

文章编号:1671-1637(2023)06-0010-68

# 自动驾驶测试与评价技术研究进展

赵祥模国家重点研发计划(2021YFB2501200)团队

**摘 要:**针对实际复杂交通运行环境中自动驾驶车辆整车级测试成本高、周期长、覆盖度低、缺乏完善工具链等难题,分析了自动驾驶测试与评价技术 7 大领域的研究现状,展望了未来发展方向,具体涵盖了自动驾驶车辆仿真测试技术、交通流仿真测试技术、硬件在环测试技术、场地测试技术、智能性评价技术、测试评价工具链与体系构建、认证与潜在缺陷检测技术等。在自动驾驶车辆仿真测试方面,分析了自动驾驶仿真测试软件、车辆动力学模型、测试背景车交互行为模型、云控平台监管的仿真测试与车辆仿真系统标准化的研究现状,总结了自动驾驶车辆仿真测试目前存在的主要问题;在自动驾驶交通流仿真测试方面,总结了测试背景车驾驶风格模型、交通流建模与仿真、交通场景生成方法和加速测试方法的研究现状,展望了自动驾驶交通流仿真测试的未来发展趋势;在硬件在环测试技术方面,总结了人-车-路-环多维数字孪生测试和自动驾驶车辆整车级系统平台构建方法,概述了高清摄像头、毫米波雷达、超声波雷达等典型传感器数据与车车/车路通信信号的模拟技术;在场地测试技术方面,综述了封闭场地测试、开放道路测试与高速公路测试相关测试场、测试标准和关键技术的发展现状;在智能性评价技术方面,从自动驾驶智能性概念、场景复杂度量化和评估、自动驾驶智能性评价体系与社会合作性评价方法四方面介绍自动驾驶智能性评价方法的研究现状;在测试评价工具链与体系构建方面,主要从测试评价工具链技术、自动驾驶测试评价体系、自动驾驶测试标准现状三方面介绍了自动驾驶测试评价标准体系现状;在认证与潜在缺陷检测技术方面,从自动驾驶缺陷的定义、成因分析、缺陷分类、缺陷检测等方面综述了目前自动驾驶的缺陷检测方法,总结了自动驾驶车辆安全保障面临的挑战。研究结果表明:自动驾驶测试评价技术虽已取得较大进展,但测试评价标准体系仍不完善,现有测试工具与方法难以满足 L3 级及以上自动驾驶车辆测试需求;虚拟仿真与数字孪生技术发展应用水平较低,在拟真度、测试效率与整车级测试能力方面存在诸多不足;未来需进一步加强全场景、高保真建模技术与实时仿真软件研发,建立虚实交互的在线加速孪生测试系统,研究自动驾驶全栈危险测试场景生成和加速测试方法,整合自动驾驶测试技术和工具,形成自动驾驶测试评价的工具链,完善标准规范。

**关键词:**智能交通;自动驾驶;测试与评价技术;交通流仿真测试;硬件在环测试;场地测试;智能性评价;测试评价工具链;缺陷检测

**中图分类号:**U495      **文献标志码:**A      **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2023.06.002

## Research progress in testing and evaluation technologies for autonomous driving

ZHAO Xiang-mo's team supported by the National Key Research and  
Development Program of China (2021YFB2501200)

**Abstract:** In view of the high cost, long cycle, low coverage, and lack of a perfect tool chain for

收稿日期:2023-06-19

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2501200)

作者简介:赵祥模(1966-),男,重庆人,长安大学教授,工学博士,从事智慧交通与智能网联汽车测试技术研究。

引用格式:赵祥模国家重点研发计划(2021YFB2501200)团队. 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.

**Citation:** ZHAO Xiang-mo's team supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFB2501200). Research progress in testing and evaluation technologies for autonomous driving[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 10-77.

autonomous driving vehicle tests in the actual complex traffic environment, the research status of seven major areas of testing and evaluation technologies for autonomous driving was analyzed, and the future development direction of testing and evaluation technologies for autonomous driving was predicted, including simulation and testing technology of autonomous driving vehicles, simulation and testing technology of traffic flow, hardware-in-the-loop testing technology, field testing technology, intelligence evaluation technology, testing and evaluation tool chain and its system's construction, certification and potential defect detection technology, etc. In terms of simulation and testing of autonomous driving vehicles, the research status of simulation and testing software for autonomous driving, vehicle dynamics models, background vehicle interaction behavior models for testing, simulation and testing of cloud control platform supervision, and standardization of vehicle simulation system was analyzed. The main problems currently existing in the simulation and testing of autonomous driving vehicles were summarized. In terms of simulation and testing of autonomous driving traffic flow, the research status of driving style models for test background vehicles, traffic flow modeling and simulation, traffic scenario generation methods, and acceleration testing methods was summarized, and the future development trend of simulation and testing of autonomous driving traffic flow was predicted. In terms of hardware-in-the-loop testing technology, the human-vehicle-road-loop multi-dimensional digital twin tests and construction methods of the system platform for autonomous driving vehicles were summarized. Typical sensor data from high-definition cameras, millimeter-wave radars, and ultrasonic radars, as well as simulation technology of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-road communication signals, were reviewed. In terms of field testing technology, the development status of closed field testing, open road testing, and highway test-related testing fields, testing standards, and key technologies were summarized. In terms of intelligence evaluation technology, the research status of intelligence evaluation methods for autonomous driving was introduced from four aspects: the concept of autonomous driving intelligence, the quantification and evaluation of scene complexity, the intelligence evaluation systems of autonomous driving, and the social cooperation evaluation methods. In terms of testing and evaluation tool chain and system construction, the current situation of the testing and evaluation standard system for autonomous driving was introduced mainly from three aspects: the testing and evaluation tool chain technology, the autonomous driving testing evaluation system, and the current situation of autonomous driving testing standards. Finally, in terms of certification and potential defect detection technology, the current defect detection methods for autonomous driving were reviewed from the definition, cause, classification, and detection of autonomous driving defects. The challenges faced in the safety assurance of autonomous driving vehicles were summarized. Research results show that although the autonomous driving testing and evaluation technology has made great progress, the testing and evaluation standard system is still not perfect, and the existing testing tools and methods fail to meet the testing needs of autonomous driving vehicles at level three and above. The development and application level of virtual simulation and digital twin technology is low, and there are many deficiencies in the degree of simulation, testing efficiency, and vehicle testing ability. In the future, it is necessary to further strengthen the research and development of full-scene and high-fidelity modeling technology and real-time simulation software, establish an online accelerated twin testing system with virtual and real interaction, study the scenario generation and acceleration methods of autonomous driving full-stack hazardous testing, and integrate autonomous driving testing technologies and tools, so as to form a tool chain for autonomous driving

testing and evaluation and improve standard specifications. 20 tabs, 29 figs, 299 refs.

**Key words:** intelligent transportation; autonomous driving; test and evaluation technology; traffic flow simulation test; hardware-in-the-loop test; field test; intelligence evaluation; test evaluation tool chain; defect detection

**Author resume:** ZHAO Xiang-mo(1966-), male, professor, PhD, xmzhao@chd.edu.cn.

**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China (2021YFB2501200)

## 0 引 言

自动驾驶车辆是中国抢占汽车产业制高点,促进行业转型升级、由大变强的重要突破口。目前,自动驾驶车辆正在由测试示范逐步迈入量产商用阶段的过程中,面临针对实际复杂交通运行环境的整车级测试成本高、周期长、覆盖度低、缺乏完善工具链等难题,导致高等级自动驾驶车辆的上路许可与效能评价成为制约自动驾驶技术落地应用的瓶颈。

近年来,世界多国政府、主要智能汽车研发企业和科研机构等在自动驾驶测试评价领域开展了大量研究,驾驶辅助功能测评体系逐步完善,自动驾驶功能测评体系逐步建立;中国科学技术部在“十三五”期间重点支持了“自动驾驶电动汽车测试与评价技术”,在“十四五”期间支持了“自动驾驶仿真及数字孪生测试评价工具链”等项目,在测试理论、场景构建、模拟及场地测试等方面取得了显著进展,中华人民共和国工业和信息化部(下称工信部)、公安部、交通运输部也从支撑服务平台、认证管理、示范道路等方面开展了顶层设计与项目支持。

随着驾驶自动化等级的提高,现有基于功能模块和单项系统的测试逻辑、方法与工具,已不能适应其面向复杂多变且多要素耦合的交通环境应用的需求,需要基于真实交通场景构建支撑高等级自动驾

驶的全新综合测评体系。面向车、路系统智能化程度不断耦合提升过程中的自动驾驶整车级智能评级、缺陷识别、安全认证的测评技术,已经成为当前世界面向高等级自动驾驶测评的研究重点。

基于上述背景,本文针对自动驾驶测试与评价所面临的核心问题,系统梳理与分析了自动驾驶仿真测试、硬件在环测试、场地测试、评价方法、测评体系、认证与缺陷识别等技术的研究进展,并展望了未来发展方向。

## 1 自动驾驶测试评价面临的问题

自动驾驶车辆想要早日实现商业化应用,需经历大量的道路测试以及适应演进交通环境的高等级自动驾驶系统上路许可与效能评价,而自动驾驶车辆的测试还需解决车辆在哪、目的地在哪、如何测试等基本问题。要解决这些问题,涉及仿真工具、硬件平台、软件平台、软件算法、交互、安全等多个技术领域。

目前,自动驾驶主流的“三支柱”和“金字塔”测试架构都包括仿真测试<sup>[1]</sup>、封闭场地测试<sup>[2]</sup>和开放道路测试<sup>[3]</sup>,如图1所示,3种方法的优点以及存在的问题分析如下。

(1)仿真测试:仿真测试依赖动力学模型且数字化构建的车辆动力学模型难以精准复现真实车辆动力学模型,降低测试精度。

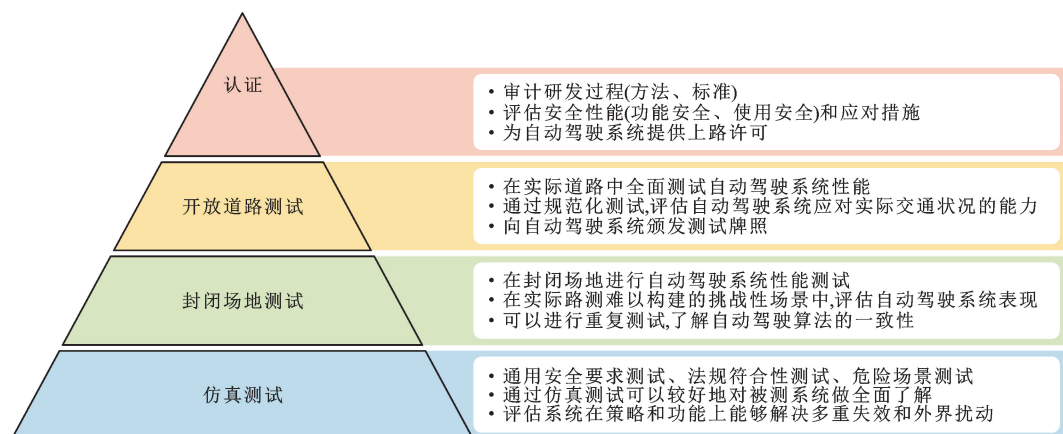


图1 自动驾驶“三支柱”测试方法

Fig. 1 Three-pillars test method of autonomous driving

(2)封闭场地测试:封闭场地测试虽然测试场景可控,安全性高,但无法覆盖真实道路中所有场景以及更复杂的混合交通流场景,对真实场景的参考意义有一定的局限性。

(3)开放道路测试:开放道路测试提高了场景的多样性,测试的场景也更加接近真实使用环境,其测试结果有着相对较大的参考意义,但也有较多的不可控因素,容易导致安全事故,有一定的安全风险。

上述3种方法各有优劣,如表1所示。随着自动驾驶车辆技术的发展,交通场景越来越复杂,交通参与者与日剧增。由表1可以看出单一测试方法很难确保测试效果,未来的自动驾驶车辆测试将更注重仿真测试、封闭场地测试、开放道路测试三者的有机融合。

表1 三种自动驾驶测试方法优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of three autonomous driving test methods

| 方法 | 仿真测试                         | 封闭场地测试                    | 开放道路测试                         |
|----|------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 对象 | 软件、硬件、虚拟环境                   | 真实车辆、实际道路、模拟参与者           | 真实车辆、真实道路、真实参与者                |
| 优点 | 虚拟的测试环境;安全;丰富的测试场景;可重复且测试效率高 | 真实车辆和道路;封闭场景单一;可重复测试;安全可控 | 真实的车辆、道路和参与者;连续多变的测试场景;贴合实际应用  |
| 缺点 | 依赖车辆动力学模型;精度不高;无法验证车辆的执行能力   | 建设场地费用较大;测试场景数量有限;可升级性不高  | 路况不可控,安全风险大;需要大量的时间和成本投入;可重复性差 |

在自动驾驶仿真测试领域,以德国西门子公司PreScan软件、VIRES公司Virtual Test Drive(VTD)软件等为代表的产品占据了自动驾驶仿真测试商业领域的主导地位,该类软件在车辆动力学建模等方面有着长期积累,在场景建模与材质渲染等方面处于领先地位;针对中国交通环境与规模仿真测试需求,百度和腾讯分别开发了Apollo与TAD Sim仿真测试软件,已在多家企业开展部署。此外,同济大学在车辆动力学建模方面也取得了较多的研究成果。但现有仿真测试技术普遍存在传感器模型粒度粗、场景描述失真、车辆动力学模型精度不足等缺陷;同时还存在微观行为仿真与宏观交通流仿真功能相对独立、功能集成度和耦合度低、场景生成手段单一、难以实现高覆盖度加速测试的问题。

在模拟测试领域,美国国家仪器公司、德国西门子公司等,均针对低等级自动驾驶系统提出了较为成熟的硬件在环测试解决方案;长安大学研发了基于

整车在环的自动驾驶车辆室内快速测试平台;上海国际汽车城有限公司、李斯特公司等也构建了基于转鼓平台的整车在环测试装备。但目前整车在环测试中的车路耦合作用机制不明晰,平台灵敏度、可靠性及可量化能力较差,且无法在有限物理空间下实现真实交通环境与虚、实主体重构。

在场地测试领域,美国Mcity、瑞典AstaZero、长安大学车联网与智能汽车试验场(Connected and Automated Vehicle Test, CAVTest)等国内外多个测试基地实施了大量的自动驾驶功能性场地测试并初步启动了场地孪生连续测评及加速测试工作。Mcity已开展1500余车次的联网现场测试,覆盖汽车、卡车和巴士等多种车型;长安大学CAVTest率先建立了数字孪生封闭场地在线测试系统;上海国际汽车城有限公司建设运营的国家智能网联汽车(上海)试点示范区对100 km<sup>2</sup>内的488 km道路进行智能网联化改造,支持城市环境下的自动驾驶数字化虚拟重构测试。但目前场地测试仍存在实车测试场景构建难度较大,场地孪生能力及人-车-路-环云端协同能力不足和测试效率较低等问题。

在智能性评级、缺陷识别和认证领域,德国PEGASUS项目提出了用于自动驾驶开发和测试验证的测试规程与场景;自动化及测量系统标准协会提出了OpenX场景数据标准体系;ISO 26262和SOTIF标准重点关注电子电气系统失效故障和功能设计不足导致的自动驾驶非失效风险;国内以公安部交通管理科学研究所为代表的相关机构,在自动驾驶等级划分、自动驾驶测试标准规范、测试牌照认证管理等方面初步形成了中国特色的认证与管理模式。但虚拟仿真、模拟及场地测试间工具功能割裂、标准不一致等问题仍较为凸显,亟需构建标准化的自动驾驶测试工具链,制订完善的测试评价标准体系。

综上,自动驾驶测试评价技术虽已取得较大进展,但测试评价标准体系仍不完善,现有测试工具及方法难以满足高等级自动驾驶车辆测试需求,虚拟仿真与数字孪生技术发展应用水平较低,在拟真度、测试效率与整车级测试能力方面存在诸多不足。

本文针对自动驾驶测试与评价技术,面向自动驾驶全流程测试工具链,系统梳理和分析了自动驾驶车辆仿真测试技术、交通流仿真测试技术、硬件在环测试技术、场地测试技术、智能性评价方法、测试评价工具链与体系方法、认证与潜在缺陷检测技术7大领域的研究现状,展望了未来发展方向。本文组织结构如图2所示。

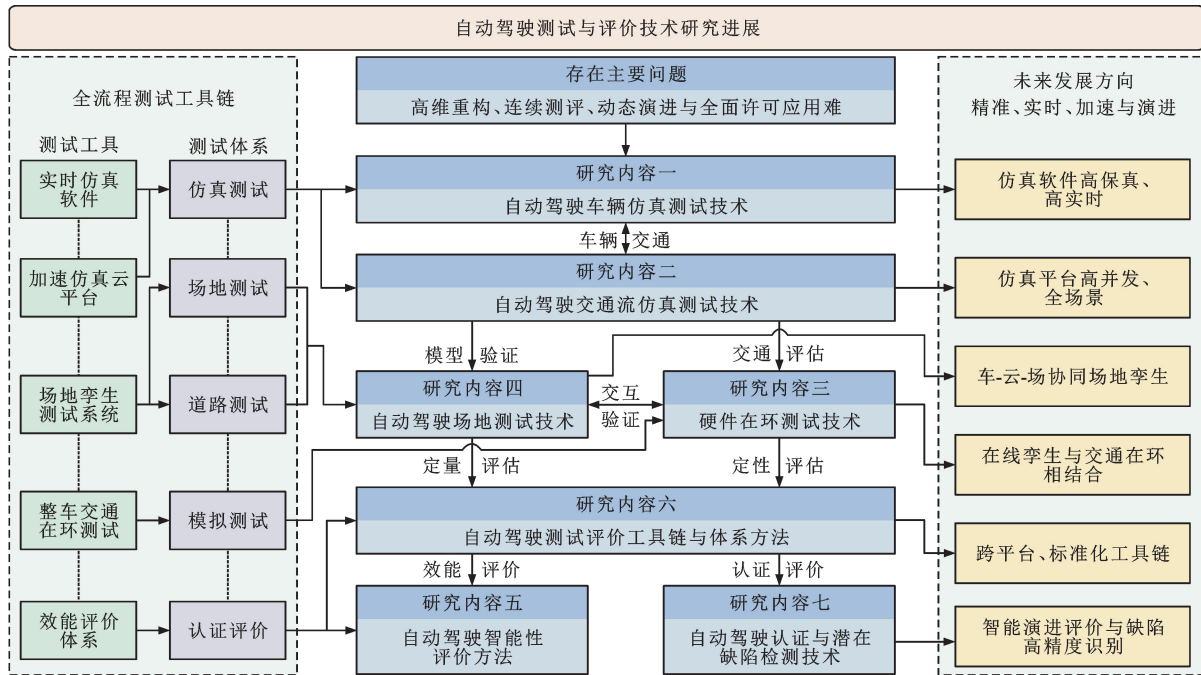


图2 整体组织结构

Fig. 2 Integrated organizational structure

## 2 自动驾驶车辆仿真测试技术

本节主要从高等级自动驾驶仿真测试工具发展现状与未来发展需求概述、车辆动力学模型、测试背景车驾驶人模型、云控平台监管的仿真测试和仿真

测试标准化五方面对当前自动驾驶仿真测试进行综述,组织结构如图3所示。

### 2.1 自动驾驶仿真测试软件(朱西产、刘瑞)

由于自动驾驶所面对的场景近似无限且场景泛化困难,传统汽车测试领域经常采用的典型场

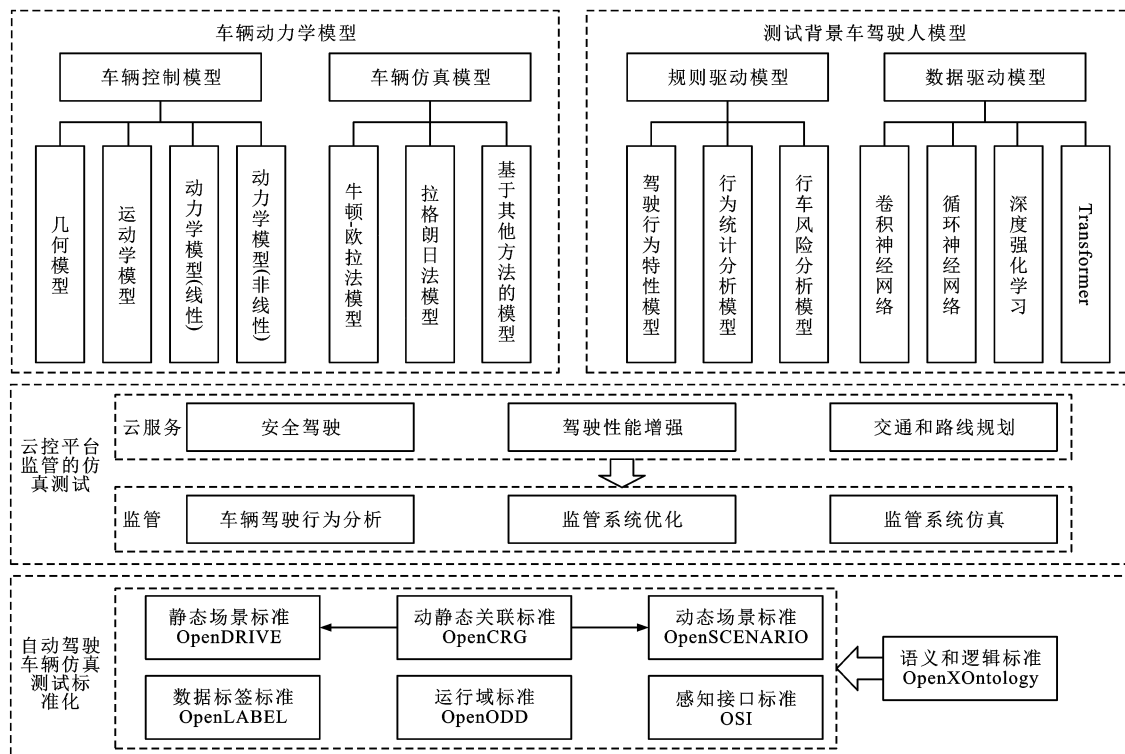


图3 自动驾驶车辆仿真测试技术组织结构

Fig. 3 Organizational structure of simulation and testing technology of autonomous driving vehicles

景测试方法已无法满足自动驾驶的测试需求。研究表明,需要十亿公里以上的道路测试才能在统计学意义上证明自动驾驶比人类驾驶更安全。如何通过仿真提高测试效率和降低测试成本已成为一个研究重点和热点。欧洲通过 AdaptIVe 和 PEGASUS 等项目逐渐完善了一套基于仿真测试、在环测试和道路测试的自动驾驶测试规程,联合国世界车辆法规协调论坛自动驾驶与网联车辆工作组在此基础上提出了多支柱的测试方法。仿真已成为自动驾驶设计、评价、许可与上路使用整个生命周期中最重要的测试手段之一。为了提高仿真场景的真实性和仿真测试的区分度,高等级自动驾驶测试对仿真的精度和保真度提出了更高的要求。需要针对高精度车辆动力学模型、拟人化

测试背景车模型、高价值测试场景、高保真环境和传感器模型、云控平台等关键技术开展研究,以提高自动驾驶仿真测试的效果。

自动驾驶仿真软件基于计算机技术,集静态场景仿真、汽车动力学仿真、传感器仿真等为一体,不需借助硬件便可对自动驾驶车辆进行早期开发与验证,具有低成本、高效率等优势。国内外众多公司与科研机构纷纷展开了对自动驾驶仿真测试平台的研究,不同仿真测试平台在自动驾驶建模方面各有优劣。目前常用的智能驾驶相关的仿真测试工具按照软件设计之初的主要目的可以分为车辆动力学仿真软件、交通流仿真软件、高级驾驶辅助系统(Advanced Driving Assistance System, ADAS)仿真测试软件和自动驾驶仿真测试软件,如表 2 所示。

表 2 主要仿真测试工具及其特点  
Table 2 Main simulation test tools and their characteristics

| 主要目的      | 软件        | 所属公司    | 车辆动力学模型 | 传感器与环境模型 | 交通参与者模型 |
|-----------|-----------|---------|---------|----------|---------|
| 车辆动力学仿真   | CarSim    | MSC     | 好       | 有        | 有       |
|           | CarMaker  | IPG     | 好       | 有        | 有       |
| 交通流仿真     | VISSIM    | PTV     | 无       | 无        | 良       |
|           | SUMO      | DLR     | 无       | 无        | 良       |
| ADAS 仿真测试 | PreScan   | TASS    | 有       | 良        | 有       |
|           | VTD       | VIRES   | 有       | 良        | 有       |
|           | SCANeR    | OKTAL   | 有       | 良        | 有       |
|           | Panosim   | 天行健     | 良       | 良        | 有       |
|           | CARLA     | Intel   | 无       | 有        | 有       |
| 自动驾驶仿真测试  | Carcraft  | Waymo   | 有       | 好        | 良       |
|           | TAD Sim   | 腾讯      | 有       | 好        | 良       |
|           | 51Sim-One | 51WORLD | 有       | 好        | 良       |
|           | Apollo    | 百度      | 有       | 好        | 良       |

车辆动力学仿真软件主要包括 CarSim 和 CarMaker,其核心竞争力是高精度的车辆动力学模型。CarSim 是从整车角度进行仿真的动力学仿真测试软件,支持 ADAS 相关功能和自动驾驶开发。IPG 公司研发的 CarMaker 仿真测试软件,可提供测试自动驾驶车辆和轻型汽车的仿真解决方案。近些年,CarSim 和 CarMaker 的新版本中增加了场景构建功能,可以用来进行 ADAS 系统的仿真测试。但它们的传感器模型、环境模型和场景编辑器都相对简单,只能支持比较单一的 ADAS 测试场景搭建。交通流仿真软件主要包括 VISSIM 和 SUMO,主要用来支持交通规划和道路设计。VISSIM 和 SUMO 中没有车辆动力学模型、传感器模型和动静态环境模型,只能作为仿真组件来构建一个自动驾驶联合仿真测试平台。

ADAS 仿真测试软件主要包括 PreScan、VTD、SCANeR、Panosim、CARLA 等,是伴随着 ADAS 的商业化落地诞生的。TASS 推出的 PreScan 是基于物理学的仿真软件,用于传感器和基于 V2X (Vehicle to X)的 ADAS 开发,能够实现算法的快速接入和场景的快速搭建。德国 VIRES 公司研发的 VTD 是一套用于 ADAS 和自动驾驶系统开发的仿真测试平台。Panosim 是天行健自主研发的仿真软件,应用于自动驾驶技术的研发、测试和验证。此外,常用的 ADAS 仿真测试软件还包括 Pro-SiVIC、Pilot-D GaiA、VI-grade 等。相比于车辆动力学和交通流的仿真软件,ADAS 测试软件的主要优势在于基于物理原理的传感器模型、丰富的环境模型和自由度高的场景编辑器,通过这些组件 ADAS 测试

软件可以灵活快速地搭建测试场景。ADAS 测试软件都留有 CarSim 和 CarMaker 的接口,可以调用车辆动力学仿真软件中的高精度车辆模型,实现测试中车辆姿态和轨迹的准确模拟。为了满足主机厂和供应商的需求,ADAS 仿真测试软件都能较好地支持模型在环测试、软件在环测试、硬件在环测试,甚至可以支持整车在环测试。国内外很多硬件在环和整车在环智能车测试平台都使用 ADAS 仿真测试软件来实现虚实结合的在环测试。但 ADAS 测试软件主要针对离散场景测试需求而没有考虑连续的交通流,因此,无法支持大规模城市级仿真。ADAS 测试软件都预留了交通流仿真软件接口,可以跟车辆动力学仿真软件和交通流仿真软件构成联合仿真平台。但受限于仿真实时性和本地算力,联合仿真平台仍然难以支持城市级仿真。

近些年,国内外开发了很多针对高等级自动驾驶的仿真测试软件,主要包括 Carcraft、TAD Sim、51Sim-One 和 Apollo。其中,Carcraft 是 Waymo 公司开发的仿真软件,主要应用于验证自动驾驶算法。Waymo 通过 Carcraft 平台可以实现每天 3 200 万公里的虚拟仿真测试。截至 2020 年 5 月,Waymo 已经累积了超过 240 亿公里的仿真测试数据。由于 Carcraft 平台是为了满足 Waymo 自动驾驶系统研发和测试验证需求而开发的,因而并没有公开发售。TAD Sim 是中国腾讯公司开发的高等级自动驾驶仿真软件,具有高效的三维重建技术、高保真的场景渲染引擎、基于物理引擎的传感器模型和基于云计算的仿真加速技术。51Sim-One 是中国 51WORLD 研发的仿真软件,支持接入第三方动力学软件,并提供丰富的接口来对接控制系统。Apollo 仿真软件是百度自动驾驶的一个重要组成部分,提供了较为完善的场景,通过判别系统,可以从交通规则、动力学行为和舒适度等方面对自动驾驶算法做出评价。AirSim 是微软研究院基于虚幻引擎开发的无人机与自动驾驶模拟平台。赛目公司开发的基于云平台的智能网联汽车仿真与测试平台,实现高并发、复杂车辆动力学模型的智能网联驾驶模拟仿真测试。Cognata 公司推出的仿真平台提供了一系列测试场景,包括模拟现实条件的交通模型,其最大优势在于高度真实的虚拟试驾场景。RightHook 公司的自动驾驶仿真解决方案提供了一整套的工具,包括 RightWorld、RightWorldHD、RightWorldHL 等。北美的 Paralell Domain 公司推出的测试平台优势在于其自动生成环境技术,可以在短时间内自动生成各

种复杂的场景模型。德国 AAI 公司通过高精地图创建高仿真虚拟环境,并应用人工智能技术将交通参与者训练集成到虚拟环境中。

相比于 ADAS 仿真测试软件,自动驾驶仿真测试软件可以满足以下需求。

(1)支持大规模城市级的长时间连续仿真。目标物数量较少、目标物轨迹确定、环境复杂度较低的离散场景测试已无法满足高等级自动驾驶的仿真测试需求。高等级自动驾驶软件能够快速构建高精度的大规模城市级测试场景,实现被测试车辆的长时间连续测评。

(2)支持闭环测试和开环测试,甚至可以支持开/闭环融合的测试。闭环测试是指测试中的目标物行为可以闭环调整,测试中的环境和目标物都是虚拟渲染生成的。开环测试是指测试中的目标物行为是预先设定好的,测试中的环境和目标物是基于自然驾驶采集的真实数据生成的。闭环测试主要针对智能驾驶系统的决策、控制和执行环节,开环测试主要针对自动驾驶车辆的感知系统。单独的闭环测试已无法满足高等级自动驾驶测试需求,高等级自动驾驶仿真测试软件能够同时支持闭环测试和开环测试。Waymo 的 Carcraft 软件最初就是通过回放道路采集自然驾驶数据来实现驾驶自动化系统测试,也就是开环测试。同时,高等级自动驾驶仿真测试软件能够通过智能体重建、数据增强等技术将闭环测试和开环测试的优势结合起来,构建开/闭环融合的测试方法。

(3)支持分布式的云平台仿真。为了实现大规模、长时间、高拟真度的仿真测试,高等级自动驾驶测试对于算力的要求爆炸式增加,本地集中式的仿真已经很难满足测试效率需求。这就要求高等级自动驾驶仿真软件能够支持分布式的云平台仿真,调动大量算力实现物理加速测试。

(4)具有保真度更高的传感器模型、环境模型和交通参与者行为模型。感知系统、环境和交通参与者行为的模拟精度对仿真测试的有效性有决定性影响。高等级自动驾驶仿真软件应在算力、建模新方法和计算机新技术的支持下,提高传感器模型和环境模型的建模精度。同时,应在当前广泛采用的交通流模型的基础上,基于真实道路采集的驾驶人行为数据来提高交通参与者模型的拟真度,并使交通参与者模型具有合理的随机性和不确定性。

## 2.2 车辆动力学模型(冷搏、刘铭)

在自动驾驶车辆控制中,车辆模型的建立和分析是进行控制器设计的基础。从整体来看,车辆模

型通常在两方面起着至关重要的作用。一方面,在自动驾驶车辆控制中的控制律有时来源于车辆系统的数学表示,即车辆控制模型。另一方面是车辆系统仿真,即车辆仿真模型。

### 2.2.1 车辆控制模型

车辆控制模型包括几何模型、运动学模型和动力学模型。几何模型考虑了车辆的几何尺寸,未考虑车辆的运动学,如加速度及其导数等,未考虑车辆动力学特性,如力、惯性和能量。同样,运动学模型根据整车的加速度、速度和位置来描述车辆的运动。动力学模型根据车辆的内力、惯性和能量特性来描述车辆的运动。每种控制模型都有自己的优点和用途,具体取决于研究的问题。

#### (1) 几何模型与运动学模型

几何模型充分考虑了车辆的尺寸、转弯半径和车辆在转弯过程中的道路曲率,而不考虑其速度和加速度。基于几何模型开发了 Pure Pursuit 算法和 Stanley 算法。运动学模型可以定义为在不考虑车辆动力学情况下,根据车辆的位置、速度和加速度等车辆状态来描述车辆运动的车辆模型。车辆运动学模型具有多种表达方法<sup>[4-5]</sup>,最常见的是自行车模型<sup>[6-9]</sup>,如图4所示,图中: $\beta$ 为质心侧偏角; $x'Oy'$ 为车辆坐标系, $O$ 为初始位置车辆质心,当前车头指向为 $x'$ 轴正向, $y'$ 轴正向由右手定则确定; $xOy$ 为全局坐标系,水平向左为 $x$ 轴正向,竖直向上为 $y$ 轴正向, $z$ 轴正向由右手定则确定; $\Psi$ 为车辆坐标系与全局坐标系间的夹角。自行车模型的运动学模型可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Psi + \beta) & 0 \\ \sin(\Psi + \beta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $r$ 为横摆角速度; $v$ 为车辆行驶速度; $v_x$ 为车

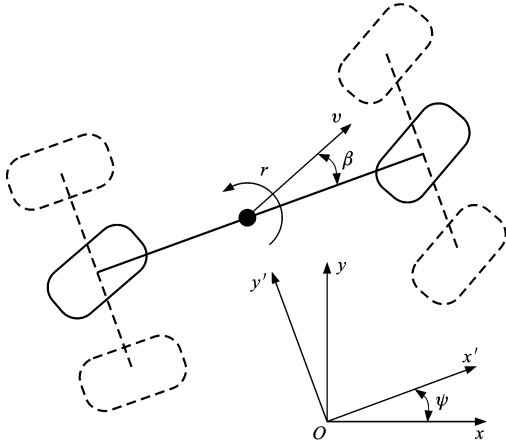


图4 自行车运动学模型

Fig. 4 Kinematics model of bicycle

辆行驶速度沿 $x'$ 轴的分量; $v_y$ 为车辆行驶速度沿 $y'$ 轴的分量。

#### (2) 动力学模型

动力学模型是通过考虑系统的内力、能量或动量来描述车辆的位置、速度和加速度的运动的车辆模型。在纵向平面中,模型通常包含横向运动、纵向的平移运动和绕 $z$ 轴的旋转运动。图5为整车动力学模型,图中: $C$ 为车辆质心; $\alpha_{ij}$ 为车辆侧偏角; $F_{xij}$ 为作用在轮胎上的纵向力; $F_{yij}$ 为作用在轮胎上的侧向力; $l_i$ 为质心到前轴或后轴中心的距离;下标 $i$ 和 $j$ 为车轮位置,其中, $i=f,r$ 分别表示前轴与后轴, $j=l,r$ 分别表示左轮与右轮; $\delta$ 为前轮转角; $l$ 为前后轴之间的距离。

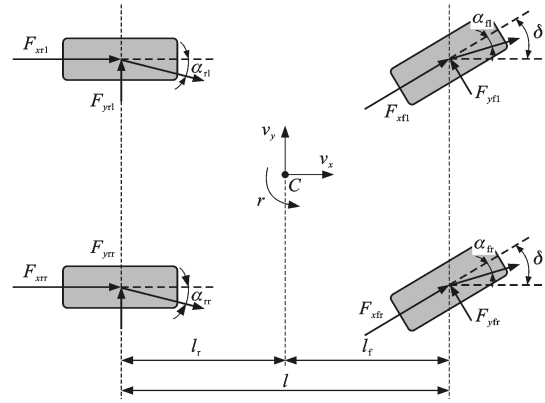


图5 整车动力学模型

Fig. 5 Dynamics model of vehicle

整车动力学模型可表示为<sup>[7]</sup>

$$F_{xrr} + F_{xrl} + F_{xfl} \cos(\delta) + F_{yfl} \sin(\delta) + F_{xfr} \cos(\delta) + F_{yfr} \sin(\delta) = m_b a_x \quad (2)$$

$$F_{yrr} + F_{yrl} - F_{xfl} \sin(\delta) - F_{xfr} \sin(\delta) + F_{yfl} \cos(\delta) + F_{xfr} \cos(\delta) + F_{yfr} \cos(\delta) = m_b a_y \quad (3)$$

$$I_z \ddot{\Psi} = (-F_{yrr} - F_{yrl})l_r + [F_{xfl} \sin(\delta) + F_{yfl} \cos(\delta) + F_{xfr} \sin(\delta) + F_{yfr} \cos(\delta)]l_f + [F_{xfr} \cos(\delta) - F_{xfl} \sin(\delta) + F_{yfl} \sin(\delta) - F_{yfr} \sin(\delta) - F_{xrl} + F_{xrr}] \frac{L}{2} \quad (4)$$

式中: $m_b$ 为整车簧载质量; $I_z$ 为绕 $z$ 轴的转动惯量; $a_x$ 为纵向运动的加速度; $a_y$ 为侧向运动加速度; $L$ 为轮距。

不同的车辆控制模型有不同的用途。在选择使用哪种控制模型时,应该考虑车辆模型的基本要求、线性工作点区域包络之外的响应与建模性能等。表3显示了不同控制模型的优缺点。

### 2.2.2 车辆仿真模型

汽车整车企业中普遍采用专业软件进行车辆动

表 3 不同控制模型优缺点  
Table 3 Advantages and disadvantages of different control models

| 模型类型       | 车辆模型           | 优点                                   | 缺点                                     |
|------------|----------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| 几何模型       | 基于阿克曼转向的几何模型   | 简单,只需少量参数;有效描述车辆位置与路径的关系;控制器设计简单     | 未考虑车辆运动学与动力学特性                         |
| 运动学模型      | 全车运动学模型        | 考虑到相对于局部坐标和全局坐标的车辆航向之间存在不同方向的可能性     | 未考虑车辆动力学特性;略微比几何模型复杂                   |
|            | 半车运动学模型(自行车模型) | 模型简单,便于控制器的设计                        | 未考虑车辆动力学特性;假设车辆相对于局部坐标的航向与相对于全局坐标的航向相同 |
|            | 带侧偏角的运动学模型     | 模型中考虑车辆的侧偏特性                         | 未考虑车辆动力学特性;增加了建模复杂度                    |
| 动力学模型(线性)  | 全车动力学模型        | 考虑了所有车轮的力,尤其是在转向运动中                  | 未考虑轮胎的非线性特性                            |
|            | 半车动力学模型(自行车模型) | 考虑了车辆的动力学特性,较为常用                     | 未考虑轮胎的非线性特性;忽略左右车轮不同响应带来的影响            |
| 动力学模型(非线性) | 全车动力学模型        | 考虑了所有车轮的力,尤其是在转向运动中;考虑轮胎响应相对于侧偏角的非线性 | 模型复杂,不能保证控制的实时性                        |
|            | 半车动力学模型(自行车模型) | 考虑轮胎响应相对于侧偏角的非线性                     | 未考虑转向时内外侧车轮的差异带来的影响                    |

力学建模仿真,利用仿真结果指导方案设计与问题整改。仿真车辆运动学和动力学特性的模型称为车辆动力学仿真模型,相对于实车测试所产生的高成本,这种方法降低了科研成本,为人类生命财产安全提供了保障,推动了车辆动力学研究的发展。

车辆动力学仿真模型的建立可以采用多刚体系统动力学建模方法,对此,国内外众多学者和研究人员提出了许多方法,主要有牛顿-欧拉法、拉格朗日法、图论法、旋量法、凯恩法及变分法等。

(1) 牛顿-欧拉法

近年来,在牛顿-欧拉法的研究领域比较有影响的是 Schiehlen 等<sup>[10-11]</sup>的工作,其特点是在列写出系统的牛顿-欧拉方程后,将笛卡尔广义坐标系变换成独立变量,对完整约束系统用达朗贝尔原理消去约束力,对非完整约束系统用茹尔当原理消去约束反力,最后得到与系统自由度数目相同的动力学方程。

Raffo 等<sup>[8]</sup>采用牛顿-欧拉法推导出了二自由度车辆模型,如图 6 所示。

得到二自由度车辆模型的运动方程为

$$m_b(\dot{v}_y + v_x r) = C_{af} \delta - \frac{v_y(C_{af} + C_{ar})}{v_x} - \frac{r(l_f C_{af} - l_r C_{ar})}{v_x} \quad (5)$$

$$I_z \dot{r} = l_f C_{af} \delta - \frac{v_y(l_f C_{af} - l_r C_{ar})}{v_x} - \frac{r(l_f^2 C_{af} + l_r^2 C_{ar})}{v_x} \quad (6)$$

式中:  $C_{ai}$  为车轴侧偏刚度。

(2) 拉格朗日法

拉格朗日方程已经广泛应用于多刚体系统动力学。由于多刚体系统十分复杂,在建立系统动力学方程时,采用传统独立的拉格朗日广义坐标将十分

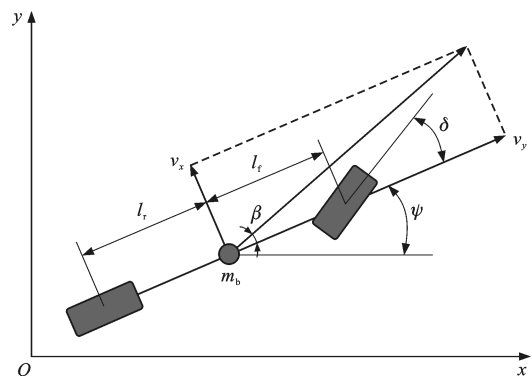


图 6 二自由度车辆模型

Fig. 6 Two-degree-of-freedom vehicle model

困难,而采用不独立的笛卡尔广义坐标则比较方便,如图 7 所示,图中:  $b_1$  为车身固连系纵向轴;  $b_2$  为车身固连系侧向轴;  $b_3$  为车身固连系垂向轴;  $a_1$  为

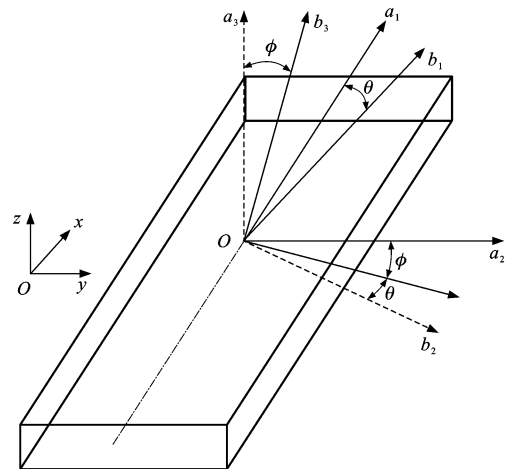


图 7 拉格朗日法中的系统坐标系

Fig. 7 System coordinate system in Lagrangian approach

与  $x$  轴平行的轴;  $a_2$  为与  $y$  轴平行的轴;  $a_3$  为与  $z$  轴平行的轴;  $\theta$  为俯仰角;  $\varphi$  为侧倾角。许多学者在这方面作出了贡献,著名的有 Orlandea 等<sup>[12-13]</sup>的工作。王敬等<sup>[14-15]</sup>利用拉格朗日能量法建立了汽车四轮转向四自由度动力学模型。

采用非线性轮胎力模型结合拉格朗日方程,可得到在考虑侧向、横摆、侧倾、俯仰四自由度时四轮转向模型的动力学方程为

$$m_b h \ddot{\theta} - m_b h \ddot{\varphi} + (m_f l_f - m_r l_r) \ddot{\Psi} + (m_b + m_f + m_r) \cdot (\dot{v}_y + v_x r) = F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yrl} + F_{yrr} \quad (7)$$

$$I_{zz} \ddot{\Psi} - I_{yz} \ddot{\theta} - I_{xz} \ddot{\varphi} + (m_f l_f - m_r l_r) (\dot{v}_y + v_x r) = l_f (F_{yfl} + F_{yfr}) - l_r (F_{yrl} + F_{yrr}) \quad (8)$$

$$I_{xx} \ddot{\varphi} - I_{xz} \ddot{\Psi} - I_{xy} \ddot{\theta} + m_b h (\dot{v}_y + v_x r) + (K_{\varphi f} + K_{\varphi r} - m_b g h) \varphi + (C_{\varphi f} + C_{\varphi r}) \dot{\varphi} = d_{yf} (F_{yfl} + F_{yfr}) - d_{yr} (F_{yrl} + F_{yrr}) \quad (9)$$

$$-m_b h (\dot{v}_y + v_x r) + I_{yy} \ddot{\theta} - I_{yx} \ddot{\varphi} - I_{yz} \ddot{\Psi} + (K_{\theta f} + K_{\theta r} - m_b g h) \theta + (C_{\theta f} + C_{\theta r}) \dot{\theta} = d_{zf} (F_{zfl} + F_{zfr}) - d_{zr} (F_{zrl} + F_{zrr}) \quad (10)$$

式中:  $m_f$  为前轴非悬挂质量;  $m_r$  为后轴非悬挂质量;  $h$  为质心距地面高度;  $g$  为重力加速度;  $I_{zz}$  为车辆相对于  $a_3$  轴的横摆转动惯量;  $I_{xx}$  为车辆相对于  $a_1$  轴的侧倾转动惯量;  $I_{yy}$  为车辆相对于  $a_2$  轴的侧倾转动惯量;  $I_{xy}$  为  $y$  轴和  $x$  轴之间的惯性积;  $I_{xz}$  为  $z$  轴和  $x$  轴之间的惯性积;  $I_{yz}$  为  $z$  轴和  $y$  轴之间的惯性积;  $K_{\varphi i}$  为悬架抗侧倾刚度;  $C_{\varphi i}$  为悬架的侧倾阻尼系数;  $K_{\theta i}$  为悬架的俯仰刚度;  $C_{\theta i}$  为悬架的俯仰阻尼系数;  $d_{yi}$  为车轮印迹侧向位移导数;  $d_{zi}$  为车轮印迹前后位移导数。

### (3) 其他方法

图论常应用于多体动力学问题<sup>[16]</sup>。王阳阳等<sup>[17]</sup>以 R-W 多体动力学理论为基础建立了整车多体动力学仿真平台; Jin 等<sup>[18]</sup>基于旋量理论,建立车辆动力学模型,重点研究了基于平顺性和稳定性的车辆悬架系统阻尼匹配问题,根据计算结果在汽车驾驶模拟器中的六自由度平台来模拟汽车运动,验证了模型的适用性能;凯恩方法由美国学者 Kane 创立,利用广义速率代替广义坐标描述多刚体系统运动,并将矢量形式的力与 D'Alembert 惯性力直接向特定的基矢量方向投影以消除理想约束力,胡隽卿<sup>[19]</sup>分析了二自由度铰接越野车辆的动力学特性,采用凯恩方法建立了该车的动力学模型。

变分方法是经典力学的重要部分。如果说在经典力学中,变分原理只是对力学现象的抽象概括,则

在计算技术飞速发展的今天,变分方法已成为可以不必建动力学方程而直接借助数值计算寻求运动规律的有效方法。杨怀广<sup>[20]</sup>基于此建立火星车通用动力学模型。

### 2.3 测试背景车交互行为模型(刘瑞、袁田)

测试背景车行为模型的真实性和测试效率对测试效率和测试有效性具有重要影响。目前,仿真测试中的测试背景车行为模型可以分为两类,即预设轨迹模型和交通流模型。预设轨迹模型主要应用在 ADAS 测试场景构建中,以被测车辆为中心预先设定测试背景车轨迹。预设轨迹模型可以较好地完成测试目的,但无法支持高等级自动驾驶的连续仿真。交通流模型即采用传统交通中常用的跟驰和变道模型作为测试背景车行为模型来构建连续交通流,将被测的自动驾驶车辆放入交通流中进行测试。交通流模型可以支持高等级自动驾驶的连续测试,但并没有考虑测试背景车与被测车辆之间的交互,每辆背景车只按照规则完成自己的跟驰或变道任务,测试的真实性、有效性和效率存在较多问题。通过学习人类驾驶人的行为,建立拟人化的测试背景车模型,使测试背景车能够实现与被测车辆之间的交互,进一步构建类似自然驾驶的测试背景车环境,是提高自动驾驶测试效率和有效性的可行方法之一。提高测试背景车交互能力的方法包括两类,第一类是研究驾驶人的行为特性并构建更加复杂的拟人化规则模型,第二类是通过大量数据训练一个机器学习模型来拟合驾驶行为特性。

规则驱动模型是对驾驶人交互行为进行建模的常用方法,通过分析真实驾驶行为建立数学关系式来表达驾驶策略。Wang 等<sup>[21]</sup>使用跟车数据对驾驶人的跟驰行为进行统计分析,并直接对驾驶人的控制行为进行建模,即建立了产生期望油门踏板开度和制动压力的驾驶人模型,最后采用比例-积分-微分控制算法对控制变量进行跟踪; Zhao 等<sup>[22]</sup>采用风险场理论对行车风险进行建模,使用加速度作为驾驶人的响应,通过学习驾驶人应对交通风险的方式建立了风险反应驾驶人模型,并基于该模型设计了仿人纵向控制策略算法; Wada 等<sup>[23]</sup>提出了基于驾驶人视觉输入的风险感知指数,基于该指数制定了跟驰状态下的减速度和制动启动时间的数学模型,进而开发了用于避撞的自动制动系统。由于可调节参数有限,在规则模型中融入驾驶行为特性相对困难,因此,近几年的相关研究相对较少。

数据驱动模型也是驾驶人交互行为建模的常用

方法<sup>[24-25]</sup>。Khodayari 等<sup>[26]</sup>提出了一种改进的人工神经网络方法来模拟驾驶人的跟车行为,将瞬时反应延迟与相对运动状态共同作为输入,加速度作为输出,建立跟车模型,生成了与人类驾驶人高度一致的轨迹;由于驾驶行为具有时间序列特征和动态随机特征,Lefèvre 等<sup>[27]</sup>结合隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)和高斯混合回归建立跟车模型,使用本车速度与前车的相对速度和相对距离来计算类人加速度序列;Wang 等<sup>[28]</sup>结合 HMM 和高斯混合模型建立了车道偏离模型来描述驾驶人的车道保持行为和车道偏离行为,即根据车速、偏航角、道路曲率等计算横摆角速度,并据此预测了车辆未来行驶轨迹;Ali 等<sup>[29]</sup>使用 Extra Trees 分类器建立换道决策模型,使用递归特征消除技术选择输入特征,并采用标准分类指标来选择最佳模型,最终模型在预测驾驶人变道行为方面表现出更好的准确性和可迁移性。

很多研究中也考虑了驾驶人的个性化驾驶行为特征。Butakov 等<sup>[30]</sup>提出了一种结合随机建模和运动学建模的 2 层模型结构来描述换道行为,下层运动学模型是以车辆运动状态和周围车辆信息为输入的正弦变道模型,上层模型采用高斯混合为特定驾驶人建立运动学模型参数值,以适应单个驾驶人的响应行为;Zhang 等<sup>[31]</sup>提出一种生成混合式模型来模拟驾驶人的跟车行为,首先标定具有时变参数的智能驾驶人模型(Intelligent Driver Model, IDM)来捕捉驾驶人的异质性,然后应用基于神经过程(Neural Process, NP)的模型生成任意给定观察到的驾驶风格的跟车行为,并通过探索时变 IDM 参数与 NP 中间变量之间的关系,推断未观察到的驾驶风格的跟车行为,进而采用无监督聚类分析方法分类不同的驾驶风格,建模不同风格的驾驶行为;Chen 等<sup>[32]</sup>以平均速度和速度标准偏差为特征向量进行聚类分析,得到了 3 种驾驶风格,即慢、快和稳定,并基于道路特征建立了以人为中心的连续速度模型,用于开发适用于山区高速公路的类人速度控制策略;黄晶等<sup>[33]</sup>采用 K-means 聚类法将驾驶风格分为激进、普通和谨慎,并通过椭圆车辆模型进行改进以描述不同风格驾驶人的行车安全区域,构建了典型工况下的最小安全距离模型,实现了适应于驾驶风格的换道轨迹规划;Ren 等<sup>[34]</sup>同样将驾驶风格聚类为激进、稳定和谨慎,进而采用多层感知器神经网络训练不同风格的驾驶人模型,显著提高了向左和向右换道的预测准确率;Zhang 等<sup>[35]</sup>应用驾

驶操作图来描述影响驾驶风格的特征,根据历史轨迹来研究车辆的短期驾驶风格,将驾驶风格与交通信息共同作为深度神经网络的输入,建立了具有驾驶风格意识的车道变更决策模型,最大程度地模仿了人类驾驶人的决策动作。

随着深度学习技术的发展,神经网络的拟合性得到了极大提升。利用深度强化学习<sup>[36-38]</sup>和深度神经网络<sup>[39-40]</sup>实现拟人化驾驶的研究得到了越来越多的关注。王鑫鹏等<sup>[41]</sup>以行驶状态作为输入,油门踏板开度、制动踏板开度和方向盘转角作为输出,开发了基于深度强化学习(Deep Reinforcement Learning, DRL)的自动驾驶决策算法,通过在算法输出部分加入线性变换过程,形成了适用于 3 种不同驾驶风格的个性化驾驶系统;Zhu 等<sup>[42]</sup>提出了基于 DRL 的跟车模型,以类似人类的方式将速度、两车之间的相对速度以及车间距映射到后车的加速度,并使用速度偏差作为奖励函数、深度确定性策略梯度算法来优化模型,可以准确重现人类的跟车行为;Li 等<sup>[43]</sup>提出了一种基于两阶段深度强化学习方法的跟车模型,结合真实的人类驾驶数据来训练驾驶策略,并利用真实人类驾驶体验来修改策略,实现了优于纯 DRL 模型的跟车性能;焦新宇等<sup>[44]</sup>采用卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)实现了从图像到行驶轨迹曲率的预测,针对不同驾驶人行为决策的不确定性导致性能不佳的问题,采用场景划分和特征预提取的方法提高了高速公路行驶轨迹预测的准确性和可靠性;Chen 等<sup>[45]</sup>开发了一种将 CNN 与长短期记忆模块(Long Short-Term Memory, LSTM)相结合的端到端驾驶决策模型,从真实和人工交通场景中学习人类驾驶人的驾驶方式,即将传感器数据与高精度地图、交通信息相结合共同输入 CNN 进行空间特征提取,进而由 LSTM 输出转向角和加速度等控制信号进行运动规划。除了深度学习以外,强化学习算法也在端到端的驾驶模型中得到了广泛的应用,但这种算法缺乏可扩展性,因此,研究人员将强化学习与深度学习相结合获取高维状态空间信息,以使自动驾驶系统更好地适应高维动态行驶环境<sup>[46-47]</sup>。Wu 等<sup>[48]</sup>提出的一种基于 DRL 的端到端自动驾驶策略学习方法,在近端策略优化的基础上,结合好奇心驱动的递归神经网络来产生内在奖励,使用与车辆状态、环境等相关的传感器数据实现了车道保持和超车任务;Guo 等<sup>[49]</sup>分别开发了基于自动编码器和 Transformer 模型的换道预测模型,使

用联网车辆收集的大规模真实数据检测车道变化,Transformer模型的注意力机制使模型达到了更高的检测精度和计算效率;Li等<sup>[50]</sup>提出了基于Transformer模型的端到端自动变道模型,采用结合了深度可分离卷积和Transformer模型的轻量级网络从时间序列的轨迹数据中提取图像语义,并通过具有位置不确定性的概率模型评估驾驶风险,最后采用DRL学习具有最小预期风险的类人变道驾驶策略。

## 2.4 云控平台监管的仿真测试(毕欣、周小钧、全盼盼)

智能网联汽车云控平台的研究是为了解决单车智能系统由于局部感知范围有限而导致的感知可靠性不足,同参与者互相关行为感知缺失,仅依靠局部信息进行的规划与控制难以实现全局优化等问题。智能网联汽车云控平台是基于新一代信息与通信技术的车-路-云一体化协同系统,通过云端将人、车、路、云的物理层、信息层、应用层连为一体,使智能车辆具有更复杂的环境感知、智能决策、协同控制等能力,一方面提高了微观层面车辆协同系统的感知和决策精度<sup>[51]</sup>,并通过全局优化提高了交通系统宏观层面的安全性与运行效率<sup>[52]</sup>,另一方面智能网联汽车云控平台还能够收集、整合、共享局部交通信息,通过互联网、物联网、大数据等技术手段实现对于城市交通系统的宏观监管<sup>[53]</sup>。

### 2.4.1 云控平台在车联网云服务方面的应用与研究

目前,国内外对于云控平台在智能网联汽车云服务方面相关研究发展迅速,主要研究方向集中在安全驾驶、驾驶性能增强、交通和路线规划三方面<sup>[54]</sup>。

在安全驾驶方面,Liang等<sup>[55]</sup>针对边缘云感知系统存在的低时效性和高能耗的缺陷,提出了基于边缘云合作和重构CNN的物体检测系统EdgeYOLO,通过结合修剪特征提取网络和压缩特征融合网络解决了云控平台感知系统对计算能力的过度依赖和云计算资源的不均衡分布问题;Whaiduzzaman等<sup>[56]</sup>提出了一种车载云计算(Vehicular Cloud Computing, VCC)的分类法,主要涉及车载云的应用、形成、密钥管理、云间通信系统以及隐私和安全问题等方面,并将VCC与普通的云计算进行了比较。

在驾驶性能增强方面,Hou等<sup>[57]</sup>为优化自动驾驶车辆在交叉口区域的通行效率和能源消耗,提出了名为CIVIC-E<sup>2</sup>的自动驾驶云控制系统,并通过可自适应寻找每辆车的到达时间和能量状况的算法得到了云控制介入的最佳信号时间,并且证明该算

法可以显著改善各种交通条件下的交叉路口性能;Kumar等<sup>[58]</sup>针对定时红绿灯控制系统将红绿灯信号分割成固定的时间导致的等待时间长、浪费燃料和增加碳排放问题,提出了以实时交通信息为输入、可动态地调整交通灯的时间的动态智能交通灯控制系统,利用深度强化学习和模糊推理实现了交通灯的切换和系统工作模式的转换,并且证明了该方法对于通行效率有明显提升。

在交通和路线规划方面,Yuan等<sup>[59]</sup>设计了基于历史和实时交通状况以及驾驶人行为的用户驾驶路线规划云系统;Xu等<sup>[60]</sup>研究了车载环境下车联网如何支持大数据的传输、存储、计算,分析了车联网如何在表征、性能评估和大数据辅助通信协议设计方面从大数据中受益;Kaiwartya等<sup>[61]</sup>提出了包括感知层、网络协调层、人工智能层、应用层与商业层的5层架构,并提出了基于云、连接和客户端3个网络元素的车联网网络模型;Sasaki等<sup>[62]</sup>提出了基于基础设施的车辆控制系统,实现了边缘服务器和云服务器之间共享内部状态、动态分配计算资源,并实现了根据网络状况自动从云端和边缘服务器切换控制;Wan等<sup>[63]</sup>提出了一种包含车载社交网络和上下文感知的车辆安全多层上下文感知架构,并介绍了一个关于上下文感知动态停车服务的应用场景,分析了该场景的挑战和可能的解决方案。

### 2.4.2 云控平台在监管方面的应用与研究

监管云控平台在通过传感器全面感知道路环境、车辆状况以及驾驶人状态的基础上,进一步对数据进行存储、传输与整合,对于这类应用的研究最早可追溯至美国提出的智能交通系统,可以通过信息平台协调、整合硬件设备采集的信息并进行处理、计算,辅助车辆的驾驶决策;欧盟委员会在2019年推出了“欧洲合作式智能交通系统战略”,其目标为实现车、路、环境之间的互联互通;日本则是先后制定了SmartWay(智能道路)计划和SmartCar先进安全型汽车计划<sup>[64]</sup>;中国也在近年推出了多个云控平台监管相关标准,如《道路运输车辆卫星定位系统视频平台技术要求》(JT/T 1077—2016),《道路运输车辆卫星定位系统视频通信协议》(JT/T 1078—2016)等,从技术方面保障了车辆视频监控系统的可行性。

云控平台监管相关研究主要集中在车辆驾驶行为分析、监管系统优化与监管系统仿真。对于智能网联汽车驾驶行为分析,袁君<sup>[65]</sup>建立了驾驶行为安全评估模型,用于对驾驶人不良驾驶习惯和驾驶行

为进行评估;张正<sup>[66]</sup>通过建模夜间驾驶、疲劳驾驶等多种因素对个体驾驶行为的影响,对驾驶人安全驾驶行为进行监管;朱爽<sup>[67]</sup>研究了驾驶行为评分模型,在参考传统车辆因素和驾驶人因素的同时引入驾驶人的驾驶行为表现,通过熵权-层次分析法确定各指标权重,建立了驾驶行为评分模型。

在监管系统优化方面,Jiang 等<sup>[68]</sup>为应对云控平台监管系统中大量视频数据和密集型的数据分析需求所带来的数据传输和计算压力,以及由于网络连接不稳定导致的视频数据不可靠问题,提出了整合多接入边缘计算和区块链技术的监控视频分析框架,优化了云控平台监管系统传输效率和延迟性,然后基于马尔科夫决策过程和 A3C (Asynchronous Advantage Actor-Critic)深度学习算法对模型进行了优化。

在云控平台仿真方面,Zhu 等<sup>[69]</sup>提出了整合人工智能交通系统和真实智能交通系统的设想和工作,利用平行于真实交通的人工智能交通系统大量且长期的迭代与模拟,实现对于真实智能交通系统预测和分析运营,并引入一些案例来证明平行交通系统的有效性;Zhu 等<sup>[69]</sup>利用信息物理社会系统研究了队列中的协作自适应巡航控制问题,设计了车、路、云分层计算结构,为驾驶人和交通管理者提供了基于云端的信息感知和场景管理;Wang 等<sup>[70]</sup>采用数字孪生系统对运控平台监管进行研究,提出了一个使用 V2C 通信的互联车辆数字孪生框架,并对针对合作式匝道并线案例验证了该数字孪生系统的有效性。

## 2.5 自动驾驶车辆仿真系统标准化(孙驰天、郭楚凡、张丰婕)

仿真面临的重大挑战就是置信度问题,不同车辆仿真系统之间作比较的前提是对仿真系统进行校准,因此,决定仿真测试系统有效性、结果可靠性是标准组织和标准存在的核心价值。为了促进不同仿真系统之间的互联、互通、互懂,标准对于自动驾驶车辆仿真系统是至关重要的。

德国自动化及测量系统标准协会 (Association for Standardization of Automation and Measuring System, ASAM) 是一家非政府的汽车领域标准化制定机构,1998 年由数位行业专家为标准化电子控制单元 (Electronic Control Unit, ECU) 开发与测试中的数据交互而创立,致力于实现开发流程中各环节的数据信息自由交换。截至 2019 年,共有来自亚洲、欧洲、北美洲的 295 家主机厂、供应商与科研

机构加入成为会员。ASAM 推出的标准涉及多个汽车标准领域,包括仿真、车联网、测量与校准、诊断、自动化测试、软件开发、ECU 网络和数据管理与分析等。

2016 年,德国联邦经济与能源部启动 PEGASUS 项目,旨在开发一套自动驾驶功能测试程序,以促进自动驾驶技术的快速落地。PEGASUS 项目内容包括定义自动驾驶车辆在仿真、测试场地与实际环境中的测试与试验标准流程,开发一个持续和灵活的工具链以维护自动驾驶开发与验证,在开发过程的早期阶段集成测试,创建跨整车厂的方法来维护高度自动驾驶的功能等。PEGASUS 项目于 2019 年 5 月结项,其中一项重要研究成果就是 OpenCRG (Open Curved Regular Grid)、OpenDRIVE、OpenSCENARIO 驾驶场景仿真格式标准。该标准已于 2018 年正式从戴姆勒和 VIREs 转交 ASAM 进行下一步标准维护与开发。以此为契机,ASAM 于 2018 年新开一类标准领域,即仿真,用来制定和协调仿真领域的自动驾驶相关标准<sup>[71]</sup>。

随着自动驾驶技术的发展,仿真测试对于自动驾驶的安全落地至关重要,ASAM 发布的 OpenX 标准得到了全球广泛关注,热度逐渐提升。成员单位提出希望制定更多的仿真领域标准,并以 OpenX 命名,其中还包括 OpenLABEL<sup>[72]</sup>。2019 年 10 月,由宝马开发的 OSI (Open Simulation Interface) 标准正式移交 ASAM 进行维护与开发。到目前为止,ASAM 已经制定了 7 大领域在内的 30 余个标准(还有 4 个标准正在制定中)。其中,许多标准已经相当成熟,并且已在各种开发流程中经过多次验证。ASAM 成员分布广泛,使得其标准在全球主机厂和供应商的工具链中发挥着重要作用。据估计,部分标准的市场采用率高于 80%。

目前,在 ASAM 仿真验证领域,OpenX 系列标准主要包括 OpenDRIVE、OpenCRG、OpenSCENARIO、OSI 和 OpenLABEL 等。在仿真测试的整体流程中,OpenDRIVE 和 OpenSCENARIO 针对仿真场景的不同数据格式进行统一;OpenLABEL 将对于原始数据和场景给出统一的标定方法;OSI 连接了自动驾驶功能与仿真工具,同时集成了多种传感器;OpenCRG 则实现了路面物理信息与静态道路场景的交互<sup>[73-74]</sup>。

### (1) OpenDRIVE

OpenDRIVE 标准定义了静态场景的描述方法,经视觉传感器或激光雷达采集得到的高精度地

图,可以通过 OpenDRIVE 格式表述出来,目前已广泛被奥迪、博世、四维图新、百度等厂商应用。在语法方面,OpenDRIVE 采用了应用较广泛的 XML 格式语法;在内容方面,符合 XML 格式基本框架的前提下,OpenDRIVE 标准对需要描述的地图、道路与建筑物的内容节点进行了定义,使用者可对该节点进行扩充;在道路信息描述中,主要包含参考线、车道线、道路横向与纵向坡度、侧面形状、路网的联结与路口信息、相邻车道信息、路面信息和铁路信息等大类以及更多细小的子类信息,使用者需按分类填写相应数据。OpenDRIVE 标准使静态场景数据中的内容条目与格式实现了统一,利于不同仿真软件实现对同一场景文件的兼容。

#### (2) OpenCRG

OpenCRG 标准主要关注道路表面的相关物理信息描述,主要用于轮胎和地面接触中与摩擦相关的问题。OpenCRG 将允许在仿真软件中对于路面的真实 3D 渲染,包括路面的摩擦因数和灰度等信息。通过弯曲的网格状分割,OpenCRG 将实现对道路的高精度描述,并降低内存占有率和计算时间。同时,OpenCRG 支持与 OpenDRIVE 格式静态场景和 OSI 中动力学模型的交互,并与 MATLAB 等软件相兼容。

#### (3) OpenSCENARIO

OpenSCENARIO 标准定义的内容主要覆盖动态场景描述,包括主车的位置与速度等信息,及其他交通参与者的信息。目前,OpenSCENARIO 主要发布了 V1.0 和 V2.0 Concept 2 个版本。

#### (4) OSI

OSI 标准定义了一个通用的接口,用来连接自动驾驶功能的开发和各种驾驶模拟框架,以实现兼容性,其愿景是能够使各种自动驾驶功能与任何仿真工具连接,同时能够集成各种传感器模型。

#### (5) OpenLABEL

OpenLABEL 标准主要关注数据标注相关问题。关注的内容包括如何将相应的数据标签分配给已采集的原始数据,如何为带有目标物标签的场景文件标注标签,如何为逻辑场景标注标签等。据了解,该项目组的工作将从标签与目标物的区别、目标标注、场景标注等方面加以分工,深入研究标注方法和格式。

#### (6) OpenODD

针对自动驾驶行业对于设计运行范围界定不清的问题,ASAM 运行设计域(Operational Design

Domain, ODD)首先明确了标准化定义及需求,开发一种机器可读的 ODD 概念标准化描述语言。ODD 的标准化定义对于基于仿真的测试尤为重要,其允许用户之间共享、比较和复用 ODD 概念,避免行业之间将资源浪费在重复构造标准件上。除此之外,ODD 的标准化定义将有助于政府标准化评估自动驾驶车辆部署的安全性,消除自动驾驶整车制造商和政府之间的沟通壁垒。

#### (7) OpenXOntology

2022 年 4 月,ASAM OpenXOntology 概念白皮书正式发布。作为打通所有 OpenX 系列定义以及框架的主体,ASAM OpenXOntology 将为 ASAM OpenX 系列标准提供一个共同的语义库与逻辑映射关系,大幅提高了 ASAM 各标准间的兼容性。

中国的驾驶场景极具特色,不仅道路结构、交通标志、交通信号灯等形态各异,人车混流的交通状况也为构建动态仿真场景增加了许多难度。为了更有针对性地解决与中国特色场景相关的诸多问题,ASAM 标准协会于 2018 年与中汽数据有限公司(简称“中汽数据”)开展技术交流。中汽数据在驾驶场景、模拟仿真等领域取得的进展得到了 ASAM 的高度认可。2018 年 10 月,ASAM 邀请中汽数据专家参加 OpenDRIVE、OpenSCENARIO 标准项目启动大会并发表演讲,得到了包括奥迪、大众、沃尔沃等整车企业的持续关注。2019 年 9 月,中汽数据与 ASAM 联合发表声明,共同组建 C-ASAM 工作组。C-ASAM 作为 ASAM 中国区唯一官方代表,全权负责统筹管理中国区 ASAM 会员,举办 C-ASAM 相关会议和培训,并由深度参与 ASAM 标准制定的中汽数据代表定期向成员更新 ASAM 标准研究进展,促进成员参与国际标准制定以及国际合作等相关事务。针对 ASAM OpenX 模拟仿真测试场景标准、XIL 在环测试标准与 ODS 数据管理工具,C-ASAM 成员积极开展研究与开发工作。C-ASAM 工作组将整合中国智能网联汽车行业,利用国际合作平台价值,实现互通互利,携手共进,达成共赢的局面。结合国内的驾驶场景和需求,工作组围绕 ASAM 标准框架进行了扩充和拓展,如图 8 所示。

目前,C-ASAM 工作组成员包括上汽集团、腾讯、百度、赛目等 20 余家中国企业与研究机构,共同为中国在相应标准中发声,成为中国对标国际标准内容的重要工作组。作为工作组成员之一,腾讯牵头 OSI 的 V2X 工作组参与到 OpenSCENARIO 1. X 标准制定。基于数据接口和格式等仿真验证领域的

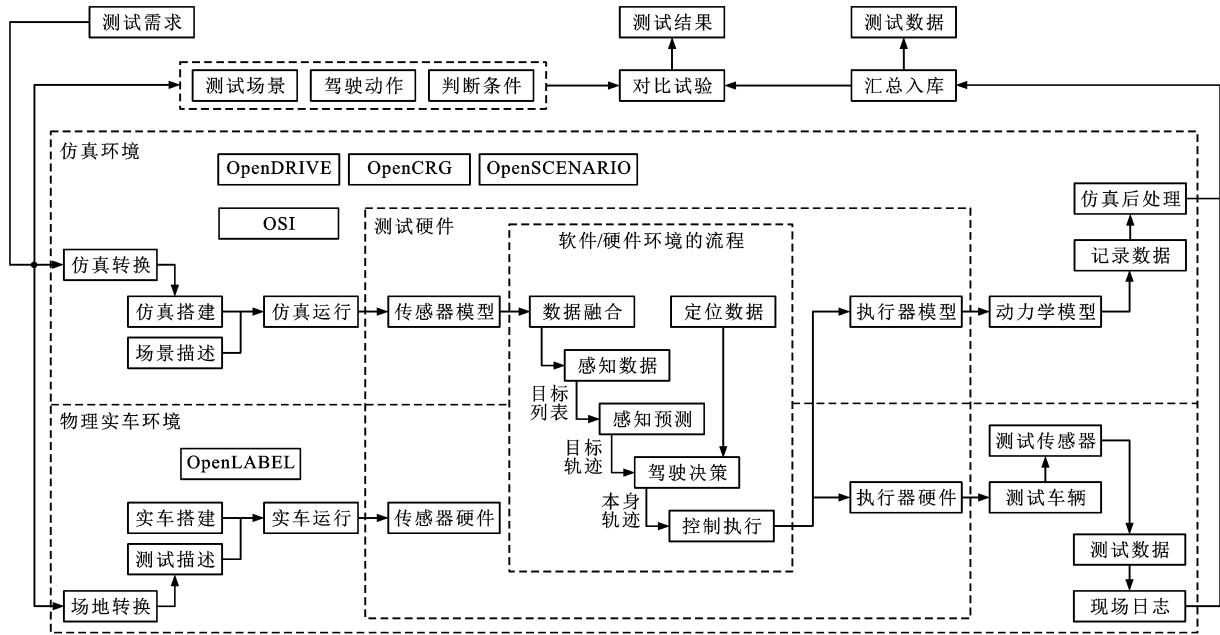


图 8 C-ASAM 工作组研究框架与内容拓展

Fig. 8 Research framework and content expansion of C-ASAM working group

共性问题, ASAM 引入的 OpenX 系列标准填补了行业多项空白。该系列标准的推出与完善, 使得仿真测试场景中各要素之间的隔阂逐渐被打破, 原本孤立的各环节的贯通与交互成为可能。随着中国汽车仿真验证领域的国际化接轨进程加快, OpenX 系列标准的影响也将不断扩展<sup>[71]</sup>。

## 2.6 总结与展望

(1) 车辆动力学模型对自动驾驶仿真的真实性有重大影响, 需要深入研究车辆动力学来提高车辆模型的精度。

(2) 拟人化测试背景车驾驶人模型可以使仿真测试模拟车辆在自然驾驶环境中的道路测试, 能够提高仿真的真实性和测试性。

(3) 高等级自动驾驶仿真测试的算力需求爆炸式增长, 需要仿真软件能够协调调度本地和云端资源进行协同仿真。

(4) 仿真测试标准格式和标准接口对推动自动驾驶仿真测试的发展具有重要意义。

## 3 自动驾驶交通流仿真测试技术

自动驾驶交通流仿真测试的目的主要是对自动驾驶在演进交通环境下的安全和交通效能进行测试, 因此, 本节主要从交通流仿真视角, 重点介绍自动驾驶测试中背景车驾驶风格模型、背景交通流模型、交通场景生成方法以及加速测试方法等关键技术的发展现状, 如图 9 所示。

### 3.1 测试背景车驾驶风格模型(孙剑、岳李圣飒、田野、朱奕昕)

#### 3.1.1 交通流仿真中的驾驶人模型

在交通流仿真中, 驾驶人建模主要考虑如何生成更加拟人化的仿真轨迹, 具体做法包括在传统微观交通模型中融入更多人因要素, 利用深度学习、强化学习模型对复杂驾驶行为进行高精度复现。

##### (1) 基于人因理论改进的微观交通模型

目前, 一些虚拟测试中利用传统微观交通模型(如 IDM 等)来生成背景车轨迹, 然而, 这些模型对驾驶人特征考虑较少, 导致生成的个体轨迹真实性有限。近年来, 对这些模型考虑驾驶人决策机制以及行为特征, 调整模型参数或者结构以提高仿真精度, 正成为新的研究点。

在决策机制方面, 任务-能力理论、驾驶风格激进进化机制、无响应机制等驾驶人决策机制已引入了传统微观交通模型, 并实现了模型精度的提升。在行为特征方面, 主要围绕驾驶行为的异质性进行仿真, 包括对驾驶风格以及个体驾驶行为的短时变化进行建模。对此, 驾驶人信息处理差异、长短时驾驶特征、驾驶风格不确定性特征、主观效用差异等已被引入模型中。此外, 对驾驶中风险感知差异<sup>[75]</sup>、失误行为特征<sup>[76]</sup>与分心特征<sup>[77]</sup>也实现了建模。

##### (2) 基于深度学习的驾驶人模型

常用的深度学习驾驶人模型主要包括 LSTM、生成对抗网络(Generative Adversarial Network,

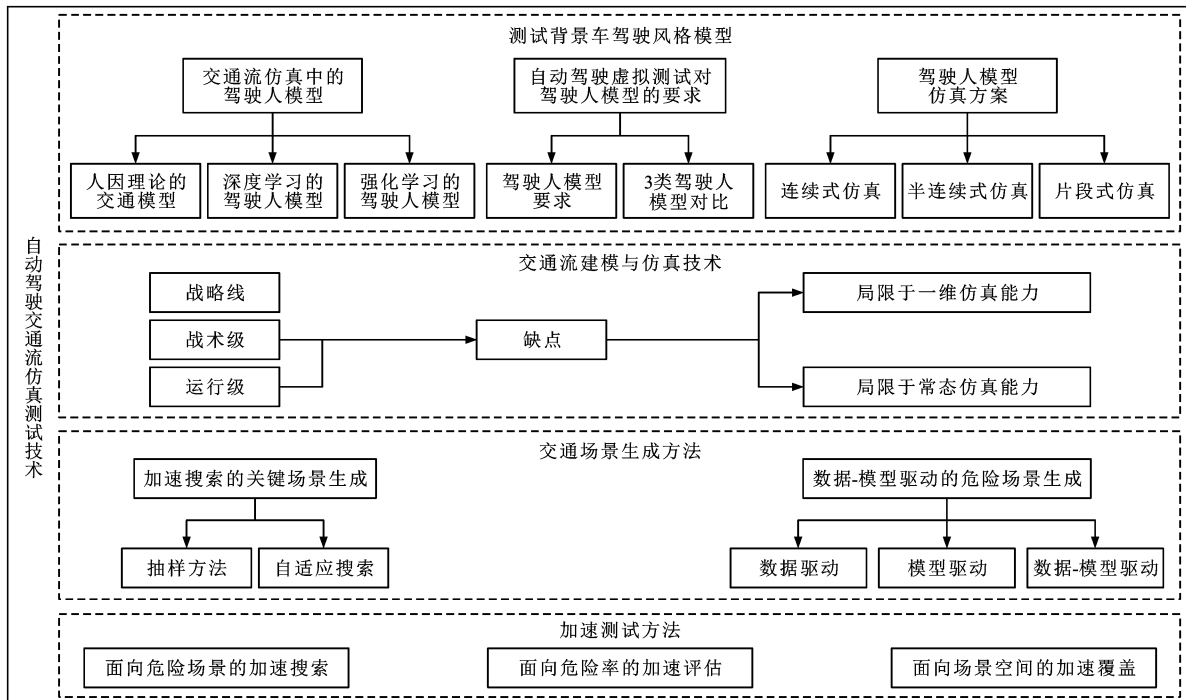


图9 自动驾驶交通流仿真测试技术组织结构

Fig. 9 Organizational structure of simulation and testing technology of autonomous driving traffic flow

GAN)和组合神经网络模型3类,能够实现对复杂驾驶行为轨迹的高精度仿真。

LSTM适用于学习时间序列数据中存在的历史相关关系,在驾驶行为预测方面应用较为广泛,已应用到对跟车、变道、弯道行为以及多模态驾驶行为的预测。同时,堆叠LSTM<sup>[78]</sup>、卷积网络关键特征提取、注意力机制与考虑交互行为相关性等技术被用于进一步提升LSTM建模精度。

GAN通过生成器和判别器的相互对抗,使仿真的驾驶行为分布不断接近真实。GAN包含多种结构,例如递归GAN、参数共享GAN、条件GAN等。研究者利用GAN对变道、超车和汇入、插入以及非预期场景中的驾驶行为<sup>[79]</sup>进行了仿真建模,实现了较好的精度。

组合神经网络模型利用多个神经网络分别对车辆、地图信息进行编码,并提取各类交互特征,从而提升对于行为特征的捕捉能力<sup>[80]</sup>。常用的车辆行为编码模块包括卷积模块、LSTM、注意力模块等;地图信息编码模块包括卷积模块、图神经网络等;交互信息编码模块包括空间注意力、GNN等<sup>[81]</sup>;预测信息解码模块包括多层感知机<sup>[82]</sup>、LSTM等。

### (3) 基于强化学习的驾驶人模型

强化学习理论通过不断地让智能体同环境交互,获知一定动作下的奖惩,从而学习到最佳的动作策略。一些研究者通过将奖惩函数的目标设定为不

断逼近驾驶人真实行为特征,从而学习到驾驶行为;模型已被用于考虑不同驾驶风格下的变道、跟车以及多车交互行为<sup>[83]</sup>。

逆强化学习是强化学习理论的进一步发展。相比强化学习,逆强化学习不需要事先给定奖励函数,而是根据专家行为轨迹数据去推理奖励函数,因此,逆强化学习更能反映驾驶人真实行为。研究者利用逆强化学习对驾驶人行为机制<sup>[84]</sup>、驾驶风格<sup>[85]</sup>等进行了建模尝试,结果显示比传统微观交通模型好。

### 3.1.2 自动驾驶虚拟测试对驾驶人模型的要求

#### (1) 双向交互仿真对驾驶人模型的要求

考虑到驾驶人模型在建模理论和实际部署能力方面的差异,虚拟测试双向交互仿真对驾驶人模型存在真实性、多样性、可解释性、可迁移性与复杂度5个维度的要求。真实性是对驾驶人模型最基本的需求,包括对驾驶行为异质性、异常驾驶行为、非完美驾驶行为、失误驾驶行为的真实再现;多样性是指驾驶人模型在七类典型场景(跟车、变道、插入、汇入汇出、超车、弯道、交叉口交互)中的研究和应用程度;可解释性是指驾驶人模型解释驾驶人认识过程和行为机制的能力;可迁移性是指驾驶人模型结构可在不同测试场景之间通用的能力;复杂度包括驾驶人模型结构的复杂程度,还包括模型的参数训练和收敛性难度。

#### (2) 面向仿真测试的3类驾驶人模型多维对比

基于人因理论改进的微观交通模型在 3 类模型中的可解释性和可迁移性最好,能够揭示人因要素对于驾驶行为的影响与认知过程,且有关规律在不同场景中可通用。同时该类模型的复杂度低。然而模型的真实性和多样性有待提高。

基于深度学习的驾驶人模型具有最好的真实性和多样性,具有大量参数和复杂的模型结构,能够实现对多类场景中复杂驾驶行为的高精度建模。然而模型复杂度高,且“黑箱”性质使其可解释性和可迁移性较差。

基于强化学习的驾驶人模型能够通过奖励函数反映驾驶人的认知过程,具有一定可解释性和可迁移性,比微观交通模型具有更高的精度。然而目前的研究多针对跟车和变道场景,多样性能力不如基于深度学习的驾驶人模型。

### 3.1.3 虚拟测试双向交互仿真 3 类需求下驾驶人模型仿真方案

虚拟测试双向交互仿真按照仿真时长、被测车和背景车的自由度可分为连续式仿真、半连续式仿真和片段式仿真 3 类,具有各自的驾驶人模型方案,具体论述如下。

#### (1) 连续式仿真

连续式仿真指被测车和背景车初始生成条件与仿真过程随机,通过一段较长时间的连续仿真,让被测车和背景车产生各种不可预期的交互,从中发现自动驾驶系统安全性可能出现的问题。连续式仿真实要求模型轻量化程度高,可迁移性强,实现长时间部署;要求具备一定可解释性,从而理解边界场景产生的原因。3 类模型中,基于人因理论的微观交通模型复杂度较低,可迁移性强,具备较好的可解释性,是比较可行的选项。然而,模型的真实性和可迁移性有待进一步提高,利用认知理论对模型进行改进,加强对异常型驾驶行为、非完美型驾驶行为与失误型驾驶行为的建模,加强对除跟车以外其他场景的研究,是未来可能发展的方向。

#### (2) 半连续式仿真

半连续式仿真对连续式仿真中完全随机的场景进行了有限程度的控制,通过靶向增加特定场景的发生概率,优化连续式仿真中测试内容不可控的情况,在保留连续式仿真发现未知不安全场景能力的同时,提高对特定场景的测试效率。特定场景属于高价值测试场景,强调模型精度以及可解释性,为靶向产生更真实的车辆交互行为;而在非特定场景中,强调模型的长时部署性。因而,在特定场景中适合

用基于强化学习的驾驶人模型,具有较好的精度与一定的可解释性;在非特定场景中,可使用基于人因理论改进的微观交通模型。应用强化学习模型存在的挑战是模型复杂度较高,奖励函数难确定,具有较多优化空间。

#### (3) 片段式仿真

片段式仿真是基于场景片段的仿真,仿真时间较短,多用于高价值边界场景库的仿真。设置片段式仿真的目的在于精细化控制高价值的边界场景,尽可能真实地模拟现实环境中的车辆高风险交互和事故过程,用以准确评估自动驾驶安全性。片段式仿真重点关注模型真实性,特别是关注复现异常型和失误型驾驶行为等与风险和事故发生有关的行为类型。

基于深度学习的驾驶人模型具有最好的真实性,有助于模拟异常型和失误型驾驶行为。尽管其模型结构复杂,长时间部署对算力要求高,但是能够有效提供短时间的片段式仿真。此外,该类模型已在全部七类场景中得到了一定研究和应用,其多样性能力已得到证明,有能力满足片段式仿真多样化的建模需求。然而,考虑到该类模型的可解释性和可迁移性较为有限,在未来结合认知理论对模型进行优化,是可能的发展方向。

### 3.2 交通流建模与仿真技术(田野、孙剑)

随着高等级自动驾驶车辆(Highly Automated Vehicle, HAV)智能水平的不断提高,对于 HAV 的测试已从单一功能的独立测试变为多功能甚至整车集成的测试和安全性认证。大量自动驾驶厂家基于路采场景,构建测试场景库,对被测对象进行测试。然而,此类场景库无法覆盖 HAV 所需面对的全部交通场景,也无法满足 HAV 安全验证巨量里程测试需求<sup>[86]</sup>。此外,基于场景库的回放测试是一种单向交互测试,背景车流无法对被测车辆的行为进行实时响应,会导致大量背景车主责的碰撞(如后车追尾等)。

基于交通流仿真生成可实现真正双向交互能力的背景交通流,已成为目前业界公认的重要解决方案<sup>[87]</sup>。与冲突对象的交互博弈是 HAV 规划决策模块的难点,也是决定 HAV 安全性和智能水平的关键。若背景车流智能度不够,无法与测试主车进行可信交互博弈,则测试结果可信度存疑。

然而,纵观国内外用于 HAV 开发与虚拟测试的主流平台,无论是集成性开源仿真测试平台(如微软 AirSim<sup>[88]</sup>、英特尔 CARLA<sup>[89]</sup>、百度 Apollo<sup>[90]</sup>

等),还是非开源的商用仿真软件(如 CarSim<sup>[91]</sup>、PreScan<sup>[92-93]</sup>、VTD<sup>[94]</sup>等),均侧重于对传感器仿真、车辆动力学仿真与场景中各类物体的三维建模仿真。而对于交通测试场景的生成,大多仅支持背景车轨迹的离线导入,少部分(如 VTD 等)虽然提供了内置的交通流模块,但其生成的交通流不够真实,缺乏高逼真度,不能够模拟车辆间双向交互,尤其是缺乏与测试主车交互的交通流环境。Waymo 研发的 Carcraft 具备较强的交通流仿真能力,但由于技术封锁与商业机密因素,并未对外界开放。

针对交通流环境缺失的问题,业界常用的解决方法是接入微观交通流仿真软件。在交通工程领域,交通流仿真软件通过虚拟化生成交通流环境,来模拟评价各种交通管控措施的预期效果。微观交通流仿真软件重点关注车辆之间的真实交互过程,以车辆个体为对象,通过构建车辆驾驶行为模型,模拟车辆在不同道路和交通条件下的运动状态,因此,微观交通仿真模型中的单车也可作为自动驾驶测试的背景交通流,从而接入自动驾驶测试平台。

图 10 展示了一个完整的微观交通仿真原型系统,交通流模型是决定仿真性能的关键。根据驾驶行为的持续时长和空间范围从大到小,通常将驾驶行为划分为战略级、战术级和运行级三层次,分别对应路网中的路径、路段和车道,后来也发展成为结构

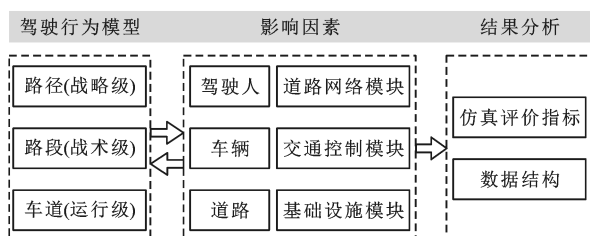


图 10 微观交通仿真原型系统

Fig. 10 Prototype system of micro traffic simulation

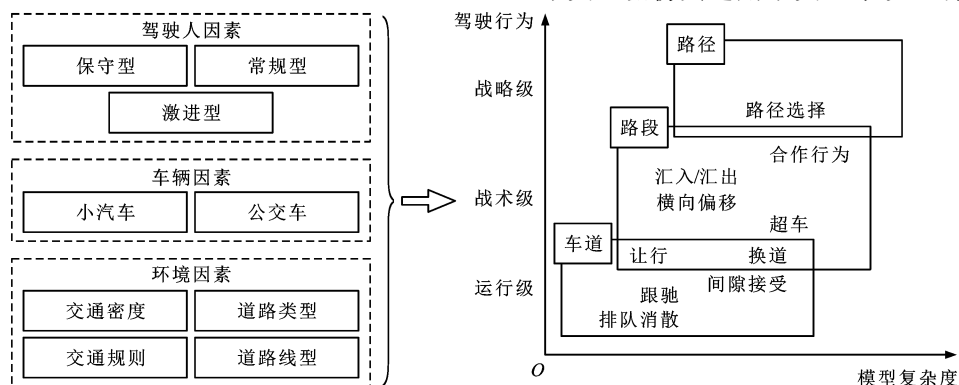


图 11 微观交通仿真核心模型结构

Fig. 11 Structure of micro traffic simulation key model

化的建模范式。图 11 展示了微观交通仿真核心模型的结构。在三层次中存在众多子模型,其模拟的侧重点也不尽相同,战略级的行为模型主要关注出行起点到出行终点路径选择问题,在中观和宏观仿真中起重要作用,而微观仿真更偏向于战术级和运行级的驾驶行为的建模。

目前,面向 ADAS 的虚拟测试工具(如 CarSim、PreScan 等)大多采用交通流仿真模型融合的方法实现交通流环境的刻画。但由于涉及 ADAS 测试工具和交通流仿真软件之间的内部数据传输,并且 2 个软件使用的路网格式不同,需要做路网匹配,这些涉及接口方面的工作需由软件商配合完成。受制于接口的开放程度,第三方用户的可操作性非常有限,无法满足开源仿真测试平台的需求。

另外,现有的交通流仿真软件都是在基于规则的逻辑框架下,通过将车辆之间的交互过程划分为跟驰、换道、合流、分流等基本交互行为,分别构建模型。这种基于规则的仿真模型都是面向交通效率评价的,对自动驾驶车辆的安全性测试意义有限<sup>[94]</sup>,具体表现如下。

(1) 现有交通仿真软件均局限于一维仿真能力

传统的交通流仿真运动建模通常关注沿车道方向上的运动,即基于车道的一维仿真,如图 12(a)所示,白色表示人行横道,粉色表示车道连接线,蓝色表示车道分割线,黄色表示车辆路径,深红色表示停车线。车辆在车道上主要按照跟驰模型更新位置,在有限位置,实施换道动作,表达车道之间的交互。然而,在现实中,在大量非结构化道路中,车辆的行为是在面域上的运动(既有纵向也有横向运动)。如图 12(b)所示,车辆并不是只关注车道运动方向,而是在平面二维空间中做运动规划决策,因此,传统的一维交通流仿真适用于交通系统运行效率评估,典

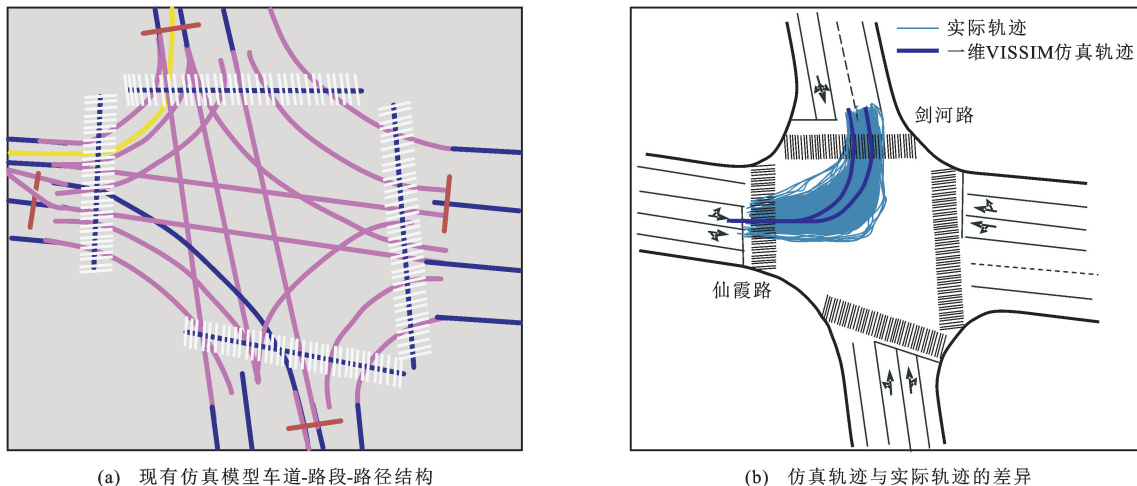


图 12 传统仿真基于车道的建模描述

Fig. 12 Lane-based modeling description of traditional simulation

型指标包括通行时间、延误、排队长度等,是以效率评价为导向的仿真方法论。但是,一维仿真难以体现高度交互、复杂干扰下的微观行为特征,这正是自动驾驶车辆安全测试所需要的。基于面域的二维仿真模型可以满足安全为导向的交通流建模仿真需求,为自动驾驶车辆的安全性测试提供更好的服务。

基于面域运动的场景在交通环境中普遍存在,典型的如交叉口内部、机非共享路段、非结构化道路和双向道路交互空间等。在这些场景下,车道规则模糊,车辆运行表现出无车道划分的多变的轨迹分布,如图 13 所示,蓝色表示左转车轨迹覆盖线,绿色表示直行车轨迹覆盖线,红色表示非机动车轨迹覆盖线,青色表示行人轨迹覆盖线。同时,存在一对一,一对多,甚至多对多的多种交通参与者交互形式。在这些混行、多交互环境中,以交叉口处的交通参与者行为最为复杂,加之中国混合交通流现象明



图 13 现实中非结构化道路处基于面域运动的交通流

Fig. 13 Traffic flow based on area movement on unstructured roads in reality

显,非机动车和行人流量大,运动自由度高,与机动车交互频繁,这些特征导致对交叉口内的复杂交互行为的仿真是自动驾驶仿真测试中最具挑战性的任务之一,因此,交叉口是应用面域二维交通流模型的典型应用场景。

针对这类问题,有学者提出了不同的二维仿真方法。Ma 等<sup>[95-96]</sup>建立分层框架模拟左转车通过交叉口时与直行机动车、非机动车和行人的交互过程,利用 Logit 模型动态地进行转向决策,执行层由改进的社会力模型构成,驱动力方向根据决策结果选取,不同类型对象的排斥力函数中的关键影响变量也根据其交互机理进行调整,约束层包含机动车运动时所需满足的动力学约束;Xu 等<sup>[97]</sup>利用类似的框架基于场论的方法对多交互作用建模解析;Sun 等<sup>[98]</sup>将分层框架推广至模拟共享路权的双向两车道道路上多对象、多交互的混合交通流场景,动机层采用运动风险场评估风险产生初始动机,决策层使用有限状态机实时评估并决策可行动机,执行层则由相应的控制方程构成。

#### (2) 现有交通仿真软件均局限于常态仿真能力

虽然虚拟测试能够加速自动驾驶车辆测试速度,但危险场景与干扰现象在一般常规交通流仿真环境中发生频率低的问题,使得自动驾驶车辆虚拟测试工作产生了定制化场景测试的需求。要测试和证明自动驾驶车辆的安全性,不仅要实现常规场景中交通流虚拟测试的高覆盖,更要对高风险场景中典型的干扰行为场景进行测试,以保证自动驾驶车辆上路后具备处理典型高风险场景和相关交互行为的能力。

然而,目前的交通流微观仿真方法多关注常态

交通流,属于“规则”交通流模拟,对于车辆之间的干扰行为关注非常少,因此,现有的虚拟测试方法迫切需要具有对高需求测试场景中的典型干扰行为进行复现的能力,以模拟自动驾驶车辆周围车辆对其潜在的干扰,从而更好地发挥虚拟测试周期短、速度快的优势,进一步推动自动驾驶车辆测试的进程。

高快速路具备行驶环境封闭、车种单一、道路呈现明显结构化特征等优势,因此,被认为是最早可能实现高度自动驾驶的道路设施。而根据业界目前的测试结果,汇入汇出区是自动驾驶车辆实现高等级自动驾驶的技术瓶颈点,也是事故高发路段。尤其是高峰期的汇入汇出区,车辆对路权的竞争更加激烈,进而引发了各种干扰行为(如车辆走走停停、胁迫换道、多步逼近换道等),对其他车辆,包括自动驾驶车辆的安全行驶产生了很大影响,因此,对高快速路场景的虚拟测试,尤其是干扰测试,就显得至关重要。

城市道路由于交通参与者之间差异大,并且不同道路类型之间没有硬隔离,导致存在诸多异质交通参与者的各种干扰。比如交叉口作为交通流集散点,具有事故发生率高的特点,而其中很大一部分原因是由非机动车、行人的违章穿行导致的。另外,在连接交叉口的主次干道上,也存在着各类非机动车越过实线进入机动车道的现象。上述现象都对自动驾驶车辆安全行驶尤其是对违章行为的反应提出更高要求,也对交通流仿真的建模能力提出了新的挑战。

此外,跳出基于规则的仿真模型框架,构建数据驱动的交通流仿真模型,基于海量路采场景数据,预测短时交互车辆的驾驶行为,也是突破一维仿真和常态仿真的主流思路。如 Lyft 公司开发了 SimNet 仿真工具<sup>[99]</sup>,美国密歇根大学开发了 NADE 仿真工具<sup>[100]</sup>,均可实现数据驱动交通流仿真。然而,此类仿真模型可解释性相对较弱,且对背景交通的长时预测精度较低。

综上,基于路采场景的测试方法是对固定场景进行“回放”测试,仅能实现背景车到主车的单向交互,并且还存在场景数据难以采集等问题,在自动驾驶测试中愈发体现出其固有的局限性。近年来,通过模拟现实交通环境生成虚拟交通流的测试方法受到越来越多的关注,目前,自动驾驶虚拟测试平台已有一定的交通流仿真能力,但其交通流仿真的信度与效度普遍较低。具体体现为现有的一维度、常态的交通流仿真模型主要针对交通效率进行评价,对车辆之间的各类交互行为刻画不清,导致其不适用于车辆安全测试,因此,有必要在传统交通流仿真的

基础上,进一步提出针对自动驾驶安全性测试的交通流模型新需求,开发二维仿真、干扰仿真等深度仿真能力,利用交通流仿真系统与自动驾驶虚拟测试工具整合,提升自动驾驶虚拟安全性测试的信度和效度。

### 3.3 交通场景生成方法(景首才、赵玉钰、杨扬)

利用有效的场景生成方法,结合虚拟仿真测试技术,可以为自动驾驶测试提供丰富多样的交通测试场景,有助于发现被测系统的未知危险场景,明晰被测系统的安全场景边界,因此,交通场景生成方法在提高测试效率方面具有显著的优势。本文从方法特征的视角,将场景生成方法分为加速搜索和数据-模型驱动 2 种。

#### 3.3.1 加速搜索的关键场景生成方法

现有的加速场景搜索的方法主要有 2 种:基于抽样的方法与基于自适应搜索的方法。抽样的方法主要包括重要性抽样方法和蒙特卡洛抽样方法。Zhao 等<sup>[101]</sup>提出一种基于重要性抽样的加速评估方法,基于自然驾驶数据,分别构建了测试背景车的变道和跟车模型,分析了重要性抽样法和蒙特卡洛抽样的效率,提出一种基于迭代搜索的最优重要性抽样方法,对模型发生冲突、碰撞的频率进行了估计,并分别利用跟车和变道场景对算法进行了验证;Feng 等<sup>[102]</sup>为寻找关键场景,提出一种测试场景库生成的统一框架,为了评估场景重要性,构建了场景临界性度量指标,提出了基于重要性抽样的高临界性度量的场景筛选方法,并分别利用变道、跟车和高速公路出口 3 种场景对加速生成架构进行了验证。

基于自适应搜索的场景加速搜索方法主要包括自适应采样和自适应搜索。Sun 等<sup>[103]</sup>为了解决自动驾驶测试周期长和测试成本高的问题,提出了一种自适应试验设计方法,通过减轻检测危险场景的计算负担从而加速自动驾驶车辆安全评估;Ding 等<sup>[104]</sup>提出一种自适应采样器,并利用此自适应采样器设计了一种多模态的安全关键场景生成方法。

#### 3.3.2 数据-模型驱动的危险场景生成方法

现有的危险交通场景生成方法主要分为数据驱动、模型驱动和数据-模型驱动 3 类,邓伟文等<sup>[105]</sup>对自动驾驶安全关键场景生成方法进行了分析,详细介绍了数据驱动生成、对抗生成和基于知识的生成 3 种目前主流的生成方法;陈吉清等<sup>[106]</sup>基于国家车辆事故深度调查体系中的 641 起事故数据,提出了一种基于典型危险事故特征的自动驾驶测试场景构建方法,构建了 15 个涉及道路路段类型的自动驾驶

测试场景;王润民等<sup>[107]</sup>系统阐述了测试场景、基元场景、场景要素之间逻辑关系,提出了自动驾驶测试场景及有关概念的定义,概括了自动驾驶测试场景构建与自动生成研究方面的成果;朱冰等<sup>[108]</sup>提出一种面向多维逻辑场景的自动驾驶安全性聚类评价方法,并以前车紧急制动场景验证了聚类方法的可行性。

在基于模型驱动的危险场景生成方法中,Menzel 等<sup>[109]</sup>提出一种基于本体论的高速公路交通场景自动生成方法,建立了一个包含五层次的知识表示模型:道路、交通基础设施、前 2 个层次的临时操作、对象和环境,最后用 284 个类、762 个逻辑公理和 75 个语义 web 规则实现了对德国高速公路建模;Ding 等<sup>[110]</sup>提出一种在显式知识指导下的语义控制场景生成方法,在生成过程中明确结合领域知识的方法,以实现语义可控的场景生成,将描述场景的语义知识分为 2 种类型,提出了一个树状结构的生成器来学习复杂的场景表示,实现语义可控的场景生成;Jesenski 等<sup>[111]</sup>提出了一个可以描述任意配置道路场景的通用模型,考虑相关车道路段的车辆之间相互作用,设计了一个层次分析框架,利用公开数据集拟合了模型参数,并推断出交通场景。

在基于数据-模型驱动的危险场景生成方法中,在基于数据驱动方面,周文帅等<sup>[112]</sup>从 HighD 数据集中提取车辆切入场景的多个实际样本,建立了车辆切入描述模型,结合切入点的碰撞时间,利用高斯混合方法评估该模型的风险程度,并结合描述模型中参数的分布,采用蒙特卡洛方法生成测试用例;朱宇等<sup>[113]</sup>构建两车轨迹约束关系模型,利用蒙特卡洛方法生成变道切入过程中不同时刻的车辆位置,形成完整变道轨迹,构建了高速公路变道测试场景;Ding 等<sup>[114]</sup>提出一种自适应安全关键场景生成方法,将场景分解为条件概率,将概率称作构建块,用一系列自回归构建块来表示交通场景,利用策略梯度强化学习方法对风险场景参数进行搜索优化。在轨迹生成方面,Choi 等<sup>[115]</sup>将生成对抗网络和模仿学习结合起来,提出一种针对城市车辆轨迹的生成对抗模仿学习轨迹生成方法,将轨迹表示为一系列路段,用部分马尔可夫决策过程对车辆轨迹进行建模,生成与真实车辆轨迹相似的合成车辆轨迹;赵祥模等<sup>[116]</sup>提出了一种基于生成对抗网络的危险变道轨迹生成方法,设计了基于安全距离模型危险场景泛化算法,构建了背景车危险变道切入自动驾驶测试场景。

### 3.4 加速测试方法(张赫、孙剑、田野)

与传统车辆安全测试不同,自动驾驶测试对象和测试重点的变化引发了新的测试挑战。传统汽车的安全性测试主要通过道路测试里程积累。基于里程的安全性测试需要海量的测试积累和数据样本,以使各种危险驾驶工况尽可能暴露。但是,基于里程的安全测试并不能保证暴露在无限自然驾驶场景中所隐藏的全部自动驾驶安全隐患,因此,传统基于里程的车辆测试手段不仅成本极高,而且需要极大的测试里程积累。目前,自动驾驶场景化测试成为主流思想。场景测试的核心在于定向构建高测试需求场景,以解决公开道路测试中场景随机、大部分场景重复、边界场景难以覆盖等引发的超长测试周期难题<sup>[117]</sup>。

为了解决进一步海量测试场景数量爆炸的难题,避免大量重复无效的场景测试,应该通过加速测试方法优化筛选高测试需求的场景。本文以“目标导向”将虚拟测试场景加速测试方法分为 3 类:(1)危险场景加速搜索方法,加速生成特定类型的危险场景,例如高风险场景、边界场景、碰撞场景和最差场景,方便探测自动驾驶的缺陷;(2)危险率加速评估方法,基于自然驾驶数据,生成符合实际分布的场景,并加速评估自动驾驶车辆在真实交通环境中遇到风险的可能性;(3)场景空间加速覆盖方法,在特定的运行设计域(即逻辑场景库)中,根据特定覆盖率指标,加速实现最大化测试覆盖率。

这 3 类方法可以通俗地总结为薄弱环节专项测试、危险率量化认证测试与驾驶功能全面测试,自下而上完成对自动驾驶车辆的安全性能的加速测试。

#### 3.4.1 面向危险场景的加速搜索方法

危险场景可以用于辅助诊断自动驾驶车辆的功能缺陷,是自动驾驶车辆测试过程中的关键环节,若不借助特定的优化方法,获取随机偶发的危险场景的效率将极其低下,因此,面向危险场景检测的加速测试方法需要在参数空间中进行针对性搜索,快速捕捉大量危险场景。搜索过程的效率和准确度是评价方法效果的重要指标。

危险场景可以进一步分为 4 个子类别:高风险场景、边界场景、冲突场景、最差情况场景。危险场景的搜索通常是一个“打标签”的过程。在学界通常用一些代理安全测度对场景的风险级别进行量化,例如碰撞时间、减速至安全时间、车头时距、间隔时间等。朱冰等<sup>[118]</sup>定义了场景危害度、场景暴露频次、场景敏感度 3 类属性,采用场景测试优先度作为

危险场景搜索和场景加速测试的基础。但实际上,由于不可能对所有场景遍历计算风险指数,所以在复杂场景空间中搜索目标场景的过程可能十分复杂。面向高风险场景检测的测试场景加速测试方法不断涌现,主流思想是将搜索问题转换为最优化问题,通过最大化或最小化的目标函数来实现搜索目标<sup>[119]</sup>,例如二分搜索、进化算法、种子填充、分类算法等。代理模型用于逼近复杂的智能车场景测试过程,通过提升代理模型的分类精度,提高方法效率。Mullins等<sup>[120]</sup>在研究中应用基于代理模型的自适应搜索技术搜索安全场景与危险场景的区域边界;Sun等<sup>[103]</sup>将自适应搜索技术运用于碰撞场景搜索,并对比了六类代理模型在搜索碰撞场景时的效率与精度;Xu等<sup>[121]</sup>提出了一种基于改进的重要性采样(Importance Sampling, IS)技术的自动驾驶车辆安全评估加速测试方法,以提取场景的关键变量并对关键变量的分布进行统计拟合,利用遗传算法通过求解优化问题来计算最优IS参数,提高了加速测试的效率。

### 3.4.2 面向危险率的加速评估方法

面向危险率的加速评估方法主要借鉴的是稀有事件仿真方法,包括马尔科夫链蒙特卡洛方法、分裂算法、子集模拟与重要度抽样等。其中,重要度抽样方法是最重要的方差缩减方法,是进行小概率事件快速概率评估的常用方法。2017年,Zhao等<sup>[122]</sup>基于重要度抽样方法率先开始了自动驾驶测试领域的加速方法研究。为了加快自动驾驶车辆的测试与评估,其具体实现方法为在蒙特卡洛抽样的基础上利用方差缩减技术,通过变化抽样测度,在保证对样本参数的无偏性估计的前提下增加极端场景的出现概率;以跟驰、变道与切入场景为研究对象,设定了冲突、碰撞与伤亡事件的极端场景特征,对其中的场景参数单独构建统计分布,通过重要度采样函数,提高收敛效率与仿真速度。对于重要度抽样方法,重点和难点在于求解重要度抽样函数。Huang等<sup>[123-124]</sup>将智能车辆的加速评估从多变量独立分布扩展到联合分布,弥补单一参数分布在极端场景特征上描述的不足;由于参数化分布难以准确拟合具有时空相关性的高维参数空间,Zhang等<sup>[125]</sup>将标准化流入重要度抽样方法,靶向学习稀有事件时空参数的联合分布。

片段式场景测试各自独立,且不考虑各种功能场景之间的连接关系,评估结果不能代表在连续驾驶过程中的自动驾驶车辆的整体性安全性表现。连

续式场景测试需求催生新的测试方法论,已有文献出现2种研究思路:一种是直接设计连续式驾驶任务,一般是给定驾驶区域或起终点,被测主车根据背景车的行为自适应地选择交互行为。Wang等<sup>[126]</sup>在研究中解决了自动驾驶交互过程中的场景测试黑盒问题,使用Level- $k$ 博弈论和社会价值取向来表征交互行为,并使用强化学习训练背景车行为基于高斯过程回归的自适应测试场景派生;Tuncali等<sup>[127]</sup>提出用于对抗性测试的快速探索随机树,搜索路径规划中的安全边界,在测试中对背景车行为随机采样;Kim等<sup>[128]</sup>利用硬件在环的仿真,模拟约2.5 km的城市道路进行驾驶测试。另一种思路是通过片段式测试推演连续式测试。Feng等<sup>[129]</sup>在*Nature Communications*上发表了最新研究成果,通过统计分析,将自然驾驶过程分为33种变速行为,利用马尔科夫链描述驾驶状态的改变,基于对抗攻击技术来调整驾驶环境,提升危险场景的出现概率。

### 3.4.3 面向场景空间的加速覆盖方法

面向覆盖率的测试场景优化法是用来衡量“什么已经测试过,什么没有测试过”的方法,覆盖率测量也被用来标记是否已经进行了“足够的测试”。测试覆盖率越高,就越能验证自动驾驶车辆在各种交通情况下的能力。考虑到真实交通环境中交通场景是无限丰富、无法穷尽的,测试预定义的场景永远是不完整的,因此,本文讨论的覆盖率评价方法仅为工业实践中经常使用的评价方法。

利用并行计算,开展云上测试现已成为一种解决遍历测试的有效方案。一些测试服务公司,例如Foretellix和Metamoto等在云上使用了暴力枚举方法节省计算时间。百度自动驾驶云服务具备高并发处理能力,通过集成场景设计和数据驱动的方法,每日虚拟测试里程可超过千万公里,支持20 000个场景并发测试。

由于自动驾驶测试场景要素众多与参数组合海量,即使在虚拟测试环境中仍面临遍历式测试不可行的难题,因此,可以通过组合测试方法实现“伪全覆盖”,即在不能实现整个场景库的100%测试覆盖时,可以通过组合测试方法实现某些参数组合的100%测试覆盖。 $T$ -wise测试是组合测试方法中最经典的一类。在软件测试领域中, $T$ -wise测试根据经验假定在所有参数中, $T$ 个参数组合可以触发大多数系统情况,而其他参数的值将与结果无关。

$T$ -wise可以表示为覆盖数组的形式,每行代表一个测试,行中各列为参数值。如何构造覆盖阵列

已经成为诸多研究的主题,包括自动化测试生成、顺序生成与粒子群优化等。 $T$ -wise 方法现已用于生成自动驾驶车辆的测试场景。Rocklage 等<sup>[130]</sup>通过非递归回溯为参数化场景生成必要的覆盖数组,将  $T$ -wise 测试方法与简单的轨迹规划模块相结合,以生成具有可变覆盖率的有效测试集;Amersbach 等<sup>[131]</sup>利用  $T$ -wise 方法提出了一种根据已知的自动驾驶车辆所需里程测试数目估计场景测试数目的方法,若  $T$  取 2,则为典型的成对测试。

$T$ -wise 覆盖度中  $T$  的取值尤为重要,目前业界针对自动驾驶  $T$ -wise 测试中  $T$  的建议取值为 6~10<sup>[131]</sup>。但是, $T$ -wise 测试是一种经常用于验证软件产品的策略, $T$  的取值通常来自测试经验累积。目前在自动驾驶车辆的测试经验十分有限,尚不清楚  $T$ -wise 方法是否可以保证自动驾驶车辆得到充分测试。

#### 3.4.4 总结

自动驾驶虚拟测试方法和加速理论的研究重点在于如何采用有限(尽可能少的)测试对自动驾驶的高测试需求场景进行有效覆盖和重点测试。本文将目前的虚拟测试场景优化方法按照测试目的分为 3 类,3 类方法各司其职,测试人员也应该“适才适所”,明确虚拟测试场景优化的目的是必不可少的第一步,可以避免测试过程走弯路,浪费不必要的测试资源。为了最大程度地提高测试效率,应对不同类型的方法进行进一步辨析和比较,根据各类方法特点,形成全新的场景测试框架体系。

目前,加速测试方法仍存在一些研究空白。现有测试优化方法在高维参数环境下无法有效运行,体现为事故率无法收敛与关键场景检索能力差等显著问题,深层次原因是现有搜索算法与方差缩减方法难以处理高维空间中的优化问题。同时,场景仿真精度低,被测物简化,有必要应用深度神经网络等算法对环境建模仿真产生的数据进行优化,应用模型优化等方式提高仿真效率是未来重要的研究方向。

### 3.5 展望

(1)基于云平台的高并发测试、加速测试是仿真测试未来重要的发展方向。云平台具备海量数据存储、处理和管理的的能力,支持大规模仿真构建,覆盖海量驾驶场景。可有效建立城市级地理信息+虚拟交通流信息,实现跨专业多用户信息交互与共享。

(2)功能安全场景库、V2X 场景库与预期功能安全场景库将是未来场景库建设的重点。

(3)混合交通仿真测试将是未来自动驾驶仿真

技术的一个重要研究领域。自动驾驶车辆取代传统汽车不是一蹴而就的事情,必然在相当的一段时间内处于两者共存的局面,因此,传统汽车与自动驾驶车辆混行将是一种常见的交通场景。

(4)当前自动驾驶仿真测试主要还是偏向于传统的主被动层面的安全性及可靠性等方面的测试验证,以及用于感知、规划决策与控制算法的研发或迭代升级,但是每一自动驾驶车辆都不是孤立存在的,必然是网联化的,是作为整个智慧交通体系中的一个智能节点而存在,因此,信息安全方向的验证测试与评价也必然是未来自动驾驶仿真测试的一个重要研究方向。

## 4 硬件在环测试技术

硬件在环仿真测试是自动驾驶测试与评价中承上启下的关键阶段,是面向自动驾驶车辆整车行为的综合性能测试,通过将虚拟仿真世界与物理世界中的自动驾驶车辆交互融合,得到准确且高效的测试效果。本章首先对人-车-路-环多维数字孪生测试技术的发展现状进行总结;其次,围绕道路工况模拟的真实性,对自动驾驶车辆的整车级系统平台构建技术展开论述;最后,针对面向车载传感器性能的硬件在环仿真测试,概述了高清摄像头、毫米波雷达、全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、超声波雷达等典型传感器数据及 V2X 信号的模拟技术,组织结构如图 14 所示。

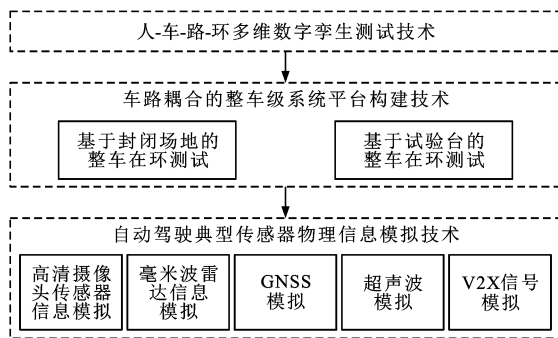


图 14 硬件在环测试技术组织结构

Fig. 14 Organizational structure of hardware-in-the-loop testing technology

### 4.1 人-车-路-环多维数字孪生测试技术(彭铖、王振)

数字孪生概念最早始于 2002 年,并在 2010 年首次应用于航空航天领域,以测试飞行器外壳与航天器<sup>[132-133]</sup>。数字孪生由真实世界中的物理对象、数字世界中的虚拟模型和连接二者的接口组成。此技术对物理实体进行数字化建模,并实现物理实体和虚拟模型双向的动态映射与同步。现实世界的数

据通过传感器传输至虚拟模型,实现现实约束在数字世界的融合,然后将模拟结果作为物理实体测试数据的参考与反馈。此外,数字孪生可以将虚拟模型形象地可视化表示,如图像、视频、增强现实等<sup>[134]</sup>。近年来,在工业4.0背景下,制造业、工业生产和机器人等工业部门已逐渐开始应用这项技术。

伴随车辆通信的发展,数字孪生也逐渐在智能交通和自动驾驶领域展开应用。Wang等<sup>[70]</sup>提出了一种通用的互联车辆数字孪生系统框架,首次将数字孪生引入自动驾驶测试领域;Liao等<sup>[135]</sup>使用数字孪生技术开发了一个合作坡道合并系统,并进行了现场实施,从机动性和燃油消耗方面评估了系统的有效性;Schroeder等<sup>[136]</sup>使用Web技术对数字孪生测试可视化;Wang等<sup>[137]</sup>通过游戏引擎将速度传递给驾驶人;Chen等<sup>[138]</sup>提出了一种跟踪虚拟目标的轨迹跟踪制导方法;Yang等<sup>[139]</sup>提出了一种物理车辆和虚拟车辆结合的多车辆试验数字孪生方法,以弥补真实车辆不足的问题。

V2X技术可以实现以车辆为中心的交通要素之间的相互实时通信,为车辆提供非视觉的感知数据,在车辆和云数据中心之间建立通信链路,实现现实世界和虚拟世界的通信<sup>[140]</sup>。在自动驾驶车辆整车在环测试中,通过使用V2X技术,可以向测试车辆发送场景信息,并提供道路虚拟测试功能,实现现有物理空间和数字空间之间的数据流在2个方向上的集成<sup>[141]</sup>。中国信息通信研究院在数字孪生自动驾驶测试系统中通过V2X通信实现了传感器数据上传和虚拟场景信息传递<sup>[142-143]</sup>。Ge等<sup>[144]</sup>提出了一种三层测试架构,使用4G/5G网络在虚拟和物理之间建立通信链路,使用LTE-V2X技术收集车辆信息和道路信息;Szalay等<sup>[145]</sup>研究了一种基于数字孪生的5G环境下低延迟网络化测试。

当前,国内外在人-车-路-环多维数字孪生测试技术的基本框架和组成要素方面不断完善,取得了一定的研究成果,并形成如下发展趋势。

(1)关注低延时通信和高精度建模的多车虚实协同测试。

(2)探寻在增强现实基础上的模拟测试系统的大规模体系结构和高效率场景生成。

(3)实现基于数字孪生自动驾驶测试的统一化通信协议。

(4)使用高真实度的汽车动力学模型,对车辆行为进一步细化。

(5)通过增强现实技术、驾驶模拟器等提高人机

交互的沉浸感,为虚拟测试提供可视化操纵。

## 4.2 车路耦合的整车级系统平台构建技术(承靖钧、王振)

作为一套结构复杂的物理信息系统,自动驾驶车辆深度融合了智能驾驶系统与汽车实体<sup>[146]</sup>,充分地利用各个子系统(如传感器、定位、感知、决策、规划、控制等)的功能特性,实现不同子系统间的高度耦合与紧密协作,并通过智能驾驶系统与汽车实体间相互关联的反馈回路,以安全、动态、实时的方式驱动车辆在交通环境中自主行驶。自动驾驶车辆行驶过程中的行为表现可直接反映所有子系统间的协作能力,即自动驾驶的综合能力。

极为复杂的工作机制使得自动驾驶车辆的行为表现具有较强的随机性和不可解释性,因此,仅测试各子系统的功能与性能并不足以全面地探知自动驾驶车辆的综合能力,也无法保证车辆的安全性与可靠性。还须在此基础上结合多维数字孪生测试平台对自动驾驶车辆进行整车级测试(即整车在环仿真测试)<sup>[147]</sup>,将其作为测试对象接入数字孪生测试平台,通过观察并分析其整体行为来对其综合能力进行测评。

尽管多维数字孪生测试平台可以提供丰富而又逼真的测试用例和场景,但对于整车在环(Vehicle-in-the-Loop, VIL)仿真测试而言,行驶过程中车辆性能参数(如动力、阻力、燃油消耗、转弯半径、滑移率等)的变化也会影响智能驾驶系统的工作,进而影响测试结果,因此,为了提高测试结果的准确性与可靠性,还须为自动驾驶提供更加真实的物理工况,如道路工况(路面附着系数、坡度、曲率等)、光照、湿度和温度等。其中,光照、湿度、温度等参数主要影响车载传感器的相关性能,也会间接影响道路工况,如路面湿滑程度等。而道路工况则直接决定了自动驾驶车辆在测试过程中的行驶性能,因此,如何在测试过程中为自动驾驶提供真实的道路工况是VIL仿真测试需要解决的关键问题之一。

根据自动驾驶车辆行驶环境中道路工况的不同,目前自动驾驶VIL仿真测试主要有2种方法,分别是基于封闭场地的整车在环测试方法和基于试验台的整车在环测试方法<sup>[148]</sup>。2种测试方法都需要多维数字孪生测试系统提供丰富而逼真的虚拟测试场景,不同点在于前者令自动驾驶车辆行驶在一片封闭的空旷场地或封闭的园区内,为车辆提供最为真实的道路工况;而后者则令自动驾驶车辆行驶在一个室内试验台上,以车路耦合的方式为车辆模

拟真实的道路工况,使车辆在试验台上行驶的效果与在真实道路上完全相同。

#### 4.2.1 基于封闭场地的整车在环测试

封闭场地测试方法在对自动驾驶进行实车测试的过程中,为其提供了真实的交通场景和物理工况。与虚拟仿真测试和开放道路测试方法相比,封闭场地测试方法兼顾了测试的真实性和效率,在自动驾驶研发过程中起到了承上启下的关键作用,因此,在自动驾驶整车在环仿真测试中较受欢迎。然而传统的封闭场地测试方法在测试场景搭建方面的成本极高,且所能支持的场景种类与数量仍受限于场地范围,所以基于封闭场地的整车在环测试方法在此基础上结合多维数字孪生测试平台为自动驾驶提供丰富而逼真的测试场景。

Miquet<sup>[149]</sup>在自动驾驶仿真平台 CarMaker 中搭建了较为简单的虚拟测试环境,解决了虚拟仿真环境与测试车辆间时钟不同步的问题,实现了测试车辆与虚拟环境间的实时交互;Pfeffer 等<sup>[150]</sup>利用搭建的虚拟环境测试了自动驾驶车辆的前向碰撞预警(Forward Collision Warning, FCW)功能;Park 等<sup>[151]</sup>利用整车在环仿真测试了车辆的自动紧急制动(Autonomous Emergency Braking, AEB)和车道保持辅助(Lane Keeping Assist, LKA)功能;Fayazi 等<sup>[152]</sup>在虚拟仿真场景中设计了一个信号交叉口,并在美国国际交通创新中心<sup>[153]</sup>(International Transportation Innovation Center, ITIC)的封闭测试场内开展实车测试,以虚实交互的方式验证一个用于引导自动驾驶高效通行的信号交叉口控制策略。

为了给 VIL 仿真测试提供更加丰富的交通场景,实现测试车辆与虚拟环境中的其他车辆间的交互,SUMO 和 VISSIM 等微观交通仿真软件被广泛地用于动态交通流模拟。Tettamanti 等<sup>[154]</sup>在 SUMO 中复现了一个封闭园区的道路拓扑和交通流,并测试了自动驾驶车辆(Autonomous Driving Vehicle, ADV)的交通拥堵辅助系统;Griggs 等<sup>[155]</sup>在 SUMO 中模拟了大规模的城市级交通环境,并测试了自动驾驶车辆的车速引导算法和局部重路由算法;Solmaz 等<sup>[156]</sup>利用 OpenDRIVE 和 SUMO 搭建了高精度的虚拟仿真环境,并测试了所提出的车路协同环境信号交叉口智能控制策略和自动驾驶车辆轨迹规划算法;Yan 等<sup>[100]</sup>在美国密歇根大学的自动驾驶测试基地 Mcity 内开展了 VIL 仿真测试,在 VISSIM 中复现了 Mcity 的道路拓扑并模拟真实的交通场景,用于测试自动驾驶车辆的决策系统和通

信系统的能力;Ard 等<sup>[157]</sup>在 VISSIM 中设计了混合交通环境下的测试场景,并在 ITIC 对其所提出的跟驰算法进行了整车级测试,用于验证该算法在减少车辆能耗方面的有效性。

基于封闭场地的整车在环测试方法为自动驾驶车辆提供了真实的道路工况和其他物理工况,保证了测试结果的真实性。同时在虚拟测试场景的配合下,也丰富了测试场景的种类与数量,可大幅度提高封闭场地的利用率和测试效率。然而,目前关于封闭场地整车在环测试方法研究仍存在如下问题。

(1)真实的物理工况不可控,不可复现。车辆所处的真实环境随着天气无时无刻不在变化,且该变化具有较强的随机性,因此,无法精确地复现完全相同的道路工况和物理工况,进而导致重复性测试的结果之间可能存在较大差异。

(2)没有考虑时变的物理工况在数字孪生测试平台中的映射与实现,因为该变化对自动驾驶车辆的各个子系统均会产生影响。

(3)由于时变的物理工况和场地范围的限制,该方法不适用于长时间、长距离的自动驾驶测试。

#### 4.2.2 基于试验台的整车在环测试

在传统汽车检测领域中,通常需要利用试验台对车辆的整体能力进行测试,尤其是在产线终端的测试阶段,如利用底盘测功机来验证车辆的制动能力和制动防抱死系统的功能。受传统汽车检测的启发,荷兰应用科学研究组织于 2000 年首先提出了整车-硬件在环(Vehicle-Hardware-in-the-Loop, VEHIL)的测试方法<sup>[147]</sup>,将自动驾驶放置在室内的底盘测功机上模拟真实的道路工况,通过虚拟交通环境的实时交互为自动驾驶提供丰富的测试场景。

在过去的 20 年内,随着自动驾驶技术日渐成熟,基于试验台的整车级测试方法也在不断地得到应用与改进。根据机械结构设计的差异,目前使用的试验台主要分为两类:底盘测功机和动力总成试验台,两者的主要区别在于前者的机械结构中包含了为测试车辆提供道路载荷的滚筒,因此,也称为滚筒试验台,而后者不包含滚筒。

##### (1)底盘测功机

底盘测功机通过在滚筒上动态地施加扭矩来模拟车辆在不同的路面坡度和路面附着系数下所受的纵向惯性力和阻力(风阻、滚动阻力等),通过这些力的合力作用在车辆的轮胎上来模拟道路载荷,为车辆提供真实的道路工况。

基于 VEHIL 测试方法,Gietelink 等<sup>[158]</sup>进一步

利用底盘测功机对 ADV 开展了一系列的功能测试和故障诊断,如自适应巡航控制(Adaptive Cruise Control, ACC)、协作性自适应巡航控制以及 FCW 功能等;Albers 等<sup>[159]</sup>针对基于滚筒试验台的整车级测试平台提出了一套规范化的测试流程用以适配 ADV 的复杂特性,该流程根据测试任务的相关需求为 ADV 配置并指定相应的测试环境;Galko 等<sup>[160]</sup>利用日本 Horiba 公司制造的底盘测功机来测试车辆的 ADAS。

上述研究均采用传统的底盘测功机来进行整车在环仿真测试,即测功机只支持车辆纵向运动的模拟。一旦车辆在试验台上行驶时转动方向盘,前轮和转动的滚筒间会产生横向的滑动摩擦力,车辆会在试验台上横向摆动,甚至造成危险。尽管 Galko 等<sup>[160-161]</sup>也在传统底盘测功机上对 ADV 的横向运动进行了模拟,但实际上,他们在测试过程中仅将车辆的从动轮(后轮)放置在试验台上,同时将车辆的驱动轮(前轮)举起或拆掉,用数字方向盘来替代它们,并通过传感器测量出前轮偏转角和后轮转速,结合自行车模型<sup>[162]</sup>和魔术公式轮胎模型<sup>[163]</sup>模拟车辆的横向运动。虽然这种方式可以在滚筒试验台上灵活地模拟车辆的横向运动,但是车辆和其搭载的机电一体化组件无法集成为一个整体的测试单元,对于 ADV 和 ADAS 而言,测试结果的准确度不高。

为了解决该问题,德国杜尔集团研发了一款前轴可转向的底盘测功机 X-Road-Curve<sup>[164]</sup>,配备一套可跟随车辆的前轮转动的前轴滚筒组,用以支持车辆在行驶过程中的转向操作。此外,无论车辆是直行还是转向,试验台都能够在不调整车辆方向盘的情况下,始终使车辆平稳地行驶在试验台的中心。可转向底盘测功机可以在整车级测试过程中为 ADV 提供更加真实的道路工况,尤其是涉及横向运动的智能驾驶算法,如 LKA、紧急避障和换道超车等。Solmaz 等<sup>[165]</sup>在虚拟场景中搭建了一个环形跑道,并利用 X-Road-Curve 对 ADV 的 ACC 和 LKA 功能进行了整车级测试,测试结果表明 X-Road-Curve 可以较好地跟随车辆的前轮转动,且基于 X-Road-Curve 的整车级测试平台可以快速、准确地复现真实的道路工况。

尽管可转向的滚筒试验台已经能够复现非常丰富而真实的道路工况,但由于车辆在室内环境下行驶,仅依靠滚筒来模拟车辆在行驶过程中所受到的惯性力和阻力依然不够精确,因为 ADV 在驾驶过

程中的姿态也会影响其综合性能,尤其是在一些复杂的道路工况下,如立交桥、坡路等。

为了解决该问题,石家庄华燕交通科技有限公司研发了一款三自由度的可转向底盘测功机,根据虚拟场景中的道路模型为 ADV 模拟 3 种姿态,即俯仰角、翻滚角和航向角;赵祥模等<sup>[166]</sup>基于长安大学 CAVTest 研发了一套多维数字孪生测试平台,面向多种道路类型(包含长直道路、坡面道路、S 型弯路等)设计了丰富的交通场景,并结合该三自由度可转向滚筒试验台开展了整车在环仿真测试,以虚实结合的方式测试 ADV 的多项功能,如 ACC、AEB、LKA 和换道等。

## (2) 动力总成试验台

与底盘测功机不同,动力总成试验台中没有设置滚筒组,在测试过程中需要将车辆举起并将轮胎卸掉,使车辆的轮胎不与任何表面接触,因此,需要构建足够精确的车轮模型(包括轮胎模型等)来保证模拟的物理工况的真实度与滚筒试验台的效果相当<sup>[167]</sup>。具体地,利用 4 台负载发动机分别将车轮模型计算出的扭矩加载到轮毂上,用于模拟车辆的行驶阻力和惯性力。受益于该机械结构,动力总成试验台在模拟车辆转向方面具有极大的优势,可以为车辆提供高动态的转向运动。

Schyr 等<sup>[168]</sup>利用动力总成试验台提出了一个整车在环测试框架 DrivingCube,试验结果表明该框架可以为 ADV 模拟更多真实的测试用例,有效地提高测试效率;Li 等<sup>[169]</sup>基于德国 KS 公司<sup>[170]</sup>制造的动力总成试验台、SUMO 和 CarMaker 搭建了一套联合仿真测试框架,并验证了 ADV 的 ACC 和 AEB 功能,试验结果表明动力总成试验台可以灵活地模拟不同的道路工况,真实地复现车辆的轮胎滑移率和非线性动力学。

与底盘测功机相比,虽然动力总成试验台更容易实现高动态转向运动,但仍需要构建更加精确的车轮模型来模拟车辆运动。相比之下,底盘测功机的测试结果更加真实,且由于技术相对成熟,基于底盘测功机的整车级系统平台被广泛应用于自动驾驶测试领域,但它仍需要更为复杂的机械结构来实现精准的转向运动。

基于试验台的整车级测试方法通过分析车辆系统与道路系统间的相互作用,结合多维数字孪生测试系统,实现了室内环境下车路耦合的整车级系统平台,不仅可以为 ADV 提供丰富而逼真的测试场景,还可以为车辆提供更加真实的道路工况。虽然

与基于封闭场地的整车级测试方法相比真实度稍弱,但基于试验台的车路耦合整车级系统平台能够支持长距离、长时间和重复性的自动驾驶实车测试,在保证测试准确性的同时大幅度提高了测试效率,而且能够全面地检查 ADV 的功能性、完整性和鲁棒性,有助于推动自动驾驶车辆产业的发展。

尽管车路耦合的整车级系统平台通过试验台为 ADV 提供了纵/横向的车辆运动,但实际上其质心仍处在一个恒定的位置并且小幅度摆动,即车辆的纵/横向加速度非常小,车辆的动态行为也因此无法完全体现,同时车载惯性传感器无法准确测量车辆的纵/横向加速度与偏航率,进而影响虚拟场景的实时更新与反馈。

针对该问题,未来的研究可以侧重于根据数字孪生测试平台中虚拟 ADV 的行为与轨迹,在试验台上模拟车辆质心的纵/横向加速度,进而通过车载惯性传感器获取车辆真实的动态行为。

#### 4.3 自动驾驶典型传感器物理信息模拟技术(薛丁瑞、王振)

感知系统是自动驾驶车辆开发的关键步骤,自动驾驶车辆通过各种传感器获取外部环境的信息,然后通过数据清洗、传感器融合等技术对感知信息进行处理后将其交给决策、规划系统进行后续处理。在整车在环测试中,对感知系统进行准确、高效的测试是后续进行自动驾驶决策、规划、执行性能测试的基础。传感器信息模拟仿真技术在传感器原理层面模拟传感器的感知数据,进而将传感器实体作为硬件接入测试环路中,实现各种传感器的硬件在环测试。

当前应用于车载端的传感器主要有激光雷达、毫米波雷达、GNSS、超声波传感器等。受限于成像原理,目前尚未出现可靠的激光雷达信息模拟设备,因此,本节主要分析了几种车载感知设备的信息模拟技术。

##### 4.3.1 高清摄像头传感器信息模拟

高清摄像头作为主要的自动驾驶车载感知设备,主要用于障碍物/其他交通参与者的识别与交通标线、信号灯等要素的采集。根据类型不同主要分为单目、双目、红外与鱼眼摄像头等,主要由图像的采集、处理与特征提取模块组成<sup>[171]</sup>。

高清摄像头的在环主要通过在图像采集模块人为注入采集的数据,进而将三维模型信息完整表达为二维信息,通常通过摄像头暗箱实现。在实际开发过程中,采用 OpenGL 图像引擎占比较高,在构建摄像头的测量学模型后,依据测量方位元素来计

算模型矩阵,根据内方位元素计算投影矩阵。在三维交通场景信息投影到二维靶平面的过程中,会存在景深信息的部分丢失,需要通过调节暗箱的导轨参数,使相机视角覆盖屏幕,确保数据完整性。

##### 4.3.2 毫米波雷达信息模拟

毫米波雷达因其相对于激光雷达较小的成本以及雨、雪、雾天气下的良好表现而被广泛使用。目前已经被用于实现包括 ACC、FCW、LKA 功能。<sup>24</sup> 与 77 GHz 的毫米波雷达被广泛使用<sup>[172]</sup>。

毫米波雷达在环测试的目的是根据预期的距离、速度、角度、雷达散射截面等物理信息,在毫米波雷达暗箱中通过雷达感知模型生成相应的电磁波信号,发送给待测毫米波雷达,使得毫米波雷达能根据设计的场景感知到不同目标。

目前主流的毫米波雷达暗箱主要通过信号处理单元、目标模拟、多自由度转台、吸波材料组成。目标模拟中的不同模块可以实现位移与速度的模拟,目标相对于待测雷达的角度通过多自由度转台的转动进行模拟,吸波材料用于减小外部电磁波与电磁波反射对测试造成的干扰<sup>[173]</sup>。

##### 4.3.3 GNSS 模拟

准确的定位与高清地图能够为自动驾驶车辆提供丰富、精确的先验信息,很大程度提高自动驾驶感知的精度。国外较早地开展了 GPS 卫星信号模拟研究,已经有较为成熟的产品商用,包括美国 Stanford Telecom 公司的 STEL-9200、英国 SPIRENT 公司的 GSS9000 与 GS7000 系列等,经过数代产品更新,相关产品已经能模拟差分信号与多路输出等功能。

GNSS 模拟的主要过程是通过模拟真实卫星与地球上相关目标的定位过程,建立定位模型,进而模拟卫星信号。该设备能够录制、回放卫星历史信号,具备较强的可重复性。GNSS 模拟设备在军事中应用较广,因此,开放的技术性文档并不多。近年来,随着自动驾驶技术的快速发展,部分机构尝试将该技术用于自动驾驶车辆定位性能的测试中,很大程度上降低了汽车定位测试的成本,提高了定位测试的效率。

##### 4.3.4 超声波模拟

相较于上述传感器,超声波传感器应用范围较小,但其原理简单,成本较低。超声波传感器的主要工作原理是通过发射 40 kHz 的超声波进行探测,然后接收反射回来的超声波,通过时间差来计算与目标障碍物的距离。

超声波的模拟与毫米波雷达暗箱原理相似,通过超声波回波模拟器发送回波来实现,回波模拟器发送信号的时间延迟可通过人为调节,从而实现不同距离的探测目标物模拟<sup>[174]</sup>。

#### 4.3.5 V2X 信号模拟

近几年,中国智能网联汽车技术发展迅速,车路协同已成为实现自动驾驶不可绕过的途径,因此,对于V2X信号的模拟也尤为重要。V2X通过在路侧与车端部署响应的专用短程通信(Dedicated Short Range Communications, DSRC)、长期演进车辆(Long-Term Evolution-Vehicle, LTE-V)、5G等通信设备,实现车、路信息共享,进一步增强了自动驾驶车辆的信息获取能力<sup>[175]</sup>。V2X信号的模拟一般通过构建虚拟传感器实现,通过控制时延、丢包率来模拟不同环境下的通信性能。

近年来,为了加快自动驾驶商用化进程,针对自动驾驶感知系统的各部件进行充分、完备的测试,确保其上路的安全性已是迫在眉睫。针对不同传感器,研究人员广泛采用暗箱、虚拟信号模拟等各种手段来生成相应的传感器信号。但目前仍存在部分传感器(如激光雷达等)难以进行信号模拟,以及部分传感器信号模拟真实性较低等问题,需创新性地在传感器感知原理层面进行重生成以解决上述问题。

### 4.4 总结与展望

硬件在环仿真测试具有较高的测试精度和测试效率,已经逐渐成为自动驾驶车辆测试与评价中不可或缺的主要环节。虚拟仿真场景是硬件在环测试的核心,交互性、实时性和真实性是硬件在环测试的立足点。本节广泛地调研了当前最新研究文献以及工业界的技术研发进展,围绕上述3个立足点对硬件在环测试中的数字孪生测试技术、整车级系统平台构建技术、车载传感器物理信息生成技术平台进行了系统性的梳理与总结。虽然硬件在环仿真在自动驾驶车辆测试领域取得了一些进展,但目前的研究和技术仍难以满足高等级(L3级以上)自动驾驶车辆的测试需求,尤其在实时性和真实性两方面。未来研究的发展思考如下。

(1)数字孪生测试平台低延迟通信技术。交互是多维数字孪生测试平台的基础,通信是实现虚实交互的技术支撑。作为高度复杂的物理信息系统,为了保证安全性与可靠性,自动驾驶车辆在测试过程中需要实时地与虚拟仿真场景中的周边元素进行交互。未来的研究首先需要进一步细化数字孪生系统中人-车-路-环模型的真实性和真实性,并扩大虚拟测试场

景的规模。在此基础上改善现有通信技术,重点关注大规模测试场景下的V2X高吞吐量、低延迟通信研究,进而提高自动驾驶车辆测试的可靠性。此外,由于自动驾驶车辆种类繁多,且用于测试的虚拟仿真场景的关注点也各有不同,随着基于数字孪生的自动驾驶测试技术的发展,构建统一的数字孪生测试标准化通信协议也是未来的研究方向之一。

(2)面向试验台的车辆质心加速度模拟技术。整车试验台可以支持车辆的纵/横向运动,并模拟真实的道路工况,但为了保证测试人员的安全,车辆通常被固定在测试台架上,无法完全地体现车辆的动态行为,且车辆在估计自身运动参数时会存在较大误差,从而影响自动驾驶车辆在数字孪生场景中的定位效果,因此,未来需要改善试验台的机械结构,并结合数字孪生测试平台中虚拟自动驾驶行为和运动轨迹在试验台上模拟自动驾驶车辆的纵/横向加速度。

(3)激光雷达物理信息生成技术。激光雷达是自动驾驶车辆中必不可少的传感器。由于激光雷达工作原理复杂,通道数量大,难以根据虚拟场景中的目标信息生成相应的反射信号,因此,目前市场上仍没有面向激光雷达的目标模拟器,导致面向激光雷达的硬件在环测试迫在眉睫。未来应该更深入地从激光雷达的工作原理和目标探测的基本原理出发,研究面向激光雷达的目标模拟器,生成探测目标的物理信息。

(4)多目标毫米波雷达物理信息生成技术。车载毫米波雷达功能丰富,除了基本的物理信息探测外,还配有多目标跟踪等高级功能。现有的毫米波雷达目标模拟器最多只能模拟3~4个目标的物理信息,而真实的毫米波雷达最多可以探测64个目标,因此,未来应该更深入地研究毫米波雷达目标探测与信号处理的建模方法,在目标模拟器中提升矢量信号收发器和可变延迟发生器的性能,从而实现更多目标的物理信息生成。

## 5 自动驾驶场地测试技术

自动驾驶场地测试主要包括封闭场地测试和开放道路测试,封闭场地测试可结合自身测试需求搭建测试场景,检测车辆系统的整体表现;开放道路测试可验证车辆在真实交通环境中的表现,但实际测试过程中由于开放测试道路周边环境的不确定性,测试效率较低。本章对封闭场地测试、开放道路测试以及高速公路测试相关测试场、测试标准和关键技术的发展现状进行阐述,组织结构如图15所示。

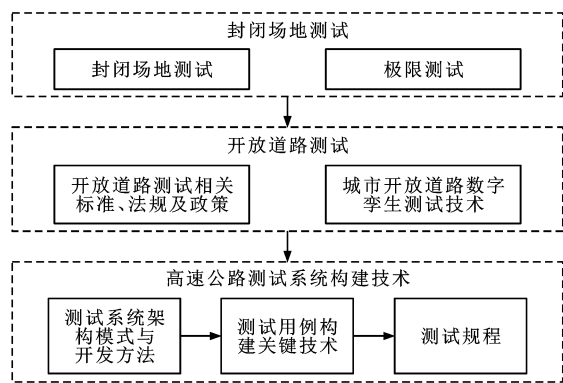


图 15 自动驾驶场地测试技术组织结构

Fig. 15 Organizational structure of field testing technology of autonomous driving

表 4 自动驾驶封闭测试场地建设类别

Table 4 Construction categories of closed test fields for autonomous driving

| 场地名称 | 自动加速与制动测试场地、自动转向“S”型路线测试场地、弯道行驶测试场地、坡道停车和起步测试场地、道路入口测试场地、道路出口测试场地 | 人行横道减速测试场地、减速丘限速测试场地、道路限速测试场地、施工区测试场地、停车让行测试场地、减速让行测试场地、锥形交通路标测试场地 | 人行横道信号灯识别与响应测试场地、平面交叉口场景测试场地、进出环岛测试场地 | 隧道模拟测试场地、前方车辆静止测试场地、前方车辆紧急制动测试场地、前方车辆减速测试场地、主动换道测试场地、前方行人横穿测试场地 |
|------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 测试用途 | 基于不同的道路类型测试自动驾驶                                                   | 基于不同的交通标志标线及其他道路交通设施测试自动驾驶                                         | 基于交叉口、环岛及信号灯等交通设施测试自动驾驶               | 测试其他交通参与者及定位信号遮蔽道路对自动驾驶的影响                                      |

对比分析,如表 5 所示,为中国规划自动驾驶车辆测试场地提供借鉴。

表 5 国外主要智能网联汽车试验场对比分析

Table 5 Comparative analysis of major foreign connected and automated vehicle test fields

| 名称                    | 国家 | 占地面积/ $10^4 \text{ m}^2$ | 建成时间        | 测试功能                 | 特点分析                     |
|-----------------------|----|--------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|
| Mcity                 | 美国 | 13.0                     | 2015 年      | 自动驾驶技术、V2X 技术        | 强化试验,柔性化设计               |
| Asta Zero             | 瑞典 | 200.0                    | 2014 年      | 车辆动力学、驾驶人行为、V2X 技术   | ADAS 场景测试与模拟设备,具备完整的测试功能 |
| Smart Road            | 美国 |                          | 20 世纪 80 年代 | 自动驾驶技术、智能交通系统、V2X 技术 | 天气模拟系统、照明和能见度检测系统        |
| City Circuit          | 英国 | 304.0                    |             | 传统汽车、智能交通系统、智能网联汽车测试 | 网联汽车测试设备、跟踪定位与监控设备       |
| Gomomentum Station    | 美国 | 850.0                    | 2014 年      | 自动驾驶技术、V2X 技术        | 2 条真实的隧道,测试面积大           |
| Castle Air Force Base | 美国 | 24.3                     | 2011 年      | 自动驾驶技术               |                          |
| Willow Run            | 美国 | 136.0                    | 2018 年      | 自动驾驶技术、V2X 技术        | 天然坑洞与 3 层立交桥             |

截至目前,中国高校与企业已经开展了大批量的智能网联交通系统试验场建设。李骁驰等<sup>[177]</sup>基于长安大学 CAVTest 提出了一种面向智能网联交通系统的模块化柔性试验场,包括 4 个层次,分别为应用场景层、感知发布层、网络链路层和管理服务层;Duan 等<sup>[178]</sup>在北京航空航天大学建立了 V2X 通信系统和性能测试平台,其中包括一个 V2X 通信系统和一个性能评估系统,可以测试和分析原型通信系统的综合性能,例如通信范围、吞吐量、数据包丢

### 5.1 封闭场地测试(惠飞、李珊珂)

封闭场地测试是自动驾驶测试“三支柱”体系中必不可少的一环。2018 年 7 月交通运输部分别在北京、重庆、西安建设 3 个自动驾驶测试基地,同时发布了《封闭测试场地建设技术指南》,用于指导自动驾驶封闭测试场地建设,从而推动自动驾驶测试工作,促进自动驾驶技术发展。该指南规定了自动驾驶封闭测试的场地、通信、供电等基本要求,适用于中国自动驾驶封闭测试场地建设,如表 4 所示。

目前对自动驾驶车辆的测试还未有一套完整成熟的测评体系及统一标准,为此,刘天洋等<sup>[176]</sup>针对国外智能网联汽车试验场地的研究发展现状进行

失率、延迟和抖动等服务质量指标;Shi 等<sup>[179]</sup>基于国家智能网联车辆(上海)测试区开展了长期演进测试,包括对 LTE-V 和 DSRC 通信技术的性能对比测试,同时提出了一种基于车联网应用场景的测试方法,并在中国进行了关于 LTE-V 和 DSRC 技术性能对比试验,以此来验证这 2 种技术在车联网应用场景下的网络性能;陈子轩等<sup>[180]</sup>以上海市同济大学嘉定校区内嘉三路和李庄环路为基础,建立了面向智能网联车的硬件在环仿真平台。其中,长安

大学 CAVTest(全国高校唯一的 A 级汽车试验场)是中国自动驾驶和车路协同场地研究和测试的重要基地,建有专用汽车试验道路设施,包括 2.4 km 的汽车高速环形跑道、5 种可靠性强化典型试验道路和 3 种低附着系数路面。该试验场是基于长安大学汽车综合性能试验场进行电子化、信息化和智能化改造而成。

在封闭场地构建与运行过程中,王润民等<sup>[181]</sup>阐述了所在的研究团队对车联网技术、自动驾驶测试评价技术、自动驾驶封闭测试场景与场地构建方法、基于 V2X 的网络化智能路侧系统集成、自动驾驶封闭测试环境气象模拟等方面的相关研究,并在此基础上建设了多种测试系统,包括全场覆盖的车联网通信系统、智能交通信号控制系统、数据采集系统、视频监控系统、定位系统、数字化地图和记录与管理系统等。此外,还联合有关机构研发和集成了自动驾驶测试数据采集车、行人模拟测试平台和气球车等测试工具,形成了自动驾驶封闭场地测试技术链和工具链。同时在研究自动驾驶封闭场地测试方法的基础上,编制了《长安大学自动驾驶封闭场地测试规程》,从测试场地、测试装备、测试规范等多方面构建了较为完整的自动驾驶封闭场地测试体系。

## 5.2 开放道路测试(黄蕾、朱世豪、陈伶俐)

开放道路测试是自动驾驶测试的最后一轮测试,将完全真实的自动驾驶车辆与场景信息相结合,是自动驾驶量产上路前最后的测试环节。美国、欧洲、日本等开展相关方向的开展较早,有一定的积累,而中国虽然开始较晚,但国家的政策倾斜使得国内企业在技术研究方面的投入不断加大,相关技术也得到了快速发展。

### 5.2.1 自动驾驶开放道路测试相关标准、法规与政策(朱世豪、黄蕾)

#### (1)国内相关标准、法规与政策

随着智能网联技术的发展,自动驾驶企业对于开放测试道路的需求越来越迫切,北京、上海、重庆、广州等先后发布了开放测试道路的实施细则和管理办法,对于开放测试道路的基本原则、测试车辆要求、测试主体要求、测试管理和事故责任认定等方面进行规定,且各地管理办法都明确表示,并不是所有的开放道路区域都允许智能网联汽车进行测试,仅部分区域可供其进行测试。在进行开放道路测试之前,智能网联汽车需要进行一定的功能测试,才能获得上路测试的资格。近年来,中国关于智能网联汽车开放道路测试的相关标准、法规与政策如表 6 所示。

表 6 中国关于智能网联汽车开放道路测试的相关标准、法规与政策  
Table 6 Standards, regulations, and policies related to open road testing of connected and automated vehicles in China

| 时间      | 标准、法规与政策                      |
|---------|-------------------------------|
| 2017.12 | 《北京市自动驾驶车辆道路测试管理实施细则(试行)》     |
| 2018.03 | 《上海市智能网联汽车道路测试管理办法(试行)》       |
| 2018.03 | 《重庆市自动驾驶道路测试管理实施细则(试行)》       |
| 2018.04 | 《智能网联汽车道路测试管理规范(试行)》          |
| 2018.08 | 《杭州市智能网联车辆道路测试管理实施细则(试行)》     |
| 2018.10 | 《深圳市智能网联汽车道路测试开放道路技术要求(试行)》   |
| 2018.12 | 广州市《关于智能网联汽车道路测试有关工作的指导意见》    |
| 2019.10 | 《自动驾驶车辆道路测试安全管理规范》            |
| 2021.07 | 《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范(试行)》     |
| 2022.10 | 《道路车辆自动驾驶系统测试场景 词汇》           |
| 2023.11 | 《四部委关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知》 |

经过多年发展,目前国内已经有 10 个国家级智能网联汽车测试示范区,各示范区根据自身特点有不同的侧重方向,但对于自动驾驶上路标准、事故认定、接管方式都做了详细的认定。

#### (2)国外相关标准、法规与政策

国外自动驾驶的研发启动较早,为了配合自动驾驶的测试和上路,美国、德国、日本等国家也出台了相关的道路测试管理办法,保证测试车辆的安全。近年来,欧美各国关于智能网联汽车开放道路测试的相关标准、法规与政策如表 7 所示。

表 7 欧美各国关于智能网联汽车开放道路测试的相关标准、法规与政策

Table 7 Standards, regulations, and policies related to open road testing of connected and automated vehicles in European and American countries

| 时间      | 国家 | 标准、法规与政策            |
|---------|----|---------------------|
| 2016.09 | 美国 | 《联邦自动驾驶汽车政策指南》      |
| 2017.05 | 德国 | 《自动驾驶法》             |
| 2016.05 | 日本 | 《自动驾驶汽车道路测试指南》      |
| 2015.07 | 英国 | 《自动驾驶汽车发展道路:道路测试指南》 |
| 2017.05 | 瑞典 | 《自动驾驶汽车公共道路测试规范》    |

表 7 汇集了欧美各国关于自动驾驶测试的上路标准,各类法规和政策中都对自动驾驶上路前的测试进行了严格的规定,要求测试主体承担安全责任,测试区域经过评估后确定,测试人员要经过训练,测试车辆通过相关测试后才能够获得开放道

路测试牌照。

### 5.2.2 城市开放道路数字孪生测试技术(陈玲俐、朱世豪)

在城市开放道路自动驾驶测试中,数字孪生技术通过网络通信技术收集现实世界的的数据,利用大数据处理技术对数据进行分析,并将结果反馈到物理空间来解决现实世界的问题。数字孪生测评系统主要包含静态孪生环境构建与动态孪生数据叠加两部分内容。

#### (1)城市开放道路静态数字孪生系统建模方法

对于大规模的场景,传统的手工构建绝不可能满足效率的需求,替代的是集合了高精地图、数据采集、照片建模、过程式生成技术为一体的创新性高效场景构建工具链和生产流程。采用孪生引擎构建出1:1的虚拟场景,使用高精度GIS数据,生成轮廓,然后通过人工对场景进行微调与修饰。

##### ①基于高精地图和采集数据进行道路重建

道路模型是对精度要求最高的部分,基于高精地图的准确信息进行重建或者基于实际采集的数据进行参考和比对,才可能做到道路模型的高精度重建。如图16、17所示,利用高精地图道路数据,主要包含中心线、轮廓线与标线等车道线,结合实际采集的道路周边数据,基于建筑信息模型建模中部件装配的思路,对道路路段、标线与设施采用先部件再组装的方式进行道路重建<sup>[182]</sup>。该方法建成的模型细节度高,真实性强,具有很好的可视化效果和操作价值。

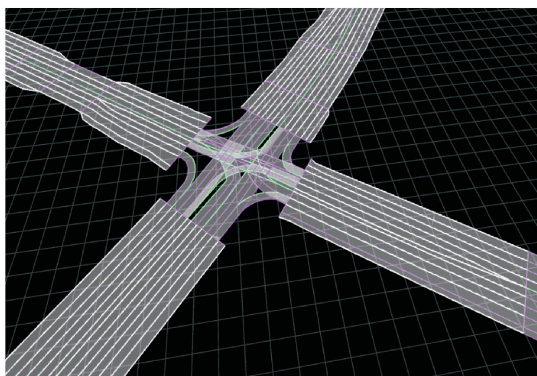


图 16 高精地图

Fig. 16 High-precision map

##### ②基于摄影制图法的静态模型重建

摄影制图法<sup>[183]</sup>是利用相机拍摄和视觉技术对细节信息丰富的模型进行重建的一种高效的方法,对于道路周边的附属设施、建筑等是非常有效的,可以实现和真实物体高度一致的结果与非常真实、自然的渲染效果。



图 17 完整道路模型

Fig. 17 Completed road model

##### ③过程式建模

针对大面积地形与非主要的建筑,利用过程式建模基于地理信息进行自动生成,在保证和真实场景一致性的同时极大程度地提高了效率,并且充分利用数据信息进一步提升场景数据的存储和渲染效率。

##### ④整合构建整体场景

对所有的场景元素进行有效和灵活的整合,并且提供方法便于对静态场景进行编辑、重构、组合,形成新的场景,构建新的数据。再使用 shader 渲染器和粒子效果,实现不同天气下的场景渲染。

#### (2)数字孪生在城市交通系统中的应用

城市开放道路中的人、车、路、环境互相之间都存在强烈的耦合关系,在对其中单个场景要素进行建模时,需要考虑该要素对其他要素的影响,利用这种耦合关系建立人-车-路-环境关系架构,打造车-路-云一体化的云控系统。在虚拟空间中构建数字孪生城市开放道路场景,实时反映现实世界中城市开放道路的动态变化。这样,可以在不影响实际道路交通的基础上,利用数字孪生技术在同一道路场景下对多个要素与对象进行同步定位、数据通信与交互设计,实现不同对象对环境或不同对象之间的同步感知、实时交互和决策行为,从而实现城市系统中的数字孪生仿真测试。

基于上海嘉定智能网联汽车示范区开放道路场景构建结果,针对部分场景进行路侧感知系统的布设,为确保数字孪生系统的精确程度,构建多传感器融合的路侧感知系统,路侧系统建设包含以下内容。

①路侧多源传感器融合的精确感知技术。由激光雷达、相机、毫米波雷达等传感器进行内外参数标定与统一授时处理,实现数据的时空同步和融合,再利用深度学习等人工智能技术对融合数据进行处理和解析,输入海量先验数据训练过的感知模型,输出高精度的感知结果,为数字孪生测评提供数据支撑。

②多传感器的空间标定与相对位姿稳定技术。要保证不同传感器数据的准确融合,就需要保证传

传感器之间的外参数一致性,且在运营生命周期里不受外因作用而轻易改变,相对位姿形变量建议低于0.1%,否则就需要重新进行联合标定。

③多传感器的时间同步技术。需要时间同步方案对不同的传感器进行统一授时,保证各传感器数据感知时间一致,才能对相同时间下的不同传感器数据进行融合。

④端到端的低时延技术。路侧融合感知的结果需要参与到城市数字孪生系统中,要求感知结果从物理世界真实发生到转化成语义化结果传输到车辆进行决策的时间不能超过数据有效时间,否则整套系统辅助的作用将失效。

### 5.3 高速公路测试系统构建技术(景峻、常玉涛、陈西广、纪艺)

本节针对真实高速公路与测试场地的测试系统构建,围绕应用系统架构开发方法、测试用例构建与测试规程设计,分析已有研究与工程实践相关成果,总结符合真实高速公路测试系统建设运行的研究内容。

#### 5.3.1 测试系统架构模式与开发方法(景峻、常玉涛)

当前各类测试系统正在向网联化、数字化、智能化方向全面转型,系统的时空复杂度快速增加,对系统的可扩展性、鲁棒性等提出了更高要求。尤其针对高速公路自动驾驶场地与真实高速公路等对实时性要求更高的场景,其加速测试云平台的构建需更加成体系的系统架构模式开发方法。

当前,现有业界主要平台系统基本采用端-边-云的体系架构模式,在带来灵活性与可扩展性等优势的同时,也进一步提高了系统建设的复杂度与难度,叠加高速公路速度快等特点对在线测试系统带来的高速、高效、高保真等方面的要求,对系统构建模式、开发方法等带来了更高的要求。此外,在中观与微观等层次模式也开展了相关研究与实践工作,如NHTSA自动驾驶测试框架中针对自动驾驶系统这种时间敏感系统采用四维实时控制系统模式<sup>[184]</sup>。为应对以上类型复杂系统的构建过程,对信息技术领域总结形成了系列成熟的系统架构方法,主流架构方法一是以Zachman框架<sup>[185]</sup>为基础开发出的主流架构框架方法企业架构计划<sup>[186]</sup>、联邦企业架构框架<sup>[187]</sup>等;二是以ISO/IEC 14252为基础开发的美国国防部信息管理技术架构框架(Technical Architecture Framework for Information Management, TAFIM),基于TAFIM开发的开放组织架构框架(The Open Group Architecture Framework,

TOGAF)<sup>[188]</sup>,基于TOGAF开发的美国国防部技术参考模型<sup>[189]</sup>与美国国防部架构框架<sup>[190]</sup>。

基于以上架构方法,国内外进行了大量的研究与实践工作,孙雨生等<sup>[191]</sup>对11种架构模型进行了对比研究,从生命周期、业务架构等七方面对5种主流模型进行了系统比较,结果表明TOGAF在业务架构、数据架构、技术架构、支撑工具与开放性等方面具有较大优势;冷丙波<sup>[192]</sup>利用TOGAF指导完成了汽车制造企业系统架构的分析与设计;相关测试系统的构建,赵祥模等<sup>[193]</sup>提出了IntelliWay智慧高速变耦合模块化总体架构,系统性地分析和预测智慧高速系统存在的挑战与未来发展趋势。

#### 5.3.2 测试用例构建关键技术(常玉涛、纪艺)

##### (1)现有关键技术

考虑基于里程的测试方法具有测试周期长、效率低、成本高等弊端,基于场景的场地测试成为自动驾驶孪生测试中不可或缺的一环,因此,开展针对高速公路场景的测试用例构建关键技术研究,有利于促进自动驾驶测试的进一步发展。

王潇屹等<sup>[194]</sup>分析了预期功能安全7层模型架构对于感知系统的影响,根据影响程度选取了适用于不同系统的试验水平和因子,设计了正交设计试验方案,将在保证测试目的的前提下提高测试效率;Xia等<sup>[195]</sup>利用层次分析法选择测试场景中的重要因素,通过组合测试法构建虚拟测试用例;Zofka等<sup>[196]</sup>利用多种传感器采集数据,提出一种在虚拟环境中利用真实交通数据构建高风险测试用例的方法;安泽萍等<sup>[197]</sup>综合考虑交通需求与道路环境属性双重因素,提出了面向高速公路智能车路协同系统的用例构建方法,构建了适合不同高速公路需求的功能完备、场景丰富、要素齐全的车路协同应用用例库,为高速公路车路协同示范应用提供参考;周文帅等<sup>[112]</sup>提出基于实际交通场景的测试用例设计和描述方法,通过分析高速公路车辆切入场景进行验证,运用HighD数据集实现测试用例设计,并利用蒙特卡洛方法生成测试用例。

在现阶段的自动驾驶领域,对于测试场景、测试用例等概念还没有明确和统一的定义,而且,现有的研究主要集中于自动驾驶测试场景的分析与构建,针对高速公路场景下测试用例设计和生成的研究较少。

##### (2)测试用例结构要素与构建

根据对测试用例构建方法的研究,以高速公路测试系统为出发点,提出相关概念与关系如图18所示。

相关概念主要分为2个域,分别为动态驾驶任

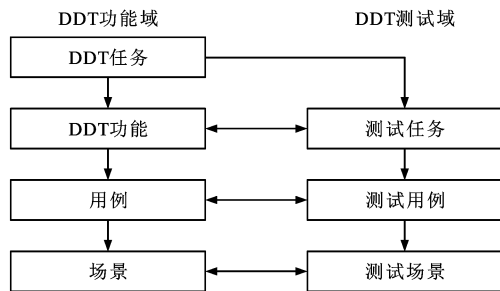


图 18 相关概念与关系

Fig. 18 Related concepts and relationships

务(Dynamic Driving Task, DDT)功能域和 DDT 测试域。前者主要分为 DDT 任务、DDT 功能、用例和场景;后者主要分为测试任务、测试用例和测试场景。测试任务为多个测试功能的耦合关系与执行顺序的描述,一个测试任务对应一个或多个测试功能;用例是指为测试功能设计的对系统如何反应外界请求的描述,通过用户的使用场景来获取需求,主要包括用例描述、测试对象及目的、包含场景与测试相关指标等因素;场景是指支撑测试用例的具体案例,主要包括场景名称、场景描述与场景示意图等因素。

### 5.3.3 测试规程(常玉涛、陈西广)

目前,测试高速公路自动驾驶测试规程以工信部、公安部、交通运输部 2018 年 4 月联合发布的《智能网联汽车道路测试管理规范(试行)》为顶层指导,累计开放智能网联汽车测试道路超过 2 000 公里,道路测试总里程超过 200 万公里;2018 年 8 月 3 日,全国汽车标准化技术委员会等发布了《智能网联汽车自动驾驶功能测试规程(试行)》<sup>[198]</sup>,为智能网联汽车自动驾驶功能检测提供了相应的测试场景、测试规程和通过条件规定;2021 年 3 月 16 日,上海市汽车工程学会起草团体标准《智能交通系统-高速公路自动驾驶系统-性能要求及道路测试规程》,规定了面向具备高速公路自动驾驶功能的 M1 和 N1 类车辆开展高速公路自动驾驶系统的道路测试要求;2021 年 7 月 27 日,工信部、公安部、交通运输部联合印发《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范(试行)》<sup>[199]</sup>,将自动驾驶车辆道路测试与示范应用范围拓宽至高速公路;2021 年 12 月,由中国智能网联汽车产业创新联盟提出的《高速公路自动驾驶系统技术要求及测试方法》团体标准已正式列入中国汽车工程学会标准研制计划。

高速公路环境下的自动驾驶测试规程还处于研究和探索期,还未有行业标准和国家标准。现有测试规程未对测试项目顺序和优先级进行约定,在后

续规范制定中,应优先开展与制动相关的场景项目、道路单一与测试目标物简单的场景测试,从而为自动驾驶企业测试提供更好的技术指导。

### 5.4 总结与展望

在封闭场地建设方面,相比于国外大多数试验场已经初步建成并投入使用,各种能力创新建设促使测试能力不断完善,国内试验场还处于学习和建设过程,虽然各个试验场都有自己的长期建设规划,但目前场地配套设施和测试能力还不完善。未来应借鉴成熟测试场地经验,从自动驾驶功能测试需求出发,建设满足自动驾驶车辆测试所需场景。

在高速公路测试系统构建方面,可以综合分析现有测试用例构建技术,结合测试用例概念结构组成要素,针对高速公路车辆运行速度大、危险场景难构建等特点,基于数字孪生与车路协同关键技术,可开展一种虚实结合的高速公路场景自动驾驶仿真测试用例构建方法研究,为高速公路自动驾驶测试提供更加便捷、高效的技术支持。

## 6 自动驾驶智能性评价方法

自动驾驶智能性评价方法研究有助于区分自动驾驶车辆的任务决策、复杂环境认知、演进交通场景理解等能力,提高汽车智能化设计水平,本章从自动驾驶智能性概念、场景复杂度的量化与评估、自动驾驶智能性多维综合评价体系与社会合作性评价方法四方面介绍自动驾驶智能性评价方法的研究现状,组织结构如图 19 所示。

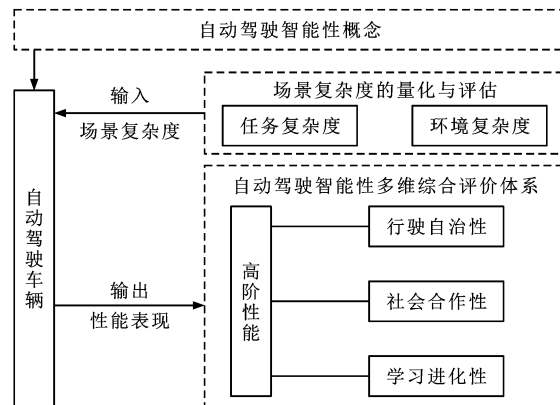


Fig. 19 Organizational structure of intelligence evaluation method of autonomous driving

### 6.1 自动驾驶智能性概念(吴新政、陈君毅、沈勇)

汽车智能化技术是减少交通事故、缓解交通拥堵、减轻环境污染的有效途径。一般来说,自动驾驶技术可以看作是人工智能的一个子领域<sup>[200]</sup>。人工

智能是指当执行与人类相同的任务时,由机器所表现出来与人类智能相同或相仿的智能<sup>[201]</sup>。进一步地,自动驾驶车辆也可以被视为一个智能体, Wooldridge 等<sup>[202]</sup>在 1995 年提出智能体应该具有以下属性。

(1)自治性:智能体可以在没有人类直接干涉的情况下进行运作,并自主地控制其行为和内部状态。

(2)社会性:智能体可以与其他智能体(或人类)通过特定语言进行交互。

(3)反应性:智能体可以感知周围的环境,并及时响应其中发生的变化。

(4)主动性:智能体不只是简单地对环境做出反应,同时也能够主动地表现出目标导向的行为。

作为拥有上述属性的一类智能体,自动驾驶车辆在开发与设计过程中,需要进行充足的测试与评价,以验证车辆足够智能,从而能替代人类完成各项驾驶任务。首先需要明确车辆智能性的概念与内涵。目前,基于上述人工智能的定义和智能体的属性,结合自动驾驶车辆具体的运行环境和行驶任务,不少学者从车辆自动驾驶能力与性能两方面对自动驾驶智能性的概念进行了阐述。

#### 6.1.1 车辆自动驾驶能力

车辆自动驾驶能力是指车辆在行驶过程中能够代替驾驶人所完成的驾驶任务,对应智能体属性<sup>[202]</sup>的自治性、反应性与主动性。基于对驾驶人具体驾驶任务的划分, Li 等<sup>[200]</sup>认为自动驾驶车辆的智能性是指车辆自主完成感知识别与决策规划,并采取行动的能力; Huang 等<sup>[203]</sup>认为智能性是无人系统为了能够完成所分配的目标所具有的综合感知、认知、分析、沟通、计划、决策和执行等能力; Nagai 等<sup>[204]</sup>认为自动驾驶车辆的智能性体现在车辆可以自适应地根据环境风险确定辅助驾驶级别,并能实现兼顾车辆动力学特性的控制性能; Payalan 等<sup>[205]</sup>综述了 ADAS 系统的能力与面临的挑战,并提出针对下一代车辆的智能性定义,即车辆智能性是指车辆基于传感器、车辆自组网、大数据基础设施等特定任务模块和服务,对自身的安全、舒适、娱乐和能耗负责的能力。

与上述研究不同,美国的 SAE J3016 与中国的《汽车驾驶自动化分级》(GB/T 40429—2021)从整体驾驶任务层面出发,根据车辆对完整动态驾驶任务的执行能力来描述自动驾驶智能性,并将车辆驾驶自动化水平划分为 0~5 共 6 个等级。中国国家标准化管理委员会分别从动态驾驶任务的完整性与

持续性、纵向或横向运动控制的持续性、纵/横向控制的同时性、能否自动执行最小风险策略与是否存在设计运行范围共 6 个要素对车辆驾驶自动化水平进行划分。

#### 6.1.2 车辆自动驾驶性能

车辆自动驾驶性能是指车辆在完成驾驶任务时的表现,对应智能体属性的社会性、主动性与自治性。自动驾驶车辆的各类内部能力,如感知认知、决策规划、控制执行等,最终将会被统一到整车层面,以支撑车辆完成驾驶任务,因此,通过车辆外部性能表现能完整与综合地理解自动驾驶智能性的含义。本文将自动驾驶车辆的性能分为体现智能性的基本性能与高阶性能。

体现智能性的基本性能由传统车辆性能拓展得到。对于传统车辆,安全性、舒适性与经济性是衡量车辆性能的 3 个重要维度。其中,安全性包括了车辆的被动安全性能、制动性能和操纵稳定性等;舒适性包含了车辆的平顺性、振动和噪声性能等;经济性主要指车辆的燃油经济性。对于自动驾驶车辆,由于驾驶任务的行为主体由人类变成了智能系统,对车辆的考察由原来的驾驶人视角(即车辆好不好开)变成了乘员视角(即车辆开得好不好),因此,安全性、舒适性与经济性被赋予了新的涵义,以体现车辆的智能性。在安全性方面,智能性主要体现在如车辆避撞性能和危害减轻能力等的主动安全性能上<sup>[206]</sup>;在舒适性方面,由于自动驾驶车辆具有更出色的运动控制和车间协同能力,与自然驾驶行为差异较大,往往会引起乘员的不舒适感<sup>[207]</sup>,因此,智能性也体现在车辆驾驶行为与乘员期望的一致性以及不让乘员产生失控感的能力<sup>[208]</sup>;此外,与传统车辆经济性对应,除了能耗效率,车辆在规定时间内高效率地完成既定驾驶任务的时间效率也是自动驾驶智能性的重要体现,因此,可将能耗效率与时间效率统称为自动驾驶车辆的高效性。目前,已有不少学者针对自动驾驶车辆,围绕安全性、舒适性与高效性展开了研究,表 8 从开发设计和测试评价 2 个角度汇总了研究自动驾驶车辆基本性能的典型文献。

作为智能体,自动驾驶车辆还具有高阶性能。结合 Wooldridge 等<sup>[202]</sup>所提出的智能体的属性,不少学者提出自动驾驶智能性也体现在尽可能少的人工干预<sup>[203]</sup>、优秀的人机交互性与学习性以及与其他交通参与者良好的交互质量上<sup>[209]</sup>。Meng 等<sup>[210]</sup>综合考虑智能性的各维度,提出了行驶自治性、社会合

表 8 自动驾驶车辆安全性、舒适性与高效性研究  
Table 8 Research on safety, comfort and efficiency of autonomous driving vehicles

| 角度       | 安全性 | 舒适性 | 高效性 | 相关文献        |
|----------|-----|-----|-----|-------------|
| 开发<br>设计 | ✓   |     |     | [211]、[212] |
|          |     | ✓   |     | [213]       |
|          |     |     | ✓   | [214]       |
|          | ✓   | ✓   |     | [215]       |
|          | ✓   |     | ✓   | [216]、[217] |
| 测试<br>评价 | ✓   |     |     | [218]       |
|          |     | ✓   |     | [219]       |
|          |     |     | ✓   | [220]       |
|          | ✓   | ✓   |     | [221]       |
|          | ✓   |     | ✓   | [222]       |
|          | ✓   | ✓   | ✓   | [200]       |

作性和学习进化性的自动驾驶智能性评价框架。其中,行驶自治性是指车辆在没有人工干预的情况下,自主且高质量地完成驾驶任务的能力,是车辆本体智能性的体现;社会合作性是车辆对交互趋势的预判能力与对交互行为的实施能力,用来刻画车辆智能性中的社会合作能力<sup>[223]</sup>;学习进化性是指自动驾驶车辆随驾驶时间累积演化出的复述重现和泛化迁移的能力,是自动驾驶车辆智能性在时间维度上的体现。图 20 总结了从车辆自动驾驶能力和性能两方面考虑的自动驾驶智能性概念框架。

## 6.2 场景复杂度的量化与评估(马依宁、陈君毅、熊璐)

车辆自动驾驶能力与性能是讨论自动驾驶智能性的 2 个重要维度。然而,这 2 个维度均是从车辆自身角度出发,想要全面地对自动驾驶智能性做出评价还需考虑车辆所处外部场景的复杂度。在自动

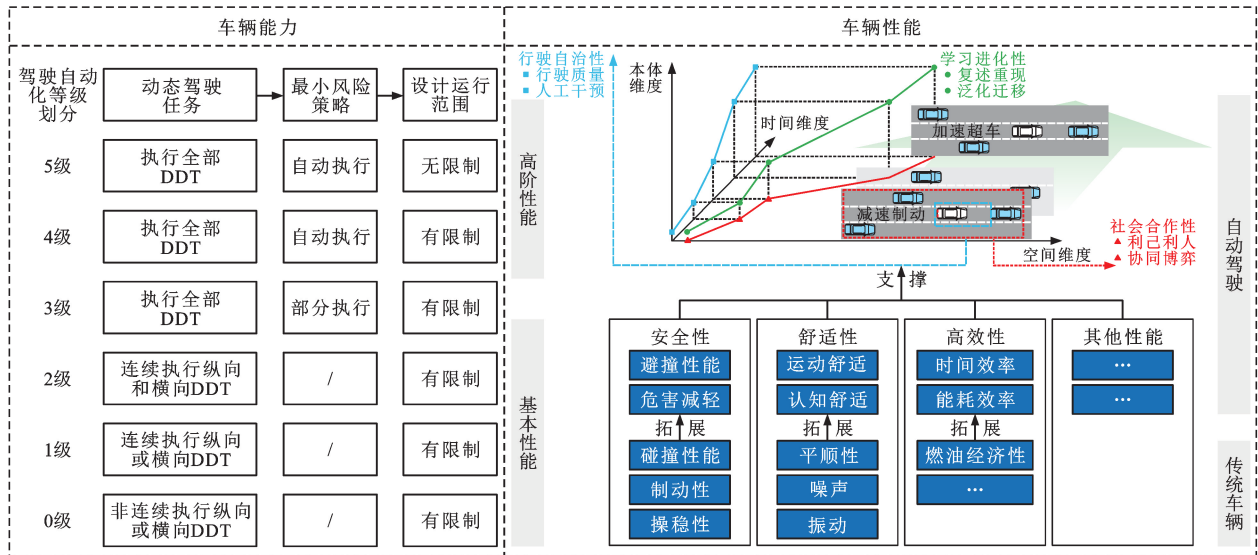


图 20 自动驾驶智能性概念框架

Fig. 20 Conceptual framework of autonomous driving intelligence

驾驶的测试与评价研究中,测试场景决定了大部分驾驶任务,因此,对场景复杂度进行量化可作为自动驾驶系统智能性评价的重要指标之一。高复杂度的测试场景有助于暴露出被测系统各项性能的缺陷<sup>[224]</sup>,当一个被测系统在高复杂的测试场景中各项性能表现十分优秀时,证明该系统的智能度较高<sup>[225]</sup>。如图 21 所示,在对自动驾驶智能性进行量化与评估时,可以借助对输入(场景复杂度)的评估和对输出(性能表现)的评估,实现对车辆智能性的评价。

本节内容对场景复杂度的定义和量化方法进行综述。量化方法的研究既可以用于设计不同复

杂度的受控场景,以提高测试效率,也可以对非受控的测试场景进行评估,从而支持对被测系统的智能性评价。

### 6.2.1 场景复杂度的定义

在科学研究领域中,不同的学科背景下复杂度的定义有所区别。通过文献调研和分析,发现学者们主要从以下 2 个角度对复杂度的概念进行了定义或解释:(1)从系统内部构成来描述复杂度。如 Xing 等<sup>[226-227]</sup>回顾了几个研究领域(通讯概念、信息复杂性、认知复杂性和显示复杂性)的文献,总结出这些领域对复杂度定义的共同之处都主要集中在 3 个因素上,即系统中基本元素的数量大小、元素的

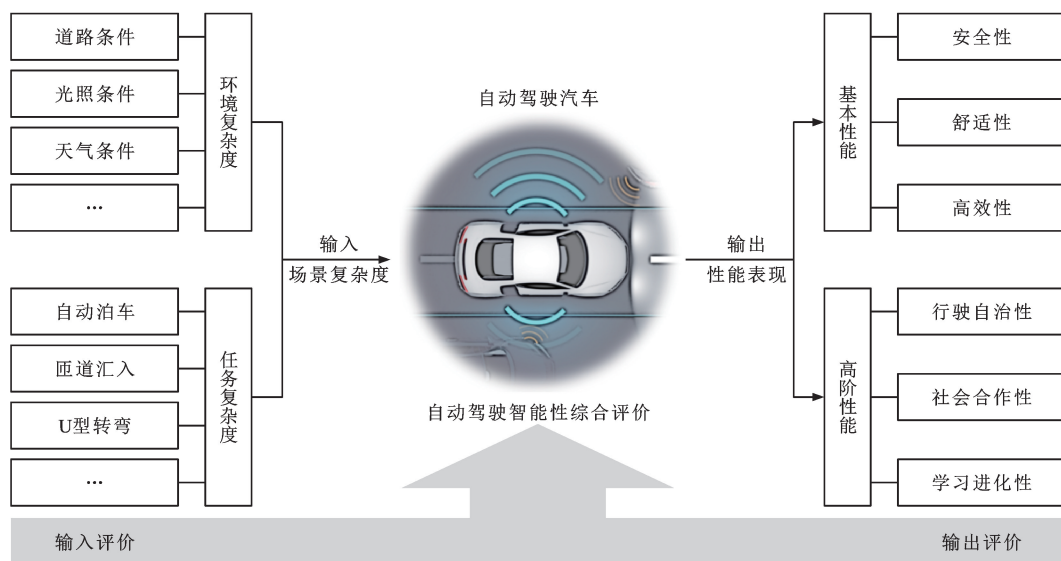


图 21 基于场景复杂度的车辆智能性评价体系

Fig. 21 Vehicle intelligence evaluation system based on scenario complexity

种类和元素之间的关系。(2)从系统外部来观测复杂度。如在信息理论的研究中,Kolmogorov 复杂度被认为是用某种语言来描述的最短的长度<sup>[228]</sup>。在拓扑研究领域中,Crutchfield 等<sup>[229]</sup>在 Kolmogorov 的基础上对复杂度定义进行了拓展,认为复杂度可以被定义为在指定的公差范围内,一个系统的模型能够基于统计来再现观测数据的极值大小。

在智能交通领域的研究中,Sussma<sup>[230]</sup>从内部构成描述复杂的交通系统“由一组相关单元(子系统)组成,这些单元(子系统)之间关系的程度和性质尚不完全清楚,它们整体的行为是难以预测的”,该研究所提到的“子系统”在自动驾驶领域可以被理解为场景中不同的交通要素,即交通要素的预测难度可用于描述交通系统的复杂程度;在此基础上,Ma 等<sup>[231]</sup>将自动驾驶车辆在相关环境和驾驶任务下的复杂度定义为场景信息在被感知、认知和预测过程中不确定性的总和;从外部观测的角度来说,Zhang 等<sup>[232]</sup>根据场景中交通参与者观测的可行驶区域面积来刻画由动态交通参与者构成的场景复杂度。

#### 6.2.2 场景复杂度量化方法

从内部构成的角度来量化复杂度的研究中,有学者试图从度量场景内部要素的影响来量化场景的复杂度,其中最常用的方法是本体论结合层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)。此类研究首先基于本体论方法对场景中不同要素进行分类,然后基于 AHP 对各类要素的影响系数进行量化,影响越大则复杂度越大。

在从观测场景的外部表现上来量化复杂度的研究中,Boelhouwer 等<sup>[233]</sup>通过在线调查获得场景中基础设施和交通因素的复杂度,计算场景的整体复杂度;Liu 等<sup>[234]</sup>首先将场景复杂度细分为三方面,即驾驶场景属性、周围车辆信息和先验环境知识,然后采用随机森林算法对观测到的场景信息进行复杂度分类。通常来看,动态复杂度相对静态复杂度来说更加复杂,Zhang 等<sup>[232]</sup>提出了一种计算动态交通参与者可行区域面积的方法,并结合信息熵<sup>[235]</sup>的概念量化了场景中动态复杂度;Liu 等<sup>[234]</sup>使用环境信息对驾驶场景进行复杂程度分类;Mueller 等<sup>[236]</sup>在评价行驶场景对驾驶人反应的影响时,将行驶场景复杂度量化为驾驶人执行的驾驶任务的难度;Wang 等<sup>[237]</sup>提出了一种基于量化每个路段复杂度的交通感知数据分类范式,包含了交通要素复杂度和道路语义复杂度,分别由主观定量评估和基于支持向量回归(Support Vector Regression, SVR)的预测得到。

通过对比以上研究发现,大多数的场景复杂度量化方法都源于主观评价,特别是基于内部构成描述复杂度的研究,量化方法全部含有主观评价。而从场景外部定义复杂度的研究中,Zhang 等<sup>[232]</sup>采取了纯客观方法量化复杂度,因此,可以分析得出复杂度定义的视角与量化方法的主/客观有一定的关系。此外,要素数据获取的视角也存在一定差异。基于车外第三方视角获取数据来量化场景复杂度是主流研究手段,而基于自车视角获取数据的研究则相对较为少见。以上结果总结如表9所示:●为天气环

表 9 自动驾驶测试场景中复杂度的量化方法

Table 9 Quantitative methods of complexity in autonomous driving testing scenarios

| 复杂度定义视角                  | 量化方法                          | 主/客观  | 量化要素    | 数据获取视角 | 文献    |
|--------------------------|-------------------------------|-------|---------|--------|-------|
| 基于场景内部<br>构成描述并<br>量化复杂度 | Multi-Factor Analysis, Survey | 主观    | ● ★ ◆   | 车外     | [231] |
|                          | AHP                           | 主观    | ■ ◆     | 车外     | [195] |
|                          | Ontology, AHP                 | 主客观结合 | ◆       | 车外、自车  | [238] |
|                          |                               | 主客观结合 | ▲ ★     | 车外、自车  | [238] |
| 基于场景外部<br>观测定义并<br>量化复杂度 | SVR                           | 主客观结合 | ● ■ ◆   | 车外     | [235] |
|                          | Survey                        | 主观    | ● ■ ◆   | 车外、自车  | [234] |
|                          | Random Forest                 | 主客观结合 | ● ◆     | 自车     | [236] |
|                          | NASA-TLX Surveys              | 主客观结合 | ● ★ ■   | 自车     | [237] |
|                          | Drivable Area, Entropy        | 客观    | ● ▲ ★ ◆ | 车外     | [232] |

境;▲为道路设施;★为交通环境;■为动态交通参与者;◆为自车驾驶属性。

### 6.3 自动驾驶智能性多维综合评价体系(蒙昊蓝、邢星宇、陈君毅、余卓平)

传统车辆评价指标主要关注车辆本身的动力学性能,对自动驾驶车辆仍然适用。针对自动驾驶车辆的智能性,需要建立一套新的系统性评价体系,以满足自动驾驶车辆在开发与认证过程中的评价需求。针对该问题,学界和产业界均进行了探索和研究,试图对自动驾驶车辆的智能性进行阐述并建立相应的评价指标体系。目前,国内外对自动驾驶车辆智能性评价的研究主要分为两类:一类是第三方

机构主导的智能车竞赛,根据比赛目的设计了评价体系和评分机制;另一类是由各类科研机构开展的理论研究,基于不同的评价理论和方法对自动驾驶车辆的综合表现进行了分析。

对车辆智能度评价的早期探索以无人车比赛为主,如美国国防高级研究计划局主导的无人车挑战赛与中国自然科学基金委员会组织的中国智能车未来挑战赛等。比赛一般在预先规定的道路或区域内进行,通过人为构建的模拟交通环境,并指定车辆需要完成的行驶任务,对无人车辆的智能度进行考察。各类比赛中对自动驾驶车辆智能度评价的方法如表 10 所示。

表 10 不同比赛中自动驾驶车辆智能度评价方法对比

Table 10 Comparison of intelligence evaluation methods of autonomous driving vehicles in different competitions

| 比赛/项目           | 国家 | 首届时间   | 考察功能或性能         | 指标                             |
|-----------------|----|--------|-----------------|--------------------------------|
| Percept OR      | 美国 | 2001 年 | 自主行为能力          | 自主行驶里程、任务耗时、行驶速度、人工干预次数、任务失败次数 |
| Grand Challenge | 美国 | 2004 年 | 自主行为能力          | 行驶里程、完成时间                      |
| Urban Challenge | 美国 | 2007 年 | 自主行为能力和部分交互能力   | 任务完成时间、完成质量、违反交通规则、危险行为        |
| 智能车未来挑战赛        | 中国 | 2009 年 | 安全性、舒适性、敏捷性、智能性 | 完成任务总时间、任务完成质量、人工干预次数          |
| 自动驾驶车辆挑战赛       | 中国 | 2018 年 | 智能性、安全性、人机交互、能效 | 任务完成时间、任务完成度、人工干预次数            |

各类自动驾驶车辆比赛的核心是比赛过程中设置的任务,并由车辆完成任务的各项指标对自动驾驶进行评价。总体而言,各类比赛核心围绕自动驾驶车辆的自主行为能力、交互能力与学习能力展开评价,反映了业界对自动驾驶车辆的一般要求。

为了能够更准确地描述智能性的表现,一些研究机构对评价理论和方法进行了研究。早期的自动驾驶车辆测试与评价主要是基于单一功能与场景,随着技术的进步,对于自动驾驶车辆的评价逐渐向复杂化、集成化发展。在对自动驾驶车辆评价研究进程中,不少研究吸收了 ALFUS 无人系统自动级别框架对于广义的无人系统的评价经验。在此启发

下,先后出现了多种评价方法,主要分为基于里程的评价和基于场景的评价两类,整体包含了车辆控制行为、行车行为、交通行为等评价指标体系,如表 11 所示。

其中基于里程的评价与各类无人车比赛类似,仍注重被评价对象的整体完成情况;基于场景的评价则根据具体场景的特点设计评价目标,针对性更强。为了克服基于单个场景的评价场景依赖性强、方法外推性较弱的缺点,同济大学的研究团队结合智能主体的概念率先提出了一种从车辆自身、空间和时间维度共同评价自动驾驶车辆行驶智能度的主客观评价框架。该框架涵盖了自动驾驶车辆作为

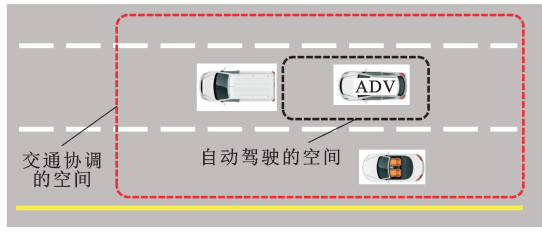
表 11 不同研究中自动驾驶车辆智能度评价方法对比

Table 11 Comparison of intelligence evaluation methods of autonomous driving vehicles in different studies

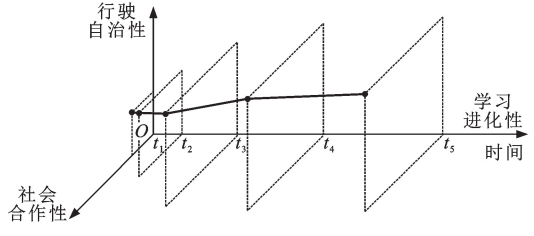
| 来源                           | 机构                            | 评价目标/准则/指标                                            | 类型   |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|------|
| Lowrie 等 <sup>[239]</sup>    | 马里兰大学                         | 总行驶里程、人工控制行为、人工干涉率等                                   | 基于里程 |
| Pomerleau 等 <sup>[240]</sup> | 卡内基梅隆大学                       |                                                       | 基于里程 |
| Broggi 等 <sup>[241]</sup>    | 帕尔马大学                         |                                                       | 基于里程 |
| Maurer 等 <sup>[242]</sup>    | 慕尼黑国防大学                       |                                                       | 基于里程 |
|                              | 美国国家标准与技术研究院 <sup>[243]</sup> | 人工干预度、环境复杂度、任务复杂度                                     | 基于里程 |
| Wang 等 <sup>[244]</sup>      | 中国科学院沈阳自动化研究所                 | 感知技术、导航技术、人机交互、信息通讯技术、路径规划技术、多平台协同技术、运动控制技术、任务规划、学习适应 | 基于场景 |
| Sun 等 <sup>[245]</sup>       | 北京理工大学                        | 车辆控制行为、基本和高级行车行为、基本和高级交通行为                            | 基于场景 |
| 蒙昊蓝等                         | 同济大学                          | 行驶自治性、社会合作性、学习进化性                                     | 基于场景 |

一种智能主体所应该具有的行驶自治性、社会合作性和学习进化性 3 种特性,图 22 从个体、空间和时间 3 个维度共同囊括了现有的评价研究所涉及的各

种评价目标,使评价体系不再依赖于特定场景,图中坐标轴上  $t_1 \sim t_5$  分别代表了车辆在随时间学习进化过程中的观测时间点。



(a) 行驶自治性和社会合作性



(b) 行驶自治性、社会合作性和学习进化性

图 22 自动驾驶车辆的行驶自治性、社会合作性和学习进化性

Fig. 22 Driving autonomy, social cooperation and learning evolution of autonomous driving vehicles

针对不同的评价维度,需要进一步选取评价指标。如对自动驾驶车辆的行驶自治性来说,可以由安全性、舒适性和高效性等几类指标构成对行驶质量的评价。根据量化程度,评价指标可分为计量指标和非计量指标(定性指标),其中计量指标的数值一般通过测试结果计算与分析得到<sup>[246]</sup>,非计量指标的数据主要来源于专家主观评价。非计量指标的结果直接反映了人类知识与经验,可信度更高,但量化程度低。

评价方法是指通过集结模型对评价指标进行计算,得出综合评价结果。集结模型可以通过主观、客观或组合的方法得到,从而体现各指标对最终评价结果的影响程度或评价主体对不同指标的重视程度。常用的评价方法包括模糊综合评价法、灰色关联度法、神经网络法、加权算术平均法和 TOPSIS 方法等。

6.4 社会合作性评价方法(蒙昊蓝、陈君毅、余卓平)

随着技术与产品的不断升级和普及,未来将存在越来越多的自动驾驶车辆与人类驾驶车辆混合行驶在道路上的情况,这将对道路交通系统产生巨大的影响。在完全由人类组成的交通环境中,虽然不同的驾驶人驾驶风格迥异,但其对交通

环境的感知机理、交通场景的理解能力、风险判别机制、协同与博弈决策机制和车辆的控制能力等都是同质且近似的,因此,在共同遵守交通法规这一底线的前提下,由各交通参与者构成的道路交通系统是处于一种较为平衡的状态。然而,自动驾驶车辆与驾驶人在上述方面存在明显差异,这种差异将使得自动驾驶车辆与现行道路交通参与者互不适应,在局部交通系统中产生合作困境,可称之为社会合作性问题。

社会合作性指自动驾驶车辆在完成行驶任务的过程中,在满足交通规则约束和不发生碰撞的前提下,使得自车行驶收益和周围交通收益总体最大化的能力。这将是自动驾驶车辆在开放道路行驶时应具备的重要能力之一,缺失该能力将导致自动驾驶车辆难以融入自然交通系统。尤其在交通规则约束较弱的行驶场景中,该能力的高低决定了自动驾驶车辆融入自然交通的表现优劣。建立针对自动驾驶车辆的社会合作性评价方法愈发受到行业重视,其测试场景、评价体系与测试中的背景车模型等重要组成部分均有相关研究开展。

社会合作性评价方法研究的关键是解析社会合作性属性,以指导测评场景的选取和评价体系的构建。在交通领域中,社会合作性主要是针对交通流设计利益函数,如效率、安全事故率、通行能力等大尺度交通系统的整体通行状态。在汽车领域,社会合作性主要体现在车辆通过预测他车行为,实施利益最大化的行驶策略。学者们分别从十字路口、环岛、匝道等场景入手,通过建立利益函数、博弈模型、成本函数等方法,研究车辆交互决策。

在场景方面,各研究中的如路口、环岛、匝道等场景存在车辆间行驶轨迹冲突的共同点。为了获取适用于社会合作性评价的场景,有学者以匝道汇入场景为例,基于自然驾驶数据分析,通过定义车辆交互过程中的初始状态、驾驶动作和交互性能等三方面指标(图 23),聚类分析了典型的逻辑场景,认为当场景的轨迹冲突越不剧烈,可交互空间越大时,车辆行为有越好的多样性<sup>[247]</sup>。

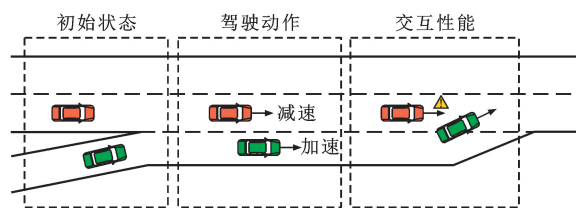


图 23 匝道汇入场景

Fig. 23 On-ramp scenario

在评价体系方面,各研究集中关注车辆交互行驶时的行为及其对一定范围的交通系统产生的影响。通过设计过程成本、舒适成本、安全成本和燃油消耗成本函数,Wei 等<sup>[248]</sup>评估了自动驾驶车辆的社会合作行为,对自动驾驶策略进行择优;Letter 等<sup>[249]</sup>从效率维度通过总行驶时间、平均速度、单位距离行驶时间来评估车道合并时的驾驶策略;Ntousakis 等<sup>[250]</sup>从舒适性维度通过速度、加速度、加速度变化率来比较纵向轨迹规划结果;Parmar 等<sup>[251]</sup>从效率和能耗维度利用燃油消耗量、总行驶时间评估了车道合并场景的控制策略。综合不同的评价维度,同济大学的研究团队将社会合作性的评价归纳为利人、利己 2 个评价角度,通过全局、自车、他车 3 个评价视角,进行了专家评价,并在此基础上设计了涵盖效率、能耗和舒适性等维度的评价体系,运用神经网络构建了主客观映射评价模型<sup>[252]</sup>。

除场景和评价体系外,背景车模型是将评价方法落实到测评工作过程中的重要测试工具。传统的测试目标按既定轨迹运动,可重复性高,自主性弱;以 IDM 模型为代表的跟驰模型具有一定的

纵向交互能力,临车道的车辆不对其产生影响;基于机器学习算法的驾驶行为模型,可通过类人决策实现多种驾驶风格或行为动机。3 类模型的特点如表 12 所示。

表 12 背景车模型的分类与优势分析

Table 12 Classification and advantage analysis of background vehicle models

| 控制方式    | 既定轨迹    | 跟驰模型    | 驾驶行为模型          |
|---------|---------|---------|-----------------|
| 可解释性    | 参数化、可解释 | 参数化、可解释 | 无解析表达           |
| 状态空间复杂度 | 极低      | 低、确定性   | 高、概率性           |
| 交互能力    | 无       | 纵向      | 纵向、侧向           |
| 优势      | 完全可重复性高 | 可解释性较强  | 类人决策实现多种驾驶风格或动机 |

与传统的自动驾驶车辆测评不同,社会合作性的测评中对手车既需要同时具备纵向和侧向的自主交互能力,又需要具备可解释性和可重复性,可应用于标准化测评的模型有待进一步研究。

在相关标准方面,行业内已有针对智能网联汽车交通和谐性的测试与评价团体标准发布。如上海市交通运输行业协会发布了智能网联汽车匝道场景交通和谐性测试与评价方法,其内容以高速公路具有加速车道的匝道汇入场景为例,对测试与评价流程、测试场景及测试评价提出了要求。

## 6.5 总结与展望

综上所述,伴随自动驾驶技术的发展,国内外对自动驾驶车辆智能性评价的研究均已取得了一定进展。虽各研究中由于对智能性内涵的理解不同使得评价方式存在差异,但共同点均在于从外在行为表现阐述自动驾驶车辆的智能性。通过设定评价目标,指定评价指标及其权重,并选用合适的集结模型,对自动驾驶车辆的性能进行评价。未来自动驾驶车辆智能性评价的发展趋势可以从以下三方面展开讨论。

(1)在场景复杂度的研究中,学者们基于不同视角对复杂度进行了定义和量化评估,量化结果可作为评价自动驾驶系统智能性的指标之一。在自动驾驶测试场景的复杂度定义方面,目前的研究主要是围绕场景内部的要素和属性来定义复杂度概念。未来对测试场景复杂度的定义需要进一步明确,不但可以从外部观测的角度上衍生出更多元的定义,还可采取内外视角结合的方式对场景复杂度进行综合定义。在量化方法方面,场景中多类元素复杂度的关系往往是耦合且互相影响的,然而目前多数研究在量化要素间关系时将其简化为加法,可能导致量化结果不准确,因此,在要素间复杂度的计算关系上

还需要进一步探索和验证。

(2)深入分析发现,大部分针对智能性的评价研究,主要涉及智能性的一部分表现,如自主行为能力等,主要体现任务完成度;另一方面,如何使基于场景的评价方法不依赖于具体场景,增强其方法的外推性是一种趋势。在未来的研究中,遵循某一理论依据对评价体系进行归纳,从更高维度的智能性行为出发,涵盖自动驾驶车辆应该具有的所有特性,有待深入探索。

(3)整体而言,社会合作性是自动驾驶车辆智能度主客观综合评价理论中空间维度的具体表征,其优劣会对自动驾驶车辆的易用性和社会接受度产生直接影响,决定了自动驾驶车辆能否经由人机混合交通阶段的过渡到大规模的自动驾驶

交通。这一属性的提出为自动驾驶车辆融入现有的交通环境提供了明确的设计目标,其测评方法还有待进一步实践。

7 自动驾驶测试评价工具链与体系方法

本节主要综述了自动驾驶测试评价工具链,介绍了自动驾驶测试评价标准体系现状,主要包括测试评价工具链、自动驾驶测试评价体系、自动驾驶测试标准三方面。

7.1 测试评价工具链(杨澜、李仕杰)

现有的自动驾驶测试评价工具链一般以虚拟测试工具为主,主要是 OEM、Tier 等企业提供的仿真平台,可实现 VIL/HIL/MIL 等工具的系统集成,如表 13 所示。

表 13 各国自动驾驶测试工具链集成方案

Table 13 Tool chain integration schemes for autonomous driving test in various countries

| 序号 | 名称                                                         | 国家 | 合作单位                      | 特征                                                                  |
|----|------------------------------------------------------------|----|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1  | Test Bed Lower Saxony for Automated and Connected Mobility | 德国 | 德国航天中心、德国交通部、德国西门子、大众、沃尔沃 | 覆盖城乡、高速公路等多种道路,支持硬件、软件、驾驶人与车辆在环测试工具的自动驾驶测试系统                        |
| 2  | VTD                                                        | 美国 | 德国 VIRES                  | 提供复杂交通场景与物理驱动模拟,包含软硬件、驾驶人与车辆在环的测试环境                                 |
| 3  | ASAM OpenX                                                 | 德国 | ASAM                      | 提供驾驶和交通模拟器界面,包含用于验证自动驾驶功能的静态和动态内容                                   |
| 4  | Drive Sim/Drive Constellation                              | 美国 | 英伟达                       | 围绕车端、桌面端、云端构建了 GPU 硬件统一架构和 CUDA 软件架构,为自动驾驶应用领域提供支持                  |
| 5  | Apollo                                                     | 中国 | 百度                        | 包括完整的软硬件和服务系统,包括车辆平台、硬件平台、云端数据服务等;场景库包括了法规标准场景、危险工况场景和能力评估场景共 200 种 |
| 6  | 华为八爪鱼 (HUAWEI Octopus)                                     | 中国 | 华为                        | 在数据采集、数据挖掘、数据标注、算法训练、仿真平台等方面提供完整解决方案,包含大量数据集和场景库                    |
| 7  | TAD Sim                                                    | 中国 | 腾讯                        | 通过工业级车辆动力学模型、虚实结合等技术打造虚实结合、线上线下一体的自动驾驶仿真平台                          |

Test Bed Lower Saxony for Automated and Connected Mobility 项目是由德国航天中心、德国交通部、德国西门子、大众和沃尔沃联合搭建,用于自动驾驶车辆在开发与验证过程的自动化和网联化测试<sup>[253]</sup>,包括多种道路类型,形成了包含硬件、软件、驾驶人与车辆在环测试工具的自动驾驶测试工具链。工具链各个工具以集成方式被调用,同时以最佳方式将虚拟测试环境和真实测试环境结合开展数字孪生测试,实现高效、灵活、开放的集成测试。

VTD 可应用于汽车主动安全、无人车半实物测试的实时复杂交通场景生成(含雷达、红外、摄像头等传感器成像)与汽车驾驶模拟器开发中的交通视

景展示。同时,该系统也应用于工业等视景系统的实时仿真,包括道路网建模、天气和环境模拟、交通场景建模、交通声效模拟、场景仿真管理与高精度的实时画面渲染。

ASAM OpenX 用于解决仿真测试中各环节的数据、接口格式等不统一带来的问题<sup>[73]</sup>。对测试场景、驾驶动作、判断条件进行描述,OpenDRIVE 对应静态地图场景,OpenSCENARIO 对应动态行为场景,将这些信息输入到模拟环境之中,搭建仿真场景。

英伟达公司围绕车端、桌面端、云端构建了 GPU 硬件统一架构和 CUDA 软件架构,发布了自动驾驶平台 NVIDIA DRIVE<sup>[254]</sup>。平台搭配了自研

的软件架构 Drive AV 和 Drive IX。在仿真领域,英伟达推出 Drive Constellation 仿真系统和 Drive Sim,由 2 台不同的服务器打造,分别用于生成虚拟行驶车辆与产生传感器信号和处理仿真所得的传感器数据。

百度的 Apollo 通过车辆平台、硬件平台、软件平台、云端数据服务等四大部分,可以快速搭建一套自动驾驶系统,提供了完整的软硬件解决方案和服务系统。Apollo 与 Unity 合作开发了基于 Unity 引擎的虚拟仿真环境,通过模拟交通流来增强现实世界图像,以创建逼真的仿真场景。

在云服务方面,华为与腾讯也在着手研究云生态开发系统。华为推出了自动驾驶云服务 HUAWEI Octopus。该系统集成了云端训练和云端并行仿真,具有丰富的仿真场景与高并发实例处理能力,提供超过 20 万个仿真场景实例,每日虚拟测试里程可超过 1 000 万公里,支持 3 000 个实例并发测试。系统从数据采集、数据挖掘、数据标注、算法训练、仿真平台、数据集和场景库等方面提供了完整的自动驾驶测试解决方案。

腾讯发布了 TAD Sim 仿真平台,结合专业的游戏引擎、工业级车辆动力学模型、虚实一体交通流等技术,打造虚实结合、线上线下一体的自动驾驶仿真平台,可以实现场景的几何还原、逻辑还原与物理还原。TAD Sim 支持云端运行,包括场景型云仿真和虚拟城市型云仿真 2 种模式,可以实现加速仿真和高并发仿真,能够满足真实世界中各种场景和驾驶的可能性,加速自动驾驶测试进程。

测试工具是自动驾驶测试体系的基础,目前不同测试工具之间存在定义不明确、接口不统一、内容不完善等问题,导致了工具之间的协调性差,难以相互衔接,不利于测试体系的构建,因此,为了加快自动驾驶标准化测试周期,亟需进一步明确各仿真测试工具的测试内容,确定各工具测试边界,统一各测试平台输入输出接口,形成各测试工具之间的数据共用,增加测试工具之间的协调性,实现自动驾驶标准化测试流程和测试规范,加快构建完善的自动驾驶测试工具链和测试体系。

## 7.2 自动驾驶测试评价体系(杨澜、何泽宇)

自动驾驶测试评价体系是自动驾驶工具链上非常关键的环节。在工业界,传统的自动驾驶开发测试流程采用 V 型开发流程,包括了设计开发流程和测试验证流程两阶段。设计开发流程以基于模型设计(Model-Based Design, MBD)为主,主要基于

MATLAB 和 Simulink 搭建,测试验证流程则是在不同阶段采用不同的测试方法实现。随着自动驾驶系统与交通环境的愈发复杂,传统的 MBD 不能够满足测试需求,亟待建立具有系统性、科学性、有效性的自动驾驶车辆测试评价方法。通过分析自动驾驶关键技术、安全特性与自动驾驶对测试评价方法的新需求,国际汽车组织提出了包括实际道路测试、封闭场地测试和包含仿真测试的审核评估的自动驾驶车辆“三支柱”测试评价方法<sup>[255]</sup>。联合国自动驾驶评价与管理办法非正式工作组提出了一种包含场景目录、仿真测试、封闭场地测试、实际道路测试、审核评估和在用监测报告等技术手段的测试评价方法。工信部也在逐步明确智能网联汽车在产品过程保障和测试评价等方面的要求,推动智能网联汽车准入管理研究。

2013 年以来,世界各国的政府、车企和零部件商开展了相关研究,如表 14 所示,Waymo、Cruise 和 PEGASUS 侧重于使用虚拟仿真测试,模拟多种行车环境,加速测试进程。AdaptIVe 项目和宝马公司(BMW)分别通过实车测试、虚拟仿真测试结合实车测试的方法对特定等级自动驾驶车辆进行测试验证工作。日本丰田研究所(TRI)通过开放道路测试验证不同等级驾驶模式下自动驾驶车辆安全性。2018 年后,中国的自动驾驶车辆测试评价相关项目也逐渐启动。阿里巴巴达摩院和交通部联合成立的车路协同联合实验室通过开放道路测试致力于自动驾驶与道路的智能化管理。中国科学院自动化研究所、腾讯和百度通过虚拟仿真测试结合实车测试的方式来提升测试效率,降低测试成本,加速自动驾驶车辆落地。长安大学牵头主持了中国“十四五”规划下第一个自动驾驶测试重点研发计划“自动驾驶仿真及数字孪生测试评价工具链”。

与此同时,一些高校、科研院所对自动驾驶车辆的测试评价体系进行了相关研究。清华大学苏州汽车研究院联合 51VR 等发布的自动驾驶仿真蓝皮书《中国自动驾驶仿真技术研究报告(2019)》提出了一种仿真测试评价体系,从驾驶安全性、驾驶舒适性、交通协调性和标准匹配性四方面对自动驾驶车辆进行测试评价;赵祥模等<sup>[166,256]</sup>提出一种整车在环仿真的自动驾驶车辆室内快速测试平台,能够快速测试自动驾驶车辆智能感知与行为决策等性能指标,在后续的研究中又提出了一种基于多自由度转鼓平台的自动驾驶整车在环虚拟仿真测试平台,并通过自动驾驶车辆自适应跟驰和碰撞场景测试验证了

表 14 各国自动驾驶测试评价相关项目  
Table 14 Projects related to autonomous driving test and evaluation in various countries

| 序号 | 项目/机构           | 国家 | 时间     | 方法                            | 核心                                            | 测试目标                                                                               | 测试工具                                                        |
|----|-----------------|----|--------|-------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1  | Waymo           | 美国 | 2013 年 | 虚拟仿真测试                        | 模拟各种复杂路况                                      | 提升测试里程数与加速测试                                                                       | 基于 Carcraft 的虚拟仿真测试                                         |
| 2  | AdaptIVe        | 欧洲 | 2014 年 | 面向 L2 级以上<br>实车测试             | 侧重于用户体验<br>相关指标的研究                            | 研究车载传感器与<br>车对车互联、V2X                                                              | 开放道路测试                                                      |
| 3  | Cruise          | 美国 | 2016 年 | 虚拟仿真测试                        | 现实场景转化到可以<br>编辑的虚拟场景                          | 推进 L4 级自动驾驶车辆<br>测试                                                                | 基于 Morpheus 的<br>虚拟仿真测试                                     |
| 4  | PEGASUS         | 德国 | 2016 年 | 虚拟仿真测试                        | 通过虚拟仿真环境对<br>自动驾驶技术进行<br>测试和验证                | 提高自动驾驶车辆安全性                                                                        | 基于研发的虚拟<br>仿真软件                                             |
| 5  | BMW             | 德国 | 2017 年 | 面向 L4 级虚拟仿真<br>测试与实车测试        | 通过数据驱动进行<br>严格的测试                             | 提高自动驾驶车辆<br>安全性                                                                    | 基于 Unity 的虚拟<br>仿真测试与开放<br>道路测试                             |
| 6  | TRI             | 日本 | 2017 年 | 实车测试                          | 高级驾驶辅助模式和<br>完全自动驾驶模式<br>的综合测试                | 防止车辆直接撞向前方<br>物体,探测驾驶人行为                                                           | 开放道路测试                                                      |
| 7  | 车路协同联合<br>实验室   | 中国 | 2018 年 | 实车测试                          | 以车辆的需求为主体,<br>传送不同的信息给<br>不同的车辆               | 研究 CAV 与路侧基站的<br>信息感知及交互能力,<br>CAV 开启与否对<br>AEB 功能的影响                              | 开放道路测试                                                      |
| 8  | 中国科学院<br>自动化研究所 | 中国 | 2019 年 | 虚拟仿真测试与<br>实车测试               | 提出一种新的图灵测试<br>方法测试无人车对复杂<br>场景的理解和决策能力        | 研究无人车对复杂交通场景<br>的理解与决策的能力                                                          | 基于无人驾驶测试与<br>验证系统的虚拟仿真<br>测试与封闭道路测试                         |
| 9  | 长安大学            | 中国 | 2021 年 | 自动驾驶仿真与数字<br>孪生测试评价工具链        | 面向演进交通环境下的<br>自动驾驶上路许可<br>与效能评价               | 加速突破适应演进交通环境<br>的高等级自动驾驶系统上路<br>许可与效能评价中的关键<br>技术,开发面向智能评级、<br>缺陷识别及安全认证的<br>完整工具链 | 实时仿真软件、加速<br>仿真云平台、场地孪生<br>测试系统、整车交通在<br>环测试平台与综合<br>效能评价体系 |
| 10 | 百度 Apollo       | 中国 | 2021 年 | 面向 L3/L4 级虚拟<br>仿真测试与实车<br>测试 | 侧重于实现量产园区<br>自动驾驶、限定区域<br>城市自动驾驶、城市<br>全网自动驾驶 | 研究使用纯路侧感知能力,<br>真正实现开放道路连续<br>路网 L4 级别自动驾驶<br>闭环的车路协同技术                            | 基于 Apollo Studio<br>虚拟仿真测试与<br>开放道路测试                       |

平台的有效性;Son 等<sup>[257]</sup>提出了一种通过对不同的测试工况选取不同的关键指标来评估自动驾驶车辆的性能的方法;刘法旺等<sup>[258]</sup>对比了模拟仿真测试、封闭场地测试和实际道路测试 3 种方法的优缺点,提出了基于场景的“三支柱”融合测试评估方法,为综合评估具有自动驾驶功能的智能网联汽车安全性提供保障;Kim 等<sup>[259]</sup>提出了一种基于单目或双目摄像头的测量方法来评估自动驾驶车辆的安全性,并通过对比实车测试结果验证所提方法的可靠性;Zhang 等<sup>[260]</sup>提出了一种基于自然驾驶轨迹的自动驾驶车辆功能安全多逻辑场景

安全评价方法,来评价被测自动驾驶车辆在多种场景下的综合性能。

7.3 自动驾驶测试标准(杨澜、袁佳琪)

7.3.1 自动驾驶测试相关标准规范

世界各国已经逐步开展了自动驾驶测试评价的相关政策、标准和规范的建设工作,以加速推动自动驾驶的落地进程。自 2001 年以来,自动驾驶标准就已经引发了全世界各标准化组织的广泛关注,如国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)、美国工程师协会(Society of American Engineers, SAE)等组织提出了自动驾驶

测试相关标准,以引领自动驾驶车辆进行更加完善和全面的测试。目前已经有数百个自动驾驶标准陆续发布<sup>[261]</sup>,如图 24 所示。图 25 统计了自动驾驶标准全球制定和发布情况,CEN 为欧洲标准化协会,ETSI 为欧洲电信标准化协会,3GPP 为国际电信标准组织。

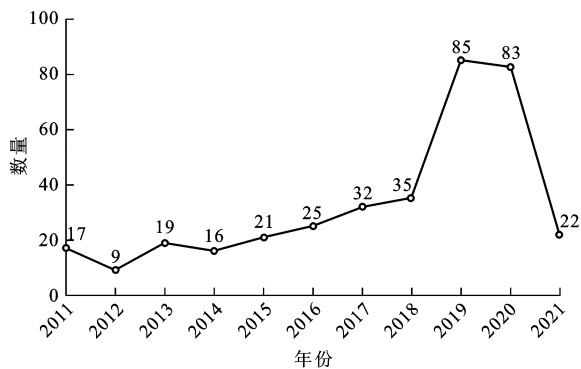


图 24 近十年自动驾驶标准发布数量趋势

Fig. 24 Trend of issued number of autonomous driving standards in the past decade

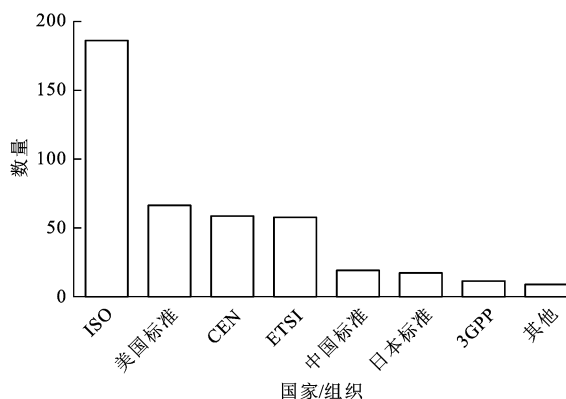


图 25 自动驾驶标准全球发布情况

Fig. 25 Global release of autonomous driving standards

同时,各国致力于发布自动驾驶测试评价法规,推进自动驾驶车辆长足发展。表 15 总结了中国、美国、日本、德国和英国最近 10 年发布的相关法规。

### 7.3.2 自动驾驶测试标准内容

各国致力于自动驾驶车辆公共道路测试许可和安全性责任划分的同时,各个组织和机构也针对各级自动驾驶车辆涵盖的测试功能和评价指标作了详细说明。表 16 总结了部分自动驾驶标准功能,其中自动车道保持系统相关标准和自动紧急制动系统标准在自动驾驶功能测试中占比最大。

大部分组织机构提出的标准规范为汽车提供了功能安全系统框架,包括汽车生命周期改装活动的指导,具体风险评估方法,可接受残余风险的必要安全要求,确保获得足够的、可接受的安全等级的有效

性和确定性措施等。表 17 统计了部分测试标准包含的性能评价指标。

### 7.4 总结与展望

目前,自动驾驶测试评价工具链一般以虚拟测试工具链为主,用于 SIL、MIL、HIL 等工具的集成,全流程测试的技术发展仍然不成熟;测试工具的非标准化和信息孤岛现象较为严重,标准尚未推进,工具相互独立。针对单一功能的测试评价工具及其流程已无法满足高级别自动驾驶车辆的测试评价要求,需要进一步研究跨平台的系统逻辑结构、测试业务、数据和功能的系统集成方法,测试数据共享和同步方法,构建完善、统一的自动驾驶车辆综合测试评价体系。

## 8 自动驾驶车辆认证与潜在缺陷检测技术(张宇探、闵海根)

本节分析了自动驾驶车辆目前的准入认证规范和管理机制,从自动驾驶缺陷的定义、成因分析、分类、检测等方面综述了目前自动驾驶的缺陷检测技术,总结了自动驾驶车辆安全保障方面面临的挑战,组织结构如图 26 所示。

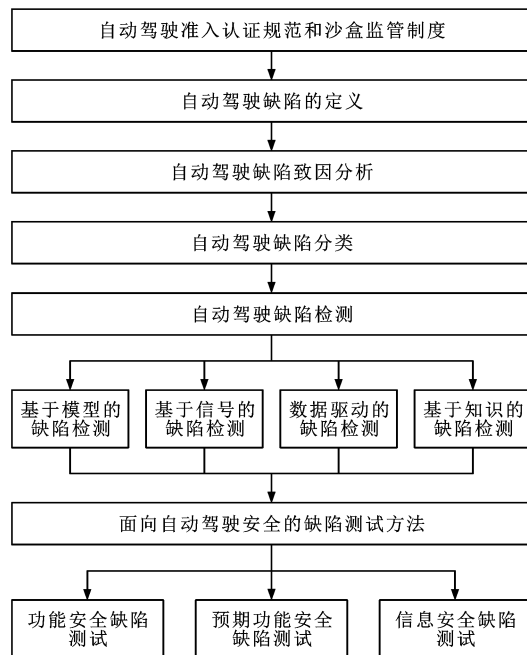


图 26 自动驾驶车辆认证与潜在缺陷检测技术组织结构

Fig. 26 Organizational structure of certification and potential defect detection technology of autonomous driving vehicles

### 8.1 自动驾驶准入认证规范和沙盒监管制度(张宇探)

近几年来,自动驾驶技术飞速发展,许多汽车主机厂的量产项目都已经进入了大众视野。技术分析表明,虽然部分自动驾驶车辆已经达到 L3 级水平,但考虑法规和认证,仍以 L2 级辅助驾驶进行宣传

表 15 各国近十年发布的关于自动驾驶的法规

Table 15 Regulations on autonomous driving issued by various countries in past decade

| 国家 | 法规                        | 时间     | 机构/地点                                 | 主要内容                                                                                     |
|----|---------------------------|--------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 中国 | 《北京市自动驾驶车辆道路测试管理实施细则(试行)》 | 2017 年 | 北京市交通委员会、北京市公安交通管理局、北京市经济和信息化局        | 规定了自动驾驶的研发和测试中对测试单位申请条件、车辆要求与驾驶要求等                                                       |
|    | 《智能网联汽车道路测试管理规范(试行)》      | 2018 年 | 工信部、公安部、交通运输部                         | 发布智能网联汽车发展技术路线图,制定了发展目标和战略规划                                                             |
|    | 《智能网联汽车自动驾驶功能测试规程(试行)》    | 2018 年 | 智能网联汽车产业创新联盟、全国汽车标准化技术委员会智能网联汽车分技术委员会 | 规定了 14 个自动驾驶功能与 34 个场景                                                                   |
|    | 《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范(试行)》 | 2021 年 | 交通运输部、工信部、公安部                         | 主要明确了道路测试、示范应用及测试区(场)的定义,将道路测试和示范应用的范围扩展到包括高速公路在内的公路、城市道路和区域,并对省、市级相关主管部门的主要职责与工作机制进行了说明 |
|    | 《自动驾驶汽车运输安全服务指南(试行)》      | 2022 年 | 交通运输部                                 | 要求从事运输经营的自动驾驶车辆应当具备车辆运行状态记录、存储和传输功能,向运输经营者和属地交通运输主管部门及时传输相关信息                            |
|    | 《道路车辆自动驾驶系统测试场景 词汇》       | 2022 年 | 工信部                                   | 规范了自动驾驶系统、动态驾驶任务、设计运行范围及条件等概念,明确了场景、动静态环境与实体要素之间的关系,与功能安全、预期功能安全等国际标准建立了配套关系             |
| 美国 | 《自动驾驶法案(H. R. 3388)》      | 2017 年 | 众议院                                   | 首次对自动驾驶车辆的生产、测试和发布进行管理                                                                   |
|    | 《自动驾驶车辆法》                 | 2021 年 | 亚利桑那州                                 | 只要车内有驾驶人,L3 和 L4 级就可以在亚利桑那州的公共道路上行驶                                                      |
|    | 《自动驾驶客运服务试验和部署计划书》        | 2021 年 | 加利福尼亚州                                | 将自动驾驶所有活动分为 4 种,并形成 4 种不同计划的监管规则                                                         |
| 德国 | 《道路交通安全法第八修正案》            | 2017 年 | 联邦议院                                  | 允许 L3 级自动驾驶上路行驶,规定记录装置,明确交通事故责任                                                          |
|    | 《道路交通安全法修正案(自动驾驶法)》       | 2021 年 | 联邦政府、联邦议院、参议院                         | 允许自动驾驶 L4 级车辆在特定场景下和特定区域内行驶                                                              |
| 日本 | 《自动驾驶汽车道路测试指南》            | 2016 年 | 警察厅                                   | 要求驾驶人须坐在驾驶位置上进行测试并遵守相应法律法规,且先进行封闭试验场地测试                                                  |
|    | 《道路交通安全法》                 | 2019 年 | 众议院、政府内阁                              | 允许 L3 级自动驾驶上路行驶                                                                          |
| 英国 | 《自动驾驶车辆发展道路:无人驾驶技术规则综述》   | 2016 年 | 商务部、交通运输部                             | 支持 Google、捷豹、沃尔沃、日产等自动驾驶车辆制造厂商在英国进行公共道路测试                                                |
|    | 《汽车技术和航空法案》               | 2017 年 | 交通运输部                                 | 规定了自动驾驶车辆发生事故时的责任分配问题以及影响责任判定的因素                                                         |
|    | 《自动与电动汽车法案》               | 2018 年 | 交通运输部                                 | 规定了自动驾驶车辆引起的交通事故保险赔付方法                                                                   |
|    | 《自动驾驶联合报道》                | 2022 年 | 英格兰和威尔士法律委员会、苏格兰法律委员会                 | 提出 75 条自动驾驶法规方面的建议                                                                       |

推广。目前,虽然 ISO/SAE 行业标准对车辆信息安全、车辆预期功能安全等提出了严格的框架,并且在具体操作层面上给出了详尽的指导,但是此系列标准无地域限制和法律约束。联合国世界车辆法规协调论坛近期发布了 3 项关于智能网联汽车的重要

法规,规定从 2022 年 7 月起新车型必须满足该法规才能在欧盟上市,主要包括信息安全(UN R155)、软件升级(UN R156)与自动车道保持系统(UN R157)相关认证标准。信息安全认证主要包括信息安全管理流程体系认证和整车型式认证。信息安全管理

表 16 自动驾驶测试标准包含的测试功能

Table 16 Test functions included in autonomous driving test standards

| 标准                                            | 功能  |     |      |      |     |        |     |      |
|-----------------------------------------------|-----|-----|------|------|-----|--------|-----|------|
|                                               | ACC | FCW | 变道决策 | 盲区检测 | LKA | 车道偏离预警 | AEB | 低速跟踪 |
| ISO 17387:2008                                |     |     | √    |      |     |        |     |      |
| ISO 22178:2009                                |     |     |      |      |     |        |     | √    |
| ISO 15623:2013                                |     | √   |      |      |     |        |     |      |
| ISO 17361:2017                                |     |     |      |      |     | √      |     |      |
| ISO 15622:2018                                | √   |     |      |      |     |        |     |      |
| SAE J2400—2014                                |     | √   |      |      |     |        |     |      |
| SAE J2399—2021                                | √   |     |      |      |     |        |     |      |
| 《智能运输系统 自适应巡航控制系统性能要求与检测方法》(GB/T 20608—2006)  | √   |     |      |      |     |        |     |      |
| 《智能运输系统 车道偏离报警系统性能要求与检测方法》(GB/T 26773—2011)   |     |     |      |      |     | √      |     |      |
| 《乘用车自动紧急制动系统(AEBS)性能要求及试验方法》(GB/T 39901—2021) |     |     |      |      |     |        | √   |      |
| NHTSA <sup>[262]</sup>                        |     | √   |      | √    | √   | √      | √   |      |
| Euro-NCAP <sup>[263]</sup>                    |     | √   |      |      | √   | √      | √   |      |
| A-NCAP <sup>[264]</sup>                       | √   | √   |      |      | √   | √      | √   |      |
| C-NCAP <sup>[265]</sup>                       |     |     |      |      |     |        | √   |      |

表 17 自动驾驶测试标准包含的评价指标

Table 17 Evaluation indicators included in autonomous driving test standards

| 标准                              | 评价指标   |            |        |        |       |         |        |         |         |         |      |         |            |      |
|---------------------------------|--------|------------|--------|--------|-------|---------|--------|---------|---------|---------|------|---------|------------|------|
|                                 | 伤害的严重性 | 暴露于危险中的可能性 | 危险的可控性 | 风险可接受性 | 警报准确性 | 系统报警重复性 | 警报可接受性 | 碰撞警报及时性 | 安全等级独立性 | 目标识别准确性 | 防撞击性 | 探测区域有效性 | 车道辅助系统的避让性 | 抗翻滚性 |
| ISO 15623:2013                  |        |            |        |        | √     |         |        | √       |         | √       | √    | √       |            |      |
| ISO 17361:2017                  |        |            |        |        | √     | √       | √      |         |         |         |      |         |            |      |
| ISO 26262:2018                  | √      | √          | √      |        |       |         |        |         | √       |         |      |         |            |      |
| ISO 21448:2022                  | √      | √          | √      | √      |       |         |        |         |         |         |      |         |            |      |
| SAE J2400—2003 <sup>[266]</sup> |        |            |        |        |       | √       | √      | √       |         | √       |      | √       |            |      |
| SAE J2980—2018                  | √      | √          | √      |        |       |         |        |         |         |         |      |         |            |      |
| SAE J2399—2021                  |        |            |        |        |       |         |        |         |         | √       |      |         |            |      |
| GB/T 26773—2011                 |        |            |        |        | √     | √       | √      |         |         |         |      |         |            |      |
| GB/T 34590—2017                 | √      | √          | √      |        |       |         |        |         | √       |         |      |         |            |      |
| NHTSA 26555 <sup>[262]</sup>    | √      | √          |        |        | √     |         |        |         |         | √       | √    |         |            |      |
| NHTSA NCAP <sup>[267]</sup>     | √      |            |        |        | √     | √       | √      | √       |         |         | √    |         |            | √    |
| C-NCAP <sup>[267]</sup>         | √      |            |        |        |       |         |        |         |         |         | √    |         | √          |      |
| Euro-NCAP <sup>[268]</sup>      | √      |            |        |        |       |         |        |         |         |         | √    |         | √          |      |
| J-NCAP <sup>[269]</sup>         | √      |            |        |        |       |         |        |         |         |         | √    |         |            |      |

流程体系主要用以识别、分析、防御相关信息安全威胁、信息安全漏洞和信息安全攻击等潜在风险项。

整车型式认证主要涵盖车辆零部件、系统和整车产品的相关性能要求与试验方法,主要依据整车框架

指令进行车辆产品认证。软件升级认证包括主机厂对配置和质量控制过程、安全执行升级过程、软件升级网络安全过程进行验证,并对登记的软件进行升级批准,即要求软件升级的真实性和完整性,而且主机厂能够可靠地执行升级。自动车道保持系统认证主要规定了系统安全和故障安全响应、人机界面和驾驶人的操作信息、网络安全和软件更新,以及适用该功能的运行安全要求与相应测试标准,是首个L3级自动驾驶领域的第一项国际法规。以上3项法规标志着自动驾驶系统已经从符合标准进入到遵守法规的时代。

为确保现有监管认证体系不会阻碍新产品和新技术的投入,国外通过建立试验区为企业提供了多种驾驶场景,企业可以在受限场景下开展测试;政府可以新增条款对企业豁免,让企业可以针对相关规定下无法测试的部分进行测试。中国借鉴国外相关经验引入沙盒监管体系,可以有效引导企业查找问题<sup>[270]</sup>,改进设计,降低风险。企业需要对国家市场监督管理总局进行沙盒监管书面申请,针对企业的申请,监管总局进行初步的评估,企业针对测试技术制定车辆深度测试方案并开展测试,测试中期和末期向监管局提交相关评估报告,在完成深度测试,达到预期目标后,自动退出沙盒监管。沙盒监管鼓励企业进行技术创新,为企业提供了安全测试区,让企业不局限于法规规定,可以合理进行新技术测试,有利于智能驾驶等前沿技术的发展。

## 8.2 自动驾驶缺陷的定义(赵宁)

《缺陷汽车产品召回管理条例》中明确了缺陷的定义:是指由于设计、制造、标识等原因导致的在同一批次、型号或者类别的汽车产品中普遍存在的不符合保障人身、财产安全的国家标准、行业标准的情形,或者其他危及人身、财产安全的不合理的危险。该定义中明确了2个要素,一个是不符合标准,另一个是不合理的危险。

从国家市场监督管理总局缺陷产品管理中心发布的2004—2018年汽车召回统计数据来看,汽车零部件和子系统召回情况为:气囊和安全带缺陷占召回总量的33%,发动机缺陷占25%,电子电器占12%,制动/车轮占8%,转向/悬架占8%,动力传动系统占6%,车身占5%,其他部分占1%。近年来,随着汽车智能化程度的不断提升,自动驾驶车辆相关的召回案例时有发生。比如,由于驻车灯SCN软件编码错误导致的驻车灯部分不亮而引发的召回案件;由于电子驻车制动控制

程序编程不当,电子驻车制动马达有持续工作过热而发生损坏的可能性,从而危及人身财产安全而引发召回的案件;由于AEB系统误将路面金属接缝认知为障碍物而产生的误刹车有诱发后车追尾的风险而引发的召回案件;由于整车控制器程序编程不当,当使用手机远程功能时,有行驶中异常熄火的可能性,从而引发召回的案件等。

从以上案例可以看到,自动驾驶车辆的缺陷除了传统汽车部件和电子电器常见的不符合设计规范(或标准)和随机硬件失效之外,还包括由于其复杂功能包含的大量软件代码而产生的软件错误、传感器感知错误与由于网络安全漏洞攻击导致的失控等,这些缺陷通过功能安全的软硬件开发流程和测试手段来解决。

然而,自动驾驶车辆上路时依然会在其能力边界上出现一些性能不足的情况而导致危及人身和财产安全的事故。例如夜间自动驾驶车辆通过高架测速摄像机时,摄像机曝光拍照的一瞬间导致感知摄像头无法识别前方目标物,目标跟随丢失,从而导致控制失效并引发事故。这时系统既没有感知错误,也没有硬件失效,而是因为摄像头动态范围没有覆盖这样的场景。

自动驾驶系统是一个高复杂性的系统,技术本身也存在天然的局限性。例如前面提到的摄像头对强光的感知性能局限,毫米波雷达、激光雷达在雨雪、雾霾天气下电磁波散射导致的探测性能局限,深度神经网络算法针对不同训练样本会产生参数差异的局限性,同步定位与建图算法中粒子滤波方法的时间特性局限等。还有功能场景设计时考虑不足,未料想到各种场景可能性,以及可能存在的用户对系统功能不理解或理解偏差导致的误用等。这些是自动驾驶系统预期功能安全研究的内容,都应该归纳为自动驾驶系统的缺陷。

关于自动驾驶系统的缺陷导致的危害事件是否属于“不合理的风险”,行业内常参考的接受准则有:任何新系统的残余风险不应高于那些具有类似功能或危害的现有系统,即风险容忍原则;权衡降低风险所需付出的成本代价(针对没有已有系统做参考的情况);自动驾驶系统缺陷导致的风险水平不高于熟练谨慎的驾驶人在同等场景下产生的风险水平。

对于自动驾驶系统缺陷导致的不合理的风险,如果在产品开发阶段,则应当由整车原始委托生产通过合理的测试和改进策略来降低风险概率。如果发生在沙盒测试阶段,则应提供完整的测试数据和

缺陷解决方案,并在后续沙盒测试阶段证明缺陷问题已解决。如果发生在用户使用阶段,则可能面临产品被召回的局面。

综上所述,本文用枚举的方式对自动驾驶系统的缺陷做出如下定义:产品设计不符合保障人身、财产安全的国家标准和行业标准的内容;随机硬件失效;软件错误;信息安全漏洞库的攻击导致自动驾驶系统失效;传感器感知识别局限导致的自动驾驶系统风险水平高于熟练谨慎的驾驶人的风险事件;复杂交通场景下,自动驾驶轨迹规划与控制算法无法应对熟练谨慎的驾驶人能应对的交通场景的情况;自动驾驶系统对车辆稳定性能控制不足导致的风险水平高于熟练谨慎的驾驶人的风险事件;合理可预见的人员误用。

### 8.3 自动驾驶缺陷成因分析(裴双红)

对于上文总结的自动驾驶系统的缺陷,特别是功能设计不足和感知部件性能不足的预期功能安全缺陷,需要针对特定的功能场景来分析研究,因此,

分析自动驾驶的场景对于自动驾驶系统缺陷的成因机理探究至关重要。然而,正如上文所述,自动驾驶系统在真实道路中遇到的危险场景是无法穷尽的,因此,需要找到一种方法,将无穷尽的危险场景映射到有限的参数空间中。

ISO 34502:2022 基于场景的自动驾驶系统安全性评估框架标准就提出了这样一套方法,将自动驾驶系统的动态驾驶任务分解为感知、决策和控制 3 个子任务,每个子任务都与一个或几个特定的物理原理相联系。这个物理原理实现的过程如果被场景风险因子激发,就有可能导致物理性能无法正常实现,也就表现为系统的缺陷。如果充分分析了感知、决策、控制 3 个子任务的物理原理和对应场景风险因子,就可以涵盖自动驾驶系统的所有潜在缺陷。图 27 表示自动驾驶系统的危险场景可以分解为感知、决策、控制 3 个子任务的危险场景,图中: $d_x$  和  $d_y$  分别为两车的纵向和横向相对距离; $V_y$  为车辆横向速度; $G_x$  为车辆纵向减速度。

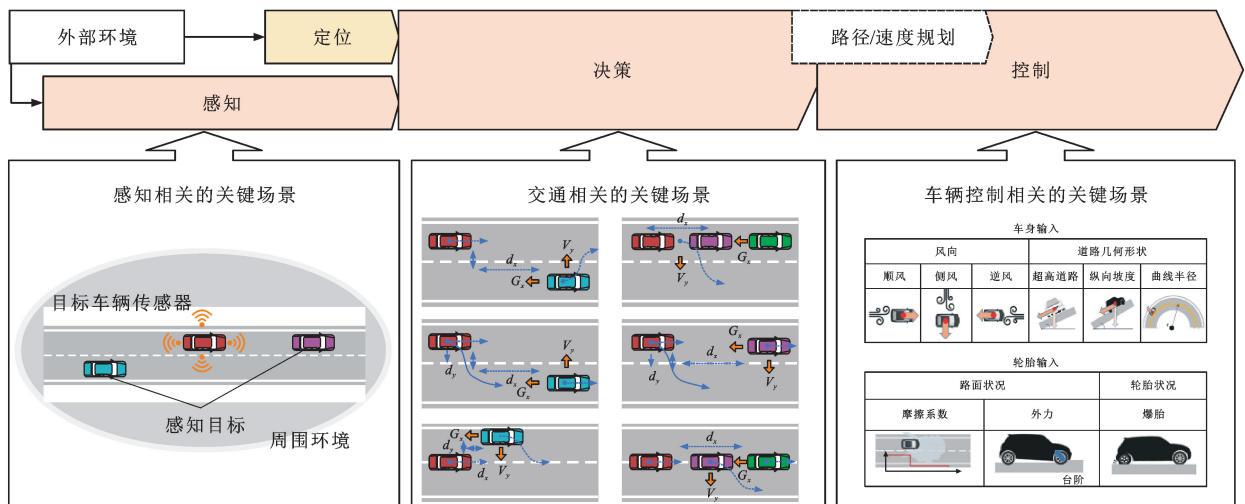


图 27 自动驾驶系统的关键场景

Fig. 27 Key scenarios of autonomous driving system

ISO 34502:2022 基于场景的自动驾驶系统安全性评估框架标准还提出了一个假设,即如果自动驾驶的场景和场景风险因子可以被解构,那么针对某一个具体的危险场景来说,将解构后的风险因子根据物理原理的分析泛化到合理的取值空间,然后再将泛化后的场景风险因子逻辑重构,这样就形成了一个逻辑场景。假设这个逻辑场景中包含决策、感知和控制 3 个风险因子,分别用 A、B、C 表示,  $N_A$ 、 $N_B$ 、 $N_C$  分别表示这 3 个风险因子泛化向量的元素个数,那么,这个逻辑场景就有重构为  $N_A N_B N_C$  种参数组合的可能性,也就是可以生成  $N_A N_B N_C$  个具体测试场景。由于物理原理是唯一

的,物理原理对应的风险因子的取值理论上也是有边界的。这样就把真实世界中无法穷尽枚举的危险场景转移到有限的逻辑场景空间中,也就是说,研究自动驾驶系统的缺陷成因机理也就是研究场景风险因子及其合理的组合。

ISO 34502:2022 基于场景的自动驾驶系统安全性评估框架标准的这套方法的优点在于不依赖于自动驾驶系统本身,具有很强的通用性。也就是说,如果 2 个不同的自动驾驶系统的 ODD 是一样的,那么对于其中一个的基于场景的风险因子分析,逻辑场景库和安全性评估方法也可以为另一个自动驾驶系统所应用,而不用考虑这 2 个自动驾驶系统是

否有相同的传感器选型与软硬件架构等。

引入 ISO 34502:2022 基于场景的自动驾驶系统安全性评估框架标准中的 3 个名词:感知干扰、交通干扰和车辆干扰,分别表示场景风险因子对感知、决策和控制 3 个子任务的物理原理的影响。

### 8.3.1 交通干扰

自动驾驶决策子任务相关的物理原理如图 28 所示,用 12 宫格列举了对自车运动决策构成危险的周围交通车辆的位置和运动行为。不同位置的交通车辆有不同的运动威胁,包含切入、切出、加速、减速 4 类。图 29 展示了场景风险因子和交通物理原理交叉分析得到交通干扰场景的方法。左列是场景风

险因子分类,包括主路、合流区、分流区,以及在这 3 个道路结构下主车道保持和主车变道的集中情况。上行是隐含了交通车位置关系的交通车辆运动类别。通过图 29 的交叉分析得到 24 种可能在真实交通中遇到的危险场景。

### 8.3.2 感知干扰

感知干扰分为 3 类,分别是传感器感知性能局限、遮挡盲区与 V2X 通信性能局限。感知性能局限与传感器的具体类型及其感知识别的物理原理相关。以毫米波雷达为例,用一个二维矩阵将场景风险因子和毫米波雷达探测的物理原理交叉分析,得到毫米波雷达感知干扰的致因机理,如表 18 所示。

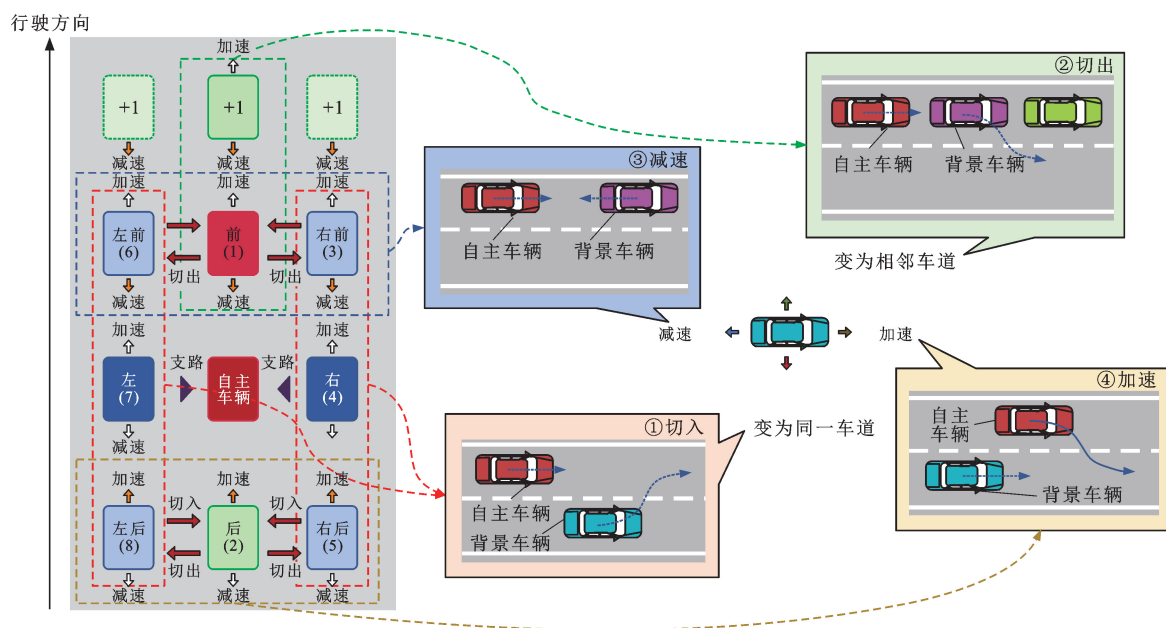


图 28 对自车运动决策构成危险的几种情形

Fig. 28 Several situations posing risks to movement decision-making of autonomous driving vehicles

盲区是自动驾驶车辆运行时经常遇到的一种感知干扰,盲区遮挡可以分为被交通车辆遮挡、被道路结构(如隔离带等)遮挡和由于道路表面高程不同导致的遮挡(如上下坡、匝道等)。交通车辆遮挡的情况又分为正前/后方遮挡、侧方遮挡、斜角遮挡,以及这 3 种遮挡分别在直道、左弯道和右弯道中的情形。

### 8.3.3 车辆干扰

车辆的行驶本质上是力与运动的关系。车辆受到的力主要是作用在车身上的力和作用在车轮上的力。作用在车身上的力包括风的作用力、路面倾斜产生的重力分力与汽车转弯时的离心力。作用在车轮上的力包括路面摩擦力(制动力和驱动力)、路面凸起物的冲击力与爆胎时的冲击力。

## 8.4 自动驾驶缺陷分类(闵海根、方煜坤)

自动驾驶技术的出现,使得很大一部分驾驶错

误的来源从驾驶人转向设计和制造自动驾驶车辆的生产者,产品生产过程中的缺陷将影响到行车安全。如表 19 所示,本文根据生产环节的差异与安全风险来源的不同,对自动驾驶缺陷进行分类。

根据生产环节的差异,王乐兵<sup>[271]</sup>将自动驾驶车辆的缺陷分类为制造缺陷、设计缺陷和警示缺陷。制造缺陷指在制造过程中,产品偏离其预期设计的情况,如传感器功能障碍或安装错误,导致自动驾驶感知模块失效并带来安全风险;设计缺陷指生产者或销售者对产品导致损害的可预见风险本可以通过采纳合理的替代设计而减少或避免,但因为没有采纳该替代设计而使产品具有不合理危险,如自动驾驶软件设计者忽略了某些对人身财产安全具有重要影响的因素,使得自动驾驶功能存在潜在安全风险;警示缺陷指产品所导致的可预见的损害风险本可以

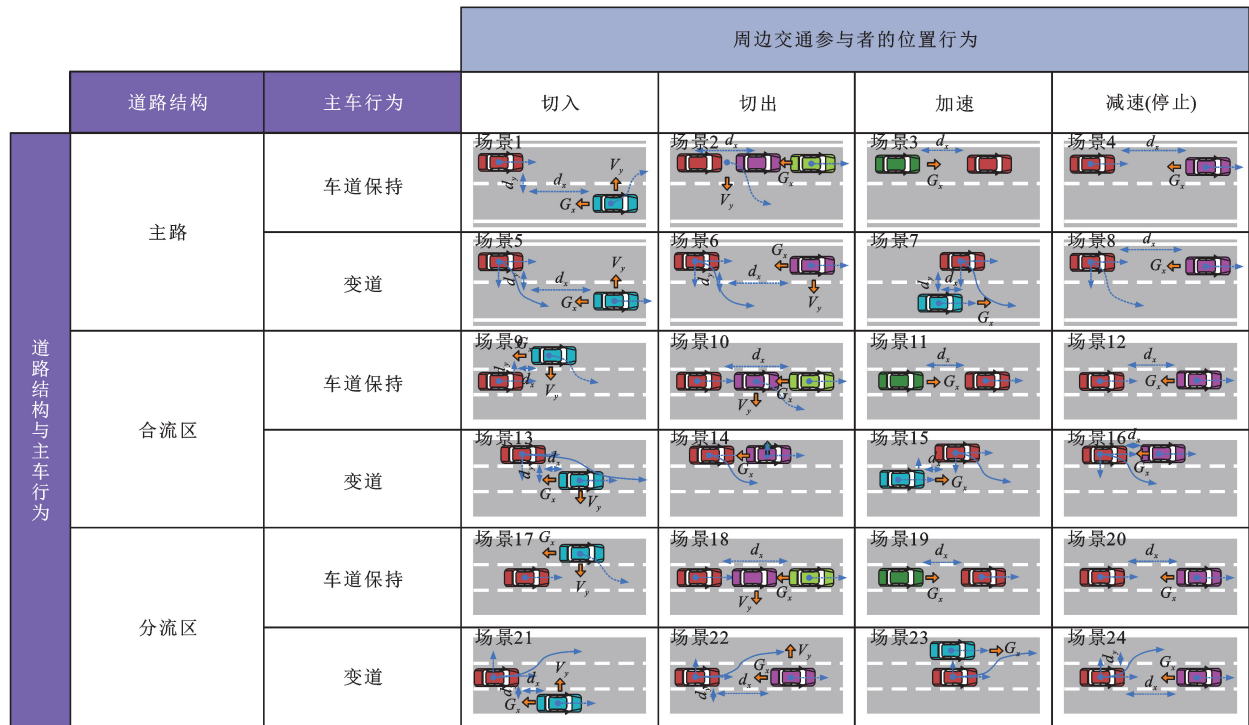


图 29 对场景风险因子和交通物理原理交叉分析得到的交通干扰场景

Fig. 29 Traffic interference scenarios obtained from cross analysis of scenario risk factors and traffic physics principles

通过由生产者或销售者提供合理的指导教育或警示而减少或避免,但因为说明或警示不充分致使产品产生不合理的危险,如某些特定工况下,自动驾驶系统未向用户发出警示和接管请求,使得车辆处于不安全的驾驶状态。

从安全角度看,自动驾驶安全主要涉及功能安全、预期功能安全、信息安全三方面。道路车辆功能安全是指不存在由电子电气系统的功能异常表现引起的危害,而导致不合理的风险;预期功能安全是指不存在由预期功能或其实现的不足引起的危害而导致不合理的风险;信息安全指不存在由内部或外部网络攻击导致不合理的风险。自动驾驶系统的软硬件高度集成,以支持实现全部动态驾驶任务,其缺陷或带来上述 3 种安全风险。在此背景下,一是传感器、执行器、计算平台、软件、通信等可能会发生系统性失效或随机硬件失效,造成整车危害,即出现功能安全问题;二是由于场景感知、决策算法、人工智能等实现的不充分性、不确定性带来自动驾驶的功能局限,造成非失效风险,影响到整车行驶的安全性,即预期功能安全问题;三是由于网络攻击导致的自动驾驶系统功能异常带来的安全问题,即信息安全问题。由此,本文将自动驾驶系统的缺陷归纳为“使得自动驾驶系统出现安全风险的因素”,从安全风险来源的

角度将自动驾驶缺陷分类为功能安全缺陷、预期功能安全缺陷和信息安全缺陷。功能安全缺陷指导致自动驾驶电子电气系统的功能异常的安全风险因素,如软硬件故障、产品设计制造不符合国家和行业标准等;预期功能安全缺陷指由于自动驾驶功能实现不足而导致安全风险的因素,如传感器感知性能不足、自动驾驶感知、规划、决策、控制算法实现的不充分、可预见的人员误用等;信息安全缺陷指可能使自动驾驶系统处于网络攻击威胁的因素,如通信协议漏洞与数据校验缺失等。

### 8.5 自动驾驶缺陷检测(闵海根、方煜坤)

自动驾驶系统缺陷带来了巨大的安全风险,检测自动驾驶产品缺陷对于保障驾驶安全具有重要意义。本节讨论的自动驾驶缺陷检测方法着重于自动驾驶产品方面,不涉及人员误用相关的缺陷。

缺陷的存在或导致自动驾驶功能异常,可由特定观测对象的观测数据所体现。从数据分析的角度来看,异常指数据中明显有别于大多数样本的个体,通过分析收集到的系统运行数据并捕捉其中的异常数据模式是检测缺陷的有效手段。故而,缺陷检测问题一定程度上可以通过检测自动驾驶各子系统运行时的数据异常来实现,常见的方法包括基于模型的方法、基于信号的方法、数据驱动的方法和基于知识的方法,本节将逐一进行阐述。

表 18 毫米波雷达感知干扰分析框架

Table 18 Analysis framework of sensing interferences from millimeter-wave radars

[illegible]

续表 18

| 毫米波雷达         |       |          |       |          | 物理原理(信号感知/传感器安装方位角) |      |    |           |    |   |    |          |        |         |        |
|---------------|-------|----------|-------|----------|---------------------|------|----|-----------|----|---|----|----------|--------|---------|--------|
|               |       |          |       |          | 被测目标物的信号            |      |    |           |    |   |    | 其他探测物的信号 |        |         |        |
|               |       |          |       |          | 频率                  | 相位   |    | 能量        |    |   |    | 噪音       | 非期望的信号 |         |        |
|               |       |          |       |          |                     | 探测方向 | 传播 | 无信号(部分信号) | 高频 |   | 信号 |          | 低信噪比   | 有效信号比例低 | 无效信号增长 |
| 反射            | 折射    | 延迟变化     | 混叠    | 谐波       | 差异大                 |      |    |           |    |   |    |          |        |         |        |
| 感知干扰的<br>因果因子 | 感知目标物 | 道路上的障碍物  | 掉落物   | 颜色/材质    |                     |      |    |           |    |   |    | ○        |        |         |        |
|               |       |          |       | 形状       |                     |      |    |           |    |   | ○  |          |        |         |        |
|               |       |          |       | 相对位置/运动  |                     |      |    |           |    |   | ○  |          |        |         |        |
|               |       |          | 动物    | 颜色/材质    |                     |      |    |           |    |   |    | ○        |        |         |        |
|               |       |          |       | 形状       |                     |      |    |           |    |   |    | ○        |        |         |        |
|               |       |          |       | 相对位置/运动  |                     |      |    |           |    |   |    | ○        |        |         |        |
|               |       |          | 临时建筑  | 颜色/材质    |                     |      |    |           |    |   |    | ○        |        |         |        |
|               |       |          |       | 形状-反射强度大 |                     |      |    |           |    | ○ | ○  | ○        |        |         |        |
|               |       |          |       | 形状-反射强度小 |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       |          |       | 脏污       |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       |          |       | 相对位置     |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       |          | 移动目标物 | 其余车辆     | 颜色/材质               |      |    |           |    |   |    |          |        |         |        |
|               |       | 形状-反射强度大 |       |          |                     |      |    |           |    | ○ | ○  |          |        |         |        |
|               |       | 形状-反射强度小 |       |          |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       | 脏污       |       |          |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       | 相对位置     |       |          |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       | 摩托车      |       | 颜色/材质    |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       |          |       | 形状/大小    |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       |          |       | 黏附物      |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       |          |       | 相对位置     |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       | 自行车      |       | 颜色/材质    |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       |          |       | 形状/大小    |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       |          |       | 黏附物      |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       |          |       | 相对位置     |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       | 行人       |       | 颜色/材质    |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       |          |       | 形状/大小    |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |
|               |       |          |       | 相对位置     |                     |      |    |           |    |   |    |          | ○      |         |        |

## 8.5.1 基于模型的自动驾驶车辆缺陷检测方法

基于模型的缺陷检测方法需要一个可以明确描述系统各变量之间关系的系统模型,利用该系统模型,可以开发缺陷检测算法来监测模型预测值与系统测量值之间的一致性<sup>[272]</sup>。基于模型的方法可以进一步分为基于校验关系的方法<sup>[273]</sup>、参数估计方法<sup>[274]</sup>和基于观测器的方法<sup>[275]</sup>,该类方法需要系统模型作为先验知识,诊断过程很大程度上依赖于模型的精度。模型刻画了系统的先验知识,对于自动驾驶车辆,建立的模型通常用来描述以下对象的先

验:(1)自动驾驶车辆的组件/子系统;(2)自动驾驶车辆单车;(3)一组存在协同关系的智能网联汽车。在组件或子系统层面,模型描述了特定组件或特定子系统的动态特性,缺陷检测是通过检查模型预测值与系统测量值之间的一致性来实现的。从自动驾驶车辆单车的层面来看,用于缺陷检测的模型应该至少从一个方面反映车辆的特征,比如车辆运动学或动力学模型反映了车辆的运动特征。对于一组存在协同关系的智能网联汽车,每个智能体都具有与组内部分或全部智能体通信的功能,模型被用来描

表 19 自动驾驶缺陷分类  
Table 19 Classification of autonomous driving defects

| 分类依据   | 名称       | 含义                      | 示例                            |
|--------|----------|-------------------------|-------------------------------|
| 生产环节   | 制造缺陷     | 制造过程中产品偏离预期设计           | 传感器功能障碍                       |
|        | 设计缺陷     | 未采纳替代设计规避可预计的风险         | 自动驾驶软件设计忽略了某些对人身财产安全具有重要影响的因素 |
|        | 警示缺陷     | 说明或警示不充分带来的不合理危险        | 某些特定工况下,自动驾驶系统未能向用户发出警示和接管请求  |
| 安全风险来源 | 功能安全缺陷   | 导致自动驾驶电子电气系统功能异常的安全风险因素 | 软硬件故障                         |
|        | 预期功能安全缺陷 | 由于自动驾驶功能实现不足而导致安全风险的因素  | 传感器感知性能不足                     |
|        | 信息安全缺陷   | 可能使自动驾驶系统处于网络攻击威胁的因素    | 通信协议漏洞                        |

述智能体之间如何进行交互,通过比较特定智能体的实际状态或行为与交互模型给出的智能体的预期状态或行为之间的差异对缺陷进行检测。

8.5.2 基于信号的自动驾驶车辆缺陷检测方法

基于信号的方法假设一个系统或过程的缺陷可以反映在某些特定的测量信号中,它从原始信号中提取特征,通过比较提取的特征与系统健康状态下的特征之间的差异进行缺陷检测<sup>[272]</sup>。对于自动驾驶车辆,信号处理技术通常用于诊断特定的部件或子系统,用于症状(或模式)分析的信号可以在时域、频域与时频域提取。信号处理技术在自动驾驶车辆缺陷检测中往往与其他方法特别是数据驱动方法相结合,通常采用信号处理技术(如小波变换、经验模态分解等)进行数据预处理或特征提取。

8.5.3 数据驱动的自动驾驶车辆缺陷检测方法

系统健康状态的精确模型或先验知识并不总是可以得到,尤其对于复杂系统(如自动驾驶车辆),因而数据驱动方法是缺陷检测的重要方面。数据驱动方法需要大量的历史数据以提取隐含的特征,在特征提取的基础上,通过观测系统实时的特征与所学习到的特征的一致性实现缺陷检测<sup>[276]</sup>。基于数据驱动的缺陷检测方法可分为统计分析方法和非统计分析方法。基于统计分析的方法将在线数据与已知的缺陷症状或历史观察到的正常行为进行统计比较作出诊断;基于非统计分析的方法则从历史数据中学习系统特征,建立缺陷检测模型。在统计框架下,常用的方法如主成分分析<sup>[277]</sup>、独立成分分析<sup>[278]</sup>和支持向量机<sup>[279]</sup>等,这些方法需要使用一定量的训练数据,通过统计分析来捕捉系统或过程的关键特征。非统计数据驱动框架中,人工神经网络由于其强大的非线性逼近能力和自适应学习能力,被大量应用于缺陷检测中,包括卷积神经网络、贝叶斯网络、自动编码器、长短时记忆网络等。卷积神经网络

以捕捉多个变量之间的关系和空间数据的特征提取而闻名<sup>[280]</sup>;贝叶斯网络结合了概率模型的特点,可以很好地表示缺陷和症状之间的因果关系<sup>[281]</sup>;自动编码器是一种典型的基于重构的异常检测方法,训练好的自动编码器在遇到异常实例时将输出较高的重构误差<sup>[282]</sup>;长短时记忆网络则是一种典型的基于预测的方法,该方法假设正常实例在时间维度上比异常实例更具有预测性,训练好的模型在遇到异常时会返回较高的预测误差<sup>[283]</sup>。

8.5.4 基于知识的自动驾驶车辆缺陷检测方法

基于知识的方法需要关于研究对象缺陷特征的知识库,以及一个将推理方法应用于有关知识的推理引擎来检测缺陷,适用于没有详细数学模型的复杂或多部件系统<sup>[284]</sup>。基于知识的缺陷检测方法分为两类:因果分析和专家系统<sup>[285]</sup>。因果分析方法通常依赖于缺陷-症状关系的因果模型,失效模式、影响及危害性分析和故障树分析是 2 种典型基于因果分析的缺陷检测方法。专家系统是包含和模拟某一专业领域人类专家行为的系统,能够根据新数据处理、记忆和重组信息,学习和推理未知知识,做出适当的决定,并解释为什么会做出这样的决定<sup>[286]</sup>。通常,if-then 规则常被用来表示专家系统的知识,而专家系统采用布尔逻辑可能会导致系统对各种不确定性较为敏感,模糊逻辑为解决这一问题提供了可能,该方法将特征空间划分为模糊集,利用模糊规则进行推理,提供近似于人类的推理<sup>[276]</sup>。

8.6 面向自动驾驶安全的缺陷测试方法(闵海根、方煜坤)

通过缺陷测试发现并排除导致自动驾驶系统出现安全风险的因素,对于开发安全的自动驾驶产品具有重要意义,本节将从功能安全、预期功能安全和信息安全方面阐述缺陷测试方法。

### 8.6.1 功能安全缺陷测试方法

功能安全缺陷指导致自动驾驶电子电气系统的功能异常的安全风险因素,如软硬件故障等。针对功能安全缺陷的测试,可以通过合理选取故障样本进行故障注入,通过试验观察和分析系统的动态行为,评估系统存在故障时的容错性能。从已知的故障模式集中合理地选取样本分配到测试节点是功能安全缺陷测试的关键环节,常用按比例分层抽样与按比例随机抽样的故障样本分配<sup>[287]</sup>;按比例分层抽样方法先要确定组成单元要注入的故障样本数量,再从组成单元故障模式库中抽样选择;随机抽样方法直接从故障模式库中随机抽取模式构成样本集,未对关键故障模式进行重点抽样,存在样本覆盖性差和实际环境下系统测试符合性低的问题。以故障率为基础的概率性样本分配方法考虑了故障出现的概率,当故障率信息估计不准确时,会影响最终测试结果可信度。并且,该方法容易忽略小概率故障样本,而在实际自动驾驶系统中,小概率故障样本易造成严重安全影响。分层抽样和随机抽样的故障样本分配方法在一定条件下优化了样本分配方案,但对于复杂系统的测试验证,考虑的样本分配影响因素不够全面合理,基于多因子的故障样本分配方案被重视和研究<sup>[287]</sup>。如邓露等<sup>[288]</sup>考虑了故障率、危害度、严酷度;余思奇等<sup>[289]</sup>考虑了故障率、危害度、检测隔离时间、维修性和测试研发代价等;李天梅<sup>[290]</sup>提出了基于故障扩散强度的样本选取方法,并改进了传统的基于故障率的样本分配方法;石君友等<sup>[291]</sup>构建了故障模式信息模型,结合充分性度量和准则,评价了样本集充分程度。故障注入是测试性验证的核心,主要可以分为基于硬件、软件和仿真的故障注入方式。基于硬件的故障注入更接近于系统运行现场中发生的真实故障,但对于高度集成的系统,故障测试时不可能开封分解测试,导致许多硬件故障注入无法进行;基于软件的故障注入实现较为容易,但注入的故障局限于软件有关的部分;基于仿真的故障注入覆盖故障类型相对更广,可控性和可观测性高,但模型开发耗时,故障可信度依赖于模型的准确性。利用仿真进行故障注入具有安全性高、效率高、成本低、故障可重复性强的特点,可以方便地构造现实不容易出现的小概率故障样本,但是仿真可信度影响着测试结果的置信度。

### 8.6.2 预期功能安全缺陷测试方法

预期功能安全缺陷指由于自动驾驶功能实现不足而导致安全风险的因素,如传感器感知性能不足

与自动驾驶感知、规划、决策、控制算法实现的不充分等。预期功能安全缺陷的本质在于软硬件功能的性能不足,即在因预期功能安全问题导致的整车级危害中,导致此类危害的系统行为是因为软硬件存在性能局限,而造成此类危害的系统行为是由场景中的触发条件引发的。触发条件是场景中的特定条件,可以引发导致危害行为的后续系统反应,也可以直接引发系统因功能不足而产生的危害行为,是导致整车危害事件的直接原因。性能局限是组件本身的技术能力局限性,其与一个或多个触发条件相结合,可导致危害行为,是导致整车级危害事件的根本原因<sup>[292]</sup>,因此,自动驾驶场景库的构建对于预期功能安全缺陷测试至关重要。考虑到自动驾驶系统在真实道路中遇到的危险场景无法穷举,需找到一种方法,将无穷尽的危险场景映射到有限的参数空间。ISO 34502:2022 标准将自动驾驶系统的动态驾驶任务分解为感知、决策和控制 3 个子任务,每个子任务都与一个或几个特定的物理原理相联系。物理原理实现的过程如果被场景风险因子激发,就有可能导致物理性能无法正常实现,即表现为预期功能安全缺陷。ISO 34502:2022 标准中进一步将场景风险因子进行解构,即针对某一个具体的危险场景来说,将解构后的风险因子根据物理原理的分析泛化到合理的取值空间,然后再将泛化后的场景风险因子逻辑重构,形成一个逻辑场景。于是,危险测试场景的构建问题,就转化成了有限逻辑场景的构建问题,而逻辑场景的构建,又可以进一步转化为分解场景风险因子与确定风险因子取值范围的问题。一旦包含有特定触发条件的测试场景构建完毕,就可以对自动驾驶系统的预期功能安全缺陷进行测试,记录发生危险时系统的表现与对应的触发条件。Feng 等<sup>[100]</sup>在构建自动驾驶测试场景时,进行了稀疏但对抗性的调整,在确保评价无偏性的前提下,通过训练背景车帮助自动驾驶车辆学习何时执行对抗性的策略,显著减少所需的测试里程;Priisalu 等<sup>[293]</sup>将自动驾驶关键测试场景的生成问题,转化成训练算法学习在场景中如何放置行人的问题,诱导生成易发生碰撞的测试场景以加速测试过程。

### 8.6.3 信息安全缺陷测试方法

信息安全缺陷指可能使自动驾驶系统处于网络攻击威胁的因素,如通信协议漏洞等。对自动驾驶系统,网联化是其未来发展的重要趋势,车辆诊断端口、控制器局域网络(Controller Area Network, CAN)总线、电子控制单元、传感器系统等均可能受

到网络攻击。智能网联汽车信息安全常见的攻击场景大致分为:远程攻击、短距离攻击和接触攻击<sup>[294]</sup>。远程攻击者通过网络远程连接车辆恶意更改车辆固件与发送控制命令等;短距离攻击场景中,攻击者通过蓝牙、WiFi等通信方式控制车辆或影响车辆正常通信;接触攻击场景中,攻击者可直接获取车辆数据,攻击硬件。Kim等<sup>[295]</sup>将智能网联汽车信息安全攻击分为针对汽车控制系统、自动驾驶系统组件、V2X通信、风险评估系统等的攻击。针对信息安全缺陷,可以通过构建针对特定组件的网络攻击模型进行测试,Pham等<sup>[296]</sup>总结了针对智能网联汽车信息安全常见的网络攻击模型,如表20所示,表中,OBD指车载自诊断系统(On-Board-Diagnostics)。

表20 针对智能网联汽车信息安全常见的网络攻击模型

Table 20 Common network attack models for information security of connected and automated vehicles

| 网络攻击模型           | 目标组件 | 访问方式 |
|------------------|------|------|
| 针对OBD设备的攻击       | OBD  | 物理端口 |
| 通过OBD对CAN总线的攻击   | CAN  | 物理端口 |
| 远程访问ECU对CAN总线的攻击 | CAN  | 远程访问 |
| 通过CAN总线对ECU进行攻击  | ECU  | 物理端口 |
| 远程攻击ECU          | ECU  | 远程访问 |
| 激光雷达欺骗           | 激光雷达 | 远程访问 |
| 激光雷达干扰           | 激光雷达 | 远程访问 |
| 雷达欺骗             | 雷达   | 远程访问 |
| 雷达干扰             | 雷达   | 远程访问 |
| GNSS欺骗           | GNSS | 远程访问 |
| GNSS干扰           | GNSS | 远程访问 |
| 对抗训练的图片干扰        | 相机   | 远程访问 |
| 网络信息伪造           | 连接机制 | 远程访问 |
| 网络拒绝服务攻击         | 连接机制 | 远程访问 |

利用目前常用的网络安全测试方法可以测试自动驾驶系统的信息安全缺陷。周媛媛<sup>[297]</sup>利用CAN-Pick、AUTO-X、Nmap、BurpSuite+exuss、Wireshark、HackRF+Gqrx等测试工具,结合渗透测试、DoS攻击、协议破解、应用程序接口攻击、暴力破解、模糊测试、代码逆向分析、端口扫描与攻击、劫持云端、IVI通信、SQL注入和中间人欺骗等方法,形成了一套较为全面系统的车联网信息安全测试框架。

## 8.7 总结与展望(闵海根、方煜坤)

### 8.7.1 功能安全仍需加强

在功能安全方面,除了传统汽车部件和电子电

器常见的不符合设计规范(或标准)和随机硬件失效之外,自动驾驶系统还包括由于其复杂功能包含的大量软件故障,在系统硬件和软件设计上面临更多冗余、异构、监控的要求。如何设计自动驾驶系统故障诊断及容错控制机制以使得车辆在面临功能安全风险时仍可保持所需要的性能、确保车辆满足功能安全要求仍有待研究。

### 8.7.2 预期功能安全测试场景构建不足

预期功能安全风险是由系统性能不足与驾驶场景中的某些触发条件共同导致的。在自动驾驶系统中,性能局限导致的非失效风险增多(如:传感器本身没有发生失效,但性能可能会降低,输入出现偏差,导致自动驾驶决策和执行出现问题而引发车辆危害行为),驾驶场景成为影响安全的重要因素,未知的不安全场景对自动驾驶系统提出了挑战,机器学习存在不确定性,也可能造成设计不足,导致非失效风险,危害到自动驾驶的安全性<sup>[298]</sup>。除了不断提升系统性能(如硬件方面提升传感器的感知性能等,算法方面提升自动驾驶感知、决策规划、控制执行算法的性能等)以外,构建测试场景,找出特定预期功能安全风险所对应的触发条件,从而设计相应的策略避免可能的风险是确保自动驾驶预期功能安全的重要方面。自动驾驶系统在真实道路中遇到的危险场景无法穷尽,如何高效、高保真地构建测试场景仍面临巨大挑战。

### 8.7.3 信息安全保障不足

网联化已经成为自动驾驶车辆发展的趋势之一,在带来更多信息辅助自动驾驶规划决策的同时,也引入了信息安全问题,使汽车存在被恶意远程控制、威胁、攻击的可能。从车联网企业网络安全实际看,产业链相关企业,特别是传统车企,网络安全意识不强,防护能力不足,信息安全投入不够等问题比较突出<sup>[299]</sup>。此外,针对车联网的网络安全测试评价机制尚不完善,从部件、子系统到整车的软硬件信息安全测试验证能力不足。

### 8.7.4 机器学习方法的不确定性

机器学习方法由于其优异的性能表现,被大量用于自动驾驶相关的应用中,但机器学习方法本身的不确定性却是自动驾驶安全相关问题的来源之一。由于实际环境的复杂性和多样性,机器学习模型本身的假设可能无法对其进行足够准确地描述,使得系统对于给定的输入产生不一致的输出,即输出具有不确定性,进而导致系统行为决策的不确定性,可能引发自动驾驶安全相关事故。

### 8.7.5 道路交通参与者行为的不确定性对自动驾驶系统的影响

在自动驾驶发展过程中,将长期与有人驾驶共同存在,而道路交通参与主体的行为存在较大的不确定性,这种不确定性可能导致决策算法判断失误从而引发交通安全风险,对自动驾驶决策算法提出巨大挑战。

### 8.7.6 自动驾驶安全标准制定与相关立法需不断跟进

自动驾驶技术发展迅猛,产业链各主体均推出了各自的安全解决方案,亟需一套统一的自动驾驶安全标准规范各主体的安全机制设计。此外,相关立法也需要及时跟进,明确自动驾驶相关安全事故的责任主体,促成自动驾驶产业链各主体履行对产品的安全义务。

## 9 结 语

自动驾驶测试评价技术虽已取得较大进展,但测试评价标准体系仍不完善,现有测试工具及方法难以满足 L3 级及以上自动驾驶车辆测试需求,虚拟仿真与数字孪生技术发展应用水平较低,在拟真度、测试效率与整车级测试能力方面存在诸多不足。

(1)本文首先从车辆仿真和交通流仿真两方面对自动驾驶仿真测试技术进行了分析;以提高测试的真实性为目的,从车辆动力学、拟人化测试、计算需求和

标准格式等方面出发,对自动驾驶车辆仿真测试技术进行了分析;从自动驾驶测试的背景车驾驶风格模型、背景交通流模型、交通场景生成方法、加速测试方法与虚拟仿真云平台等关键技术出发,对自动驾驶交通流仿真测试技术进行了分析。未来需进一步突破动力学、传感器等要素高精度、高保真建模技术,需进一步研究危险场景生成与加速测试理论,形成完备高保真仿真软件与高并发测试云平台。

(2)硬件在环仿真测试具有较高的测试精度和测试效率,是自动驾驶仿真测试与评价中的必要一环。本文对硬件在环测试中的数字孪生测试技术、整车级系统平台构建技术、车载传感器物理信息生成技术 3 种核心技术,进行了系统性梳理与总结,分析了交互性、实时性和真实性在硬件在环测试中的重要性。

(3)从封闭场地测试、开放道路测试、高速公路测试系统构建等方面对于自动驾驶场地测试进行了全面分析。在封闭场地建设方面,国内大多数试验场已经初步建成,测试能力不断完善,未来需进一步研究车-云-场协同的场地孪生在线加速测试方法,建设满足自动驾驶车辆测试的虚实融合场景。

(4)对自动驾驶智能性评价方法的研究现状进行了综述,梳理了国内外工具链的集成方法,并重点分析了自动驾驶测试评价标准体系的现状。介绍了自动驾驶缺陷的定义、致因分析、缺陷分类等,并研究了目前自动驾驶的缺陷检测方法。

## 编写团队

策划:赵祥模<sup>1</sup>,惠 飞<sup>2</sup>,徐志刚<sup>1</sup>

组稿:赵祥模<sup>1</sup>,朱西产<sup>3</sup>,惠 飞<sup>2</sup>,黄 蕾<sup>4</sup>,孙正良<sup>5</sup>

统稿:赵祥模<sup>1</sup>,惠 飞<sup>2</sup>,徐志刚<sup>1</sup>,景首才<sup>1</sup>,穆柯楠<sup>2</sup>

撰写:(以姓氏笔画为序)

马依宁<sup>3</sup>,王 振<sup>1</sup>,方煜坤<sup>1</sup>,田 野<sup>6</sup>,仝盼盼<sup>3</sup>,邢星宇<sup>3</sup>,毕 欣<sup>3</sup>,朱世豪<sup>4</sup>,朱西产<sup>3</sup>,朱奕昕<sup>6</sup>,刘 瑞<sup>7</sup>,刘 铭<sup>3</sup>,孙 剑<sup>6</sup>,孙驰天<sup>8</sup>,纪 艺<sup>9</sup>,李仕杰<sup>1</sup>,李珊珂<sup>1</sup>,杨 扬<sup>10</sup>,杨 澜<sup>1</sup>,吴新政<sup>3</sup>,何泽宇<sup>1</sup>,余卓平<sup>3</sup>,冷 搏<sup>3</sup>,闵海根<sup>1</sup>,沈 勇<sup>3</sup>,张 赫<sup>6</sup>,张丰婕<sup>8</sup>,张宇探<sup>11</sup>,陈君毅<sup>3</sup>,陈玲俐<sup>4</sup>,岳李圣颀<sup>6</sup>,周小钧<sup>3</sup>,承靖钧<sup>1</sup>,赵 宁<sup>11</sup>,赵玉钰<sup>1</sup>,袁 田<sup>7</sup>,袁佳琪<sup>1</sup>,郭楚凡<sup>8</sup>,黄 蕾<sup>4</sup>,常玉涛<sup>9</sup>,彭 铖<sup>1</sup>,惠 飞<sup>2</sup>,景 峻<sup>9</sup>,景首才<sup>1</sup>,蒙昊蓝<sup>3</sup>,裴双红<sup>11</sup>,熊 璐<sup>3</sup>,薛丁瑞<sup>1</sup>,穆柯楠<sup>2</sup>

单位:

1. 长安大学 信息工程学院,陕西 西安 710064
2. 长安大学电子与控制工程学院,陕西 西安 710064
3. 同济大学 汽车学院,上海 201804
4. 上海国际汽车城(集团)有限公司,上海 201800
5. 公安部交通管理科学研究所,江苏 无锡 214151
6. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804
7. 长安大学 汽车学院,陕西 西安 710018

8. 腾讯云计算(北京)有限责任公司, 北京 100084
9. 山东高速信息集团有限公司, 山东 济南 250102
10. 北京百度网讯科技有限公司, 北京 100084
11. 东风汽车集团有限公司技术中心, 湖北 武汉 430056

## 参考文献:

## References:

- [1] GAO Feng, DUAN Jian-li, HAN Zai-dao, et al. Automatic virtual test technology for intelligent driving systems considering both coverage and efficiency[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14365-14376.
- [2] 邓晓峰, 王润民, 徐志刚, 等. 我国智能网联汽车测试及示范基地发展现状[J]. 汽车工业研究, 2019(1): 6-13.  
DENG Xiao-feng, WANG Run-min, XU Zhi-gang, et al. Development status of intelligent networked automobile testing and demonstration base in China[J]. Auto Industry Research, 2019(1): 6-13. (in Chinese)
- [3] 孙航, 李志军, 张琳琳, 等. 基于 OEDR 和 ODC 的自动驾驶汽车实际道路测试评价技术研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(6): 842-850.  
SUN Hang, LI Zhi-jun, ZHANG Lin-lin, et al. Research on the test and evaluation technique of real roads for automated driving vehicles based on OEDR and ODC[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(6): 842-850. (in Chinese)
- [4] WANG Jun-min, STEIBER J, SURAMPUDI B. Autonomous ground vehicle control system for high-speed and safe operation[J]. International Journal of Vehicle Autonomous Systems, 2009, 7(1/2): 18-35.
- [5] PING E P, HUDHA K, JAMALUDDIN H. Hardware-in-the-loop simulation of automatic steering control for lanekeeping manoeuvre: outer-loop and inner-loop control design[J]. International Journal of Vehicle Safety, 2010, 5(1): 35-59.
- [6] ZAKARIA M A, ZAMZURI H, MAMAT R, et al. A path tracking algorithm using future prediction control with spike detection for an autonomous vehicle robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, DOI: 10.5772/56658.
- [7] ELBANHAWI M, SIMIC M, JAZAR R. The role of path continuity in lateral vehicle control[J]. Procedia Computer Science, 2015, 60: 1289-1298.
- [8] RAFFO G V, GOMES G K, NORMEY-RICO J E, et al. A predictive controller for autonomous vehicle path tracking[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2009, 10(1): 92-102.
- [9] GUO Lie, GE Ping-shu, YANG Xiao-li, et al. Intelligent vehicle trajectory tracking based on neural networks sliding mode control[C]//IEEE. Proceedings 2014 International Conference on Informative and Cybernetics for Computational Social Systems (ICCSS). New York: IEEE, 2014: 57-62.
- [10] SCHIEHLEN W O. Computer generation of equations of motion[C]//Springer. Computer Aided Analysis and Optimization of Mechanical System Dynamics. Berlin: Springer, 1984: 183-215.
- [11] SCHIEHLEN W O, KREUZER E J. Symbolic computerized derivation of equations of motion[C]//Springer. Dynamics of Multibody Systems; Symposium Munich. Berlin: Springer, 1977: 290-305.
- [12] ORLANDEA N, CALAHAN D A, CHACE M A. A sparsity-oriented approach to the dynamic analysis and design of mechanical systems—part 2[J]. Journal of Engineering for Industry, 1977, 99(3): 780-784.
- [13] CHACE M A. Methods and experience in computer aided design of large-displacement mechanical systems[C]//Springer. Computer Aided Analysis and Optimization of Mechanical System Dynamics. Berlin: Springer, 1984: 233-259.
- [14] 王敬, 杨志刚, 王勇. 汽车四轮转向四自由度动力学模型[J]. 山东交通学院学报, 2008, 16(1): 11-15.  
WANG Jing, YANG Zhi-gang, WANG Yong. A four-degree freedom dynamics model of automotive four-wheel-steering[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2008, 16(1): 11-15. (in Chinese)
- [15] LIU Z, PAYRE G, BOURASSA P. Nonlinear oscillations and chaotic motions in a road vehicle system with driver steering control[J]. Nonlinear Dynamics, 1996, 9: 281-304.
- [16] BLAJER W. An effective solver for absolute variable formulation of multibody dynamics[J]. Computational Mechanics, 1995, 15(5): 460-472.
- [17] 王阳阳, 靳晓雄, 左曙光, 等. 基于 R-W 多体理论的整车动力学仿真平台研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(1): 22-25.  
WANG Yang-yang, JIN Xiao-xiong, ZUO Shu-guang, et al. A research on vehicle dynamics simulation platform based on R-W method of multi-body dynamics[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(1): 22-25. (in Chinese)
- [18] JIN Ting, GONG Yun-qiu, WEI Chun-yu. Vehicle dynamics modeling based on vortex[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 624: 289-292.
- [19] 胡隽卿. 两自由度铰接越野车行驶动力学特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.  
HU Jun-qing. Study of the ride dynamics characteristics of the off-road vehicle with two degree of freedom articulated body[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [20] 杨怀广. 面向多运动工况的主动悬架火星车建模及仿真技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
YANG Huai-guang. Research on modeling and simulation of mars rovers with active suspension system for variable moving conditions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)

- [21] WANG Jian-qiang, ZHANG Lei, ZHANG De-zhao, et al. An adaptive longitudinal driving assistance system based on driver characteristics[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(1): 1-12.
- [22] ZHAO Xiao-cong, HE Ren, WANG Jian-qiang. How do drivers respond to driving risk during car-following? Risk-response driver model and its application in human-like longitudinal control[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2020, 148: 105783.
- [23] WADA T, DOI S, TSURU N, et al. Characterization of expert drivers' last-second braking and its application to a collision avoidance system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(2): 413-422.
- [24] PAPATHANASOPOULOU V, ANTONIOU C. Towards data-driven car-following models[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 55: 496-509.
- [25] YU Rong-jie, ZHANG Rui-ci, AI Hao-an, et al. Personalized driving assistance algorithms: case study of federated learning based forward collision warning[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2022, 168: 106609.
- [26] KHODAYARI A, GHAFARI A, KAZEMI R, et al. A modified car-following model based on a neural network model of the human driver effects[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, 2012, 42(6): 1440-1449.
- [27] LEFÈVRE S, CARVALHO A, BORRELLI F. A learning-based framework for velocity control in autonomous driving[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(1): 32-42.
- [28] WANG Wen-shuo, ZHAO Ding, HAN Wei, et al. A learning-based approach for lane departure warning systems with a personalized driver model[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(10): 9145-9157.
- [29] ALI Y, HUSSAIN F, BLIEMER M C J, et al. Predicting and explaining lane-changing behaviour using machine learning: a comparative study[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 145: 103931.
- [30] BUTAKOV V A, IOANNOU P. Personalized driver/vehicle lane change models for ADAS[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 64(10): 4422-4431.
- [31] ZHANG Yi-fan, CHEN Xin-hong, WANG Jian-ping, et al. A generative car-following model conditioned on driving styles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 145: 103926.
- [32] CHEN Zhi-gui, WANG Xue-song, GUO Qi-ming, et al. Towards human-like speed control in autonomous vehicles: a mountainous freeway case[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2022, 166: 106566.
- [33] 黄 晶, 蒯仲勋, 彭晓燕, 等. 考虑驾驶人风格的换道轨迹规划与控制[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(6): 226-239, 247.
- HUANG Jing, JI Zhong-xun, PENG Xiao-yan, et al. Driving style adaptive lane-changing trajectory planning and control[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(6): 226-239, 247. (in Chinese)
- [34] REN Guo-qing, ZHANG Yong, LIU Hao, et al. A new lane-changing model with consideration of driving style[J]. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 2019, 17(3): 181-189.
- [35] ZHANG Yi-fan, XU Qian, WANG Jian-ping, et al. A learning-based discretionary lane-change decision-making model with driving style awareness[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(1): 68-78.
- [36] DESJARDINS C, CHAIB-DRAA B. Cooperative adaptive cruise control: a reinforcement learning approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 1248-1260.
- [37] ZHANG Yi, SUN Ping, YIN Yu-han, et al. Human-like autonomous vehicle speed control by deep reinforcement learning with double Q-learning[C]//IEEE. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York: IEEE, 2018: 1251-1256.
- [38] 朱 冰, 蒋渊德, 赵 健, 等. 基于深度强化学习的车辆跟驰控制[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(6): 53-60.
- ZHU Bing, JIANG Yuan-de, ZHAO Jian, et al. A car-following control algorithm based on deep reinforcement learning[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(6): 53-60. (in Chinese)
- [39] LI Guo-fan, YANG Liang, LI Shen, et al. Human-like decision making of artificial drivers in intelligent transportation systems: an end-to-end driving behavior prediction approach[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2022, 14(6): 188-205.
- [40] HAN Lei, WU Lei, LIANG Fu-jian, et al. A novel end-to-end model for steering behavior prediction of autonomous ego-vehicles using spatial and temporal attention mechanism[J]. *Neurocomputing*, 2022, 490: 295-311.
- [41] 王鑫鹏, 陈志军, 吴超仲, 等. 考虑驾驶风格的智能车自动驾驶决策方法[J]. *交通信息与安全*, 2020, 38(2): 37-46.
- WANG Xin-peng, CHEN Zhi-jun, WU Chao-zhong, et al. A method of automatic driving decision for smart car considering driving style[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2020, 38(2): 37-46. (in Chinese)
- [42] ZHU Mei-xin, WANG Xue-song, WANG Yin-hai. Human-like autonomous car-following model with deep reinforcement learning[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 97: 348-368.
- [43] LI Dian-zhao, OKHRIN O. Modified DDPG car-following model with a real-world human driving experience with CARLA simulator[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 147: 103987.
- [44] 焦新宇, 杨殿阁, 江 昆, 等. 基于端到端学习机制的高速公路行驶轨迹曲率预测[J]. *汽车工程*, 2018, 40(12): 1494-1499.
- JIAO Xin-yu, YANG Dian-ge, JIANG Kun, et al. Driving trajectory curvature prediction of vehicle on highway based on

- end-to-end learning mechanism[J]. *Automotive Engineering*, 2018, 40(12): 1494-1499. (in Chinese)
- [45] CHEN Long, HU Xue-min, TIAN Wei, et al. Parallel planning: a new motion planning framework for autonomous driving[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, 6(1): 236-246.
- [46] ARADI S. Survey of deep reinforcement learning for motion planning of autonomous vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 23(2): 740-759.
- [47] KIRAN B R, SOBH I, TALPAERT V, et al. Deep reinforcement learning for autonomous driving: a survey[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(6): 4909-4926.
- [48] WU Yuan-qing, LIAO Si-qin, LIU Xiang, et al. Deep reinforcement learning on autonomous driving policy with auxiliary critic network[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2023, 34(7): 3680-3690.
- [49] GUO Hong-yu, KEYVAN-EKBATANI M, XIE Kun. Lane change detection and prediction using real-world connected vehicle data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 142: 103785.
- [50] LI Guo-fa, QIU Yi-fan, YANG Yi-fan, et al. Lane change strategies for autonomous vehicles: a deep reinforcement learning approach based on transformer[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(3): 2197-2211.
- [51] CHEN Qi, TANG Si-hai, YANG Qing, et al. Cooper: cooperative perception for connected autonomous vehicles based on 3D point clouds[C]//IEEE. 2019 IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). New York: IEEE, 2019: 514-524.
- [52] WANG Chao-jie, GONG Si-yuan, ZHOU An-ye, et al. Cooperative adaptive cruise control for connected autonomous vehicles by factoring communication-related constraints[J]. *Transportation Research Procedia*, 2019, 38: 242-262.
- [53] ARTHURS P, GILLAM L, KRAUSE P, et al. A taxonomy and survey of edge cloud computing for intelligent transportation systems and connected vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(7): 6206-6221.
- [54] WANG Hao-xin, LIU Ting-ting, KIM B, et al. Architectural design alternatives based on cloud/edge/fog computing for connected vehicles[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2020, 22(4): 2349-2377.
- [55] LIANG Si-yuan, WU Hao, ZHEN Li, et al. Edge YOLO: real-time intelligent object detection system based on edge-cloud cooperation in autonomous vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(12): 25345-25360.
- [56] WHAIDUZZAMAN M, SOOKHAK M, GANI A, et al. A survey on vehicular cloud computing[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2014, 40: 325-344.
- [57] HOU Yun-fei, SELIMAN S M S, WANG En-shu, et al. Cooperative and integrated vehicle and intersection control for energy efficiency (CIVIC-E<sup>2</sup>)[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(7): 2325-2337.
- [58] KUMAR N, RAHMAN S S, DHAKAD N. Fuzzy inference enabled deep reinforcement learning-based traffic light control for intelligent transportation system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(8): 4919-4928.
- [59] YUAN Jing, ZHENG Yu, XIE Xing, et al. Driving with knowledge from the physical world[C]//ACM. Proceedings of the 17th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2011: 316-324.
- [60] XU Wen-chao, ZHOU Hai-bo, CHENG Nan, et al. Internet of vehicles in big data era[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, 5(1): 19-35.
- [61] KAIWARTYA O, ABDULLAH A H, CAO Yue, et al. Internet of vehicles: motivation, layered architecture, network model, challenges, and future aspects[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 5356-5373.
- [62] SASAKI K, SUZUKI N, MAKIDO S, et al. Vehicle control system coordinated between cloud and mobile edge computing[C]//IEEE. 2016 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). New York: IEEE, 2016: 1122-1127.
- [63] WAN Jia-fu, ZHANG Da-qiang, ZHAO Sheng-jie, et al. Context-aware vehicular cyber-physical systems with cloud support: architecture, challenges, and solutions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(8): 106-113.
- [64] 张 扬, 彭国雄, 杨晓光. 日本 ITS 发展现状及趋势[J]. *中外公路*, 2003, 23(3): 8-10.  
ZHANG Yang, PENG Guo-xiong, YANG Xiao-guang. Present situation and trend of ITS development in Japan[J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2003, 23(3): 8-10. (in Chinese)
- [65] 袁 君. 基于数据挖掘技术的驾驶行为评分模型设计[J]. *信息记录材料*, 2020, 21(10): 153-155.  
YUAN Jun. Design of driving behavior scoring model based on data mining technology[J]. *Information Recording Materials*, 2020, 21(10): 153-155. (in Chinese)
- [66] 张 正. 基于车联网驾驶行为评分的安全驾驶卫士分析与设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.  
ZHANG Zheng. The analysis and design of driving safety guards based on the score of driving behavior in vehicle networking[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017. (in Chinese)
- [67] 朱 爽. 车联网环境下基于 UBI 的车险费率厘定模式与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.  
ZHU Shuang. Research on the automobile insurance ratemaking mode and method based on UBI in the internet of vehicle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [68] JIANG Xian-tao, YU F R, SONG Tian, et al. Intelligent resource allocation for video analytics in blockchain-enabled internet of autonomous vehicles with edge computing[J].

- IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(16): 14260-14272.
- [69] ZHU Feng-hua, LYU Yi-sheng, CHEN Yuan-yuan, et al. Parallel transportation systems; toward IoT-enabled smart urban traffic control and management[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(10): 4063-4071.
- [70] WANG Zi-ran, LIAO Xi-shun, ZHAO Xuan-peng, et al. A digital twin paradigm: vehicle-to-cloud based advanced driver assistance systems[C]//IEEE. 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). New York: IEEE, 2020: 1-6.
- [71] ASAM. Project types: learn which project types are available at ASAM[EB/OL]. (2023-03-21) [2023-04-01]. <https://www.asam.net/active-projects/project-types>.
- [72] ASAM. Development process: learn how ASAM standards are developed [EB/OL]. (2023-03-21) [2023-04-01]. <https://www.asam.net/active-projects/development-process>.
- [73] 周博林, 张宗实, 陈 蓁. ASAM OpenX 与基于场景的自动驾驶仿真测试[J]. 标准科学, 2021(增 1): 110-122.
- ZHOU Bo-lin, ZHANG Zong-shi, CHEN Chen. ASAM OpenX and scenario based simulation test for autonomous driving[J]. Standard Science, 2021(S1): 110-122. (in Chinese)
- [74] C-ASAM. ASAM 标准项目类型[EB/OL]. (2022-03-29) [2022-11-03]. <http://www.c-asam.net/?s=news-show-id-2.html>.
- C-ASAM. The type of ASAM standard project [EB/OL]. (2022-03-29) [2022-11-03]. <http://www.c-asam.net/?s=news-show-id-2.html>. (in Chinese)
- [75] LU Guang-quan, CHENG Bo, WANG Yun-peng, et al. A car-following model based on quantified homeostatic risk perception[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 408756.
- [76] YANG H H, PENG H. Development of an errorable car-following driver model[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(6): 751-773.
- [77] LINDORFER M, MECKLENBRÄUKER C F, OSTERMAYER G. Modeling the imperfect driver: incorporating human factors in a microscopic traffic model[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(9): 2856-2870.
- [78] CAI Jun-yu, JIANG Hao-bin, WANG Jun-yan. Implementation of the human-like lane changing driver model based on Bi-LSTM[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2022, 2022: 9934292.
- [79] JULKA S, SOWRIRAJAN V, SCHLOETTERER J, et al. Conditional generative adversarial networks for speed control in trajectory simulation[C]//Springer. 7th International Conference on Machine Learning, Optimization, and Data Science. Berlin: Springer, 2021: 436-450.
- [80] LIU Jian-bang, MAO Xin-yu, FANG Yu-qi, et al. A survey on deep-learning approaches for vehicle trajectory prediction in autonomous driving[C]//IEEE. 2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). New York: IEEE, 2021: 978-985.
- [81] LIANG Ming, YANG Bin, HU Rui, et al. Learning lane graph representations for motion forecasting[C]//Springer. 16th European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2020: 541-556.
- [82] VARADARAJAN B, HEFNY A, SRIVASTAVA A, et al. Multipath+: efficient information fusion and trajectory aggregation for behavior prediction[C]//ICRA. 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). New York: ICRA, 2022: 7814-7821.
- [83] ALBABA B M, YILDIZ Y. Driver modeling through deep reinforcement learning and behavioral game theory[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(2): 885-892.
- [84] SUN Ruo-yu, HU Shao-chi, ZHAO Hui-jing, et al. Human-like highway trajectory modeling based on inverse reinforcement learning[C]//IEEE. 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). New York: IEEE, 2019: 1482-1489.
- [85] HUANG Zhi-yu, WU Jing-da, LYU Chen. Driving behavior modeling using naturalistic human driving data with inverse reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 10239-10251.
- [86] SUN Jian, ZHANG He, ZHOU Hua-jun, et al. Scenario-based test automation for highly automated vehicles: a review and paving the way for systematic safety assurance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(9): 14088-14103.
- [87] ALTHOFF M, KOSCHI M, MANZINGER S. Common road: composable benchmarks for motion planning on roads [C] // IEEE. 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York: IEEE, 2017: 719-726.
- [88] SHAH S, DEY D, LOVETT C, et al. Airsim: high-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles[C]//Springer. Field and Service Robotics: Results of the 11th International Conference. Berlin: Springer, 2018: 621-635.
- [89] CARLA. Carla simulator[EB/OL]. (2022-09-12) [2022-11-03]. <https://carla.readthedocs.io/en/latest>.
- [90] FAN Hao-yang, ZHU Fan, LIU Chang-chun, et al. Baidu apollo em motion planner[J]. arXiv, 2018, DOI: 1807.08048.
- [91] BENEKOHAL R F, TREITERER J. CARSIM. Car-following model for simulation of traffic in normal and stop-and-go conditions [J]. Transportation Research Record, 1988, 1194: 99-111.
- [92] Siemens. Simcenter prescan software[EB/OL]. (2022-09-21) [2022-11-03]. <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/autonomous-vehicle-solutions/prescan/>.
- [93] QI Xiao, NI Ying, XU Yi-ming, et al. Autonomous vehicles' car-following drivability evaluation based on driving behavior spectrum reference model[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2021, 2675(7): 129-141.
- [94] SONG Zhi-jin, WANG Hui-zi, SUN Jian, et al. Experimental

- findings with VISSIM and TransModeler for evaluating environmental and safety impacts using micro-simulations[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(8): 566-580.
- [95] MA Zi-an, SUN Jian, WANG Yun-peng. A two-dimensional simulation model for modelling turning vehicles at mixed-flow intersections[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 75: 103-119.
- [96] MA Zi-an, XIE Jian-bo, QI Xiao, et al. Two-dimensional simulation of turning behavior in potential conflict area of mixed-flow intersections[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(5): 412-428.
- [97] XU Yi-ming, MA Zi-an, SUN Jian. Simulation of turning vehicles' behaviors at mixed-flow intersections based on potential field theory[J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2019, 7(1): 498-518.
- [98] SUN Jian, LIU Han, MA Zi-an. Modelling and simulation of highly mixed traffic flow on two-lane two-way urban streets[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2019, 95: 16-35.
- [99] BERGAMINI L, YE Ya-wei, SCHEEL O, et al. SimNet: learning reactive self-driving simulations from real-world observations[C]//IEEE. 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). New York: IEEE, 2021: 5119-5125.
- [100] YAN Xin-tao, ZOU Zheng-xia, FENG Shuo, et al. Learning naturalistic driving environment with statistical realism[J]. Nature Communications, 2023, 14: 2037.
- [101] ZHAO Ding, HUANG Xia-nan, PENG Hu-ei, et al. Accelerated evaluation of automated vehicles in car-following maneuvers[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(3): 733-744.
- [102] FENG Shuo, FENG Yi-heng, YU Chun-hui, et al. Testing scenario library generation for connected and automated vehicles, part I: methodology[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(3): 1573-1582.
- [103] SUN Jian, ZHOU Hua-jun, XI Hao-chen, et al. Adaptive design of experiments for safety evaluation of automated vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(9): 14497-14508.
- [104] DING Wen-hao, CHEN Bai-ming, LI Bo, et al. Multimodal safety-critical scenarios generation for decision-making algorithms evaluation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 1551-1558.
- [105] 邓伟文,李江坤,任秉韬,等.面向自动驾驶的仿真场景自动生成方法综述[J].中国公路学报,2022,35(1):316-333.
- DENG Wei-wen, LI Jiang-kun, REN Bing-tao, et al. A survey on automatic simulation scenario generation methods for autonomous driving[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(1): 316-333. (in Chinese)
- [106] 陈吉清,舒孝雄,兰凤崇,等.典型危险事故特征的自动驾驶测试场景构建[J].华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(5):1-8.
- CHEN Ji-qing, SHU Xiao-xiong, LAN Feng-chong, et al. Construction of autonomous vehicles test scenarios with typical dangerous accident characteristics[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 1-8. (in Chinese)
- [107] 王润民,朱宇,赵祥模,等.自动驾驶测试场景研究进展[J].交通运输工程学报,2021,21(2):21-37.
- WANG Run-min, ZHU Yu, ZHAO Xiang-mo, et al. Research progress on test scenario of autonomous driving[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 21-37. (in Chinese)
- [108] 朱冰,张培兴,赵健.面向多维度逻辑场景的自动驾驶安全性聚类评价方法[J].汽车工程,2020,42(11):1458-1463,1505.
- ZHU Bing, ZHANG Pei-xing, ZHAO Jian. Clustering evaluation method of autonomous driving safety for multi-dimensional logical scenario[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(11): 1458-1463, 1505. (in Chinese)
- [109] MENZEL T, BAGSCHIK G, MAURER M. Scenarios for development, test and validation of automated vehicles[C]//IEEE. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York: IEEE, 2018: 1821-1827.
- [110] DING Wen-hao, LI Bo, EUN K J, et al. Semantically controllable scene generation with guidance of explicit knowledge[J]. arXiv, 2021, DOI: 2106.04066.
- [111] JESENSKI S, STELLET J E, SCHIEGG F, et al. Generation of scenes in intersections for the validation of highly automated driving functions[C]//IEEE. 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York: IEEE, 2019: 502-509.
- [112] 周文帅,朱宇,赵祥模,等.面向高速公路车辆切入场景的自动驾驶测试用例生成方法[J].汽车技术,2021(1):11-18.
- ZHOU Wen-shuai, ZHU Yu, ZHAO Xiang-mo, et al. Vehicle cut-in test case generation methods for testing of autonomous driving on highway[J]. Automobile Technology, 2021(1): 11-18. (in Chinese)
- [113] 朱宇,赵祥模,徐志刚,等.基于蒙特卡洛模拟的无人车高速公路变道虚拟测试场景自动生成算法[J].中国公路学报,2022,35(3):89-100.
- ZHU Yu, ZHAO Xiang-mo, XU Zhi-gang, et al. Automatic generation algorithm of lane-change virtual test scenario on highways for automated vehicles using Monte Carlo simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(3): 89-100. (in Chinese)
- [114] DING Wen-hao, CHEN Bai-ming, XU Min-jun, et al. Learning to collide: an adaptive safety-critical scenarios generating method[C]//IEEE. 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). New York: IEEE, 2020: 2243-2250.
- [115] CHOI S, KIM J, YEO H. TrajGAIL: generating urban vehicle trajectories using generative adversarial imitation learning[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 128: 103091.

- [116] 赵祥模,赵玉钰,景首才,等. 面向自动驾驶测试的危险变道场景泛化生成[J]. 自动化学报, 2023, 49(10): 2211-2223.  
ZHAO Xiang-mo, ZHAO Yu-yu, JING Shou-cai, et al. Generalization generation of hazardous lane-changing scenarios for automated vehicle testing[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(10): 2211-2223. (in Chinese)
- [117] 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. (in Chinese)
- [118] 朱冰,范天昕,赵健,等. 基于危险边界搜索的自动驾驶系统加速测试方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(3): 704-712.  
ZHU Bing, FAN Tian-xin, ZHAO Jian, et al. Accelerate test method of automated driving system based on hazardous boundary search[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(3): 704-712. (in Chinese)
- [119] SAEED A, AB HAMID S H, MUSTAFA M B. The experimental applications of search-based techniques for model-based testing: taxonomy and systematic literature review[J]. Applied Soft Computing, 2016, 49: 1094-1117.
- [120] MULLINS G E, STANKIEWICZ P G, HAWTHORNE R C, et al. Adaptive generation of challenging scenarios for testing and evaluation of autonomous vehicles[J]. Journal of Systems and Software, 2018, 137: 197-215.
- [121] XU Yi-ming, Zou Ya-jie, SUN Jian. Accelerated testing for automated vehicles safety evaluation in cut-in scenarios based on importance sampling, genetic algorithm and simulation applications[J]. Journal of Intelligent and Connected Vehicles, 2018, 1(1): 28-38.
- [122] ZHAO Ding, LAM H, PENG Hu-ei, et al. Accelerated evaluation of automated vehicles safety in lane-change scenarios based on importance sampling techniques[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(3): 595-607.
- [123] HUANG Zhi-yuan, LAM H, LEBLANC D J, et al. Accelerated evaluation of automated vehicles using piecewise mixture models[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(9): 2845-2855.
- [124] HUANG Zhi-yuan, LAM H, ZHAO Ding. An accelerated testing approach for automated vehicles with background traffic described by joint distributions[C]//IEEE. 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2017: 933-938.
- [125] ZHANG He, SUN Jian, TIAN Ye. Accelerated testing for highly automated vehicles: a combined method based on importance sampling and normalizing flows[C]//IEEE. 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2022: 574-579.
- [126] WANG Xin-peng, PENG Hu-ei, ZHANG Song-an, et al. An interaction-aware evaluation method for highly automated vehicles[C]//IEEE. 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). New York: IEEE, 2021: 394-401.
- [127] TUNCALI C E, FAINEKOS G. Rapidly-exploring random trees for testing automated vehicles[C]//IEEE. 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). New York: IEEE, 2019: 661-666.
- [128] KIM Y, TAY S, GUANETTI J, et al. Hardware-in-the-loop for connected automated vehicles testing in real traffic[J]. arXiv, 2019, DOI: 1907.09052.
- [129] FENG Shuo, YAN Xin-tao, SUN Hao-wei, et al. Intelligent driving intelligence test for autonomous vehicles with naturalistic and adversarial environment[J]. Nature Communications, 2021, 12: 748.
- [130] ROCKLAGE E, KRAFT H, KARATAS A, et al. Automated scenario generation for regression testing of autonomous vehicles[C]//IEEE. 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2017: 476-483.
- [131] AMERSBACH C, WINNER H. Defining required and feasible test coverage for scenario-based validation of highly automated vehicles[C]//IEEE. 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). New York: IEEE, 2019: 425-430.
- [132] SHAFTO M, CONROY M, DOYLE R, et al. Modeling, simulation, information technology and processing roadmap[J]. National Aeronautics and Space Administration, 2010, 11: 1-32.
- [133] 刘大同,郭凯,王本宽,等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1-10.  
LIU Da-tong, GUO Kai, WANG Ben-kuan, et al. Summary and perspective survey on digital twin technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 1-10. (in Chinese)
- [134] QI Qing-lin, TAO Fei. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison[J]. IEEE Access, 2018, 6: 3585-3593.
- [135] LIAO Xi-shun, WANG Zi-ran, ZHAO Xuan-peng, et al. Cooperative ramp merging design and field implementation: a digital twin approach based on vehicle-to-cloud communication[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(5): 4490-4500.
- [136] SCHROEDER G, STEINMETZ C, PEREIRA C E, et al. Visualising the digital twin using web services and augmented reality[C]//IEEE. 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). New York: IEEE, 2016: 522-527.
- [137] WANG Zi-ran, WU Guo-yuan, BORIBOONSOMSIN K, et al. Cooperative ramp merging system: agent-based modeling and simulation using game engine[J]. SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles, 2019, 2(2): 115-128.
- [138] CHEN Qi, WANG Xu-gang, YANG Jing, et al. Trajectory-following guidance based on a virtual target and an angle

- constraint[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 87: 448-458.
- [139] YANG Chun-ying, DONG Jiang-hong, XU Qing, et al. Multi-vehicle experiment platform: a digital twin realization method[C]//IEEE. 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). New York: IEEE, 2022: 705-711.
- [140] NIAZ A, SHOUKAT M U, JIA Yan-bing, et al. Autonomous driving test method based on digital twin: a survey[C]//IEEE. 2021 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube). New York: IEEE, 2021: 1-7.
- [141] HETZER D, MUEHLEISEN M, KOUSARIDAS A, et al. 5G connected and automated driving: use cases and technologies in cross-border environments[C]//IEEE. 2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). New York: IEEE, 2019: 78-82.
- [142] ZHAO Ding, PENG Hu-ei. From the lab to the street: Solving the challenge of accelerating automated vehicle testing[J]. *arXiv*, 2017, DOI: 1707.04792.
- [143] HUANG Wu-ling, WANG Kun-feng, LYU Yi-sheng, et al. Autonomous vehicles testing methods review[C]//IEEE. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2016: 163-168.
- [144] GE Yu-ming, WANG Yang, YU Run-dong, et al. Demo: research on test method of autonomous driving based on digital twin[C]//IEEE. 2019 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC). New York: IEEE, 2019: 1-2.
- [145] SZALAY Z, FICZERE D, TIHANYI V, et al. 5G-enabled autonomous driving demonstration with a V2X scenario-in-the-loop approach[J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(24): 7344.
- [146] LI Li, WANG Xiao, WANG Kun-feng, et al. Parallel testing of vehicle intelligence via virtual-real interaction[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(28): eaaw4106.
- [147] VERHOEFF L, VERBURG D J, LUPKER H A, et al. VEHL: a full-scale test methodology for intelligent transport systems, vehicles and subsystems[C]//IEEE. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000. New York: IEEE, 2002: 369-375.
- [148] BOCK T, SIEDERSBERGER K H, MAURER M. Vehicle in the loop-augmented reality application for collision mitigation systems[C]//IEEE. Fourth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'05). New York: IEEE, 2005: 1-9.
- [149] MIQUET C. New test method for reproducible real-time tests of ADAS ECUs: "Vehicle-in-the-Loop" connects real-world vehicles with the virtual world[C]//Springer. 5th International Munich Chassis Symposium 2014. Berlin: Springer, 2014: 575-589.
- [150] PFEFFER R, LEICHSENRING T. Continuous development of highly automated driving functions with vehicle-in-the-loop using the example of Euro NCAP scenarios[C]//Springer. Simulation and Testing for Vehicle Technology: 7th Conference. Berlin: Springer, 2016: 33-42.
- [151] PARK C, CHUNG S, LEE H. Vehicle-in-the-loop in global coordinates for advanced driver assistance system[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(8): 2645.
- [152] FAYAZI S A, VAHIDI A, LUCKOW A. A Vehicle-in-the-Loop (VIL) verification of an all-autonomous intersection control scheme[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 107: 193-210.
- [153] ITIC. International Transportation Innovation Center[EB/OL]. (2013-09-20)[2022-11-03]. <http://www.itic-sc.com>.
- [154] TETTAMANTI T, SZALAI M, VASS S, et al. Vehicle-in-the-loop test environment for autonomous driving with microscopic traffic simulation[C]//IEEE. 2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES). New York: IEEE, 2018: 1-6.
- [155] GRIGGS W, ORDÓÑEZ-HURTADO R, RUSSO G, et al. Control Strategies for Advanced Driver Assistance Systems and Autonomous Driving Functions: Development, Testing and Verification[M]. Berlin: Springer, 2018.
- [156] SOLMAZ S, HOLZINGER F, MISCHINGER M, et al. Towards Connected and Autonomous Vehicle Highways: Technical, Security and Social Challenges [M]. Berlin: Springer, 2020.
- [157] ARD T, GUO Long-xiang, DOLLAR R A, et al. Energy and flow effects of optimal automated driving in mixed traffic: vehicle-in-the-loop experimental results[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 130: 103168.
- [158] GIETELINK O, PLOEG J, DE SCHUTTER B, et al. VEHL: a test facility for validation of fault management systems for advanced driver assistance systems[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2004, 37(22): 397-402.
- [159] ALBERS A, DÜSER T. A new process for configuration and application of complex validation environments using the example of vehicle-in-the-loop at the roller test bench[C]//ASME. Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York: ASME, 2010: 807-816.
- [160] GALKO C, ROSSI R, SAVATIER X. Vehicle-hardware-in-the-loop system for ADAS prototyping and validation[C]//IEEE. 2014 International Conference on Embedded Computer Systems, Architectures, Modeling, and Simulation (SAMOS XIV). New York: IEEE, 2014: 329-334.
- [161] VERBURG D J, VAN DER KNAAP A C M, PLOEG J. VEHL: developing and testing intelligent vehicles [C]//IEEE. 2002 Intelligent Vehicle Symposium. New York: IEEE, 2002: 537-544.
- [162] MITSCHKE M, WALLENTOWITZ H. *Dynamik der Kraftfahrzeuge*[M]. Berlin: Springer, 1972.
- [163] PACEJKA H B, BESSELINK I J M. Magic formula tyre model with transient properties[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1997, 27(S1): 234-249.

- [164] Dürr Group. X-road-curve dynamically tests autonomous cars[EB/OL]. (2018-04-11)[2022-11-03]. <https://www.durr-group.com/en/duerrmore/autonomous-driving>.
- [165] SOLMAZ S, RUDIGIER M, MISCHINGER M. A vehicle-in-the-loop methodology for evaluating automated driving functions in virtual traffic[C]//IEEE. 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York: IEEE, 2020: 1465-1471.
- [166] 赵祥模, 承靖钧, 徐志刚, 等. 基于整车在环仿真的自动驾驶汽车室内快速测试平台[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 124-136. ZHAO Xiang-mo, CHENG Jing-jun, XU Zhi-gang, et al. An indoor rapid-testing platform for autonomous vehicle based on vehicle-in-the-loop simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6): 124-136. (in Chinese)
- [167] DIEWALD A, KURZ C, KANNAN P V, et al. Radar target simulation for vehicle-in-the-loop testing[J]. Vehicles, 2021, 3(2): 257-271.
- [168] SCHYR C, BRISSARD A. Driving cube-a novel concept for validation of powertrain and steering systems with automated driving[C]//CRC Press. In Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'16). Boca Raton: CRC Press, 2016: 79-84.
- [169] LI He-xuan, NALIC D, MAKAPATI V, et al. A real-time co-simulation framework for virtual test and validation on a high dynamic vehicle test bed [C] // IEEE. 2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York: IEEE, 2021: 1132-1137.
- [170] 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.
- [171] WANG Xiao-gang. Intelligent multi-camera video surveillance: a review[J]. Pattern Recognition Letters, 2013, 34(1): 3-19.
- [172] HASCH J, TOPAK E, SCHNABEL R, et al. Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 GHz frequency band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(3): 845-860.
- [173] 王文威. 基于转鼓平台的智能汽车整车在环加速测试研究与实现[D]. 西安: 长安大学, 2020. WANG Wen-wei. Research and implementation of drum-based intelligent vehicle-in-the-loop accelerated evaluation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [174] 于洪峰, 王裕鹏, 华典, 等. 基于摄像头在环的HIL仿真测试与研究[J]. 汽车电器, 2019(12): 4-7. YU Hong-feng, WANG Yu-peng, HUA Dian, et al. Camera ADAS HIL simulation and study[J]. Automobile Electric Parts, 2019(12): 4-7. (in Chinese)
- [175] ZHOU Hai-bo, XU Wen-chao, CHEN Jia-cheng, et al. Evolutionary V2X technologies toward the Internet of vehicles: challenges and opportunities[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(2): 308-323.
- [176] 刘天洋, 余卓平, 熊璐, 等. 智能网联汽车试验场发展现状与建设建议[J]. 汽车技术, 2017(1): 7-11, 32. LIU Tian-yang, YU Zhuo-ping, XIONG Lu, et al. Current development status and construction advice for proving ground of intelligent and connected vehicles[J]. Automobile Technology, 2017(1): 7-11, 32. (in Chinese)
- [177] 李骁驰, 赵祥模, 徐志刚, 等. 面向智能网联交通系统的模块化柔性试验场[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 137-146. LI Xiao-chi, ZHAO Xiang-mo, XU Zhi-gang, et al. Modular flexible test bed for intelligent and connected transportation system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6): 137-146. (in Chinese)
- [178] DUAN Xu-ting, YANG Yue, TIAN Da-xin, et al. A V2X communication system and its performance evaluation test bed[C]//IEEE. 2014 IEEE 6th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC 2014). New York: IEEE, 2014: 1-2.
- [179] SHI Meng-kai, LU Chang, ZHANG Yi, et al. DSRC and LTE-V communication performance evaluation and improvement based on typical V2X application at intersection[C]//IEEE. 2017 Chinese Automation Congress (CAC). New York: IEEE, 2017: 556-561.
- [180] 陈子轩, 马万经, 郝若辰, 等. 面向智能网联车的硬件在环仿真平台[C]//中国智能交通年会学术委员会. 第十三届中国智能交通年会大会论文集. 北京: 中国智能交通年会学术委员会, 2018: 54-63. CHEN Zi-xuan, MA Wan-jing, HAO Ruo-chen, et al. Hardware-in-the-loop simulation testbed for intelligent and connected vehicle[C]//Technical Committee on Annual Conference of ITS China. The 13th Annual Conference of ITS China. Beijing: Technical Committee on Annual Conference of ITS China, 2018: 54-63. (in Chinese)
- [181] 王润民, 张心睿, 王由道, 等. 自动驾驶封闭测试场地建设技术研究与实践[J]. 汽车实用技术, 2020(4): 33-36. WANG Run-min, ZHANG Xin-rui, WANG You-dao, et al. Research and practice on construction technology of closed test field autonomous driving [J]. Automobile Applied Technology, 2020(4): 33-36. (in Chinese)
- [182] 乔冠栋. BIM技术在城市道路设计中的优势与应用研究[J]. 工程建设与设计, 2023(4): 91-93. QIAO Guan-dong. Research on advantages and application of BIM technology in urban road design [J]. Construction and Design for Engineering, 2023(4): 91-93. (in Chinese)
- [183] 鲍秀之, 陈新望, 卢明岳. 建筑物真三维图形的摄影测量方法[J]. 铁路航测, 1996(3): 1-4. BAO Xiu-zhi, CHEN Xin-wang, LU Ming-yue. Photogrammetric methods for real three-dimensional graphics of buildings[J]. Railway Investigation and Surveying, 1996(3): 1-4. (in Chinese)
- [184] THORN E, KIMMEL S C, CHAKA M, et al. A framework for automated driving system testable cases and scenarios[R]. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2018.
- [185] ZACHMAN J A. A framework for information systems

- architecture[J]. IBM Systems Journal, 1987, 26(3): 276-292.
- [186] SPEWAK S H, HILL S C. Enterprise Architecture Planning: Developing a Blueprint for Data, Applications and Technology[M]. Boston: QED Pub. Group, 1993.
- [187] CHETAL A. Federal enterprise architecture[J]. Alphascript Publishing, 2002, 46(4): 258-274.
- [188] LAGERSTRÖM R, SOMMESTAD T, BUSCHLE M, et al. Enterprise architecture management's impact on information technology success[C]// IEEE. 2011 44th Hawaii International Conference on System Sciences. New York: IEEE, 2011: 1-10.
- [189] SIMON G A. DoD (department of defense) protocol reference model[R]. Santa Monica: System Development Corporation, 1982.
- [190] WOOD W G, BARBACCI M, CLEMENTS P, et al. DoD architecture framework and software architecture workshop report[R]. Pittsburgh: Software Engineering Institute of Carnegie Mellon University, 2003.
- [191] 孙雨生, 刘林, 薛彤. IT规划参考模型比较研究[J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(11): 2771-2779, 2823.
- SUN Yu-sheng, LIU Lin, XUE Tong. Comparative research on IT planning reference model[J]. Computer and Digital Engineering, 2019, 47(11): 2771-2779, 2823. (in Chinese)
- [192] 冷丙波. 基于EA的汽车制造行业信息系统集成应用研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2013.
- LENG Bing-bo. The automobile manufacturing industry information system integration application research based on EA [D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2013. (in Chinese)
- [193] 赵祥模, 高赢, 徐志刚, 等. IntelliWay-变耦合模块化智慧高速公路系统一体化架构及测评体系[J]. 中国公路学报, 2023, 36(1): 176-201.
- ZHAO Xiang-mo, GAO Ying, XU Zhi-gang, et al. IntelliWay: an integrated architecture and testing methodology for intelligent highway using varied coupling modularization[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(1): 176-201. (in Chinese)
- [194] 王潇屹, 李俊成, 马雪寒. 自动驾驶汽车感知系统测试用例构建方法研究[J]. 质量与标准化, 2022(1): 51-54.
- WANG Xiao-yi, LI Jun-cheng, MA Xue-han. Research on test case construction method of autonomous vehicle perception system[J]. Quality and Standardization, 2022(1): 51-54. (in Chinese)
- [195] XIA Qin, DUAN Jian-li, GAO Feng, et al. Test scenario design for intelligent driving system ensuring coverage and effectiveness[J]. International Journal of Automotive Technology, 2018, 19(4): 751-758.
- [196] ZOFKA M R, KUHN F, KOHLHAAS R, et al. Data-driven simulation and parametrization of traffic scenarios for the development of advanced driver assistance systems[C]// IEEE. 2015 18th International Conference on Information Fusion (Fusion). New York: IEEE, 2015: 1422-1428.
- [197] 安泽萍, 贺静, 姚翔林. 高速公路智能车路协同系统应用场景库构建研究[J]. 公路, 2021, 66(12): 270-274.
- AN Ze-ping, HE Jing, YAO Xiang-lin. Research on the construction of expressway intelligent vehicle infrastructure cooperative systems application scenario library[J]. Highway, 2021, 66(12): 270-274. (in Chinese)
- [198] 马亚芳, 王文杰, 顾可, 等. 智能网联汽车自动驾驶功能测试分析[J]. 时代汽车, 2021(23): 38-39, 46.
- MA Ya-fang, WANG Wen-jie, GU Ke, et al. Test and analysis of autonomous driving function of intelligent and connected vehicles[J]. Auto Time, 2021(23): 38-39, 46. (in Chinese)
- [199] 刘新. 工信部: 规范智能网联汽车道路测试与示范应用[J]. 中国设备工程, 2021(16): 1.
- LIU Xin. Ministry of industry and information technology: standardizing intelligent networked vehicle road test and demonstration application[J]. China Plant Engineering, 2021(16): 1. (in Chinese)
- [200] LI Li, HUANG Wu-ling, LIU Yue-hu, et al. Intelligence testing for autonomous vehicles: a new approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(2): 158-166.
- [201] LI Li, LIN Yi-lun, ZHENG Nan-ning, et al. Artificial intelligence test: a case study of intelligent vehicles[J]. Artificial Intelligence Review, 2018, 50(3): 441-465.
- [202] WOOLDRIDGE M, JENNINGS N R. Intelligent agents: theory and practice[J]. The Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2): 115-152.
- [203] HUANG Hui-ming, PAVEK K, NOVAK B, et al. A framework for autonomy levels for unmanned systems (ALFUS)[C]// AUVSI. Proceedings of the AUVSI's unmanned systems North America. New York: AUVSI, 2005: 849-863.
- [204] NAGAI M S, INOUE H. Research into ADAS with autonomous driving intelligence for future innovation[C]// Springer. 5th International Munich Chassis Symposium 2014. Berlin: Springer, 2014: 779-793.
- [205] PAYALAN Y F, GUVENSAN M A. Towards next-generation vehicles featuring the vehicle intelligence[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(1): 30-47.
- [206] WU Xin-zheng, XING Xing-yu, CHEN Jun-yi, et al. Risk assessment method for driving scenarios of autonomous vehicles based on drivable area[C]// IEEE. 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2022: 2206-2213.
- [207] 蒙昊蓝, 陈君毅, 王斌, 等. 车辆行驶行为的负性刺激对乘员预期的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 759-766.
- MENG Hao-lan, CHEN Jun-yi, WANG Bin, et al. Effect of negative stimulus caused by vehicle maneuver on passenger's expectation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(5): 759-766. (in Chinese)
- [208] BELLEM H, THIEL B, SCHRAUF M, et al. Comfort in

- automated driving: an analysis of preferences for different automated driving styles and their dependence on personality traits[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2018, 55: 90-100.
- [209] MA Yi-ning, SUN Chen, CHEN Jun-yi, et al. Verification and validation methods for decision-making and planning of automated vehicles: a review[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2022, 7(3): 480-498.
- [210] MENG Hao-lan, CHEN Jun-yi, FENG Tian-yue, et al. An interactive car-following model (ICFM) for the harmony-with-traffic evaluation of autonomous vehicles[C]//SAE International. 2023 WCX SAE World Congress Experience. Warrendale: SAE International, 2023: 01881765.
- [211] 朱西产, 魏昊舟, 马志雄. 基于自然驾驶数据的跟车场景潜在风险评估[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(4): 169-181.
- ZHU Xi-chan, WEI Hao-zhou, MA Zhi-xiong. Assessment of the potential risk in car-following scenario based on naturalistic driving data[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(4): 169-181. (in Chinese)
- [212] SHALEV-SHWARTZ S, SHAMMAH S, SHASHUA A. On a formal model of safe and scalable self-driving cars[J]. *arxiv*, 2017, DOI: 1708.06374.
- [213] BAE I, MOON J, SEO J. Toward a comfortable driving experience for a self-driving shuttle bus[J]. *Electronics*, 2019, 8(9): 943.
- [214] TASHIRO M, MOTOYAMA H, ICHIOKA Y, et al. Simulation analysis on optimal merging control of connected vehicles for minimizing travel time[J]. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 2020, 18(1): 65-76.
- [215] CHU K, LEE M, SUNWOO M. Local path planning for off-road autonomous driving with avoidance of static obstacles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(4): 1599-1616.
- [216] CHAI Chen, ZENG Xian-ming, WU Xiang-bin, et al. Evaluation and optimization of responsibility-sensitive safety models on autonomous car-following maneuvers[J]. *Transportation Research Record*, 2020, 2674(11): 662-673.
- [217] CAO Peng, XU Zhan-dong, FAN Qiao-chu, et al. Analysing driving efficiency of mandatory lane change decision for autonomous vehicles[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2019, 13(3): 506-514.
- [218] CHEN Bai-ming, CHEN Xiang, WU Qiong, et al. Adversarial evaluation of autonomous vehicles in lane-change scenarios[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 10333-10342.
- [219] 蒙昊蓝, 陈君毅, 邢星宇, 等. 汽车乘员不舒适感的客观表征研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(增 1): 54-63.
- MENG Hao-lan, CHEN Jun-yi, XING Xing-yu, et al. Study on objective representation of passenger discomfort[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(S1): 54-63. (in Chinese)
- [220] SUN Yang, XIONG Guang-ming, CHEN Hui-yan, et al. A cost function-oriented quantitative evaluation method for unmanned ground vehicles[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 301/302/303: 701-706.
- [221] SUN Yang, YANG He, MENG Fei. Research on an intelligent behavior evaluation system for unmanned ground vehicles[J]. *Energies*, 2018, 11(7): 1764.
- [222] PAN Ang, ZHANG Xin, IRYO-ASANO M, et al. Efficiency and safety evaluation of left-turn vehicles and crossing pedestrians in signalized intersections under the autonomous vehicle mixed flow condition[J]. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 2022, 20(1): 103-116.
- [223] 陈君毅, 陈磊, 蒙昊蓝, 等. 两车交互场景中的车辆交通协调性评价方法[J]. *汽车技术*, 2020(11): 1-7.
- CHEN Jun-yi, CHEN Lei, MENG Hao-lan, et al. Evaluation method of the harmony with traffic in two-vehicle interaction scenarios[J]. *Automobile Technology*, 2020(11): 1-7. (in Chinese)
- [224] XIA Qin, DUAN Jian-li, GAO Feng, et al. Automatic generation method of test scenario for ADAS based on complexity[C]//SAE International. SAE Intelligent and Connected Vehicles Symposium. Warrendale: SAE International, 2017: 1-9.
- [225] 马依宁, 姜为, 吴靖宇, 等. 基于不同风格行驶模型的自动驾驶仿真测试自演绎场景研究[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(2): 216-228.
- MA Yi-ning, JIANG Wei, WU Jing-yu, et al. Self-evolution scenarios for simulation tests of autonomous vehicles based on different models of driving styles[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(2): 216-228. (in Chinese)
- [226] XING Jing, MANNING C A. Complexity and automation displays of air traffic control: literature review and analysis[R]. Washington DC: US Department of Transportation, 2005.
- [227] XING Jing. Measures of information complexity and the implications for automation design[R]. Washington DC: US Department of Transportation, 2004.
- [228] CASTI J L. Connectivity, Complexity and Catastrophe in Large-Scale Systems[M]. New York: John Wiley and Sons, 1979.
- [229] CRUTCHFIELD J P, YOUNG K. Inferring statistical complexity[J]. *Physical Review Letters*, 1989, 63(2): 105-108.
- [230] SUSSMAN J M. The new transportation faculty: the evolution to engineering systems[J]. *Transportation Quarterly*, 1999, 53(3): 15-26.
- [231] MA Yi-ning, PAN Xin-fu, XIONG Lu, et al. Definition and quantification of the complexity experienced by autonomous vehicles in the environment and driving task[C]//CICTP. 2020 COTA International Conference of Transportation Professionals. Reston: CICTP, 2020: 1030-1042.
- [232] ZHANG Ling-tong, MA Yi-ning, XING Xing-yu, et al. Research on the complexity quantification method of driving scenarios based on information entropy[C]//IEEE. 2021 IEEE

- International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). New York: IEEE, 2021: 3476-3481.
- [233] BOELHOUWER A, BEUKEL A P V D, VOORT M C, et al. Determining infrastructure-and traffic factors that increase the perceived complexity of driving situations[C]// Springer. Advances in Human Aspects of Transportation: Proceedings of the AHFE 2020 Virtual Conference on Human Aspects of Transportation. Berlin: Springer, 2020: 3-10.
- [234] LIU Yong-kang, HANSEN J H L. Towards complexity level classification of driving scenarios using environmental information[C]// IEEE. 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). New York: IEEE, 2019: 810-815.
- [235] COVER T M, THOMAS J A. Elements of Information Theory[M]. New York: John Wiley and Sons, 2001.
- [236] MUELLER J, STANLEY L, MARTIN T, et al. Driving simulator and scenario effects on driver response[C]// IISE. Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference. Montreal: IISE, 2014: 507-513.
- [237] WANG Jia-jie, ZHANG Chi, LIU Yue-hu, et al. Traffic sensory data classification by quantifying scenario complexity[C]// IEEE. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York: IEEE, 2018: 1543-1548.
- [238] GAO Feng, DUAN Jian-li, HE Ying-dong, et al. A test scenario automatic generation strategy for intelligent driving systems[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 1-10.
- [239] LOWRIE J W, THOMAS M, GREMBAN K, et al. The autonomous land vehicle (ALV) preliminary road-following demonstration[C]// SPIE. Intelligent Robots and Computer Vision IV. Washington DC: SPIE, 1985: 336-350.
- [240] POMERLEAU D. RALPH: rapidly adapting lateral position handler[C]// IEEE. Proceedings of the Intelligent Vehicles' 95. Symposium. New York: IEEE, 2002: 506-511.
- [241] BROGGI A, BERTOZZI M, FASCIOLI A. ARGO and the Mille Miglia in automatic tour[J]. IEEE Intelligent Systems and Their Applications, 1999, 14(1): 55-64.
- [242] MAURER M, BEHRINGER R, FURST S, et al. A compact vision system for road vehicle guidance[C]// IEEE. Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition. New York: IEEE, 1996: 313-317.
- [243] MCWILLIAMS G T, BROWN M A, LAMM R D, et al. Evaluation of autonomy in recent ground vehicles using the autonomy levels for unmanned systems (ALFUS) framework[C]// IEEE. Proceedings of the 2007 Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems. New York: ACM, 2007: 54-61.
- [244] WANG Yue-chao, LIU Jin-guo. Evaluation methods for the autonomy of unmanned systems[J]. Chinese science bulletin, 2012, 57(26): 3409-3418.
- [245] SUN Yang, CHEN Hui-yan. Research on test and evaluation of unmanned ground vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(6): 978-986.
- [246] 陈君毅,李如冰,邢星宇,等.自动驾驶车辆智能性评价研究综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 1785-1790, 1824.
- CEHN Jun-yi, LI Ru-bing, XING Xing-yu, et al. Survey on intelligence evaluation of autonomous vehicles[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(12): 1785-1790, 1824. (in Chinese)
- [247] 蒙昊蓝,陈君毅,陈磊,等.基于自然驾驶数据的匝道行驶典型场景聚类分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(增1): 123-131.
- MENG Hao-lan, CHEN Jun-yi, CHEN Lei, et al. Clustering analysis of typical ramp scenarios based on naturalistic driving data[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(S1): 123-131. (in Chinese)
- [248] WEI Jun-qing, DOLAN J M, LITKOUHI B. Autonomous vehicle social behavior for highway entrance ramp management[C]// IEEE. 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York: IEEE, 2013: 201-207.
- [249] LETTER C, ELEFTERIADOUL. Efficient control of fully automated connected vehicles at freeway merge segments[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 80: 190-205.
- [250] NTOUSAKIS I A, NIKOLOS I K, PAPAGEORGIOU M. Optimal vehicle trajectory planning in the context of cooperative merging on highways[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 71: 464-488.
- [251] PARMAR H, CHAKROBORTY P, KUNDU D. Modelling automobile drivers' toll-lane choice behaviour at a toll plaza using mixed logit model[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, 104: 593-600.
- [252] 陈君毅,陈磊,蒙昊蓝,等.基于神经网络的车辆交通协调性评价模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 135-141.
- CHEN Jun-yi, CHEN Lei, MENG Hao-lan, et al. Evaluation model of harmony with traffic based on neural network[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(1): 135-141. (in Chinese)
- [253] VIRES. Virtual test drive[EB/OL]. (2022-11-11)[2022-11-03]. <https://hexagon.com/products/virtual-test-drive>.
- [254] NVIDIA. NVIDIA drive end-to-end solutions for autonomous vehicles[EB/OL]. (2022-01-13)[2022-11-03]. <https://developer.nvidia.com/drive>.
- [255] OICA. Future certification of automated/autonomous driving Systems[EB/OL]. (2019-01-28)[2022-11-03]. <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2019/wp29grva/GRVA-02-09e.pdf>.
- [256] 王润民,赵祥模,徐志刚,等.一种自动驾驶整车在环虚拟仿真测试平台设计[J]. 汽车技术, 2022(4): 1-7.
- WANG Run-min, ZHAO Xiang-mo, XU Zhi-gang, et al. Design of virtual simulation test platform based on vehicle-in-the-loop for automatic driving[J]. Automobile Technology, 2022(4): 1-7. (in Chinese)
- [257] SON T D, BHAVE A, VAN DER AUWERAER H.

- Simulation-based testing framework for autonomous driving development[C]//IEEE. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), New York: IEEE, 2019: 576-583.
- [258] 刘法旺,曹建永,张志强,等. 基于场景的智能网联汽车“三支柱”安全测试评估方法研究[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(1): 1-7.
- LIU Fa-wang, CAO Jian-yong, ZHANG Zhi-qiang, et al. A scenario-based “three-pillar” safety testing and assessment method for intelligent and connected vehicles[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2023, 13(1): 1-7. (in Chinese)
- [259] KIM B J, LEE S B. Safety evaluation of autonomous vehicles for a comparative study of camera image distance information and dynamic characteristics measuring equipment[J]. IEEE Access, 2022, 10: 18486-18506.
- [260] ZHANG Pei-xing, ZHU Bing, ZHAO Jian, et al. Safety evaluation method in multi-logical scenarios for automated vehicles based on naturalistic driving trajectory[J]. Accident Analysis and Prevention, 2023, 180: 106926.
- [261] 吴盛豪,郑素丽,杨璐琦. 国外自动驾驶汽车标准化发展趋势及其对我国的启示[J]. 标准科学, 2021(11): 16-24.
- WU Sheng-hao, ZHENG Su-li, YANG Lu-qi. Development trend of standardization of overseas autonomous vehicles and its enlightenment to China[J]. Standard Science, 2021(11): 16-24. (in Chinese)
- [262] 贺锦鹏,马芳武,刘卫国,等. 汽车前碰撞预警系统 ISO 15623 标准和 NHTSA 26555 评价规程对比试验[J]. 汽车技术, 2014(7): 28-33.
- HE Jin-peng, MA Fang-wu, LIU Wei-guo, et al. Comparative test between ISO 15623 on forward vehicle collision warning system and NHTSA 26555 assessment program[J]. Automobile Technology, 2014(7): 28-33. (in Chinese)
- [263] 曹建永,曹寅,张建文. 基于 Euro-NCAP 的汽车主动安全测试技术分析[J]. 质量与标准化, 2016(3): 55-58.
- CAO Jian-yong, CAO Yin, ZHANG Jian-wen. Analysis of vehicle active safety testing technology based on Euro-NCAP[J]. Quality and Standardization, 2016(3): 55-58. (in Chinese)
- [264] 唐波. ANCAP 的先进碰撞试验技术[J]. 汽车与配件, 2013(9): 21-23.
- TANG Bo. Advanced crash test technology of ANCAP[J]. Automobile and Parts, 2013(9): 21-23. (in Chinese)
- [265] 郭飞,赵磊,党国峰. 汽车检测机构与 C-NCAP 体系研究[J]. 中国高新区, 2019(7): 36-37.
- GUO Fei, ZHAO Lei, DANG Guo-feng. Research on automobile detection organization and C-NCAP system[J]. Science and Technology Industry Parks, 2019(7): 36-37. (in Chinese)
- [266] PEREZ M A, KIEFER R J, HASKINS A, et al. Evaluation of forward collision warning system visual alert candidates and SAE J2400[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2009, 2(1): 750-764.
- [267] 李海岩,杨振,贺丽娟,等. 全球 NCAP 行人保护测评的对比研究及展望[J]. 汽车工程, 2021, 43(5): 730-738.
- LI Hai-yan, YANG Zhen, HE Li-juan, et al. Comparative study and prospect of pedestrian protection assessment in global NCAP[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(5): 730-738. (in Chinese)
- [268] 王玉梅,郭庆祥. Euro-NCAP 更新对乘用车安全评价的影响[J]. 汽车工程师, 2014(4): 18-22.
- WANG Yu-mei, GUO Qing-xiang. Effect on updated Euro-NCAP on safety evaluation for a passenger car[J]. Automotive Engineer, 2014(4): 18-22. (in Chinese)
- [269] 林高泽,杨海燕,周大永,等. E-NCAP V8.0 与 J-NCAP 行人保护性能试验规程对比[J]. 汽车工程师, 2015(12): 13-17.
- LIN Gao-ze, YANG Hai-yan, ZHOU Da-yong, et al. Pedestrian protection test method comparison between E-NCAP V8.0 and J-NCAP[J]. Automotive Engineer, 2015(12): 13-17. (in Chinese)
- [270] 王云鹏. 坚守安全底线 加强监管创新—构建包容审慎的汽车安全沙盒监管制度[J]. 中国市场监管研究, 2022(4): 5-6, 54.
- WANG Yun-peng. Insisting on safety base line and enhancing regulation innovation—build an inclusive and prudent vehicle safety sandbox regulatory system[J]. Research on China Market Supervision, 2022(4): 5-6, 54. (in Chinese)
- [271] 王乐兵. 自动驾驶汽车的缺陷及其产品责任[J]. 清华法学, 2020, 14(2): 93-112.
- WANG Le-bing. Defects in autonomous vehicles and their product liability[J]. Tsinghua Law Review, 2020, 14(2): 93-112. (in Chinese)
- [272] GAO Zhi-wei, CECATI C, DING S X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques—part I: fault diagnosis with model-based and signal-based approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3757-3767.
- [273] JIANG Yu-chen, YIN Shen, KAYNAK O. Optimized design of parity relation-based residual generator for fault detection: data-driven approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(2): 1449-1458.
- [274] ZHANG Zi-long, ZHAO Zhi-bin, LI Xiao-long, et al. Faster multiscale dictionary learning method with adaptive parameter estimation for fault diagnosis of traction motor bearings[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 3504113.
- [275] CHOI K, KIM Y, KIM S K, et al. Current and position sensor fault diagnosis algorithm for PMSM drives based on robust state observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 5227-5236.
- [276] GAO Zhi-wei, CECATI C, DING S X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques—part II: fault diagnosis with knowledge-based and hybrid/active approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3768-3774.
- [277] BEN LAKHAL N M, ADOUANE L, NASRI O, et al. Interval-based solutions for reliable and safe navigation of intelligent autonomous vehicles[C]//IEEE. 2019 12th

- International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo). New York: IEEE, 2019: 124-130.
- [278] BANDO M, ONO Y, HIEIDA Y, et al. GNSS fault detection with unmodeled error[J]. *Advanced Robotics*, 2017, 31(15): 763-779.
- [279] LIU Jing, WEI Yan-hui, HAO Sheng-gong. A fault diagnosis method for INS/DVL/USBL integrated navigation system based on support vector regression[C]// IEEE. OCEANS 2019-Marseille. New York: IEEE, 2019: 1-8.
- [280] VAN WYK F, WANG Yi-yang, KHOJANDI A, et al. Real-time sensor anomaly detection and identification in automated vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(3): 1264-1276.
- [281] KANAPRAM D T, MARIN-PLAZA P, MARCENARO L, et al. Self-awareness in intelligent vehicles: feature based dynamic Bayesian models for abnormality detection[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2020, 134: 103652.
- [282] AN J, CHO S. Variational autoencoder based anomaly detection using reconstruction probability[J]. *Special Lecture on IE*, 2015, 2(1): 1-18.
- [283] PANG Guan-song, SHEN Chun-hua, CAO Long-bing, et al. Deep learning for anomaly detection: a review[J]. *ACM Computing Surveys*, 2021, 54(2): 1-38.
- [284] CHI Yuan-fang, DONG Yan-jie, WANG Z J, et al. Knowledge-based fault diagnosis in industrial internet of things: a survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(15): 12886-12900.
- [285] KHALASTCHI E, KALECH M. On fault detection and diagnosis in robotic systems[J]. *ACM Computing Surveys*, 2018, 51(1): 1-24.
- [286] SANDOVAL-PILLAJO L, TARUPI A, BASANTES A, et al. Expert system for diagnosis of motor failures in electronic injection vehicles[C]// IEEE. 2019 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS). New York: IEEE, 2019: 259-266.
- [287] 刘磊. 装备智能故障诊断及测试性验证与评价方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- LIU Lei. Research on intelligent fault diagnosis and testability verification and evaluation methods of equipment[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017. (in Chinese)
- [288] 邓露, 许爱强, 赵秀丽. 基于故障属性的测试性验证试验样本分配方案[J]. *测试技术学报*, 2014, 28(2): 103-107.
- DENG Lu, XU Ai-qiang, ZHAO Xiu-li. Allocation plan of samples based on failure attribute in testability demonstration test[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2014, 28(2): 103-107. (in Chinese)
- [289] 余思奇, 景博, 黄以锋. 基于贡献度的测试性验证试验样本分配方案研究[J]. *中国测试*, 2015, 41(2): 91-95.
- YU Si-qi, JING Bo, HUANG Yi-feng. Study on allocation scheme of failure sample in testability validation tests based on contribution[J]. *China Measurement and Test*, 2015, 41(2): 91-95. (in Chinese)
- [290] 李天梅. 装备测试性验证试验优化设计与综合评估方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- LI Tian-mei. Research on optimization design and integrated evaluation of testability verification test for equipments[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [291] 石君友, 康锐, 田仲. 基于信息模型的测试性试验样本充分性研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(8): 874-878.
- SHI Jun-you, KANG Rui, TIAN Zhong. Study on sufficiency of sample set in testability demonstration based on information model[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(8): 874-878. (in Chinese)
- [292] 冯浩. 高速公路自动驾驶系统感知模块预期功能安全研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- FENG Hao. Research on safety of the intended functionality of perception module for highway pilot system[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [293] PRIISALU M, PIRINEN A, PADURARU C, et al. Generating scenarios with diverse pedestrian behaviors for autonomous vehicle testing[C]// PMLR. Proceedings of the 5th Conference on Robot Learning. New York: PMLR, 2021: 1247-1258.
- [294] 360 智能网联汽车安全实验室. 智能网联汽车信息安全发展趋势分析[J]. *智能网联汽车*, 2020(3): 54-63.
- 360 Intelligent and Connected Vehicle Security Laboratory. Analysis on the development trend of intelligent network automobile information security[J]. *Intelligent Connected Vehicles*, 2020(3): 54-63. (in Chinese)
- [295] KIM K, KIM J S, JEONG S, et al. Cybersecurity for autonomous vehicles: review of attacks and defense[J]. *Computers and Security*, 2021, 103: 102150.
- [296] PHAM M, XIONG Kai-qi. A survey on security attacks and defense techniques for connected and autonomous vehicles[J]. *Computers and Security*, 2021, 109: 102269.
- [297] 周媛媛. 车联网信息安全测试技术分析及应用[J]. *北京汽车*, 2020(2): 23-27.
- ZHOU Yuan-yuan. Analysis and application of Internet of vehicles information security testing technology[J]. *Beijing Automotive Engineering*, 2020(2): 23-27. (in Chinese)
- [298] 刘法旺, 李艳文. 自动驾驶系统功能安全与预期功能安全研究[J]. *工业技术创新*, 2021, 8(3): 62-68.
- LIU Fa-wang, LI Yan-wen. Research on functional safety and safety of the intended functionality for automated driving system[J]. *Industrial Technology Innovation*, 2021, 8(3): 62-68. (in Chinese)
- [299] 邹博松, 朱科屹, 王奔捷. 智能网联汽车信息安全测试及分析[J]. *智能网联汽车*, 2020(6): 56-58.
- ZOU Bo-song, ZHU Ke-yi, WANG Hui-jie. Test and analysis of intelligent network automobile information security[J]. *Intelligent Connected Vehicle*, 2020(6): 56-58. (in Chinese)