

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.050

基于虚拟交通和车辆在环的自动驾驶功能测试

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:自动驾驶功能开发需要在实车部署之前进行泛化的测试和验证,但此类系统的性能尚无法进行全场景的现实交通场景测评,为此提出一种新型的车辆在环混合测试方法。该方法可以在封闭的试验场中使用模拟的交通环境和传感器信号对虚拟交通场景中的真实车辆进行测试评价,并且适用于在虚拟场景中测试和验证高级驾驶辅助系统(ADAS)功能。为验证混合测试方法的有效性,以验证轨迹规划算法的 ADAS 功能为例进行测试。实验结果表明:该方法可以结合虚拟和现实测试的优点,在多个场景中泛化验证算法性能,并可提升测试准确性和效率,从而加速算法开发流程和迭代速度。

关键词:自动驾驶;高级驾驶辅助系统;混合测试;车辆在环

中图分类号:U461.91 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0265-06

Autonomous Driving Function Testing Based on Virtual Traffic and Vehicle-in-the-Loop

Xiang Shilin, Chu Guanyao, Wang Xia

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

Abstract: The development of autonomous driving functions requires generalized testing and validation before deployment on real vehicles. However, the performance of such systems cannot yet be evaluated across full-scenario real-world traffic conditions. This paper proposes a novel vehicle-in-the-loop hybrid testing method, which can test and evaluate real vehicles in virtual traffic scenarios within a closed test site using simulated traffic environments and sensor signals, and is applicable for testing and validating ADAS functions in virtual scenarios. To verify the effectiveness of the proposed hybrid testing method, an ADAS function for validating trajectory planning algorithms is taken as an example for testing. Experimental results show that this method can combine the advantages of virtual and real testing, generalize and verify algorithm performance across multiple scenarios, and improve testing accuracy and efficiency, thereby accelerating the algorithm development process and iteration speed.

Keywords: autonomous driving; advanced driver-assistance systems (ADAS); hybrid testing; vehicle-in-the-loop

0 引言

随着自动驾驶技术与相关功能发展日益加快,测试自动驾驶或高级驾驶辅助系统(advanced driver-assistance systems, ADAS)功能,并验证车辆在多种交通场景下的性能表现已经成为系统开发周期中面临的主要挑战之一^[1]。为了确保自动驾驶功能的可靠性,必须在安全驾驶条件下进行多项实车测试。然而,这些测试通常需要较长的周期和较高的成本,并且在将此类系统部署到实车之前,通常无法完全验证每个 ADAS 功能的全场景表现。目前汽车行业的普遍方法是根据某些性能标准使用仿真工具来验证自动驾驶系统功能,但仅通过仿真进行验证和测试也有其局限性,与实车测试表现也会存在差异^[2-4]。为了解决上述问题,需要结合仿真测试与实在测试的新型方

法,比如实时硬件在环(HIL)仿真、车辆在环(Vehicle-in-the-loop, VIL)仿真等^[5-7],这些测试手段都是仿真与真实测试相结合理念的实现。

为了对 ADAS 和自动驾驶系统的进行全方位的测试,本文提出了虚拟仿真和实车测试相结合的混合测试方法,其中真实车辆可以与仿真车辆有机整合,在统一的测试框架中分析 ADAS 系统在虚拟创建的交通场景中的性能表现。混合测试是一种基于 ICOS 联合仿真平台的新型测试方法^[8-9],它可以有效测试涉及自动驾驶和手动驾驶车辆的多种混合交通场景。在开发的混合测试解决方案中,一辆真实的测试车辆在封闭的试验场上行驶,而感知传感器所需的必要输入则由 SUMO 交通仿真软件对静态和动态环境进行实时联合仿真提供。所开发的解决方案与现有的 VIL 或 VIL 系统的主要区别在于利用了实时联合仿真平台,并

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。

且基于城市微观交通仿真平台(simulation of urban mobility, SUMO)集成了现实交通流模型。该混合测试方法可以针对 SAE 3 级 ADAS 功能包括自适应巡航控制(ACC)、车道保持辅助(LKA)和轨迹规划(TP)功能等进行测评,从而测评该算法的横向和纵向跟踪以及变道决策能力。

如表 1 所示,为测试所提出的混合测试方法的有效性,进行了纯仿真和真实道路测试的定性和定量比较。这里考虑了成本、有效性、时间、灵活性和真实性等评分标准,由此得出了纯仿真、混和测试及真实测试的总体得分分别为 7、9、13。结果表明,混合测试评分介于真实测试评分和纯仿真评分之间。虽然仿真可以以较低的成本为构建和测试驾驶场景提供快速结果和泛化选择,但无法完全取代道路测试,也无法达到百分之百的真实水平。同时道路测试成本通常很高,并且难以支撑 ADAS 功能的详尽场景测试。因此,本文所提出的混合测试方法可以提供两种传统方法之间的折中解决方案。

表 1 ADAS 测试方法的主观定量比较

参数	得分		
	纯仿真	混和测试	真实测试
成本	1	2	3
有效性	1	2	3
时间	1	1	1
灵活性	3	2	1
真实性	1	2	3

1 虚拟场景建模的联合仿真框架

在混合测试中,测试车辆在封闭的试验场中行驶,并通过耦合协同仿真框架在虚拟交通环境中进行交互。车辆的传感器信号由仿真环境提供,也就是说,协同仿真提供车道标线、交通标志和动态虚拟交通等虚拟对象。当前车辆位置由 GPS 传感器测量,方便在场景地图中进行自车定位。被测车辆的位置和其他车辆状态传输到交通仿真模块,从而车辆可以基于虚拟交通做出相应的驾驶行为。混合测试方法的架构如图 1 所示,其中虚拟仿真和真实测试作为测试环境的两个相互连接的部分,物理和虚拟仿真组件在真实动态交通条件下为评估 ADAS 功能提供测试环境。

测试车辆配备了 ADAS 功能系统,可以通过开发 ECU 中的运行的算法进行控制。测试车辆及其硬件设置的详细信息请参见第 3 节。

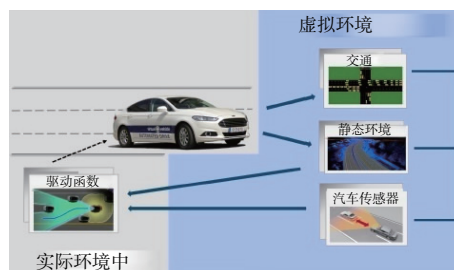


图 1 混合测试模式

1.1 交通流仿真

本文采用 SUMO 交通模拟器作为微观仿真模块用于生成交通流。SUMO 提供了逼真的车辆交通流,可以随机产生多个车辆。仿真中的每辆车使用简化的汽车跟随模型建模。由于交通流仿真关注的是自车对大型交通网络上交通流的交互能力,一般来说,它们的模型并不能再现真实的车辆动力学表现。对于目前混合测试来说,重点是在观察真实车辆的 ADAS 功能是否有效,不需要周围有真实动力学建模的车辆。此外, SUMO 还提供了控制单个车辆的接口。因此,当前车辆的位置,车辆的速度以及航向也需要传输到 SUMO 中。

1.2 静态环境

静态环境主要是为自车提供相关的道路基础设施信息,包括当前路段上所有车道的高度精确路线以及自车前方交通标志的位置。用于描述静态基础设施元素(如车道路线及其属性以及交通标志)的格式是 OpenDRIVE 文件格式,将其作为静态环境的输入。如图 2 所示,根据静态环境的输入和虚线框的参数化,模型将筛选虚线框内所有关于车道的信息,如 x/y 坐标、道路标志类型、车道 id 和道路 id。虚线框内车道的详细描述以及信号将被发送到传感器系统。

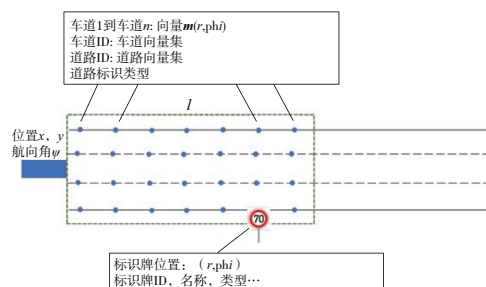


图 2 静态环境输出

图 2 显示了静态环境的输出,它被传输到传感器系统。每条车道都由一组极坐标和特定属性(如车道 ID、道路 ID 和道路标志类型)来描述。

交通信号的描述参数几乎是一样的,比如信号位置、信号 ID 等的极坐标。

1.3 传感器系统

传感器系统用于持续监测车辆的周围环境。传感器系统向自动驾驶功能系统提供不断更新的交通状况信息,使轨迹规划算法能够适应当前的交通状况。协同仿真中的传感器系统包括两个子传感器。第 1 个是静态环境传感器,第 2 个是动态环境传感器。静态环境传感器可以通过其距离 r 和方位角 α 进行参数化设置。该传感器的水平视场对应于汽车内前视摄像头的真实视场,该摄像头检测汽车前方的车道和标志。该传感器的参数化范围为 150 m,方位角为 40° 。

来自静态环境的输入可以被描述为静态地图的一部分,其中包括车辆前方的车道和标志。传感器系统的主要任务是确定地图上的哪些信息位于传感器的视野范围内,并且可以被车辆看到。传感器系统的输出是其视野内的车道和交通标识,如图 3 所示。

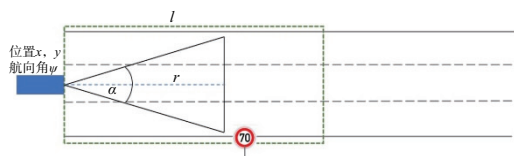


图 3 传感器的输出

动态环境传感器通过耦合接口接收来自 SUMO 仿真的动态输入。由于 ADAS 功能算法需要获取车辆前方以及车辆后部的车辆信息,因此该传感器的参数化方式可以在 200 m 的范围内以 360° 的视场检测车辆,参见图 4。此外,对于每个车辆位置 (x, y) ,纵向速度 v_x 和横向速度 v_y 以及车辆宽度通过界面传输到 SUMO 中。

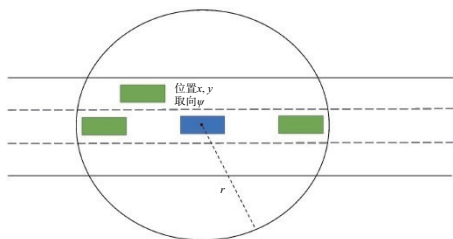


图 4 动态环境传感器视野

2 ADAS 功能控制模块和子系统

2.1 高速公路自主领航

高速公路自主领航(motorway chauffeur, MWC)

是一款 SAE 3/3+级等效 ADAS 功能,结合了多个独立的控制子系统,包括纵向控制系统和横向控制系统。速度和目标距离调节由 ACC 分系统调节,目标轨迹跟踪由 LKA 分系统控制。然而, MWC 的一个重要组成部分是轨迹规划模块,它利用 ACC 和 LKA 子系统的同时执行变道策略规划。

MWC 控制器及其子组件的实现是在 MATLAB/Simulink 和 Carmaker 的仿真环境中开发,然后在测试车上实现。一旦相应的 ADAS 组件在仿真中符合一定的性能标准,就可以嵌入 C/C++代码中,在测试车辆的 ECU 硬件上运行。

2.2 轨迹规划

轨迹规划器接受多源输入(自车动力学,环境对象,交通对象),计算目标速度和位置轨迹。从自车状态上获取车辆动力学参数,如纵向速度 v_x 和横向速度 v_y ,纵向加速度 a_x 和横向加速度 a_y ,以及横摆角速度 $\dot{\psi}$ 。车辆联合仿真框架的传感器组件提供有关道路标志的信息,如位置、线路类型和能见度,以及附近交通参与者的位置、速度和类型。

这里描述的轨迹规划器是为仿真具有明确定义和可见道路标记的高速公路驾驶情况而设计的。轨迹规划器设定车辆在车道中间行驶,当车辆需要离开当前车道并移动到新车道时,触发执行变道操作。轨迹曲线遵循基于贝塞尔曲线的轨迹,如图 5 所示。如果没有其他车辆阻碍自车行驶,轨迹规划使用最右边的车道。如果较慢的前车阻止自车达到其设定的速度,则生成向左车道的变道请求。当不在最右边的车道上行驶时,如果这条车道在车辆前方是无障碍物,轨迹规划器会强制自车切换到右侧车道。此外,换道的在入匝道驾驶情况下需要并入主要交通车道,此时也会触发换道。

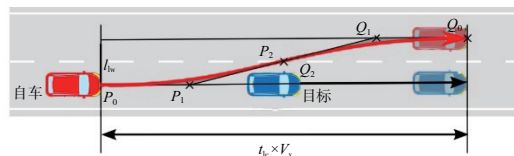


图 5 变道贝塞尔曲线

由图 5 可见, MWC 的 LKA 控制器用于跟踪实际车道并执行换道操作。除了车辆动态变量外,参考轨迹(即要跟随的车道的描述)和偏移量 y_L 是 LKA 控制器的输入参数。有了这两个输入,就可以实时跟踪误差。当 $t < t_{LC}/2$ 时,参考轨迹跟踪车道 1(旧车道),当 $t_{LC}/2 < t < t_{LC}$ 时,参考轨迹跟

踪车道 2(新车道),所需的偏移量 y_L 遵循贝塞尔曲线。在 t_0 时刻,自我车辆从 P_0 点开始变道,在 t_1 时刻 Q_0 点结束变道。变道持续时间 t_{LC} 是轨迹规划器的一个参数。利用 $P_2=Q_2$ 的对称性,将曲线分成两部分,得到两条二次贝塞尔曲线。这条曲线由 3 个控制点 P_0 、 P_1 和 P_2 构成

$$P(t) = (1-t)^2 P_0 + 2t(1-t) P_1 + t^2 P_2 \quad (1)$$

将车道中心线的轨迹与样条曲线的轨迹叠加形成规划结果轨迹。这对于低曲率的直线和曲线都具有有效性。对于变道的决策基于一个位置矩阵,它描述了来自周围交通车辆的位置。每个矩阵元素保存着该区域内最近车辆的 ID。首先,在道路标识(车道线)的约束下,将周围的每辆车分配到一条车道上。这些信息被用于在障碍物矩阵中分配车辆。在已知的周围环境下,生成变道请求,并检查预定义的规则,以确保变道不会造成碰撞。通常,当领先车辆的行驶速度比自车慢时会生成变道请求,但也可能会根据所希望的车道产生变道请求。

在车道变更请求的情况下,必须检查是否满足预定义的规则。这组规则由离散的决策组成,包含目标车道通行条件、车道可通行空间等。这些规则也可以参数化,例如,到领先车辆的必要时间间隔可以通过设置适当的参数来选择。当这些变道检查通过后,就会开始变道。轨迹规划器将期望的横向车道位置传递给 MWC 的轨迹执行控制器。MWC 的 ACC 功能是速度控制器的核心,系统结合变道决策与横向控制器输出的障碍物矩阵、选取合理的速度控制目标。

3 测试车辆和试验装置

用于测试内部开发的 ADAS 功能的测试车辆基于福特蒙迪欧 MY2016 混合动力平台。这辆车具有一套 ADAS 系统,可以完全控制油门、刹车、转向和测试车辆的换挡。该车的图片以及安装的传感器硬件如图 6 所示。

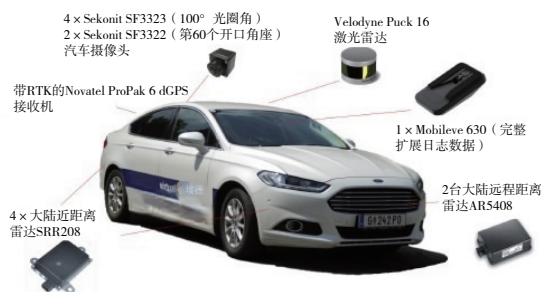


图 6 装有传感器设备的福特蒙迪欧测试车

测试车辆还安装了 dSPACE MicroAutobox-II 实时 ECU,在其中运行 ADAS 功能算法。

基于车载传感器提供的传感器数据以及联合仿真平台的模拟数据进行实时测试。ACC、LKA 和轨迹规划的 ADAS 函数在 MATLAB/Simulink 中实现,然后导出为 C++ 代码,由 MATLAB/Simulink 嵌入式编码器自动生成,在 dSPACE MicroAutobox 实时硬件上运行。因此,运行在 MicroAutobox ECU 上的 ADAS 功能通过 CAN 接口向车辆执行器下发控制命令。

在混合测试中,联合仿真框架在位于车内的 Nuvo 7006 PC 机上运行。测试车辆中的 PC 负责利用联合仿真框架运行交通和环境仿真、传感器模型和目标列表生成算法,同时还实时连接到车辆的 CAN 总线,以收集 PC 上交通仿真中车辆相关的参数。福特蒙迪欧测试车具有实现混合测试方法的完整软硬件架构和内部通信结构,如图 7 所示。

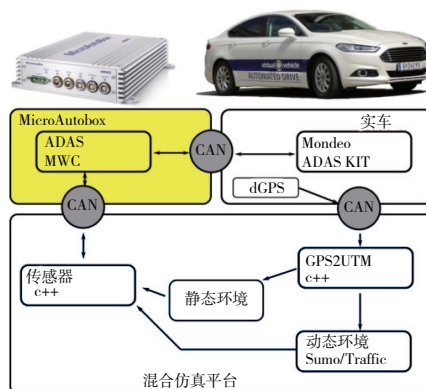


图 7 混合测试的硬件和软件架构

在混合测试方法架构下,模拟测试车辆的传感器信号,并感知在仿真静态环境中创建的虚拟物体以及动态交通组件。模拟的传感器信号排除了 GPS 传感器数据,GPS 传感器数据提供了来自真实车的位置和航向信息,以便在联合仿真平台中使用的高精地图(即静态环境)上定位自车位置信息。自车的位置和其他车辆状态被发送到交通仿真中,交通仿真中的模拟车辆对自车做出反应。车道标线、道路弯度等环境信息以及其他交通参与者只是虚拟存在。虚拟的动态对象由周围的交通车辆组成,而静态环境由道路标记和交通标志等特征组成。混合测试方法的概念如图 1 所示,其中虚拟组件和真实组件分别集中在图的右侧和左侧。

使用虚拟传感器会使车辆无法感知测试区域

(即试验场)中的真实物体和真实道路标记。因此,出于安全考虑,混合测试需要在一个开放的区域进行,该区域必须足够大,以覆盖虚拟测试场景,并在道路布局周围设置额外的缓冲区。

混合测试会生成自车和仿真交通对象的位置和速度的日志。通过这些日志,可以研究自车的性能表现。记录的数据来自用于虚拟交通(SUMO)的模拟工具以及车辆传感器本身(惯性测量,如加速度、偏航率、转向角等)。在测试运行期间,车辆状态(位置、速度、加速度、航向、偏航率等)和周围车辆的状态被记录下来,可用于调试和验证仿真参数。基于记录的数据自动生成测试评价报告,描述了仿真中的车辆 ADAS 性能表现以及真实车辆的实际反馈结果。通过混合测试的结果,可以验证和改进自动驾驶系统的功能算法,加速算法迭代效率。

4 测试结果及分析

在混合测试架构下讨论一个特定的测试案例。下面的试验主要关注虚拟交通情况下的变道行为。由于道路布局以及周围交通情况,轨迹规划触发了变道决策。当车辆在真实的测试路线上行驶时,它可以感知到虚拟车辆的存在,并考虑虚拟旁车对自车的干扰。受测试道路的长度和安全方面的限制,场景内车辆行驶速度不超过 30 km/h。

图 8 显示了一个入口匝道的虚拟地图,该匝道映射到试验场物理可用空间的限制内。 x 轴指向东方, y 轴指向北方。自车从左下角开始,一共有 3 条车道。最右边的车道用作入匝道。另外两条车道组成了主干道。在东北端,由于真实测试场地的限制,主路变窄为一条车道。这可以模拟一个道路工程区域,当虚拟交通车流(图 8 中的空矩形)在主干道上行驶时,自车(实矩形)从最右边的车道开始,这对应于入口匝道。主干道路上的限速为 30 km/h。自车的轨迹(实线)表明它进行了两次变道。第一次是自车从入口匝道并入主要主干道,第二次是由于测试场地末端的道路布局变窄再次变道。

图 9 为同一试验期间自车的纵向参数。在图 9(a)中,可以看到试验期间自车的实际速度与期望速度。我们观察到自车根据 30 km/h (即 8.33 m/s)的期望速度调整其速度。图 9(b)显示了踏板的驱动命令。图 10 描述了自车的横向动态,反映了轨迹规划器控制功能的性能表现,包括横摆角、横向加速度以及车辆输出的指令转向角等参数。

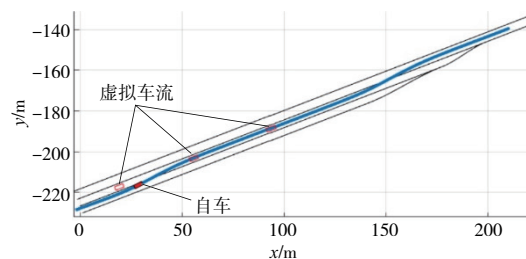
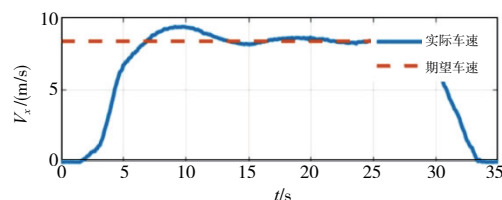
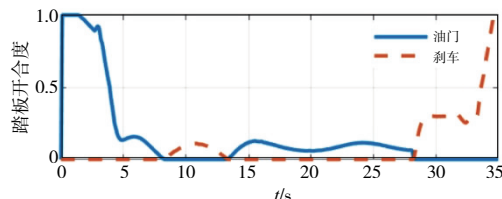


图 8 测试道路和自车的轨迹

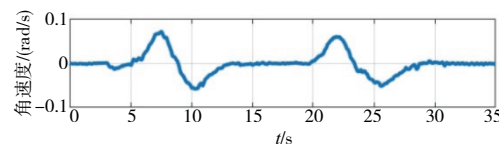


(a) 速度

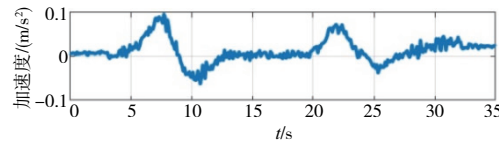


(b) 踏板

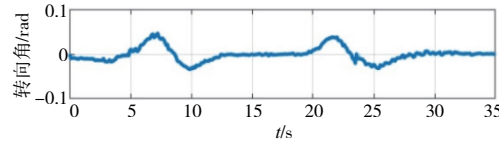
图 9 自车纵向状态参数



(a) 角速度



(b) 加速度



(c) 转向角

图 10 自车横向动态参数

为了对上述混合测试案例进行比较,本文对相同的场景进行了纯仿真的测试。该仿真基于与混合测试实现中相同的联合仿真框架,但使用 IPG-Carmaker 中的车辆模型来替换实际车辆,并且 ADAS 功能在 MATLAB/Simulink 上运行。联合仿真框架的其余部分与混合测试保持一致。

在纯仿真中得到的车辆轨迹如图 11 所示。可以观察到,自车的变道行为与图 8 中的混合测试略

有不同,在变道决策上有明显的延迟。由于变道决策被延迟,横向动力学变量的峰值响应如图 12 所示,其峰值明显更大,特别是对于第二次变道过程。

纯仿真测试的横向动力学(如图 12 所示)和纵向动力学(如图 13 所示)的总体趋势与混合仿真测试结果相似。

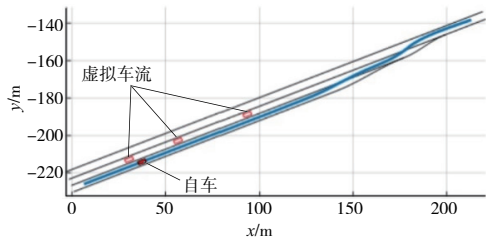


图 11 相同场景下的纯仿真车辆轨迹

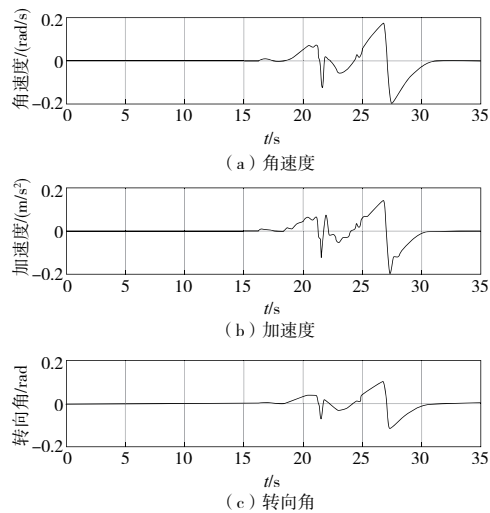


图 12 纯仿真车辆的横向动态参数

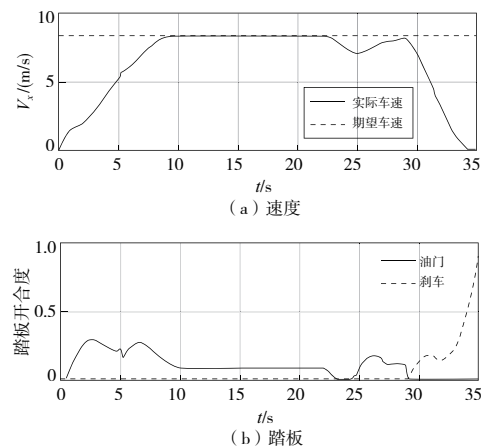


图 13 纯仿真车辆纵向动态参数

5 结语

本文将实车测试与仿真相结合,提出了一种混合测试方法,用以评估汽车 ADAS 和自动驾驶功能,并对轨迹规划算法进行了具体的测试。描

述了联合仿真框架及其所有子组件。该框架实现了交通场景仿真与真实测试车辆之间的实时集成,并可以进行 ADAS 功能测试评价。此外,还介绍了测试装置的硬件和软件架构,分析相关的轨迹规划性能参数,如变道持续时间、轨迹跟随的超调或极限驾驶条件下的稳定性特征。

混合测试架构可以通过多种方式进行扩展。本文场景建模只使用了一个交通模拟器,后续可以通过将一个逼真的环境模拟器(如 CARLA)集成到联合仿真框架中来改进,从而将物理传感器模型包含到联合仿真框架中,以便与感知算法开发一起使用。在进一步的扩展中,可以将实际的车载传感器集成到联合仿真框架中,以便将仿真和现实世界的元素结合起来,作为混合测试方案的模块之一,提高混合测试架构的兼容性。

参考文献:

- [1] Fayazi S A, Vahidi A. Vehicle-in-the-loop (VIL) verification of a smart city intersection control scheme for autonomous vehicles [C]//2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). Maui, HI, USA: IEEE, 2017: 1575-1580.
- [2] Augustin D, Schucker J, Tschirmer J, et al. A simulation-based reinforcement learning approach for long-term maneuver planning in highway traffic scenarios [C]//Proceedings of the 9th VDI/VDE Fachtagung AUTOREG 2019. Mannheim: VDI Verlag, 2019: 47-60.
- [3] 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.
- [4] 郝玉锴, 文圣丰, 吴云, 等. 基于模型的驾驶辅助系统设计与实现[J]. 计算机仿真, 2021, 38(11): 108-111, 449.
- [5] Lopez P A, Behrisch M, Bieker-Walz L, et al. Microscopic traffic simulation using SUMO [C]//2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Maui, HI, USA: IEEE, 2018: 2575-2582.
- [6] 刘法旺, 徐晓庆, 陈贞, 等. 搭载自动驾驶功能的智能网联汽车安全测试与评估方法研究[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(3): 221-227.
- [7] 朱向雷, 王海弛, 尤翰墨, 等. 自动驾驶智能系统测试研究综述[J]. 软件学报, 2021, 32(7): 2056-2077.
- [8] 郭魁元, 吴飞燕, 张通, 等. 基于 FuSa 和 SOTIF 的 L2 级驾驶辅助系统整车测试方法研究[J]. 中国汽车, 2020, 30(12): 21-24, 60.
- [9] 王凤娇, 宗岩, 靳志刚, 等. 自动驾驶仿真测试场景设计[J]. 科学技术创新, 2020(29): 100-101.

收稿日期: 2024-03-11