



# 智能网联汽车在环仿真测试 标准体系研究报告

全国汽车标准化技术委员会  
智能网联汽车分技术委员会  
自动驾驶标准工作组

2024年5月

---

## 前言

仿真测试是智能网联汽车测试验证“多支柱法”的重要内容。当前行业应用的在环仿真平台方案多、品牌多、接口不统一、模型不通用。从而给仿真结果的可信带来了艰巨的挑战。仿真结果可信应当从软硬件工具可信、仿真模型可信、整车仿真结果可信三个层面来论证。

本报告分为五个章节。第一章介绍了在环仿真测试技术的发展历程及当前应用情况。第二章研究了在环仿真软件和硬件的功性能需求及可信度验证的试验方法。第三章研究了仿真子系统模型的功性能要求及可信度验证的试验方法。第四章研究了整车仿真模型可信度验证的试验方法。第五章提出了在环仿真测试标准体系的建议。

本报告组建了来自车企、检测机构、系统供应商、仿真工具链厂家、科研机构等在内的 29 家企业参与调研和讨论。在本研究报告编制过程中，各起草单位参阅了大量文献资料，搜集了研发一线的最新成果，以期获得最全面、最详实的支撑资料。相关引用内容也均已在文中说明。

在此，再次衷心感谢参与研究报告编写的各个单位和组织：中国汽车技术研究中心有限公司、东风汽车集团有限公司、吉利汽车研究院（宁波）有限公司、国汽（北京）智能网联汽车研究院有限公司、中汽智联技术有限公司、北京赛目科技股份有限公司、吉林大学、重庆长安汽车股份有限公司、比亚迪汽车工业有限公司、惠州市德赛西威汽车电子股份有限公司、上海机动车检测认证技术研究中心有限公司、襄阳达安汽车检测中心有限公司、招商局检测车辆技术研究院有

---

限公司、上海蔚赫信息科技有限公司、德斯拜斯机电控制技术(上海)有限公司、英伟达、思博伦通信科技(北京)有限公司、中国软件评测中心、宁波路特斯机器人有限公司、北京航迹科技有限公司、上汽大众汽车有限公司、智己汽车科技有限公司、中国第一汽车集团有限公司、上汽通用五菱汽车股份有限公司、合众新能源汽车股份有限公司、长城汽车股份有限公司、安徽江淮汽车集团股份有限公司、北京百度智行科技有限公司、上海临港绝影智能科技有限公司、宇通客车股份有限公司。

主要编写人：华一丁、张宇探、李占旗、李志磊、孙良、赵文博、翟洋、白智敏、薛经纬、陈磊、李小龙、翁绍洲、张贤超、张峻荧、曾杰、于晓军、魏华、颜勇、何庆、赵振飞、王荣、张巍、王艳华、甄妮、周文峰、罗丰山、张蕾、孙兆瑜、张惠然、鞠晓男。

---

## 目 录

第一章 智能网联汽车在环仿真测试现状.....	8
1.1 在环仿真测试的定义.....	8
1.1.1 基础定义 .....	8
1.1.2 在环仿真测试定义 .....	8
1.2 在环仿真测试的目的和意义.....	9
1.2.1 在环仿真测试的目的.....	9
1.2.2 在环仿真测试的意义.....	9
1.3 在环仿真测试的发展.....	10
1.3.1 在环仿真测试工具的发展.....	10
1.3.2 在环仿真测试模型的发展.....	14
1.3.3 在环仿真测试可信评价的发展.....	16
1.4 在环仿真测试的问题和难点.....	17
1.5 智能网联汽车在环仿真测试的应用情况.....	18
1.5.1 模型在环仿真测试的应用.....	18
1.5.2 软件在环仿真测试的应用.....	19
1.5.3 硬件在环仿真测试的应用.....	20
1.5.4 车辆在环仿真测试的应用.....	21
1.5.5 驾驶员在环仿真测试的应用.....	23
第二章 在环仿真平台架构及标准化需求.....	25
2.1 在环仿真平台架构.....	25
2.1.1 软件 .....	25
2.1.2 硬件 .....	28
2.1.3 模型 .....	29
2.1.4 接口 .....	30
2.1.5 数据 .....	31
2.2 在环仿真软件及标准化需求.....	32
2.2.1 软件系统需求 .....	32
2.2.2 仿真软件功能要求 .....	32

---

2.2.3 测试软件功能要求 .....	37
2.2.4 软件试验方法 .....	39
2.2.5 软件系统标准化需求.....	45
2.3 在环仿真硬件及标准化需求.....	45
2.3.1 硬件系统需求 .....	45
2.3.2 通用硬件 .....	48
2.3.3 功能外设 .....	54
2.3.4 硬件试验方法 .....	61
2.3.5 硬件系统标准化需求.....	64
2.4 在环仿真接口协议及标准化需求.....	64
2.4.1 被测系统接口协议 .....	64
2.4.2 仿真平台接口协议 .....	67
2.4.3 跨平台接口协议 .....	67
2.4.4 在环仿真接口协议标准化需求.....	68
2.5 仿真工具通用技术标准化建议.....	68
第三章 智能网联汽车在环仿真子系统模型技术现状及标准化需求 .....	69
3.1 仿真模型构成及现状.....	69
3.1.1 仿真模型构成 .....	69
3.1.2 仿真模型现状 .....	70
3.2 不同应用场景对仿真模型的整体要求.....	73
3.2.1 高速和城市快速路场景.....	73
3.2.2 城区道路场景 .....	73
3.2.3 泊车场景 .....	73
3.3 智能传感器模型功能及性能要求.....	74
3.3.1 智能传感器模型仿真原理.....	74
3.3.2 智能传感器模型功能要求.....	76
3.3.3 智能传感器模型性能要求.....	77
3.4 车辆动力学模型功能及性能要求.....	79
3.4.1 车辆动力学模型功能要求.....	79
3.4.2 车辆动力学模型性能要求.....	81

---

3.5 交通流模型功能及性能要求.....	81
3.5.1 交通流模型功能要求.....	81
3.5.2 交通流模型性能要求.....	84
3.6 仿真模型标准化需求.....	85
第四章 在环仿真集成系统模型技术现状及标准化需求.....	86
4.1 在环仿真集成系统模型与实车相关性的含义.....	86
4.2 在环仿真集成系统模型与实车相关性评估的必要性.....	86
4.3 在环仿真集成系统模型与实车相关性研究现状.....	87
4.4 在环仿真集成系统模型与实车相关性标准化需求.....	90
4.4.1 在环仿真集成系统模型与实车相关性评估要点.....	91
4.4.2 在环仿真集成系统模型与实车相关性试验方法及流程需求.....	91
4.4.3 在环仿真集成系统模型与实车相关性试验场景设计原则.....	92
4.5 在环仿真集成系统模型标准化需求.....	93
第五章 在环仿真测试标准体系研究总结.....	94
参考文献.....	95
附录.....	97
附录 A: 传感器模型试验方法.....	97
A.1 基于 Sim Pro 的传感器验证方案.....	97
A.2 基于 Omniverse 的物理级相机模型的验证方案.....	100
A.3 基于 VTD 的激光雷达模型验证方案.....	103
A.4 感知模型置信度验证方案.....	104
A.5 基于 Spirent Sim3D 的 GNSS 多径/NLOS 模型验证方案.....	105
附录 B: 动力学模型试验方法及性能要求.....	107
B.1 基于 Sim Pro 的车辆动力学模型试验方案.....	107
B.2 基于 CarSim 的车辆动力学模型试验方案.....	109
B.3 基于 ASM 的车辆动力学模型试验方案.....	110
B.4 动力学模型置信度验证.....	111
附录 C: 交通流模型试验方法及性能要求.....	114
C.1 交通流模型试验方法.....	114
C.2 交通场景模型评价指标.....	118

---

C.3 交通场景一致性评价方法.....	120
----------------------	-----

---

# 第一章 智能网联汽车在环仿真测试现状

## 1.1 在环仿真测试的定义

### 1.1.1 基础定义

1. 系统：具有某些特定功能、按照某些规律结合起来、互相作用、互相依存的所有物体的集合或综合。
2. 模型：是对系统、实体、现象或过程的描述或表示。
3. 数学模型：是系统的某种特征本质的数学表达式，即用数学公式来描述所研究的客观对象或系统中某一方面的规律。
4. 仿真：是对一个系统、实体、现象或过程的行为特征的模仿<sup>[2]</sup>。
5. 测试：通过计划、准备、运行或演练相关项或要素，以验证其满足所定义的要求、探测其异常、对其行为建立信心的过程。
6. 仿真测试：通过对道路、交通基础设施、目标物、环境等建模，搭建试验环境以模拟真实的驾驶场景，以及搭配传感器建模、车辆动力学建模等仿真模型，完成自动驾驶系统试验工作的一种形式<sup>[2]</sup>。
7. 仿真工具链：一种由仿真工具和模型组成的，用于自动驾驶系统仿真试验的软/硬件设备总称。
8. 闭环测试：指在一个环境中进行测试，在该环境中，ADS 硬件、软件或环路中其他元素的动作影响仿真中其他对象的动作。
9. 开环测试：指在一个环境中进行测试，在该环境中，ADS 硬件、软件或环路中的其他元素的动作不影响仿真中其他对象的动作。
10. 验证：通过检查和提供客观证据确认规定的要求已经得到满足。
11. 确认：通过检查和提供客观证据确认满足特定预期用途的特定要求。
12. 可信度：仿真试验的结果可以被相信的程度。

### 1.1.2 在环仿真测试定义

1. 软件在环仿真测试：是一种将算法搭载在模型或应用软件上，并集成到仿真测试系统中，用于测试算法的功能、性能表现与模型和代码一致性

---

的测试方法。

2. 硬件在环仿真测试：将真实的车辆被测传感器、控制器或执行器中部分硬件实体嵌入仿真测试环境中，测试硬件响应、软硬件交互性能的方法。
3. 车辆在环仿真测试：将真实车辆嵌入仿真测试环境过程中，注入仿真环境信息至真实车辆感知系统完成感知信息对齐，使得真实车辆能够在试验台架上或封闭场地中行驶的测试方法。
4. 模型在环仿真测试：在虚拟仿真环境中对特定模型或系统进行测试和评估的过程。通常，这个级别的开发涉及到运行在通用计算机上的高级抽象软件框架。
5. 驾驶员在环仿真测试：通过一种带有组件的驾驶模拟器，使驾驶员能够在虚拟环境中操作并与虚拟环境进行通信，用于评估人机交互设计和实现主观评价<sup>[3]</sup>。

## 1.2 在环仿真测试的目的和意义

### 1.2.1 在环仿真测试的目的

在环仿真测试是汽车电子起步和发展过程中重要的测试验证手段。其主要目的是为了模拟真实道路环境，以验证车辆的功能、性能和安全性。通过仿真测试，可以模拟各种复杂的交通场景和道路情况，包括标称场景、危险场景、边缘场景等，以评估车辆的自动驾驶能力、交通协同性能以及对各种意外情况的响应能力。这有助于发现和解决潜在的安全隐患，提高智能网联汽车的可靠性和安全性，推动自动驾驶技术的发展和应用。

作为智能驾驶系统与功能测试的关键技术之一，在环仿真测试平台是智能网联汽车“V”型开发过程中不可缺少的工具链，它可以有效解决极端场景下的智能网联汽车测试难题，也可以与真实物理环境中的测试相辅相成，互为补充。

### 1.2.2 在环仿真测试的意义

在智能驾驶领域，在环仿真测试在测试环节中逐渐承担更加重要的角色。它能够评估安全性、验证并优化功能、评价测试效率高、测试过程安全、测试流程精准可控、节约成本资源，并具备可扩展性与灵活性，同时在商业合作与推广等

---

方面带来积极影响。

在环仿真测试的意义主要有以下几点：

- (1) 缩短开发周期，提高测试效率；
- (2) 提高测试覆盖度，保证系统安全性；
- (3) 节约人工和成本，提高经济效益；
- (4) 促进技术发展与创新，加速智能驾驶商业化进程。

## 1.3 在环仿真测试的发展

### 1.3.1 在环仿真测试工具的发展

#### 1.3.1.1 软件技术发展

随着智能驾驶功能的不断提高，促进了测试技术的创新，以满足日益复杂的智能化系统需求。按照智能网联汽车功能发展路线，在环仿真测试软件的发展可分为三个阶段：

1. 初期阶段，智能驾驶技术主要是一些辅助功能的功能性测试和等效性测试，面向 ADAS 的仿真测试软件主要用于车辆动力系统及辅助驾驶安全的测试与验证。
2. 中期阶段，智能驾驶技术由一些基础的辅助功能开始向较高等级的功能过渡，如高速公路上的自动跟车、变道和停车等，涉及的场景较为复杂，也需要应对一些较为极端的工况，仿真平台支持导入复杂精确的被控模型，因此在环仿真测试软件对仿真场景的丰富度和多样性、传感器的精确度、GNSS 多径/NLOS 环境、自动化测试工具以及多样性评价指标等也有了更高的要求。
3. 当前阶段，由于传统的 ADAS 仿真软件已经无法满足高等级自动驾驶汽车的仿真测试需求，新兴软件企业纷纷自主研发仿真测试工具，特别地，一些软件工具已经可以实现传感器仿真、车辆动力学仿真、交通流仿真的自动驾驶汽车一体化仿真测试功能，以支撑自动驾驶系统的开发。

一方面，随着计算能力的提升和传感器技术的进步，自动驾驶功能的验证对真实的物理模型的关注度逐渐提高，开始整合复杂环境的建模和高精度传感器模型的验证以适应智能驾驶技术的发展<sup>[4]</sup>。

另一方面，随着场景内容的增加，单个计算机的性能遇到瓶颈，一个计算节点不可能独立完成仿真任务，这就需要使用一种机制将仿真任务分配到多个机器上，并且让所有机器协同工作，这样做能够降低单个机器的性能需求，从而使大规模仿真任务得以实现<sup>[5]</sup>。云仿真提供了灵活的计算节点调度能力，具备实时计算和并行处理能力，满足大批量任务并发执行的需求，能保证在大规模场景下仍能保持稳定运行，并提供高效率的数据处理与分析功能。通过云仿真平台开展云端大规模并行加速，可以实现在同一仿真场景下，同时进行多台车辆的仿真，提升仿真测试效率以及仿真的交互性。

现阶段主要仿真测试软件如表 1.1 所示<sup>[6]</sup>。

表 1.1 主要仿真测试工具及其特点

主要功能	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	有	有	有
	CarMaker	IPG	有	有	有
	ASM	Dspace	有	有	有
交通流仿真	VISSIM	PTV	无	无	有
	SUMO	DLR	无	无	有
ADAS 仿真测试	PreSCAN	TASS	有	有	有
	VTD	VIRES	有	有	有
	SCANeR	OKTAL	有	有	有
	Panosim	天行健	有	有	有
	SimPro	赛目科技	有	有	有
	Drive Sim	英伟达	无	有	无
	Model Desk	Dspace	有	有	有
自动驾驶仿真测试	CARLA	Intel	无	有	有
	Carcraft	Waymo	有	有	有
	TADSim	腾讯	有	有	有
	51Sim-One	51WORLD	有	有	有
	Apollo	百度	有	有	有

### 1.3.1.2 硬件技术发展

1989 年德国 dSPACE 公司开发出首套硬件在环模拟器并成功应用。此后，通过与 MATLAB/Simulink 结合，开启汽车电控基于模型化开发(MBD)的序幕。二十世纪九十年代中后期至二十一世纪初，硬件技术步入快速发展阶段，从第一套 ABS/ESP 硬件在环系统闭环应用，到硬件在环覆盖所有汽车功能域，虚拟整车硬件在环 (Virtual Vehicle) 在国内外主流主机厂普遍应用，短短十年间硬件在

环技术快速发展。现阶段，面对汽车新四化发展，硬件在环技术也在推陈出新。同时，随着“软件定义汽车”概念的提出，硬件在环测试的重要性和使用广泛性也越来越高。各大工具供应商不断推出新的硬件在环平台，提供更强大实时计算能力，更高带宽通讯，支持全新 E/E 架构。

在环仿真测试中硬件技术的发展可以从其各个核心组件的技术迭代过程来分析，包括实时处理器，IO/总线及信号调理模块，故障注入模块和其他扩展组件。

实时处理器技术的发展情况如表 1.2 所示：

表 1.2 实时处理器技术发展

起步阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 单板处理器，处理器与 IO/总线通道集成在一块板卡上</li> <li>● 计算主频在几百 MHz，单核</li> <li>● 简单实时操作系统</li> </ul>
发展阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 独立的处理器，处理器与 IO/总线板卡的通讯速率达到 10Mb/s 以上</li> <li>● 计算主频达到 2Ghz，可达到 4 核</li> <li>● 通常采用工具商自研的实时系统</li> <li>● 支持多核和多处理器并行，并保证实时性，但数量有限</li> <li>● 针对于电机仿真，等高频模型计算需求，提供独立的 FPGA 计算板卡</li> </ul>
成熟阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 独立的处理器，处理器与 IO/总线板卡的通讯速率达到 1Gb/s 以上</li> <li>● 计算主频可到 3Ghz 以上，可达到 6 核；针对一些应用推出 10 核以上的多核处理器</li> <li>● 集成商业实时系统，如 QNX；并随着智能网联技术的发展普遍使用 Linux</li> <li>● 支持多核和多处理器并行，并保证实时性，数量上可达到 100 个以上</li> <li>● 针对于电机仿真，等高频模型计算需求，提供独立的 FPGA 计算板卡</li> <li>● 支持商业化模型和标准，如各种物理模型，基于 FMI 标准的模型等</li> <li>● 集成 GPU 支持复杂交通场景模型和传感器模型</li> </ul>

IO/总线及信号调理模块的发展情况如表 1.3 所示：

表 1.3 I/O 总线及信号调理模块发展

起步阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 与处理器板卡集成在一块板卡上</li> <li>● 无车载总线通道</li> <li>● 无信号调理功能</li> </ul>
发展阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 针对于电机仿真，等高频模型计算需求，提供独立的 FPGA 计算板卡</li> <li>● 针对不同的 IO 需求，提供模块化、多样化的 IO 板卡</li> <li>● 针对常用车载总线仿真，提供模块板卡，如 CAN、LIN、FlexRay 等</li> <li>● 针对特殊信号仿真，提供额外信号调理模块</li> </ul>
成熟阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 针对不同的 IO 需求，提供模块化、多样化的 IO 板卡；并具备柔性通道，可通过软件配置通道属性</li> <li>● 支持高速总线，比如千兆车载以太网，支持面向服务的通讯协议，如 SOME/IP, DDS</li> <li>● IO 板卡集成常用信号调理模块</li> </ul>

其他外设的发展情况如表 1.4 所示：

表 1.4 其他外设发展

起步阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 无故障注入</li> <li>● 只包含实时处理器和通用 IO 信号的仿真</li> </ul>
发展阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 提供故障注入板卡，可串联在硬件在环信号链路中，实现手动及自动化故障注入测试</li> <li>● 支持大电流通道的故障注入模块</li> <li>● 集成机械台架，用于底盘域等领域的机械级测试</li> <li>● 集成功率级板卡（最大电压不超过 60V，最大电流不超过 200A），可实现低压电机功率级测试</li> </ul>
成熟阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 提供集成于 IO 或总线板卡内的故障注入模块</li> <li>● 支持高速总线通道的故障注入模块</li> <li>● 集成毫米波雷达回波模拟台架，引入真实被测雷达，进行仿真测试</li> <li>● 集成视频暗箱，支持接入真实摄像头</li> <li>● 支持感知传感器接口仿真，比如串行视频接口，进行原始数据注入</li> <li>● 集成射频仿真设备，如 GNSS, V2X, 5G 模拟器，用于相关信号模拟</li> </ul>

---

	<ul style="list-style-type: none"><li>● 集成功率级模拟器（最大电压可达 1000V 以上，最大电流可达 600A 以上），可实现高压电机功率级测试</li></ul>
--	---

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。

### 1.3.2 在环仿真测试模型的发展

#### 1.3.2.1 车辆动力学模型

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。

早期的自动驾驶仿真模型主要基于简化的物理和行为规则，用于评估基本功能和算法。现阶段，随着自动驾驶仿真测试的大规模应用，车辆动力学模型的精度和真实性得到了显著的提升，同时可以模拟更多的物理场景，并开始引入深度学习和机器学习技术。以下是车辆模型现阶段的特点：

1. 多体系统建模：当前车辆模型通常采用多体系统建模方法，以准确地描述车辆各个部件之间的相互作用。这包括悬挂系统、转向系统、轮胎特性等。通过考虑这些因素，可以更准确地预测车辆在不同路况下的运动行为。
2. 非线性建模：传统简化刚体假设被逐渐替代为更复杂且准确描述车辆变形和滑移行为的非线性弹性模型。例如，在轮胎建模方面，传统简化刚体轮胎被逐渐替代为更复杂且准确描述轮胎变形和滑移行为的非线性弹性轮胎模型。
3. 实时仿真优化：随着自动驾驶技术需求增长，实时仿真优化成为一个重要目标。通过使用高效算法和并行计算技术，可以加快计算速度，并支持更复杂且逼近实时运行需求的测试场景。

---

### 1.3.2.2 传感器模型

现阶段，主流的自动驾驶传感器包括摄像头、激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达、组合惯导、V2X 等，传感器的仿真可以基于三种不同级别的传感器模型构建方式，可以根据不同的开发应用需求进行选择。

理想传感器模型根据环境感知和障碍物追踪，提供路面实况信息。理想传感器生成的目标列表与传感器的物理特性无关，此类传感器很容易进行参数配置，主要用于融合和规控算法的验证。

混合传感器模型是在理想传感器的基础上考虑噪声和目标物属性等因素，增加误差信号来描述天气条件等不确定性对传感器感知效果的影响；此类传感器模型用于功能开发/测试等。

物理传感器模型与提供目标列表不同，该传感器模型提供原始信号，这些信息将被用于信号处理及目标追踪算法。物理传感器仿真通过还原信号生成、传输、接收、处理的全过程，并考虑传感器与目标物特性对信号的干扰与影响，从而间接获得传感器感知结果的偏差。物理级传感器仿真主要用于部件级/原始信号处理开发与测试。

### 1.3.2.3 交通场景模型

交通场景模型发展的初期，模型主要用于简单的交通流模拟和道路设计评估。这些模型通常基于基本的物理规则和数学公式，能够模拟车辆的基本运动规律，但缺乏对环境因素和行为因素的细致刻画。随着计算机技术和仿真算法的发展，交通场景模型开始考虑更多的环境因素和行为因素。例如，模型开始引入道路几何形状、交通信号控制、车辆间相互作用等因素，以更准确地模拟实际交通情况。此外，随着地理信息系统（GPS）和遥感技术的发展，交通场景模型开始融入地理空间数据，使得模型能够更真实地反映实际地理环境和道路条件。

目前相对比较通用的场景形式是由 2018 年德国 PEGASUS 项目提出的六层场景模型，分别为第一层（L1）-道路层，包含的要素主要有道路及和拓扑、路面质量、路面边界等；第二层（L2）-交通设施层，包含的要素有结构边界、交通标志牌、信号灯等；第三层（L3）-L1 与 L2 的临时性操纵层，包含的要素有道路的临时性设施，如临时封路、道路施工现场等；第四层（L4）-目标层，包含的

---

要素有交通参与者状态、行为等；第五层（L5）-环境层，主要的要素有天气、光照等其它环境信息；第六层（L6）-数据通讯层，包含的要素有 V2X 信息、数字地图信息等。因此在进行仿真场景构建时分为三个阶段，分别为功能场景-逻辑场景-具体场景。

2021 年，由 PEGASUS 的后续项目 VVM(Verification and Validation Method) 中的专家提出了四层场景分级模型概念，在三层分级模型的基础上，新增了抽象场景 (Abstract Scenario) 这一层级，并被 ISO 34501 采纳，纳入了国际标准体系。

### 1.3.3 在环仿真测试可信评价的发展

联合国世界车辆法规协调论坛 (UN/WP.29) 自动驾驶验证方法非正式工作组 (VMAD IWG) 针对自动驾驶功能提出新评估和测试方法 (New Assessment/Test Method for Automated Driving, NATM)，包括场景目录，以及模拟仿真测试、封闭场地测试、实际道路测试、审核评估和在用监测报告等 5 类技术手段（以下简称“多支柱法”），支撑 ADS 的安全性验证。其中，仿真作为“多支柱法”的重要内容，在智能网联汽车综合安全评估中发挥着至关重要的作用。对此，NATM 中针对仿真测试提出了可信度评估框架与流程，主要包含仿真试验的管理、分析、验证和确认四大组成部分。

2022 年工信部发布的《关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知（征求意见稿）》中明确规定了“应证明使用的模拟仿真测试工具链置信度，以及车辆动力学、传感器等模型可信度，并通过与封闭场地和实际道路测试结果对比等手段验证模拟仿真测试的可信度”。2023 年 11 月发布《关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知》，推动试点落地。

2024 年国标《智能网联汽车自动驾驶功能仿真试验方法及要求》工作组发布的征求意见稿中也将仿真试验可信度评估作为规范性附录进行了约束，此部分内容要求将与国际法规也进行协同。

本报告也将从工具、子系统模型以及集成系统三个层面对在环仿真测试可信评价进行展开论述，指导可信评价的实操落地方案。在此列出本报告第三章和第四章的要求遵循的可信度评估要点，如图 0.1 所示。

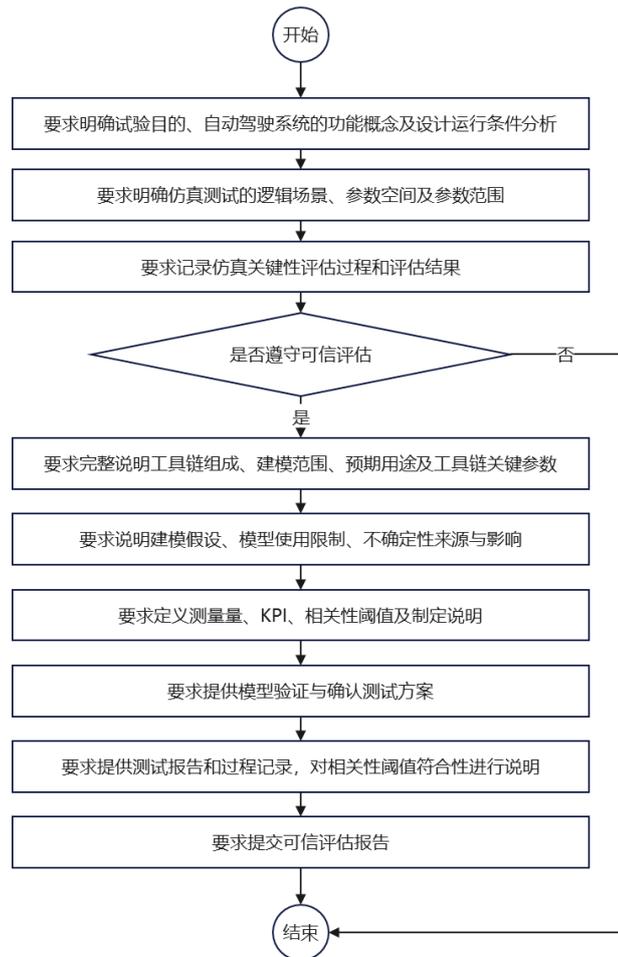


图 0.1 在环仿真测试可信评估要点

## 1.4 在环仿真测试的问题和难点

总体问题：（1）MIL 的问题在于怎么将模型进行优化，以便于与自动驾驶虚拟仿真软件进行实时仿真。（2）HIL 和 VIL 之间的最严肃的问题就是实时性，往往 HIL 和 VIL 是要与虚拟仿真软件平台、上位机、下位机、车辆动力学模型进行联合仿真、相互之间数据的优先度，怎么保持实时性是比较大的挑战。（3）对于 MIL\SIL\HIL 测试是通过虚拟车辆模型，ADAS/ADS 功能测试只能侧重于功能逻辑测试；而 VIL 无法引入实际道路中的感知场景，无法对感知引起的功能问题进行测试。

工具链方面的主要问题是：测试工具是自动驾驶测试体系的基础，目前存在两类问题，其一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。其二，格式不统一，如场景格式，OpenX 格式虽然是标准格式，但因自动驾驶软件

---

产品架构不同，OpenX 的场景数据下发到各个单位并不通用

模型方面的主要问题是：如车辆动力学不准确，性能测试结果无权威性；执行器表现无法模拟，性能测试结果无权威性。

可信度方面的主要问题是：目前还没有行业认可的具体可量化的可信度评价指标；场景泛化的理论依据不足，复现和泛化出来的虚拟仿真环境与真实环境之间存在的差异对测试结果造成的影响，缺少可量化的评价指标；测试结果在功能逻辑层面具有权威性，在整车性能层面不具有权威性。

## 1.5 智能网联汽车在环仿真测试的应用情况

环仿真测试技术以硬件在环仿真测试在国外应用最早也是最广泛的一种半实物仿真技术。得益于电子技术的发展，硬件在环测试技术的发展很快。硬件在环测试在国外发展的比较成熟，有一批例如 NI、dSPACE 等公司专注以硬件在环测试的研究，并且拥有自己的软硬件知识产权组成的一套测试系统。硬件方面 dSPACE 公司拥有丰富的板卡资源，并且具备了完整的 I/O 接口，用于灵活配置不同的测试需求。软件方面将测试的管理、自动化测试以及模型的参数化集成为一体，并且和 MATLAB/Simulink 软件完美兼容，通过自动代码生成功能，直接调用第三方软件，如当前应用最广泛的 MATLAB/Simulink 模型开发工具。因其硬件软件的独特优势，成为了汽车电子控制器开发测试的重要选择<sup>[7]</sup>。

国内整体上在在环仿真测试领域起步较晚，其中一项重要原因是汽车电子电控系统技术大多数掌握在外国企业手中。但一些高校、研究院和汽车制造商非常重视硬件在环测试技术，一些学者也投入了大量的时间精力在这个课题上进行研究探索，并且取得了一些研究成果。

### 1.5.1 模型在环仿真测试的应用

模型在环仿真测试在虚拟环境中对智能汽车系统进行全面测试和验证的方法。这种应用能够模拟各种真实道路场景和交通情况，评估汽车系统的性能、安全性和可靠性，以及对复杂交通环境的适应能力，相关案例介绍如下。

东风汽车集团有限公司研发总院完成了多车道 ADAS 级别的智能驾驶模型在环仿真测试能力的构建及应用。从功能规范、标准法规、实际应用中的特殊典型场景多个维度进行了仿真场景的开发和构建。在多个项目及课题中应用迭代，

实现了毫米波雷达、摄像头仿真模型车道线及目标列表输出接口的标准化，基本涵盖 ISO23150 相关的接口，还支持模型向硬件在环测试阶段的完美复用。

### 1.5.2 软件在环仿真测试的应用

软件在环仿真测试可以快速、准确、重复地验证算法或模型的正确性和可靠性；可以对算法进行多种工况和参数的组合测试，覆盖更多的测试场景，提高测试的有效性和完备性；可以实时进行调试和更新，加快算法的迭代过程，缩短智能汽车的开发周期，相关案例介绍如下。

吉林大学通过搭建多软件联合虚拟仿真测试平台，对智能驾驶系统进行了软件在环加速测试研究。串行软件在环虚拟仿真测试软硬件架构如图 0.2 所示，由场景建模、车辆动力学、车辆运动控制、试验管理四部分组成<sup>[8]</sup>。

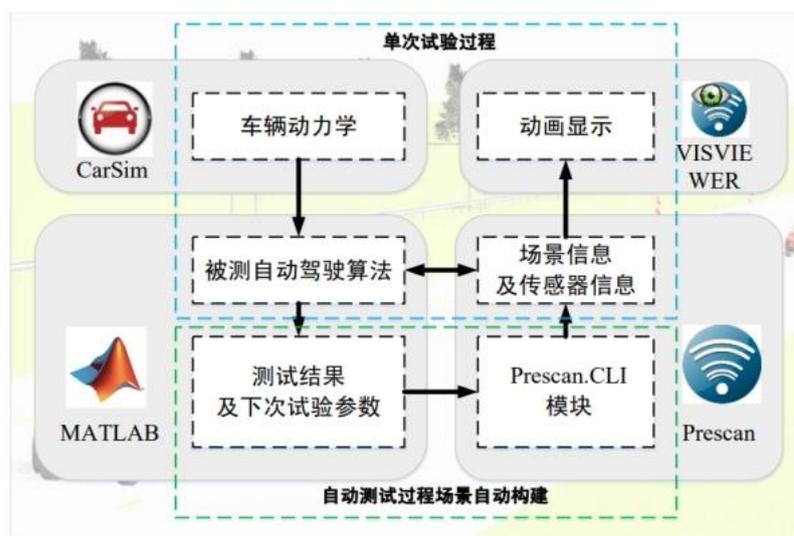


图 0.2 多软件联合虚拟仿真测试平台架构

吉利汽车在软件在环仿真测试方面，针对 L2 及以上的 ADAS/ADS 功能测试，通过构建高还原度场景模型、高精度车辆动力学模型、复杂传感器模型以及自动化测试评价模块，搭建完成自动驾驶软件在环云仿真平台，能够实现场景的自动生成、场景泛化、自动化测试、评价管理等功能，从而实现算法的快速验证与迭代。

重庆长安汽车股份有限公司从基础智能驾驶辅助功能和高阶智能驾驶辅助功能逻辑仿真测试评价出发，以功能状态机、规控算法、HMI 为被测对象，搭建简单传感器模型、动力学模型和仿真模拟平台，实现 SIL 规控闭环仿真测试评价。

基于实车测试数据进行关键场景参数分析，采用场景泛化策略自动化生成大量仿真测试场景库，结合 SIL 仿真测试平台开展基于场景的自动化并行仿真测试，如图 0.3 所示。

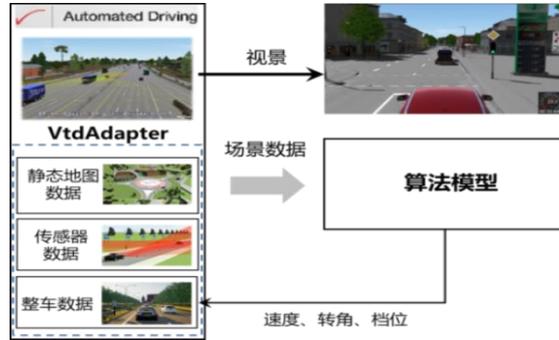


图 0.3 长安汽车 SIL 仿真测试平台架构

### 1.5.3 硬件在环仿真测试的应用

典型的智能网联汽车硬件在环仿真测试平台主要包括机柜、传感器仿真系统、实时仿真系统、图形工作站、上位机操作电脑、道路交通场景仿真软件、车辆动力学软件、试验软件、自动化测试软件、通讯接口开发等。目前自动驾驶硬件在环仿真系统在这些方面具备标准化的产品，可以满足硬件在环仿真系统对各模块的功能要求，在感知传感器仿真专用系统和通讯接口开发等方面硬件在环仿真系统的实现具备定的差异性。下面对案例进行介绍。

吉利汽车针对 ADAS/ADS 功能，通过搭建硬件在环台架将真实的汽车域控制器与模拟的系统环境（包括 NI/dSPACE）相结合，通过模拟各种实际的驾驶场景和条件，对硬件进行测试和验证。在 HIL 测试中，真实的硬件设备（如控制器、传感器、执行器等）被连接到模拟的虚拟系统环境中。整个虚拟的系统环境向硬件设备发送模拟信号，从而模拟出真实的自动驾驶场景。

安徽江淮汽车集团股份有限公司最早在新能源领域基于 dSPACE 硬件在环仿真设备搭建了整车 VCU 的 HIL 测试环境。从 2020 年起基于 dSPACE 仿真设备、Prescan 场景仿真软件、驾驶模拟设备集成开发了基于 HIL 仿真测试技术的智能驾驶汽车人机共驾 HIL 仿真测试系统，建立了智能汽车“感知-决策-执行”HIL 闭环仿真环境，如图 0.4、图 0.5 所示。

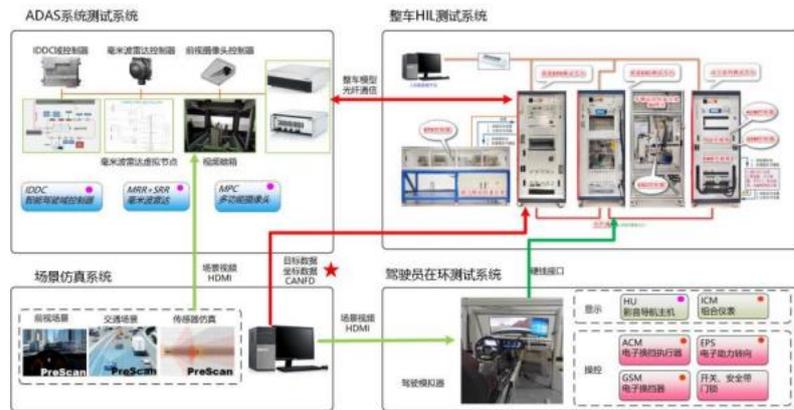


图 0.4 江淮汽车智能汽车整车级 HIL 仿真测试平台



图 0.5 江淮汽车智驾系统 HIL 仿真测试技术方案

东风汽车集团有限公司研发总院完成了行泊一体智能驾驶系统硬件在环仿真测试能力的构建及应用。从功能规范、标准法规、实际应用中的特殊典型场景多个维度进行了仿真场景的构建。通过视频注入、超声波回波模拟、CAN 板卡、实时系统、程控电源等设备集成及调试，实现对被测系统的硬件及信号的闭环。对比实车测试数据，开展了仿真模型对标工作，相关对比工况下的仿真模型与实车的表现误差小于 5%。在 HIL 设备支持下，对被测控制器的网络、诊断、功能逻辑、故障注入、功能安全等方面进行了覆盖性测试，HIL 测试问题查准率在 20% 以上。并完成了 R79 等法规符合性摸底测试。

#### 1.5.4 车辆在环仿真测试的应用

车辆在环测试中被测车辆运行在实验室平台上或者空旷的场地中，用真实车辆的动力学特性替代仿真软件中建立的车辆动力学模型，免去了车辆动力学模型参数标定过程，降低模型偏差对测试结果带来的不良影响，相关案例介绍如下。

国家智能网联汽车创新中心搭建了国内首个智能网联汽车车辆在环仿真测试系统，实现了车端、路端和云端的整车系统级仿真测试，如图 0.6 所示。该实

实验室已面向量产车型提供测试服务，可支持整车 ADAS 测试、整车 AD 高级别智能驾驶测试、整车 GNSS 和 V2X 测试等。VIL 仿真测试系统包括道路负载模拟系统、场景及传感器实时仿真系统、驾驶员视景交互系统、试验辅助设备系统等，可补充道路试验中不能测、不敢测的极端工况、危险工况和边角工况，并在不同虚拟场景中测试智驾功能。在实际道路或试验场测试前，进行整车级仿真测试，可对智能驾驶中的感知系统、控制策略、执行机构等关键环节进行综合验证与评估。

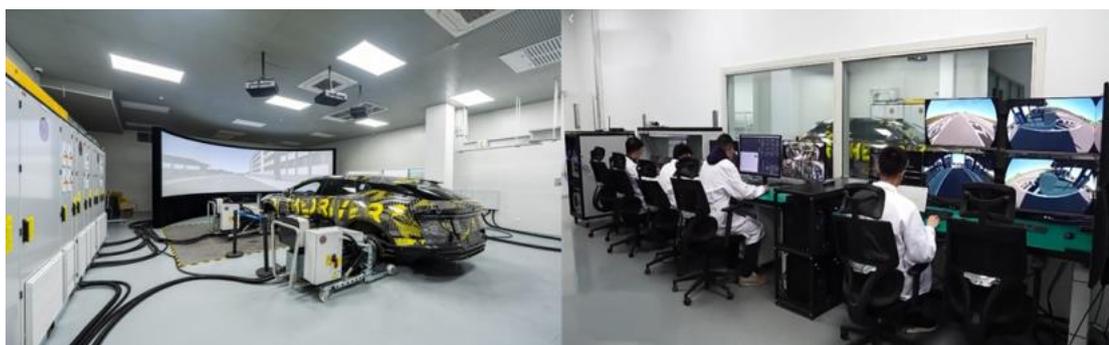


图 0.6 智能驾驶整车在环测试系统

中科院深圳先进院针对当前智能驾驶测试方法中的不足，在开发测试的过程中并行自主研发了智能驾驶整车在环测试系统，用于精准模拟真实的驾驶环境及数据收集过程。如图 0.7 所示，该系统可完成一周 100 公里里程的复杂场景测试，系统功能至少迭代一次。该团队智能驾驶整车在环测试系统由动力在环测试台架和智能驾驶数据收集分析系统组成。在真实测试过程中，台架模拟的准确性保证了智能驾驶系统数据的真实性，而智能驾驶系统数据的真实性又提高了台架数学物理模型对真实环境模拟的准确度。



图 0.7 智能驾驶整车在环测试系统

中汽中心工程院开发的面向智能驾驶动态场景测试的整车在环仿真系统整体解决方案如图 0.8 所示，其融合毫米波雷达模拟器、摄像头视觉模拟装置、导航卫星模拟器，可满足各类智能驾驶功能的整车级系统功能验证。



图 0.8 面向智能驾驶动态场景测试的车辆在环平台

招商局检测车辆技术研究院有限公司搭建有整车场地在环测评系统如图 1.9 所示，可实现自动驾驶汽车的环境感知算法验证、电控系统的匹配和联合运行、决策控制器的功能验证、路径规划的验证、各类交通工况的验证。还可提供面向自动驾驶系统的整车场地在环仿真系统搭建，提供面向乘用车、商用车的全套解决方案。

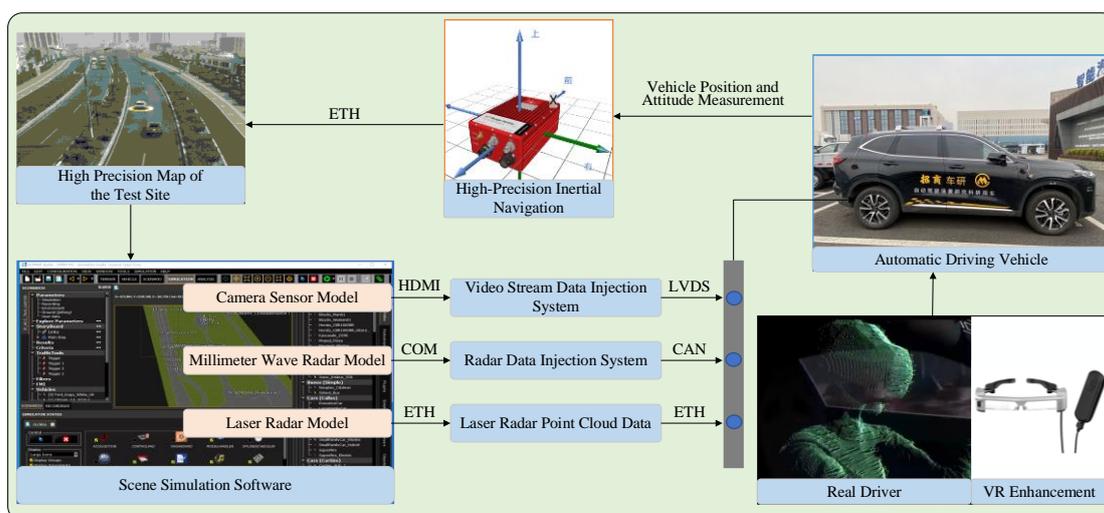


图 0.9 整车场地在环平台系统架构

### 1.5.5 驾驶员在环仿真测试的应用

驾驶员在环仿真测试主要可用于驾驶人疲劳检测、驾驶人状态分析、驾驶人舒适性评价等方面，下面对相关的测试实例进行介绍。

招商局检测车辆技术研究院有限公司针对驾驶人疲劳状态检测搭建了一种自动化的驾驶员疲劳检测系统在环测试平台，如图 0.所示。该平台由仿生机器人、

六自由度驾驶模拟器、光照模拟系统、测试管理与数据处理软件组成，由控制软件根据预定义的测试动作列表，发出仿生机器人疲劳动作指令，被测疲劳检测系统机器人识别并发出语音报警，数据管理系统识别报警信号，达到自动化的测试管理与数据处理的目标。同时，驾驶模拟器与光照模拟器可以根据预设的驾驶舱振动谱与外部环境光照条件，复现实际道路运行时的环境条件。

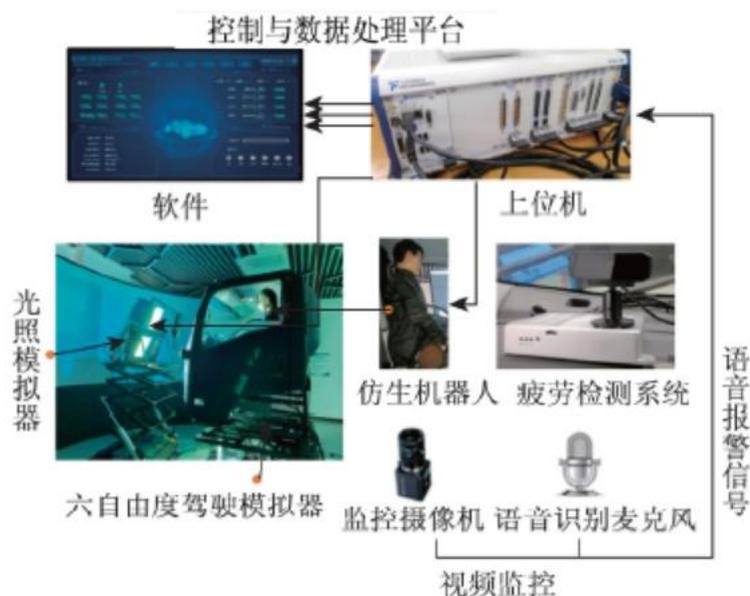


图 0.10 驾驶员疲劳检测系统在环测试平台

国家智能网联汽车创新中心从驾驶员驾驶主观评价与客观生理信号分析出发，围绕智能底盘，智能座舱，智能驾驶领域建立了整车虚拟与人机交互实验室如图 0.9 所示。应用驾驶模拟器，该团队在车辆高精度底盘动力学模型，高精度轮胎模型与路面，国内外调校专家库，生理学信号采集，座舱评价方法，模拟器定制化服务等方面展开产品虚拟开发与性能提升的工程服务与研究。



图 0.9 绳索式高动态驾驶模拟器

## 第二章 在环仿真平台架构及标准化需求

### 2.1 在环仿真平台架构

虽然在不同的测试阶段测试平台会有差异，基本架构要包括硬件、软件、统一的通信接口和数据交换规范。硬件是环仿真平台的基础，负责提供必要的计算和存储资源。硬件通常包括高性能计算机、存储设备和网络设备等。这些硬件设备需要具备强大的计算能力和稳定性，以应对仿真过程中产生的海量数据和复杂计算。软件是环仿真平台的核心，负责实现仿真算法、数据处理和分析等功能。软件通常采用模块化设计，以便于开发和维护。此外，软件还需要具备良好的可扩展性和灵活性，以满足不断变化的需求。统一的通信接口是环仿真平台中硬件和软件之间的桥梁，负责数据的传输和交换。统一的通信接口可以确保不同设备和系统之间的无缝连接，提高数据传输的效率和可靠性。此外，通信接口还需要支持多种数据格式和传输协议，以满足不同应用的需求。数据交换规范是环仿真平台中不同系统和应用之间数据共享和交互的基础。规范需要明确数据的格式、交换方式和安全保障等方面的要求，以确保数据的准确性和可靠性。此外，规范还需要支持多种数据交换协议，以满足不同系统和应用的需求。

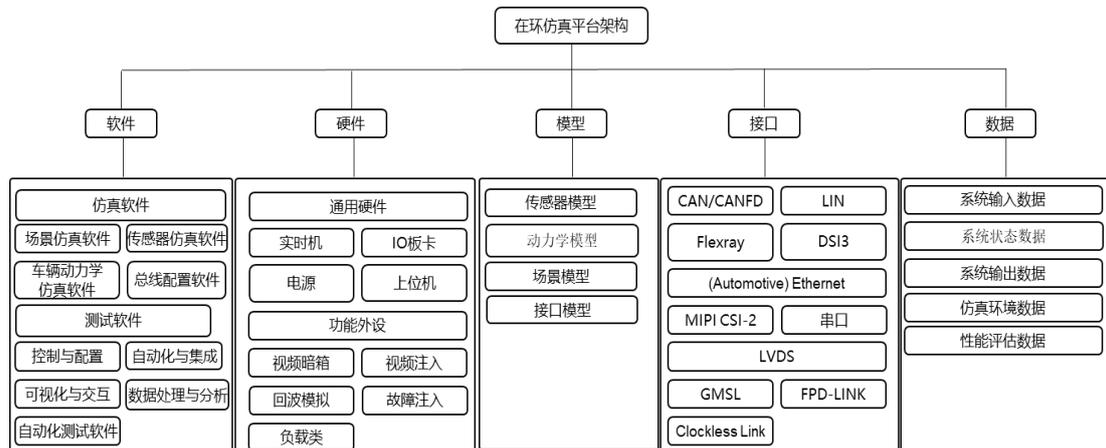


图 2.1 仿真平台架构图

#### 2.1.1 软件

软件包含仿真软件和测试软件。仿真软件包含以下：

1. 场景仿真软件：这类软件用于创建和模拟道路、交通环境以及相关的交

---

通元素，如车辆、行人、交通信号等。它们可以根据实际需求，生成不同类型、不同复杂度的道路和交通场景，以便进行自动驾驶和驾驶辅助系统的测试。

2. 传感器仿真软件：这类软件用于模拟各种车载传感器，如雷达、摄像头、激光雷达（LiDAR）等。它们可以生成模拟的传感器数据，包括道路标志、车辆、行人等物体的检测数据，以便在自动驾驶算法开发中进行测试和验证。
3. 车辆动力学仿真软件：这类软件用于模拟车辆的动力学行为，包括车辆的加速、制动、转向等运动过程。它们可以根据车辆的动力学模型，生成逼真的车辆运动轨迹和动力学数据，以便进行车辆控制和驾驶辅助系统的测试。
4. 仿真引擎：这类软件是仿真运行的主要模块，其功能应当包括适配器、仿真内核、场景解析与执行、交通流接口、车辆动力学接口、仿真检测器接口等。仿真引擎的设计中需要考虑拓展性、智能性与兼容性。拓展性体现在仿真引擎采用内核和适配器分离的设计，旨在提高仿真系统的可扩展性和灵活性。该架构将仿真引擎分为两个部分：仿真内核是仿真系统的核心组件，具有较高的开发难度和稳定性要求，负责管理和更新仿真世界中所有对象的状态，包括车辆、道路、交通信号等。适配器是仿真系统的外围组件，它负责将仿真内核提供的稳定接口转换为自动驾驶系统所需的运行环境接口，包括传感器数据、控制指令等。智能性体现在仿真过程中交通参与者需要具备一定的智能性，应当利用数据驱动智能体的方式进行行为控制，交通参与者（包括驾驶员、行人、自行车手等）都应该能够以真实世界中的方式进行决策交互并模拟现实世界中各类交通参与者的丰富多样的行为，令仿真具备真实性、多样性以及高效性，创建出更接近现实世界的测试环境。兼容性体现在仿真引擎要支持行业标准的仿真数据格式与地图数据格式的解析与播放。
5. 总线配置软件：这类软件需根据系统的实际需求和应用场景进行综合考虑，选择合适的总线类型和连接方式，完成对系统中总线设置和安排，将场景仿真软件、传感器仿真软件、车辆动力学仿真软件、仿真引擎等

---

软件、硬件设备等组件集成到模拟环境中，确保正确、高效地进行数据传输和通信，测试仿真系统在实际操作条件下的行为。其功能应当包括：根据系统的需求和应用场景，选择合适的总线类型，包括 ISA 总线、PCI 总线、USB 总线、SCSI 总线、PCIe 总线等；配置总线通信协议，确保各个设备能够按照统一的标准进行数据传输和通信；将设备通过适当的接口和线缆连接到总线，以及配置设备的物理地址和逻辑地址等参数，确保设备之间的连接正确无误；配置总线控制器，包括设置控制器的参数、配置中断处理等；确定总线的拓扑结构，即各个设备在总线上的连接方式；配置总线通信协议，确保各个设备能够按照统一的标准进行数据传输和通信，包括设置数据格式、传输速度、同步方式等参数配置；可模拟总线故障，以测试系统的容错能力；可记录总线通信的数据，方便后期分析和调试。

测试软件包含以下：

1. **控制与管理：**软件可以控制和管理仿真平台的运行。通过设定仿真参数、控制仿真进程、监控仿真状态等，软件可以确保仿真测试的顺利进行，并提供灵活的测试环境和条件。
2. **自动化与集成：**软件可以实现自动化测试和集成测试。通过自动化测试，可以减少人工干预，提高测试效率和准确性；通过集成测试，可以验证各个系统组件之间的协同工作和交互，确保整个系统的稳定性和可靠性。
3. **可视化与交互：**软件可以提供可视化的界面和工具，方便工程师进行仿真测试的操作和监控。通过可视化界面，工程师可以直观地查看仿真结果、调整仿真参数、控制仿真进程等，从而提高测试的可操作性和直观性。
4. **数据处理与分析：**软件可以收集、处理和分析仿真过程中产生的各种数据。这些数据包括车辆的位置、速度、加速度、传感器数据等，通过对这些数据的分析，工程师可以了解车辆在各种条件下的性能和表现，从而优化控制算法和车辆设计。
6. **自动化测试软件：**自动化测试软件通常提供可视化的测试序列编辑环境，软件支持测试计划、测试用例、测试资源的管理，确保测试过程的有序进行。测试人员可以创建测试用例、分配测试资源、跟踪测试进度并生

---

成测试报告。自动执行测试用例，并记录测试结果。测试人员可以通过软件界面启动测试，并监控测试过程，确保测试按预期进行。

软件在在环仿真平台中发挥着至关重要的作用。它不仅可以模拟和仿真车辆和交通环境，还可以处理和分析数据、控制和管理仿真进程、实现自动化测试和集成测试，以及提供可视化的界面和工具。这些功能使得软件成为在环仿真平台中不可或缺的一部分，为车辆和系统的测试和验证提供了强大的支持。

## 2.1.2 硬件

### 通用硬件：

1. 实时机：用于实现工程项目的设计、实时仿真、快速原型、集成测试与硬件在环测试。将开发好的模型可直接在主机仿真环境下执行离线非实时仿真，通过相关协议实现模型仿真的控制，包括模型编译、下载、节点分配、仿真执行、停止等操作，实际仿真定时精度应不大于 1ms，同步精度不大于 1ms；
2. IO 板卡：带宽、OSI 层级协议要求、丢包率等要求
3. 电源：静态、动态等要求
4. 上位机：CPU、GPU、内存、硬盘等
5. IO 板卡：用于实现仿真系统与外部设备之间数据传输的硬件设备，实现模拟信号、数字信号的采集和转换。IO 板卡应支持多种不同类型的 IO 接口和通信协议，同时应具备实时性和可扩展性。
6. 电源：利用程控电源和电源开关仿真板，可实现 KL87, KL30, KL15 等电源逻辑切换，同时应能满足静态电流以及动态电流的采集需求。电压输出稳定，可编程控制，应具备过压、过流、自动温控等保护功能。电源开关应可将程控电源的输出转变为可控的电源开关输出。交流电源管理模块，可分别对程控电源、内部板卡电源、实时系统供电进行开关控制和保护作用。
7. 上位机：用于控制和监控仿真过程，负责运行仿真软件，实现与下位机和 IO 板卡进行通信，实时处理仿真数据以及呈现仿真结果，应具备高性能处理、大容量内存、高速存储以及稳定图形处理能力等。

### 功能外设：

- 
1. 暗箱类：暗箱应具备良好的密闭空间和遮光性，可配备广色域、高刷新率、分辨率的视景显示屏幕，屏幕色域范围广，亮度高且均匀无色差；暗箱支架应支持水平、垂直、俯仰、横摆角度的调节和锁止，可匹配透镜设备实现摄像头成像要求；具备输入输出接口，可以实现外部设备及仿真图像的数据传输；支持智能摄像头标定，支持虚拟标靶/棋盘格标定；
  2. 回波模拟类：可通过硬线仿真模式，实现传感器接口协议的仿真，满足每一个传感器的反射时间可调节，可支持一收一发、一收多发；
  3. 注入类：注入系统应能将交通场景仿真软件输出的视频/点云/总线信息/故障信息等处理转换成相关处理芯片所要求的数据形式，并通过匹配的硬件接口输出，进而实现场景模拟；
  4. 机械激励/负载类：机械激励/负载类在环仿真台架，主要用于测试验证和研究实车制动/转向/悬架/驱动系统的功能和性能。在环仿真台架应能够真实模拟真实制动/转向/悬架/驱动系统的动力学行为和性能，可通过精确的模型和数据采集系统，确保测试结果的准确性和可靠性；在环仿真台架应设计有灵活的调整机构，以适应不同车型和制动/转向/悬架/驱动系统的尺寸和配置要求；制动/转向/悬架/驱动系统在环仿真台架应具备高重复性和稳定性，可通过精确的控制系统和稳定的数据采集系统，确保每次测试结果均具有一致性和可比性；制动/转向/悬架/驱动系统在环仿真台架的测试因涉及到车辆的安全性，在环仿真台架应具备完善的安全保护措施。包括过载保护、紧急停车功能、安全防护装置等，以确保测试过程的安全性；制动/转向/悬架/驱动系统在环仿真台架应配备高性能的数据采集和处理系统，能够实时采集制动过程中的各种参数和数据，并进行处理和分析。通过数据记录和分析，帮助研究人员了解制动系统的性能特点和潜在问题。

### 2.1.3 模型

在环仿真测试的模型包含传感器模型、动力学模型、场景模型等。

传感器模型主要用于模拟真实世界中的传感器行为和数据，以评估和优化自动驾驶算法的性能。通过数学建模和计算机仿真技术，模拟真实世界中各类传感器（如摄像头、激光雷达、毫米波雷达、GPS等）的工作原理、数据特性和输出行为。这些模型可以精确模拟传感器在不同环境条件下的感知数据，为自动驾驶

---

算法提供可靠的测试数据。

动力学模型是自动驾驶系统研发中的核心组成部分，它主要用于模拟车辆在行驶过程中的运动状态和动力学特性。场景模型涵盖了多个方面，包括道路布局、交通参与者、天气条件、光照情况等。这些元素被精确地建模和组合，以创造出高度逼真的虚拟驾驶环境。道路布局可以模拟各种复杂的路况，如交叉口、高速公路、城市街道等；交通流模型模拟包括其他车辆、行人、自行车等，他们的行为可以通过预设的规则或机器学习算法来模拟；天气和光照条件也是影响自动驾驶算法性能的重要因素，因此场景仿真模型还需要考虑这些因素的变化。

#### 2.1.4 接口

接口包含硬件接口、软件接口、模型接口、数据接口及故障注入接口等，因系统架构、软硬件、算法开发等差异性，数据接口种类繁多，暂时无法达成统一状态，数据接口标准化尚未形成。

不同的在环仿真平台，可根据不同的测试需求和系统特性进行分类，包括但不限于如下接口类型：

- 硬件接口：用于连接仿真平台和被测系统的硬件设备。定义硬件设备的连接方式、通信协议和数据格式等，以确保仿真平台能够正确地获取和处理被测系统的传感器数据和执行器控制信号；

- 软件接口：用于连接仿真平台和被测系统的软件模块。定义软件模块之间的通信方式、数据格式和调用方式等，以确保仿真平台能够模拟被测系统的软件运行和交互；

- 模型接口：用于模型参数的配置或标定，定义主车车辆动力学模型、交通参与者模型、传感器模型、三维环境模型的参数化类型及需求，包括主车车辆动力学计算、交通参与者的行为路径计算、传感器数据计算等；

- 数据接口：用于交换数据和信息。定义通信数据的格式、传输速率和通信数据类型等，以确保仿真平台和被测系统能够正确地获取和处理数据，同时可用于分析、评估和验证仿真结果；

- 故障注入接口：用于将故障信号注入至被测系统，验证被测系统的故障处理能

---

力。

此外，在环仿真平台接口，还应满足如下功能要求：

- 支持标准通信协议，以便实现跨平台和跨语言的互操作性；
- 支持请求超时、重试机制以及流量控制等功能；
- 遵循标准规范，确保数据的正确解析和序列化；
- 提供加密传输的功能，以保护数据在传输过程中的安全；
- 支持访问控制，以防止未经授权的访问；
- 支持异常捕获和日志记录功能，以便于排查问题和性能优化；
- 具备良好的扩展性，以便于未来新增功能和调整参数；
- 满足高并发、低延迟通信需求。

### 2.1.5 数据

在环仿真的数据通常包含以下几个主要方面：

**系统输入数据：**包括仿真过程中系统所接收的外部输入信号或控制信号。例如，在车辆控制系统中，系统输入数据可能包括驾驶员的转向角度、油门踏板位置、刹车踏板位置等。通常由传感器或用户操作产生，并作为仿真模型的输入。

**系统状态数据：**指仿真系统中各个组件或子系统的当前状态信息。状态数据可以包括各种传感器读数（如车速、发动机转速、轮速等），系统配置参数（如车辆质量、悬挂刚度等）以及系统内部变量的状态（如电池电量、液压系统压力等）。

**系统输出数据：**根据输入和当前状态计算得到的输出结果。输出数据可能包括控制信号（如发动机控制单元发送的喷油脉冲宽度）、系统响应（如车辆加速度、制动距离等）以及仿真过程中生成的其他相关输出。

**仿真环境数据：**指仿真模型所代表的实际环境或场景的数据。例如在车辆仿真中，仿真环境数据可能包括道路网络、交通流量、天气条件等。这些数据用于模拟实际运行环境，以测试系统在各种条件下的性能。

**性能评估数据：**指用于评估仿真系统性能或仿真结果的数据。性能评估数据包括仿真过程中的性能指标（如响应时间、误差率等）以及仿真结束后的总

---

结性数据（如总行程距离、燃油消耗量等）。这些数据用于评估仿真系统的有效性、可靠性和准确性。

在环仿真中，上述数据通常通过仿真软件、硬件设备、传感器和控制器之间的交互生成和传输。仿真软件负责模拟系统的行为和性能，硬件设备提供真实的输入和输出接口，传感器和控制器则负责实时采集和发送数据。这些数据的准确性和质量对于仿真结果的有效性至关重要。但因在环仿真系统架构、软硬件、算法开发等差异性，数据种类繁多，暂时无法达成统一状态，数据标准化尚未形成。

## 2.2 在环仿真软件及标准化需求

### 2.2.1 软件系统需求

在环仿真软件通过搭建智能网联汽车仿真测试所需的测试环境，反馈相关感知信息及车控指令，形成自动驾驶算法模拟仿真测试评估结果，是完成自动驾驶模拟仿真测试的重要工具。

高等级自动驾驶汽车是由环境感知、规划决策、控制执行三大模块交互构成的复杂系统，因此，在环仿真软件需具备环境感知-规划决策-控制执行一体化仿真测试能力。按照软件的业务功能划分，可分为基础的仿真软件，以及为其赋能的测试软件。仿真软件包括场景仿真、传感器仿真、车辆动力学仿真、总线配置等软件，测试软件则可实现控制管理和自动化测试等多种功能。

### 2.2.2 仿真软件功能要求

自动驾驶在环仿真软件，需要包括静态场景还原、动态场景构建、传感器仿真、车辆动力学仿真等功能，提供自动驾驶算法运行需要的输入信息，并对算法发出的控制指令进行响应。其基本要求应包括：

#### （1）场景仿真软件

场景仿真软件应当包括场景编辑工具与场景生成技术。场景编辑器可支持用户自定义生成各种驾驶场景，包括但不限于特定的道路布局、交通流量、以及其他交通参与者的行为。自定义场景旨在根据用户需求模拟现实世界中的各种驾驶情况，包括常见的日常驾驶情况，以及那些罕见但对自动驾驶系统性能和安全性影响深远的极端情况。场景编辑器需具备简单明了的交互界面，丰富多样的场景

---

元素。用户可通过简单的操作灵活生成所需要的场景，且生成的场景应可支持行业标准数据格式并可直接用于仿真。

场景生成技术是在真实场景库的基础上，对场景类型和数量进行补充，以实现整体场景的高覆盖率。生成类场景须符合用户的功能场景需求，并带有相应标签。场景生成技术需要根据行业标准协议构建了一系列场景剧本，将复杂的交互场景抽象成多层次、结构化的动作与触发序列。对每类功能场景，通过对实际路测真实数据和开源数据的分布拟合，结合专家经验提取每一类场景中的关键场景参数以及相应的参数分布，来构造逻辑场景。在此基础上，结合贝叶斯优化算法，评估场景中所有交通参与者之间的驾驶决策影响，以高效准确地在给定的关键参数分布中挑选出具有关键性、对抗性、高价值的具体场景。生成场景应具备真实性、丰富性、交互性等特征。

## （2）传感器仿真软件

自动驾驶需要靠传感器去感知外界环境，传感器仿真用于模拟车辆上安装的各种传感器，从而获得交通场景的状态。为实现场景元素与自动驾驶功能的关联，应用目标列表映射、像素映射、概率映射、物理特性映射等多种技术方式，通过摄像头、激光雷达、毫米波雷达、激光雷达、GNSS 等类型的传感器建模，实现车载传感器对于场景的感知过程。传感器仿真软件功能要求主要体现在以下几个方面：

摄像头仿真需要支持相机的镜头结构和光学特性，如支持焦距调节、模糊、畸变、暗角、亮度调节、色彩空间、雨水浸润等；能够支持更改摄像头内外参数，如摄像头安装位置、分辨率、工作频率、视场角和畸变参数等。

激光雷达仿真需要满足激光测距功能，参照真实激光雷达的扫描方式，模拟每一条真实雷达射线的发射，与场景中所有物体求交；能够将障碍物在三维空间中测量得到的目标信息转化为点云数据，并提供相应格式输出；能够支持更改激光雷达的外参和内参，包括安装位置和角度、工作频率、最大探测距离、线数和水平分辨率、水平视场角等。

毫米波雷达仿真需要满足毫米波探测功能，根据配置的视场角和分辨率信息，向不同方向发射一系列虚拟连续调频毫米波，并接收目标的反射信号；能够支持更改毫米波雷达的外参和内参等，如安装位置、角度、探测距离、探测角度、距

---

离分辨率和角度分辨率等。

超声波雷达仿真需要满足超声波探测功能，模拟超声波的发射频率、波形、功率等参数，通过发射超声波，并接收周围物体反射的回波，实现对环境的探测；能够模拟超声波与目标物体之间的相互作用，包括超声波在目标物体表面的反射、散射、折射等现象，以及目标物体的大小、材料等参数对超声波的影响；能够支持更改超声波雷达安装位置和角度等。

GNSS 仿真需要能够准确地模拟卫星信号的接收和处理过程，以实现精确的位置定位功能；能够实现在不同的动态移动场景（包括加速度和方向变化），准确地预测定位结果的功能。

### （3）车辆动力学仿真软件

自动驾驶技术的核心是车辆的自动驾驶控制系统，而控制系统的设计和优化需要基于精确的车辆动力学模型。车辆动力学仿真软件功能要求主要体现在以下几个方面：

仿真软件需要能够准确地模拟车辆的运动状态，包括车辆的位置、速度、加速度等参数。需支持对车辆动力学参数进行可视化配置，支持车辆动力学性能的模拟与测试、自动驾驶算法的控制模拟等。根据算法的控制输入和道路情况，计算车辆动态信息，并把相关信息输出给算法，从而实现持续的闭环运行。

参数化定义车辆，即使用参数和变量的组合代表车辆，满足仿真过程中驱动制动等输入输出要求；通过“车身”、“转向”、“车轮”、“制动”、“前悬架”、“后悬架”、“动力传动”等模块对车辆的动力学参数进行可视化配置，实现对车辆动力学性能的个性化设置。

通过以上一系列模型的建立，平台可以快速响应汽车的动力学数据，并提供精准的计算结果，另外，还需考虑驾驶员、道路条件和空气动力学特征，使得车辆模型更加接近实际情况；平台的仿真不仅要建立更为精细的车辆模型，还需对车辆驾驶平顺性和车辆动力性等指标进行有效模拟。

### （4）仿真引擎

仿真引擎是负责仿真运行的主要模块，其功能应当包括适配器、仿真内核、场景解析与执行、交通流接口、车辆动力学接口、仿真检测器接口等。

仿真引擎的设计中需要考虑拓展性、智能性与兼容性。

---

拓展性体现在仿真引擎采用内核和适配器分离的设计，旨在提高仿真系统的可扩展性和灵活性。该架构将仿真引擎分为两个部分：仿真内核是仿真系统的核心组件，具有较高的开发难度和稳定性要求，负责管理和更新仿真世界中所有对象的状态，包括车辆、道路、交通信号等。适配器是仿真系统的外围组件，它负责将仿真内核提供的稳定接口转换为自动驾驶系统所需的运行环境接口，包括传感器数据、控制指令等。

智能性体现在仿真过程中交通参与者需要具备一定的智能性，应当利用数据驱动智能体的方式进行行为控制，交通参与者（包括驾驶员、行人、自行车手等）都应该能够以真实世界中的方式进行决策交互并模拟现实世界中各类交通参与者的丰富多样的行为，令仿真具备真实性、多样性以及高效性，创建出更接近现实世界的测试环境。

兼容性体现在仿真引擎要支持行业标准的仿真数据格式与地图数据格式的解析与播放。

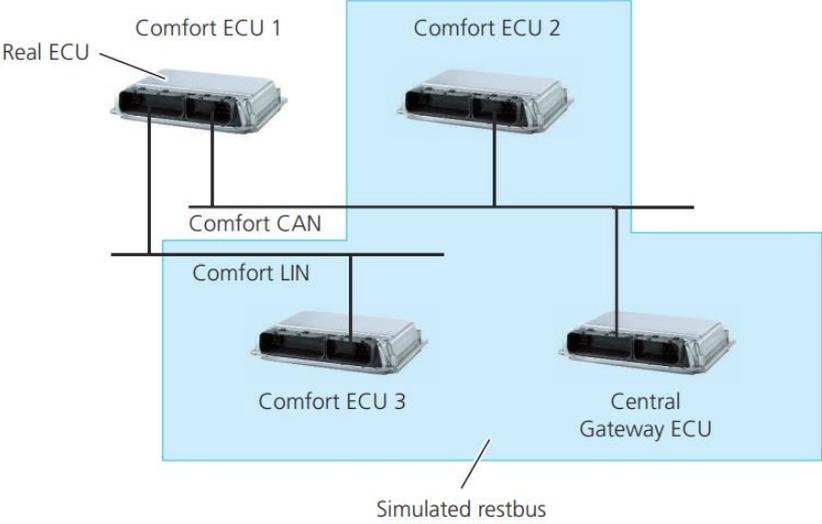
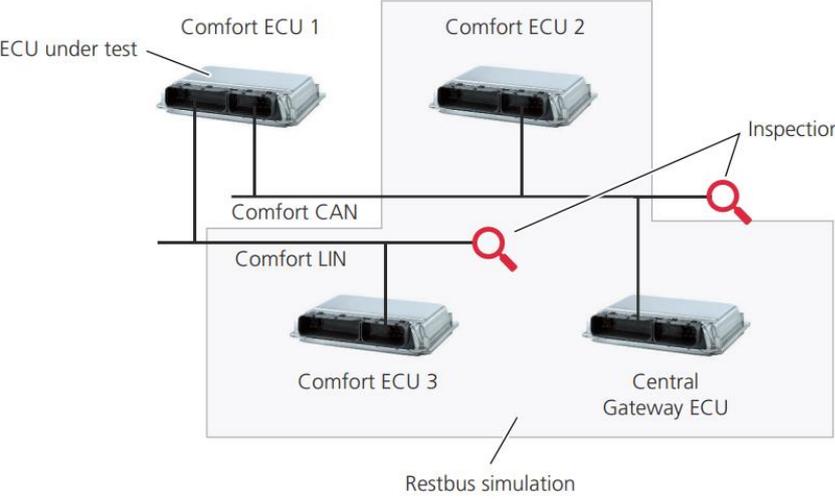
#### （5）总线配置软件

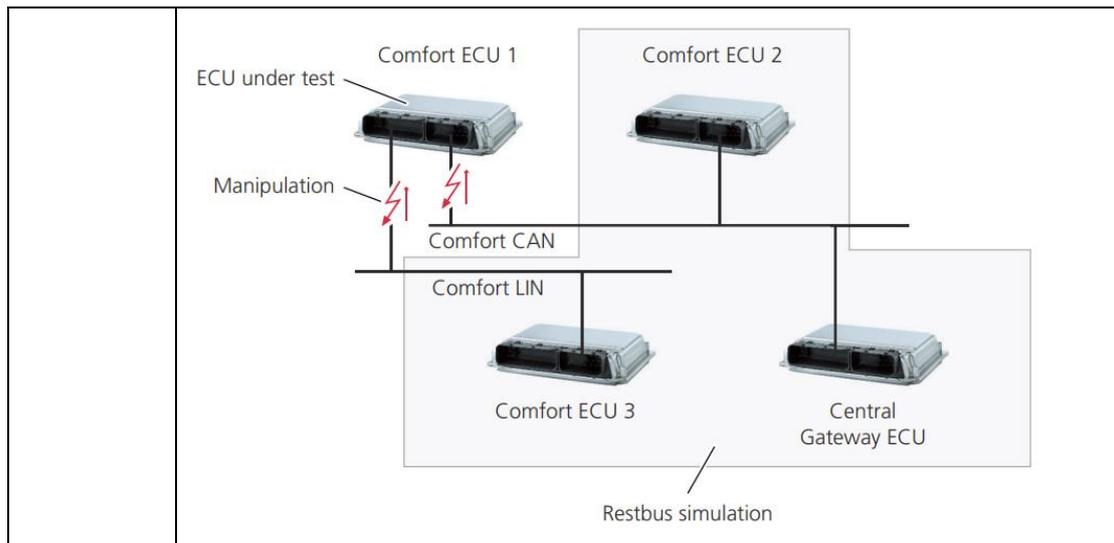
在环仿真中，总线仿真与监控是必不可少的一环。总线配置软件可以根据各种各样的通讯矩阵文件，配置仿真平台的总线通讯。具体来说，总线配置软件应具备以下功能：

- 支持智能网联汽车的总线通讯类型，包括 CAN/CAN FD, LIN, FlexRay, Ethernet, Automotive Ethernet 等；
- 支持对接通用格式的通讯矩阵，包括 AUTOSAR 系统描述文件 ARXML、FIBEX、DBC 以及 LDF 文件等，可实现通讯矩阵文件的导入、可视化分类、过滤、查找及更新；
- 支持汽车总线安全及校验算法的仿真及检测，包括端对端保护、PDU Container、secure onboard communication、CRC/Checksum、Counter 等；
- 支持静态 Container PDU 和 Global Time Synchronization；
- 支持面向服务的通讯协议；
- 支持配置仿真平台总线资源。

在环仿真应用中，总线仿真软件应覆盖下面三种应用场景：总线仿真，总线检查，总线操作。

表 2.1 总线仿真软件应用场景

应用场景	解释
总线仿真	<p>也称残余总线仿真，模拟被测 ECU 之外的其他通讯节点，例如，测试一个真实 ECU 时，可以将其连接到在环仿真平台，由仿真平台模拟所有缺失的节点与被测 ECU 通讯。</p>  <p>The diagram illustrates a restbus simulation setup. A 'Real ECU' (Comfort ECU 1) is connected to a 'Comfort CAN' bus. This bus is connected to a 'Simulated restbus' block, which contains 'Comfort ECU 2', 'Comfort ECU 3', and a 'Central Gateway ECU'. The 'Simulated restbus' also connects to a 'Comfort LIN' bus, which is also connected to the 'Real ECU'.</p>
总线检查	<p>独立于 ECU 之外，检查总线通讯情况，检查聚焦于已存在总线上的通讯数据。例如，检查被测 ECU 与仿真节点之间的总线交互。</p>  <p>The diagram shows the same restbus simulation setup as above, but with a focus on inspection. A red magnifying glass labeled 'Inspection' is positioned over the 'Comfort CAN' bus line between 'Comfort ECU 1' and 'Comfort ECU 2'. Another red magnifying glass is positioned over the 'Comfort LIN' bus line between 'Comfort ECU 1' and 'Comfort ECU 3'. The entire simulation area is labeled 'Restbus simulation'.</p>
总线操作	<p>在数据传输到总线之前对其进行操作，例如，测试被测 ECU 收到错误总线数据后的反应。并可以灵活控制操作的次数。</p>



### 2.2.3 测试软件功能要求

#### (1) 控制与管理

在环仿真中，控制与管理软件用于对整个实验过程进行综合管理，布局测试界面、编辑实验控件、测量数据及数据后处理。因此控制与管理软件除了能够访问仿真平台，也能在同一时间轴下访问被测件及总线通讯。



图 2.2 控制与管理系统

具体来说，控制与管理软件应具备以下功能：

- 支持访问各个在环仿真平台，包括软件在环，硬件在环，整车在环等，也支持访问被测控制器；
- 具备集成工程与实验文件管理的功能；
- 具备硬件平台注册、平台信息查看及固件管理功能；
- 具备成熟的控件，可以此快速、便捷地搭建测试界面，关联模型中的变量，实现监控功能；
- 具备数据采集和记录功能，可自定义数据记录的开始、结束时间或条

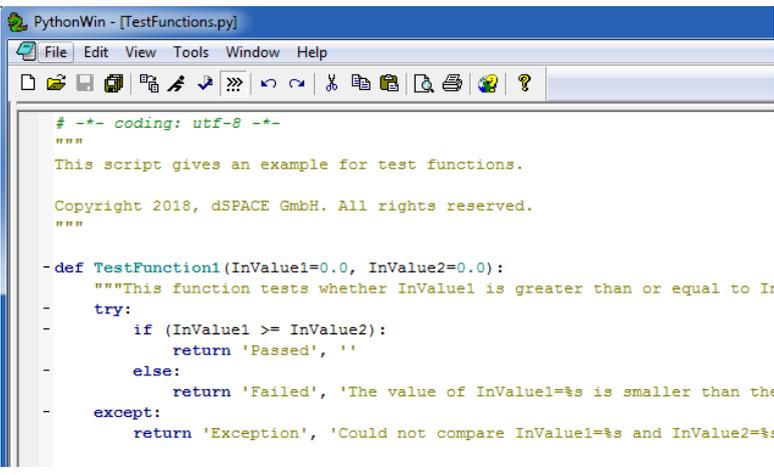
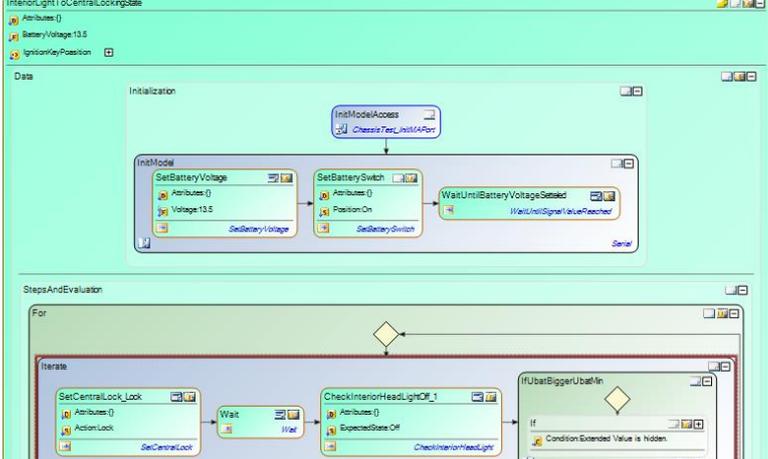
件，并对已记录的数据进行分析与回放；

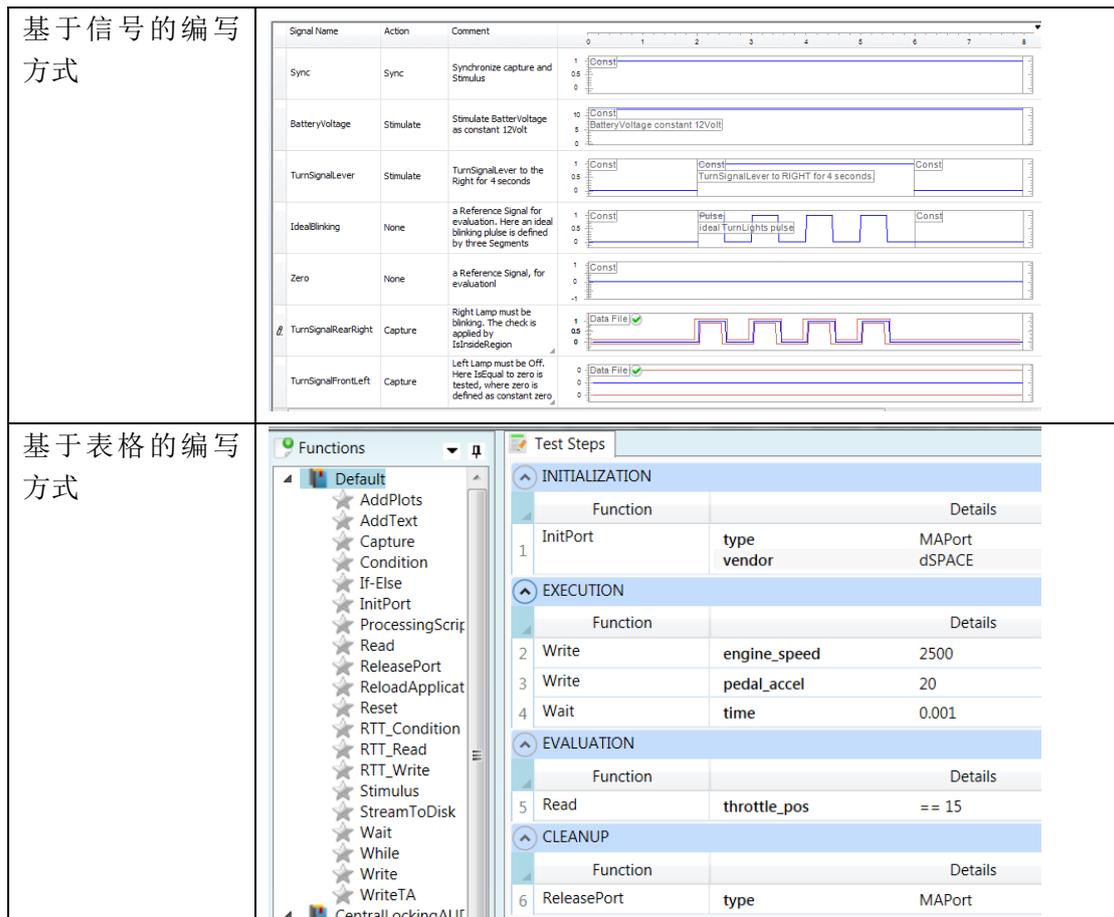
- 具备故障注入操控功能；
- 具备总线监控功能，可依据总线通讯矩阵自动生成测试界面；
- 具备图形化的信号源编辑功能；
- 具备被测控制器标定功能；
- 具备被测控制器诊断功能；
- 支持工具自动化，可使用软件接口库，实现自定义功能扩展及自动化。

## (2) 自动化测试

在环仿真中，测试自动化是提高测试效率，降低测试成本的有效手段。自动化测试软件用于测试用例的编写、管理，测试执行和测试结果反馈。其中，测试用例的开发有多种方式（见下表），借助自动化测试软件可以根据实际用例的设计和测试人员的喜好，选择合适的方式。

表 2.2 测试用例开发方式

测试编写方式	示例
基于脚本的编写方式	 <pre data-bbox="502 1057 1276 1532"># -*- coding: utf-8 -*- """ This script gives an example for test functions.  Copyright 2018, dSPACE GmbH. All rights reserved. """  def TestFunction1(InValue1=0.0, InValue2=0.0):     """This function tests whether InValue1 is greater than or equal to In     try:         if (InValue1 &gt;= InValue2):             return 'Passed', ''         else:             return 'Failed', 'The value of InValue1=%s is smaller than the     except:         return 'Exception', 'Could not compare InValue1=%s and InValue2=%s</pre>
基于图框的编写方式	 <pre data-bbox="502 1559 1270 2018">graph TD     InitModeAccess[InitModeAccess] --&gt; SetBatteryVoltage[SetBatteryVoltage Voltage: 13.5 SetBatteryVoltage]     SetBatteryVoltage --&gt; SetBatterySwitch[SetBatterySwitch Position: On SetBatterySwitch]     SetBatterySwitch --&gt; WaitUntilBatteryVoltageSettled[WaitUntilBatteryVoltageSettled Wait/UntilSignalValueReached]     WaitUntilBatteryVoltageSettled --&gt; SetCentralLock_Lock[SetCentralLock_Lock Action: Lock SetCentralLock]     SetCentralLock_Lock --&gt; Wait[Wait]     Wait --&gt; CheckInteriorHeadLightOff_1[CheckInteriorHeadLightOff_1 ExpectedState: Off CheckInteriorHeadLightOff_1]     CheckInteriorHeadLightOff_1 --&gt; IfUbatBiggerUbatMin{IfUbatBiggerUbatMin Condition Extended Value is Hidden IfThenSize}</pre>



具体来说，自动化测试软件应具备以下功能：

- 支持多种测试用例编写方式，实现测试用例的编写和管理；
- 支持访问平台中的硬件、软件和模型；
- 提供丰富、成熟的测试库，包括逻辑控制、平台访问、故障注入、标定、诊断、数据分析、报告编辑等；
- 支持测试用例的离线编写和调试，能够暂停/单步执行自动测试序列；
- 支持创建自定义测试库，便于测试用例间的复用；
- 支持实时测试，即对时间精度要求高的测试序列，可下载到实时硬件中与模型同步运行；
- 支持自动生成测试报告，反馈测试重要信息、中间过程和结果。

## 2.2.4 软件试验方法

针对仿真软件的测试评价，可根据 GB/T 25000.51-2016《系统与软件工程系统与软件质量要求和评价（SQuaRE）第 51 部分：就绪可用软件产品（RUSP）的质量要求和测试细则》标准，软件测试内容主要包括功能性、性能效率、兼容

---

性、易用性、可靠性和信息安全性。

#### 2.2.4.1 功能性

##### 1) 测试指标

功能性测试指标包括功能完备性、功能正确性、功能合适性以及功能的依从性。其中功能完备性指的是对指定的任务和用户目标的覆盖程度，功能正确性指的是产品提供具有所需精度的正确的结果的程度，功能合适性指的是功能促使指定的任务和目标实现的程度，功能性的依从性指的是产品遵循与功能性相关的标准、约定或法规以及类似规定的程度。

##### 2) 测试方法

功能测试主要方法包括等价类划分法、边界值分析法、因果图法、场景法等，具体测试方法如下：

###### ① 等价类划分法

等价类划分法是一种典型的黑盒测试方法，该方法不考虑程序的内部结构，只根据对程序的要求和说明来设计测试用例。等价类划分法把程序的输入域划分成若干部分，然后从每个部分中选取少数代表性数据作为测试用例。每一类的代表性数据在测试中的作用等价于这一类中的其他值。

###### ② 边界值分析法

边界值分析是考虑边界条件而选取测试用例的一种功能测试方法。软件测试中大量的错误通常发生在输入或输出范围的边界上，而不是在输入范围的内部，因此针对各种边界情况设计测试用例，可以查出更多的错误。这里所说的边界是指相对于输入等价类和输出等价类而言，稍高于其边界值及稍低于其边界值的一些特定情况。边值分析是对等价类划分的有效补充。

###### ③ 因果图法

因果图是一种形式语言，由自然语言写成的规范转换而成，这种形式语言实际上是一种使用简化记号表示的数字逻辑图。因果图法是从用自然语言书写的程序规格说明的描述中找出因（输入条件）和果（输出或程序状态的改变），通过因果图转换为判定表。

等价类划分方法和边界值分析法都是着重考虑输入条件，并没有考虑到输入情况的各种组合，也没考虑到各个输入情况之间的相互制约关系。如果在测试时

---

必须考虑输入条件的各种组合，可能的组合数将是天文数字。因此必须考虑描述多种条件的组合，相应产生多个动作的形式来考虑设计测试用例，这就需要利用因果图法。

#### 2.2.4.2 性能效率

##### 1) 测试指标

性能测试指标包括时间特性、资源利用性、容量、性能效率的依从性。其中时间特性指的是系统执行功能时，其响应时间、处理时间及吞吐率满足需求的程度，资源利用率指的是系统执行其功能时，所使用资源数量和类型满足需求的程度，容量指的是系统参数（参数包括存储数据项数量、并发用户数、通信带宽、交易吞吐量和数据库规模）的最大限量满足需求的程度，性能效率的依从性指的是系统遵循与性能效率相关的标准、约定或法规以及类似规定的程度。

##### 2) 测试方法

性能测试主要测试特定性能点的执行效率，包括服务器事务处理平均响应时间、服务器 90% 的事务处理平均响应时间、每秒请求数、事务成功率等指标，以此考察系统在各种情况下的性能表现。测试方法包括并发负载测试，疲劳强度测试、大容量测试等。

##### ① 并发负载测试

并发负载测试是通过逐步增加系统负载，测试系统性能的变化，并最终确定在满足性能指标的情况下，系统所能承受的最大负载量的测试。

##### ② 疲劳强度测试

疲劳强度测试是模拟系统的日常业务或高峰业务，持续执行“一段时间”，暴露系统的性能问题，例如内存泄漏，资源争用等；其中时间指标要满足两个主要条件，一是这段模拟时间所处理的交易量要达到系统疲劳强度需求的业务量，二是在这段测试周期中必须通过加大负载，以尽可能长的测试周期来保证疲劳强度测试。

##### ③ 大数据量测试

大数据量测试包括独立数据量测试和综合数据量测试两种主要类型，独立数据量测试是针对系统存储、传输、统计、查询等业务进行单用户大数据量测试；综合数据量测试是采用并发测试、疲劳强度测试以及大数据量测试结合的测试方

---

案。

### 2.2.4.3 兼容性

#### 1) 测试指标

兼容性测试指标包括共存性、互操作性以及兼容性的依从性。其中共存性指的是在共享相同的硬件或软件环境的条件下,系统能够与其他系统交换信息和执行其所需的功能的程度,互操作性指的是两个或多个系统能够交换信息并使用已交换的信息的程度,兼容性的依从性指的是系统遵循与兼容性相关的标准、约定或法规以及类似规定的程度。

#### 2) 测试方法

兼容性测试用于确保构建的系统与其他各种对象(如其他网络浏览器、硬件平台、用户、操作系统等)的兼容性。一般通过测试系统在特定的硬件平台上、不同的应用软件之间、不同的操作系统平台上、不同的网络等环境中是否能够稳定的运行。

### 2.2.4.4 易用性

#### 1) 测试指标

易用性测试指标包括可辨识性、易学性、易操作性、用户差错防御性、用户界面舒适性、易访问性以及易用性的依从性。其中可辨识性指的是用户能够辨识产品或系统是否适合他们的要求的程度,易学性指的是在指定的使用周境中,产品或系统在有效性、效率、抗风险和满意度特性方面为了学习使用该产品或系统这一指定的目标可为指定用户使用的程度;易操作性指的是产品或系统具有易于操作和控制的属性的程度;用户差错防御性指的是系统预防用户犯错的程度;用户界面舒适性指的是用户界面提供令人愉悦和满意的交互的程度,易访问性指的是在指定的使用周境中,为了达到指定的目标,产品或系统被具有最广泛的特征和能力的个体所使用的程度;易用性的依从性指的是产品或系统遵循与易用性相关的标准、约定或法规以及类似规定的程度。

#### 2) 测试方法

易用性测试包括对应用程序的测试和用户手册等系列文档的测试。

##### ① 针对应用程序的测试

---

主要包括安装测试，功能易用性测试、界面测试和辅助系统测试四部分。其中安装测试主要通过安装软件产品评估安装的易用性；功能易用测试通过对业务符合性、功能指定性、业务模块的集成度、约束性、交互性等功能性进行易用性测试；界面测试是指对界面的规范性、一致性、合理性等进行测试和评估；辅助系统测试主要测试帮助和引导用户使用软件而存在于软件内的辅助系统的完整好用性。

#### ② 针对文档的测试

对软件系统中的用户手册、在线帮助等文档的条理、结构布局等进行易用性测试。

### 2.2.4.5 可靠性

#### 1) 测试指标

可靠性测试指标包括成熟性、可用性、容错性、易恢复性以及可靠性的依从性。其中成熟性指的是系统、产品或组件在正常运行时满足可靠性要求的程度；可用性指的是系统、产品或组件在需要使用时能够进行操作和访问的程度；容错性指的是尽管存在硬件或软件故障,系统、产品或组件的运行符合预期的程度；易恢复性指的是在发生中断或失效时,产品或系统能够恢复直接受影响的数据并重建期望的系统状态的程度；可靠性的依从性指的是产品或系统遵循与可靠性相关的标准、约定或法规以及类似规定的程度。

#### 2) 测试方法

可靠性测试通过对软件产品的可靠性进行调查、分析和评价来确定软件产品是否达到可靠性的目标，并对检测出的失效的分布、原因及后果进行分析，并给出纠正建议。

软件可靠性测试包括按行为或结果来划分输入与的划分测试，纯粹随机选择输入的随机测试，基于功能、路径、数据流或控制流的覆盖测试等。每种测试方法都局限于暴露一定数量和一类缺陷，但是这些都是面向错误的测试，测试所得结果不能直接用于评价软件可靠性，必须通过一定的分析处理后使用可靠性模型进行可靠性评价。其中软件的可靠性模型包括种子法模型、失效率类模型、曲线拟合类模型等。

---

## 2.2.4.6 信息安全性

### 1) 测试指标

信息安全测试指标包括保密性、完整性、抗抵赖性、可核查性、真实性以及信息安全的依从性，保密性指的是系统确保数据只有在被授权时才能被访问的程度，完整性指的是系统防止为授权访问、篡改计算机程序或数据的程度，抗抵赖性指的是活动或事件发生后可以被证实且不可被否认的程度，可核查性指的是实体的活动可以被唯一地追溯到该实体的程度，真实性指的是对象或资源的身份标识能够被证实符合其声明的程度，信息安全的依从性指的是系统遵循与信息安全相关的标准、约定或法规以及类似规定的程度。

### 2) 测试方法

安全测试验证应用程序的安全等级和识别潜在安全性缺陷的过程。应用程序级安全测试的主要目的是查找软件自身程序设计中存在的安全隐患，并检查应用程序对非法侵入的防范能力，根据安全指标不同测试策略也不同，主要方法有：

#### ① 功能验证

功能验证采用软件测试中黑盒测试方法，对设计安全的软件功能，如：用户管理模块、权限管理模块、加密系统、认证系统等进行测试，主要验证上述功能是否有效。

#### ② 漏洞扫描

安全漏洞扫描通常是借助于特定的漏洞扫描器完成的。漏洞扫描器是一种自动检测远程或本地主机安全性弱点的程序。漏洞扫描器分为主机漏洞扫描器和网络漏洞扫描器两种类型。主机漏洞扫描器是指在系统本地运行检测系统漏洞的程序，如 COPS、Tripewire、Tiger 等自由软件。网络漏洞扫描器是指基于网络远程检测目标网络和主机系统漏洞的程序，如 Satan、ISS Internet Scanner 等。

#### ③ 模拟攻击实验

模拟攻击实验室一组特殊的黑盒测试案例，以模拟攻击来验证软件或信息系统的安全防护能力。其中模拟攻击包括冒充、重演、消息篡改、服务拒绝、内部攻击以及外部攻击等。

#### ④ 侦听技术

侦听技术是在数据通信或数据交互过程中，对数据进行截取分析，目前流行

的是数据包的捕获技术，称为 Capture,可以通过该项技术验证网络加密。

### 2.2.5 软件系统标准化需求

在环仿真软件包含仿真软件和测试软件。建议标准化仿真软件的基本要求和试验方法；以及测试软件的功能要求和试验方法。

## 2.3 在环仿真硬件及标准化需求

### 2.3.1 硬件系统需求

在环仿真硬件在业务侧应满足传感器部件级别、域控制器系统级别、整车级别的仿真需求，从研发侧应满足 MiL, SiL, HiL,ViL 等需求。站在行业通用性而言，其仿真硬件系统架构如图 2.3 仿真硬件系统架构：

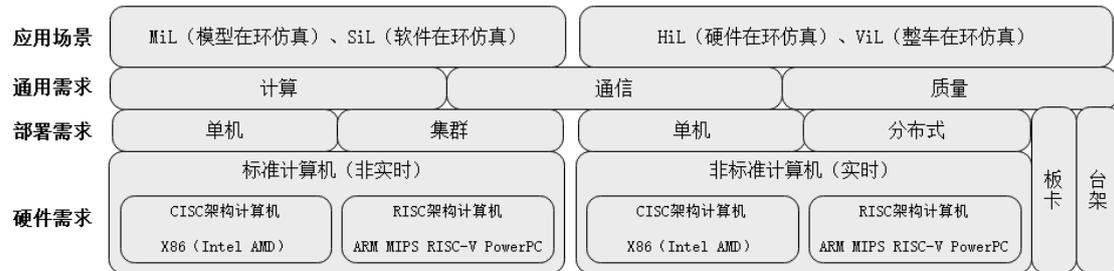


图 2.3 仿真硬件系统架构

智能网联在环仿真工具链一般覆盖 MiL 模型在环仿真、SiL 软件在环仿真、HiL 硬件在环仿真、ViL 整车在环仿真。其中 MiL 与 SiL 基于标准计算机支持其仿真要求，应用于传感器仿真、车辆动力学仿真、交通环境场景仿真和控制算法仿真的数字化仿真场景。HiL 与 ViL 采用非标准的计算机和与之配套板卡来满足其仿真需求，应用于通过板卡将 ADS 域控制器实物或整车接入感知仿真系统和车辆动力学仿真系统，实现实物闭环的仿真场景。

所以，在满足智能网联车在环仿真需求的前提下，仿真硬件有三类需求：硬件需求、部署需求和通用需求。

#### 2.3.1.1 硬件需求

MiL、SiL 数字仿真场景的硬件运行环境一般为标准计算机（PC 机或服务器）。标准计算机硬件要求：选型方面要覆盖市场主流的计算机，涵盖国内外厂商；技术方面覆盖以 CISC 架构和 RISC 架构的计算机，其处理器包括车辆动力学模型与控制模型仿真计算所需的 CPU，和感知场景仿真计算所需的 GPU。标

---

准计算机是为上层应用提供硬件支持，需要支持传感器仿真、车辆动力学仿真、交通环境场景仿真和控制算法仿真应用下的操作系统，包括 CISC 架构和 RISC 架构下的国内外操作系统。

HiL、ViL 实物仿真场景的运行环境需要实时的非标准计算机和配套板卡及台架组合而成。传统使用场景为实验室内，特殊使用场景为特殊环境（环境模拟或外场试验），特殊使用场景需要在传统实验室场景硬件需求下做特种加固的硬件定制化，本文主要讨论传统实验室使用场景下的仿真硬件需求。非标准计算机应具备主流计算机架构、实时性和扩展性三个要求。主流计算机架构满足硬件要求：选型方面要覆盖市场主流的计算机，涵盖国内外厂商；技术方面覆盖以 CISC 架构和 RISC 架构的计算机，其处理器包括车辆动力学模型与控制模型仿真计算所需的 CPU，和感知场景仿真计算所需的 GPU。实时性应能支持车辆动力学仿真和控制算法仿真应用下的实时操作系统，如 RT-Linux、QNX、VxWors 等。扩展性应具备可扩展板卡的能力，扩展能力应采用主流总线板卡技术，如 PCI(CPCI、PXI) 和 PCI-E 技术，从而解决行业板卡跨品牌不通用难题。HiL 和 ViL 板卡可分为仿真板卡、IO 板卡、车载总线板卡、信号调理板卡、故障注入板卡等，板卡基本需求应满足具体业务需求指标，另外满足行业通用要求，具备 PCI(CPCI、PXI) 或 PCI-E 插卡模式。台架具有业务定制化、多样化特点，基本需求应满足业务，不具备标准化要求。

#### 2.3.1.2 部署需求

随着智能网联车技术发展，EE 架构趋向控制器集中化，控制类仿真模型（尤其车辆动力学）将趋向单体复杂化，多传感器融合、视觉方案和 E2E 方案的技术演进，场景类仿真模型（尤其传感器模型、交通环境模型）将趋向融合复杂化。

仿真硬件需要满足当前需求，也需要满足后续需求。支撑 MiL、SiL 场景的标准计算机应满足单传感器或模块化算法仿真测试需求下的单机部署形态，也应满足感知、决策和执行全链条仿真需求下的集群部署形态，集群部署形态应支持资源池化和跨品牌横向扩展的能力。支撑 HiL、ViL 场景的实时的非标准计算机应满足分布式架构下单控制器仿真需求下的单机部署形态，也应满足域控制器/中央计算机仿真需求下的分布式部署形态，分布式部署形态应支持跨品牌级联仿真能力。

#### 2.3.1.3 通用需求

---

通用需求是针对硬件抽象化通用的技术需求，主要涵盖计算、通信和质量。

计算需求在满足仿真模型解算等业务需求外，应考虑单元计算能力及单元计算能力的扩展性。以 CISC 架构和 RISC 架构的计算机应具备两方面要求：单机仿真计算能力和集群/分布式仿真计算能力。单机处理器计算能力应满足业务端仿真计算需求，通常仿真模型时间精度要求 1ms，如果单机计算能力难以覆盖复杂模型计算要求，应具备横向扩展算力能力，可基于通信机制实现集群和分布式仿真（具体通信参照通信需求）。高速仿真和采集板卡应以 FPGA 技术实现，如视频注入、传感器仿真、控制模型仿真等，仿真时间精度要求 10ns。

通信需求有计算机通信需求和板卡通信需求。以 CISC 架构和 RISC 架构的计算机应具备横向扩展能力，可实现跨核、跨 CPU、跨 CPU、跨虚拟机、跨物理机的通信能力，通信包含数据传输也仿真调度两方面。板卡通信实现低高速数据传输能力，实现方式应采用行业通用技术选型，如 PCI（CPCI、PXI）总线和 PCI-E 总线。

质量要求针对在环仿真硬件的通用性要求，应具备：可靠性、安全性、可维修性、保障性。可靠性包括抗干扰、容灾备份（集群/分布式仿真硬件）、简化设计、环境适应性等能力；安全性包括电气安全、机械安全、材料安全、运行安全等能力；可维修性包括部件可互换性、自检能力、易拆装性、可测试性等能力；保障性包括：设备保障、使用保障、培训保障、技术保障等能力。

同时硬件需要具备实时性、专业性、集成性、扩展性。

### 1) 实时性

在环仿真本质上需要将被测件接入仿真测试环境进行业务闭环，实时性是必要条件，在自动驾驶仿真测试中，需要车辆动力学仿真和感知场景仿真对硬件需要较高实时性。

### 2) 专业性

自动驾驶仿真测试覆盖各传感器仿真、ADS 控制器仿真、整车仿真，涉及光、电、图等信号的处理，需要专业仿真板卡、专业的采集板卡来支撑。

### 3) 集成性

在环仿真工具链硬件是融合 CPU、GPU 和 FPGA 计算能力，集成各专业通信板卡、仿真板卡等部件的一套综合硬件架构。

---

#### 4) 扩展性

满足智驾技术快速发展、模型复杂性发展，硬件需具有横向扩展能力：计算能力、仿真能力、专业板卡扩展能力。

#### 5) 通用性

标准计算机和非标准计算机均采用以 CISC 架构和 RISC 架构，其硬件具有行业通用性。

### 2.3.2 通用硬件

#### 2.3.2.1 实时机

实时机提供高性能的计算能力，确保实时处理传感器数据、执行控制算法以及生成必要的控制信号。这种实时性能是 HiL 测试的关键，它确保了测试过程中数据的实时采集、处理与反馈，从而能够准确模拟实际驾驶环境中的车辆行为。

其次，实时机通过支持标准化的接口协议，实现与传感器、控制器以及其他系统组件的无缝连接。这确保了测试数据的准确传输和同步，使得 HiL 测试能够真实反映智能驾驶系统的性能和行为。

此外，实时机还运行实时操作系统（RTOS），为测试提供可靠、稳定的运行环境。RTOS 的确定性调度和任务管理功能，确保了测试过程中的任务能够按照预定时间准确执行，从而提高了测试的准确性和可靠性。

最后，实时机还具备较高的安全性和可靠性，能够抵御电磁干扰、系统崩溃等异常情况。这保证了 HiL 测试的稳定进行，即使在恶劣的测试环境下，也能够确保测试结果的准确性和有效性。

硬件性能要求：

1. **计算能力：**实时机必须具备强大的计算能力，能够处理智能驾驶系统所需的大量数据和复杂算法。这通常要求使用高性能处理器，计算主频可以达到 3Ghz 及以上 CPU 要求 10 核及以上，时钟精度 1us，最小仿真步长 20us，的架构以支持并行计算和实时响应。
2. **内存与存储：**实时机需要足够的内存和高速存储设备，内存大小在 32GB 以上，硬盘内存 500GB 以上，以支持操作系统的运行、应用程序的执行以及数据的实时处理和存储。

- 
3. 网络通信: 实时机应支持高速、低延迟的网络通信协议, 确保与传感器、控制器和其他系统组件之间的实时数据传输和同步。与 I/O 总线板卡的通讯速率应达到 10Mb/s 以上

接口协议标准:

1. 传感器接口: 实时机应提供标准化的传感器接口, 如 Ethernet、CAN 等, 支持各种传感器数据的接入和采集, 如摄像头、雷达、激光雷达等。
2. 通信总线: 实时机应遵循汽车行业的通信总线标准, 如 CAN、Ethernet 等, 以实现与其他车载系统的数据交换和协同工作。

操作系统标准:

1. 实时性: 实时操作系统 (RTOS) 应保证任务按照预定时间调度执行, 确保系统响应的实时性和确定性。
2. 资源管理: RTOS 应提供有效的任务管理、内存管理和中断处理机制, 确保系统资源的合理利用和高效运行。

数据处理标准:

1. 数据采集与预处理: 实时机应能够实时采集传感器数据, 并进行必要的预处理, 如滤波、去噪等, 以提高数据的准确性和可靠性。
2. 数据分析与决策: 实时机应具备强大的数据处理和分析能力, 能够根据采集的数据进行实时分析和决策, 支持智能驾驶的自主导航、障碍物识别等功能。
3. 数据安全性: 实时机应确保数据的安全性, 包括数据的加密存储、传输和访问控制, 防止数据泄露和非法访问。

安全性标准:

1. 电磁兼容性 (EMC): 实时机应满足 GB/T 18268.1-2010 测量、控制和实验室用的电设备电磁兼容性要求, 能够抵御外部电磁干扰, 确保系统的稳定运行和数据的准确性。
2. 故障检测和诊断: 实时机应具备故障检测和诊断功能, 能够实时监测系统的运行状态, 发现潜在故障并及时报警, 提供故障定位和维修指导。
3. 功能安全: 实时机应遵循功能安全标准, ISO 26262 等, 确保在异常情况下系统能够安全地切换到备用模式或进行紧急制动等操作, 保障乘客

---

和车辆的安全。

### 2.3.2.2 IO 板卡

在硬件在环测试中，输入输出板卡发挥着不可或缺的作用，其功能和作用尤为突出。

输入输出板卡的核心功能是模拟和精确测量各类信号。它能够逼真地模拟传感器和执行器的输入信号，无论是模拟量如电流、电压、电阻，还是数字量如开关状态、编码开关等，都能进行模拟与精确测量。通过精准模拟这些信号，测试人员能够构建出高度仿真的车辆测试环境，从而全面而深入地评估控制器的性能表现。同时，输入输出板卡还具备出色的测量能力，能够准确捕捉控制器的输出信号，确保测试的精确性和可靠性。

其次，输入输出板卡在硬件在环测试中扮演着实时信号交互与通信接口的关键角色。它充当着仿真模型与控制器之间的桥梁，将仿真模型产生的信号迅速传递给控制器，并实时接收控制器的输出信号。这种实时的信号交互使得测试人员无需接触实际车辆，即可对控制器的功能和性能进行详尽的测试，大大提高了测试的效率和便捷性。

此外，输入输出板卡还具备出色的负载仿真功能。它能够模拟实际负载设备的运行状态，如电机的工作特性、灯光的亮灭情况等，从而模拟出真实车辆负载条件下的工作环境。这种功能使得硬件在环测试更加贴近实际运行情况，能够更准确地评估控制器在真实负载下的性能表现。

最后，输入输出板卡还能有效检测输出引脚的数字输出状态，确保控制器的数字输出准确无误。这一功能有助于及时发现潜在问题和故障，为后续的修复和优化工作提供有力支持。

硬件要求：

**接口类型和兼容性：**IO 板卡需要提供多种接口类型以满足不同外部设备的需求，如串口、USB、以太网、PCIe 等。此外，IO 板卡还应具备良好的兼容性，能与各种主流操作系统和设备顺利配合。

**信号电平与驱动能力：**IO 板卡需要处理各种信号电平，包括低电平、高电平以及模拟信号等。此外，板卡应具有较强的驱动能力，以确保信号在传输过程中的稳定性和可靠性。

**数据传输速率:**随着技术的发展,外部设备的数据传输速率不断提高。因此,IO板卡需要具备较高的数据传输速率,以满足实时数据交换的需求。

**稳定性和可靠性:**IO板卡需要具备较高的稳定性和可靠性,以确保在长时间运行过程中不会出现故障或数据丢失。这要求板卡采用高品质的元器件和稳定的电路设计,同时还需要经过严格的测试和验证。

**可维护性和可扩展性:**IO板卡的设计应考虑到易于维护和升级。例如,板卡应提供易于更换的故障部件,同时支持功能扩展,以满足未来可能的需求变化。

**电磁兼容性(EMC):**IO板卡需要具备良好的电磁兼容性,以避免外部电磁干扰对数据传输的影响。这包括采用合适的屏蔽措施、接地设计以及滤波技术等。

表 2.3 接口类别与具体性能要求

接口类型	具体的功能和性能要求
数字/PWM 输入	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 输入范围: 0...60V</li><li>■ 输入阻抗: 1M<math>\Omega</math> 及以上</li><li>■ 频率范围: 1Hz...100kHz</li><li>■ 输入阈值可调, 阈值分辨率: 10bit</li><li>■ 电气隔离电压: 5000V 以上</li></ul>
数字/PWM 输出	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 输出范围: 0...60V</li><li>■ 输出阻抗: 20<math>\Omega</math> 及以下</li><li>■ 频率范围: 1Hz...100kHz</li><li>■ 最大驱动能力: 100mA 及以上</li><li>■ 电气隔离电压: 5000V 以上</li></ul>
模拟输入	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 输入范围: <math>\pm 60V</math></li><li>■ 截止范围: 25KHz@3dB</li><li>■ 精度: <math>\pm 1mV@\pm 1V</math>, <math>\pm 5mV@\pm 10V</math>, <math>\pm 30mV@\pm 60V</math></li><li>■ 分辨率: 16bit</li><li>■ 采样率: &gt;100kS/s</li><li>■ 电气隔离电压: 5000V 以上</li></ul>
模拟输出	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 输出范围: <math>\pm 20V</math></li><li>■ 精度: <math>\pm 20mV</math></li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 分辨率：16bit</li> <li>■ 最大驱动能力：30mA 及以上</li> <li>■ 电气隔离电压：5000V 以上</li> <li>■ 上升/下降时间：20us@(0, 10V)</li> </ul>
电阻模拟	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 输出范围：20 Ω …1M Ω</li> <li>■ 工作电压：±12V</li> <li>■ 最大电流：100mA</li> <li>■ 分辨率：1 Ω</li> <li>■ 精度：1.5 Ω +0.5%</li> <li>■ 更新速率：5ms</li> </ul>
传感器仿真	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 支持轮速传感器，包括 DF10/DF11i/DF11s/VDA 等</li> <li>■ 支持 PSI5 协议传感器，符合 V1.3, V2.1</li> <li>■ 支持 SENT/SPC 协议传感器，符合 SAE J2716</li> </ul>

### 2.3.2.3 通讯板卡

在智驾 HiL 测试系统中，CAN 和以太网通讯硬件的结合使用可以实现不同设备之间的数据交换和通信。CAN 总线因其高实时性和可靠性，常用于传感器和执行器与控制单元之间的通信；而以太网则因其高速数据传输能力，常用于与控制单元或上位机之间的通信。通过遵循相应的硬件标准，这些通讯硬件可以确保数据在智驾 HiL 测试系统中的准确、可靠传输。

**CAN 通讯硬件标准：**

CAN 通讯硬件主要遵循 ISO11898 标准，该标准定义了 CAN 通信的速度和电气特性。具体来说，ISO11898 包括了高速 CAN（通信速度为 5kbps 到 1Mbps）和低速 CAN（通信速度为 125kbps 以下）的通信标准。智能网联汽车在环仿真测试中主要应用为高速 CAN/CANFD，CAN 通信速率应达到 1Mbps，CAN-FD 通信最大速率应达到 8Mbps

在硬件设计上，CAN 收发器主要分为驱动器和接收器。驱动器接收 MCU 的信号并将其转换为 CANH 和 CANL 的差分信号，而接收器则将这些差分信号转换为 RX 引脚到 MCU 的信号。这种设计确保了数据在 CAN 总线上的稳定传输。

---

以太网通讯硬件标准：

以太网通讯硬件主要遵循 IEEE 802.3 标准，该标准定义了包括物理层的连线、电子信号和介质访问层协议的内容。这确保了以太网硬件在各种网络环境中都能实现稳定、高效的通信。智能网联汽车在环仿真测试环境中应支持 IEEE 100BASE-TX 和 1000BASE-T 标准以太网、支持 IEEE 100BASE-T1 和 1000BASE-T1 车载以太网。

此外，以太网硬件还常常支持各种网络协议和应用层协议，如 TCP/IP、UDP 等，以满足不同应用的需求。在硬件设计上，以太网通讯硬件通常包括网络接口控制器（NIC）、物理层设备（如 PHY 芯片）以及相关的连接器和线缆。

#### 2.3.2.4 故障注入板卡

故障注入板卡用于将故障信号注入至被测系统，验证被测系统的故障处理能力，应满足以下要求：

接口类型与兼容性：

故障注入板卡应支持 HiL 系统所使用的接口类型，如模拟量输入输出、数字量输入输出、通信接口（如 CAN、LIN、Ethernet 等），同时考虑接口的电气特性，如电压范围、电流限制等，以确保安全注入故障。

故障注入能力：

板卡应能够模拟断路、短路到电源、短路到地、通道之间短路等故障。

安全性与可靠性：

故障注入过程中应确保测试人员的安全，避免电流过大、电压过高等危险情况。板卡本身应具有高可靠性及过流保护功能，以确保测试的准确性和重复性。

接口与通信协议：

板卡应提供标准的接口和通信协议，如 CAN、以太网或者串口通信以便与测试管理软件或其他测试设备无缝集成。

#### 2.3.2.5 上位机

上位机通过以太网连接实时机，完成试验管理、测试配置、在线调参、监控以及数据分析等任务。建议配置如下：

CPU 要求 8 核及以上

---

主频 3.5GHz 及以上

内存 32GB 及以上

硬盘 4TGB 及以上

### 2.3.3 功能外设

在环仿真硬件在通用硬件基础上，增加功能外设硬件，主要为了满足如下需求：

- 硬件故障注入
- 感知传感器仿真
- 机械负载台架仿真

#### 2.3.3.1 硬件故障注入外设

硬件故障注入外设用于注入电气级别的故障，以对被测件进行诊断、功能安全相关的测试。硬件故障注入外设应具备以下功能：支持下列故障类型，包括开路、短路到地、短路到电压、信号间短路、等；支持普通故障注入和大电流故障注入（至少 50A）；支持标准化接口库，方便实现测试自动化，如 ASAM XIL Electrical Error Simulation。

#### 2.3.3.2 感知传感器仿真外设

感知传感器的仿真会有几个不同选项，用户可以根据自身情况（比如测试对象的情况，感知传感器的情况）选择适当的选项。仿真选项大致可以分为三种：前端仿真，数据注入仿真和目标列表仿真。具体区分可参考表 2.4 传感器仿真选项区分。

表 2.4 传感器仿真选项区分

仿真选项	描述	架构示意图
------	----	-------

<p>前端仿真</p>	<p>被测对象包含完整的感知传感和控制器。</p> <p>前端仿真的架构中，除通用硬件在环系统之外，还需要引入额外的仿真台架，来仿真相应物理信号，比如毫米波、射频信号、等。</p>	
<p>数据注入仿真</p>	<p>屏蔽真实的传感部分，而通过仿真的方式将原始数据（Raw data）或对象列表（Target list）注入到感知算法的前端。</p> <p>数据注入仿真的架构，除通用硬件在环系统之外，还需要引入环境传感器仿真平台（图形工作站）和环境传感器接口单元。</p>	
<p>目标列表仿真</p>	<p>被测对象只包含应用部分（决策控制），直接仿真目标列表（Object list）给被测对象。</p> <p>通常来说，目标列表仿真可直接使用总线作为接口，不需要增加额外硬件。</p>	

在实际应用中，往往会出现针对不同传感器类型及其情况，采用不同选项融合的在环仿真硬件系统。因此，需要梳理清楚各个传感器，采用何种仿真选项，如表 2.5 多传感器仿真方案梳理。

表 2.5 多传感器仿真方案梳理

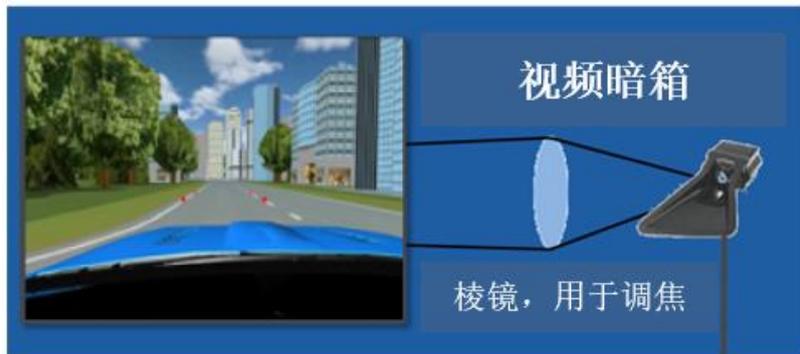
仿真选项传感器	前端仿真	数据注入仿真	目标列表仿真
---------	------	--------	--------

类型			
毫米波雷达	回波模拟台架	模拟信号/点云注入	总线仿真
超声波雷达	回波模拟台架	-	总线仿真
激光雷达	-	模拟信号/点云注入	总线仿真
摄像头	视频暗箱	视频注入	总线仿真
V2X	V2X模拟器	-	总线仿真
GNSS	GNSS模拟器	-	总线仿真

下面将介绍几种主要的外设硬件，包括视频暗箱、回波模拟台架、视频注入设备、GNSS 模拟器。

### 1. 视频暗箱

视频暗箱台架装载真实被测摄像头和显示屏。显示器会播放摄像头视角的实时动画，该动画应由场景软件渲染而成，为摄像头提供拍摄源。同时，视频暗箱还常常会配备一块棱镜，用于调节被测摄像头的焦距，以使其能够清晰地拍到显示屏上的画面。



图, 视频暗箱架构

视频暗箱应具备以下功能。

- 台架选用黑色材料，保证整个暗箱内不透光。
- 摄像头支架具备前后、左右、上下、垂直方向旋转、上下俯仰五个自由度。棱镜支架具备前后、左右、上下三个自由度，保证每个方向的自由度通过丝杆微调实现。
- 摄像头使用夹具两边夹紧、在其上下、横摆和俯仰方向上带有标尺。

### 2. 回波模拟台架

回波模拟台架可引入真实被测雷达,通过回波模拟的方式,仿真虚拟目标物,使其被真实雷达识别。目标物的信息可为静态值,支持远程设置;也可与仿真模型动态关联,并保证一定更新频率(通常为 1KHz)。

回波模拟台架根据被测雷达类型可分为:毫米波雷达回波模拟台架和超声波雷达模拟台架。

毫米波雷达回波模拟台架架构如图 2.4 所示,可仿真以下目标特性:

- 相对距离,
- 相对速度,
- RCS 雷达反射横截面,
- 相对方位角,
- 雷达的高度和倾斜角。

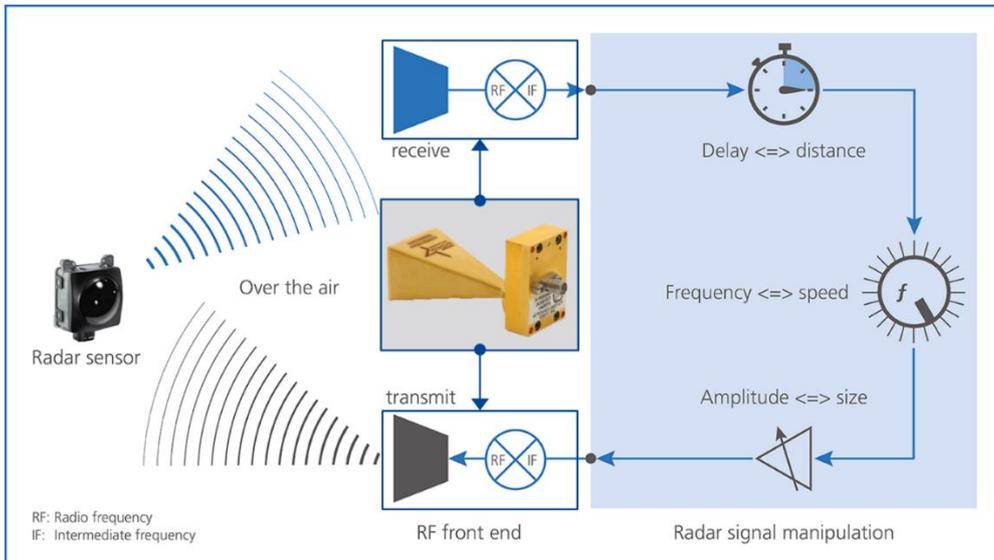


图 2.4 毫米波雷达回波模拟台架架构

超声波雷达回波模拟台架架构如图 2.5 所示,可仿真距离、幅值、频率、信号长度等目标特性

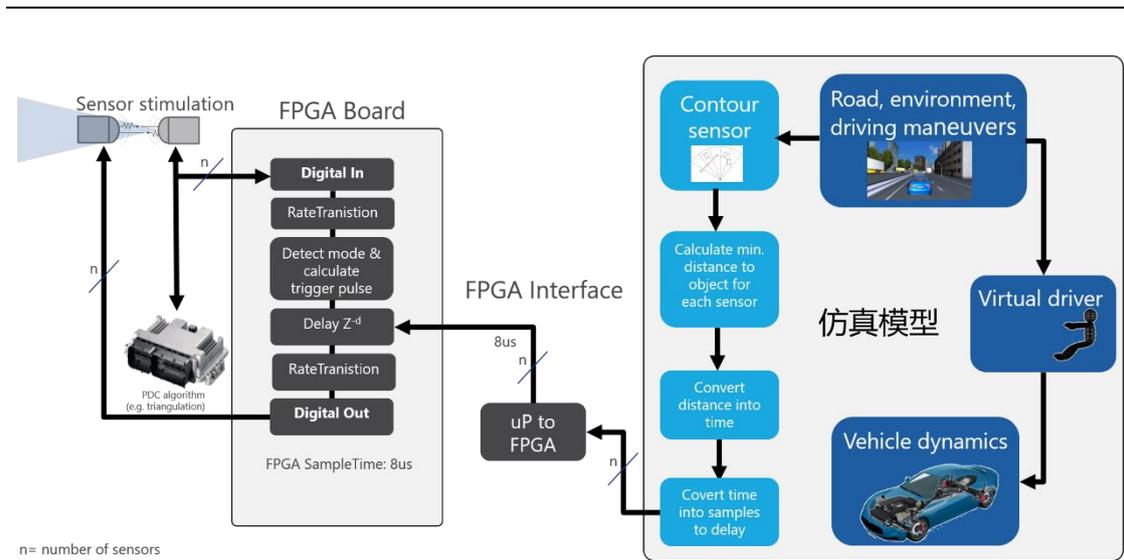


图 2.5 超声波雷达回波模拟台架架构

### 3. 视频注入设备

视频注入设备可模拟真实摄像头，结合传感器模型或实采回放数据，将原始数据注入进被测控制器，其架构图如图 2.6。具体包括环境传感器接口单元和环境传感器仿真平台。

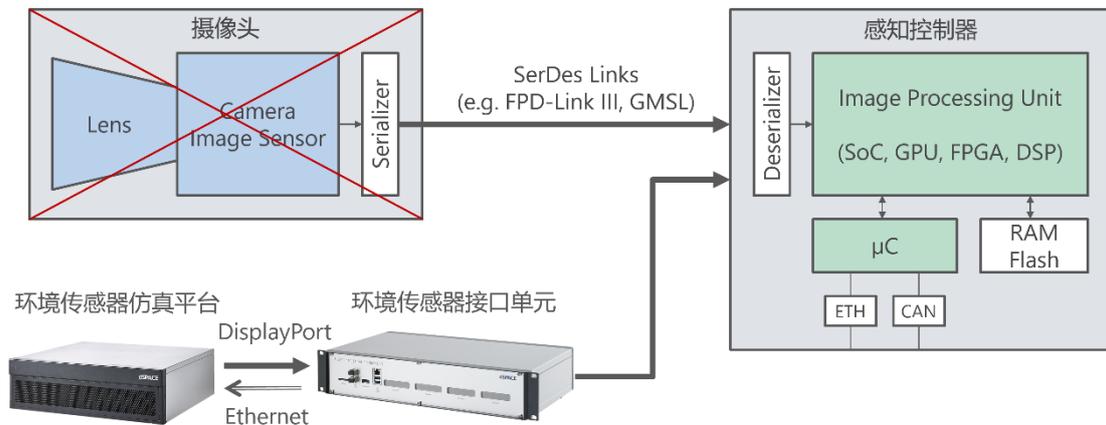


图 2.6 视频注入架构

环境传感器接口单元用于实现传感器数据注入的接口，并与被测控制器正常交互。其应具备以下功能。

- 具备较强计算能力，支持多传感器的同步数据注入；
- 具备高带宽；
- 提供模块化的硬件接口模块，比如：MIPI CSI-2, HiSPI, LVDS, 1G/10G 以太网；
- 支持开环数据回放和闭环仿真；

- 支持故障注入功能，比如摄像头像素级别故障。

环境传感器仿真平台装配高性能 GPU，为物理传感器模型计算提供资源。其应具备以下特性：

- 针对传感器模型计算进行相应优化；
- 与实时处理器信息交互及同步；
- 支持并行计算扩展。

#### 4. GNSS 模拟器

GNSS 仿真可以基于下图的方式：车辆的 6 自由度轨迹真值由 HIL 系统中的仿真软件给出，GNSS 模拟器则基于轨迹真值和待测控制器定位模块所需的卫星信息，根据星历发出 GNSS 射频信号，同时基于车辆所在位置的多径和 NLOS 情况，将 GNSS 射频的多径和遮挡效应也实现仿真。

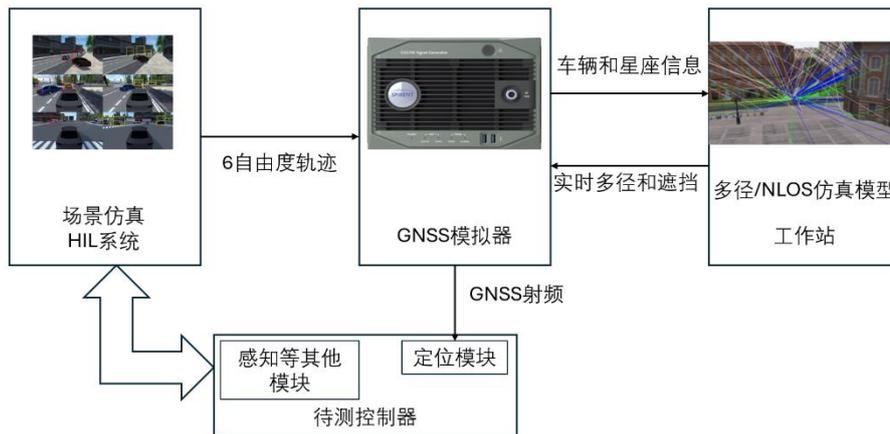


图 2.7 GNSS 仿真架构

GNSS 模拟器的硬件基本要求如下：

- 单台模拟器支持单 RF 同时输出 GPS L1、GPS L5、BEIDOU B1I、BEIDOU B2A，并可升级支持 GPS L2、BEIDOU B1C、BEIDOU B2I、BEIDOU B3I、GAL E1、GAL E5ab、GLONASS L1、GLONASS L2 等，信号的模拟可以任意组合应用于任意星座；
- 单台模拟器最多可模拟 256 颗卫星；
- 可模拟最大相对速度  $\pm 30,000$  m/s；
- 可模拟最大相对加速度  $\pm 2,000$  m/s<sup>2</sup>；
- 可模拟最大相对加加速度  $\pm 22,000$  m/s<sup>3</sup>；

- 可模拟角速率(1.5m 杠杆臂) $>2\pi$  rad/s,角速率(0.05m 杠杆臂) $>10\pi$  rad/s;
- 伪距精度最高可达到 0.3mm RMS,更新率最高可达到 1KHz,内部时延不高于 4ms;
- 可复用于硬件在环和车辆在环仿真系统中。

### 2.3.3.3 机械负载台架外设

通过机械负载台架外设可以将真实被测控制器和(液压、电动)执行机构纳入到整个测试回路中。下面将聚焦于底盘制动和转向台架。

#### 1.制动台架

湿式制动台架集成真实液压制动系统,包含真空助力泵/iBooster,ESP,制动盘,卡钳,等。并在真实液压制动系统中集成一定数量的传感器,采集各个点的液压压力,四个轮边制动力以及卡钳的夹紧力,从而可以动态采集液压制动系统状态。

此外台架还配置了一个线性电机,模拟“踩制动踏板”的动作,并配有力传感器采集真实电机输出力的大小。在整个闭环运行过程中,线性电机根据驾驶员模型指令“踩”制动踏板,其他所有的传感器信号,比如轮速信号,由实时硬件根据车辆动力学模型计算结果仿真反馈给制动控制器,其控制整套真实液压制动系统工作,而装载在液压制动系统中的传感器实时捕捉制动系统状态,如轮边制动力,“喂”给车辆动力学模型。如此,形成一个真实液压制动系统在环的完整控制回路。

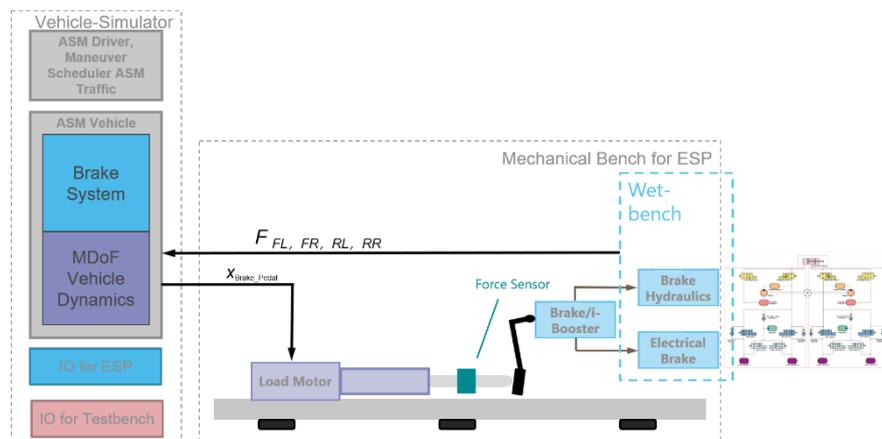


图 2.8 湿式制动台架架构

## 2.转向台架

转向电机对顶台架包含一个负载电机，通过联轴器与被测转向控制器及其助力电机对顶。负载电机根据转向模型实时计算的转向角或者负载扭矩输出响应的角度或扭矩。

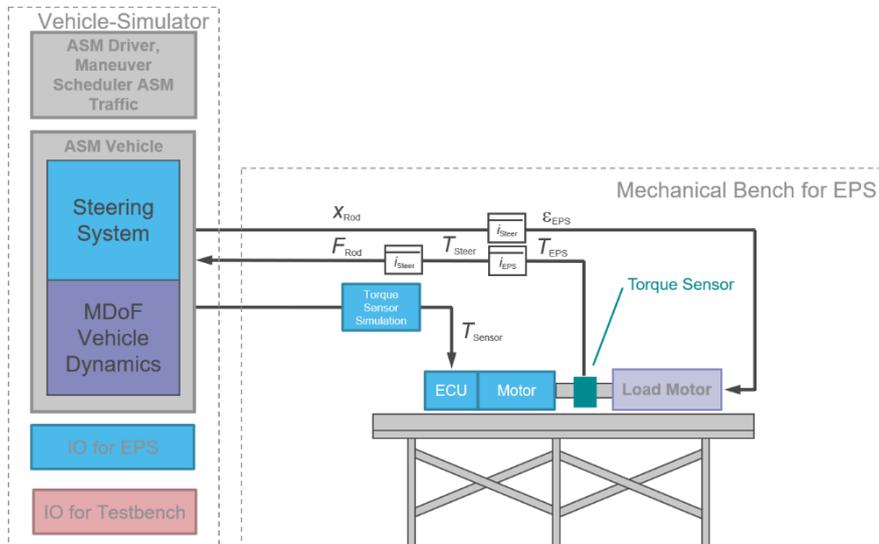


图 2.9 转向台架架构

### 2.3.4 硬件试验方法

硬件试验方法主要包含两种，分别为激励硬件试验和开环硬件试验。

- 激励硬件试验，试验对象只针对在环仿真硬件本身。通过给定输入后，使用相关工具来做检测，验证硬件功能是否符合设计定义。激励硬件试验常常适用于通用硬件的试验。
- 开环硬件试验，试验对象包含在环仿真硬件及被测控制器。通过给定输入后，使用控制器来做检测，验证硬件功能是否符合设计定义。开环硬件试验常常适用于外设硬件的试验。

表 2.6 激励硬件试验

试验对象	试验项	试验方法
整体硬件	电气安全试验	依据 DIN EN 61010（电子测量、控制及实验室设备的安全要求，根据 HIL 系统的高压隔离，漏电，PE 连接测试），验证硬件系统的合规性。
实时处理器	实时性试验	指定一款主流车辆动力学模型（如 IPG CarMaker, dSPACE ASM），设置模型运行步长为 1ms，编译下载到实时处理器的一个核中运行。检测其平均运行时间和最长运行时间。

		建议平均运行时间为模型步长的 20%以内，即 0.2ms 内。最长运行时间为模型步长的 50%以内，即 0.5ms 内。
	上位机通讯延迟试验	设置模型步长为 1ms，编译下载到实时处理器的一个核中运行。检测上位机通讯延迟，即从上位机发送一个指令，如修改一个模型变量，到上位机接收到该指令在实时模型计算后的结果为止，整个过程所对应的时间。 建议延迟时间小于 5 个步长，即 5ms。
IO 板卡	输入通道激励试验	配置相应 IO 板卡的硬件通道，同时通过上位机测试软件观测得到的输入值。 使用信号发生器给定该通道激励信号（从零到满量程中选择三个稳态值），并使用高精度万用表或示波器检测该信号值，作为参考值。 比较参考值和上位机观测值，验证输入通道是否满足要求。具体验证指标包括范围，精度，等。
	输出通道激励试验	配置相应 IO 板卡的硬件通道，同时通过上位机测试软件设置输出值（从零到满量程中选择三个稳态值）。 使用高精度万用表或示波器检测该通道输出信号，作为参考值。 比较参考值和上位机设置值，验证输出通道是否满足要求。具体验证指标包括范围，精度，等。
硬件故障注入外设	故障注入激励试验	配置相应的故障注入通道，同时通过上位机测试软件设置故障注入类型（开路，短路到地，短路到电源，信号间短路）。 使用万用表该通道是否正常实现所设置的故障类型。

表 2.7 开环硬件试验

试验对象	试验项	试验方法
视频暗箱	视频暗箱开环试验	在视频暗箱中装载真实被测摄像头，同时在屏幕中播放静态画面。 检测摄像头拍摄到的画面是否清晰，并比较与屏幕中的画面是否一致。
视频注入设备	视频注入设备自检	用视频注入设备接入被测控制器，按正常上电顺序给两者上电，进行下列试验。 检测视频注入设备帧率输出是否正常； 检测视频注入设备分辨率输出是否正常。
	视频注入开环试验	用视频注入设备接入被测控制器，按正常上电顺序给两者上电，进行下列试验。 检测两者 I2C 交互是否正常；

		<p>使用被测控制器可视化工具，检测注入画面颜色是否正常；</p> <p>使用被测控制器可视化工具，检测注入视频流是否流畅且稳定；</p> <p>使用被测控制器可视化工具，检测注入视频帧率是否正常且稳定；</p> <p>使用被测控制器可视化工具，检测注入视频分辨率是否正常且稳定。</p>
	压力试验	<p>用视频注入设备接入被测控制器，按正常上电顺序给两者上电。进行 6 小时压力测试，检测上述验证项是否达到要求。</p>
回波模拟台架	回波模拟开环静态试验	<p>在回波模拟台架中接入真实被测雷达，通过上位机测试软件设置不同的静态参数，同时回读雷达检测到的值，进行比较试验。</p> <p>具体试验内容包括如下：</p> <p>仿真雷达目标数；</p> <p>仿真雷达目标相对距离，建议范围 7~1000m，精度 6cm；</p> <p>仿真雷达目标相对速度，建议范围±700Km/h，精度 4mm/s；</p> <p>仿真雷达俯仰角，建议范围±10°；</p> <p>仿真雷达目标水平角，建议范围±90°，精度 0.02°；</p> <p>仿真雷达目标水平角速度，建议范围 0~160°/s；</p> <p>仿真雷达频率，及带宽。</p>
	回波模拟开环动态试验	<p>在回波模拟台架中接入真实被测雷达，并与实时系统连接，受实时系统动态控制。</p> <p>在实时系统中下载运行特定场景，同时在上位机测试软件中观测雷达目标仿真值，并回读雷达检测到的目标值，进行动态比较试验。</p> <p>具体试验内容包括如下：</p> <p>仿真雷达目标数；</p> <p>仿真雷达目标相对距离，建议范围 7~1000m，精度 6cm；</p> <p>仿真雷达目标相对速度，建议范围±700Km/h，精度 4mm/s；</p> <p>仿真雷达俯仰角，建议范围±10°；</p> <p>仿真雷达目标水平角，建议范围±90°，精度 0.02°；</p> <p>仿真雷达目标水平角速度，建议范围 0~160°/s；</p> <p>模拟器与实时系统整体更新频率，建议值为 1KHz。</p>

GNSS 模拟器	GNSS 模拟器开环试验	<p>使用具备足够通道数的 GNSS 接收机在定制场景下观测，统计收到的信号数量。建议通道数量为 256。</p> <p>在定制场景下，使用频谱仪测试并记录扫频信号，记录扫频范围从最低端开始到最高端的一次完整扫频时间，利用多普勒频移原理 <math>v = \Delta f \cdot c / f_0</math>，通过计算可以得出卫星与车辆之间的运动速度。建议相对速度为 <math>\pm 30,000 \text{ m/s}</math>。</p> <p>在定制场景下，使用频谱仪测试并记录扫频信号，记录扫频范围从最低端开始到最高端的一次完整扫频时间，利用多普勒频移原理，<math>a = \Delta f \cdot c / (f_0 \cdot t)</math> 通过计算可以得出卫星于车辆之间的相对加速度。建议相对加速度为 <math>\pm 2000 \text{ m/s}^2</math>。</p> <p>在定制场景下，使用频谱仪测试并记录扫频信号，记录扫频范围从最低端开始到最高端的一次完整扫频时间，利用多普勒频移原理，<math>J = 2\Delta f \cdot c / (f_0 \cdot t^2)</math> 通过计算可以得出卫星于车辆之间的相对加加速度。建议相对加加速度为 <math>\pm 22000 \text{ m/s}^3</math>。</p> <p>在定制场景下，使用频谱仪测试载波频率，通过频率变化的周期特征计算出姿态变化的周期特征。建议姿态范围为可模拟角速率（1.5m 杠杆臂）<math>&gt; 2\pi \text{ rad/s}</math>，角速率（0.05m 杠杆臂）<math>&gt; 10\pi \text{ rad/s}</math>。</p> <p>采用巴克码翻转点测量方法，使用高采样示波器分别记录卫星导航信号伪距移动前后两次的时延差，从而判断伪距相位控制精度。建议伪距精度为 <math>\pm 0.3 \text{ mm RMS}@1000\text{Hz}</math>。</p> <p>在定制场景下，使用频谱仪测试载波频率，通过伪距率变化的周期特征计算出模拟器的更新频率。建议更新率为 <math>1000\text{Hz}</math>。</p> <p>在定制场景下，通过高速示波器测量并记录指令输入和模拟器生成 RF 的时间差。建议 HIL 内部时延为 <math>\leq 4\text{ms}@1000\text{Hz}</math>。</p>
----------	--------------	---

### 2.3.5 硬件系统标准化需求

硬件系统分为通用硬件和功能外设硬件。建议标准化通用硬件的基本功能、性能和试验方法；以及功能外设硬件的基本功能和试验方法。

## 2.4 在环仿真接口协议及标准化需求

### 2.4.1 被测系统接口协议

在环仿真被测系统接口协议定义仿真系统中被测系统与各个组件之间如何进行数据交换和通信的规则和标准。这些协议确保仿真过程中的数据一致性、准确性和实时性，主要组件包括：毫米波雷达、摄像头、超声波等。被测系统接口协议分为总线通信协议、数字串行接口协议、图像数据传输协议，分类如表 2.8 被测系统接口协议分类。

表 2.8 被测系统接口协议分类

类别	标准化需求	备注
总线通信协议	CAN/CANFD LIN Flexray Ethernet Automotive Ethernet	主要用于毫米波雷达、激光雷达、车身、底盘、网关等，组件之间的通讯
数字串行接口协议	DSI3	用于超声波雷达与被测系统之间的信号交互
图像数据传输协议	LVDS GMSL FPD-LINK Clockless Link MIPI CSI-2	主要用于摄像头与被测系统图像数据传输

#### a) CAN/CAN-FD/LIN/FLEXRAY

CAN/CAN-FD/LIN/FLEXRAY 是最常用的总线协议，在车载网络上应用广泛。智能感知传感器可以通过 CAN 接口将环境信息传输给被测系统，例如市面上大部分的毫米波雷达都采用 CAN/CAN-FD 作为通讯接口实现其与控制器之间的数据交互。同时摄像头传感器和控制器一体的设备，也会经由 CAN 总线将图像感知过后的数据传送给车内网络。部分传感器也基于 LIN 网络，如超声波雷达与控制器直接的数据交互。而 FLEXRAY 带宽较高，一般用于主干网络的通讯。

#### b) Ethernet 以太网

激光雷达可以通过标准以太网接口输出激光点云数据。另外，标准以太网作为很多外围设备的标配数据接口（比如 GNSS 模拟器），可以方便的通过 TCP 或者 UDP 协议与仿真平台进行数据交互。

#### c) Automotive Ethernet 车载以太网

---

随着智能驾驶系统对于数据带宽的要求越来越高,同时为了应对车辆应用场景对于数据带宽使用效率、接口和线束严苛要求,车载以太网应运而生。与传统以太网相比,车载以太网对物理层进行了修改,采用单对非屏蔽双绞线,引入了10BASE-T1、100BASE-T1、1000BASE-T1 等不同速率的标准。同时支持多种传输层和应用层协议,如 UDP、TCP、DDS、SOME/IP 等。

#### d) DSI3

DSI3 (Distributed System Interface) 总线采用主从结构进行数据交互。通过前向和反向通道 DSI3 提供了效率很高的双工通讯机制。虽然最初是设计为车载安全气囊应用,但是随着其功能增强,超声波雷达与控制器之间的接口也广泛采用 DSI3 总线。

#### e) LVDS

在分布式架构中,摄像头常通过 LVDS 接口输出原始图像/视频数据给控制器,目前市面上提供的 LVDS 接口解决方案主要有以下几种,其中 GMSL 和 FPD-LINK 相对来说应用范围更广。

##### 1) GMSL

GMSL 英文全称为 Gigabit Multimedia Serial Link,是 Maxim 公司(现在 ADI)推出的一种针对车用的串行传输接口标准,目前 GMSL2 可以支持的最高串行速率为 6Gbps,支持同轴电缆传输、同轴电缆 PoC (Power over Coax) 供电,串行解串是成对使用,典型的器件如 Max96717/MAX96724、MAX9295/MAX9296 等。

##### 2) FPD-LINK

TI 公司推出的串行解串解决方案,有 I, II, III, IV 四个系列。FPD-LINK III 的最高带宽可达 4.16Gbps,FPD-LINK IV 可以达到 13.5Gbps。支持 PoC(Power over Cable),主流器件 DS90UB953/DS90UB954、DS90UH949/DS90UH948 等。

##### 3) Clockless Link

采用了 ROHM 自有传输协议的 Clockless Link SerDes IC 成对传输串行数据的差分接口。通过成对传输,可进一步实现高速(最高 3.6Gbps)和长距离通信。还支持成对双向传输,可使用同轴电缆和 STP(Shielded Twisted Pair 屏蔽双绞线)电缆,支持 PoC (Power over Coax)。

#### f) MIPI CSI-2

---

MIPI CSI (Camera Serial Interface) 是由 MIPI (Mobile Industry Processor Interface 移动行业处理器接口) 联盟下 Camera 工作组指定的接口标准, 专门针对摄像头芯片的接口而设计。在摄像头与控制器一体式结构的设计中, 控制器与摄像头通过 CSI-2 直接进行数据传输。因此在此情况下如需要仿真摄像头数据, 对控制器中的感知和控制算法进行验证, 则需要仿真平台通过 CSI-2 接口将摄像头模型仿真出来图象数注入给被测控制器。

在毫米波雷达传感器中, 前端的原始数据与后续的数据处理单元之间也有采用 CSI-2 接口进行大量的数据传输。在测试验证数据处理单元功能的方案中, 仿真系统将毫米波雷达模型仿真的射频前端原始数据(AD 采样数据)需要通过 CSI-2 接口将其输出给数据处理单元。

#### 2.4.2 仿真平台接口协议

仿真平台接口指的是为访问仿真平台中的软件和硬件而提供的相应接口, 包括访问硬件平台的接口和仿真软件平台的接口。

针对仿真平台中的硬件设备, 最常用的接口是 ASAM XIL API 协议接口。ASAM XIL 是用于测试自动化工具和测试台架之间通信的 API 标准, 仿真平台支持的标准为其中的 ASAM XIL API – MA(Model Port)和 EES (Electrical Error Simulation)。ASAM XIL API-MA 是模型访问端口, 定义了访问和采集运行在硬件平台中的模型变量的规范, 目的是将测试软件和测试硬件分开, 使得同一测试用例可以重复应用在不同的仿真平台上。ASAM XIL API-EES 是故障注入访问接口, 描述了访问硬件平台中的电气故障注入单元的规范, 通过使用标准化的流程来定义、设置故障注入通道, 以及激活和取消故障。ASAM XIL API 使用通用 UML 模型, 可以映射到不同的编程语言, 技术参考中提供了 C#和 Python 两种语言。

仿真平台软件除了仿真测试功能的实现, 通常包含自动化 API, 为更上层的测试框架调用提供接口。各平台供应商功能实现方式不一样, 一般为专用的 API, 平台间互通性较差, 测试用例不易在各个平台间移植和复用。部分测试软件提供对控制器的标定和诊断功能, 可以参照 ASAM MCD-3 MC、ASAM ASAP3 或 ASAM MCD-3 D 标准进行接口设计, 此部分接口平台互通性高, 同样的测试用例可以跨平台复用。

---

ASAM XIL API 覆盖仿真模型、诊断、故障等内容，并未包括仿真机本身调度，建议仿真平台接口协议层增加仿真机本身调度协议的建立，满足国内 OEM、Tier1 针对企业需求定制化自动化测试能力。

### 2.4.3 跨平台接口协议

背景：国内 OEM、Tier1 如果有 HiL 级联仿真需求时，无法跨平台

内容：实现跨平台仿真接口协议，满足行业跨平台级联仿真需求

协议：可基于以太网实现，也可基于反射内存卡

协议内容：包括仿真时钟调度与仿真数据传输功能及安全验证等设计

价值：解决行业跨平台问题，降低采购成本，增强仿真平台健壮性

### 2.4.4 在环仿真接口协议标准化需求

接口部分已经有成熟的标准支持，该部分不再制定标准。

## 2.5 仿真工具通用技术标准化建议

仿真工具通用技术标准化主要体现在在环仿真平台架构、在环仿真软件及标准化需求、在环仿真硬件及标准化需求等方面。通过前几章节的研究分析，将在环仿真工具通用技术标准化，对于智能网络汽车的在环仿真意义重大，建议将在环仿真软件、硬件的基本功能要求及试验方法、跨平台接口协议建立推荐性国家标准。适用于智能网络汽车系统架构工程师、软件开发工程师、仿真测试工程师等。

# 第三章 智能网联汽车在环仿真子系统模型技术现状及标准化需求

## 3.1 仿真模型构成及现状

### 3.1.1 仿真模型构成

在环仿真平台中，仿真模型是通过物理建模或数学建模的方法，近似地模拟各系统的特性和输入-输出关系。仿真模型可以根据其所描述的对象和功能进行分类，不同模型可以相互融合和交叉，以适应复杂多变的自动驾驶交通场景。一个完整的在环仿真平台中仿真模型通常包括智能传感器模型、车辆动力学模型、交通流模型等，图 1 为仿真模型包含的几个主要子系统。

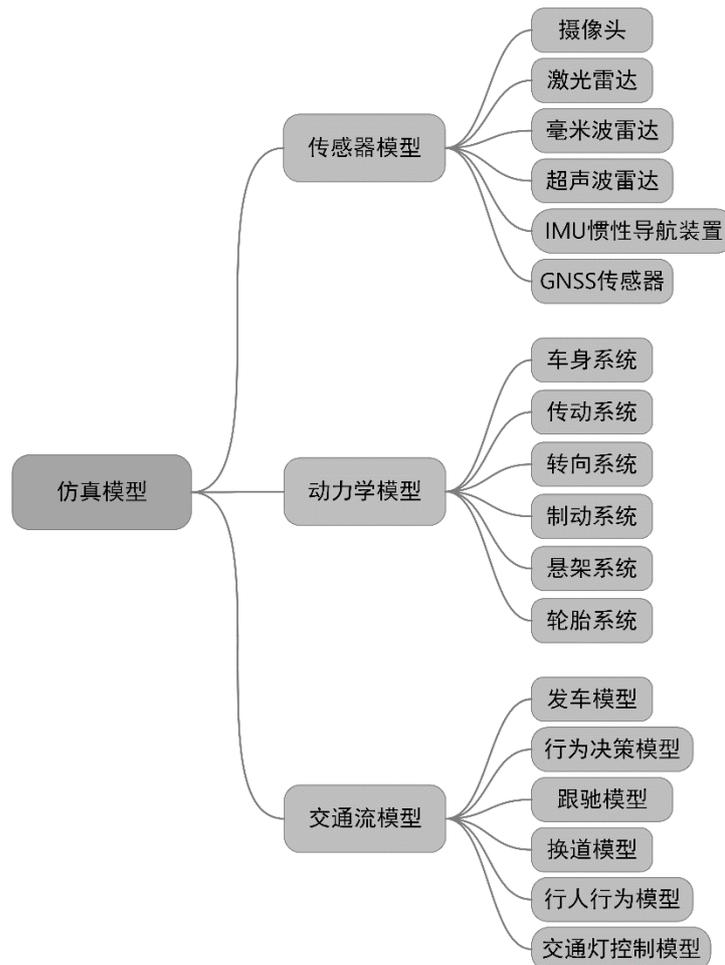


图 3-1 仿真模型构成

以下为仿真模型的各个子系统包含的主要内容：

---

### （1）智能传感器模型

智能传感器模型可以用于生成感知数据，以供感知模块进行处理。传感器模型可以分为摄像头、激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达、IMU 惯性导航装置、GNSS 传感器等。

### （2）车辆动力学模型

动力学模型用来模拟车辆的运动学和动力学特性，包括车辆的加速性能、制动效能、转向特性、侧倾性能等。考虑到模型运行性能，一般常用的动力学模型分为单轨模型、双轨模型、多体动力学模型。其中，多体动力学模型从结构上可以分为车身系统模型、传动系统模型、转向系统模型、制动系统模型、悬架系统模型、轮胎模型等。

### （3）交通流模型

交通流模型是仿真模型的重要组成部分，用于模拟车辆实际行驶的环境。交通流模型模拟不同道路和路口的交通流密度和流量。它需要考虑不同车辆和行人之间的间隔和空间占用，以准确地模拟交通流的拥堵状况和交通规则遵守情况<sup>[6]</sup>。此外，需要能够模拟环境变化和不确定性因素对交通情景的影响。

综上所述，仿真模型是智能网联在环仿真平台中关键的组成部分，对于准确评估自动驾驶系统的性能和安全性至关重要，精确的仿真模型能够保证可靠的测试结果，指导系统开发并降低实际道路测试风险。

## 3.1.2 仿真模型现状

随着计算机仿真技术的进步、计算能力的提升和对实体研究的深入，仿真模型已在多个领域获得了重大的革新。仿真模型的建模层次逐步深入，向工作原理靠近；建模假设的影响逐步降低，单一模型的使用范围越来越大，跨场景通用性和预测性显著提升，模型的流通性逐渐增强。

### 3.1.2.1 传感器模型

随着自动驾驶和驾驶辅助技术的进步，对传感器的依赖日益增加。传感器模型从简理想的传感器模型逐步发展到原始数据级模型，原始数据级模型也在逐步实现传感器和环境的模型解耦。现阶段，理想传感器模型多用于前期对智驾系统规控算法的测试，原始数据级模型多用于感知系统和智驾系统的验证测试。

---

根据对真实世界感知结果的保真度以及传感器建模的复杂程度，传感器模型可分为理想传感器、混合传感器、物理传感器三个层级。

**理想传感器：**通常表示没有误差的传感器模型，主要考虑环境中的几何关系（几何模型），通过设置传感器检测边界，直接从仿真软件的环境数据中提取探测范围内的环境真值（Ground Truth, GT）作为传感器感知目标的检测结果。理想传感器模型的输入输出均为目标列表。

**物理传感器：**针对传感器的具体物理结构和物理原理，从物理特性的角度对传感器工作链路进行全物理级建模，还原传感器信号生成、传输、接收、处理的全过程，并在其中考虑环境条件、材料特性或传感器特定效应对信号的干扰与影响，例如电磁波的多路径反射、动态传感器性能，包括探测丢失率、目标分辨率等。物理传感器模型将仿真环境提供的虚拟环境作为输入，传感器的视频或点云等原始数据作为输出。

**混合传感器：**除理想传感器和物理传感器以外的其他类型传感器则为混合传感器，其建模思路可能包括以下两种情况：① 在理想传感器的基础上考虑噪声和目标物属性等因素，在理想待输出对象的数据信息中增加误差信号（如能量衰减模型与噪声模型）；② 对传感器工作链路进行部分物理级建模，输出传感器原始数据。混合传感器模型可将目标列表/环境参数作为输入，目标列表/传感器原始数据作为输出。

#### 3.1.2.2 车辆动力学模型

车辆动力学模型已经从初步的线性模型发展到高度复杂、非线性的多体模型，受限于当前计算机计算能力，结合有限元的多体动力学应用范围较小。企业自研模型多为非线性单轨模型或双轨模型，多体动力学模型由于其复杂性，企业多采用商用解决方案。较为成熟的多体动力学模型已经可以对汽车零部件系统进行较为细致的数学建模，模型考虑了燃油车与电动车动力特性的差异性、轮胎动力学特性、悬架的 K&C 特性、转向动力学特性、制动动力学特性等。特别是智能网联汽车对更加广泛应用场景的需求在不断增加，对于模型的准确性和预测能力提出了更高的要求。车辆动力学模型已在行业中得到广泛应用，它们为工程师和研究者提供了强大的工具来模拟各种驾驶场景。

#### 3.1.2.3 交通流模型

现代交通流模型已经从传统的宏观模型转变为更为详细、精确的微观模型。这些模型可以模拟单一车辆的行为，或者模拟大规模的交通车流。与此同时，通过城市交通仿真软件的模型也被开发出来用来模拟复杂的交通场景和互动，如 SUMO 和 MATSim，已经允许研究者模拟整个城市的交通流动，并与实现了与其他系统进行交互<sup>[4]</sup>。

表 3-1 主要仿真软件模型对比

仿真软件	CarSim	CarMaker	VTD	Sim Pro	Drive Sim	ASM
<b>传感器模型</b>						
<b>相机模型</b>						
理想相机模型	√	√	√	√	√	√
混合相机模型	√	√	√	√	√	√
物理相机模型		√	√	√	√	√
<b>激光雷达模型</b>						
理想模型	√	√	√	√	√	√
混合模型	√		√	√	√	√
物理模型		√		√	√	√
<b>毫米波雷达模型</b>						
理想模型	√	√	√	√	√	√
混合模型	√	√	√	√	√	√
物理模型		√		√	√	√
<b>超声波雷达模型</b>						
理想模型	√	√	√	√	√	√
混合模型	√		√	√	√	√
物理模型		√		√	√	
<b>GNSS 模型</b>						
理想模型	√	√	√	√	√	√
物理模型		√				
<b>动力学模型</b>						
车身模型	√	√	√	√		√
动力传动模型	√	√	√ (简单)	√		√
转向模型	√	√	√ (简单)	√		√
制动模型	√	√	√ (简单)	√		√
悬架模型	√	√	√ (简单)	√		√
轮胎模型	√	√	√ (简单)	√		√
空气动力学模型	√	√	√ (简单)	√		√
<b>交通场景模型</b>						
行为决策模型	√	√	√	√	√	√
跟驰模型	√	√	√	√	√	√
换道模型	√	√	√	√	√	√
交通信号控制模型	√	√	√	√	√	√

行人行为模型	√	√	√	√	√	√
随机交通流模型	√	√	√	√	√	
AI 交通流模型				√	√	

### 3.2 不同应用场景对仿真模型的整体要求

智能网联在环仿真测试是一种高效、安全、低成本的测试方法，用于全面评估自动驾驶汽车的功能和性能。智能网联汽车按照应用场景的不同可以分为高速和城市快速路场景、城区道路场景和泊车场景。

#### 3.2.1 高速和城市快速路场景

高速和城市快速路场景的主要特征是车辆速度限制在 120km/h 以下、道路拓扑较为简单、道路变化较为舒缓、交通参与者类型少、交通标识类型少、交通规则较为简单、驾驶安全风险高，是首选的智能驾驶落地场景之一，对仿真保真度要求严苛。高速和城市快速路运行的智驾系统可分为单车道、多车道两类。感知模型需要实现 FOV（重点关注前向和相邻侧向）内长距离范围内的保真度；车辆动力学模型需要实现大车道半径、全速度区间以及直线和变道工况的保真度；交通流模型则需要实现全速度区间的交通保真度，且交通参与者类别主要为机动车。

#### 3.2.2 城区道路场景

城区道路场景主要特征是车辆速度限制在 80km/h 以下、道路拓扑及环境复杂、交通参与者类型复杂、交通标识类型多、交通规则复杂、驾驶安全风险中等，对仿真保真度和复杂性要求高。感知模型需要实现 FOV（重点关注前向和侧向）内中距离范围内的保真度；车辆动力学需要实现中小车道半径、限速范围内以及直线和变道工况的保真度；交通流模型则需要实现全速度区间、全行驶方向的交通保真度，交通参与者需要覆盖所有交通类型。

#### 3.2.3 泊车场景

泊车场景的主要特征是，车辆速度低、处在封闭区域环境、交通参与者类型简单、引导标识类型少、交通规则简单，是首选的智能驾驶落地场景之一，驾驶

---

安全风险低，产生的风险主要表现为经济损失，且场地试验代价较小，对仿真保真度要求中等。感知模型需要实现 FOV（环绕）内短距离范围内的保真度；车辆动力学需要实现小转弯半径、低速范围内的保真度；交通流模型则需要实现低速区间、全行驶方向的保真度，交通参与者需要覆盖机动车和行人。

### 3.3 智能传感器模型功能及性能要求

#### 3.3.1 智能传感器模型仿真原理

在智能汽车仿真测试过程中，传感器建模是一个关键环节，其建模质量决定了仿真测试中智能汽车感知环境目标对象的逼真度。传感器在环仿真，本质是高真实度的传感器模型和虚拟场景复现这两个能力的结合。根据仿真需求的不同，传感器仿真可以分为物理信号仿真、原始信号仿真和目标信号仿真。物理信号仿真是直接仿真传感器收到的信号，如摄像头的物理信号为光学信号、毫米波雷达的物理信号为电磁波信号、超声波雷达的物理信号为声波信号；原始信号仿真时把传感器的探测单元拆掉，直接仿真电控嵌入式系统中专门的数字处理芯片的输入单元；目标信号仿真是直接将传感器检测的理想目标仿真到决策层算法输入端。目前主要的仿真传感器为摄像头、激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达、GNSS 传感器等。

摄像头传感器的完整感知过程包含视觉传感器安装、图像采集、图像处理等过程，其中的每一步都将影响传感器最终的感知精度。传感器芯片是一个二维检测元件阵列，光线从周围环境的不同表面反射出来，最终被摄像头的传感器芯片检测为数字信号，实现三维环境被投影到二维平面的过程<sup>[9]</sup>。摄像头仿真是基于环境物体的几何空间生成逼真的图像，再根据物体的真实材质与纹理，通过计算机图形学对三维模型添加颜色和光学属性等，来仿真模拟图像合成。

激光雷达传感器可以通过追踪目标，获取周围环境的深度信息。其工作原理为激光发射器发射一束激光脉冲，当激光脉冲照射到待检测目标后产生反射，反射信号被激光接收机接收后送至信号处理系统，同时反馈给控制系统，由此来计算待测目标与雷达所在位置的距离<sup>[10]</sup>。激光雷达仿真是通过参考真实激光雷达的扫描方式，模拟每一条真实雷达射线的发射，与场景中的所有物体求交，仿真结

果包括带反射强度的点云和障碍物真值信息。

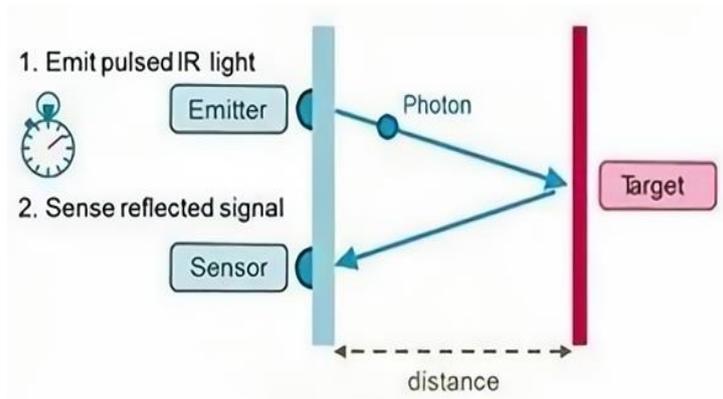


图 3-2 激光雷达原理图

毫米波雷达传感器通常发射一定功率的调频连续波，并在一段时间后接收到回波信号。其工作原理为发射器发出毫米波，利用此时间差，传感器可以计算出前方目标物体的距离。同时，根据多普勒效应，被探测的目标具有相对运动时，接收到的信号频率与发射时不同，由此来测得待测目标相对于雷达的运动速度<sup>[11]</sup>。毫米波雷达仿真一般会根据配置的视场角和分辨率信息，向不同方向发射一系列虚拟连续调频毫米波，并接收目标的反射信号，可以根据障碍物的径向距离、距离分辨率和角度分辨率等信息对同一障碍物的点进行聚类并返回最终仿真结果。

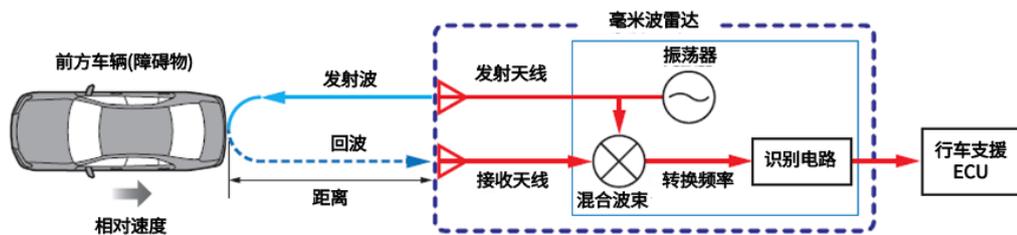


图 3-3 毫米波雷达原理图

超声波雷达是利用超声波发生器产生的超声波，再由接收探头接收经障碍物反射回来的超声波，根据超声波反射接收的时间差计算与障碍物之间的距离<sup>[5]</sup>。超声波雷达仿真通过计算机模拟产生超声波信号并发送出去，当超声波信号遇到障碍物时会被反射回来，根据反射信号的时间延迟和强度等信息计算出障碍物与传感器之间的距离、速度和方向等属性。

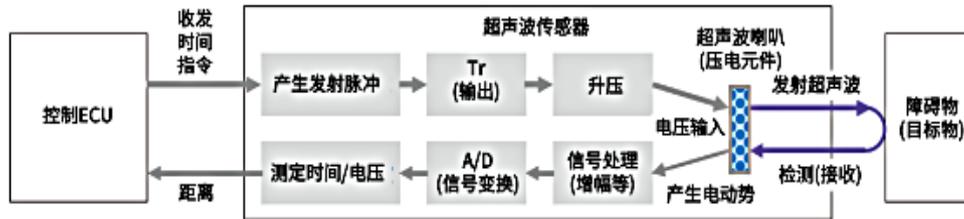


图 3-4 超声波雷达原理图

在 GNSS 定位中，多径效应（multipath）和非视距误差（NLOS, Non-Line-of-Sight）是两种常见的影响定位精度的因素。GNSS 多径/NLOS 环境是来自于信号的遮挡、反射和折射，这些效应可能在车载 GNSS 接收机中造成严重的误差。根据卫星几何分布和车载 GNSS 接收机环境条件的不同，多径误差可能只有几米，但也可能高达数百米，由此对自动驾驶决策算法产生影响。

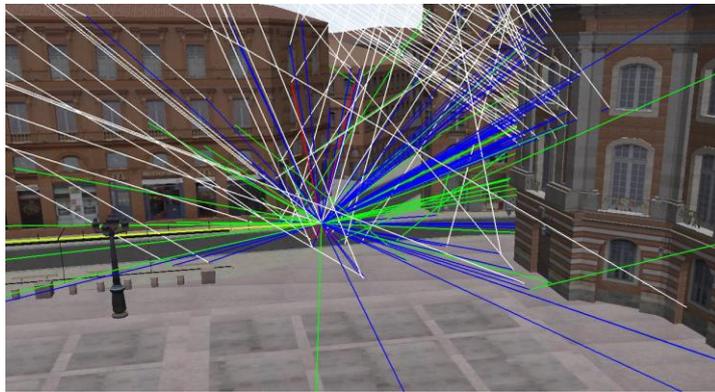


图 3-5 典型 GNSS 多径/NLOS 环境

### 3.3.2 智能传感器模型功能要求

智能传感器在仿真模拟中起到数据生成、噪声模拟、性能模拟和多传感器同步输出的作用，根据智能传感器不同类型所需满足特定的功能要求如下：

（1）数据生成：传感器模型需要生成模拟传感器所感知到的环境信息，根据数据生成原理的不同可以分为目标列表数据和原始数据。

1) 目标列表数据：

- 摄像头：目标对象的特征及形状、颜色、位置、速度，车道线的颜色、种类等；
- 激光雷达：目标对象的相对距离、相对速度、加速度、大小和方向等。
- 毫米波雷达：目标对象的相对距离、相对速度、方向和高度等。
- 超声波雷达：目标对象的坐标 (x,y,z)、角度 (pitch, roll, heading) 等。
- GNSS: 目标车辆的绝对位置坐标。

---

## 2) 原始数据:

- 摄像头: 输出图像信息、镜头的特性信息。
- 激光雷达: 输出水平角度及分辨率、垂直角度及分辨率、扫描时间间隔、点云位置坐标、测量距离及反射率等信息。
- 毫米波雷达: 输出点云、点云纵向距离、点云横向距离、点云纵向相对速度、点云横向相对速度、点云 RCS 值等信息。
- 超声波雷达: 能输出探测距离、回波宽度、回波强度等信息。
- GNSS: 观测量信息, 如伪距、载波相位、载噪比、多普勒等观测量。

(2) 噪声模拟: 传感器模型需要能够模拟传感器在实际应用中存在的各种噪声和误差。例如, 摄像头模型可以模拟图像的噪点、炫光, 激光雷达模型可以模拟点云的噪声和测距误差, GNSS 可以通过构造遮挡环境模拟 GNSS 传感器在多径/NLOS 环境下的噪声情况等。这样可以使得仿真的数据更加真实, 并且能够考虑传感器的不确定性。

(3) 特性模拟: 传感器模型需要能够模拟传感器的特性和性能。例如, 摄像头模型需要考虑相机的曝光时间、感光度、畸变、景深、拖影和视场角等参数, 激光雷达模型需要考虑雷达的角分辨率、测量范围、畸变等, GNSS 模型可以考虑在多径/NLOS 伪距变化、多普勒变化、功率变化等。这样可以使得仿真的数据更加准确, 并且能够满足不同应用场景的要求。

(4) 同步实时输出: 自动驾驶系统通常会使用多种不同类型的传感器进行感知, 因此多传感器模型需要能够支持同步实时输出, 以支持融合算法实现多传感器的融合, 并避免错帧漏帧情况。

### 3.3.3 智能传感器模型性能要求

#### (1) 精度要求

##### 1) 摄像头仿真模型精度要求

- 原始图像数据的分辨率与色彩空间格式与实际摄像头数据保持一致。
- 同一识别算法, 实车识别与仿真识别结果一致。

##### 2) 激光雷达仿真模型精度要求

- 仿真模型输出数据可通过上位机软件识别实现可视化。模型点云分布与

---

实际点云分布形状一致，点云数量误差不超过 10%，长宽高的误差不超过 10%；

- 模拟点云数据的值需与实际场景点云数据的值误差不超过±5cm；
- 目标的反射率信息与实际反射率的误差不超过 10%；
- 带识别算法开环验证，点云识别到物体的目标信息需与实际激光雷达的误差不超过±5cm。

### 3) 毫米波雷达仿真模型精度要求

- 毫米波雷达仿真模型输出点云分布与实际点云分布形状一致，点云数量误差不超过 10%；
- 模拟点云数据的值需与实际场景点云数据的值误差不超过±5cm；
- 对于同类目标 RCS 与实际 RCS 的误差不超过 10%；
- 带识别算法开环验证，点云识别到物体的目标信息需与实际毫米波雷达的误差不超过±5cm。

### 4) 超声波雷达仿真模型的精度要求

- 对于目标的反射率信息与实际反射率的误差不超过 10%；
- 带识别算法开环验证，识别到的物体的目标信息与实际超声波雷达的误差不超过±5cm。

## (2) 同步性要求

当对多个摄像头进行模拟时，应确保摄像头之间的同步性：

1) 摄像头模拟应字标准时间同步，确保如双目模拟及环视系统等多个摄像头同时模拟时能协同工作避免数据错乱；

2) 摄像头同步时间的精确度要求，时间同步的精度对数据的准确性直接影响，精度至少应远高于于图像的发送周期；

3) 时间同步应稳定可靠。在设备变化更新的情况下，同一摄像头仿真系统下摄像头模拟应保持同步误差稳定允许范围内。

## (3) 实时性要求

传感器模型仿真应具备高实时性，以摄像头模型为例，

1) 视频注入的传输实时性链路应包含从图像渲染、图像处理、格式串行直至控制器接收解串整个链路的延时。

- 
- 2) 图像传输的物理线路总延时不应超过 10ms;
  - 3) 图像链路的总延时与实车摄像头链路的延时偏差应不超过 10%;
  - 4) 延时误差应具备一致性或趋优性, 场景变换、软件升级或板卡换新等情况, 延时应保持不变或更优。

#### (4) 鲁棒性与稳定性要求

在复杂道路条件下, 如恶劣天气、弱光照等情况下, 传感器模型需要保持良好的工作状态。因此, 传感器模型需要满足鲁棒性和稳定性要求, 在各种环境条件下都能正常工作。

附录 A 为传感器模型试验方法及性能要求的具体案例, 可参考。

### 3.4 车辆动力学模型功能及性能要求

车辆动力学模型用于模拟车辆的运动行为和动力特性, 它在自动驾驶系统中也扮演着重要的角色。在智能网联在环仿真测试系统中, 动力学仿真在实现系统闭环中起着关键的作用。基于车辆物理特性和控制算法, 构建完整的整车动力学模型, 模拟和评估自动驾驶车辆在不同道路条件下的运动行为。

#### 3.4.1 车辆动力学模型功能要求

在虚拟环境中, 车辆动力学模块接收自动驾驶系统的控制模块给出的控制信号(油门、刹车、转向等), 直接对车辆的各个模块进行控制, 同时实时更新车辆位姿状态和底盘总线参数, 并将参数信息输出给自动驾驶车辆的各个模块, 实现闭环控制。

动力学模型功能要求主要体现在以下几个方面:

##### (1) 动力学实现

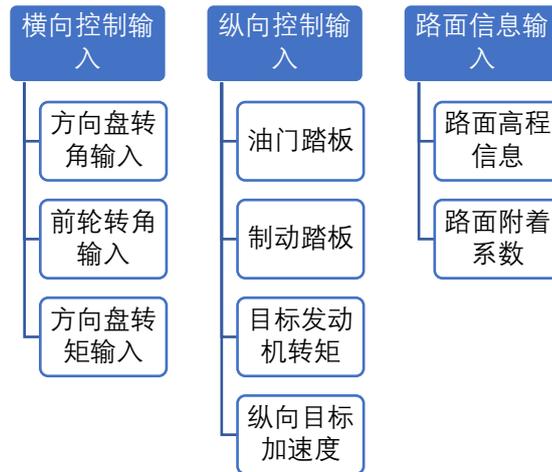
- 模型自由度: 模型应不少于 15 个自由度, 至少包含车身三个位移自由度(x、y、z)、车身三个旋转自由度(俯仰、侧倾、横摆)、四个车轮各自的转动、四个车轮各自的接地点、垂向跳动以及转向系统方向盘转向角输入等。
- 能够实现整车纵向、横向、垂向动力学响应, 准确地模拟车辆在道路上的运动行为, 包括加速、减速、转弯、刹车等。根据实际需求配置车身

系统、动力和传动系统、转向系统、制动系统、悬架系统、轮胎系统。

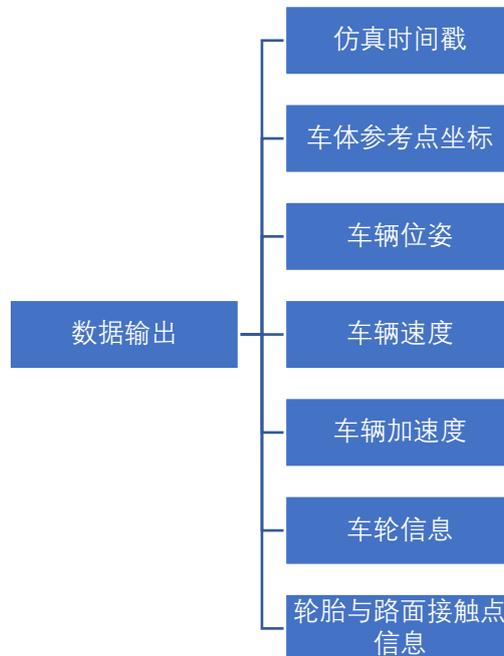
(2) 外部交互实现：能够与空气模型交互，实现空气动力学激励；能够与地面模型交互，实现轮胎激励；能够与驾驶员模型交互，实现转向、加减速、换挡等激励。

(3) 仿真数据接口配置：

- 数据输入：数据输入需要包含横向控制输入、纵向控制输入和路面信息输入，下图为具体包含的输入信息：



- 数据输出：



(4) 控制响应：车辆动力学模型需要能够模拟车辆对控制指令的响应速度和精确度。它需要模拟车辆在接收到控制输入后，能够正确地执行相应的动作，

---

并且在不同的驾驶场景下有适当的控制策略。例如，在紧急情况下，车辆需要能够迅速响应并采取适当的避障动作。

(5) 实时计算和反馈：根据控制指令实时更新车辆位姿、加减速信号等，并将车辆状态信息同步给车辆的各个子系统，通过将实际输出与期望输出做对比，并根据差异调整控制指令，使得车辆能够更好地跟随期望轨迹并保持正确的位姿。

### 3.4.2 车辆动力学模型性能要求

车辆动力学模型需反映出真实车辆在真实场景中加减速、换道等主要车辆运动行为，这些行为均对车辆动力学模型仿真提出以下性能要求：

(1) 模型的精确性：能够满足仿真测试对模型精确性的要求，能够准确地反映物理特性，以获得可靠而准确的仿真结果，并与实际车辆数据相匹配；

(2) 模型的实时性：模型应能够在实时环境中运行，满足仿真测试对模型实时性的要求，包括快速计算、高采样率，支持云端并行仿真加速测试的需要；能够实时响应自动驾驶系统控制模块的控制指令；

(3) 车辆稳定性：车辆动力学模型需要能够模拟车辆的稳定性，包括横向稳定性和纵向稳定性。它需要考虑车辆的重心位置、悬挂系统等因素，以确保模拟结果能够准确地反映车辆在不同路况和驾驶情况下的稳定性表现。

附录 B 为动力学模型试验方法及性能要求的具体案例，可参考。

## 3.5 交通流模型功能及性能要求

交通流模型是从空间和时间维度描述人-车-路-环境之间复杂动态关系的模型，是自动驾驶汽车产品研发和功能测试的基础。交通流模型通常包括环境中的行人（类型、行为动作）、动物、车辆行驶信息、道路信号灯的交通管控信息、天气、光照条件等。

### 3.5.1 交通流模型功能要求

#### 3.5.1.1 基本功能要求

针对交通流模型，需要依据相关的国标及法规要求进行模型的搭建，对模型提出以下功能要求：

---

(1) 能够构建不同种类的道路，精确描述道路的几何特性、道路数量、道路宽度以及限速，能够描述特殊的交通设施，比如公交车站、障碍物等。

(2) 交通流模型需要能够准确地模拟车辆的行驶行为，具有合理的跟驰跟驰行为，并可判断信号灯，根据信号的改变跟驰策略；具有合理的换道模型，车辆可根据标线识别可换道区域，可自主选择车道完成换道过程。它需要基于车辆的动力学特性和交通规则，预测车辆的运动轨迹，并确保模拟结果与实际交通流的行驶行为相吻合。

(3) 交通流模型能够模拟行人的行为，包括行人的移动速度、行进方向、行人之间的相互关系等。

(4) 能够对交通信号灯的周期变化进行精确描述，可以改变相位方案，且车辆根据红绿灯智能改变行为。。

(5) 能够模拟环境变化和不确定性因素对交通情景的影响。例如，模型需要能够模拟天气变化、道路状况变化。

### 3.5.1.2 交通流模型分类要求

#### (1) 发车模型

发车模型是交通流模拟的起点，是交通模型最基本的子模型，负责提供交通流的输入。交通车辆的产生主要有两种方式：一是利用实测的交通流数据作为输入，产生与实际完全相同的交通流；二是以用户的具体需求为参考，通过设定交通流的一些宏观参数，例如车流密度、驾驶员类型组成、车辆类型组成、平均车速等，产生符合用户需求的交通流。

#### (2) 行为决策模型

行为决策模型是交通流中车辆智能性的主要体现，是交通场景模型的核心之一。决策模型的功能是对使车辆在面对不同交通状况时能够做出合理的驾驶行为选择，交通车辆主要有跟驰、换道、超车等驾驶行为。

表 3-2 行为决策方法分类

基于规则的智能车辆行为决策方法	使用预定义的规则和逻辑来指导车辆的行为决策
基于结构化模型的方法	用数学模型来描述车辆、环境和其他交通参与者的行为，通过模拟这些模型，车辆可以预测不同行为对周围环境的

	影响，进而做出相应的决策
基于机器学习的行为决策方法	机器学习方法利用大量的数据和算法来训练车辆的行为决策系统，包括监督学习、强化学习和深度学习等技术，可以使车辆从数据中学习并适应不同的交通情境

### (3) 交通流跟驰模型

建立在车辆跟驰理论基础上的—类交通流微观模型，描述了在限制超车的单车道上行驶车队中相邻两车之间的相互作用，其与驾驶员反应时间、多车道情况、路面情况、人类视觉因素、天气状况等因素均有关。跟驰模型需要正确预测车辆运动并复制实际交通中观察到的现象，还要能够描述和反应道路条件、人为因素对交通流的影响。

表 3-3 车辆跟驰模型分类

车辆跟驰模型分类	交通工程角度	刺激-反应类	GM 模型、Newell 模型、Helly 模型
		安全距离类	Gipps 模型、NETSIM 模型、FRESIM 模型
		生理-心理类	Wiedemann 模型、Winsum 模型、DVA 模型
		人工智能类	模糊逻辑模型、神经网络模型、模糊神经网络
	统计物理角度	优化速度	OV 模型、GF 模型、FVD 模型
		智能驾驶	IDM 模型、HDM 模型
		元胞自动机	NaSch 模型、FI 模型、VDR 模型

跟驰行为建模需要使得模型能够同时在微观和宏观水平上与现实交通特性相吻合，既需要考虑驾驶人复杂的多目标决策过程，通过模型结构的改进以增强现实性，又需要提高跟驰数据采集的质量，建立规范统一的参数标定与模型验证方法。

### (4) 交通流换道模型

车辆受到当前车道和相邻车道车辆的影响，进行换道的模型。换道过程一般分为两个过程：换道判断过程（包括选择换道目标、判断是否换道、判断进入目标车道的可能性以及换道后的改善条件）和车辆换道变换。车辆换道行为根据换道的原因不同换道行为可分为自由换道与强制换道。自由换道指车辆为了追求更自由的驾驶环境而进行的换道行为，强制换道指车辆为了到达车辆目的地而进行的换道行为。

表 3-4 车辆换道模型分类

车辆换道模型 分类	Gipps 类模型	
	效用选择模型	自由换道、强制换道、协作换道
	间隙接受模型	自由换道、强制换道
	人工智能类	模糊逻辑模型、人工神经网络模型、博弈论模型

### 3.5.2 交通流模型性能要求

（1）实时性：模型需要在实时性要求下进行场景识别和决策，以保证车辆能够及时地做出相应的行驶决策。

（2）精度和准确性：模型需要高准确性的识别、跟踪和预测动态目标，以及精确的道路几何建模，以确保安全和稳定的行驶。

（3）鲁棒性和适应性：模型需要对不同的交通场景和复杂的驾驶情况具有鲁棒性和适应性，能够处理各种异常情况，如恶劣天气、道路坏况等。

（4）可扩展性和灵活性：模型需要具备可扩展性和灵活性，能够适应不同类型的车辆和交通环境，并能够随着技术和需求的发展进行更新和升级。

（5）安全性：模型需要确保行驶的安全性，能够有效地应对潜在的危险和风险，如紧急制动、避让障碍等。

（6）可解释性和可调整性：模型需要具备可解释性和可调整性，能够解释其决策和行为，并根据需要进行调整和优化，以提高性能和效果。

附录 C 为交通流模型试验方法及性能要求的具体案例，可参考。

---

### 3.6 仿真模型标准化需求

综合本节以上对仿真模型的标准化研究,可以看出仿真模型涉及多个细分子模块,且各模块之间相互独立又共同组成仿真模型的完整技术链路。现阶段,随着自动驾驶技术的不断进步和应用,在环仿真测试也得到快速的发展,尤其是MIL、HIL等验证手段已较为成熟,SIL的应用也逐渐增多。但行业内针对仿真模型的开发和验证缺乏统一的标准,不同厂商和企业目前对仿真模型的定义仍不统一,仿真模型存在差异,模型的精确性也缺乏统一的验证标准,因此难以对自动驾驶系统进行有效的比较和评估。此外,缺乏统一的标准可能导致测试结果不一致或无法复现,使得监管机构难以制定相关政策和规范,影响自动驾驶系统的升级迭代。因此,亟需制定统一且明确的仿真模型标准化需求。

针对仿真模型的开发和验证,提出以下标准化需求建议:

标准化模型术语、定义、分类及功能范围,以划分各个模型的边界和使用范围;

标准化模型接口,以促进模型流通和集成,确保不同仿真模型之间可以进行数据交互及传输;

标准化模型分级,以确定模型测试内容,便于实施模型认证;

标准化模型测试方法和相关性要求,以完善相应的测试方法与流程,量化模型测试评价,便于实施模型认证。

---

## 第四章 在环仿真集成系统模型技术现状及标准化需求

### 4.1 在环仿真集成系统模型与实车相关性的含义

在环仿真集成系统模型是由传感器模型、车辆动力学模型、驾驶员模型、交通场景模型等构成的人-车-路-环仿真模型，以及关键的车载零部件、控制器、软件或算法组成的集成系统。

在环仿真集成系统模型与实车相关性指在环仿真集成系统模型与实车的相关程度。相关程度即集成系统与实车的相似程度，通过模型和系统的测量量和关键性能指标(KPI)来实现量化评估。

### 4.2 在环仿真集成系统模型与实车相关性评估的必要性

在智能网联汽车的开发过程中，通过仿真搭建要素覆盖全面的测试场景，涵盖危险场景、边缘场景等，解决路试长尾场景难以复现的难题，缩短了开发周期，降低了试验成本。然而，仿真测试在提高测试效率的同时，也面临着重要考验：如何证明仿真测试的结果在整车层面多大程度地还原了真实车辆的性能表现？

显然，这个问题是一切仿真测试工作的前提。GB/T 智能网联汽车自动驾驶功能仿真试验方法及要求（工作组征求意见稿）<sup>[12]</sup>的附录 A 阐述了仿真试验可信度评估的框架与流程，提出了相关性阈值设计和相关系统确认的要求，如图 4-1 所示。

在环仿真集成系统模型与实车相关性评估就是为了在实操层面提出一套标准化的，指导如何进行相关性阈值设计和相关系统确认的方法。为了更好地指导行业开展在环仿真集成系统模型与实车相关性评估的工作，支持仿真测试高效促进开发迭代，达到智能网联汽车准入和上路通行试点的要求，有必要制定在环仿真集成系统模型与实车相关性评估细化方案和相关标准流程。

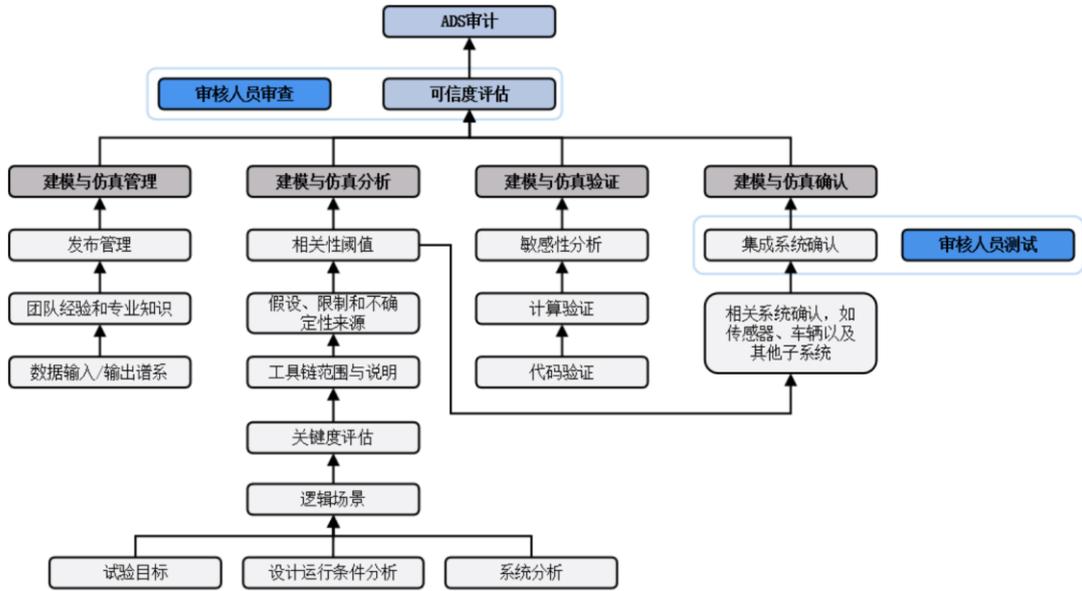


图 4-1 附录 A 可信度评估框架与流程

### 4.3 在环仿真集成系统模型与实车相关性研究现状

本报告调研了主机厂、检测机构、高校等多家单位关于在环仿真集成系统模型与实车相关性评估的具体案例：

案例 1：奥迪股份公司自动驾驶部发表的论文《A Credibility Assessment Approach for Scenario-Based Virtual Testing of Automated Driving Functions》<sup>[13]</sup>首先对自动驾驶车辆进行真实场地测试，记录车辆总线及行驶数据。接下来根据记录的数据进行虚拟场景搭建，地图使用基于摄像机和/或激光扫描仪结合精确定位系统对交通网络进行的测量的原始 ODR 参数。对其变化进行敏感性分析，并调查对这些样本内虚拟驱动器的影响。通过使用最佳子模式分配(OSPA)指标等方法进行进一步评估，可以实现影响和参数相关性的量化。基于原型车配置传感器参数与位置，基于对象建立模拟感知的粒度，最后基于速度、加速度等关键信号的相关性反映真实测试和虚拟仿真测试之间的绝对偏差。

案例 2：招商局检测车辆技术研究院有限公司发表的论文《Vehicle-in-loop simulation test research for autonomous vehicle》<sup>[14]</sup>和《Research on the Application of Advanced Vehicle in Loop Simulation Test Approach for Evaluating ACC》<sup>[15]</sup>基于 ACC 与 AEB 两种工况下的 VIL 测试与实车测试结果进行对比分析，重点关注不同测试用例下仿真测试与实车测试的相对速度、相对距离、TTC、加速度等指标

之间的变化趋势与相对误差大小从而对可信度进行量化分析。置信度的 KPI 指标由拟合优度来体现。拟合优度是指回归曲线对观测值的拟合程度，度量拟合优度的统计量是可决系数（亦称确定系数） $R^2$ ， $R^2$  最大值为 1， $R^2$  越接近 1 说明曲线与观测值拟合程度越好，反之越小说明拟合程度越差。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{实值} - \text{仿真值})^2}{\sum_{i=1}^n (\text{实值} - \text{实平均})^2}$$

即  $R^2$ ，试验结果表明，速度、TTC、距离的拟合度达到 90-98%，而加速度较为敏感，拟合度 40%-70%。

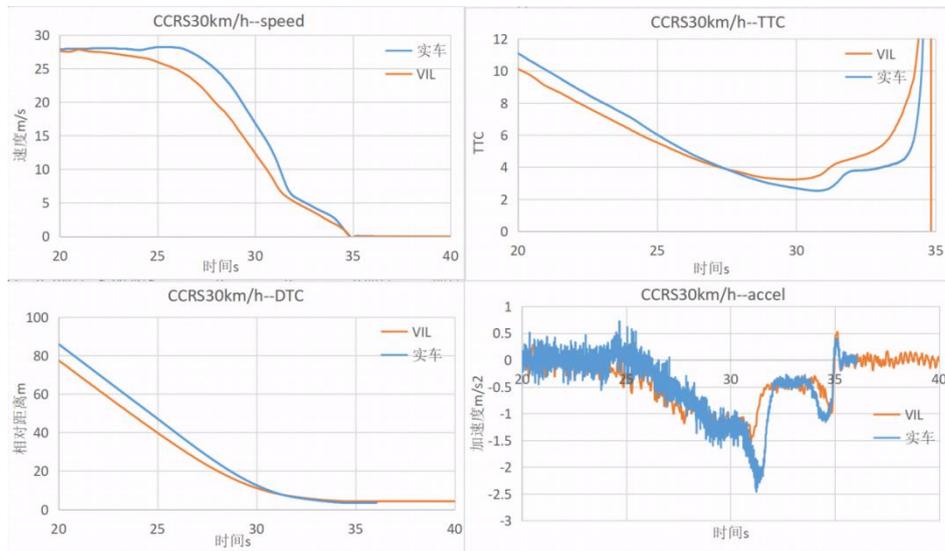


图 4.2 两种工况下的 VIL 测试与实车测试结果对比

案例 3: ISO 34502 自动驾驶系统测试场景 基于场景的安全评估框架<sup>[16]</sup>，提出了虚拟测试平台（VTP）的偏差根据预定的测试标准（KPI）进行量化。KPI 通过及失败要求必须具有充分的依据，并具有明确的说明以用于对评估测试结果做出评价。KPI 可以是宏观的(例如，在确定的场景中避免事故的能力；在多个仿真场景中计算得到的每公里事故数)或微观的(例如，在一个场景中计算的最小碰撞时间(TTC))。为了增强结果的可信度，仿真过程的最终和中间信号都可以通过 KPI 进行评估。由于 KPI 通常是几个 VTP 或真实世界测试平台（RWTP）输出信号的函数(例如，相对目标的位置和速度)，可以在各自的信号上附加额外度量指标。比如，TTC 的相关指标是自车和周围车辆之间距离的均方根误差(RMSE)。

案例 4: 重庆长安汽车从决策控制时机一致性和车辆控制表现趋势一致性两个维度评估在环仿真集成系统模型与实车相关性。试验过程如下：

---

第一步，选择试验场景。选取的纵向驾驶试验场景有自适应巡航控制场景、交通拥堵情况下自动驾驶的切入、切出及跟停场景等；选取的横向驾驶试验场景包括智能辅助变道、智慧偏移等。

第二步，关键性能指标（KPI）定义。表征决策控制时机的 KPI 有减速时机、变道时刻车距，表征车辆控制表现趋势的 KPI 有本车车速、相对速度、两车车距。

第三步，实车试验和数据采集。为保证实车测试环境的正确和稳定，选择在场地平稳，车道线清晰，无逆光的汽车试验场进行以上纵向和横向控制的典型场景试验。通过在本车和目标车上加装高精度组合惯导系统测量车辆位置数据。通过 CANoe 记录整车 CAN 数据，通过智能驾驶软件系统记录算法模型的输出信号。

第四步，仿真场景重构。将实车采集的数据通过转换模块自动化生成 OpenDRIVE 格式文件，用于在仿真环境下描述实车相同道路信息，如道路类型、宽度、车道线类型等，从而控制仿真环境与实车环境车辆行驶环境的一致性。将采集到的目标车轨迹点数据导入 VTD 仿真软件并生成 OpenSCENARIO 标准文件，包含交通参与者的属性，如车辆类型（汽车、自行车、行人等）、速度、行驶路径等。配置仿真的时间长度、步长等参数，还原数据中交通参与者的行为，如跟车行为、换道行为、行人路径选择等。设置仿真本车初始速度即为初始测试速度，并在仿真一开始默认功能激活。

第五步，KPI 拟合度评估。用皮尔逊相关性系数来评估线性相关程度，用相对误差计算车辆决策控制时机的一致性。

案例 5：比亚迪仿真可信度研究方案如下：智能驾驶仿真工具链的置信度，对仿真测试的结果有重要的影响，高置信度的仿真工具链的测试结果从功能、性能角度评判均可信赖，低置信度或者未经过置信度校验的仿真工具链只可以验证功能层级的仿真校验。

仿真工具链的置信度可以从如下几个维度考量：工具链本身的硬件架构、工具链上位机、工具链整个仿真系统的延时性、各部分仿真模型的可信度（感知模型、动力学模型、驾驶员模型）及功能闭环的完整工具链置信度。

（一）工具链的硬件架构包含：实时机、IO 及故障注入板卡、总线板卡、雷

---

达模拟器、视频注入接口单元等硬件设备,其可信度由硬件(包含自研硬件产品))  
供应商本身提供相关资料证明,证明其功能及性能指标满足可信度要求;

(二)工具链的上位机包含:场景仿真软件上位机、动力学软件上位机、自动化软件的上位机、试验管理上位机等,其可信度由上位机软件(包含自研上位机)供应商本身提供相关资料证明,证明其功能及性能指标满足可信度要求,可参考工具链上位机软件提供的认证证书(如功能安全认证等);

(三)工具链仿真系统的延时性:可以从硬件及软件两个维度综合考量,如视频注入系统的延时性,动力域执行系统的延时性等,通过仿真系统实测结果与车型项目真实数据对比,评判系统的延时性并进行优化;

(四)仿真模型的置信度,包含感知模型、动力学模型、及驾驶员模型,评估模型的可信度需要先确保仿真的物理模型本身的有效性及可信性,此部分可依据模型标准验证方法-静态代码测试验证手段进行验证(例如 Modeling standards for ISO26262)。

(五)功能闭环的完整工具链置信度验证:从感知、规控至动力学整个链路的置信度进行校验,选择被测对象(感知&规控算法),将其搭载至实车环境,根据功能 ODC 原则验证的功能场景项,记录实车采集的数据(原始数据),回灌至仿真环境,进行整个规控路径的曲线对比,来验证仿真工具链的置信度。

从以上调研分析可以看到,有一小部分单位已经按照附录 A 仿真试验可信度评估框架执行了可信度评估,但行业目前并未普及应用。

目前行业在在环仿真集成系统模型与实车相关性评估方面存在以下问题:行业各主体如主机厂、检测机构、科研机构、仿真软硬件厂家等对相关性评估的理解不尽一致,常常有针对单一传感器的研究没有形成整车级别的相关性研究,评估场景和评估指标往往缺乏理论支撑。

#### 4.4 在环仿真集成系统模型与实车相关性标准化需求

基于前文的论述,只有在环仿真工具链全链条上包括仿真软件及其模型厂家、仿真设备及其模型厂家、零部件厂家、系统供应商、主机厂、检测机构在内的所有相关单位通力合作,并在国家标准流程指导下才可能完成整车级别的相关性评估。

---

因此当前迫切需要启动在环仿真集成系统模型与实车相关性要求及试验方法标准化工作。标准化工作的主要内容包括：

- 1) 在环仿真集成系统模型与实车相关性试验场景、关键性指标及其阈值。
- 2) 在环仿真集成系统模型与实车相关性试验方法及流程；

#### 4.4.1 在环仿真集成系统模型与实车相关性评估要点

应参照《GB/T 智能网联汽车自动驾驶功能仿真试验方法及要求（工作组征求意见稿）》附录 A 仿真试验可信度评估流程，仿真试验分析和仿真试验确认的要求制定在环仿真集成系统模型与实车相关性评估要点，归纳总结为以下几项：

- 1) 要求明确试验目的、自动驾驶系统的功能概念及设计运行条件分析
- 2) 要求明确仿真测试的逻辑场景、参数空间及参数范围
- 3) 要求记录仿真关键性评估过程和评估结果
- 4) 要求完整说明工具链组成、建模范围、预期用途及工具链关键参数
- 5) 要求定义测量量、KPI、相关性阈值及制定说明
- 6) 要求提供模型验证与确认测试方案
- 7) 要求提供测试报告和过程记录，对相关性阈值符合性进行说明
- 8) 要求提交可信评估报告

#### 4.4.2 在环仿真集成系统模型与实车相关性试验方法及流程需求

在环仿真集成系统模型与实车相关性评估应参照以下试验方法：通过在封闭场地或者实际道路上的实车测试及关键性能指标（KPI）数据采集，还原到仿真工具链重构具备输入一致性要求的仿真场景并执行仿真测试的方式，对比实车测试 KPI 和仿真测试 KPI 的相关性阈值达到设计要求。

在环仿真集成系统模型与实车相关性试验流程包含以下几个步骤：

- 1) 确定试验场景和仿真平台
- 2) 关键性能指标（KPI）定义和相关性阈值设计
- 3) 道路测试及数据采集
- 4) 试验场景的仿真复现
- 5) 测试输入一致性确认
- 6) 仿真测试及数据采集

---

## 7) 相关性评估

### 4.4.3 在环仿真集成系统模型与实车相关性试验场景设计原则

2023年11月17日，工业和信息化部、公安部、住房和城乡建设部、交通运输部四部委联合发布的《关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知》，基于附件1《智能网联汽车准入和上路通行试点实施指南（试行）》，在第二章智能网联汽车产品的测试验证要求中，针对自动驾驶系统仿真测试也明确要求：模拟仿真测试场景至少包括充分、合理的标称场景、危险场景和边缘场景，以有效地验证自动驾驶系统安全。

按照《自动驾驶功能仿真测试标准化需求研究报告》<sup>[17]</sup>，仿真测试场景应遵循全面性、真实性和可重复性的基本原则，定义如下：

#### （1）全面性：

场景应能充分覆盖被测标的物的 ODD 和边界场景，从而保证自动驾驶在 ODD 范围内可通过整车仿真验证基本功能、功能安全、预期功能安全等；

相关性测试场景应包含自动驾驶仿真整车的感知-决策-执行系统，确保自动驾驶系统在感知、决策、执行等各个层面满足仿真验证可信度。

相关性测试场景需要满足不同测试对象阶段、不同测试形式的整车仿真需求，例如整车 HIL 仿真、整车 VIL 仿真，与实车工况的测试结果对比。

#### （2）真实性：

相关性测试的场景原始数据来源应该真实，场景参数应基于实际，逻辑参数设置合理。

#### （3）可重复性：

相关性测试中的同一测试场景在同一测试平台多次测试结果应保持高度一致，在不同测试的平台的结果的偏差应符合设计要求。

具体的，“在环仿真集成系统模型与实车相关性试验”场景类别应至少覆盖关键性评估后的所有逻辑场景，场景选取原则是逻辑场景的参数典型值和逻辑场景参数边界值。特别地，根据实车试验能力最大限度选择试验参数边界值，若实车试验的最大限度值小于逻辑场景边界值，则在环仿真集成系统模型只能评估与实车相应的值。

另外，应参考《智能网联汽车 组合驾驶辅助系统技术要求及试验方法 第 1

---

部分：单车道行驶控制》<sup>[18]</sup>、《智能网联汽车 组合驾驶辅助系统技术要求及试验方法 第 2 部分：多车道行驶控制》<sup>[19]</sup>、《智能网联汽车 自动泊车系统性能要求与试验方法》<sup>[20]</sup>、《智能网联汽车 自动驾驶功能仿真试验方法及要求》、《 GB/T 12543-2009 汽车加速性能试验方法》<sup>[21]</sup>、《 GB 12676-1999 商用车辆和挂车制动系统技术要求和试验方法》<sup>[22]</sup>、《GB/T 6323-2014 汽车操纵稳定性试验方法》<sup>[23]</sup>等标准内容，基于智能网联汽车在高速道路场景、城区道路场景、泊车场景下纵向行驶控制、横向行驶控制、泊车行驶控制的功能、性能要求，结合整车加速性能、制动性能、操纵稳定性能的要求，综合研判确定整车集成系统模型与实车相关性试验场景及场景对应的关键性能指标。

#### 4.5 在环仿真集成系统模型标准化需求

综合以上调查研究，可以看出在环仿真集成系统模型与实车相关性验证是准入法规明确要求的内容，但行业目前对在环仿真集成系统模型与实车相关性验证的试验方法、试验场景、评估指标等存在较大差异，未形成统一的标准化验证流程。不利于准入法规对仿真结果可信的审查评估。基于此，提出标准化需求建议：

标准化在环仿真集成系统模型与实车相关性试验的场景、试验方法和流程、关键性能指标（KPI）和阈值。

---

## 第五章 在环仿真测试标准体系研究总结

综合本报告研究内容和各章中的标准化建议，提出标准体系由以下标准构成：

1. 《智能网联汽车自动驾驶系统仿真工具链技术要求及试验方法 第1部分：系统集成层面》。该标准把在环仿真集成系统模型作为一个黑盒，考量这个黑盒模型与实车在特定场景下的整车级别功能性指标相关性。标准化内容包含在环仿真集成系统模型与实车相关性试验的场景、试验方法和流程、关键性能指标（KPI）和阈值。

2. 《智能网联汽车自动驾驶系统仿真工具链技术要求及试验方法 第2部分：软硬件层面》。该标准内容包含在环仿真软件功能要求、性能要求、软件试验方法，硬件功能要求、性能要求、硬件试验方法，接口协议。

3. 《智能网联汽车自动驾驶系统仿真工具链技术要求及试验方法 第3部分：子系统模型层面》。其中，感知传感器模型部分包含各类感知传感器模型原理和分类、数据格式和接口、模型相关性试验方法及阈值；车辆动力学模型部分包含车辆动力学模型原理和分类、数据格式和接口、模型相关性试验方法及阈值等；交通流模型部分包含交通流模型原理和分类、数据格式和接口、模型相关性试验方法及阈值等。

结合当前智能网联汽车在环仿真测试行业发展情况，形成在环仿真测试标准项目启动优先级建议，具体如下：

1. 建议优先启动以下标准：

《智能网联汽车自动驾驶系统仿真工具链技术要求及试验方法 第1部分：系统集成层面》、《智能网联汽车自动驾驶系统仿真工具链技术要求及试验方法 第2部分：软硬件层面》。

2. 建议择期启动以下标准：

《智能网联汽车自动驾驶系统仿真工具链技术要求及试验方法 第3部分：子系统模型层面》。

---

## 参考文献

- [1] 刘瑞叶.计算机仿真技术基础（第 2 版）[M].电子工业出版社:, 201105.1~6.
- [2] 联合国 WP29 VMAD 工作组, 文件编号 VMAD-SG2-02-01 presentation
- [3] 联合国 WP29 VMAD 工作组, 文件编号 VMAD-32-12 ig s1-3
- [4] Stefan F, Chevalier A M R, Marbaix M, et al. Method for modeling a motor vehicle sensor in a virtual test environment. Google Patents, 2019.
- [5] 自动驾驶虚拟仿真测试评价理论与方法. 孙剑, 田野, 余荣杰著.-北京:科学出版社, 2022.7
- [6] 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
- [7] 郎鹏飞.基于 dSPACE 的硬件在回路仿真系统研究[D].华南理工大学,2014.
- [8] 张培兴,邱彬,朱冰等.自动驾驶系统并行加速测试方法研究[J].汽车工程,2022,44(02):208-214.
- [9] Ruben, F., "A CNN-Based Approach for Driver Drowsiness Detection by Real-Time Eye State Identification," Applied Sciences, 2023.
- [10] 侯德藻, "基于 SUMO 软件的异构交通流仿真平台车辆模型开发与集成,"汽车工程学报, 2022.
- [11] Yi, Shih., "Reconstruction and Synthesis of Lidar Point Clouds of Spray," IEEE Robotics and Automation Letters, 2022.
- [12] GB/T 智能网联汽车自动驾驶功能仿真试验方法及要求（公开征集意见稿）, 2023.6
- [13] Stadler C, Montanari F, Baron W, et al. A credibility assessment approach for scenario-based virtual testing of automated driving functions[J]. IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems, 2022, 3: 45-60.Vehicle-in-loop simulation test research for autonomous vehicle
- [14] Hu X, Zeng J, Li S, et al. Vehicle-in-loop simulation test research for autonomous vehicle[C]//Eighth International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2023). SPIE, 2023, 12790: 189-197.

- 
- [15] Zeng J, Hu X, Wang K, et al. Research on the application of advanced vehicle in loop simulation test approach for evaluating ACC[C]//Eighth International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2023). SPIE, 2023, 12790: 366-375.
- Road vehicles — Scenario-based safety evaluation framework for Automated Driving Systems, ISO/DIS 34502, 2021
- [16] Road vehicles — Scenario-based safety evaluation framework for Automated Driving Systems, ISO/DIS 34502, 2021
- [17] 自动驾驶功能仿真测试标准化需求研究项目组, 自动驾驶功能仿真测试标准化需求研究报告, 全国汽车标准化技术委员会智能网联汽车分技术委员会, 2020.11
- [18] 智能网联汽车 组合驾驶辅助系统技术要求及试验方法 第1部分: 单车道行驶控制 (报批稿), 2023.3
- [19] 智能网联汽车 组合驾驶辅助系统技术要求及试验方法 第2部分: 多车道行驶控制 (报批稿), 2023.3
- [20] 智能网联汽车 自动泊车系统性能要求与试验方法 (草案), 2023.3
- [21] GB/T 12543-2009 汽车加速性能试验方法, 2009.3
- [22] GB 12676-1999 商用车辆和挂车制动系统技术要求和试验方法, 2014.10
- [23] GB/T 6323-2014 汽车操纵稳定性试验方法, 2014.2

## 附录

### 附录 A：传感器模型试验方法

#### A.1 基于 Sim Pro 的传感器验证方案

##### A.1.1 试验整体思路

SimPro 是北京赛目科技股份有限公司自主研发的用于 ICV 仿真测试、验证和评价的产品。

传感器模型配置主要是针对摄像头、毫米波雷达、激光雷达、超声波雷达的物理特性，根据不同应用场景下（高速公路/城市快速路场景、城区道路场景、泊车场景）的仿真测试需求进行建模。

针对传感器模型的相关性验证，可基于“测试环境构建+对比参数”的验证框架，主要通过设置传感器参数、选取对比参数、构建典型场景，进行传感器模型与真实传感器输出结果的比对，具体流程如下图所示。



图 A-1 传感器模型相关性评估框架

基于传感器的不同建模层级分类以及传感器仿真建模评价研究，可进一步梳理出以下三个层面的传感器模型相关性验证思路。

(1) 目标列表层面：通过对传感器模型输出的目标检测结果与传感器实测结果

---

进行统计对比，验证传感器模型的可信度。

- 摄像头：目标对象的特征及形状、颜色、位置，车道线的颜色、种类等；
- 毫米波雷达：目标对象的相对距离、相对速度、方向和高度等。
- 激光雷达：目标对象的相对距离、相对速度、加速度、大小和方向等。

(2) 传感器原始数据层面：与目标列表相比，传感器原始数据取决于建模的传感器类型。

- 图像用作摄像头原始数据。
- 点云信息用作毫米波雷达和激光雷达原始数据。

(3) 传感器仿真过程各阶段输出结果：

针对传感器工作链路进行物理级建模，是搭建高保真传感器模型的关键方法。传感器仿真主要考虑了外部组件和内部组件两部分，外部组件主要指信号传输过程中环境因素的影响；而内部组件是指传感器自身的物理结构与特性。因此我们需要考虑传感器的工作模式、完整的信号处理工具链和真实传感器的特定缺陷，基于传感器信号生成、传输、接收、处理的全过程，对每个阶段的输出结果进行对比，从而实现传感器模型的精确评价。

### A.1.2 输出相关性指标确定及要求

为使得仿真测试结果对控制算法更新迭代更具参考和指导意义，每类传感器仿真模型精度验证可参考以下方式：

#### A.1.2.1 摄像头模型

镜头效果验证：利用真实镜头效果和仿真镜头效果的图片进行对比，统计每个像素点的畸变率。

检测对比验证：利用检测算法对输出的图片进行识别，与真实图片识别的结果进行对比。注意点如下：

- 所用的识别算法必须相同，场景需要一致。
- 利用多个场景，进行多帧的识别验证，分别计算对比检测的准确率 ACC，精确率 PPV，灵敏度 TPR，特异度 TNR。以上算法指标并非越高越好，而是与真实环境检测的值越匹配越好。
- 识别框的 IOU 计算。通过计算真实检测与仿真输出检测的包围盒交叉区域面积与总面积比值来评价包围盒的匹配度。

### A.1.2.2 激光雷达模型

检测对比验证：利用检测算法对输出的点云进行识别，与真实点云数据识别的结果进行对比。注意点如下：

- 所用的识别算法必须相同，场景需要一致。
- 利用多个场景进行识别验证，分别计算对比检测的准确率 ACC，精确率 PPV，灵敏度 TPR，特异度 TNR。以上算法指标并非越高越好，而是与真实环境检测的值越匹配越好。
- 识别框的 IOU 计算。识别目标的包围盒体现目标的大小，朝向等信息，通过计算真实检测与仿真输出检测的包围盒交叉区域体积与总覆盖体积比值来评价包围盒的匹配度。

### A.1.2.3 毫米波雷达模型

针对毫米波雷达模型的相关性指标验证需注意以下几点：

1) 通过将毫米波雷达模型与真实毫米波雷达输出结果进行对比验证，如：测距精度，测速精度，以及多目标分区的各类分辨率。表 A-1 为某真实毫米波雷达参数示例。

表 A-1 毫米波雷达性能指标

技术指标		参数
测距精度		$\pm 0.23\text{m}/\pm 0.07\text{m}$
测速精度		$\pm 0.03\text{m/s} / \pm 0.08\text{m/s}$
方位测角精度		$\pm 0.3^\circ/\pm 1^\circ$
俯仰测角精度		$\pm 0.6^\circ$
多目标区分	距离分辨率	0.9m/0.28m
	速度分辨率	0.1m/s / 0.3m/s
	角度分辨率	3°/5°

2) 检测精度信息时，由于误差的随机性，需要测量多次数据计算与真值的方差等信息。

3) 多目标区分需要在场景中设置不同位置的车辆，观测其可区分时的距离、角度、速度差是否满足该雷达的分辨率。

4) 输出数据中的强度验证，需要对设置固定位置的不同物体进行测量，对

---

比数据强度信息与真实雷达的测量结果。

5) 例如带宽、工作频段等为毫米波自身的设计属性，不与输出结果直接相关，并且难以在仿真中实现的参数不进行验证。

## A.2 基于 Omniverse 的物理级相机模型的验证方案

Omniverse 是 NVIDIA 公司研发的图形和仿真模拟产品。

摄像头模型的物理仿真涉及图像渲染、数据生成、图像还原等多个环节，摄像头模型试验方法的主要思路为使用标准物质和标准设备对某版本的传感器及其模型进行测试。试验方法为内外场对比方法，即车载传感器实验室试验和车载传感器仿真实验室场景试验对比。试验需保证内外场对比测试的算法版本一致性，需保证内外场对比测试的场景真值一致性，需保证内外场对比测试流程的一致性，需保证对比过程中测量量的初始状态对齐。实验室内的标准物质和标准设备可采用标准棋盘格、标准色卡、标准图纸、标准灯光等。

摄像头模型的主要作用是将 3D 场景信息转换为 2D 图像信息，测量量为摄像头/模型输出的图像。KPI 涉及分辨率、动态范围、噪声、色差、MTF、径向畸变、切向畸变、FOV 等。抛开物理含义，矩阵数值对比层面，KPI 涉及欧拉距离、皮尔森相关系数等。

以 NVIDIA 的摄像头模型图像质量的验证为例介绍试验过程。

第一步是对摄像头内参真实度的校准：

1) 执行内参摄像头校准：在车辆或测试架上安装摄像头，捕捉移动中的棋盘图案视频，覆盖每个摄像头的视野范围。

2) 生成模拟棋盘校准图像：使用真实摄像头镜头校准数据在 DRIVE Sim 中重建每个摄像头，并从校准工具估计的图表位置和方向重建真实棋盘图像。

3) 从合成图像生成内参校准：将合成图像输入到 DriveWorks 校准工具中，产生新的多项式系数。

4) 计算真实与模拟镜头之间的最大  $\theta$  畸变：比较根据真实图像和模拟图像校准定义的几何形状，找出光通过镜头时角度变化最大的点。

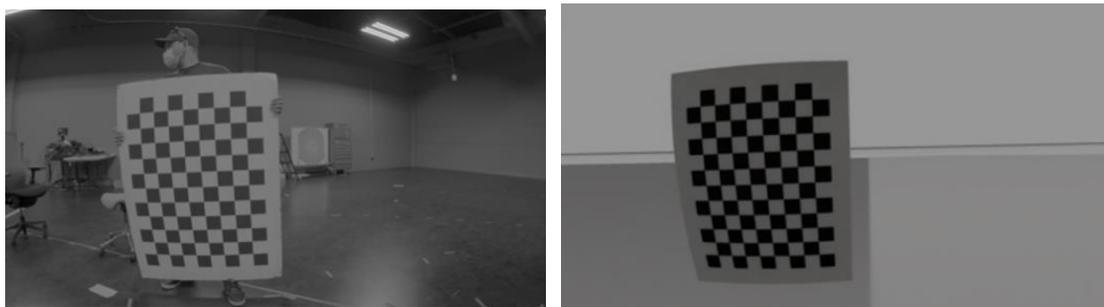


图 A-2 摄像头标定棋盘格

第二步采用与内参验证类似的工具，在实验室受控环境中，进行外参的验证，包含三个步骤：

1) 执行外参摄像头校准：在实验室内安装摄像头或测试架，并捕捉多个校准图案（AprilTag 图表）的图像。NVIDIA 使用 DriveWorks 校准工具来计算摄像头和校准图表在 3D 空间中的确切位置和方向。

2) 在仿真中重新创建场景：使用从真实校准和 AprilTag 图表位置的地面真相派生的外参参数，系统在仿真中生成每个模拟摄像头的合成图像。

3) 从合成图像产生外参校准：将合成图像输入到 DriveWorks 校准工具中，以输出场景中所有摄像头和图表的位置和方向，并计算了从真实和模拟图像派生的外参参数之间的 3D 差异。

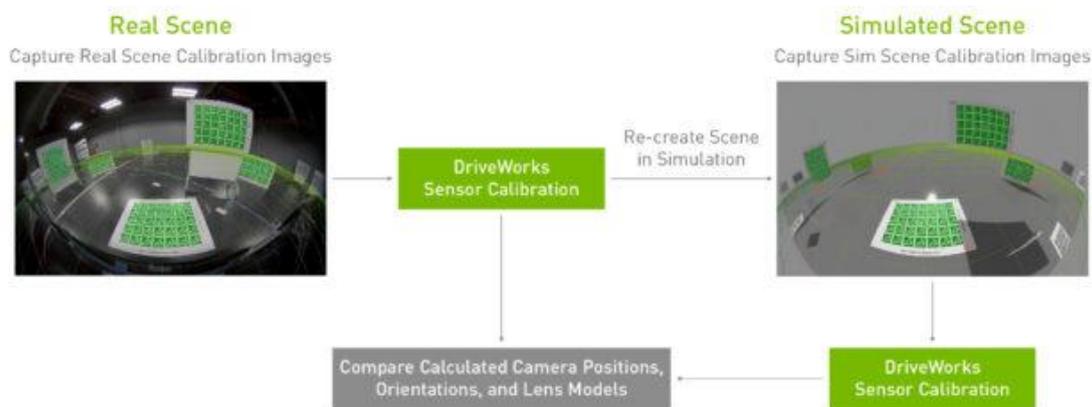


图 A-3 摄像头验证场景

下一步是验证与每个像素关联的值是否准确。Nvidia 模拟了 Macbeth ColorChecker 图表并在 DRIVE Sim 中捕获了它的图像以验证图像质量。然后将每个色块的 RGB 值与相应真实图像的 RGB 值进行比较。

除了真实图像之外，NVIDIA 还推出了 Iray 渲染器，它是 NVIDIA 最真实的物理光模拟器，已通过 CIE 171:2006 验证。首先使用 Iray 渲染系统生成的模

---

拟图像执行此测试，然后使用 NVIDIA RTX 渲染器执行此测试。与 Iray 的比较可以根据公认的行业黄金标准很好地衡量 RTX 渲染器的能力。

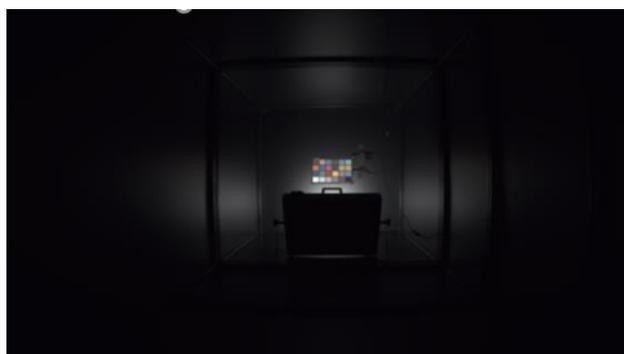
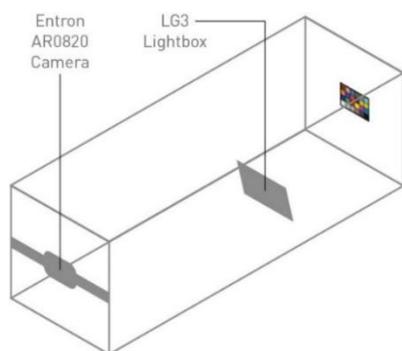
最后，根据以下过程验证了模拟相机的图像质量：

1) 在测试室捕获 Macbeth ColorChecker 色卡图像：将 Macbeth ColorChecker 色卡放置在一个测量高度并用特征外部光源照亮。相机被放置在已知高度和距离 Macbeth 色卡的位置。

2) 在模拟中重建图像：使用测试设置的尺寸、校准后的 Macbeth 色卡值和外部照明配置文件，首先使用 DRIVE Sim RTX 渲染器渲染测试场景。继而预定义的相机模型重建实验室中捕获的图像。

3) 提取每个色块的平均亮度和 RGB 值：对实际图像、Iray、DRIVE Sim RTX 渲染器的所有三张图像中每个色块的所有像素的颜色值进行平均。

4) 比较白平衡后的亮度和 RGB 值：测量值针对每个色块对第 19 色块进行归一化以进行白平衡。最后对比实际图像、Iray 渲染和 RTX 渲染的平衡色彩和亮度值。



## Compare RGB and Brightness Values

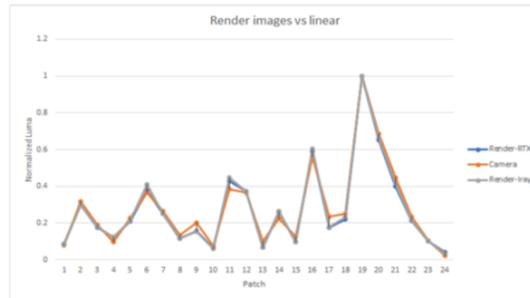


图 A-4 摄像头色卡验证

### A.3 基于 VTD 的激光雷达模型验证方案

VTD (Virtual Test Drive) 是由德国 VIRES 公司开发的用于高级驾驶员辅助系统和自动驾驶系统仿真测试的产品。

根据雷达仿真范围的定义，雷达的原始数据可以是模拟电平、数字电平、点云信息。雷达常用的模型是点云模型。雷达点云模型试验方法的主要思路同摄像头。实验室内的标准物质和标准设备可采用标准角反、标准目标物等。

雷达点云模型的主要作用是将 3D 场景信息转换为点云信息，测量量为雷达/模型输出的点云。KPI 涉及分辨率、噪声、畸变、FOV 等。矩阵数值对比同摄像头。

以下以单激光雷达验证方案为例进行介绍：

#### 1) 场景设置

- 场景元素设置：直道且无坡度，天气晴天，主车采用吉利星越 L (黑色)，目标车采用吉利星越 L (白色)，采集点云数据且数据记录时长不小于 5s，设置 5 个不同仿真场景；
- 场景设置：
  - 场景 1：主车处于静止状态，将激光雷达安装在主车正前方位置，将目标车辆分别放置在距离主车激光雷达安装位置正前方 10，30，50，80，120，150 处，采集不少于 5s 的真实雷达数据；
  - 场景 2：主车处于静止状态，将激光雷达安装在主车正前方位置，将目标静态行人分别放置在距离主车激光雷达安装位置正前方 10，30，50，80，120，150 处，采集不少于 5s 的真实雷达数据；
  - 场景 3：主车处于静止状态，将激光雷达安装在主车正前方位置，将已

---

知材料反射强度的平板分别放置在距离主车激光雷达安装位置正前方 10, 30, 50, 80, 120, 150 处, 采集不少于 5s 的真实雷达数据;

- 场景 4: 主车处于静止状态, 将激光雷达安装在主车正前方位置, 目标车辆的初始位置距离主车激光雷达安装位置正前方 10m, 测试开始后, 目标车由静止开始以  $2\text{m/s}^2$  加速驶离主车 (最大速度为  $30\text{km/h}$ ), 采集不少于 5s 的真实雷达数据;

## 2) 模型验证方案

- 采用主观评价的方式观察上位机实际点云与 VTD 中仿真模型点云分布形状, 计算单帧点云数量与实际雷达点云数量, 误差不超过 10%;
- 模拟点云数据的值需与实际点云误差的值不超过  $\pm 5\text{cm}$ ;
- 已知材质目标的反射率与实际反射率的误差不超过 5%;
- 永识别算法开环验证, 目标信息需与 VTD 中真值的误差不超过  $\pm 5\text{cm}$ 。

## A.4 感知模型置信度验证方案

感知模型置信度验证可以从 2 个方面进行验证:

1. 视频注入后的 IPM 投影图像感知拼接效果, 可在域控内部通过域控本身的感知算法进行 IPM 投影验证 (此方案需要首先保证感知算法的正确性), 可验证前视、侧视、后视及环视摄像头融合方案;

2. 传感器性能本身的感知模型验证: 参考 PEGASUS 高度自动驾驶功能评估方法中关于场景可能性描述的层级模型。感知系统应该正确识别自车位置、监测周围环境中的目标和事件。可从如下维度进行验证, a) 道路, 含车道特征、道路边缘等; b) 目标物, 含机动车、非机动车、行人等。其中感知系统应正确识别道路和道路设施信息, 保证系统在合理道路环境下被激活, 对于车辆传感器模型的要求即为内外场对比下正确识别以上信息类型。对于测试场景中的目标物检测, 占据了感知系统中绝大多数的识别内容。目标物中也包含了车辆在实际运行工况下能够遇到的绝大多数物体。自动驾驶辅助系统根据感知获取的目标物信息合理规划和控制车辆行驶路径与行驶速度, 保障具体功能执行, 实现车辆安全运行。因此感知系统应能监测目标物的位置以及动态目标的移动速度, 目标物识别 (包含静态或动态交通参与者)、车道线的识别 (包括类型及颜色)、距离识别 (包含目标物与自车的相对距离、车道线相对自车的距离、车道线中线位置等)、

速度识别（目标物的相对速度），构建相同的内外场场景，对比实车真实环境与仿真场景对于 3D 目标物或车道线检测的精确度与准确度，针对 3D 目标物体的位置，速度，类型关键参数进行置信度对比。

感知模型置信度验证方案及指标：

感知模型置信度验证方案	评价指标
纵向测距验证	平均绝对百分比误差 (MAPE) 均方根误差 (RMSE)
横向测距验证	
纵向测速验证	
道路线型及目标物检测验证	识别准确度

纵向测距验证方案举例说明：为了评估车辆视觉模型纵向测距在外场测试结果和内场仿真结果偏差的程度，计算内外场不同测试 case 下 ROS 数据的偏差并最终计算得到纵向测距工况下所有测试 case 的均方根误差（RMSE）：

前车所在车道	纵向距离 RT 值 (m)	外场纵向距离 ROS 均值 (m)	内场纵向距离 ROS 均值 (m)	Squared Error (SE)

#### A.5 基于 Spirent Sim3D 的 GNSS 多径/NLOS 模型验证方案

Spirent Sim3D 是一款多径仿真解决方案，专为汽车应用设计，能够模拟真实地理环境中的多径和遮挡效应，用于测试全球导航卫星系统（GNSS）在汽车中的性能。

GNSS 多径/NLOS 模型对比验证试验方法包括几下步骤：

- 选择典型城市峡谷场景，例如：上海浦东陆家嘴；
- 准备试验车进行路试，试验车需具备车载定位模块（GNSS 接收机，即待测件）和一套 GNSS 真值采集系统；
- 试验车在预先设计的路径上行驶，待测件和真值系统同时工作，真值系统用于采集车辆运行轨迹，待测件进行载噪比、伪距率、多普勒等参数的解析并记录数据；
- 将地图供应商或测绘机构提供的虚拟城市 3D 地图（对应于试验场行驶的地区）导入多径/NLOS 仿真软件，在实验室中对同款车载 GNSS 接收机（待测件）进行仿真测试（如下图），待测件进行信噪比、伪距率、多普勒等解析并

记录数据；

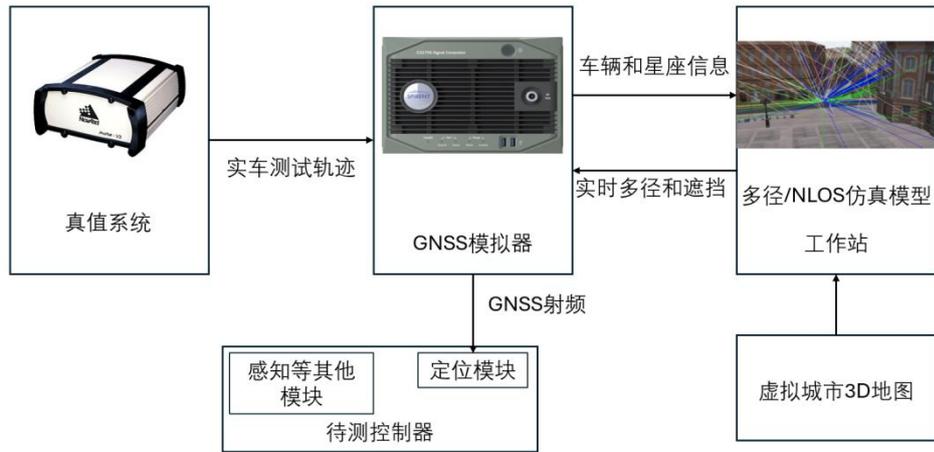


图 A-5 GNSS 模型验证方案

- 比对外场测试和仿真测试的拟合情况（如下图）；

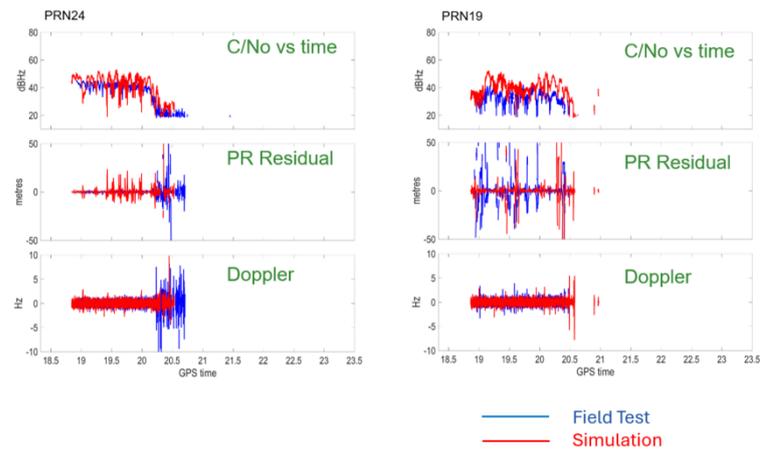


图 A-6 GNSS 模型验证结果

## 附录 B：动力学模型试验方法及性能要求

### B.1 基于 Sim Pro 的车辆动力学模型试验方案

#### B.1.1 试验方法

针对车辆动力学模型的相关性验证，可基于“**工况+对比参数**”的验证框架，主要通过配置车辆动力学参数、构建典型试验工况、选取对比参数，进行仿真与实车测试结果的对比，具体流程如下图所示。



图 B-1 车辆动力学模型相关性评估框架

#### (1) 车辆动力学参数配置

根据实车车型参数，配置车辆动力学模型的车身模块、动力传动模块、制动模块、转向模块、悬架模块和车轮模块参数。

#### (2) 实车试验工况设置

针对实车试验工况设置主要包括加速工况、制动工况和转向工况。

#### (3) 仿真结果对比

动力学试验方法主要思路为针对车辆的稳态特性、动力性、制动性、操稳性、紧急工况进行对比测试。可参考的标准有 GB/T 6323、GB/T 40509、GB/T 40521、GB/T 34597 等。针对不同试验工况，选取相应的对比参数。三种不同场景的试验内容基本一致，泊车可适当增加专用场景，主要区别在于场景参数和性能要求。

以转向工况测试为例，以实车采集的方向盘转角作为车辆动力学模型的输入，

记录车辆动力学模型的横摆角速度的输出结果，计算横摆角速度的幅频特性，根据《GB/T6323-2014 转向盘角脉冲试验》的方法，获取横摆角速度峰值、横摆角速度谐振峰频率、横摆角速度谐振峰水平，与采集的实车数据对比，从而验证车辆动力学模型的模拟精度。

### B.1.2 输出相关性指标的确定

针对车辆动力学模型的转向、制动、加速性能指标需满足以下要求。

#### (1) 横向控制性能要求

横向控制性能主要关注车辆的转向和侧向稳定性。通过转向模型和悬架模型，实现车辆在不同路况和速度下的稳定转向和侧向移动，对车辆的稳定性、路径跟踪和转向响应起到关键作用。

表 B-1 横向控制性能要求

横向控制	性能要求	性能指标
转向工况	GB/T 6323-2014 汽车操纵稳定性试验方法	横摆角速度
		车身侧倾角
		侧向加速度
		质心侧偏角

#### (2) 纵向控制性能要求

纵向控制性能主要研究车辆的加速、减速和制动。通过车辆动力传动模型和制动模型，不仅决定了车辆的速度和加速度，还影响着车辆在紧急情况下的制动能力和距离。

表 B-1 纵向控制性能要求

纵向控制	性能要求	性能指标
加速工况	GB/T 12543-2009 汽车加速性能试验方法	纵向加速度
		纵向速度
		纵向位移
		车身俯仰角
制动工况	GB 12676-1999 汽车制动系统结构、性能和试验方法	制动减速度
		纵向速度

		制动距离
		车身俯仰角

## B.2 基于 CarSim 的车辆动力学模型试验方案

CarSim 是 MSC 公司旗下专门针对车辆动力学仿真的产品，可以仿真车辆对驾驶员，路面及空气动力学输入的响应，主要用来预测和仿真汽车整车的操纵稳定性、制动性、平顺性、动力性和经济性，同时被广泛地应用于现代汽车控制系统的开发。

### B.2.1 对比工况和对比指标

表 B-3 工况和对比指标

对标工况		车速(km/h)	参数
0.2g 制动		90	制动时间、制动距离
紧急制动		80	
全油门加速		0-100	加速时间、加速距离
操稳工况	单移线	60	侧向加速度、车身侧倾角、横摆角速度
	双移线	60	
	正弦	60	
	稳态回转	0-40	
	左角脉冲	80	
	右角脉冲	80	
	左角阶跃	60	
	右角阶跃	60	

### B.2.2 对比方法

仿真模型输入为实车测试中采集到的方向盘转角，油门踏板开度，车速等，用踏板行程转换为节气门开度，主动轮缸压力取平均代为制动主缸压力，通过仿真模型的响应与实车测试响应进行对比，验证和优化动力学模型的精度。

为提高模型精度，修正如下系统模型和参数：

- VS Command 脚本中调整传动系统动力分配

- 
- 调整制动系统延迟
  - 简化悬架 C 特性曲线为零点附近斜率
  - 轮胎模型进行了适当调整
  - 修正涉及到的空白参数，如部分转动惯量等
  - 转向系统 C 特性微调
  - 悬架弹簧曲线和横向稳定杆刚度微调
  - 增加驾驶员模型的质量

### B.2.3 对比总结

#### (1) 对比概述

调整对标模型，经过与实车试验数据进行对比，除去部分不合理实车试验数据，各工况数据对标精度均可达到 85%以上，部分精度可达 95%以上（详细工况对比曲线见后续小节），能够满足高速工况下的智驾功能虚拟测试精度要求。

#### (2) 指标说明

##### 1) 精度计算方法

距离 =  $(1 - | \text{实车距离} - \text{仿真距离} | / \text{实车距离}) * 100\%$

时间 =  $(1 - | \text{实车时间} - \text{仿真时间} | / \text{实车时间}) * 100\%$

##### 2) 操稳工况

对于操稳参数指标精度百分比的计算，即将仿真数据与实车数据 X 轴对齐，逐点求误差，再求其平均；

如所对比曲线有 100 组有效数据点，计算公式为：

$$(\sum (1 - |\text{仿真数据} - \text{实车数据}| / \text{实车数据})) / 100 * 100\%$$

### B.3 基于 ASM 的车辆动力学模型试验方案

#### (1) 驱动性能

1) 测试工况：初速度 10/15/20m/s，定加速度 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、2；

#### 2) 验收标准：

- 加速-速度曲线与实车数据趋势保持一致
- $1 - (\text{仿真加速度峰值} - \text{实车加速度峰值}) / \text{实车加速度峰值} \geq 80\%$

---

(2) 制动性能

1) 测试工况：初速度 10/15/20m/s，定加速度-0.2、-0.4、-0.6、-0.8、-1.0、-1.2，-2，-3，-4；

2) 验收标准：

- 加速-速度曲线与实车数据趋势保持一致
- 1- (仿真加速度峰值-实车加速度峰值) / 实车加速度峰值  $\geq 80\%$

(3) 转向性能

1) 测试工况：以初速 60、80、100km/h 变道（左右）

2) 验收标准：

- 方向盘转角与-yawrate 趋势保持一致
- 1- (仿真横摆角速度峰值-实车横摆角速度峰值) / 实车横摆角速度峰值  $\geq 80\%$

(4) 连续性性能

1) 测试工况 1：完整的一个加速&减速连续动作

验收标准：

- 加速-速度曲线与实车数据趋势保持一致
- 1- (仿真加速度峰值-实车加速度峰值) / 实车加速度峰值  $\geq 80\%$

2) 测试工况 2：实车的 S 型数据

验收标准：

- 方向盘转角与-yawrate 趋势保持一致
- 1- (仿真横摆角速度峰值-实车横摆角速度峰值) / 实车横摆角速度峰值  $\geq 80\%$

#### B.4 动力学模型置信度验证

仿真试验涉及标称场景、危险场景、边缘场景的测试和验证，依据被测的功能提取需求场景，覆盖本系统全部 DDT，根据场景需求内容拆解动力学性能指标，并构建对应的动力学测试需求点，选取匹配的测试方法进行动力学置信度的验证，常用的动力学验证方式如构建纵向加速，纵向制动，横向操稳等测试条目，对比实车与仿真动力学模型的物理表现差异来评估其置信度。

动力学模型置信度验证方案（仅展示出部分内容）：

	D 挡滑行工况测试
	半油门起步工况测试
	线性制动工况测试
	紧急制动工况测试
	转向盘中心区操作稳定性测试
	转向瞬态响应（转向盘转角角脉冲输入）测试

D 挡滑行工况测试验证举例说明：

序号	试验项目	测试工况要求	数据对比要求	试验结果	备注
1-1	D 挡滑行工况测试 (60km/h)	<p>此工况起始车速 60km/h，进入滑行区域后保持车辆挡位不变，加速踏板、制动踏板和方向盘无操作，沿直线滑行减速直至车速降为 0 km/h。当车速过低时（一般指 7km/h 以下），空气阻力小，电机控制策略输出恒定驱动力矩使车辆保持低速稳定行驶。此时车辆脱离滑行工况进入蠕行工况，因此从记录下的数据中提取车速由 60km/h 至 10km/h 的数据段用于 D 挡滑行工况对标。</p>	<p>分别对比内外场工况的滑行距离和纵向车速：均方根误差 RMSE、加权平均绝对误差百分比 WMAPE、内外场绝对差值极大/极小值、均值和试验结果曲线走势。</p>	<p>由60km/h滑行至10km/h过程中，外场测试滑行距离269.41m，仿真测试滑行距离269.05m。</p> <p>纵向车速的均方根误差 RMSE=0.55(km/h)；加权平均绝对误差百分比 WMAPE=1.694%；内外场绝对差值极大值=1.18(km/h)，极小值=0(km/h)；外场车速均值=28.28(km/h)，仿真车速均值=28.36(km/h)。</p> <p>纵向距离的均方根误差 RMSE=0.1662(m)；加权平均绝对误差百分比 WMAPE=0.63%；内外场绝对差值极大值=2.25(m)，极小值=0(m)；外场距离均值=176.16(m)，仿真距离均值=174.66(m)。</p>	/



---

## 附录 C：交通流模型试验方法及性能要求

### C.1 交通流模型试验方法

#### C.1.1 交通流一致性试验过程

交通流仿真分为基础道路模型、交通控制模型、交通管理模型、交通行为模型、仿真参数设定、车辆数据输入、结果输出。

(1) 基础道路模型：路网模块主要对交通中道路和设施进行建模，路网模块包括对道路、交叉口、高架桥等元素进行描述，道路一般要细致到车道。

(2) 交通控制模型：主要的控制部分是交叉口内的信号灯控制以及路段上的信号控制，作用是限制车辆的速度和通行权限，具有一定的动态变化规律，可以在初始化阶段设定完整的信号灯控制方案。

(3) 交通管理模型：交通管理模型主要针对交通管理部门在交通环境中根据道路或交叉口使用情况附加的交通管理措施。

(4) 交通行为模型：包括不同类型驾驶员的反应时间、车辆在排队状态下的最小间距等。跟驰模型、换道模型等属于典型的交通流仿真模型，模型的选择和建立原理直接影响到整个仿真系统运行的结果和精度。

(5) 仿真参数设定：仿真参数属于仿真系统用户的输入部分，主要目的是让用户根据自身的仿真需求调整仿真系统运行，包含的基本内容有：仿真时间时长、仿真速度、刷新步长、随机数种子等。

(6) 车辆数据输入：一种是对输入车辆的流率、路径选择的比例、驾驶员的类型分布以及车辆的类型和初始行驶状态提出约束和规范。另一种是针对车辆的具体行为状态进行仿真，使得车辆行为模型与现实情况的拟合程度更高，在特定区域输入车辆信息，具体设定每个车辆的类型、初始位置、初始速度、初始加速度、驾驶员类型等。

(7) 结果输出：基础的输出数据是车辆的行驶数据，例如车辆通过某个定点或定线处车辆的瞬时速度、加速度、方向，或者车辆在某个行驶范围内行驶数据的集合，包括每个时间间隔的速度、加速度、方向、车辆换道次数和转弯次数。

### C.1.2 交通场景一致性试验参数

#### (1) 宏观交通流参数

交通流整体的特性可以反映交通流的状况，例如流量、速度、密度等特性。其中道路中流量和密度的数值较为好获取，通过实际采集的流量和密度，混合交通流的比例，将密度和混合交通流比例输入仿真模型，输出的流量与实际的流量进行对比，从而验证模型的有效性。

在比较交通流模型产生的结果与实际道路交通流是否一致时，可采集以下信息：车辆横向纵向位置，速度，加速度，车头间距，车头时距，车型，宽度，长度，通过分析交通流量、车速、车流密度、车头时距、通行能力、延误时间等交通变量确定车流运行的特性。

表 B-8 宏观交通流参数分类

宏观交通流参数分类	断面交通流变量比较	断面速度
		断面密度
		断面流量
	交通流关系比较	速度与密度
		速度与流量
		密度与流量
	衰减趋势比较	单模拟值与实测值
		平均模拟值与实测值
		全部组合值与实测值

#### (1) 微观交通流参数

微观交通流仿真模型是描述细颗粒度的个体交通流因受其他交通流的影响而产生的个体行为，个体行为较难预测，此时需要将单个车辆的位置、时刻、车头时距、速度等属性的模拟值与实测值比较进行验证。

表 B-9 微观交通流参数分类

微观交通流参数分类	断面速度比较	速度变换模式
		速度波动
	轨迹比较	车辆位置
		冲击波
		形状及转变
	车距比较	车头时距
车头间距		

### C.1.3 交通场景一致性验证

#### (1) 交通场景车辆特征提取

不同车辆的换道行为由于驾驶人个体差异和场景多样性存在明显差异，同一车辆两次换道行为的持续时间、速度变化趋势也有所不同，需要进行统计分析数据记录中车辆换道的宏观特征和个别异常趋势，从而提取提供交通场景中车辆的行为特征。

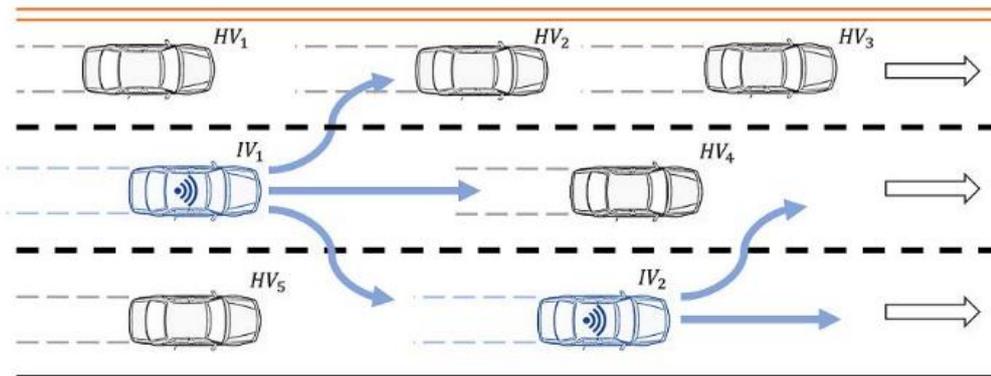


图 B-2 交通场景示例

若假定车辆在靠右侧的道路行驶，在道路上的左换道和右换道行为所表征的驾驶目标并不相同，车辆的左换道行为大多为超车的加速过程或寻求更高的速度，右换道行为往往是驾驶员控制车辆由短时间内的较高速度恢复至期望速度的过程，因此可以将车辆的左右换道行为区分统计分析。对车辆换道行为进行特征时应考虑其在换道开始时刻的纵向绝对速度，根据轨迹换道开始时的初速度绝对值，

---

分别对处于不同初速度区间的换道轨迹的换道持续时间进行概率密度统计和正态分布拟合，得到其概率密度直方图和正态分布拟合曲线，分析车辆换道行为的差异性特征。

## （2）交通场景一致性评估维度

在验证交通场景中车辆的行为表现时，可对车辆在运动过程中的车道追踪能力、动态速度特征、驾驶安全性以及轨迹规划效率进行对比分析，基于仿真过程中的具体数值应用统计学等方法验证其与真实交通场景的一致性。

### 1) 交通场景车辆车道追踪能力

交通场景车辆对于车道的追踪能力表现了智能车对于基本交通规则遵守程度，基于仿真交通场景中车辆的运动过程，记录其在整个仿真过程中的参考轨迹、车辆行驶轨迹、车辆速度、车辆加速度和车辆急动度等运动状态参数，从而验证交通场景模型的拟人化程度。

记录车辆在超车、换道、跟驰、紧急停车、重新启动跟驰和提速至期望速度等场景行为下的表现，比较其横向位置与车道中心线的误差，验证其对期望车道的追踪能力，使得产生的交通流车辆面向不同行为模式的场景时均能够保证车辆安全性的同时遵从期望车道设置驾驶。

### 2) 交通场景车辆的动态运动特征

交通场景中车辆在保持合理位置运动时，也应保持运动的稳定性。通过考量车辆横纵向急动度、横纵向加速度和横纵向速度等统计值，可以评估车辆在运动过程中的稳定性特征。

记录车辆在运动场景行为下的表现，观测车辆的横纵向速度表现，比较速度特征变化趋势，在统计方法下表明车辆在横纵向运动的行为特征（加减速和驾驶航向角等），验证其横纵向速度追踪能力。车辆急动度是指其加速度的变化率，即为车辆加速度的加速度。急动度绝对值的大小反映了车辆运动状态的变化快慢，可用以评估驾驶安全性和舒适性。

### 3) 轨迹规划效率

在仿真环境下，在贴近真实环境下车辆表现的同时，也应保持交通场景模型改变车辆运动状态的高效率。统计动态交通流车辆在每个周期下定位、感知、决策、规划、控制等流程下的计算时间，在保证不损失车辆性能的前提下，使得车

辆具有更好的场景适应性。

## C.2 交通场景模型评价指标

在对比验证交通场景的一致性时，可采用宏观指标，如路段上车辆平均速度、换道完成率，也可采用微观指标，如车辆行驶时间、车头时距。指标可用于评价仿真系统准确性，也可用于实际应用，如评价车辆产生方案合理性、评价车道设置合理性等。

表 B-10 交通场景模型评价指标

		评价用图	评价指标
交通场景模型 评价指标	车辆速度	时间-平均速度-信号 相位关系图	平均静止距离
		分车道时间-速度图	前方车辆数量
		车辆制动-启动图	紧急停车距离
	车辆换道	换道位置分布对比图	期望车道变换距离
		换道时间对比图	等待换道时间、换道完成时 间
	车辆行驶 时间	行驶时间对比图	延误时间
	车辆时距	空间-时间对比图	最小车头时距、安全距离

### C.2.1 平均速度

平均速度是评价仿真系统宏观准确率的指标之一，通过计算某时刻仿真范围所有车辆的平均速度  $V_{Ave}(t)$  和某时刻某车道上所有车辆的平均速度  $V_{AveL}(t)$ ，从而得到平均速度误差  $e_{Ave}$  的计算式为：

$$V_{Ave}(t) = \frac{\sum_{i \in Q(t)} v_i(t)}{N(t)}$$

$$V_{AveL}(t) = \frac{\sum_{i \in Q_l(t)} v_i(t)}{N_l(t)}, l \in L$$

$$e_{Ave} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |V_{Ave}(t) - V_{AveS}(t)|$$

其中,  $Q(t)$ 为 $t$ 时刻目标范围车辆编号集合,  $N(t)$ 为 $t$ 时刻目标范围车辆总数, 下标 $l$ 表示某一个车道的参数,  $L$ 为车道编号集合,  $T$ 表示仿真总时长,  $V_{Ave}(t)$ 表示平均速度真实值,  $V_{AveS}(t)$ 表示仿真值。

### C.2.2 车辆数

车辆数是评价仿真系统宏观准确率的指标之一, 某时刻的车辆数定义为该时刻仿真范围所有车辆的数量, 车辆数误差 $e_{Veh}$ 的计算式为:

$$e_{Veh} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |N(t) - N_l(t)|$$

$N_l(t)$ 表示 $t$ 时刻目标范围内车辆数的仿真值,  $T$ 表示仿真总时长。

### C.2.3 车辆行驶时间

车辆行驶时间用于评价仿真系统的车辆微观行为准确度, 其定义为车尾离开停车线的时间与进入仿真区域的时间之差, 在一定程度上, 该指标可反映车辆的延误水平。行驶时间 $T_i$ 、行驶时间误差 $e_T$ 计算式如下:

$$T_i = t_{i,exit} - t_{i,enter}$$

$$e_T = \frac{1}{N} \sum_{i \in Q} |T_i - T_{il}|$$

其中,  $t_{i,exit}$ 为车辆 $i$ 的车头跨越停车线的时刻,  $t_{i,enter}$ 为其进入仿真区域的时刻,  $N$ 为仿真时间内进入仿真范围的车辆总数,  $T_i$ 为车辆行驶时间真实值,  $T_{il}$ 表示车辆行驶时间仿真值。

### C.2.4 换道完成率

换道完成率为在仿真结束时, 完成换道至行驶目标车道的车辆比例, 是评价换道模型的宏观指标, 换道完成率 $C_{Complete}$ 的计算式如下:

$$C_{Complete} = \frac{N_{finish}}{N}$$

其中,  $N_{finish}$ 为仿真结束时位于行驶目标车道的车辆总数。

---

## C.3 交通场景一致性评价方法

### C.3.1 统计分析

通过选择适当的统计指标，如平均车速、交通流量、密度、延误等，收集实际数据和仿真数据，并进行对比分析。可以使用描述性统计来描述数据的分布特性，或使用推断性统计来检验两组数据之间是否存在显著差异。

**描述性统计分析：**首先，可以对实际和模拟的交通数据进行描述性统计，如均值、中位数、众数、标准差、偏度、峰度等。这些统计量可以帮助我们了解数据的分布特性，如数据的集中程度、离散程度以及形状等。

**相关性分析：**通过计算实际和模拟数据之间的相关系数，可以评估两者之间的线性关系。常用的相关系数有皮尔逊相关系数、斯皮尔曼秩相关系数等。如果相关系数接近 1 或 -1，说明实际和模拟数据之间有较强的线性关系，模型的一致性较好。

**回归分析：**回归分析可以进一步探索实际和模拟数据之间的关系。通过建立一个回归模型，我们可以预测模拟数据对应的实际数据值，并计算预测误差。常用的回归分析方法有线性回归、多项式回归、逻辑回归等。

**假设检验：**假设检验可以帮助我们判断模拟数据与实际数据之间是否存在显著差异。常用的假设检验方法有 t 检验、卡方检验、F 检验等。通过设定一个原假设（如模拟数据与实际数据无显著差异），并计算相应的统计量（如 t 值、卡方值等），我们可以判断原假设是否成立。

**方差分析 (ANOVA)：**如果有多个模拟场景或不同条件下的模拟数据，可以使用方差分析来比较它们与实际数据之间的差异。方差分析可以帮助我们确定不同条件或场景下模拟数据的差异是否显著。

### C.3.2 误差分析

定义合适的误差指标，如均方误差 (MSE)、均方根误差 (RMSE)、绝对误差等，计算实际数据与仿真数据之间的误差。

**均方误差 (Mean Squared Error, MSE)：**这是衡量预测值与实际值之间误差的标准，计算的是误差的平方的平均值。MSE 的值越小，说明预测模型越准确。

**均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE)：**这是 MSE 的平方根，也被

---

称为标准误差。RMSE 的单位与原始数据的单位相同，因此更容易解释。同样，RMSE 的值越小，预测模型的准确性越高。

**平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE):** 这是预测值与实际值之间误差的绝对值的平均值。与 MSE 一样，MAE 的值越小，预测模型越准确。与 MSE 相比，MAE 对误差的处理更加稳健，因为它不会将大的误差进行平方放大。

**中位数绝对误差 (Median Absolute Error, MdAE):** 这是预测值与实际值之间误差的中位数的绝对值。MdAE 对误差的处理更加稳健，因为它不会受到极端值的影响。

**R 方 (Coefficient of Determination):** 也称为确定系数，用于衡量模型对数据的拟合程度。利用拟合优度检验方法对所建立的交通场景特征参数模型进行检验。拟合优度检验用于描述回归线性方程对样本观测值的拟合程度，可通过样本决定系数和自由度调整复决定系数来评价，两类系数的值在 0 和 1 之间，越接近于 1，说明因变量不确定性的绝大部分能由回归方程解释，拟合优度越好。

### C.3.3 可视化比较

使用图表、图形等可视化工具，直观地展示实际数据和仿真数据之间的差异。这有助于更深入地探索和分析数据，并突出显示数据之间的差异。

**散点图 (Scatter Plots):** 散点图是一种用于展示两个变量之间关系的图形。通过将实际数据和模拟数据分别绘制在散点图上，我们可以直观地比较它们之间的分布和趋势。如果散点图中的点紧密地围绕某条直线（如  $y=x$  线），则说明模拟数据与实际数据具有较好的一致性。

**直方图 (Histograms):** 直方图用于展示数据的分布情况。通过绘制实际数据和模拟数据的直方图，我们可以比较它们的形状、峰值、分布范围等特征。如果两者的直方图非常相似，则说明模拟数据在分布上与实际数据具有较高的一致性。

**时间序列图 (Time Series Plots):** 对于随时间变化的交通数据，时间序列图是一种有效的可视化工具。通过将实际和模拟的时间序列数据绘制在同一张图上，我们可以观察它们之间的趋势和波动是否一致。如果两者的时间序列图在形状和变化趋势上相似，则说明模拟数据在时间上与实际数据具有较高的一致性。

**流量-密度图 (Flow-Density Plots):** 流量-密度图用于展示交通流量与道路密度之间的关系。通过绘制实际和模拟的流量-密度图，我们可以比较它们在不同

---

密度下的流量表现。如果两者的流量-密度图在形状和趋势上相似，则说明模拟数据在流量-密度关系上与实际数据具有较高的一致性。

**热力图 (Heat Maps):** 热力图通过颜色变化来展示数据的分布情况。在交通场景中，热力图可以用于展示交通拥堵、车辆速度等指标的分布情况。通过将实际和模拟的热力图进行比较，我们可以直观地识别出哪些区域或时间段内模拟数据与实际数据存在较大差异。