



引文格式: 史云阳, 朱世超, 徐长靖, 等. SC-V2XSim: 车路协同环境下的高速公路混合交通流联合仿真方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(4): 595-608. DOI: 10.13203/j.whugis.20230274

Citation: SHI Yunyang, ZHU Shichao, XU Changjing, et al. SC-V2XSim: A Co-simulation Method for Highway Mixed Traffic Flow Considering V2X[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(4): 595-608. DOI: 10.13203/j.whugis.20230274

SC-V2XSim: 车路协同环境下的高速公路混合交通流联合仿真方法

史云阳¹ 朱世超² 徐长靖² 任骏逸¹ 毕聪威² 刘志远¹

¹ 东南大学交通学院, 江苏 南京, 211189

² 山东高速基础设施建设有限公司, 山东 济南, 250000

摘要: 基于开源微观交通仿真软件SUMO构建车路协同环境下的车辆驾驶行为模型, 包括驾驶控制、驾驶建议与智慧导航3个模块及6个典型车路协同场景。结合车辆仿真软件CARLA具备高精度物理与传感器模型的优势, 提出了一种面向高速公路混合交通流的协同联合仿真框架, 命名为SC-V2XSim。该框架弥补了微观交通仿真不具备车路协同仿真功能、无法接入自动驾驶算法与车辆仿真不具备真实交通流模型的缺陷。选择中国浙江省沪杭甬高速公路进行了测试与验证, 并模拟不同渗透率情况下的混合交通流特征。提出了一种考虑车路协同等新一代信息化技术的智慧高速服务水平评价体系, 以期智慧高速的建设与发展提供一种分析评价方法。实验结果表明, 对于智慧高速而言, 全息感知、数字孪生和车路协同是3个重要的影响因素。随着具备车路协同功能车辆的增加, 道路平均车速也逐渐提高, 在具备100%网联车辆渗透率的情况下平均车速提高达到15%。网联车辆相对于人类驾驶车辆具有更加合理的驾驶行为, 所提出的考虑车路协同等新一代信息技术的智能公路服务水平评价体系能够为智慧公路的建设和发展提供一种可行的分析评价方法。

关键词: 车路协同; 混合交通流; 联合仿真; 评价体系

中图分类号: P208

文献标识码: A

收稿日期: 2023-07-30

DOI: 10.13203/j.whugis.20230274

文章编号: 1671-8860(2024)04-0595-14

SC-V2XSim: A Co-simulation Method for Highway Mixed Traffic Flow Considering V2X

SHI Yunyang¹ ZHU Shichao² XU Changjing² REN Junyi¹ BI Congwei² LIU Zhiyuan¹

¹ School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China

² Shandong High-Speed Infrastructure Co. Ltd, Jinan 250000, China

Abstract: Objectives: New technologies such as autonomous driving, intelligent networking, and V2X (vehicle-to-everything) are considered to be the key to driving changes in the future transportation system. Many studies have reached a consensus that human-driven vehicles, intelligent connected vehicles, and different levels of self-driving vehicles will coexist for a long period of time in the future. How to analyze the characteristics of the mixed traffic flow composed of these different types of vehicles is the key to realize the full promotion and application of vehicle-circuit coordination and autonomous driving technology. Simulation is an important method, but most of the existing microscopic traffic simulation tools do not have the ability to simulate the mixed traffic flow under the environment of vehicle-road cooperation. **Methods:** First, we build a vehicle driving behavior model under vehicle-road collaborative environment based on SUMO, an open-source micro-traffic simulation software, including three modules of driving control,

基金项目: 国家自然科学基金(52131203)。

第一作者: 史云阳, 博士生, 主要研究方向包括强化学习、交通与自动驾驶仿真。yunyang-shi@seu.edu.cn

通讯作者: 刘志远, 博士, 教授, 博士生导师。zhiyuanl@seu.edu.cn

driving advice and intelligent navigation, and six typical vehicle-road collaborative scenarios. Combined with the advantages of vehicle simulation software CARLA, which has high precision physical and sensor models, a collaborative co-simulation framework for expressway mixed traffic flow is proposed and named SC-V2XSim. The framework makes up for the defects that micro-traffic simulation does not have vehicle-road co-simulation function, can not access automatic driving algorithm and vehicle simulation does not have real traffic flow model. Second, the Shanghai-Hang-Ningbo expressway in Zhejiang Province is selected for testing and verification, and the characteristics of mixed traffic flow under different permeability conditions are simulated. Finally, a new generation information technology such as vehicle-road coordination is proposed to provide an analysis and evaluation method for the construction and development of the intelligent highway. **Results:** The experimental results show that holographic sensing, digital twin and V2X are three important factors for smart highway. On the other hand, with the increase of vehicles with vehicle-road collaboration function, the average road speed also gradually increases, and the average speed increases to 15% in the case of 100% V2X penetration. **Conclusions:** Compared with human-driven vehicles, intelligent connected vehicles have more reasonable driving behaviors. The proposed intelligent highway service level evaluation system, which considers vehicle-road coordination and other new generation information technologies, can provide a feasible analysis and evaluation method for the construction and development of smart highway.

Key words: V2X; mixed traffic flow; co-simulation; evaluation system

随着智能汽车相关技术的快速发展,传统的交通运输系统将发生巨大的变化,这对研究人员和工程师提出了巨大的挑战^[1]。智能汽车相关的前沿技术中,车路协同技术近些年被认为是未来交通工程及车辆工程领域的重要发展方向,也是缓解交通拥堵,提高道路通行效率,保障驾驶安全的重要手段^[2]。V2X(vehicle-to-everything)是一种车联网技术,旨在通过车辆与其他交通参与者、基础设施、网络和云服务器之间的相互通信,实现更加智能和安全的交通系统^[3]。V2X技术包括以下几种通信方式:(1)V2V(vehicle-to-vehicle),车辆与其他车辆之间的通信。通过V2V,车辆具备实现信息交换的能力,能够将位置、速度和车辆状态等信息进行实时共享,从而提高行车安全,减少交通事故的发生。(2)V2I(vehicle-to-infrastructure),车辆与基础设施之间的通信。通过V2I,车辆可以与交通信号灯、路边传感器等交通基础设施进行连接,获取交通流量信息、道路状况等,以优化交通流畅性和效率。(3)V2P(vehicle-to-pedestrian),车辆与行人之间的通信。通过V2P,车辆可以检测到行人的位置和动态信息,从而提醒驾驶员注意周围行人,减少行人事故的发生。(4)V2N(vehicle-to-network),车辆与网络之间的通信。通过V2N,车辆可以连接到云服务器和其他网络资源,获取实时交通信息、导航更新等服务。借助于V2X技术,人类驾驶员能够在驾驶过程中获取大量超出视

距范围内的交通信息,如前方事件与周围车辆的精准信息,并能够基于这些信息调整驾驶行为,通过这样的方式提高道路交通安全。V2X技术的发展被认为是未来智能交通系统和自动驾驶技术的重要基础,有望为交通安全、交通效率和环境保护等方面带来显著的改进。文献[4]认为在V2X环境下,相关的技术加持使得混合交通流维持在一个更高的车辆密度情况下仍能保持自由流的状态。文献[5]通过考虑V2X通信限制的基本图,探讨了不同人类驾驶车辆和智能网联车辆市场渗透率下,车队管理对异构交通环境下通行能力的影响,并进一步研究了不同车队规模下交通通行能力和燃油效率的变化。另有一些研究表明,在具备人类驾驶、智能网联、自动驾驶的混合交通流情况下,车辆间最小车头时距与车辆换道模型等特性相较于传统交通流均有很大的不同^[6]。然而,受限于相关法律和研发成本,车路协同大规模上路之前需要在计算机仿真软件中进行测试。

在仿真软件中实现V2X技术有着重要的意义,包括:(1)安全性评估。通过仿真软件可以模拟现实交通场景,包括不同类型的车辆、基础设施和行人的交互。在这种模拟环境下,可以测试V2X技术在不同交通情况下的反应和表现,从而评估其对交通安全的影响。这一类的评估方法可以为V2X技术提供未来的优化方向。(2)算法优化。仿真软件提供了一个虚拟平台,可以用于

开发和测试 V2X 算法。通过在仿真环境中运行大量测试用例快速优化算法,改进 V2X 系统的性能,确保其在真实道路上的稳定和可靠性。(3)资源成本节约。在真实道路上测试 V2X 技术需要耗费大量时间、资源和金钱,并且可能存在风险。借助仿真软件,可以大大降低测试成本,并且可以在安全控制的虚拟环境中进行多次测试,从而更好地准备在实际道路上的部署。(4)弥补真实道路测试的限制。在真实道路上测试 V2X 技术存在一些限制,如天气条件的不稳定性、交通状况的不可控性等。仿真软件可以模拟各种天气和交通状况,以及现实中难以复现的极端场景,这一些场景如恶劣天气等是自动驾驶、V2X 技术进行测试与优化的关键环节^[7]。

微观交通仿真软件具备模拟车辆跟驰、换道等行的能力,然而传统微观交通仿真软件更加注重交通流特性的刻画,难以模拟车路协同环境下车辆的决策与驾驶行为^[8]。近年来发展迅速的车辆仿真软件拥有更加真实的车辆动力学与传感器模型,可以嵌入高级别的自动驾驶控制算法,但是无法真实刻画人类驾驶员的驾驶行为,不具备模拟交通流的能力。交通仿真软件与自动驾驶软件各有优势,结合两类软件的优势实现协同联合仿真也成为了近些年进行自动驾驶、智能网联系统模拟的可行方法。其中,传统的微观交通仿真软件如 VISSIM、MATSim、AIMSUN 等近些年也被应用于混合交通流相关的研究^[9-11]。文献[12]对基于宏观与微观交通仿真结合智能网联与自动驾驶车辆建模进行了详细的综述与调查,结果表明,现有的大多数研究集中在对智能网联车辆跟驰行为的模型构建上,并综合分析其对交通流的影响(包括道路通行能力、平均车速等),对于横向换道等行的研究并不常见。而车辆仿真软件如 PreScan、Simulink、CARSIM 等也在自动驾驶仿真与测试等领域得到了关注。其中,PreScan 在自动驾驶测试中得到了广泛应用^[13],文献[14]通过构建基于 PreScan 和 Matlab/Simulink 的仿真环境来验证结合 V2X 技术的交叉口车辆碰撞预警算法。此类软件拥有真实的物理场景和高渲染可视化效果,基于联合仿真构建的融合环境实现了自动驾驶算法的多场景仿真测试。

近些年,也有文献对交通仿真软件与车辆仿真软件的协同进行了初步的探索^[15-16]。文献[17]将交通仿真软件与车辆仿真软件 Simulink 进行融

合,强化车辆动力学,在真实的交通场景中验证自动驾驶;文献[18]将 V2X 通信、交通网络、自动/常规车辆模型等核心组件紧密结合,分别对应 3 个流行的开源模拟器 Omnet++、SUMO 和 Webots,通过交通控制接口进行集成和连接,设计了一个综合的常规、互联、自动驾驶仿真平台。

相对于城市道路来说,高速公路作为更加封闭、稳定的环境,被认为更加适用于基于仿真的车路协同方法测试与优化。本文提出了一种高速公路场景下的 V2X 微观交通仿真方法,基于微观交通仿真软件实现 V2X 环境下的车辆驾驶控制、驾驶建议与智慧导航 3 个核心功能,并针对典型车路协同场景构建控制逻辑与算法。同时提出一种联合仿真方法,实现微观交通仿真控制 V2X 车辆、人类驾驶车辆,车辆仿真软件实现自动驾驶算法控制的全流程测试。选择中国浙江省沪杭甬高速公路,结合卡口数据在仿真中实现了算法的测试与验证,提出了考虑 V2X 的智慧高速服务水平评价体系。本文将上述高速公路 V2X 微观仿真-交通与车辆联合仿真-智慧高速服务水平评价的全流程方法与框架命名为 SC-V2XSim。

1 关键技术及算法

1.1 基于 SUMO-CARLA 的联合仿真方法

本文选择两款主流仿真工具:微观交通仿真软件 SUMO^[19]与车辆仿真软件 CARLA^[20],构建一套协同联合仿真方法与框架,兼顾道路交通环境、驾驶员行为、车辆动力学、V2X 车辆、自动驾驶算法等,实现对自动驾驶算法、车路协同控制算法的多场景测试。

SUMO 是一款由德国航空航天中心交通运输研究所开发的开源、多模式微观交通仿真软件。其具备一个完善的 Python 接口:交通控制接口(traffic control interface, Traci),通过与仿真进程通讯,Traci 可以获取仿真主体的所有信息并在线调控,以控制仿真内个体的行为(包括机动车、路侧设施等)。Traci 接口提供了良好的二次开发基础与条件,可以灵活地与现有人工智能相关的 Python 库(如 Tensorflow、OpenAI)等结合,为跨平台的联合仿真提供基础接口。

车辆仿真软件 CARLA 是由西班牙巴塞罗那自治大学计算机视觉中心指导开发的开源仿真模拟器,目前被广泛用于自动驾驶系统的开发、训练与验证。CARLA 依托于虚幻引擎进行开发,使用服务器和多客户端的架构,支持高渲染

的三维模型。CARLA提供许多开源的数字资产(包括建筑及车辆等)以及由这些资产搭建的测试场景。CARLA支持使用由三维道路搭建软件RoadRunner构建基础路网,同时包括激光雷达、多摄像头等多类传感器模型仿真,能够自由地调节环境的光照和天气,这也弥补了现有交通仿真软件不具备传感器模型、无法支持三维信息的输入、车辆物理碰撞模型较为简单等缺陷。由于CARLA提供了一整套高度灵活的Python应用接口,可以便捷地实现对仿真中的车辆、信号灯等元素的控制,因此,也为实现联合仿真提供了可能性。

本文提出了一种基于SUMO与CARLA的联合仿真方法,其中涉及到几个关键模块,包括路网与车辆的信息同步映射以及两种软件的协同通信,整体的框架如图1所示。路网构建模块核心在于SUMO二维路网与CARLA三维路网的匹配。SUMO支持OSM、Opendrive等数据格式,利用Netconvert工具自动化生成二维路网,包括路段长度、车道数、车道限速等信息。进一步地,利用RoadRunner工具采用不同的投影规则将二维路网进行转化。基于转化后的路网,利用素材库中的三维模型导入,实现三维仿真。同时,高精度地图由于具备高精、动态等特征,也被广泛用于自动驾驶系统测试与优化,作为主要输入的信息源之一^[21-22]。高精度地图也被作为一种输入数据源支持作为CARLA端的地图输入,来构建三维基础路网。

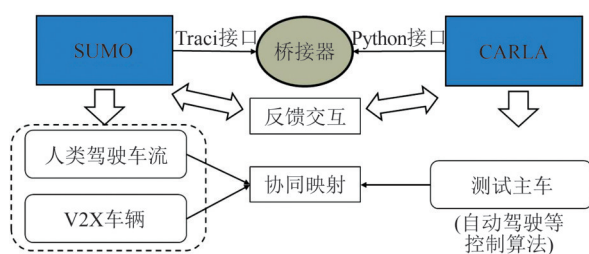


图1 基于SUMO-CARLA的混合交通流联合仿真框架
Fig. 1 Co-simulation Framework of Mixed Traffic Flow
Based on SUMO-CARLA

CARLA与SUMO在仿真结构上均采用客户端-服务器的框架,这为两者的联合仿真创造了条件。其中,服务器负责展示仿真界面,而客户端与服务器连接,TCP/IP端口获取仿真内的信息,通过不同的端口实现多客户端同步运行。通过构建桥接器,将SUMO和CARLA中不同格式的信息进行匹配,包括车辆类型、车辆位置信息、

基础设施信息等。基于该桥接器,SUMO生成的背景车流可以在CARLA的环境中产生实时同步的映射车辆,而CARLA中接入的自动驾驶等控制算法会对此产生反馈,也同样会在二维场景中进行同步。

基于上述框架实现协同仿真后,实现在SUMO段产生具备跟驰、换道等微观行为的人类驾驶车辆模型与V2X车辆控制模型。在CARLA端通过接入不同的自动驾驶算法,结合传感器模型实现基于三维数据输入的算法测试(比如面向混合交通流环境下自动驾驶的路径规划^[23]、自主避障等)。通过上述过程来实现完整的混合交通流仿真测试与优化全流程。

1.2 考虑V2X环境的驾驶行为控制方法

由于高速公路相对封闭的环境,车与行人的信息交互在本框架内不被考虑,车辆/驾驶员将会根据实际的驾驶场景以及接收到的信息采取对应的驾驶行为。SC-V2XSim的信息基础主要有3类(见图2),图2中蓝色车辆为智能网联车辆,黑色车辆为人类驾驶车辆。第一类是搭载有智能终端设备的智能网联车辆之间的信息交互(例如车速、位置信息、车道信息、减速/换道状态等);第二类是智能路侧设备(road side unit, RSU)的信息反馈,如感知范围外的拥堵情况,不具有信息传输功能的慢速车辆、管控措施等;考虑到智能网联车辆自身会配置有传感器,第三类信息是车辆自身传感器的感知信息,主要感知车辆周边环境及车辆状态。相比传统车辆仿真,V2X条件下车辆对信息的感知范围将不再局限于驾驶员的视觉或车载广播,因此车辆对路况信息的感知范围将会大大增加。此外,先进设备基础上测量得到的各类感知信息精确性更高,车载系统可以基于这些信息进行计算,向驾驶员反馈行驶建议,由驾驶员自行选择是否采纳。V2X条件下,车辆的行为将具有前瞻性、安全性和高效性。前瞻性是由于感知范围的扩大,驾驶员能够对视线范围外的突发情况提前做出反应,安全性同理。根据V2V以V2I反馈的路况信息,及时换道或更换路线,能够减轻可能发生的拥堵,提升高速路网的运行效率。然而,由于人类驾驶员的行为受主观判断影响较大,系统建议的驾驶行为在某些情况有一定概率不被驾驶员采纳。因此,本文对于V2X车辆控制划分为3类,包括微观层面的驾驶控制与驾驶建议、宏观层面的智慧导航,并且在框架中加入了驾驶建议的遵从率。

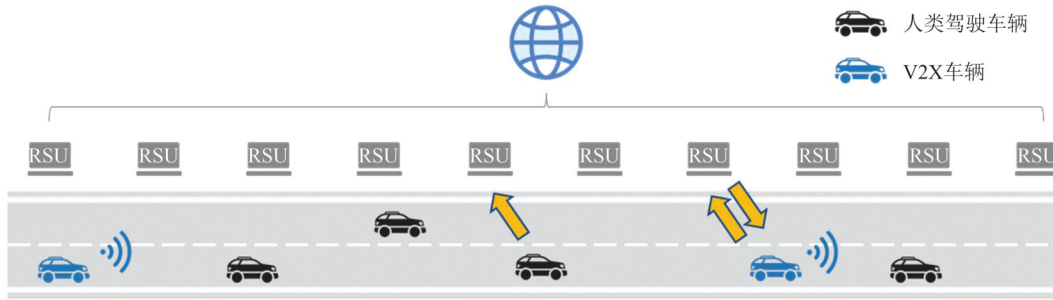


图 2 高速公路 V2X 信息传递示意

Fig. 2 Diagram of Highway V2X Information Transmission

1) 驾驶控制。驾驶控制是指在突发情况(如前车突然刹车、相邻车道车辆突然换道)下,车载控制系统直接控制车辆进行减速,防止由于驾驶员反应时间过长造成的安全隐患。驾驶控制事关行车安全性,因此优先级最高。当 V2X 车辆前方存在换道行为或急减速行为时,车辆提前减速,减速度与当前车道的后车状态相关,减速行为无反应时间。在前车突然换道至 V2X 车辆车道场景下,若 $k_{i+1}(t) - k_i(t) \leq L_s$ (其中,前车位置为 $k_{i+1}(t)$, $k_i(t)$ 为 V2X 车辆位置, L_s 为 V2X 车辆检测范围), 则检测前车的当前时间横向加速度 $a_{i-1}^x(t)$, 若前车横向加速度大于所设定阈值 A^x , 即 $a_{i-1}^x(t) \geq A^x$, 则 V2X 车辆立即减速。在前车突然减速场景下, 若 $k_{i+1}(t) - k_i(t) \leq L_s$ 且 $a_{i-1}^y(t) \geq A^y$, 则 V2X 车辆立即减速。

2) 驾驶建议。驾驶建议是车辆针对获取到的感知信息给出的驾驶建议, 比如前方慢速车辆位置, 建议提前减速/换道等。当 V2X 车辆前方存在慢速车辆或前方道路状况良好, 则建议 V2X 车辆减速或加速。在 V2X 车辆前方存在慢速车辆场景下, 若 $k_{i+1}(t) - k_i(t) \leq L_s$, 前车速度 $v_{i+1}(t) \leq V_d$ 时 (V_d 为定义慢速车辆的阈值), 则建议 V2X 车辆减速。在 V2X 车辆前方道路状况良好场景下, 当 $k_m(t) - k_i(t) \geq K$ 时 ($m=i+1, i+2, \dots, K$ 为触发建议加速的阈值), 则建议 V2X 车辆加速。

3) 智慧导航。智慧导航用于向车辆提供宏观层面的管控信息, 例如前方道路是否发生拥堵、预计等待时间、建议从某匝道口离开高速等。例如, 当高速公路前方区域发生拥堵, 且排队时长超过驾驶员的忍耐限度时, 算法将建议驾驶员从最近的匝道口驶离高速。统计路侧设施所在的各截面流量 $q_i(t)$ 、平均车速 $\bar{v}_i(t)$, 识别拥堵发生区段及拥堵程度, 预估计算拥堵消散时间 T 。记拥堵截面向后传播速度为 w , v' 为车辆速度, 车

辆当前位置到达拥堵截面位置的距离为 L_c , 则当 $T - \frac{L_c}{w + v'} \geq T_{max}$ 时, 将建议驾驶员从匝道口离开高速公路, 其中 T_{max} 为等待时间阈值。

进一步地, 在考虑不同的驾驶行为与高速公路特征的基础上, 本文构建 6 大典型车路协同场景, 如图 3 所示。

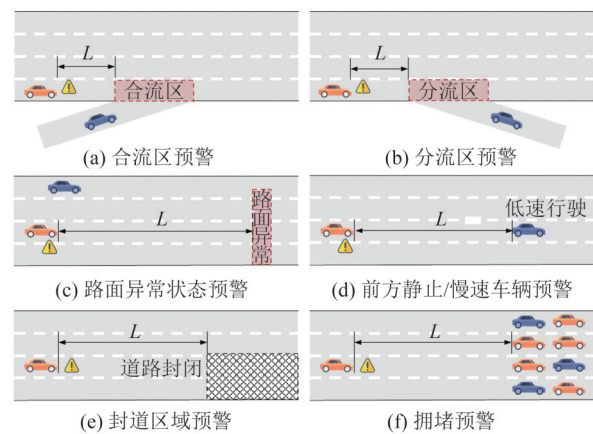


图 3 车路协同典型场景

Fig. 3 Typical Scenario of V2X

1) 合流区预警。如图 3(a) 所示, 当 V2X 车辆距离道路合流区为 1 km 和 0.5 km 时, V2X 车辆接收预警信息, 提醒车辆即将到达合流区。

2) 出匝道预警。如图 3(b) 所示, 当 V2X 车辆距离道路分流区为 1 km 和 0.5 km 时, V2X 车辆接收预警信息, 提醒车辆即将到达分流区。

3) 路面异常状况预警。如图 3(c) 所示, 路侧单元检测到路面异常时, 向距离路面异常上游 1 km 和 0.5 km 的 V2X 车辆推送路面异常预警信息。

4) 前方静止/慢速车辆预警, 如图 3(d) 所示, 路侧单元检测到前方静止/慢速车辆时, 向距离该车上游 1 km 和 0.5 km 的 V2X 车辆推送异常车辆预警信息。

5) 封道区域预警。如图 3(e) 所示, 路侧单元

在获取道路封道信息后,向距离封闭道路起点上游1 km和0.5 km的V2X车辆推送异常车辆预警信息。

6)前方拥堵预警。如图3(f)所示,路侧单元在检测到道路发生拥堵时,向距离拥堵路段起点上游1 km和0.5 km的V2X车辆推送异常车辆预警信息。

SC-V2XSim的整体仿真流程如下:基本仿真环境配置包含仿真时长、混行比例(普通车辆、理想条件下的无人驾驶车辆、V2X车辆)。采用RSU作为路侧智能设备,其参数包含相邻设备间隔距离、信息反馈的时间粒度等。3种参照信息对应了3种限制条件:车载传感器感知距离、车车通讯距离最大值、车-设备通讯距离最大值。若仿真过程中触发了预先设置的3类控制场景,即驾驶控制、驾驶建议、智慧导航,则对车辆进行控制。同时,无人驾驶车辆算法由CARLA端输入,具备高度灵活性,可以自由接入任意控制算法对无人驾驶端的算法进行测试与优化。



图4 沪杭甬高速公路仿真路网

Fig. 4 Shanghai-Hangzhou-Ningbo Highway Simulation Network

2.1 基于卡口数据的车流还原方法

基于现实世界真实数据在仿真中还原人类驾驶车流是进行联合仿真测试的关键环节。本文提出了一种基于真实卡口数据的车流还原方法,根据高速公路卡口经纬度信息实现高速公路卡口和仿真路网的匹配,并根据历史卡口过车数据实现仿真过程背景车流量的导入。

首先基于最近邻匹配算法将实际高速公路卡口根据经纬度信息与仿真路网进行关联匹配。其次,根据历史卡口过车数据实现仿真过程背景车流量的导入,其特征在于用户选取历史时间片段,SC-V2XSim实现过车数据自动化生成仿真内

2 案例分析

本文选取了沪杭甬高速公路进行实际验证与测试。SC-V2XSim系统仿真测试被设定以红垦枢纽为起点的110 km区段上。仿真参数输入如表1所示,图4展示了沪杭甬高速公路110 km的SUMO仿真路网示意图。

表1 SC-V2XSim的仿真输入参数

仿真参数	仿真值
仿真时长/s	3 600
感知错误率	0.1
V2X渗透率	0.2
自动驾驶车辆渗透率	0.2
遵从率	0.7
RSU覆盖率	0.5
感知设备间距/m	100
车车交互感知距离/m	50
车设备交互感知距离/m	50

高速公路路段的道路交通流量,具体的流程如下:

1) 时间片段内过车数据获取。仿真载入起始时间为 t_0 ,车流量载入终止时间为 t_1 ,对于单条过车数据,若卡口记录时间 $t_0 \leq t_i \leq t_1$,则保存该过车数据;

2) 车流量生成。针对过程1)中所保存的过车数据,选取同一车辆 i 的多条过车数据 $D_k^i(k=0, 1, 2, \dots, n)$,代表车辆 i 的 n 条过车数据。记录车辆 i 的第一次过车数据 D_1^i 的卡口 E_1 作为该车于仿真路网出行起点,记录车辆 i 的最后一次过车数据 D_n^i 的卡口 E_n 作为车辆于仿真路网的出行

终点;

3) 车辆速度计算。针对所生成的仿真车辆 i , 采取所记录的相邻过车数据计算其车辆速度:

$$V_k^i = \frac{L_{E_{k+1}}^i - L_{E_k}^i}{t_{E_{k+1}}^i - t_{E_k}^i} \quad (1)$$

式中, $L_{E_{k+1}}^i$ 为记录车辆 i 第 $k+1$ 条过车数据的卡口 E_{k+1} 的位置; $L_{E_k}^i$ 为记录车辆 i 第 k 条过车数据的卡口 E_k 的位置; $t_{E_{k+1}}^i$ 为记录车辆 i 第 $k+1$ 条过车数据的时间; $t_{E_k}^i$ 为记录车辆 i 第 k 条过车数据的时间。

采用上述方法实现基于真实卡口数据的人类驾驶车辆行为控制, 为仿真提供重要输入, 为后续进行 V2X 车辆测试提供背景测试交通流。

2.2 基于仿真的车路协同场景测试

根据所构建的高速仿真环境与卡口数据还原车流之后, 本节针对车路协同控制算法进行验证与测试。针对驾驶控制、驾驶建议和智慧导航 3 种算法, 分别选取典型场景对算法有效性进行实验。如图 5(a) 所示, 该测试场景为前车人类驾驶车辆采取了一个临时的变道行为, 观察后车 V2X 车辆的行为变化。图 5(a) 中蓝色曲线代表

了没有开启驾驶控制算法的测试车辆, 橙色代表了开启驾驶控制功能的 V2X 车辆。观察车辆车速随时间的变化, 人类驾驶车辆在 $t=5$ s 时突然变道至 V2X 车辆所在车道, 观察两条速度变化曲线可以看出, 开启了驾驶控制功能的 V2X 车辆立即减速, 相比于不开启功能的测试车辆具有更快的应急反应能力。如图 5(b) 所示, 测试场景为同车道的人类驾驶车辆前车突然减速。当前车突然减速时, 辅助驾驶系统将直接控制车辆立即减速, 避免驾驶员反应不及造成安全隐患。图 5(b) 中, 蓝色、橙色和绿色曲线分别代表人类驾驶车辆、关闭驾驶控制功能的测试车辆以及开启驾驶控制功能的 V2X 车辆的车速随仿真时间的变化。在初始阶段, 人类驾驶前车以 35 m/s 的速度稳定行驶, 在第 10 秒左右前车突然刹车。此时开启了驾驶控制功能的 V2X 车辆也立即从 33 m/s 减速至 28 m/s, 而未开启驾驶控制功能的车辆将在第 17 秒左右才开始减速。结果显示, 开启驾驶控制算法的辅助驾驶功能可以有效保证驾驶员的行车安全, 在前车突然减速的情况下及时制动, 避免事故。

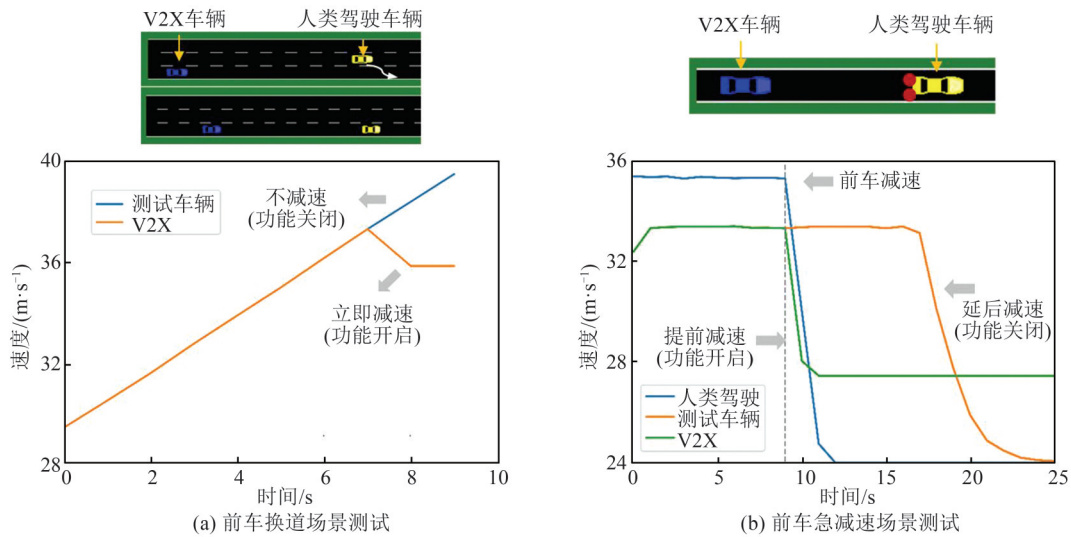


图 5 驾驶控制算法测试

Fig. 5 Test of Driving Control Algorithm

对于驾驶建议算法进行仿真测试, 结果如图 6 所示。当前方 V2X 车辆由于道路异常等需要采取制动与减速情况时, 该车辆将信息反馈给后方 V2X 车辆, 驾驶系统基于该信息, 结合与前方人类驾驶车辆距离等信息, 给出提前减速建议。图 6 中, 横、纵坐标均分别代表仿真时间和车辆速度。驾驶建议功能开启时, 同车道前方 V2X 车辆减速信息能够传递到后方间隔的 V2X 车辆, 对比开启驾驶建议前的测试车辆与 V2X 车辆, V2X 车辆能

够提前减速保持相对安全的车距。同时, 对于事故拥堵场景, 驾驶建议能够将下游的严重拥堵等信息传递到上游, 对于还未进入收费站的车辆提供宏观层面的路径选择建议。

进一步地, 为了测试 V2X 控制算法的性能, 对不同 V2X 渗透率下的交通流特征进行分析。选取沪杭甬高速中多个临近枢纽的关键路段, 长度约为 2 km。测试了在 0%、20%、50%、100% 4 种不同渗透率情况下不同路段的评价速度, 由表 2

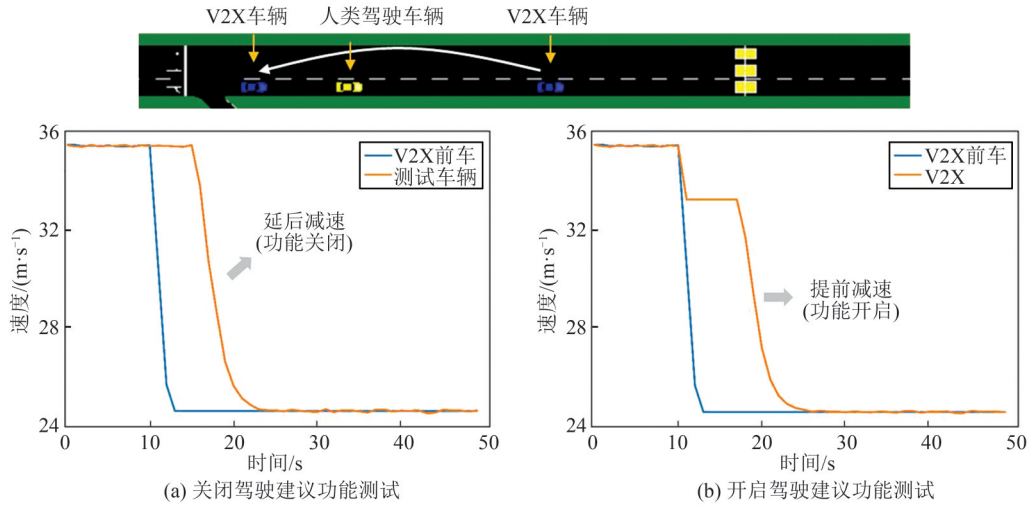


图6 驾驶建议算法测试

Fig. 6 Test of Driving Suggestion Algorithm

可以看出,随着渗透率的增加,路段的整体平均速度不断提升,在具有100%的V2X渗透率情况下,路段的平均速度约有15%左右的提升。

表2 不同V2X渗透率下关键路段平均车速变化/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)

Tab. 2 Change of Average Speed on Key Road Sections Under Different V2X Permeability/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)

路段名称	不同V2X渗透率/%			
	0	20	50	100
红垦枢纽_机场互通_杭州方向	84	86	90	99
机场互通_瓜沥互通_杭州方向	93	93	98	108
瓜沥互通_柯桥互通_杭州方向	92	94	100	105
柯桥互通_齐贤枢纽_杭州方向	88	90	99	103
齐贤枢纽_绍兴互通_杭州方向	84	85	94	99
绍兴互通_沽渚枢纽_杭州方向	85	87	92	100
沽渚枢纽_上虞互通_杭州方向	78	82	86	90
上虞互通_牟山互通_杭州方向	71	74	78	86
牟山互通_余姚西枢纽_杭州方向	88	90	97	104
余姚西枢纽_余姚互通_杭州方向	83	85	93	98

综合上述分析可以得出:开启驾驶控制、驾驶建议与智慧导航功能的V2X算法在典型的仿真场景测试下相较于人类驾驶车辆,具备更良好的驾驶行为,能够在周围车辆做出不合理驾驶行为情况下及时反馈调整。

3 考虑V2X环境的智慧高速服务水平评价体系

智慧高速公路服务水平的影响因素是一个多层次的复杂结构体系,且各种因素之间又存在着错综复杂的关系^[24]。构建面向智慧高速公路

的服务水平评价需要综合考虑智慧高速的交通服务质量特性,以及相较于传统高速公路的优化提升效果。现有的评价体系大多面向传统公路,缺乏将车路协同等因素考虑在内^[25]。因此,面向结合新一代信息化技术的智慧公路,亟需构建一个全面、系统、量化的服务水平评价指标体系。

考虑到智慧高速公路服务水平的评价涉及智慧、安全、效率、绿色等多个方面^[26],本文将基于层次分析法^[27]构建融合车路协同等多因素的新一代智慧高速公路服务水平评价体系。利用层次分析法进行服务水平评价时,主要涉及评价内容的分析、评价指标的选取、评价指标的无量纲化、指标的打分、综合得分的计算5个部分。

目前已有的相关研究中,文献[28]基于GIS,面向车路协同,建立智慧高速信息服务水平评价指标体系,其中应用层从安全、效率两个角度对不同路段进行评价,安全类指标包括多种道路预警和提示,效率则包含信息推送和管理。文献[29]基于能力和效益对智慧高速公路能力进行评估,具体评价指标包括交通监测、交通管控、信息服务等。

本文基于层级分析法的服务水平评价体系覆盖智慧高速建设、管理、养护、运营全生命周期,分为目标层、准则层、指标层3个层次。如文献[30]对于新一代智慧高速公路系统架构进行了设计研究,本文重点考察智慧高速的物理系统(全息感知技术、车路协同技术、智慧管控等)和信息系统(数字孪生、智慧服务等)。3个层次分别用不同的指标来衡量智慧高速的服务水平。其中,目标层是智慧高速服务水平评价的影响因素,指明本评价体系是从多维度考虑智慧高速服

务水平影响因素而构建的;准则层是在目标层下,将评价指标分为智慧建设与养护、全息感知、数字孪生、车路协同、智慧管理、智慧控制、智慧

运营和智慧服务 8 个方面;指标层则是准则层指标的进一步细分,从多个指标实现准则层评价。建立的评价指标体系如表 3 所示。

表 3 考虑 V2X 的智慧高速评价指标表

Tab. 3 Intelligent Highway Evaluation Index Considering V2X

目标层	准则层	指标层	说明
智慧高速服务水平评价影响因素 (A)	智慧建设与养护(B ₁)	智能化建设水平(B ₁₁)	建设阶段安全、进度、质量、成本的精细化和智能化管理水平
		桥隧健康智能检测水平(B ₁₂)	是否利用高新技术手段对桥梁隧道进行健康检测
		设施数字化管养水平(B ₁₃)	数字化、精细化接养水平
		设施全寿命养护能力(B ₁₄)	是否有效进行预防性养护,科学把握寿命周期规律
	全息感知(B ₂)	交通运行状态感知情况(B ₂₁)	如车辆驾驶行为、动态交通流量
		交通事件感知情况(B ₂₂)	异常停车、行人闯入、车辆逆行等道路异常事件检测
		路域环境感知情况(B ₂₃)	如气象环境、路侧绿化环境等
		基础设施监测情况(B ₂₄)	如路面性能、结构健康状态、附属设施完善程度
		能耗信息感知情况(B ₂₅)	对能源消耗情况进行分析
	数字孪生(B ₃)	物理虚拟模型搭建能力(B ₃₁)	物理实体与虚拟实体的数据同步和物理虚拟模型的构建情况
		数据解析算法性能(B ₃₂)	算法仓库的构建,多源异构数据解析能力
		平行仿真推演能力(B ₃₃)	推演效果,对于分析决策的支持能力
	车路协同(B ₄)	自动驾驶支持能力(B ₄₁)	驾驶辅助、智能网联和群体协同 3 个阶段
		智能网联交互功能(B ₄₂)	智能网联交互功能的性能优越程度、功能完善程度
智慧管理(B ₅)	货车编队运行情况(B ₄₃)	能否实现货车编队全自动驾驶	
	收费管理情况(B ₅₁)	是否实现自由流收费、收费资源优化情况	
	车辆信用管理情况(B ₅₂)	对于信用信息的管理情况	
	恶劣条件应急能力(B ₅₃)	极端恶劣天气等情况下的应急能力	
智慧控制(B ₆)	突发事故救援能力(B ₅₄)	突发事件的救援反应速度和处理能力	
	路网级协同诱导能力(B ₆₁)	路网级别的分流诱导情况	
	匝道精细控制能力(B ₆₂)	匝道车流精细控制的能力	
	车道级精细控制能力(B ₆₃)	车道级精细控制的能力	
智慧运营(B ₇)	主动可变限速能力(B ₆₄)	动态限速策略实施能力	
	智慧高速资产管理系统建设(B ₇₁)	资产管理、运营、分析的能力	
	数据增值服务系统建设(B ₇₂)	整合资源、促进经济的能力	
智慧服务(B ₈)	数据生态产业圈建设(B ₇₃)	商业价值实现能力	
	信息发布质量(B ₈₁)	是否准确、是否延迟	
	5G 网络部署质量(B ₈₂)	是否支持 5G,部署质量如何	
	伴随式信息服务水平(B ₈₃)	行驶指引、信息提示等功能完善程度	
		智慧服务区建设水平(B ₈₄)	智能充电、安全监控、智慧运营情况

将智慧高速服务水平评价分解为 3 个层次的指标后,还需要通过构造判断矩阵、计算指标权重、一致性检验、判断矩阵调整和层次总排序一致性检验这 5 个步骤,构建基于层次分析法的智慧高速服务水平评价体系。

1) 构造判断矩阵。采取专家调查问卷的形式,对指标体系中同一层的各指标进行两两对比,并且针对于特定的评价目标进行重要性程度排序,按照事先定好的标度值构造出判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,其形式为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵中元素 a_{ij} 反映针对准则 A_k 元素 a_i 相对于 a_j 的重要程度,此矩阵是一个互反矩阵,有如下性质:

$$a_{ij} > 0, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ii} = 1 \quad (3)$$

专家调查问卷打分具体通过比较两个指标的相对重要性。此指标体系共设计了30个二级

指标,需要各位专家根据经验对每一层指标相对于它所属上一级指标的重要程度进行两两比较,然后结合标度含义表4进行打分。打分表分为一级指标表和二级指标表。如表5所示,考虑第一级指标相对于总目标“智慧高速服务水平”的重要性,如果“智慧建设养护水平”比“全息感知”明显重要,那么就在矩阵的上三角对应位置填5;如果“智慧建设养护水平”相比“全息感知”稍微不重要,那么相应位置就填1/3。同理,表6为二级指标相对于一级指标的相对重要性打分表示例。假设调查对象即访问的专家为 m ,通过专家问卷调查,目标层和准则层的每个指标都可以得到 m 个两两比较矩阵。

表4 判断矩阵标度定义

Tab. 4 Definition of Judgment Matrix Scale

标度	含义
1	两个因素相比,具有相同重要性
3	两个因素相比,前者比后者稍微重要
5	两个因素相比,前者比后者明显重要
7	两个因素相比,前者比后者强烈重要
9	两个因素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 a_{ij} ,那么因素 j 与因素 i 重要性之比为 $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$

表5 一级指标打分表示例

Tab. 5 Example of the First Level Indicators Scoring Representation

指标	智慧建设与养护	全息感知	数字孪生	车路协同
智慧建设与养护	1	1	1/2	1/4
全息感知	1	1	1	1/2
数字孪生	2	1	1	1/2
车路协同	4	2	2	1

2)计算指标权重。层次分析法中,求解权重向量 B 的方法主要有几何平均法、算术平均法、特征值向量和最小二乘法4种。本文采用特征值向量法。

根据获得的判断矩阵就可以计算各层因素的权重:针对目标层或准则层某一指标,假设其下层各指标的最大特征向量为 $B = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T$,可以通过求解下列方程式得到 B 和 λ_{max} ,它们分别对应判断矩阵 A 的特征向量和最大特征值:

表6 二级指标打分表示例

Tab. 6 Example of the Second Level Indicators Scoring Representation

指标	智能化建设水平	桥隧健康智能检测水平	设施数字化管养水平	设施全寿命养护能力
智能化建设水平	1	2	1	1/3
桥隧健康智能检测水平	1/2	1	1	1
设施数字化管养水平	1	1	1	2
设施全寿命养护能力	3	1/2	1	1

$$AB = \lambda_{\max} B \quad (4)$$

把计算出来的特征向量 $B = [\beta_1 \beta_2 \beta_3]^T$ 进行归一化处理, 可得到权重向量 $W = [\omega_1 \omega_2 \cdots \omega_n]^T$, 即:

$$\omega_i = \frac{\beta_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i} \quad (5)$$

3) 一致性检验。(1) 计算一致性指标 (consistency index, CI) I_{CI} :

$$I_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

(2) 根据如表 7 所示的平均随机一致性指标 (random consistency index, RI) 表, 可以查找到不同矩阵阶数 n 所对应的值 I_{RI} :

表 7 平均随机一致性指标

Tab. 7 Average Random Consistency Indicators

n	I_{RI}	n	I_{RI}
1	0	8	1.41
2	0	9	1.46
3	0.52	10	1.49
4	0.89	11	1.52
5	1.12	12	1.54
6	1.24	13	1.56
7	1.26	14	1.56

(3) 基于 I_{CI} 值与对应的 I_{RI} , 便能够计算一致性比例 (consistency ratio, CR) I_{CR} :

$$I_{CR} = \frac{I_{CI}}{I_{RI}} \quad (7)$$

当 $I_{CR} < 0.10$ 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的; 否则应对判断矩阵作适当修正。

4) 判断矩阵调整。由于所研究问题的复杂性和人们认识上可能产生的片面性, 构造出的判断矩阵往往不具有 consistency, 这时可应用如下方法对判断矩阵进行调整, 具体的调整步骤为:

(1) 将矩阵 (设都是 $n \times n$ 的方阵) 中的元素 a_{ij} (其中 $1 < i \leq n, 1 \leq j \leq n$) 除以 \bar{a}_{ij} ($\bar{a}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_{ik} a_{kj}$), 令变量 $b_{ij} = a_{ij} / \bar{a}_{ij}$ 。

(2) 若 $b_{ij} < 1$, 且 $a_{ij} = 9$, 或 $b_{ij} > 1$ 且 $a_{ij} = 1/9$, 则不计算偏离距离 d_{ij} ; 其他情况都计算偏离距离 d_{ij} 。

(3) 比较出最大的 d_{ij} , 并记录元素的序号 i 和 j 的值, 取 1~9 标度中最接近 a_{ij} 的数代替元素 a_{ij} 。

(4) 重新计算 λ_{\max} , 检验调整后的矩阵一致性, 如果不一致, 按照以上方法继续进行调整, 直到满足一致性。

5) 层次总排序一致性检验。最终要得到各

元素, 特别是最低层中各方案对目标的排序权重, 从而进行方案选择。对层次总排序也需要做一致性检验, 计算各层要素对系统总目标的合成权重, 并对各被选方案排序。

设上一层次 A 包含 n 个因素 A_1, A_2, \dots, A_n , 其层次权重值分别为 a_1, a_2, \dots, a_n , 如果 B 层次某些因素对于 A_i 单排序的一致性指标为 $I_{CI, i}$, 相应的平均随机一致性指标为 $I_{RI, i}$, 则 B 层次的总排序随机一致性比率为:

$$I_{CR} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i I_{CI, i}}{\sum_{i=1}^n a_i I_{RI, i}} \quad (8)$$

当 $I_{CR} < 0.10$ 时, 则层次总排序结果满足一致性要求。

选取在智慧交通领域具有丰富经验的 32 位专家, 通过调查问卷的方式得到各位专家对各指标之间重要性的判断打分。根据专家打分初步构造判断矩阵, 并通过上述步骤进行判断矩阵调整, 最终确定各指标对应的权重。

根据对智慧高速服务水平评价指标体系内各个指标重要程度的对比分析, 并参照标度表 (见表 4) 内对各个指标间的相对重要程度进行打分, 最终形成指标相对重要度矩阵 (见图 7)。

	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8
B_1	1.00	1.04	0.93	1.43	0.99	0.62	1.33	1.12
B_2	0.97	1.00	2.01	1.22	2.00	1.68	1.75	2.18
B_3	1.08	0.50	1.00	1.26	1.75	1.35	1.83	1.66
B_4	0.70	0.82	0.80	1.00	1.72	1.21	1.78	2.04
B_5	1.01	0.50	0.57	0.58	1.00	1.55	1.58	1.27
B_6	1.60	0.60	0.74	0.83	0.65	1.00	1.99	1.33
B_7	0.75	0.57	0.55	0.56	0.63	0.50	1.00	1.20
B_8	0.89	0.46	0.60	0.49	0.79	0.75	0.83	1.00

图 7 基准判断矩阵

Fig. 7 Baseline Judgment Matrix

指标层各指标重要度判断矩阵如图 8 所示。

针对服务水平评价指标体系各指标的一致性检验, 需要针对准则层各指标的一致性进行检验, 计算公式为:

$$\begin{cases} \lambda_{\max} = 8.2329 \\ n = 8 \\ I_{RI} = 1.46 \end{cases} \quad (9)$$

$$I_{CI} = \frac{8.2329 - 8}{8 - 1} = 0.03328 \quad (10)$$

$$I_{CR} = \frac{I_{CI}}{I_{RI}} = \frac{0.03328}{1.46} = 0.0236 < 0.1 \quad (11)$$

根据上述检测结果, 该体系满足一致性检验标准。进一步地, 按以上算法可依次检验指标层各指标的一致性, 如表 8 所示。

	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}		B_{21}	B_{22}	B_{23}	B_{24}	B_{25}		B_{31}	B_{32}	B_{33}		B_{41}	B_{42}	B_{43}
B_{11}	1.00	2.20	1.71	2.06	B_{21}	1.00	1.21	1.91	2.54	3.61	B_{31}	1.00	1.50	1.04	B_{41}	1.00	1.84	2.73
B_{12}	0.46	1.00	0.56	1.03	B_{22}	0.83	1.00	1.90	2.11	2.95	B_{32}	0.67	1.00	1.56	B_{42}	0.54	1.00	2.23
B_{13}	0.58	1.78	1.00	1.63	B_{23}	0.52	0.53	1.00	1.59	2.34	B_{33}	0.97	0.64	1.00	B_{43}	0.37	0.45	1.00
B_{14}	0.49	0.97	0.61	1.00	B_{24}	0.39	0.47	0.63	1.00	2.13								
					B_{25}	0.28	0.34	0.43	0.47	1.00								
	(a) 智慧建设与养护					(b) 全息感知					(c) 数字孪生				(d) 车路协同			
	B_{51}	B_{52}	B_{53}	B_{54}		B_{61}	B_{62}	B_{63}	B_{64}		B_{71}	B_{72}	B_{73}		B_{81}	B_{82}	B_{83}	B_{84}
B_{51}	1.00	1.27	0.90	0.92	B_{61}	1.00	2.07	2.05	2.01	B_{71}	1.00	1.74	1.79	B_{81}	1.00	1.63	1.48	1.89
B_{52}	0.79	1.00	1.37	0.48	B_{62}	0.48	1.00	1.00	1.19	B_{72}	0.58	1.00	1.16	B_{82}	0.61	1.00	1.54	1.83
B_{53}	1.12	0.73	1.00	0.70	B_{63}	0.49	1.00	1.00	1.63	B_{73}	0.56	0.86	1.00	B_{83}	0.68	0.65	1.00	1.22
B_{54}	1.09	2.09	1.42	1.00	B_{64}	0.50	0.84	0.61	1.00					B_{84}	0.53	0.55	0.82	1.00
	(e) 智慧管理					(f) 智慧控制					(g) 智慧运营				(h) 智慧服务			

图8 指标层重要度判断矩阵

Fig. 8 Judgment Matrix of Importance of Index Layer

表8 指标层各指标一致性检验表

Tab. 8 Consistency Check of Indicators at Indicator Layer

指标层指标	I_{CI}	I_{CR}	是否满足一致性
B_1	0.005 2	0.005 8	满足
B_2	0.009 4	0.008 4	满足
B_3	0.039 1	0.075 2	满足
B_4	0.010 7	0.020 7	满足
B_5	0.027 0	0.030 3	满足
B_6	0.008 2	0.009 3	满足
B_7	0.002 3	0.004 4	满足
B_8	0.011 3	0.012 6	满足

各个指标计算所得的权重汇总如表9和表10所示。

表9 准则层权重汇总表

Tab. 9 Summary of Weight of Criterion Layer

分层	指标名称	总体权重
准则层	全息感知	0.185 9
	数字孪生	0.146 2
	车路协同	0.140 5
	智慧建设与养护	0.127 2
	智慧控制	0.122 6
	智慧管理	0.112 2
	智慧服务	0.083 5
	智慧运营	0.081 9

基于各项指标权重,可以建立考虑V2X环境的智慧高速服务水平评价体系方程,具体计算公式为:

$$f = 0.127 2B_1 + 0.185 9B_2 + 0.146 2B_3 + 0.140 5B_4 + 0.112 2B_5 + 0.122 6B_6 + 0.081 9B_7 + 0.083 5B_8 \quad (12)$$

$$B_i = \sum_j (k_{ij} \times B_{ij}) \quad (13)$$

式中, f 为服务水平评价的最终指数值; B_i 是第*i*个准则层的指数值; k_{ij} 是第*i*个指标层第*j*个指标的权重值; B_{ij} 是第*i*个指标层第*j*个指标的指数值。

表10 指标层权重汇总表

Tab. 10 Index Layer Weight Summary

准则层	指标层	总体权重
车路协同	自动驾驶支持能力	0.072
全息感知	交通运行状态感知情况	0.061
数字孪生	物理虚拟模型搭建能力	0.056
全息感知	交通事件感知情况	0.052
智慧建设与养护	智能化建设水平	0.050
智慧控制	路网级协同诱导能力	0.049
数字孪生	数据解析算法性能	0.049
车路协同	智能网联交互功能	0.045
数字孪生	平行仿真推演能力	0.041
智慧运营	智慧高速资产管理系统建设	0.038
智慧管理	突发事故救援能力	0.037
智慧建设与养护	设施数字化管养水平	0.034
全息感知	路域环境感知情况	0.033
智慧服务	信息发布质量	0.029
智慧管理	收费管理情况	0.028
智慧控制	车道级精细控制能力	0.027
智慧控制	匝道精细控制能力	0.025
全息感知	基础设施监测情况	0.025
智慧管理	恶劣条件应急能力	0.024
智慧管理	车辆信用管理情况	0.024
车路协同	货车编队运行情况	0.023
智慧服务	5G网络部署质量	0.023
智慧运营	数据增值服务系统建设	0.023
智慧建设与养护	设施全寿命养护能力	0.022
智慧建设与养护	桥隧健康智能检测水平	0.021
智慧控制	主动可变限速能力	0.021
智慧运营	高速公路数据生态产业圈建设	0.021
智慧服务	伴随式信息服务水平	0.017
全息感知	能耗信息感知情况	0.015
智慧服务	智慧服务区建设水平	0.014

根据最终准则层权重和指标层权重汇总表,可以得到各影响因素对考虑V2X环境的智慧高速服务水平评价体系的影响程度。8个准则层中,权重最高的为全息感知层,其次是数字孪生

和车路协同。V2X环境下,道路、车辆、基础设施、设备与云平台之间的通讯是支撑V2V、V2I、V2P、V2N等应用场景的重要支撑,因此全息感知能力是这些应用场景服务水平的重要影响因素,其高权重与实际情况相符。智慧高速是充分利用互联网、云计算、物联网实现的高速公路智慧化总体设计,数字孪生可以反映其全生命周期过程,车路协同是实现自动驾驶的核心技术,因此两项对于智慧高速服务水平评价的影响较大。8个准则层下,有30个指标层,表10是按权重排列的指标层列表。其中,车路协同准则层下的自动驾驶支持能力指标层的权重最高,为0.072,而全息感知准则层下的交通运行状态和交通事件感知情况指标层、数字孪生准则层下的物理虚拟模型搭建能力和数据解析算法性能指标层、智慧建设与养护准则层下的智能化建设水平指标层、智慧控制准则层下的路网级协同诱导能力指标层的权重也均达到了0.050左右。V2X环境下智慧高速的高质量服务离不开自动驾驶技术、道路和基础设施建设、道路交通感知和诱导能力,这些指标层的高权重值是符合评价目标的。

4 结 语

本文提出了一种考虑V2X环境,基于微观交通仿真工具SUMO与车辆仿真工具CARLA的混合交通流联合仿真框架SC-V2XSim。该框架支持在微观交通仿真侧构建人类驾驶模型与具备驾驶控制、驾驶建议与智慧导航功能的V2X模型,在车辆仿真侧接入自动驾驶等测试算法,实现协同仿真与映射反馈,同时基于浙江省沪杭甬高速公路对该框架进行了验证,并基于层次分析法建议了考虑V2X等新一代信息技术的智慧高速公路服务水平评价体系。未来拟结合通信仿真,将通信成本与传输方法考虑在框架内,进一步还原V2X环境的混合交通流。

参 考 文 献

- [1] Zhao Xiangmo. Research Progress in Testing and Evaluation Technologies for Autonomous Driving[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(6): 10-77. (赵祥模. 自动驾驶测试与评价技术研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(6): 10-77.)
- [2] Wang Z L, Shi Y Y, Tong W P, et al. Car-Following Models for Human-Driven Vehicles and Autonomous Vehicles: A Systematic Review[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2023, 149(8): 04023075.
- [3] Xu Z C, Sun F Y. A Simulation Study on V2X for Road Traffic Management [C]//The 10th International Conference on Information Systems and Computing Technology, Guilin, China, 2022.
- [4] Wang X Y, Han J Y, Bai C L, et al. Research on the Impacts of Generalized Preceding Vehicle Information on Traffic Flow in V2X Environment [J]. *Future Internet*, 2021, 13(4): 88.
- [5] Dai Y L, Yang Y W, Zhong H M. Impact of Platoon Management on Heterogeneous Traffic Under V2X Communication Limitation [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2023, 2677(5): 1100-1119.
- [6] Wu C, Kreidieh A, Parvate K, et al. Flow: A Modular Learning Framework for Mixed Autonomy Traffic [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, 38(2): 1270-1286.
- [7] Zhao Wangyu, Li Bijun, Shan Yunxiao, et al. Vehicle Detection and Tracking Based on Fusion of Millimeter Wave Radar and Monocular Vision [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1832-1840. (赵望宇, 李必军, 单云霄, 等. 融合毫米波雷达与单目视觉的前车检测与跟踪[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(12): 1832-1840.)
- [8] Gu Z Y, Yang X, Zhang Q, et al. TERL: Two-Stage Ensemble Reinforcement Learning Paradigm for Large-Scale Decentralized Decision Making in Transportation Simulation [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2023, 35(12): 13043-13054.
- [9] Chen S K, Wang H, Xiao L, et al. Random Capacity for a Single Lane with Mixed Autonomous and Human-Driven Vehicles: Bounds, Mean Gaps and Probability Distributions [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 160: 102650.
- [10] Mena-Oreja J, Gozalvez J. PERMIT: A SUMO Simulator for Platooning Maneuvers in Mixed Traffic Scenarios [C]//The 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems, Maui, USA, 2018.
- [11] Vinitzky E, Lichtlé N, Parvate K, et al. Optimizing Mixed Autonomy Traffic Flow with Decentralized Autonomous Vehicles and Multi-agent Reinforcement Learning [J]. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2023, 7(2): 13.
- [12] Do W, Rouhani O M, Miranda-Moreno L. Simula-

- tion-Based Connected and Automated Vehicle Models on Highway Sections: A Literature Review [J]. *Adv Transp*, 2019(1): 1-14.
- [13] Zhuo L. Research on Reliability of Autonomous Emergency Braking System Based on Prescan [C]// IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications, Dalian, China, 2022.
- [14] Han B, Zhang Y, Liu Y, et al. Performance Test of V2X Vehicle Collision Warning Algorithm Based on Combination of Virtual Reality Fusion [J]. *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering and Computer Science*, 2023, 85(2): 111-124.
- [15] Nalic D, Pandurevic A, Eichberger A, et al. Design and Implementation of a Co-simulation Framework for Testing of Automated Driving Systems [J]. *Sustainability*, 2020, 12(24): 10476.
- [16] Shi Y Y, Liu Z K, Wang Z H, et al. An Integrated Traffic and Vehicle Co-simulation Testing Framework for Connected and Autonomous Vehicles [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2022, 14(6): 26-40.
- [17] Pariota L, Coppola A, Di Costanzo L, et al. Integrating Tools for an Effective Testing of Connected and Automated Vehicles Technologies [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2020, 14(9): 1025-1033.
- [18] Jia D Y, Sun J, Sharma A, et al. Integrated Simulation Platform for Conventional, Connected and Automated Driving: A Design from Cyber-Physical Systems Perspective [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 124: 102984.
- [19] Lopez P A, Behrisch M, Bieker-Walz L, et al. Microscopic Traffic Simulation Using SUMO [C]// The 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems, Maui, USA, 2018.
- [20] Dosovitskiy A, Ros G, Codevilla F, et al. CARLA: An Open Urban Driving Simulator [J]. *CoRL*, 2017(1): 1-16.
- [21] Zhang Yanhuang, Huang Wei, Liu Xintao, et al. An Approach for High Definition (HD) Maps Information Interaction for Autonomous Driving [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230166. (张焱杰, 黄炜, 刘信陶, 等. 自动驾驶高精地图信息交互方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230166.)
- [22] Li Bijun, Guo Yuan, Zhou Jian, et al. Development and Prospects of High Definition Map for Intelligent Vehicle [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230287. (李必军, 郭圆, 周剑, 等. 智能驾驶高精地图发展与展望 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230287.)
- [23] Guo Xiaomin, Li Bijun, Long Jiangyun, et al. Path Planning of Urban Autonomous Driving Using Laser Point Cloud Data [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(4): 182-190. (郭晓旻, 李必军, 龙江云, 等. 利用激光点云的城市无人驾驶路径规划算法 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 182-190.)
- [24] Khattak A. Level of Service of Multi-lane Highway Section Under Fluctuated Traffic Flow Condition: A State-Dependent Discrete-Event Simulation Framework [C]// The 5th International Conference on Transportation Information and Safety, Liverpool, UK, 2019.
- [25] Panchal S, Shrivastava A K. Landslide Hazard Assessment Using Analytic Hierarchy Process (AHP): A Case Study of National Highway 5 in India [J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2022, 13(3): 101626.
- [26] Wandelt S, Sun X Q. Lufthansa Express Rail in Germany: A Critical Evaluation of Benefits and Limitations of the Intermodal Network Based on Journey Time and Fares [J]. *Multimodal Transportation*, 2022, 1(4): 100048.
- [27] Zhang J, Cao Y P, Cao J L. Environmental Assessment of Low-Grade Highway Based on AHP-FCE Method [C]// The 7th International Conference on Industrial and Business Engineering, Macau, China, 2021.
- [28] Cui Youkai, Cang Yuntao, Cheng Mingle. Development and Application of GIS-Based Information Service Level Evaluation System for Intelligent Highway Vehicleway Collaborative Application [C]// World Transport Congress, Wuhan, China, 2023. (崔优凯, 常云涛, 程明乐. 基于GIS的智慧高速公路车路协同应用信息服务水平评价系统开发及应用 [C]// 世界交通运输大会, 中国武汉, 2023.)
- [29] Yang Chao, Cao Gengyong, Yang Song, et al. The Evaluation Indicators System of Smart Motorways [J]. *China Transportation Review*, 2023, 45(8): 47-51. (杨超, 曹更永, 杨松, 等. 智慧高速公路评价指标体系研究 [J]. 综合运输, 2023, 45(8): 47-51.)
- [30] Du Yuchuan, Liu Chenglong, Wu Difei, et al. Framework of the New Generation of Smart Highway [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 203-214. (杜豫川, 刘成龙, 吴获非, 等. 新一代智慧高速公路系统架构设计 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 203-214.)