of forward collision warnings for drowsy drivers [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 126: 25-30.
- [43] BAO S, LEBLANC D J, SAYER J R, et al. Heavy-truck drivers' following behavior with intervention of an integrated, in-vehicle crash warning system: A field evaluation [J]. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2012, 54 (5): 687-697.
- [44] MORALES-ALVAREZ W, SIPELE O, LÉBERON R, et al. Automated driving: A literature review of the take over request in conditional automation [J]. *Electronics*, 2020, 9 (12): 2087.
- [45] 余荣杰, 田野, 孙剑. 高等级自动驾驶汽车虚拟测试: 研究进展与前沿 [J]. *中国公路学报*, 2020, 33(11): 125-138.

- YU Rong-jie, TIAN Ye, SUN Jian. Highly automated vehicle virtual testing: A review of recent developments and research frontiers [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33 (11): 125-138.
- [46] STRAND N, NILSSON J, KARLSSON I C M, et al. Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, 27: 218-228.
- [47] 杨 澜,赵祥模,吴国垣,等. 智能网联汽车协同生态驾驶策略综述[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(5): 58-72.
- YANG Lan, ZHAO Xiang-mo, WU Guo-yuan, et al. Review on connected and automated vehicles based cooperative eco-driving strategies [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20 (5): 58-72.
- [48] 张 驰. 考虑空间视野的高速公路运行速度预测模型与应用研究[D]. 西安:长安大学, 2010.
- ZHANG Chi. Study on the operating speed prediction model and application of freeway based on spatial vision [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [49] WANG Z, WU Y, NIU Q. Multi-sensor fusion in automated driving: A survey [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 2847-2868.
- [50] 李 立,徐志刚,赵祥模,等. 智能网联汽车运动规划方法研究综述[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(6): 20-33.
- LI Li, XU Zhi-gang, ZHAO Xiang-mo, et al. Review of motion planning methods of intelligent connected vehicles [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32 (6): 20-33.
- [51] 郭景华,李克强,罗禹贡. 智能车辆运动控制研究综述[J]. *汽车安全与节能学报*, 2016, 7(2): 151-159.
- GUO Jing-hua, LI Ke-qiang, LUO Yu-gong. Review on the research of motion control for intelligent vehicles [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2016, 7 (2): 151-159.
- [52] BASSANI M, CATANI L, SALUSSOLIA A, et al. A driving simulation study to examine the impact of available sight distance on driver behavior along rural highways [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 131: 200-212.
- [53] MOHAMMED A S, AMAMOU A, AYEVIDE F K, et al. The perception system of intelligent ground vehicles in all weather conditions: A systematic literature review [J]. *Sensors*, 2020, 20 (22): 6532.
- [54] ZANG S, DING M, SMITH D, et al. The impact of adverse weather conditions on autonomous vehicles: How rain, snow, fog, and hail affect the performance of a self-driving car [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14 (2): 103-111.
- [55] CARBALLO A, LAMBERT J, MONRROY A, et al. LIBRE: The multiple 3D LiDAR dataset [C] // IEEE. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. New York: IEEE, 2000: 1094-1101.
- [56] YEONG D J, VELASCO-HERNANDEZ G, BARRY J, et al. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review [J]. *Sensors*, 2021, 21 (6): 2140.
- [57] CHAVEZ-GARCIA R O, AYCARD O. Multiple sensor fusion and classification for moving object detection and tracking [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17 (2): 525-534.
- [58] WANG S, MA Y, LIU J, et al. Readiness of as-built horizontal curved roads for LiDAR-based automated vehicles: A virtual simulation analysis [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2022, 174: 106762.
- [59] 贺 勇,路 昊,王春香,等. 基于多传感器的车道级高精度地图制作方法[J]. *长安大学学报:自然科学版*, 2015, 35(增): 274-278.
- HE Yong, LU Hao, WANG Chun-xiang, et al. Generation of precise lane-level maps based on multi-sensors [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2015, 35 (S): 274-278.
- [60] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述·2017 [J]. *中国公路学报*, 2017, 30(6): 1-197.
- Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's automotive engineering research progress: 2017. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30 (6): 1-197.
- [61] MA Y, ZHENG Y, EASA S, et al. Virtual analysis of urban road visibility using mobile laser scanning data and deep learning [J]. *Automation in Construction*, 2022, 133: 104014.
- [62] ZHAO J, XU H, LIU H, et al. Detection and tracking of pedestrians and vehicles using roadside LiDAR sensors [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 100: 68-87.
- [63] ABDO J, HAMBLIN S, CHEN G. Effective range assessment of lidar imaging systems for autonomous vehicles under adverse weather conditions with stationary vehicles [J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 2022, 8 (3): 031103.
- [64] KWON S, PARK T. Channel-based network for fast object detection of 3D LiDAR [J]. *Electronics*, 2020, 9 (7): 1-10.
- [65] ZEEB K, BUCHNER A, SCHRAUF M. What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2015, 78: 212-221.
- [66] ERIKSSON A, STANTON N A. Takeover time in highly automated vehicles: Noncritical transitions to and from manual control [J]. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2017, 59 (4): 689-705.
- [67] 吴超仲,吴浩然,吕能超. 人机共驾智能汽车的控制权切换与安全性综述[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(6): 135-145.
- WU Chao-zhong, WU Hao-ran, LYU Neng-chao. Review on control switch and safety of human-computer driving intelligent vehicle [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18 (6): 135-145.

- [68] BOYSEN N, BRISKORN D, SCHWERDFEGER S. The identical-path truck platooning problem [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 109: 26-39.
- [69] STEYN W J V, MAINA J W. Guidelines for the use of accelerated pavement testing data in autonomous vehicle infrastructure research [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2019, 6 (3): 273-281.
- [70] ZHOU F, HU S, CHRYSLER S T, et al. Optimization of lateral wandering of automated vehicles to reduce hydroplaning potential and to improve pavement life [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2019, 2673 (11): 81-89.
- [71] GARCÍA A, CAMACHO-TORREGROSA F J. Influence of lane width on semi-autonomous vehicle performance [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2020, 2674 (9): 279-286.
- [72] GUNGOR O E, AL-QADI I L. All for one: Centralized optimization of truck platoons to improve roadway infrastructure sustainability [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 114: 84-98.
- [73] GOODALL N J, LAN C L. Car-following characteristics of adaptive cruise control from empirical data [J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2020, 146 (9): 04020097.
- [74] GERSHON P, SEAMAN S, MEHLER B, et al. Driver behavior and the use of automation in real-world driving [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 158: 106217.
- [75] JANSSEN R, ZWIJNENBERG H, BLANKERS I, et al. Truck platooning-driving the future of transportation (TNO 2014 R11893) [R]. Delft: TNO Mobility and Logistics, 2015.
- [76] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述·2013 [J]. *中国公路学报*, 2013, 26(3): 1-36. Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's road engineering research; 2013 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26 (3): 1-36.
- [77] STOGIOS C, KASRAIAN D, ROORDA M J, et al. Simulating impacts of automated driving behavior and traffic conditions on vehicle emissions [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 76: 176-192.
- [78] MCDONALD A D, ALAMBEIGI A, ENGSTRÖM J, et al. Toward computational simulations of behavior during automated driving takeovers: A review of the empirical and modeling literatures [J]. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2019, 61 (4): 642-688.
- [79] STAIGER J, CALVERT S. Empirical analysis of longitudinal and lateral vehicle dynamics of automated vehicles [C] // TRB. *Transportation Research Board 100th Annual Meeting*. Washington DC: TRB, 2021: 1-16.
- [80] KHOURY J, AMINE K, SAAD R A. An initial investigation of the effects of a fully automated vehicle fleet on geometric design [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2019: 6126408.
- [81] GARCÍA A, LLOPIS-CASTELLÓ D, CAMACHO-TORREGROSA F J. Influence of the design of crest vertical curves on automated driving experience [C] // TRB. *Transportation Research Board 98th Annual Meeting*. Washington DC: TRB, 2019: 1-18.
- [82] THOMAS N E, MARTINEZ-PEREZ F J. Impacts of road-trains on the geometric design of highways [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2015, 141 (4): 04014087.
- [83] GARCÍA A, PASTOR-SERRANO D. Determination of minimum horizontal curve radius for safe stopping sight distance of vehicles overpassing truck platoons [J]. *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2021, 37 (5): 539-557.
- [84] GARCÍA A, CAMACHO-TORREGROSA F J, PADOVANI B P V. Examining the effect of road horizontal alignment on the speed of semi-automated vehicles [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 146: 105732.
- [85] INTINI P, COLONNA P, BERLOCO N, et al. Rethinking the main road design concepts for future automated vehicles native roads [J]. *European Transport*, 2019, 73 (3): 1-28.
- [86] OTHMAN K. Impact of autonomous vehicles on the physical infrastructure: Changes and challenges [J]. *Designs*, 2021, 5 (3): 40.
- [87] SHLADOVER S E, MILLER M A, YIN Y, et al. Assessment of the applicability of cooperative vehicle-highway automation systems (CVHAS) to bus transit and intermodal freight: Case study feasibility analyses in the metropolitan Chicago region (CA04-0494) [R]. Richmond: University of California PATH, 2008.
- [88] GHIASI A, HUSSAIN O, QIAN Z, et al. Lane management with variable lane width and model calibration for connected automated vehicles [J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2020, 146 (3): 04019075.
- [89] 朱冰, 张培兴, 赵健, 等. 基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试研究进展 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(6): 1-19. ZHU Bing, ZHANG Pei-xing, ZHAO Jian, et al. Review of scenario-based virtual validation methods for automated vehicles [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32 (6): 1-19.
- [90] HE Y, MATTAS K, DONA R, et al. Introducing the effects of road geometry into microscopic traffic models for automated vehicles [J/OL]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*; 1-10 [2021-11-03]. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3126049>.
- [91] 李林恒, 甘婧, 曲栩, 等. 智能网联环境下基于安全势场理论的车辆跟驰模型 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(12): 76-87. LI Lin-heng, GAN Jing, QU Xu, et al. Car-following model based on safety potential field theory under connected and automated vehicle environment [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32 (12): 76-87.

- [92] 李林恒,甘 婧,曲 栩,等. 智能网联环境下基于安全势场理论的车辆换道模型[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 184-195.
LI Lin-heng, GAN Jing, QU Xu, et al. Lane-changing model based on safety potential field theory under the connected and automated vehicles environment [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34 (6): 184-195.
- [93] YEGANEH A, VANDOREN B, PIRDAVANI A. Impacts of load distribution and lane width on pavement rutting performance for automated vehicles [J/OL]. *International Journal of Pavement Engineering*: 1-11 [2021-06-07]. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1935938>.
- [94] HOQUE M M, LU Q, XIN C. Effect of highway lane management policy of heavy vehicles on the cost of flexible pavement [J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2018, 144 (11): 04018072.
- [95] 宋明涛,陈 丰. 自动驾驶对沥青面层寿命及养护成本影响分析[J/OL]. 中国公路学报: 1-15 [2021-11-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20211109.1553.004.html>.
SONG Ming-tao, CHEN Feng. The influence of autonomous vehicles on asphalt pavement s service life and maintenance cost [J/OL]. *China Journal of Highway and Transport*: 1-15 [2021-11-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20211109.1553.004.html>.
- [96] STROUP-GARDINER M, TUROCHY R E, CARTER A. Influence of various material and traffic inputs on flexible pavement design methods for Alabama roadways [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2007, 133 (8): 455-461.
- [97] CHEN F, BALIEU R, KRINGOS N. Potential influences on long-term service performance of road infrastructure by automated vehicles [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2550: 72-79.
- [98] CHEN F, SONG M, MA X, et al. Assess the impacts of different autonomous trucks' lateral control modes on asphalt pavement performance [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 103: 17-29.
- [99] NOORVAND H, KARNATI G, UNDERWOOD B S. Autonomous vehicles: Assessment of the implications of truck positioning on flexible pavement performance and design [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2017, 2640 (1): 21-28.
- [100] GUNGOR O E, SHE R, AL-QADI I L, et al. One for all: Decentralized optimization of lateral position of autonomous trucks in a platoon to improve roadway infrastructure sustainability [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 120: 102783.
- [101] CHEN F, SONG M, MA X. A lateral control scheme of autonomous vehicles considering pavement sustainability [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120669.
- [102] SONG M, CHEN F, MA X. Organization of autonomous truck platoon considering energy saving and pavement fatigue [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 90: 102667.
- [103] SCHOENMAKERS M, YANG D, FARAH H. Car-following behavioural adaptation when driving next to automated vehicles on a dedicated lane on motorways: A driving simulator study in the Netherlands [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 78 (3): 119-129.
- [104] LENGYEL H, TETTAMANTI T, SZALAY Z. Conflicts of automated driving with conventional traffic infrastructure [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 163280-163297.
- [105] LYON B, HUDSON N, TWYXCROSS M, et al. Automated vehicles: do we know which road to take? [R]. Sydney: Infrastructure Partnerships Australia, 2017.
- [106] EUROPEAN ROAD ASSESSMENT PROGRAMME. Roads that cars can read: A quality standard for road markings and traffic signs on major rural roads [R]. Leuven: Euro NCAP, 2013.
- [107] LEE H S, KIM K. Simultaneous traffic sign detection and boundary estimation using convolutional neural network [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19 (5): 1652-1663.
- [108] CAO J, SONG C, PENG S, et al. Improved traffic sign detection and recognition algorithm for intelligent vehicles [J]. *Sensors*, 2019, 19 (18): 4021.
- [109] WAYKOLE S, SHIWAKOTI N, STASINOPOULOS P. Review on lane detection and tracking algorithms of advanced driver assistance system [J]. *Sustainability*, 2021, 13 (20): 11417.
- [110] SHEN M, SUN J, PENG H, et al. Improving localization accuracy in connected vehicle networks using rao-blackwellized particle filters: Theory, simulations, and experiments [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20 (6): 2255-2266.