

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/335136035>

Research progress on scene-based virtual test of autonomous driving vehicles

Article in Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport · August 2019

CITATIONS

0

READS

42

4 authors, including:



Zhigang Xu

Chang'an University

64 PUBLICATIONS 200 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Sustainable pavement [View project](#)



Optimization and Testing for Truck Platoon Considering Communication Delay(NSFC 61973045) [View project](#)

文章编号:1001-7372(2019)06-0001-19

基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试研究进展

朱冰¹, 张培兴¹, 赵健¹, 陈虹¹, 徐志刚², 赵祥模², 邓伟文³

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130025; 2. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 3. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:随着自动驾驶等级的提高,面向传统汽车的测试工具与测试方法已不能满足自动驾驶汽车测试的需要。基于场景的虚拟测试方法在测试效率、测试成本等方面具有巨大的技术优势,是未来自动驾驶汽车测试验证的重要手段,已成为当前的研究热点。通过对大量相关文献的系统梳理,综述了基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试研究进展。对比分析了自动驾驶测试场景的不同定义方式,明确了测试场景的内涵,归纳了测试场景的要素种类,概述了测试场景的数据来源,总结了场景数据的处理方法。在此基础上,对自动驾驶汽车虚拟测试方法进行了总结,分析了典型的测试方式、测试平台和虚拟测试的技术要点,梳理了软件在环、硬件在环和车辆在环测试方案及其关键技术。针对自动驾驶汽车测试效率问题,研究了基于场景的加速测试技术,概述了典型的测试场景随机生成方法和危险场景强化生成方法。最后,对基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试所面临的问题及未来发展趋势进行了分析和展望。研究结果表明:基于场景的虚拟测试是推动自动驾驶技术发展和产业落地的必由之路,未来研究应着力突破基于解构与自动重构的测试场景数据库、人-车-环境系统一体化高置信度建模、自动驾驶汽车虚拟测试标准工具链、不同自动驾驶汽车渗透率下的混合交通模拟与测试、测试案例动态自适应随机生成机制等核心共性技术,建立自动驾驶汽车虚拟测试标准体系。

关键词:汽车工程;自动驾驶汽车测试;综述;测试场景;虚拟测试

中图分类号:U467.13 文献标志码:A DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.06.001

Review of Scenario-based Virtual Validation Methods for Automated Vehicles

ZHU Bing¹, ZHANG Pei-xing¹, ZHAO Jian¹, CHEN Hong¹,
XU Zhi-gang², ZHAO Xiang-mo², DENG Wei-wen³

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, Jilin, China; 2. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
3. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Owing to the advancement in autonomous driving technology, testing tools and testing methods for conventional automobiles cannot meet the validation requirements of autonomous vehicles. Scenario-based virtual validation methods have technical superiority with respect to testing efficiency and time consumption. Such methods can aid in conducting autopilot test verification in the future and have thus drawn significant research interest. In this study, through

收稿日期:2019-03-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0105103);国家自然科学基金项目(51775235);

吉林省科技发展规划项目(20180201056GX);吉林省发改委科技研发项目(2019C036-6)

作者简介:朱冰(1982-),男,吉林双辽人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhubing@jlu.edu.cn。

通讯作者:赵健(1978-),男,辽宁锦州人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhaojian@jlu.edu.cn。

the systematic analysis of a large number of related literature, the developmental history of scenario-based virtual testing associated with autonomous vehicles is reviewed. The differences among scenario definitions were compared and the connotation of a test scenario was defined. Various types of elements, data sources, and processing methods associated with scenarios were specified, based on which, various virtual testing methods for autonomous vehicles were identified and listed. Typical virtual testing methods, test platforms, and virtual test points were subsequently analyzed, and key technologies corresponding to software-in-the-loop testing, hardware-in-the-loop testing, and vehicle-in-the-loop testing were outlined. To address the issue of inadequate testing efficiency associated with the virtual testing process, scenario-based automated driving acceleration test technology was studied. Typical random scenario test generation methods and crucial scenario reinforcement generation methods were thereby determined and listed. Furthermore, issues and future development trends associated with scenario-based virtual validation of autonomous vehicles were also analyzed. The obtained results indicate that scenario-based virtual testing is essential for promoting the development of autopilot technology. Additionally, further research needs to be conducted on aspects, such as the development of test scenario database based on deconstruction and automatic reconfiguration, high-confidence models for human-vehicle-environment integration system, primary technologies for supporting virtual testing of automated vehicle driving through standard tool chains, mixed traffic simulation with testing under different autonomous vehicle penetration rates, iterative optimization and adaptive acceleration testing of automated driving, and establishment of standard systems for virtual testing of autonomous vehicles.

Key words: automotive engineering; validation of autonomous vehicle; review; test scenario; virtual testing

0 引言

随着人工智能技术的发展,自动驾驶汽车为解决传统汽车“交通拥堵、环境污染、事故频发、能源短缺”等问题提供了新的途径^[1]。科学完善的测试评价体系对提高自动驾驶汽车研发效率、健全技术标准和法律法规、推进相关产业创新发展至关重要。为保障自动驾驶汽车上路的安全性,美国于2016年出台《自动驾驶法案》,首次对自动驾驶汽车的生产、测试和部署进行监管^[2]。随着自动驾驶等级的提高,汽车系统复杂性进一步增加,多变的天气、复杂的交通环境、多样的驾驶任务和动态的行驶状态等都为自动驾驶汽车测试评价提出了新的挑战^[3-6]。特别是自动驾驶汽车的测试评价对象已经从传统汽车的人、车二元独立系统变为人-车-环境-任务强耦合系统。传统的道路场地测试已经无法满足自动驾驶汽车的测试需求,有数据显示,自动驾驶汽车最少需进行2.4亿km的测试且没有事故发生,才能证明其系统安全性不低于人类驾驶人^[7-8]。

基于场景的虚拟测试技术试验场景配置灵活、

测试效率高、测试重复性强、测试过程安全、测试成本低,可实现自动测试和加速测试,节省了大量人力物力。因此,基于场景的虚拟测试已成为自动驾驶汽车测试评价不可或缺的重要环节。国内外众多科研机构和研究人员都对此开展了广泛的研究^[9-12]。例如,美国的Waymo和中国的百度等在自动驾驶汽车领域处于世界领先的公司均建立了自动驾驶模拟系统,开展了大量的虚拟测试^[13-14]。

纵观现有研究,基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试主要包含以下3个方面重要内容:

(1)自动驾驶测试场景:测试场景是自动驾驶测试的核心和源头,包含测试场景的定义、要素分析、数据采集和数据处理等核心内容。

(2)自动驾驶虚拟测试平台:测试平台是自动驾驶虚拟测试的工具基础,包含模型在环测试(Model-in-the-Loop, MiL)、硬件在环测试(Hardware-in-the-Loop, HiL)、整车在环测试(Vehicle-in-the-Loop, ViL)等多种平台体系。

(3)自动驾驶加速测试方法:加速测试是自动驾驶虚拟测试的重要优势,如何利用有限的场景和特

征反映无限丰富与复杂的行驶环境,建立基于概率分布的危险场景强化随机模拟方法是加速测试需要解决的关键问题。

本文将从以上3个方面对基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试研究进行总结和归纳,对目前研究所面临的问题及未来的发展趋势进行分析和展望。

1 自动驾驶测试场景

1.1 场景的定义

“场景”(Scenerio)一词来源于拉丁语 Olinda,意为舞台剧,现泛指生活中特定的情景^[15-16]。随着科技的发展,场景的概念逐渐应用于工业生产的开发测试过程中。

基于场景的测试最先应用于软件系统的开发,“场景”用来描述系统的使用方式、使用要求、使用环境,以及构想更多可行的系统^[17-20]。此后,很多领域都对场景一词进行了各自学科内的定义,例如气候变化^[21]、能源工业^[22]等。但现阶段在自动驾驶领域,“场景”尚没有明确统一的定义。自 Schieben 等^[23]将场景的概念应用于自动驾驶测试以来,许多学者都提出了各自对自动驾驶测试场景一词的理解。Elrofai 等^[24]提出“场景是在一个特定时间范围内,测试车辆周围动态环境的持续变化,包括测试车辆在该环境中的行为”。Koskimies^[25]认为“场景是系统在执行特定任务时的一系列事件的非正式描述”,可使用一种面向对象的建模方法来描述场景。RAND 公司在自动驾驶研究报告中提出“场景是用来检测和验证自动驾驶系统在特定行驶环境下行为能力的一系列要素的组合”。PEGASUS 项目根据自动驾驶产品开发的阶段、系统开发阶段和测试阶段对场景的需求差异,分别提出了对应的功能场景、逻辑场景和具体场景概念^[26]。西安交通大学郑南宁院士将场景定义为“某个交通场合在特定时间和特定空间中的具体情形或景象,它可以定义为一组实体,这些实体可给出当前环境丰富的感知数据描述”^[27]。综合以上观点,这些场景定义在核心要素上存在一致性:都包含道路环境要素、其他交通参与者、车辆驾驶任务,同时,这些要素都会持续一定时间、具有动态变化的特性。

因此,自动驾驶测试场景的内涵可以理解为:场景是自动驾驶汽车与其行驶环境各组成要素在一段时间内的总体动态描述,这些要素组成由所期望检验的自动驾驶汽车的功能决定。简言之,场景可认为是自动驾驶汽车行驶场合与驾驶情景的有机组合。

自动驾驶测试场景具有无限丰富、极其复杂、难

以预测、不可穷尽等特点,因此,用于虚拟测试的场景应满足可量化(场景的各个要素特征可以被量化)、可复现(场景在目前技术基础和测试软件上可以进行复现)和高保真(能够在一定程度上呈现或反映真实世界中的场景)的要求。

1.2 场景的要素种类

确定场景要素是进行基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试的首要环节。OpenDrive 和 OpenScenario 是目前最为常用的场景描述开源文件格式,其对场景要素中的道路要素和交通动态要素进行了详细的规定^[28-29]。

但现阶段,针对场景要素的种类和具体内容,不同研究者之间仍存在争议。Go 等^[30]在软件设计领域提出的场景要素4个基本类型为主体、主体的背景环境、主体的目标和主体的一系列行动。Ulbrich 等^[31]提出自动驾驶测试场景要素应包括测试车辆、交通环境要素、驾驶任务信息以及特定的驾驶行为,自动驾驶车辆是测试场景的一部分。Geyer 等^[32]则认为场景是自动驾驶测试时预先定义的驾驶环境、驾驶任务、静态要素和动态要素,测试车辆本身不包含于场景中。Korbinian 等^[33]也将测试车辆排除,将场景要素分为3类,环境部分(天气、光照、风速等)、静态部分(车道线、树木、障碍物)和动态部分(交通参与者、行人)。RAND 公司最新报告中将场景要素分为5层,分别为道路信息层(车道线、路口形状、车道数等)、道路基础设施层(交通指示牌、树木、护栏等)、道路信息层与道路设施层的动态变化(道路维修、树木折断、障碍物移动等)、动态目标(行人、交通参与者)、环境状况(光线、天气),不包含测试车辆。

Matthaei 等^[34]对天气和光照是否应列为场景要素进行了讨论。Erwin 等^[35]认为在系统开发的前期,场景只需道路和其他交通参与者的基本信息。

自动驾驶汽车在测试过程中,测试车辆本身会对周围场景要素,尤其是其他交通参与者产生明显的影响,测试车辆和周围驾驶环境之间相互作用形成闭环。同时,测试车辆的固有状态会对自动驾驶系统的行为决策起到关键影响,例如在超车时车辆的加速性能对决策的执行起到决定作用。因此,测试车辆应作为测试场景的一部分,与周围行驶环境构成测试场景的整体。基于这个理念,本文综合上述场景要素研究,提出了如图1所示的场景要素具体情况。由图1可见,测试场景要素主要包括测试车辆基础信息和交通环境要素2大类,其中,测试车辆基础信息又包括测试车辆基础要素、目标信息以

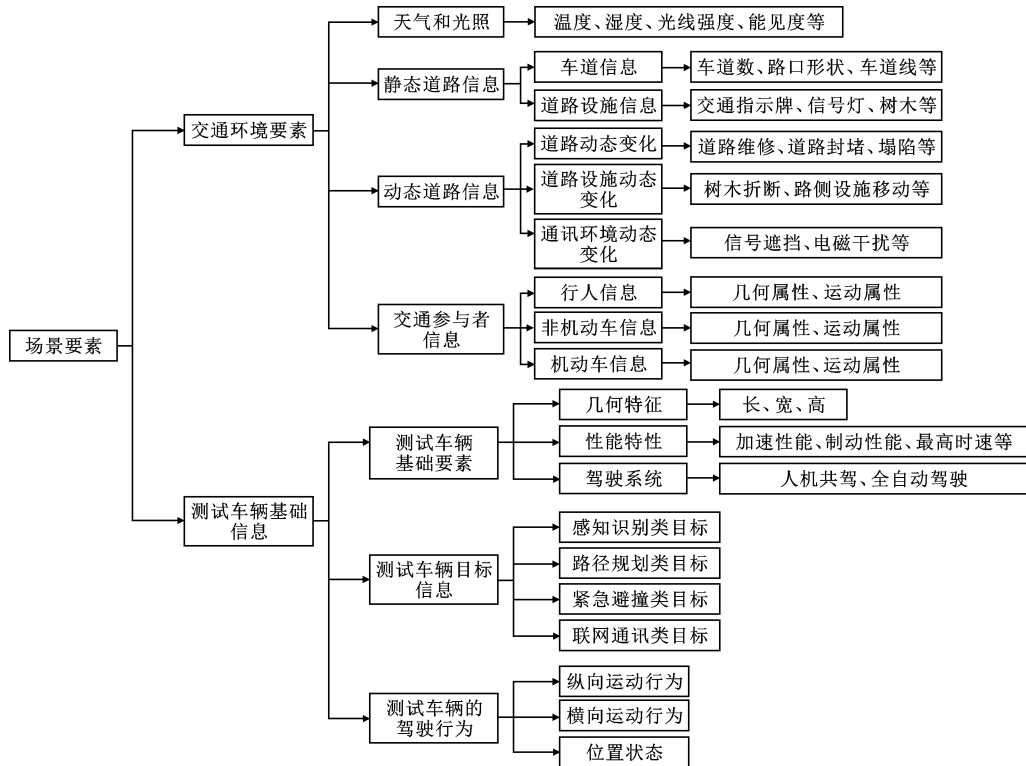


Fig. 1 Scenario Element Details

及驾驶行为 3 类;交通环境要素包括天气和光照、静态道路信息、动态道路信息和交通参与者信息 4 类。

1.3 场景的数据来源

为保证自动驾驶汽车测试时的场景类型足够丰富,需要收集大量的典型场景数据并建立测试场景库。目前,很多国家都已着手构建自动驾驶测试场景库,以期在自动驾驶测试领域占得先机^[36]。例如,德国的 PEGASUS、KITTI,美国的 NHTSA 自动驾驶测试架构项目、加州大学伯克利分校 BDD100K,中国的“昆仑计划”、百度 ApolloScape 等均致力于为自动驾驶技术研究和测试提供更为实用的场景数据资源^[37]。

自动驾驶测试场景的数据来源主要包括真实数据、模拟数据和专家经验等 3 个部分,具体内容如图 2 所示。

(1)真实数据。真实数据来源主要包括自然驾驶数据、事故数据、路侧单元监控数据,以及驾驶人考试、智能汽车封闭试验场测试、开放道路测试等典型测试数据。

自然驾驶数据是通过在传统汽车上加装雷达、摄像头、高精度惯导等多传感器采集平台,在车辆正常行驶的过程中所采集的场景要素数据。典型的自然驾驶数据采集工况包括高速公路、城市道路、停车

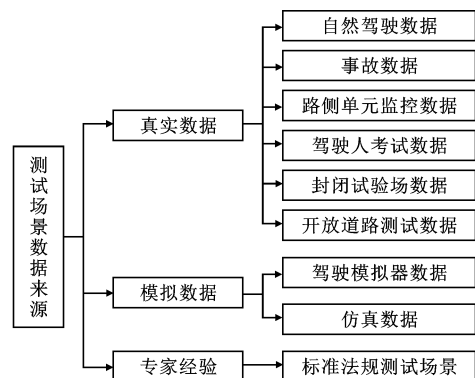


Fig. 2 Test Scenario Data Source

场等。典型的自然驾驶场景数据采集车辆配置如图 3 所示。

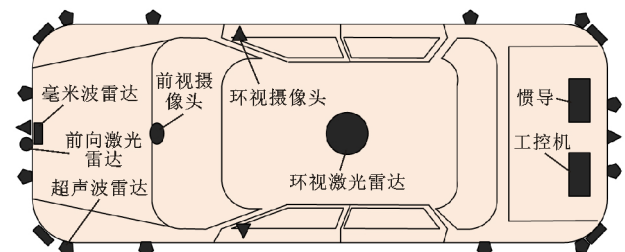


图3 典型的自然驾驶场景数据采集车辆

Fig. 3 Typical Natural Driving Data Acquisition Vehicle

由于存在多种传感器信息,自然驾驶场景数据采集的关键是保证传感器数据之间时间、空间同步。时间同步需要对不同传感器数据采集周期进行同步,目前多使用GPS,COMPASS,GLONASS或GALILEO等统一时钟源设备实现传感器数据之间的纳秒级同步^[38];对于不同频率的传感器数据,可采用中值采样、样条差值采样等方法实现时间同步^[39-40]。空间同步需要对不同传感器的坐标系进行统一,从而保证不同传感器数据在空间维度上匹配。

事故数据是利用现有的道路交通事故大数据,分析提炼出的适用于自动驾驶测试的特征要素。现阶段,为分析事故成因、提高道路交通安全,很多国家和组织都建立了交通事故数据库,如中国的CIDAS数据库^[41],德国的GIDAS数据,美国NHTSA的GES数据库,欧盟的ASSESS数据库等。自动驾驶测试可充分利用这些数据库提供的数据资源,构建基于交通事故与违法情景的测试场景。

路侧单元监控数据是利用交警、路政等管理机构在交叉路口、事故多发路段等地建立的路侧监控设备采集得到的场景要素数据。目前,中国已有9万余条道路接入了视频监控,可以为自动驾驶测试提供丰富的场景数据源。

驾驶人考试场景数据是利用机动车驾驶人考试管理系统采集得到的人-车-环境多维度场景要素信息。进行自动驾驶测试时,可以充分借鉴机动车驾驶人考试管理制度以及考试项目、方法和要求等,从安全驾驶技能、安全驾驶意识等维度构建测试场景。

智能汽车封闭试验场测试数据是在专门的封闭试验场内进行不同智能化水平等级的智能汽车系统测试得到的场景要素数据^[42]。目前,很多国家都建立了专门的智能汽车封闭试验场,如美国的M-City、日本的J-Town、瑞典的AstaZero、韩国的K-City,以及中国上海的智能网联汽车试点示范区、重庆的i-VISTA测试试验场、长春的国家智能网联汽车应用(北方)示范区、长安大学自动驾驶封闭场地测试基地等。利用这些试验场,可以柔性地构建丰富的交通场景,进行自动驾驶汽车开发测试和性能测试,可以积累大量的自动驾驶测试场景数据。

智能汽车开放道路测试数据是指满足测试条件的智能汽车在开放道路上进行测试时所采集获取的场景要素数据。除了传统的场景数据之外,通过开放道路测试,还可以获取自动驾驶汽车与其他道路使用者之间的互动数据,这可以为自动驾驶汽车最终的产业化实施奠定数据基础。美国的Waymo无

人驾驶汽车已在20多个城市积累了超过2000万km的自动驾驶数据^[13];2018年百度无人驾驶汽车在北京市完成了约14万km的开放道路测试;特斯拉利用售出车辆的联网功能,在全球收集了超过160亿km的真实驾驶数据^[43],这些数据有利于发现自动驾驶功能的缺陷,从而进行系统的完善和升级。

(2)模拟数据。模拟数据来源主要包括驾驶模拟器数据和仿真数据。

驾驶模拟器数据是利用驾驶模拟器进行测试得到的场景要素信息。驾驶模拟器是集车辆运动模拟系统、实时监控系统、声光系统、视景系统、数据采集与传输系统于一体的虚拟仿真测试设备^[44],其视景可以来源于真实场景导入或虚拟生成。相比道路测试,驾驶模拟器测试安全、高效、可重复性好,可以进行大范围的、以及危险和极限工况的驾驶人在环测试。美国密歇根大学、英国利兹大学、中国吉林大学、同济大学、清华大学等,均利用驾驶模拟器采集了大量的人-车-环境闭环系统数据,并在此基础上进行了不同等级自动驾驶系统的开发与测试研究^[45-47]。

仿真数据是指自动驾驶汽车在仿真环境中虚拟运行得到的测试数据。仿真环境可以通过真实场景导入或车辆行驶环境建模产生。车辆行驶环境建模主要包括道路场景建模、交通环境建模、气象建模以及电磁环境建模等。道路场景建模重点在于其模拟真实环境中道路场景要素的几何特性、物理特性和行为特性^[48];交通环境建模的关键在于生成正确的交通流量信息及周围交通车辆行为,目前多采用元胞自动机的方式^[49-51];气象建模及电磁环境建模旨在还原真实环境中的天气状态以及电磁干扰,例如模拟光线强度、湿度、温度、电磁信号的阴影效应、多普勒频移等^[52-53]。

(3)专家经验。专家经验数据是指通过以往测试的经验知识总结得到的场景要素信息^[54],标准法规测试场景是典型的专家经验场景数据来源。

目前,世界各国已有80余类自动驾驶测试法律法规。以自动紧急制动(Autonomous Emergency Braking, AEB)功能为例,Euro-NCAP将AEB功能测试分为AEB-City, AEB Inter Urban和AEB Pedestrian三种类型^[55],每种测试类型又有其对应的测试场景。中国发布的《智能网联汽车自动驾驶功能测试规程(试行)》中提出了包括交通标志和标线的识别及响应等在内的34个测试场景^[56]。

1.4 场景数据的处理

由于不同数据来源之间的场景数据格式及类型

可能存在差异,并且原始数据中存在大量无效数据、错误数据,因此,需要对场景数据进行适当处理才能形成真正可用的自动驾驶汽车测试场景。场景数据处理的关键在于场景要素的解构与重构。

德国 PEGASUS 项目提出了场景数据处理的 7 个步骤^[57]:生成通用环境描述、检查数据格式、生成附加信息、分析场景之间的关联程度、分析场景发生的可能性、聚类逻辑场景数据并计算频率分布、根据生成的逻辑场景生成具体测试场景。中国百度公司提出了包括场景分类规则定义、场景标签(元素分解、量化)、标签聚类的场景聚类三步法。

根据现有的典型场景数据处理方式,本文总结归纳提出了如图 4 所示的场景数据处理流程。

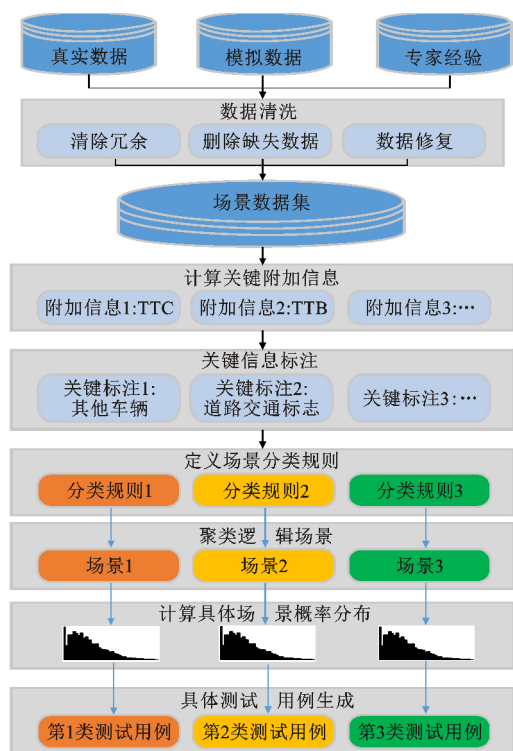


图 4 场景数据处理流程

Fig. 4 Scenario Data Processing Flow

第 1 步:将所收集得到的场景数据进行清洗,主要包括清除冗余、删除缺失数据、数据修复等,其中数据修复可以进行关键信息的人工补全或者按照数据的统计学规律进行修复。在数据清洗过程中应满足^[58-59]:保持数据的完整性约束;制定合适的数据清洗规则、满足用户需求;在满足所有数据质量需求的前提下,清洗代价最小。以数据修复为例,其清洗代价 $C_{\text{ost}}(t)$ 的表达式为

$$C_{\text{ost}}(t) = w(t) \sum_{A \in R} D_{\text{istance}}(t_A, t'_A) \quad (1)$$

$$C_{\text{ost}}(I) = \sum_{t \in I} C_{\text{ost}}(t) \quad (2)$$

式中: t 为单一数据元组; $w(t)$ 为数据元组 t 在所有数据元组中所占的比重; I 为所有数据元组的总和; $D_{\text{istance}}(t_A, t'_A)$ 为要素 t_A 与修复后的要素 t'_A 之间的距离,一般选用 Damerau-Levenshtein 距离算法。

第 2 步:将清洗过后的数据进行整理,形成可用的场景数据集。

第 3 步:计算场景关键附加信息。对于不能通过传感器直接得到的关键信息,需要进行计算,包括碰撞时间(Time to Collision),车头时距(Time Headway),制动时间(Time to Brake)^[60]等。

第 4 步:对场景要素中的关键信息进行标注。常用的标注方式包括:基于语义分析的方式^[61]、基于半监督学习的方式^[62]、基于贝叶斯学习的方式^[63]。

第 5 步:定义场景分类规则。分析场景要素特征参数的分布规律,根据被测的自动驾驶功能需求,建立场景分类规则。譬如前车切入危险场景中的本车速度、切入车辆速度、切入位置等^[64]。

第 6 步:聚类逻辑场景。将符合分类规则的场景区聚类成为相应的逻辑场景,并明确场景要素的参数空间。常用的聚类算法主要有 K-Means 聚类^[65]、层次聚类、混合高斯模型^[66]等。Li 等^[67]针对自动测试汽车测试场景的聚类,提出了在 K-Means 的基础上利用深度学习实现交通基础场景自动聚类的方法。

第 7 步:计算具体场景概率分布。根据上述场景数据,计算逻辑场景的核密度函数,以便于后续具体场景的随机生成。假设 x_1, x_2, \dots, x_n 为独立同分布的 n 个场景样本点,设其概率密度函数为 f ,则核密度 $\hat{f}_h(x)$ 估计为

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - x_i) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (3)$$

$$K_h(x) = \frac{1}{h} K\left(\frac{x}{h}\right) \quad (4)$$

式中: K 为核函数,非负且积分为 1; h 为平滑参数,由平均积分平方误差进行确定; K_h 为缩放核函数。

最后,根据具体场景概率分布进行测试用例的随机生成。

2 自动驾驶虚拟测试

典型的自动驾驶汽车测试验证架构如图 5 所示^[68-69],测试方式主要包括模型在环测试、驾驶模拟

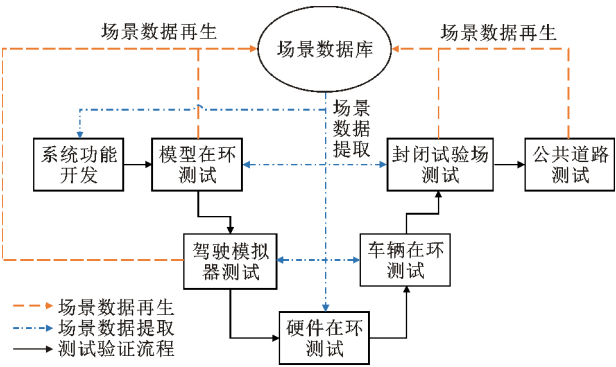


图 5 自动驾驶验证框架

Fig. 5 Framework of Automated Vehicle Validation

器测试、硬件在环测试和车辆在环测试等在虚拟环境中进行的虚拟测试,以及在封闭试验场和公共道路进行的实车测试^[70]。

在自动驾驶汽车发展的早期阶段,多采用实车

测试对自动驾驶汽车的安全性进行验证^[71]。随着自动驾驶等级的提高,自动驾驶汽车测试从单一功能和节点的测试变为了复杂且多节点的测试,此时测试场景变得无限丰富、极其复杂、不可预测、不可穷尽,道路测试已不能覆盖自动驾驶汽车所面临的全部情况^[72]。因此,亟需新的测试方法来测试评价自动驾驶汽车的智能度、安全性等。

由于测试场景丰富、计算速度快、测试效率高、资源消耗低、可重复性好、可嵌入车辆开发的各个环节等原因,各车企和研究机构将目光逐渐投向了虚拟测试^[73]。

虚拟测试与封闭试验场测试、公共道路测试的对比如表 1 所示^[74-75]。其主要差异包括测试真实度、测试成本、测试效率、测试场景数量和测试的主要目的。

表 1 虚拟测试、封闭试验场测试、公共道路测试对比

Table 1 Difference Among Virtual Test, Proving Ground Test and Field Test

测试指标	虚拟测试	封闭场地测试	公共道路测试
测试真实度	取决于模型的真实度,相比较而言真实度较低	较为真实,但缺少真实的其他交通参与者的动态变化要素	真实,与实际上路的自动驾驶汽车的行驶环境一致
测试成本	低,软件系统的成本相对较低	测试场地搭建成本较高	高,需要多人多车长时间行驶
测试效率	高,多核心并行测试可极大提高仿真速度	较高,可针对性地对关键场景进行强化测试	低,基于道路里程的测试方法需要多人多车的长时间行驶
可重复性	强,可根据定义数据搭建相同的测试场景	较强,可通过场景配置要求进行场景要素的重构	差,不可进行公共道路上的重复性测试
测试场景数量	多,在给定逻辑场景参数空间的情况下可生成任意数量的测试场景	较少,由于试验场地限制,虽然可根据场景要素的改变尽可能多地构建场景,但相比虚拟测试和开放道路测试场景数量仍较低	多,在测试时间足够长的情况下可以遇到尽可能多的所需的测试场景
测试目的	嵌入系统开发的各个环节,进行海量的场景测试,验证自动驾驶功能的边界	对关键场景进行验证,同时可通过配置场景要素搭建现实中未遇到或概率低的场景类型,验证系统在边界情况下的操作	明确相关事件的统计学规律,在实际情况中验证系统边界,检测自动驾驶汽车与传统车辆之间的交互,发现未被考虑到的新场景

2.1 虚拟测试方式

自动驾驶汽车虚拟测试方式主要包括模型在环测试、硬件在环测试和车辆在环测试^[76-77]。

2.1.1 模型在环测试

模型在环测试采用模拟场景、车辆动力学模型、传感器模型、决策规划算法进行虚拟环境下的自动驾驶测试,其主要应用于系统开发的最初阶段,没有硬件参与系统测试,主要用于验证算法的正确性。进行模型在环测试时,要求自动驾驶算法保证其发生危险的概率尽可能低或至少和传统车辆的安全性大致相同^[78]。

模型在环测试的关键在于建模的精度和计算效率。对于车辆动力学建模,目前在方法及实际应用

上都已较为成熟。Dieter^[79]对车辆动力学建模与仿真进行了系统的总结,除了基于理论的车辆动力学建模方法之外,还有许多其他建模方式,例如基于系统辨识的建模方法^[80]、基于数据驱动的建模方法^[81]、面向对象的建模方法^[82]等。自动驾驶汽车传感器建模主要包括基于小孔成像原理的单目相机建模技术^[83],基于扩展卡尔曼滤波的双目相机建模技术^[84],基于目标几何特征或物理模型的雷达建模技术^[85-86],考虑卫星定位误差的车载定位建模技术等^[87]。

为适应自动驾驶汽车的虚拟测试需求,很多专业的自动驾驶虚拟测试软件平台应运而生:Prescan, PanoSim, VTD, CarMaker, CarSim 等,不同仿

真平台在车辆动力学建模、传感器建模以及场景建模等方面各有优劣,选择合适的测试平台组成测试工具链是自动驾驶汽车全覆盖、低成本测试的研究热点^[88]。

同济大学团队基于 PreScan 测试平台,对其所提出的自动紧急制动系统进行了测试验证,同时对紧急制动过程中的相关参数进行了探究^[89];吉林大学自主研制了 PanoSim 虚拟测试软件平台,并基于该平台对驾驶人驾驶习性进行了聚类,提出了考虑不同驾驶习性的 ADAS 控制策略,进行了算法仿真验证^[90-93];Sundaravadivelu 等^[94]在 AVL-CRUISE 中搭建虚拟测试环境,并与 CarMaker 进行联合仿真,对所需的车辆动力学模型进行测试验证;Hossain 等^[95]基于 Unity 3D 跨平台游戏引擎搭建了自动驾驶虚拟测试环境,测试传感器感知状态与车辆的动力学特性。

2.1.2 硬件在环测试

硬件在环测试主要包括环境感知系统在环测试、决策规划系统在环测试和控制执行系统在环测试等,其测试要求包括:持续测试(可根据此时目的进行自动测试)、组合测试(不同标准在同一场景中进行评价,例如安全性、舒适性等)、扩展性(简单功能的测试结果具有扩展性,例如对于车道保持的测试结果可扩展应用于高级自动驾驶功能)^[96]。

环境感知系统在环测试主要包括相机在环测试、雷达在环测试、V2X 在环测试以及多源传感融合系统在环测试等。Hao 等^[97]搭建的雷达在环试验台通过模拟电波暗室内的射频环境,准确地生成了带宽雷达目标回波,并得到了带宽雷达目标散射中心的高分辨率距离分布。吉林大学搭建了完整的毫米波雷达在环试验台,通过分析毫米波雷达的噪声机制,可检测包括电磁波多径传播和多雷达干扰在内的雷达误检率及雷达在空间环境中的传播损耗和目标 RCS 动态变化的雷达漏检率^[98]。Hager 等^[99]提出了雷达、摄像头、V2X 等多源传感融合系统在环的试验框架,通过闭环测试得到其感知数据及车辆 CAN 总线数据,其提出的基于 dSPACE 的测试方案还可实现传感器数据流的实时修改,并可直接将数据注入 ECU 之中进行交互测试。Wang 等^[100]针对 V2X 测试提出一种结合虚拟和真实环境的端到端测试系统,可以承担整个协议栈的测试任务。Di 等^[101]搭建了一个集成摄像头与毫米波雷达的硬件在环试验台,该试验台还包括转向操作系统和制动系统,基于该试验台 Di 等对车道偏离预警和

自适应巡航控制系统进行了验证。典型感知系统硬件在环试验台框架如图 6 所示。

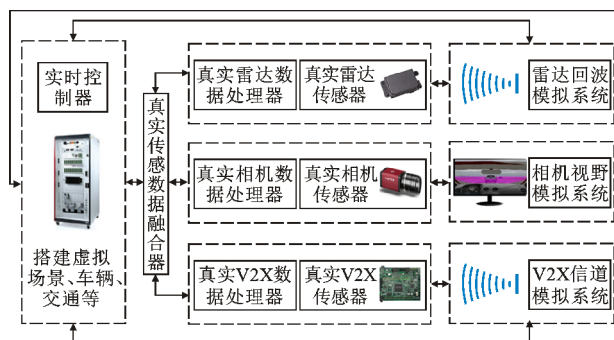


图 6 典型硬件在环测试方案

Fig. 6 Solution of Typical Hardware-in-the-Loop Test

决策规划系统在环是指将真实的车辆控制器放入虚拟的整车环境中,通过仿真模型来模拟受控对象的状态,并通过 CAN 接口、I/O 接口等将车辆控制器与仿真模型进行连接^[102]。Drolia 等^[103]通过模型模拟车辆的加速、横摆、驱动力等参数,实现车辆牵引力控制、巡航控制等控制器在环测试;We 等^[104]将实时仿真技术应用到控制器在环的试验测试中,其可以在系统开发的早期阶段验证功能的正确性以及实时性;吉林大学提出一种以前馈控制为主、反馈控制为辅的汽车动力学多目标集成控制策略,采用 DS1103 单板系统和 DS1006 中型仿真器和 dSPACE 实时仿真系统建立了快速控制原型试验平台^[105]。由于自动驾驶汽车功能的复杂性,对决策规划系统进行硬件在环测试是验证自动驾驶安全性过程中非常重要的一环。

控制执行系统在环测试主要包括制动系统在环测试、转向系统在环测试、驱动系统在环测试等。吉林大学提出一种电子液压制动与电子机械制动相结合的制动控制系统,并基于 dSPACE Autobox 和 CarSim 搭建了硬件在环平台进行测试与算法验证^[106];Cale 等^[107-108]还针对硬件在环测试过程中的通讯时间延迟问题进行了探究;Ye 等^[109]搭建了基于机电式电动助力器的硬件在环测试试验台,对紧急制动算法进行了实时验证。

控制执行系统的硬件在环测试方法发展较早,目前已经较为成熟,搭建可靠的感知系统在环试验台与决策规划系统在环试验台是今后研究工作的重点内容。

2.1.3 车辆在环测试

车辆在环测试是将整车嵌入到虚拟测试环境中进行测试,通过模拟场景测试整车性能,主要包括封

闭场地车辆在环^[110]和转毂平台车辆在环,其关键在于将车辆信息传递给模拟环境以及将模拟环境中产生的传感器信息传递给车辆控制器^[111]。典型的车辆在环测试方案如图 7 所示。

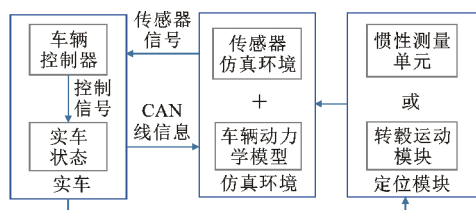


图 7 车辆在环测试方案

Fig. 7 Solution of Vehicle-in-loop Test

Tamas 等^[112]开发了一种基于开源交通流量模拟器 SOMU 的仿真测试环境,其可以模拟测试车辆周围的道路环境、其他交通参与者等,通过 CAN 总线实现测试车辆与仿真软件之间的数据连接,并实现了在现实空旷环境中的车辆在环测试;中国科学院大学基于 ACP 理论,搭建了与实际交通平行执行的自动驾驶汽车测试验证平台,对自动驾驶汽车的环境感知、动态认知规划、智能决策等功能进行了验证^[113];Wang 等^[114]基于 CPSS 和 ACP 智能机器系统以及车辆与驾驶人之间的信息交互,提出了网络-物理-社会空间的并行驾驶;Xu 等^[115]建立了一个微缩的车辆在环试验台,其包含一个基于室内超宽带的高精度定位系统,并且可以对路面材料、路面几何结构等进行灵活配置。

2.2 虚拟测试要点

在进行自动驾驶汽车虚拟测试时,主要存在 3 个技术难题:测试场景的真实性、测试场景的要素粒度和虚拟测试的评价指标。

为保证虚拟测试时场景的真实性,在进行虚拟场景测试时应建立测量参考系统(Reference Measurement System, RMS)^[116],RMS 主要用于比较所生成的虚拟测试场景与真实世界之间的差异,其精度需要比自动驾驶汽车上的传感器更高,若 RMS 系统所检测到的算法所需的场景要素的粗糙度小于某个阈值,则可以证明所生成的虚拟测试环境可以用于自动驾驶功能的测试。以车道保持功能为例,其必须的环境要素信息包括道路形状、车道线位置、车道线形状、光线条件。此时 RMS 的主要元件为图像采集装置,其相对于自动驾驶汽车所使用的传感器在分辨率、灵敏度等方面性能更优。此时将 RMS 图像采集装置置于上文搭建的硬件在环试验台进行检测,若其所检测到的道路的颜色特征、车道

线灰度值、车道线边缘形状等特性^[117]与真实世界的差值小于设定的阈值,则证明所生成的虚拟场景逼真度符合要求。

不同的测试环境与测试需求以及感知和通讯发展的阶段有关^[118],场景要素的粒度需要根据技术发展情况进行定义。以雨滴颗粒大小为例,雨滴大小会对雷达回波产生较大的干扰,雨滴越小,其对微波的反射越弱^[119]。对于自动驾驶汽车所安装的雷达来说,雨滴的直径在小于某一个阈值之后,雷达的检测结果对整个自动驾驶系统的决策结果几乎不变,此时一味追求仿真的真实度,例如减小雨滴的颗粒大小,会增大计算的消耗,对仿真环境的构建产生很大负担。因此,模拟环境的真实性需要综合考虑当前所用传感器的技术水平以及仿真场景构建处理器的计算能力。

在进行自动驾驶汽车的虚拟测试时,多以其是否发生碰撞作为虚拟测试的评价标准,为了使虚拟测试的测试内容更为丰富,Tong 等^[120]提出了指定关键绩效指标(Key Performance Indicator, KPI)的方式来描述自动驾驶汽车在虚拟测试中的性能。以自适应巡航系统为例,虚拟测试中描述自适应巡航性能的 KPI 参数包括:安全性(避免碰撞的能力)、舒适性(车辆加减速度)、自然性(人驾驶的相似程度,可能会影响驾驶人心理)、经济性(油耗),根据不同的自动驾驶功能,可以设定不同的 KPI 进行评价。由于自动驾驶系统与人工智能息息相关,一些学者也提出了使用图灵测试的方法,将智能性作为虚拟测试的评价指标^[121],中国科学院自动化研究所提出了一种驾驶人在环的平行智能测试模型,其使用图灵测试的原理对自动驾驶汽车在复杂场景中的要素理解和行驶决策能力进行了测试^[122]。

3 基于场景的自动驾驶加速测试

基于场景的自动驾驶加速测试目前主要有 2 种方式:一种方式是基于虚拟环境搭建测试场景的快速性与可重复性,根据测试需求进行测试场景的随机生成,短时间内生成大量测试场景;另一种方式是参照整车强化腐蚀测试方法^[123]所提出的危险场景强化生成方法。

3.1 测试场景随机生成

根据现实中各种场景发生的概率密度,以此为基准在虚拟环境中随机生成具体场景是进行自动驾驶加速测试过程中最基本的部分。

测试场景随机生成的技术路线主要包括以蒙特

卡罗模拟法、快速搜索随机树为代表的基于随机采样的生成方法,基于场景要素重要性层次分析的生成方法以及基于机器学习的方法等。

基于随机采样方法的测试场景随机生成方法主要包括:Yang 等^[124]和 Lee^[125]提取道路碰撞预警和自适应巡航现场测试中的数据片段,通过蒙特卡罗模拟生成主动制动系统的测试场景;Olivares 等^[126]通过分析道路地图数据,使用马尔可夫链和蒙特卡罗方法重建道路信息;Fellner 等^[127]将路径规划中的快速搜索随机树 RRT 方法应用到场景生成,其生成的测试用例可考虑超过 2 300 种场景要素;西安交通大学的研究人员提出了一种基于道路图像序列的常见模型构建方法,其使用超像素马尔可夫随机场算法进行道路区域监测,实现道路场景的随机建模^[129];Elias 等^[129]提出一种基于回溯算法的场景生成方法,可实现场景中动态要素和静态要素的随机生成。

场景要素重要性分析的测试场景生成方法^[130]首先需要进行场景要素分析,明确场景要素,对连续的场景要素进行离散化处理;随后通过信息熵与层次分析的方式确定每个场景要素的重要性指数;接下来对不同要素的重要性指数进行平坦化处理,得到每个场景要素的相对重要性参数;最终通过组合测试的方法生成测试用例。

其他一些测试场景随机生成的方法包括:参照机器学习方法,通过改变场景要素性质,例如白平衡、光线变化、运动模糊等实现测试场景随机生成^[131];基于车辆采集到的交通场景视频,通过 AR 技术在视频路面区域增加新的交通元素,可以实现危险、极端的交通场景生成^[132];Alexander 等^[133]根据收集到的数据推断周围交通参与者的行为信息,使用神经网络学习周围车辆的行为信息从而进行动态场景生成;Li 等^[134]将汽车周围的行驶位置划分为 8 个区域,通过对本车和周围交通车辆的相对位置及速度的排列组合,进行测试场景的随机生成;Vishnukumar 等^[135]提出将机器学习和深度学习应用于测试验证过程中,在给定最初的必要测试场景后,通过学习算法自动生成随机测试场景。

相比在现实世界搭建真实测试场景,在虚拟环境进行测试用例的生成可以极大程度上减少时间以及资源上的消耗。然而,由于自然情况下事故的发生概率较低,使用场景随机生成的方式仍可能面临大量计算的困扰,危险场景强化生成的方法可以很好地解决上述问题。

3.2 危险场景强化生成

若自动驾驶汽车在危险情况表现良好,则通常情况下其系统安全性也可以得到很好的保障^[136]。因此,测试危险场景下自动驾驶汽车的性能得到了越来越多学者的关注。

首先需要对危险场景进行定义与分类,很多项目都针对汽车危险场景进行了研究;SeMiFOT 将驾驶时的危险划分为 4 个等级^[137],美国 NHTSA 将碰撞分为 37 类^[138];Aparicio 等^[139-140]总结了车与车、车与行人之间的冲突类型;同济大学基于 ChinaFOT 数据库,分析了涉及骑车人的典型危险场景^[141]、涉及行人的典型危险场景^[142]、切入型危险场景^[143];Winkle 等^[144]分析了 2004~2014 年间在不同天气情况下视线受阻的事故数据,并对事故危害程度进行了分析。

上述危险场景的定义过于单一,大多只是分析其危险的类型,而对于场景要素的具体参数没有进行定义。Tang 等^[145]基于 MATLAB 算法空间,定义事故场景的各个属性参数,提出了一种城市交通事故绘制方法。Sven 等^[60]使用 TTB、期望制动减速度、TTC、交通流量、速度波动、平均速度、加速度变化等具体参数,从海量的汽车行驶数据中找到其中的危险场景。同济大学将危险场景的筛选过程分为 3 层^[146]:首先分析车辆纵向加速度、横向加速度、横摆角速度与车速之间的关系;然后在第 1 层分析的基础上分析车辆的 TTC 信息,制动力变化等;最后通过模糊评价方法进行最终的指标量化。Elrofai 等^[24]通过检测汽车行驶过程中的速度和横摆角速度判断是否有换道行为,当一段时间内持续的横摆角速度超过阈值时,则判断其为有价值的转向事件。

Zhao 等^[147-148]根据定义的危险场景,提出了一种重要性采样的危险场景加速生成方法,其核心思想是引入一个新的概率密度函数 $f^*(x)$ 代替原本的 $f(x)$,增大危险场景的生成概率,从而减少测试次数。在使用随机采样的场景生成方法时,危险场景的概率密度函数为 $f(x)$,其最小测试次数 n 为

$$n = \frac{z^2}{\beta^2} \frac{1-\gamma}{\gamma} \quad (5)$$

式中: γ 为危险场景发生的概率; β 为给定常数; z 与 $N(0,1)$ 的逆累积分布函数有关。

使用重要性采样进行危险场景生成时,危险场景的概率密度函数为 $f^*(x)$,其最小测试次数为

$$n = \frac{z^2}{\beta^2} \left\{ \frac{E_{f^*} [I^2(x)L^2(x)]}{\gamma^2 - 1} - 1 \right\} \quad (6)$$

$$I(x) = \begin{cases} 1 & x \in \varphi \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$L(x) = \frac{f(x)}{f^*(x)} \quad (8)$$

式中: $I(x)$ 为危险事件 ϵ 的指标函数; $L(x)$ 为使用重要性采样的似然比; $E_{f^*}[I^2(x)L^2(x)]$ 为改变概率密度函数后, 危险场景发生的概率^[149]。

通过对前车切入、前车制动等典型场景对危险场景强化生成的方法进行验证, 证明其测试速度可达到蒙特卡罗测试模拟的 7 000 倍。

4 自动驾驶汽车虚拟测试研究展望

虽然各国学者针对基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试进行了广泛研究, 并取得了一定的成果, 但目前的研究水平还无法满足自动驾驶汽车测试的迫切需求, 世界范围内尚未建立完善的自动驾驶汽车虚拟测试评价体系。未来, 在如下几个方面仍需进一步深入研究:

(1) 场景解构与自动重构技术

真实交通场景复杂多变, 场景数据来源广泛、数据量庞大, 因此, 应根据场景要素分析, 进行场景特征要素提取, 实现场景解构。同时, 场景要素复杂繁多, 在测试不同的自动驾驶功能时, 所需的场景要素类型不尽相同。如何根据测试需求自动重构测试场景是目前亟待解决的关键问题。标记不同场景要素并将其从整体场景中剥离, 分析不同要素之间的内在联系, 根据测试需求选择合适的场景要素并根据其耦合关系进行自动重构是解决测试场景自动生成的重点。

(2) 人-车-环境系统一体化高置信度建模

建立人-车-环境高置信度模型, 是自动驾驶虚拟测试的基础, 而如何兼顾模型精度和计算效率一直是自动驾驶虚拟仿真所面临的挑战。现阶段, 雷达、相机、定位等环境感知系统模型以及随机交通模型和虚拟环境模型等均急需突破。未来应更加深入地研究环境感知传感器物理机理建模方法, 根据相机成像机理对成像过程中的光损失、畸变、景深、噪声等进行建模; 基于光学物理与衍射机理对雷达散射截面进行计算; 利用电磁波传输理论对激光雷达测距原理进行建模; 以车载自组网技术为主体, 通过路由模型与移动模型对无线通信系统进行模拟。此外, 当前人、车、环境模型多进行单独构建, 彼此之间的耦合联系尚未明确, 应通过传感器信号的路径损耗、阴影衰减和噪声建模, 描述传感器模型与环境模

型的耦合机理, 进而, 对驾驶人、车辆、环境的影响因素进行全面分析, 构建人-车-环境一体化高置信度模型。

(3) 构建自动驾驶汽车虚拟测试标准工具链

目前, 自动驾驶汽车的虚拟测试多参照“V”形流程, 分别进行软件在环测试、硬件在环测试和车辆在环测试。然而在实际测试过程中, 测试工具链的选择尚未形成统一标准。未来, 应明确不同虚拟测试平台之间的测试优势, 采用接近服役条件下自动驾驶系统在环设计方法和多构型执行机构一体化测试技术, 建立统一、规范的自动驾驶汽车虚拟测试标准工具链。

(4) 不同自动驾驶汽车渗透率下的混合交通模拟与测试

目前在进行自动驾驶汽车虚拟测试时, 测试场景大多只包含 1 辆自动驾驶汽车。由于自动驾驶汽车与传统汽车之间存在显著的行为差异, 不同渗透率的自动驾驶汽车会对整个交通产生不同的影响。因此, 建立不同自动驾驶汽车渗透率下的混合交通模型, 分析不同自动驾驶汽车数量的交通态势及车辆行为, 进行混合交通测试是未来自动驾驶虚拟测试一个新的研究领域。

(5) 建立测试案例动态自适应随机生成机制

自动驾驶汽车工作环境和状态复杂多样、时空维度广、具有强不确定性和不可穷尽的特征, 因此, 在传统汽车危险场景大数据分析基础上, 面向不同自动驾驶汽车渗透率下的混合交通状态引入自动驾驶诱导的危险场景, 从微观角度提取并凝练这些因素的本质要素和特征; 根据场景要素组合准则与约束关系, 构建多危险等级测试场景, 建立测试案例动态自适应随机生成机制, 并实现海量数据高速并发是自动驾驶虚拟测试未来的研究重点。

(6) 建立自动驾驶汽车虚拟测试标准体系

目前, 针对自动驾驶汽车的虚拟测试尚处于萌芽阶段, 尚未形成明确的评价体系。环境复杂度、任务复杂度、人工干预度、行驶智能性等方面均可以作为虚拟测试的评价内容。未来应重点研发适应技术发展趋势的自动驾驶虚拟测试评价体系架构, 基于测试标准工具链和测试场景库, 建立测试标准体系。

5 结 语

(1) 随着自动驾驶技术等级的提高, 其测试的难度逐渐加大, 而验证自动驾驶的安全性是自动驾驶汽车上路的重要前提。由于自动驾驶汽车行驶场景

具有极其复杂、无限丰富、不可预知的特点,传统的道路测试方法已不能满足自动驾驶测试需求,基于场景的虚拟测试已成为自动驾驶汽车测试验证不可或缺的重要组成部分。

(2)本文对基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试技术的研究进展进行了梳理和总结。明确了测试场景的内涵,归纳了测试场景的要素种类,概述了测试场景的数据来源,并系统地总结了场景数据的处理方法。在此基础上,对模型在环、硬件在环和车辆在环测试方案及其关键技术进行了梳理。概述了典型的测试场景随机生成方法和危险场景强化生成方法。

(3)基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试尚处于技术发展的初级阶段,需要多领域科研工作者共同推进,未来研究应着力突破基于解构与自动重构的测试场景数据库、人-车-环境系统一体化高置信度建模、自动驾驶汽车虚拟测试标准工具链、不同自动驾驶汽车渗透率下的混合交通模拟与测试、测试案例动态自适应随机生成机制等核心共性技术,建立自动驾驶汽车虚拟测试标准体系,为自动驾驶技术发展和产业落地提供有力支撑。

参考文献:

References:

- [1] Google. What We're Driving at [EB/OL]. (2010-10-1) [2019-03-17]. <http://googleblog.blogspot.com/2010/10/whatwere-driving-at.html>.
- [2] United States House of Representatives. Self Drive Act [EB/OL]. (2017-10-15) [2019-03-17]. <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/housebill/3388/all-actions-without-amendments?r=1>.
- [3] URMSON C, ANHALT J, BAGNELL D, et al. Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge [J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25 (8): 425-466.
- [4] SAUST F, WILLE J M, LICHT B, et al. Autonomous Vehicle Guidance on Braunschweig's Inner Ring Road Within the Stadtpilot Project [C] // IEEE. *Intelligent Vehicles Symposium*. New York: IEEE, 2011: 169-174.
- [5] ARDELT M, COESTER C, KAEMPCHEN N. Highly Automated Driving on Freeways in Real Traffic Using a Probabilistic Framework [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13 (4): 1576-1585.
- [6] ANDERSON J M, KALRA N, STANLEY K D, et al. *Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers* [M]. New York: RAND Corporation, 2014.
- [7] CHRISTENSEN A, CUNNINGHAM A, ENGELMAN J, et al. Key Considerations in the Development of Driving Automation Systems [C] // NHTSA. 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). New York: NHTSA, 2015: 1-14.
- [8] BENMIMOUN M. Effective Evaluation of Automated Driving Systems [J]. *SAE Paper* 2017-01-0031.
- [9] FALKE H, RINE P, MARTIJIN T. Future Testing of Active Safety Systems [J]. *SAE Paper* 2010-01-2334.
- [10] MARC R Z, SEBASTIAN K, FLORIAN K, et al. Testing and Validating High Level Components for Automated Driving: Simulation Framework for Traffic Scenarios [C] // IEEE. 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York: IEEE, 2016: 144-150.
- [11] FAHRENKROG F, ZLOCKI A, ECKSTEIN L. Evaluation of Active Safety. From the Test to the Efficacy Analysis [J]. *Automotive Journal*, 2014, 116 (1): 34-39.
- [12] ZHU W, BORIBOONSOMSIN K, BARTH M. Microscopic Traffic Flow Quality of Service from the Drivers' Point of View [C] // IEEE. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. New York: IEEE, 2007: 47-52.
- [13] Google. Waymo Is First to Put Fully Self-driving Cars on US Roads Without a Safety Driver [EB/OL]. (2017-11-01) [2019-03-17]. <https://www.theverge.com/2017/11/7/16615290/waymo-self-driving-safety-driver-chandler-autonomous>.
- [14] Baidu. Apollo Pilot Safety Report [EB/OL]. (2018-12-01) [2019-03-17]. http://www.apollo.auto/platform/security_cn.html.
- [15] 新华辞书社. 新华字典 [M]. 10 版. 北京: 商务印书馆, 2004.
- Xinhua Dictionary. *Xinhua Dictionary* [M]. 10th ed. Beijing: The Commercial Press, 2004.
- [16] Oxford. *Oxford Dictionaries* [EB/OL]. (2012-10-01) [2019-03-17]. <http://oxforddictionaries.com/definition/scenery?q=scenery>.
- [17] DUFFY T M, OSGOOD D, HOLYOAK D, et al. Scenario-based Design: Envisioning Work and Technology in System Development [J]. *IEEE Transactions on Professional Communication*, 1996, 39 (4):

- 241-242.
- [18] GOULD J D, BOIES S J, LEVY S, et al. The 1984 Olympic Message System: A Test of Behavioral Principles of System Design [J]. *Communications of the ACM*, 1987, 30 (9): 758-769.
- [19] SESSA D, ANDREA A. A Principled Design for an Integrated Computational Environment [J]. *Human Computer Interaction*, 1985, 1 (1): 1-47.
- [20] HSIA P. Formal Approach to Scenario Analysis [J]. *IEEE Software*, 1994, 11 (2): 33-41.
- [21] OLANDER L P, GIBBS H K, STENINGER M, et al. Reference Scenarios for Deforestation and Forest Degradation in Support of REDD: A Review of Data and Methods [J]. *Environmental Research Letters*, 2008, 3 (2): 169-198.
- [22] DAN C, TYREE M, PIERCE D, et al. Climate and Sea Level Rise Scenarios for California Vulnerability and Adaptation Assessment. A White Paper from the California Energy Commission's California Climate Change Center [M]. Sacramento: California Energy Commission, 2012.
- [23] SCHIEBEN A, HEESEN M, SCHINDLER J, et al. The Theater-system Technique: Agile Designing and Testing of System Behavior and Interaction, Applied to Highly Automated Vehicles [C] // ITS. 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. New York: ACM, 2009: 43-46.
- [24] ELROFAI H, DANIEL W, CAMP O O D. Scenario Identification for Validation of Automated Driving Functions [C] // SCHULZE T, MÜLLER B, MEYER G. *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2016*. Berlin: Springer, 2016: 153-163.
- [25] KOSKIMIES K. Automated Support for Modeling OO Software [J]. *IEEE Software*, 1998, 15 (1): 87-94.
- [26] 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: 1-7.
- [27] 新智驾. 实现完全自主无人驾驶仍面临艰难挑战——谈谈认知构建的类人自主驾驶[EB/OL]. (2017-12-01) [2019-03-17]. <https://www.leiphone.com/news/201712/AqkoUyikVPUamIB.html>. AI-Drive. Achieving Fully Autonomous Unmanned Still Faces Difficult Challenges -To Talk About the Cognitive Build Humanoid Autonomous Driving [EB/OL]. (2017-12-01) [2019-03-17]. <https://www.leiphone.com/news/201712/AqkoUyikVPUamIB.html>.
- [28] LOPER M M, BLACK M J. OpenDR: An Approximate Differentiable Renderer [C] // Springer. *European Conference on Computer Vision*. Berlin: Springer, 2014: 154-169.
- [29] JULLIEN J M, MARTEL C, VIGNOLLET L, et al. OpenScenario: A Flexible Integrated Environment to Develop Educational Activities Based on Pedagogical Scenarios [C] // IEEE. *Ninth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies*. New York: IEEE, 2009: 509-513.
- [30] GO K, CARROLL J M, CARROLL. The Blind Men and the Elephant: Views of Scenario-based System Design [J]. *Interactions*, 2004, 11 (6): 44-53.
- [31] ULBRICH S, MENZEL T, RESCHKA A, et al. Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation, and Scenario for Automated Driving [C] // IEEE. *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. New York: IEEE, 2015: 982-988.
- [32] GEYER S, BALTZER M, FRANZ B, et al. Concept and Development of a Unified Ontology for Generating Test and Use-case Catalogues for Assisted and Automated Vehicle Guidance [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2013, 8 (3): 183-189.
- [33] KORBINIAN G, THOMSAS K, BENJAMIN F, et al. Towards a Scenario-based Assessment Method for Highly Automated Driving Functions [C] // Staffordshire University. 8th Conference on Driver Assistance. Stoke-on Trent: Staffordshire University, 2017: 1-7.
- [34] MATTHAEI R, BAGSCHIK G, MAURER M. Map-relative Localization in Lane-level Maps for ADAS and Autonomous Driving [C] // IEEE. *Intelligent Vehicles Symposium*. New York: IEEE, 2014: 49-55.
- [35] ERWIN D G, JAN-PIETER P. Assessment of Automated Driving Systems Using Real-life Scenarios [C] // IEEE. 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York: IEEE, 2017: 589-594.
- [36] CHRISTIAN R, FAHRENKROG F, UHLIG A, et al. A Scenario-based Assessment Approach for Automated Driving by Using Time Series Classification of Human-driving Behavior [C] // IEEE. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2016: 1360-1365.
- [37] GEIGER A, LENZ P, URTASUN R. Are We Ready

- for Autonomous Driving? The KITTI Vision Benchmark Suite [C] // IEEE. 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE, 2012: 3354-3361.
- [38] MCINNE S. Model-checking the Flooding Time Synchronization Protocol [C] // IEEE. IEEE International Conference on Control & Automation. New York: IEEE, 2010: 422-429.
- [39] 刘明, 水鹏朗. 基于功率中值和归一化采样协方差矩阵的自适应匹配滤波检测器[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1395-1401.
- LIU Ming, SHUI Peng-lang. Adaptive Matched Filter Detector Based on Power Median and Normalized Sample Covariance Matrix [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37 (6): 1395-1401.
- [40] 董义华, 孙同景, 徐丙垠. 基于三次样条插值理论电子式互感器数据同步[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 102-107.
- DONG Yi-hua, SUN Tong-jing, XU Bing-yin. Data Synchronization Based on Cubic Spline Interpolation for Electronic Instrument Transformers [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32 (5): 102-107.
- [41] 刘福聚, 王鹏, 陈吉光. 基于CIDAS乘用车行人事故的AEB系统参数研究[J]. 中国汽车, 2018, 318(9): 28-31.
- LIU Fu-ju, WANG Peng, CHEN Ji-guang. Research on AEB System Parameters Based on CIDAS Passenger Car Pedestrian Accident [J]. China Auto, 2018, 318 (9): 28-31.
- [42] WOO J W, LEE S B. Test-bed Design for Evaluation of Intelligent Transportation Systems and Intelligent Vehicle Systems [C] // IEEE. International Conference on Advanced Communication Technology. New York: IEEE, 2011: 1511-1514.
- [43] TESLA. Tesla Vehicle Safety Report [EB/OL]. (2018-10-01) [2019-03-17]. <https://www.tesla.cn/VehicleSafetyReport>.
- [44] LEE W S, KIM J H. A Driving Simulator as a Virtual Reality Tool [C] // IEEE. Proceedings of International Conference on Robotics & Automation. New York: IEEE, 1998: 71-76.
- [45] 熊坚, 曾纪国, 丁立. 面向道路汽车的驾驶模拟器的研究及应用[J]. 中国公路学报, 2002, 15(2): 117-119.
- XIONG Jian, ZENG Ji-guo, DING Li. Application and Research of Vehicle Driving Simulator for Road Traffic Problems [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15 (2): 117-119.
- [46] 孙显营, 熊坚. 车辆驾驶模拟器的发展综述[J]. 交通科技, 2001(6): 48-50.
- SUN Xian-ying, XIONG Jian. Overview of the Development of Vehicle Driving Simulator [J]. Transportation Science & Technology, 2001 (6): 48-50.
- [47] 涂辉招, 李振飞, 孙立军. 驾驶模拟器运动系统对自由驾驶行为的影响分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(11): 1696-1702.
- TU Hui-zhao, LI Zhen-fei, SUN Li-jun. Effects of Motion System of Driving Simulator on Free Driving Behaviors [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43 (11): 1696-1702.
- [48] 陈旭东. 汽车模拟驾驶虚拟场景设计与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- CHEN Xu-dong. Design and Research on Virtual Scene of Vehicle Stimulation Driving [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [49] 梅宏, 成卫, 张云生, 等. 基于二维元胞自动机的交通流模拟分析[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2013, 38(6): 42-46.
- MEI Hong, CHENG Wei, ZHANG Yun-sheng, et al. On Simulation and Analysis on Traffic Flow Based on Two-dimensional Cellular Automation [J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2013, 38 (6): 42-46.
- [50] JIAN G, HONG Z, XING L, et al. An Improved One-dimensional Cellular Automation Model of Traffic Flow [C] // IEEE. 2008 Chinese Control and Decision Conference. New York: IEEE, 2008: 4481-4485.
- [51] JUNFENG Z, HAI W, CHEN F C. Virtual Traffic Simulator for Connected and Automated Vehicles [J]. SAE Paper 2019-01-0676.
- [52] 单雄军. 复杂电磁环境建模与仿真方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- SHAN Xiong-jun. Research on Modeling and Simulation Method of Complex Electromagnetic Environment [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [53] 吴迎年. 电磁环境仿真与可视化研究综述[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(20): 6332-6338.
- WU Ying-nian. Survey on Electromagnetic Environment Simulation and Visualization [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21 (20): 6332-6338.
- [54] 张煜东, 吴乐南, 王水花. 专家系统发展综述[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(19): 43-47.

- ZHANG Yu-dong, WU Yue-nan, WANG Shui-hua. Survey on Development of Expert System [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46 (19): 43-47.
- [55] PARK M K, LEE S Y, KWON C K, et al. Design of Pedestrian Target Selection with Funnel Map for Pedestrian AEB System [C] // IEEE. IEEE Transactions on Vehicular Technology. New York: IEEE, 2017: 3597-3609.
- [56] 中国智能网联汽车产业创新联盟. 智能网联汽车自动驾驶功能测试规程(试行)[EB/OL]. (2018-10-01) [2019-03-17]. <http://www.caicv.org.cn/policy/>. China Industry Innovation Alliance for the Intelligent and Connected Vehicles. Intelligent Network Connection Car Automatic Driving Function Test Procedures (Trial) [EB/OL]. (2018-10-01) [2019-03-17]. <http://www.caicv.org.cn/policy/>.
- [57] ANDREAS P, ADRIAN Z, JULIAN B, et al. System Validation of Highly Automated Vehicles with a Database of Relevant Traffic Scenarios [C] // PEGASUS. 12th ITS European Congress. Paris: PEGASUS, 2017: 1-8.
- [58] FAN W F, GEERTS F, JIA X B, et al. Conditional Functional Dependencies for Capturing Data Inconsistencies [J]. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 2008, 33 (2): 1-48.
- [59] FAN W F, LIJZ, MA S, et al. Towards Certain Fixes with Editing Rules and Master Data [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2010, 3 (1/2): 173-184.
- [60] SVEN H, YIQUN X, ULRICH E. Simulation-based Identification of Critical Scenarios for Cooperative and Automated Vehicles [C] // WCX. WCX World Congress Experience. New York: WCX, 2018: 93-106.
- [61] 崔桐,徐欣.一种基于语义分析的大数据视频标注方法[J].南京航空航天大学学报,2016,48(5): 677-682.
- CUI Tong, XU Xin. Big Data Video Annotation Based on Semantic Analysis [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48 (5): 677-682.
- [62] BELKIN M, NIYOGI P, SINDHWANI V. Manifold Regularization: A Geometric Framework for Learning from Labeled and Unlabeled Examples [J]. Journal of Machine Learning Research, 2006, 7 (1): 2399-2434.
- [63] WANG W, ZHAO D. Extracting Traffic Primitives Directly from Naturalistically Logged Data for Self-driving Applications [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3 (2): 1223-1229.
- [64] XIA L, ZHU X, MA Z. Test Scenario for Automatic Emergency Braking System Under Cut-in Dangerous Conditions [C] // INFATS. INFATS Proceedings of the 14th International Forum of Automotive Traffic Safety. Changsha: INFATS, 2017: 1-7.
- [65] WANG R, LI H, CHEN M, et al. MIC-KMeans: A Maximum Information Coefficient Based High-dimensional Clustering Algorithm [J]. Artificial Intelligence and Algorithms in Intelligent Systems, 2019, 794: 208-218.
- [66] SMITH N R J. Higher Order Properties of GMM and Generalized Empirical Likelihood Estimators [J]. Econometrica, 2004, 72 (1): 219-255.
- [67] LI S, WANG W, MO Z, et al. Cluster Naturalistic Driving Encounters Using Deep Unsupervised Learning [C] // IEEE. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York: IEEE, 2018: 1354-1359.
- [68] RAY L, JOSHUE P, MARTIN D. A Complete Framework for Developing and Testing Automated Driving Controllers [J]. IFAC-Papers Online, 2017, 50 (1): 258-263.
- [69] GONZALEZ D, PEREZ J, MILANES V, et al. A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 17 (4): 1-11.
- [70] BAGSCHIK G, MENZEL T, MAURER M. Ontology Based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles [C] // IEEE. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2018: 1813-1820.
- [71] SAYER J R, BOGARD S E, BUONAROSA M L, et al. Integrated Vehicle-based Safety Systems: Light Vehicle Field Operational Test, Key Findings Report [J]. Annals of Emergency Medicine, 2011, 58 (2): 205-206.
- [72] HUANG W L, WEN D, GENG J, et al. Task-specific Performance Evaluation of UGVs: Case Studies at the IVFC [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15 (5): 1969-1979.
- [73] 林培群,卓福庆,姚凯斌,等.车联网环境下交叉口交通流微观控制模型及其求解与仿真[J].中国公路学报,2015,28(8):82-90.
- LIN Pei-qun, ZHUO Fu-qing, YAO Kai-bin, et al. Solving and Simulation of Microcosmic Control Model of Intersection Traffic Flow in Connected-vehicle

- Network Environment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28 (8): 82-90.
- [74] 周锐, 李力. 智能驾驶测试面临的挑战[J]. 人工智能, 2018(6): 59-70.
ZHOU Rui, LI Li. Intelligent Driving Test Challenges [J]. AI-View, 2018 (6): 59-70.
- [75] 李力, 刘跃虎, 郑南宁, 等. 无人驾驶的智能测试[J]. 中国计算机学会通讯, 2018, 14(8): 50-54.
LI Li, LIU Yue-hu, ZHENG Nan-ning, et al. Driverless Smart Test [J]. Communications of CCF, 2018, 14 (8): 50-54.
- [76] QUINLAN M, AU T C, ZHU J, et al. Bringing Simulation to Life: A Mixed Reality Autonomous Intersection [C] // IEEE. RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. New York: IEEE, 2010: 6083-6088.
- [77] 刘玉梅, 苏建, 潘洪达, 等. 虚拟仪器技术在汽车性能测试中的应用[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 112-115.
LIU Yu-mei, SU Jian, PAN Hong-da, et al. Application of Virtual Instrument Technology in Automobile Performance Test [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18 (2): 112-115.
- [78] KIROVSKII O. Determination of Validation Testing Scenarios for an ADAS Functionality: Case Study [J]. SAE Paper 2019-01-0137.
- [79] DIETER S. 车辆动力学建模与仿真[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
DIETER S. Vehicle Dynamics Modeling and Simulation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [80] 王慧丽, 杨海忠. 基于系统辨识的车辆动力学建模方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6): 1275-1282.
WANG Hui-li, YANG Hai-zhong. Vehicle Dynamics Modeling Method Based on System Identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (6): 1275-1282.
- [81] 聂隐愚. 数据驱动的车辆动力学建模与仿真研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2016.
NIE Yin-yu. Data Driven Vehicle Dynamics Modeling and Simulation Research for Railway Vehicle [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2016.
- [82] 徐学进. 基于驾驶模拟器的车辆动力学建模研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
XU Xue-jin. Study of Vehicle Dynamics Modeling for Driving Simulator [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [83] DAVISION A J, REID I D, MOLTON N D, et al. MonoSLAM: Real-time Single Camera SLAM [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29 (6): 1052-1067.
- [84] 夏侯凯顺, 陈善星, 邬依林. 基于双目云台相机的目标跟踪系统建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(2): 362-368.
XIAHOU Kai-shun, CHEN Shan-xing, WU Yi-lin. Modeling and Simulation for Target Tracking System Based on Dual-pan-tilt Camera [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27 (2): 362-368.
- [85] ETINGER A, LITVAK B, PINHASI Y. Multi Ray Model for Near-ground Millimeter Wave Radar [J]. Sensors, 2017, 17 (9): 1983.
- [86] GUO J, DENG W W, ZHANG S M, et al. A Novel Method of Radar Modeling for Vehicle Intelligence [J]. SAE Paper 2016-01-1892.
- [87] 汪涛. 智能行驶车辆定位技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
WANG Tao. Research on Localization Method for Autonomous Driving Vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [88] HUANG H M, PAVEK K, ALBUS J, et al. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: An Update [C] // SPIE. Unmanned Ground Vehicle Technology VII. Bellingham: SPIE, 2005: 1-10.
- [89] 李霖, 朱西产, 董小飞, 等. 自主紧急制动系统避撞策略的研究[J]. 汽车工程, 2015(2): 168-174.
LI Lin, ZHU Xi-chan, DONG Xiao-fei, et al. A Research on the Collision Avoidance Strategy for Autonomous Emergency Braking System [J]. Automotive Engineering, 2015 (2): 168-174.
- [90] ZHU B, JIANG Y D, ZHAO J, et al. Typical Driving Styles Oriented Personalized Adaptive Cruise Control Design Based on Human Driving Data [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 100 (3): 274-288.
- [91] ZHU B, YAN S D, ZHAO J, et al. Personalized Lane-change Assistance System with Driver Behavior Identification [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67 (11): 10293-10306.
- [92] ZHU B, LIU Z P, ZHAO J, et al. Driver Behavior Characteristics Identification Strategies Based on Bionic Intelligent Algorithms [J]. IEEE Transactions on Human-machine Systems, 2018, 48 (6): 572-581.
- [93] 苏琛. 考虑驾驶员驾驶习性的汽车纵向智能辅助驾驶系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
SU Chen. Research on Vehicle Longitudinal Intelli-

- gent Driving Assistant System Considering Driver's Driving Habit [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [94] SUNDARAVADIVELU K, SHANTHARAM G, PRABAHARAM P, et al. Analysis of Vehicle Dynamics Using Co-simulation of AVL-CRUISE and CarMaker in ETAS RT Environment [C] // IEEE. International Conference on Advances in Electrical Engineering. New York: IEEE, 2014: 1-4.
- [95] HOSSAIN S, FAYJIE A R, DOUKHI O, et al. CAIAS Simulator: Self-driving Vehicle Simulator for AI Research [J]. Intelligent Computing & Optimization, 2019, 866: 187-195.
- [96] OTTEN S, BACH J, WOHLFAHRT C, et al. Automated Assessment and Evaluation of Digital Test Drives [M] // Springer. Advanced Microsystems for Automotive Applications 2017. Berlin: Springer, 2017: 189-199.
- [97] HAO H, MING H P, ZHI J L. Hardware-in-the-loop Simulation Technology of Wide-band Radar Targets Based on Scattering Center Model [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28 (5): 1476-1484.
- [98] LI X, DENG W, WANG J, et al. Mechanism Analysis and Simulation Study of Automobile Millimeter Wave Radar Noise [J]. SAE Paper 2018-01-1641.
- [99] HAGER B, ALLEN J. Raw Data Injection and Failure Testing of Camera, Radar, and Lidar for Highly Automated Systems [J]. SAE Paper 2019-01-1378.
- [100] WANG J, SGAI Y M, GE Y M, et al. A Survey of Vehicle to Everything (V2X) Testing [J]. Sensors, 2019, 19 (2): 1-20.
- [101] DI MG, VICO F, CRISCI F, et al. An Innovative Real-time Test Setup for ADAS's Based on Vehicle Cameras [J]. Transportation Research Part F, 2019, 61: 252-258.
- [102] 呼啸.应用 ECU 在环仿真的 EPS 系统嵌入式软件测试研究[D].长春:吉林大学,2012.
HU Xiao. Research on Embedded Software Testing of EPS System Based on ECU-in-the-loop Simulation [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [103] DROLIA, WANG Z, VEMURI, et al. Demo Abstract: AutoPlug — An Automotive Test-bed for ECU Testing, Validation and Verification [C] // IEEE. International Conference on Information Processing in Sensor Networks. New York: IEEE, 2011: 131-132.
- [104] WE K S, LEE C G, LEE J, et al. ECU-in-the-Loop Real-time Simulation Technique for Developing Integrated Vehicle Safety System [C] // IEEE. International Conference on Control, Automation and Systems. New York: IEEE, 2014: 1432-1437.
- [105] 朱冰,贾晓峰,王御,等.基于双 dSPACE 的汽车动力学集成控制快速原型试验[J].吉林大学学报:工学版,2016,46(1):8-14.
ZHU Bing, JIA Xiao-feng, WANG Yu, et al. Rapid Prototype Test for Integrated Vehicle Dynamic Control Using Two dSPACE Simulators [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2016, 46 (1): 8-14.
- [106] 陈志成,吴坚,赵健,等.混合线控制动系统制动力精确调节控制策略[J].汽车工程,2018,40(4):86-93.
CHEN Zhi-cheng, WU Jian, ZHAO Jian, et al. Control Strategy for Accurate Adjustment of Braking Force in Hybrid Brake by Wire System [J]. Automotive Engineering, 2018, 40 (4): 86-93.
- [107] CALE J, JOJNSON B, DALL A, et al. Mitigating Communication Delays in Remotely Connected Hardware-in-the-loop Experiments [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 (12): 9739-9748.
- [108] NASIRI M, MONTAZERI-GH M. Time-delay Compensation for Actuator-based Hardware-in-the-loop Testing of a Jet Engine Fuel Control Unit [J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2012, 226 (10): 1371-1380.
- [109] YE Y, ZHAO J, WU J, et al. Real-time Automatic Test of AEB with Brake System in the Loop [J]. SAE Paper 2018-01-1450.
- [110] ZHANG Y, LU S, YANG Y, et al. Internet-distributed Vehicle-in-the-loop Simulation for HEVs [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67 (5): 3729-3739.
- [111] PFEFFER R, LEICHSENRING T. Continuous Development of Highly Automated Driving Functions with Vehicle-in-the-loop Using the Example of Euro NCAP Scenarios [M] // Springer. Simulation and Testing for Vehicle Technology. Berlin: Springer, 2016: 33-42.
- [112] TAMAS T, MATYAS S, SANDOR V, 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. New York: IEEE, 2018: 1-6.
- [113] 黄武陵.平行驾驶系统支持的自动驾驶安全性研究

- [D]. 北京:中国科学院大学,2014.
- HUANG Wu-ling. Research on Autonomous Driving Safety Supported by Parallel Driving System [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [114] WANG F Y, ZHENG N N, CAO D P, et al. Parallel Driving in CPSS: A Unified Approach for Transport Automation and Vehicle Intelligence [C] // IEEE. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. New York: IEEE, 2017: 577-587.
- [115] XU Z G, WANG M L, ZHANG F Z, et al. PaT-AVTT: A Hardware-in-the-loop Scaled Platform for Testing Autonomous Vehicle Trajectory Tracking [J]. Journal of Advanced Transportation, 2017: 1-12.
- [116] LEITNER A, METZNER S. Challenges for Reproducing Real-life Test Runs in Simulation for Validating Automated Driving Functions [J]. E & I Elektrotechnik und Informationstechnik, 2018, 135 (4/5): 360-364.
- [117] 陈卫卫,王卫星. 车道偏离预警线图像边缘优化检测仿真[J]. 计算机仿真, 2017,34(6):394-397.
- CHEN Wei-wei, WANG Wei-xing. Lane Departure Warning Line Image Edge Detection Optimization Simulation [J]. Computer Simulation, 2017, 34 (6): 394-397.
- [118] BOUNINI F, GINGRAS D, LAPOINTE V, et al. Autonomous Vehicle and Real Time Road Lanes Detection and Tracking [C] // IEEE. Vehicle Power & Propulsion Conference. New York: IEEE, 2015: 1-6.
- [119] 青海银. MST 雷达应用技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2016.
- QING Hai-yin. Research on the Applied Technology of MST Radar [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [120] TONG D S, AJINKYA B, HERMAN V. Simulation-based Testing Framework for Autonomous Driving Development [C] // IEEE. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM). New York: IEEE, 2019: 576-583.
- [121] TURING A M. Computing Machinery and Intelligence [J]. Mind, 1950, 59: 433-460.
- [122] LI L, WANG X, WANG K F, et al. Parallel Testing of Vehicle Intelligence Via Virtual-real Interaction [J]. Science Robotics, 2019 (4): 4106-4109.
- [123] 王海涛. 汽车道路强化腐蚀试验及评价方法[J]. 腐蚀与防护, 2007,28(6):300-302.
- WANG Hai-tao. Study on Strengthening Corrosion Test and Evaluation Method of Automobile Road [J]. Total Corrosion Control, 2007, 28 (6): 300-302.
- [124] YANG H H, PENG H. Development and Evaluation of Collision Warning/Collision Avoidance Algorithms Using an Errable Driver Model [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48 (S1): 525-535.
- [125] LEE K. Longitudinal Driver Model and Collision Warning and Avoidance Algorithms Based on Human Driving Databases [D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2004.
- [126] OLIVARES S P, REBERNIK N, EICHBERGER A, et al. Virtual Stochastic Testing of Advanced Driver Assistance Systems [C] // Springer. Advanced Microsystems for Automotive Applications 2015. Berlin: Springer, 2016: 25-35.
- [127] FELLNER A, KRENN W, SCHLICK R, et al. Model-based Mutation-driven Test Case Generation Via Heuristic-guided Branching Search [J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2019, 18 (1): 1-28.
- [128] LI K C, LIU Y H, ZHU J H, et al. Road Scene Modeling Based on Superpixel Markov Random Field [C] // CIMIC. Proceedings of 2017 China Automation Conference (CAC2017) and International Intelligent Manufacturing Innovation Conference (CIMIC2017). Jinan: CIMIC, 2017: 1-10.
- [129] ELIAS R, HEIKO K, ABDULAH K, 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.
- [130] XIA Q, DUAN J, GAO F, et al. Automatic Generation Method of Test Scenario for ADAS Based on Complexity [J]. SAE Paper 2017-01-1992.
- [131] SCHILLING R, SCHULTZ T. Validation of Automated Driving Functions [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2016.
- [132] LIAO S, LIU Y H, ZHANG C. Road Scene Video Content Enhancement Method Using AR Technology [C] // CIMIC. Proceedings of 2017 China Automation Conference (CAC2017) and International Intelligent Manufacturing Innovation Conference (CIMIC2017). Jinan: CIMIC, 2017: 1-10.
- [133] ALEXANDER K, MICHAEL G, SOREN H, et al. Bridging the Gap Between Open Loop Tests and Statistical Validation for Highly Automated Driving [J].

- SAE International Journal of Transportation Safety, 2017, 5 (1): 81-87.
- [134] LI H, QIN X, FEI X, et al. Study on the Test Scenarios of Level 2 Automated Vehicles [C] // IEEE. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). New York: IEEE, 2018: 49-54.
- [135] VISHNUKUMAR H J, BUTTING B, MULLER C, et al. Machine Learning and Deep Neural Network - Artificial Intelligence Core for Lab and Real-world Test and Validation for ADAS and Autonomous Vehicles; AI for Efficient and Quality Test and Validation [C] // IEEE. 2017 Intelligent Systems Conference (IntelliSys). New York: IEEE, 2017: 714-721.
- [136] ECKSTEIN L, ZLOCKI A. Safety Potential of ADAS-combined Methods for an Effective Evaluation [C] // TRID. 23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington DC: TRID, 2013: 1-7.
- [137] AHLSTROM C, VICTOR T, WEGE C, et al. Processing of Eye/Head-tracking Data in Large-scale Naturalistic Driving Data Sets [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13 (2): 553-564.
- [138] NAJM W G, SMITH J D, YANAGISAWA M. Pre-crash Scenario Typology for Crash Avoidance Research [R]. Washington DC: NHTSA, 2007.
- [139] APARICIO A. Status of Test Methods for Autonomous Emergency Braking Systems — Results from the Active Test Project [J]. SAE Paper 2013-01-0725.
- [140] LENARD J, DANTON R, AVERY M, et al. Typical Pedestrian Accident Scenario for the Testing of Autonomous Emergency Braking Systems [J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 73: 73-80.
- [141] 李霖,朱西产,刘颖,等. 涉及骑车人的典型交通危险场景[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2013, 42 (7):1082-1087.
- LI Lin, ZHU Xi-chan, LIU Ying, et al. Typical Traffic Risk Scenarios Related to Pedal Cyclists [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 42 (7): 1082-1087.
- [142] 苏江平,陈君毅,王宏雁,等. 基于中国危险工况的行人交通冲突典型场景提取与分析[J]. 交通与运输, 2017(增1):209-214.
- SU Jiang-ping, CHEN Jun-yi, WANG Hong-yan, et al. Establishment and Analysis on Typical Road Traffic Near-crash Scenarios Related to Pedestrian in China [J]. Traffic and Transportation, 2017 (S1): 209-214.
- [143] XIA L, ZHU X C, MA Z X. Test Scenario for Automatic Emergency Braking System Under Cut-in Dangerous Conditions [C] // INFATS. INFATS Proceedings of the 14th International Forum of Automotive Traffic Safety. Jinan: INFATS, 2017: 184-197.
- [144] WINKLE T, ERBSMEHL C, BENGLER K. Area-wide Real-world Test Scenarios of Poor Visibility for Safe Development of Automated Vehicles [J]. European Transport Research Review, 2018, 10 (2): 32.
- [145] TANG Y S, WANG L Y. Development of Scenes Drawing System for Urban Road Accidents [C] // IEEE. IEEE International Conference Mechatronics & Automation. New York: IEEE, 2011: 1152-1157.
- [146] 吴斌,朱西产,沈剑平,等. 基于自然驾驶研究的直行追尾危险场景诱导因素分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2018, 46(9):1253-1260.
- WU Bin, ZHU Xi-chan, SHEN Jian-ping, et al. Analysis of Causation of Rear-end Incidents Based on Naturalistic Driving Study [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2018, 46 (9): 1253-1260.
- [147] ZHAO D, HUANG X, PENG H, et al. Accelerated Evaluation of Automated Vehicles in Car-following Maneuvers [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017: 1-12.
- [148] HUANG Z, ZHAO D, LAM H, et al. Evaluation of Automated Vehicles in the Frontal Cut-in Scenario - An Enhanced Approach Using Piecewise Mixture Models [C] // IEEE. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). New York: IEEE, 2016: 197-202.
- [149] ROYDEN H L. Real Analysis [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1948.