

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.029

基于仿真的自动驾驶开发测试架构

向世林, 褚观耀, 王霞

(中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

摘要: 提出一种面向 ADAS 与自动驾驶功能的仿真测试验证框架。该框架基于 Amesim 与 Prescan 联合仿真, 构建高保真车辆动力学、传感器和交通环境模型, 并设计算法测试接口以加速前期验证。框架可支持感知、规划与控制等不同算法类型及多样驾驶场景, 满足安全性、舒适性与能耗/时间最优性的测评需求。以自适应巡航、绿灯监测、自主代客泊车和双车道变道为测试用例, 结果表明该架构能够高效评估与优化算法, 缩短迭代周期。

关键词: 高级驾驶辅助系统; 自动驾驶; 仿真测试; 系统架构

中图分类号: U461.91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0150-04

Simulation based autonomous driving development and testing architecture

XIANG Shilin, CHUGuanyao, WANG Xia

(China Automotive Engineering Research Institute Co., LTD., Chongqing, 401122, China)

Abstract: This paper proposes a simulation-based testing and validation framework for ADAS and autonomous driving functions. The framework integrates Amesim and Prescan co-simulation to build high-fidelity vehicle dynamics, sensor, and traffic environment models, with designed algorithm testing interfaces to accelerate early-stage validation. It supports various algorithm types, including perception, planning, and control, as well as diverse driving scenarios, enabling comprehensive evaluation of safety, comfort, and energy/time efficiency. Four use cases—adaptive cruise control, green-light monitoring, autonomous valet parking, and double-lane changing—are simulated. Results demonstrate that the proposed framework effectively evaluates and optimizes algorithms, thereby accelerating the iteration cycle.

Keywords: Advanced driver assistance Systems; autonomous driving; Simulation testing; System architecture

0 引言

近年来,高级驾驶辅助系统(advanced driver assistance systems, ADAS)和自动驾驶(autonomous driving, AD)的技术快速发展,显著提升了车辆的安全性、舒适性和经济性。它的实现依赖于机械、电气、控制、通信与计算机科学等多学科融合^[1-2]。针对算法测试与评价需求,本文提出一种基于联合仿真的测试框架,综合考虑车辆动力学、交通环境、传感器模型及规划与控制算法,并通过自适应巡航、绿灯监测、代客泊车和双车道变道等案例进行验证。

仿真是 ADAS/AD 验证的重要手段。交通环境包含道路、车辆、行人、障碍物和天气等要素,场景数量呈指数级增长,可能达到数百万级^[3-4]。真实道路测试需数百万至数十亿公里,既耗时又昂贵,且难以覆盖所有场景;同时,新配置或软件更新均需重新测试。因此,开发早期需依赖高效仿真框架,以集成多类算法并实现快速测评^[5-8]。

本文构建了基于 Amesim 与 Prescan 的联合仿真架构。Amesim 用于动力总成、悬架、转向和制动等动力学建模及控制反馈分析,Prescan 用于交通环境模拟并支持 V2V/V2I 通信场景^[9-11]。两者协同可实现虚拟化的自动驾驶功能测试与验证,形成开放交互平台,便于与 ADAS/AD 算法集成,支持大规模仿真和算法迭代优化。

在框架中,感知层处理传感器输入(图像、点云、里程计等)以识别场景并建模环境;规划层生成期望轨迹;控制层引导车辆沿轨迹运行。算法设计需同时保证安全性、满足非完整性及加速/转向约束,并兼顾舒适性、能耗与环保性^[12-16]。此外,还需具备对不确定性的鲁棒性,如模型简化误差、复杂环境的非线性特性及传感器噪声。将物理和环境因素综合进仿真框架,有助于全面验证感知、规划与控制算法。ADAS/AD 协同仿真架构如图 1 所示。

本文提出的测试流程包括 3 步:1) 基于真实场景数据和 Amesim 动力学模型进行算法开发与

第一作者简介: 向世林(1988—),男,重庆云阳人,工程师,本科,研究方向为汽车测评,2332231818@qq.com。

调试;2)结合 Prescan 传感器模型进行验证,参考 ISO 标准设定场景与参数;3)对多场景仿真结果进行综合评估。结果表明:该联合仿真框架能够高效支持 ADAS/AD 算法测试,加速开发与优化进程。

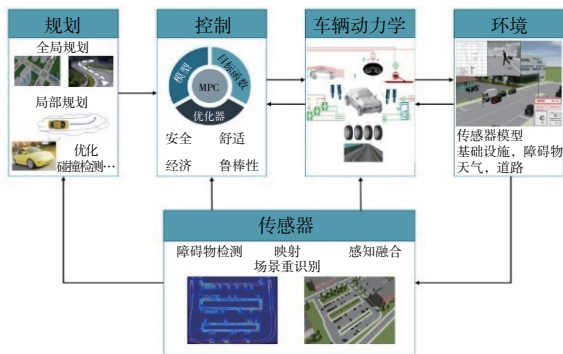


图1 ADAS/AD 协同仿真架构

1 联合仿真测试架构

1.1 Amesim 动力学模型适配

在车辆动力学建模时,暂不考虑传感器和外部环境对自车测量信号的影响。Amesim 求解器运行车辆模型,此环节主要是确保车辆动力学模型准确,使车辆在理想环境下具有良好的控制性能。控制器可以从 Amesim 本身或其他环境(即 Matlab 或 Python)中进行开发^[17-20]。

1.2 Prescan 环境生成

通过 Prescan 进行环境建模,以模拟交通环境和传感器识别的场景,并通过相关场景进行仿真测试。

考虑到具体的 ADAS 应用和测试目的,为了方便工作流程规范化,必须就不同算法模块的数据接口达成一致。这个接口定义了算法模块之间交换哪些变量以及以何种方式交换信息。

1.3 场景泛化生成

自动驾驶汽车必须证明其 ADAS/AD 系统在所有可能的天气和路况下都能以安全的方式对所有可能的交通场景做出反应。只有在证明其安全水平远高于人类驾驶水平时,才能实现智驾功能的大规模普及,这将需要大量的模拟验证场景,进行海量的虚拟场景测试分析。通过结合系统仿真软件 Amesim 和 Prescan,根据仿真目标和实车道路测试可用数据,可以生成所有相关算法模块的场景库,并具有不同的保真度,从而形成大量的泛化场景^[21]。

2 仿真测试案例分析

本节选取 4 种典型的测试用例:自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)、绿灯监测、自动代客泊车和双车道变道进行仿真测试分析,验证本文所设计的联合仿真架构的有效性。上述 4 种典型场景具有不同的智驾功能并使用不同的联合仿真接口进行测试验证。

2.1 自适应巡航控制

在高速公路上行驶时,ACC 系统会持续保持自车与车道上的前车之间的安全距离。ACC 测评标准考虑以下 4 个特征来描述 ACC 控制器的性能。

1)安全。描述 ACC 控制器如何避免和处理危险情况。任何时候都应该避免碰撞。衡量控制器避免发生碰撞的可量化参数是碰撞时间。

2)舒适性。描述 ACC 控制器的柔和程度,以确保乘客的舒适乘坐感受。为了达到理想的舒适水平,ISO 标准设定了加速度和减速度的阈值。

3)跟车距离。自车保持的跟随距离会影响乘客的心理舒适度。如果 ACC 系统的行为与普通人类驾驶员的行为不同,跟车距离过短或过长都会引发驾驶人员的不舒适感。一般来说,驾驶人员会保持一个与速度相关的跟随距离。

4)经济性。自车驱动转矩会影响车辆的能耗水平,高转矩需求会导致更高的能耗,ACC 能否更加顺滑的驱动自车行驶会影响到自车的经济性。

如图 2 所示,基于 ISO 标准中对 ACC 的 3 个场景进行仿真测试。第一个场景测试开发的 ACC 系统的识别能力。第二个场景测试 ACC 重新切换能力。ACC 重新切换意味着控制器可以根据传感器输出自主判断前方行驶的车辆,并在当前交通状况发生变化时调整其判断,例如由于前车切入或切出时。第三个场景考虑的是 ACC 控制器的曲线跟踪能力。

2.2 绿灯监测

绿灯监测的主要目的是汽车通过十字路口时在红绿灯处不停车,在行驶的路线中路口内尽量不等待红灯。这可以基于交通信号基础设施向车辆传输的信息(车辆参考速度)来实现。该驾驶辅助功能的优点包括减少交通堵塞、能量消耗和驾驶人员的疲劳感。图 3 显示了该 ADAS 应用场景的 Prescan 仿真示例。联合仿真设置与 ACC 场

景相似,但更侧重于舒适性分析,特别是当汽车开始减速时,可以根据红绿灯信息来判断,从而使自车以更加舒适的速度行驶。

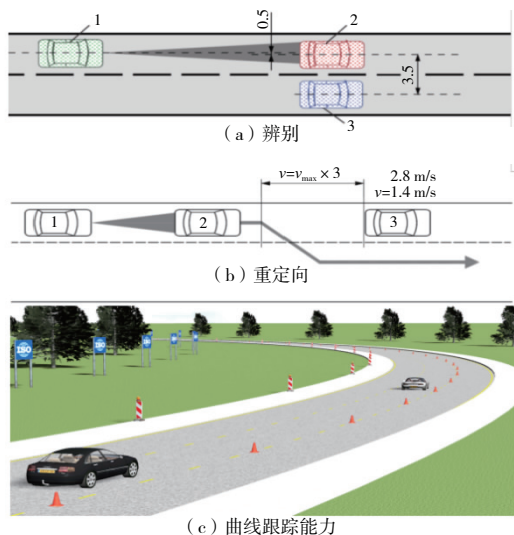


图2 来自 ISO15622 和 ISO22178 的 ACC 测试场景

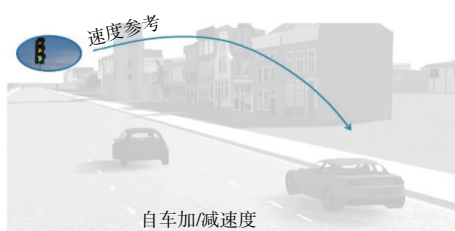


图3 绿灯监测

2.3 自动代客泊车

代客泊车是泊车辅助功能的延伸,预计将是首批商用全自动驾驶功能之一,因为自车是在低速下行驶而且交通环境可以监控。当用户激活该辅助驾驶功能时,该功能将与停车区域管理(PAM)系统一起完全接管车辆的控制,车辆将通过停车区域,直到到达指定的停车位置。在这个功能中,需要有不同的规划和控制策略。1)映射和全局规划。生成一个带有静态元素的停车场地图。然后规划器使用该地图生成从初始交接区域到目标停车位置的路径(或路径点)。2)车辆规划和控制。给定来自全局规划的参考路径,车辆将使用其传感器和感知来规划自己的轨迹,以遵循生成的路径。它们必须处理来自停车区域的其它交通要素的交互,例如行人和其他车辆进入或离开停车场时会干扰自车的行驶区域。3)移动到停车位。类似于局部规划阶段,但由于空间狭窄和停放车辆等障碍物,可行行驶区域较小,经常需要和倒车路径配合完成停车行为。

2.4 双车道变道场景

变道场景是车辆最重要但也最具挑战性的驾驶场景之一。高效的变道辅助系统不仅有助于提高安全性,还有助于提高舒适性和驾驶平稳性。在本文中,我们使用 ISO 3888-1:2099(E)中的场景仿真测试了双车道变道工况。该场景如图4所示。

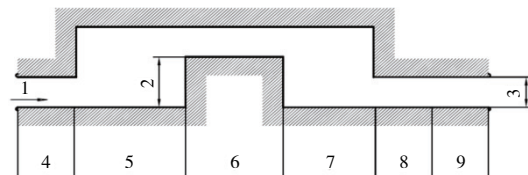


图4 ISO 3888-1:2099(E)中的双车道变换轨迹

在本节中,以一个用于双变道场景的 MPC 控制器设计为例,在这个场景中,ADAS/AD 感知系统检测到主车前面有一辆车,并决定变道。该仿真场景中只涉及控制模型设计,并假设已经给出了感知(传感器模型、物体和车道检测算法、SLAM等)和变道参考轨迹。控制目标是在模拟的 15DOF Amesim、虚拟交通场景和 Prescan 传感器模型的基础上,设计一个满足 ISO 3888-1:1999(E)标准的自动变道控制器。

1)地面真值开发和测试。首先在地面真值环境中模拟场景。控制器始终可访问完全准确的输入变量,这可以与具有无限分辨率、无限采样率和零噪声的完美传感器的情况相媲美。地面真实环境是在 Amesim 和 Simulink 的联合仿真中创建,车辆模型在 Amesim 中运行,控制器模型在 Simulink 中运行。在仿真过程中,可以从 Amesim 模型中提取准确的信号,如位置、速度、加速度、偏航和偏航率,并将其输入控制器。对于控制器的设计,必须考虑到不同驾驶特性的重要性,类似于 ACC 的例子,如安全性、舒适性和经济性。控制器的调整依赖于两个步骤。第一步是找出可以配置哪些参数,以便调整控制器以获得最佳性能。在给定优化求解器和采样时间的前提下,MPC 调整参数为预测时域、不同状态权重和目标函数输入。第二步评估比其他配置提供更好结果的最优参数配置。这可以通过随机或详尽地测试不同的参数集来完成。

2)使用交通环境和传感器进行测试。基于真值系统开发的控制器还无法用于处理真实的传感器信号。地面真值控制器必须扩展并适应不同交通场景和道路/天气条件下的真实传感器输出。在 Prescan 上对传感器和环境进行建模。来自

Prescan 的 ADAS 传感器安装在自车上并感知环境。这些传感器的输出信号由 Prescan 输出到 Simulink 中的变道控制器。当前的车辆状态(位置,速度,偏航和偏航率)也被控制器使用,这些信号来自 Amesim 模型。控制器计算转向、油门和刹车信号,然后输入到 Amesim 车辆模型中。此外,对于 4 个轮胎中的每个轮胎,通过 Simulink 将一个道路摩擦系数值(基于汽车的位置和地面材料)发送给 Amesim 模型。给定这些输入(轮胎摩擦、转向角度和油门/刹车信号),车辆的状态可以通过 Amesim 求解器计算出来。然后使用新的车辆状态来更新 Prescan 中车辆模型的状态。相应地,环境感知被更新,循环完成仿真测试过程。

对于仿真测试过程来说,还可以设计特定的测评标准来得到特定工况下的最优控制器。控制仿真结果如图 5、图 6 和图 7 所示。仿真测试结果表明,汽车在遵循参考轨迹的同时,有效而平稳地执行变道轨迹。

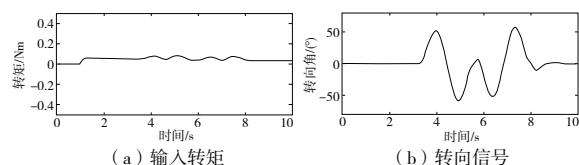


图 5 输入转矩和转向信号

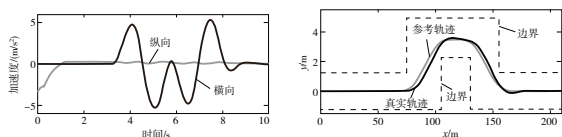


图 6 车身加速度 图 7 车辆的参考轨迹和真实轨迹

3 结语

本文提出了一种针对自动驾驶算法测试需求的联合仿真测评架构,基于 Amesim 和 Prescan 的联合仿真测试框架可以整合不同算法模块的仿真测试需求,更加高效地完成算法仿真测评。完整的 ADAS/AD 开发可以通过高保真的车辆动力学、传感器模型和真实世界环境模拟高效地进行仿真测试和验证,大大减少了必须执行的真实原型测试的工况。此外,这些测试的可重复性远远高于在真实原型中执行的测试,能够提高仿真测试效率,加速算法迭代进度。

参考文献:

- [1] KALRA N, PADDOCK S M. Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? [J]. Transportation Research Part

A: Policy and Practice, 2016, 94: 182-193.

- [2] 赵祥模国家重点研发计划(YFB)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.
- [3] 罗健伟, 胡哲铭, 郑开超, 等. 基于数字孪生的自动驾驶仿真测试研究[J]. 现代计算机, 2023, 29(9): 1-8, 38.
- [4] ZHAO R C, WONG P K, XIE Z C, et al. Real-time weighted multi-objective model predictive controller for adaptive cruise control systems[J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(2): 279-292.
- [5] 史晓雨. 自动驾驶汽车测试场景与加速测试方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [6] GAO Z H, WANG J, HU H Y, et al. Multi-argument control mode switching strategy for adaptive cruise control system[J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 581-589.
- [7] 张兴宇. 面向自动驾驶仿真测试的虚拟路网环境构建与场景自动生成算法研究及实现[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [8] 张培兴. 基于场景的自动驾驶汽车虚拟仿真加速测试与评价方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [9] 王若萱, 吴建平, 徐辉. 自动驾驶汽车感知系统仿真的研究及应用综述[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(12): 2507-2521.
- [10] 刘法旺, 何丰, 周时莹, 等. 基于场景的智能网联汽车模拟仿真测试评估方法与实践[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(2): 135-145.
- [11] 绳红强, 黄海英, 石小锐, 等. 基于改进蚁群算法的自动驾驶路径规划研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(5): 203-206.
- [12] 马明月, 苗泽霖, 王伟清, 等. 基于通行规则模型的自动驾驶仿真场景构建研究[J]. 汽车工程, 2025, 47(8): 1437-1447, 1458.
- [13] 南春丽, 阎子涵, 杨澜, 等. 自动驾驶极限道路线形测试场景生成方法[J]. 中国公路学报, 2025, 38(8): 388-396.
- [14] 石帅坤. 高速公路自动驾驶汽车切入场景集生成与测试方法[D]. 北京: 中国人民公安大学, 2025.
- [15] 钟韵瑶. 面向 V2X 技术的智能驾驶虚拟测试场景搭建与重构方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2025.
- [16] 吴建平, 李冠洲, 赵帅, 等. 自动驾驶仿真测试技术驱动汽车产业智能跃迁[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(7): 1649-1664.
- [17] 单子桐. 面向危险场景的自动驾驶车辆决策规划研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.
- [18] 范天昕. 自动驾驶系统多仿真平台联动测试评价方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.
- [19] 许依东. 自动驾驶仿真模型的形式化建模与验证研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2025.
- [20] 陈贞, 李京泰, 郭煌, 等. 基于大语言模型的自动驾驶仿真测试场景生成[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(3): 329-339.
- [21] 陈君毅, 肖文博, 王天辰, 等. 基于联合仿真的自动驾驶控制执行系统预期功能安全测试方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 777-785.

收稿日期: 2024-02-26