

ICS43.040.10

中国汽车工业协会团体标准 **XXX**

T/XXX-XXX-2020

自动驾驶系统功能测试
第7部分：仿真测试

**Test methods for functions of
automated driving system**

Part 7:

The simulation test

（征求意见稿）

2020-xx-xx 发布

2020-xx-xx 实施

中国汽车工业协会 发布

前 言

本标准参考有关国家标准、行业标准，结合我国生产企业实际情况及用户要求制定。

本标准按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本标准由吉林大学提出。

本标准由中国汽车工业协会归口。

本标准起草单位：

本标准主要起草人：

目录

| | | |
|-------|---|---|
| 1. | 范围 | 1 |
| 2 | 规范性引用文件 | 1 |
| 3 | 术语和定义 | 1 |
| 3.1 | 仿真 Simulation | 1 |
| 3.2 | 仿真测试 Simulation Test | 1 |
| 3.3 | 仿真模型 Simulation Model | 1 |
| 3.4 | 测试场景 Test Scenario | 1 |
| 3.5 | 测试用例 Test Case..... | 1 |
| 3.6 | 软件在环测试 Software-in-the-Loop Test, SiL | 2 |
| 3.7 | 硬件在环测试 Hardware-in-the-Loop test, HiL | 2 |
| 3.8 | 车辆在环测试 Vehicle-in-the-Loop Tset, ViL..... | 2 |
| 3.9 | 驾驶员在环测试 Driver-in-the-Loop Test, DiL | 2 |
| 3.10 | 自动驾驶系统 Automated Driving System | 2 |
| 3.11 | 精确度 Accuracy..... | 2 |
| 3.12 | 逼真度 Fidelity..... | 2 |
| 3.13 | 可靠性 Reliability | 2 |
| 3.14 | 稳定性 Stability..... | 2 |
| 3.15 | 验证 Validation | 2 |
| 3.16 | 校核 Verification..... | 3 |
| 4 | 自动驾驶功能仿真测试的目的 | 3 |
| 5 | 自动驾驶汽车仿真测试的内容 | 3 |
| 5.1 | 自动驾驶按系统组成分类: | 3 |
| 5.1.1 | 概述..... | 3 |
| 5.1.2 | 感知系统仿真测试..... | 4 |
| 5.1.3 | 决策控制系统仿真测试..... | 4 |
| 5.1.4 | 控制执行系统仿真测试..... | 4 |
| 5.1.5 | 端到端 (end-to-end) 仿真测试 | 5 |
| 5.2 | 按开发流程分类: | 5 |
| 5.2.1 | 概述..... | 5 |
| 5.2.2 | 概念设计仿真..... | 6 |
| 5.2.3 | 详细设计仿真..... | 6 |
| 5.2.4 | 工程样机仿真..... | 6 |
| 5.2.5 | 系统集成仿真..... | 6 |
| 5.3 | 仿真测试场景 | 7 |
| 5.3.1 | 场景数据来源..... | 7 |
| 5.3.2 | 测试场景构建..... | 7 |
| 5.3.3 | 场景要素..... | 8 |

| | | |
|-------|----------------------------|----|
| 6 | 自动驾驶汽车自动驾驶系统仿真测试接口需求 | 8 |
| 6.1 | 场景数据库接口 | 8 |
| 6.1.1 | 概述 | 8 |
| 6.1.2 | 内容及要求 | 8 |
| 6.2 | 仿真测试平台接口 | 9 |
| 6.2.1 | 概述 | 9 |
| 6.2.2 | 内容及要求 | 9 |
| 6.3 | 仿真测试结果接口 | 9 |
| 6.3.1 | 概述 | 9 |
| 6.3.2 | 内容及要求 | 9 |
| 6.4 | 自动化测试平台接口 | 9 |
| 6.4.1 | 概述 | 9 |
| 6.4.2 | 内容及要求 | 9 |
| 7 | 自动驾驶汽车自动驾驶系统仿真测试流程 | 10 |
| 7.1 | 概述 | 10 |
| 7.2 | 需求分析 | 10 |
| 7.3 | 仿真系统设计 | 10 |
| 7.4 | 仿真软件设计与实现 | 10 |
| 7.5 | 仿真硬件设计与实现 | 10 |
| 7.6 | 系统校核与验证 | 10 |
| 7.7 | 仿真开展 | 10 |
| 7.8 | 仿真结果分析 | 10 |
| 7.9 | 仿真过程评测 | 10 |
| 7.10 | 文档 | 10 |
| 8 | 自动驾驶汽车仿真测试的一般要求 | 11 |
| 8.1 | 概述 | 11 |
| 8.2 | 系统级要求 | 11 |
| 8.3 | 仿真模型要求 | 12 |
| 8.4 | 仿真设施要求 | 12 |
| 8.5 | 仿真开展要求 | 13 |
| 8.6 | 仿真结果分析要求 | 14 |
| 8.7 | 文档需求 | 14 |
| 8.7.1 | 仿真系统设计报告要求 | 14 |
| 8.7.2 | 仿真大纲要求 | 15 |
| 8.7.3 | 仿真结果分析报告 | 16 |
| 9 | 自动驾驶汽车仿真测试方法与要求 | 16 |
| 9.1 | 数字虚拟测试 | 16 |
| 9.1.1 | 概述 | 16 |
| 9.1.2 | 目的 | 17 |
| 9.1.3 | 输入 | 17 |
| 9.1.4 | 输出 | 17 |
| 9.1.5 | 仿真要求 | 17 |

| | | |
|-------------|-----------------------|-----------|
| 9.2 | 硬件在环仿真测试 | 18 |
| 9.2.1 | 概述..... | 18 |
| 9.2.2 | 目的..... | 18 |
| 9.2.3 | 输入..... | 19 |
| 9.2.4 | 输出..... | 19 |
| 9.2.5 | 要求..... | 19 |
| 9.3 | 车辆在环模拟测试 | 19 |
| 9.3.1 | 概述..... | 19 |
| 9.3.2 | 目的..... | 20 |
| 9.3.3 | 输入..... | 20 |
| 9.3.4 | 输出..... | 20 |
| 9.3.5 | 要求..... | 20 |
| 10 | 自动驾驶汽车仿真测试评价方法 | 21 |
| 10.1 | 概述 | 21 |
| 10.2 | 评价方法 | 21 |
| 10.3 | 通过性评价指标 | 21 |
| 10.4 | 性能评价指标 | 21 |
| 11 | 附录（参考场景） | 22 |
| 12 | 附录 | 24 |

自动驾驶系统功能测试

第 7 部分：仿真测试

1. 范围

本标准规定了自动驾驶汽车自动驾驶功能仿真测试的目的、内容、工具链、一般要求以及不同类型仿真测试的具体方法和要求、仿真测试的评价方法。

本标准适用于提出自动驾驶汽车仿真测试申请的乘用车、商用车辆。
其他汽车领域仿真测试可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改版）适用于本标准。

GB/T 3730.2-1996 道路车辆 质量 词汇和代码

ISO 26262 道路车辆-功能安全

ISO/PAS 21448 道路车辆-预期功能安全

ISO 7498 信息处理系统-开放系统互连-基本参考模型

3 术语和定义

下列术语及定义适用于本标准。

3.1 仿真 Simulation

使用一个相似或等效的系统对真实系统进行模拟，使其行为相似于或表现为真实的系统。

3.2 仿真测试 Simulation Test

使用仿真的方式对系统进行模拟测试。

3.3 仿真模型 Simulation Model

通过仿真软件或硬件实现，将系统的数学模型转换为仿真系统中的等效模型。

3.4 测试场景 Test Scenario

自动驾驶汽车与其行驶环境各组成要素在一段时间内的总体动态描述，这些要素组成由所期望检验的自动驾驶汽车的功能决定。

3.5 测试用例 Test Case

给定测试场景中各个场景要素具体参数，是测试场景的具体体现，用于直接测试自动驾

驶系统。

3.6 软件在环测试 Software-in-the-Loop Test, SiL

基于软件进行的模型驱动的数字仿真测试方法。

3.7 硬件在环测试 Hardware-in-the-Loop test, HiL

被测试系统中的传感器、控制器和执行器中部分实物嵌入仿真回路之中进行的仿真测试。

3.8 车辆在环测试 Vehicle-in-the-Loop Tset, ViL

完整的车辆系统嵌入仿真回路之中进行的仿真测试。

3.9 驾驶员在环测试 Driver-in-the-Loop Test, DiL

驾驶员的实际驾驶行为嵌入到仿真回路之中进行的仿真测试。

3.10 自动驾驶系统 Automated Driving System

搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置，并融合现代通信与网络技术，实现车与 X（人、车、路、云端等）智能信息交换、共享，具备复杂环境感知、智能决策、协同控制等功能的驾驶系统。

3.11 精确度 Accuracy

参数值与其“真值”之间的差异。

3.12 逼真度 Fidelity

仿真对仿真对象某个侧面或整体的外部状态和行为的复现程度。

3.13 可靠性 Reliability

在给定条件和给定时间间隔内，完成规定功能的能力。

3.14 稳定性 Stability

系统克服外部干扰并逐渐恢复到原来的平衡位置或轨迹的能力。

3.15 验证 Validation

通过提供客观证据，确认以满足特定使用或应用的要求

注 1：“验证”一词指定相应的状态。

注 2：验证的使用条件可以是真实的或模糊的。

注 3：可通过测试、分析、论证与检查相结合的方式来确定。

3.16校核 Verification

通过提供特殊要求已得到满足的客观证据来进行确认。

注 1：“校核”一词用于指定相应的状态。

注 2：确认可以包括以下的行为活动：

——执行替代性的计算；

——将一个新的设计规范与类似的成熟设计规范进行比较；

——进行试验和示范，并在发布前检查。

注 3：校核可通过测试、分析、论证与检查相结合的方式来确定。

4 自动驾驶功能仿真测试的目的

自动驾驶功能仿真测试的主要目的包括：

- 1) 验证自动驾驶汽车自动驾驶系统设计方案的正确性；
- 2) 验证自动驾驶汽车自动驾驶系统参数选择的合理性；
- 3) 验证自动驾驶汽车自动驾驶系统的抗干扰能力；
- 4) 验证自动驾驶汽车自动驾驶系统对故障的适应能力；
- 5) 验证自动驾驶汽车自动驾驶系统的软硬件功能和协调性；
- 6) 验证自动驾驶汽车自动驾驶系统满足指标要求的情况；
- 7) 对自动驾驶汽车自动驾驶系统各个子功能的综合性验证；
- 8) 对自动驾驶过程中遭遇的事故及故障进行复现与分析。

5 自动驾驶汽车仿真测试的内容

5.1 自动驾驶按系统组成分类：

5.1.1 概述

按照自动驾驶系统组成，仿真测试内容包括分级的感知系统测试、决策规划系统测试、控制执行系统测试；以及端到端的仿真测试，如图 5.1 和图 5.2 所示。

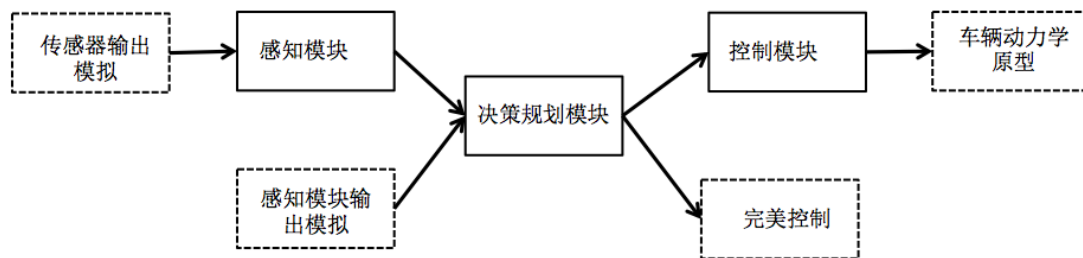


图 5.1 分级式自动驾驶测试

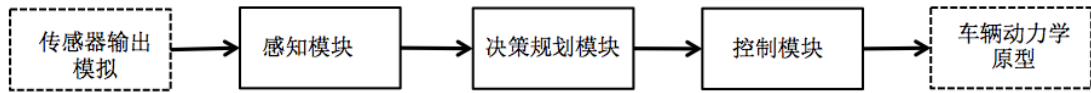


图 5.2 端到端式自动驾驶测试

5.1.2 感知系统仿真测试

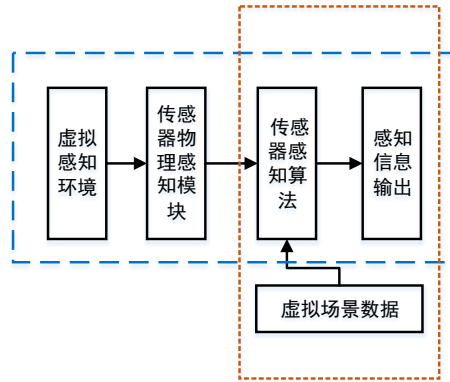


图 5.3 感知在环仿真测试

感知系统仿真测试主要包括零部件级别的仿真测试和感知系统在环仿真测试，其中零部件级仿真测试指测试传感器性能，在产品出厂时即被供应商进行了充分测试。自动驾驶系统中感知系统的仿真测试主要指感知系统在环测试，其测试内容包括感知环境虚拟构建的仿真方法和仿真数据直接注入的方式。感知环境虚拟构建的仿真方法指通过一定的技术手段搭建密闭黑箱，使其能够吸收传感器发出的电磁、声波等信息，并向其发送所需的虚拟环境中的对应传感器回波信号，从而在有限的试验场地对传感器进行在环仿真测试；虚拟场景数据直接注入的仿真方法指通过一定的技术手段，屏蔽传感器物理感知系统模块，直接向感知系统运算单元发送所需场景的数据信息。感知系统仿真测试如图 5.3。

5.1.3 决策控制系统仿真测试

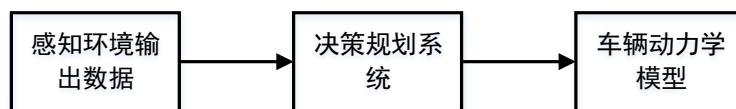


图 5.4 决策规划仿真测试

决策规划系统仿真测试是指将真实的车辆控制器放入虚拟的整车环境中，通过仿真模型来模拟受控对象的状态，并通过 CAN 接口、I/O 接口等将车辆控制器与仿真模型进行连接。其测试框架如图 5.4。

5.1.4 控制执行系统仿真测试

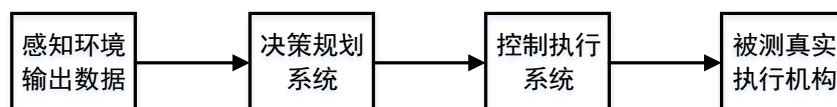


图 5.5 控制执行系统仿真测试框架

控制执行系统仿真测试多用来测试所测试算法与硬件执行机构之间是否可形成良好的控制，在测试场景中控制系统是否可以与决策规划系统形成良好的工作配合。其将真实的控制执行系统硬件嵌入到仿真系统之中，形成“闭环”通路，测试框架如图 5.5。

5.1.5 端到端 (end-to-end) 仿真测试

端到端仿真测试系统将感知模块、决策规划模块、控制模块进行集成，直接向所测试系统发送测试场景信息，通过仿真系统车辆动力学模型观察车辆实时状态。

5.2 按开发流程分类：

5.2.1 概述

自动驾驶系统设计不是一个简单的迭代过程，可以分为概念设计、详细设计、工程样机设计和系统集成设计等。在整个设计过程中都需要开展仿真，控制系统设计与控制系统仿真的对应关系如图 5.6。

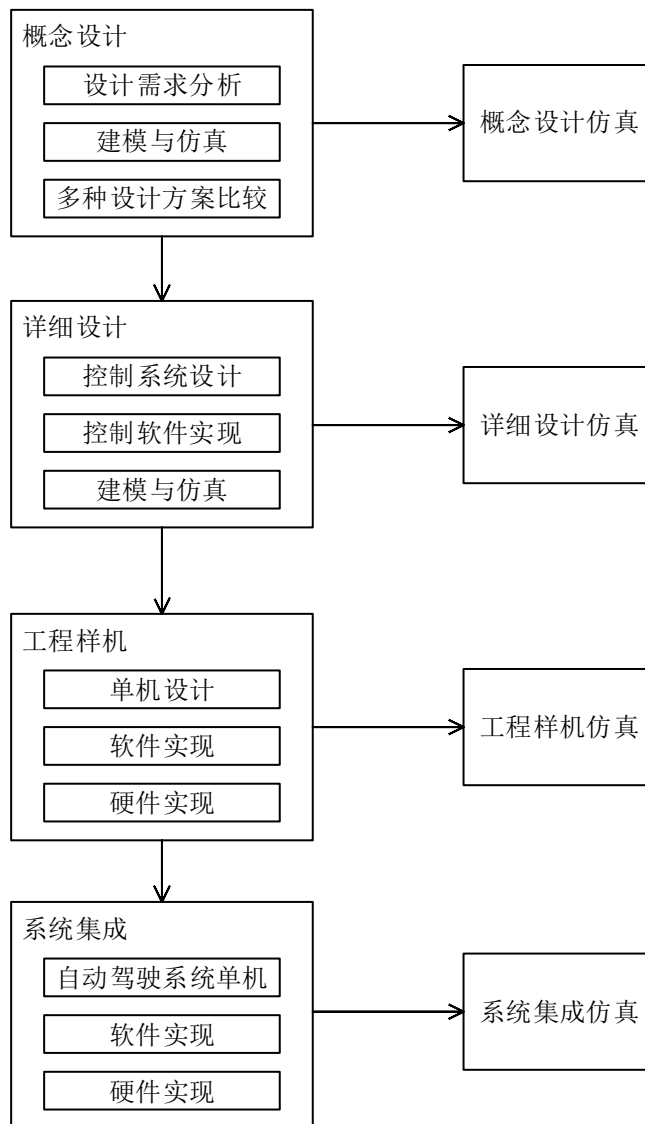


图 5.6 控制系统设计与控制系统仿真的对应关系

表 5.1 给出了概念设计仿真、详细设计仿真、工程样机仿真以及系统集成仿真的主要特点。

表 5.1 各设计过程仿真的特点

| 控制系统 仿真 | 特点 | | | | | |
|------------|--------------------------------|--|--|--------------|------------------------------|--------|
| | 仿真环境 | 验证项目 | 模型逼真度 | 控制算法编程 | 仿真系统校验 | 配置管理 |
| 概念设计 仿真 | 纯软件,非 实时 | 任务性能, 稳定性,鲁 棒性要求 | 低阶/低逼真 度简化模 型,线性, 如刚体动力 学 | 不要求模块化 | 数学模型校验 | 很少或非正式 |
| 详细设计 仿真 | 纯软件,非 实时 | 任务性能, 稳定性,鲁 棒性要求 | 高阶/高逼真 度详细模 型,非线性, 如弹性体动 力学、干扰 | 模块化 | 数学模型校验/ 仿真软件校验 | 部分正式 |
| 工程样机 仿真 | 混合软/硬 件,工程样 机或模拟 器,实时 | 信号/数据/ 时序功能 兼容性,接 口匹配性, 软件处理 功能 | 详细模型 | 接近自动驾驶 状态 | 数学模型校验/ 仿真软件校验/ 仿真硬件校验 | 部分正式 |
| 系统集成 仿真 | 混合软/硬 件,半实 物,实时 | 正常状态 下自动驾 驶软件功 能,故障模 式功能 | 纤细模型 | 正式自动驾驶 系统 | 数学模型校验/ 仿真软件校验/ 仿真硬件校验 | 正式 |

5.2.2 概念设计仿真

概念设计阶段的仿真用于控制系统结构和概念设计的研究。纯软件数学环境为论证备选的控制结构/顶层设计是否满足任务指标和稳定鲁棒性要求提供支持。采用低阶/低逼真度的线性化模型以及简单的运行环境进行数学仿真。各工程师均可运用多种共存的模型和仿真工具,几乎无需正式的配置管理。

5.2.3 详细设计仿真

详细设计阶段的仿真同样也是数学仿真,这一阶段的仿真用于系统优化、参数敏感性估计、性能评估、稳定鲁棒性估计等。仿真环境为满足任务指标和稳定鲁棒性要求的控制系统最终设计方案的论证提供支持。采用高阶/高逼真度、非线性的模型和详细的接近真实自动驾驶状态的环境模型。存在一些正式的模型、参数数据库和仿真的配置管理。

5.2.4 工程样机仿真

在原型样机阶段,为硬件、软件相结合的半实物仿真,控制系统主要部件采用原型样机,验证控制系统控制算法、原型样机、自动驾驶软件系统的正确性及各接口之间的匹配性,减少自动驾驶系统与整个自动驾驶汽车的集成风险。仿真环境在必要时可以允许使用硬件代替自动驾驶系统的传感器/执行器模型,简单的软件对象用来闭合自动驾驶系统回路。本阶段也存在一些正式的配置管理。

5.2.5 系统集成仿真

在系统集成阶段,采用半实物仿真对自动驾驶系统进行驾驶功能和失效模式功能的集成测试。自动驾驶系统的主要部件采用实物,至少包括了运行控制率、数字滤波软件和其他相关的自动驾驶软件处理器。检验自动驾驶系统各部分之间的协调性,以确认自动驾驶系统满足自动驾驶汽车安全行驶的要求。自动驾驶汽车上路之后,仿真环境仍应保留以满足:

- 1) 通过自动驾驶系统实际运行性能与上路前仿真结果的对比进行模型验证。
- 2) 在自动驾驶系统更改应用到自动驾驶汽车之前，校验其正确性。
- 3) 支持解决自动驾驶汽车的故障。本阶段仿真环境的配置管理十分正式。

5.3 仿真测试场景

5.3.1 场景数据来源

自动驾驶测试场景的数据来源主要包括真实数据、模拟数据和专家经验等三个部分，具体内容如图 5.7 所示。

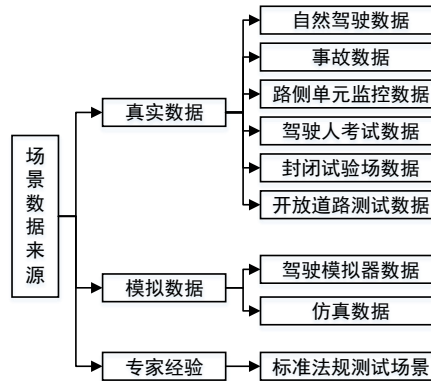


图 5.7 自动驾驶测试场景数据来源

(1) 真实数据：真实数据来源主要包括自然驾驶数据、事故数据、路侧单元监控数据，以及驾驶人考试、智能汽车封闭试验场测试、开放道路测试等典型测试数据。自然驾驶数据是通过在传统汽车上加装雷达、摄像头、高精度惯导等多传感器采集平台，在车辆正常行驶的过程中所采集的场景要素数据，典型的自然驾驶数据采集工况包括高速公路、城市道路、停车场等；事故数据是利用现有的道路交通事故大数据，分析提炼出的适用于自动驾驶测试的特征要素，其可参考目前国家事故数据库 CIDAS；路侧单元监控数据是利用交警、路政等管理机构在交叉路口、事故多发路段等地建立的路侧监控设备采集得到的场景要素数据；驾驶人考试场景数据是利用机动车驾驶人考试管理系统采集得到的人-车-环境多维度场景要素信息；智能汽车封闭试验场测试数据是在专门的封闭试验场内进行不同智能化水平等级的智能汽车系统测试得到的场景要素数据；智能汽车开放道路测试数据是指满足测试条件的智能汽车在开放道路上进行测试时所采集获取的场景要素数据。

(2) 模拟数据：模拟数据来源主要包括驾驶模拟器数据和仿真数据。驾驶模拟器数据是利用驾驶模拟器进行测试得到的场景要素信息；仿真数据是指自动驾驶汽车在仿真环境中虚拟运行得到的测试数据。

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

5.3.2 测试场景构建

自动驾驶汽车自动驾驶系统的开发过程中主要分为三个阶段，对应这三个阶段的系统仿真测试要求，可将场景进行阶段性构建仿真测试，3 个阶段构建的场景分别为功能场景、逻辑场景和具体场景。对三个阶段场景的具体定义如表 5.2 所示。

表 5.2 场景阶段性构建定义

| 场景阶段性构建 | 说明 | 例子 |
|---------|----|-----------------|
| | | 一辆汽车在一双车道快速路弧线段 |

| | | |
|------|---|---|
| | | 右侧跟随一辆货车行驶 |
| 功能场景 | 融合道路信息、本车信息、交通参与者信息、环境信息，以文字的形式将功能场景进行具体描述。 | 功能场景描述： 道路-类型-双车道快速路 道路-路型-弧线 本车-位置-右侧车道 货车-位置-右侧车道 本车-跟随-货车 |
| 逻辑场景 | 对功能场景包含信息变量化，并赋予相应的参数值空间范围。 | 逻辑场景描述： 右车道宽度：2.5m~3.75m 左车道宽度：2.5m~3.75m 弧线段半径：300m~900m 本车长：0~100m 货车长：0~100m 货车位置>本车位置 |
| 测试用例 | 定义场景变量具体的参数值。 | 测试用例描述： 右车道宽度：3m 左车道宽度：3m 弧线段半径：500m 本车长：60m 货车长：80m 货车位置>本车位置 |

以上是场景设计的三阶段方法。应用三阶段方法可以使场景设计和测试标准化、规范化，符合 ISO26262 标准，同时提高测试质量和效率。

5.3.3 场景要素

测试场景要素主要包括测试车辆和交通环境要素 2 大类，其中，测试车辆要素又包括测试车辆基础要素、目标信息以及驾驶行为 3 类；交通环境要素包括天气和光照、静态道路信息、动态道路信息和交通参与者信息 4 类。具体内容见附录 12。

6 自动驾驶汽车自动驾驶系统仿真测试接口需求

6.1 场景数据库接口

6.1.1 概述

采集、构建并储存自动驾驶汽车的测试场景的数据。包括道路形状和拓扑结构，交通灯等固定基础交通设施，临时路障等临时交通标志，天气及道路附着等环境条件，交通车，行人等可移动交通参与元素。供自动化测试工具读取响应数据。

6.1.2 内容及要求

- 1) 提供通用的定义和描述方式，以满足实际采集数据的转化和自动生成的要求；
- 2) 拥有数据格式转化工具，能够将不同传感器采集的数据转化后储存；
- 3) 具有图形化编辑窗口，能够人为定义测试场景；
- 4) 具有一定的自动重构场景的接口和能力；
- 5) 储存形式上应按照具体程度分类分层，分为功能场景，逻辑场景和具体场景；
- 6) 接口上提供各层接口，使得自动化测试工具能按层索引至具象场景，并在仿真环境中搭建；

6.2 仿真测试平台接口

6.2.1 概述

整车仿真测试平台的接口提供自动化测试软件进行的流程控制和场景搭建接口。测试状态参数和图像传递窗口，供结果处理模块可视化和记录具体数据。以及人机交互接口，用于操作者实时控制或复现具体测试场景。

6.2.2 内容及要求

- 1) 提供自动化测试软件进行流程控制所需的 API 接口函数，应兼容 C/C++,Java, Python 等常见语言；
- 2) 场景搭建的接口应支持自动化搭建；
- 3) 提供丰富的车辆、行人、骑行者等交通参与者，以及路牌，红绿灯等交通标示，施工说明等临时交通设施等接口，供测试场景的自动搭建；
- 5) 可通过共享对象等提供仿真测试过程的数据实时接口；
- 6) 能够与测试过程同步输出具体测试场景的图像信号；

6.3 仿真测试结果接口

6.3.1 概述

读取被测系统实时数据，并用于实时显示。对数据进行记录和预处理，用于测试数据分析和报告自动生成。

6.3.2 内容及要求

- 1) 提供仿真过程控制用户接口，支持手动开始，暂定，结束仿真等流程控制；
- 2) 具备数据可视化能力，通过虚拟仪表等显示系统参数状态和仿真场景视频；
- 3) 显示窗口提供自定义接口，供用户设置默认的需显示的参数和视频视角；
- 4) 提供数据曲线读取分析的 GUI 窗口；
- 5) 视频窗口图形操作接口，具备旋转、平移、缩放、视角调整等功能，提供播放速度、进度等控制接口；
- 6) 输出应支持 OSI 标准，可支持 FLV、AVI、MP4 csv, mp4, excel ,dat, mtl 等常用文件格式的导出。

6.4 自动化测试平台接口

6.4.1 概述

提供通用化的自动化测试软件平台，按功能需求从测试场景数据库中读取场景数据，并导入测试环境，控制整车测试平台多场景的自动测试，高效地完成测试报告的生成。同时提供用户定义测试用例窗口以及测试报告生成的接口。

6.4.2 内容及要求

- 1) 兼容 C/C++, Python 等多种编程语言接口用于测试用例的定义；
- 2) 提供测试报告内容和形式的定义接口；
- 3) 流程控制接口应兼容实时测试平台；
- 4) 兼容仿真测试软件接口；
- 5) 满足多种形式场景数据库文件的读取；
- 6) 支持 xml, pdf, docx 等多种文档格式报告的输出。

7 自动驾驶汽车自动驾驶系统仿真测试流程

7.1 概述

自动驾驶系统各个设计过程的仿真内容一般包括需求分析、仿真系统设计、仿真软件设计与实现、仿真硬件设计与实现、系统校核与验证、仿真开展、仿真结果分析、文档等内容。

7.2 需求分析

确定方针任务的输入（如被控对象数学模型、控制率、自动驾驶系统指标、自动驾驶系统规范以及相应的文档）；确定仿真任务的输出（如仿真数据、仿真结果分析以及相应的文档）；确定仿真的功能和所需资源（如人员需求、人员的责任、仿真模型要求、场地要求、设备需求等）。

7.3 仿真系统设计

进行仿真系统设计，确定用软件、工程样机或者实物来时间控制系统的各部分，确定仿真系统各部分之间的接口关系。制定仿真计划，编写仿真系统设计报告和仿真大纲。

7.4 仿真软件设计与实现

编写和调试仿真软件，将数学模型（如被控对象、驾驶环境、执行机构）用软件来实现。

7.5 仿真硬件设计与实现

设计和实现仿真系统中所使用的硬件。

7.6 系统校核与验证

对仿真模型进行校核与验证，对仿真模型置信度做出评估，确保仿真模型的功能和性能指标满足要求。

7.7 仿真开展

按照试验大纲内容进行仿真

7.8 仿真结果分析

分析仿真结果，评估自动驾驶系统性能

7.9 仿真过程评测

对整个仿真过程进行评测。

7.10 文档

编写仿真相关报告，如仿真结果分析报告。

8 自动驾驶汽车仿真测试的一般要求

8.1 概述

自动驾驶汽车仿真测试的一般要求分为系统级要求、仿真设施要求、方针开展要求、仿真结果分析要求和文档要求。

8.2 系统级要求

系统级要求涵盖了自动驾驶汽车自动驾驶仿真过程中所应遵循并应在系统级被定义的要求，如表 8.1 所示。

表 8.1 系统级要求

| 序号 | 要求 |
|----|---------------------------------|
| 1 | 应定义仿真的输入和输出 |
| 2 | 应确定仿真模型开发所需的数据资料和文档 |
| 3 | 应确定仿真需要输出的数据，包括精度、逼真度、可靠性 |
| 4 | 应根据仿真需求，确定仿真类型（SiL、HiL、ViL、DiL） |
| 5 | 应根据仿真需求，确定仿真系统的组成及各部分的功能 |
| 6 | 应确定仿真所需要的模型，见 5.3 |
| 7 | 应根据仿真类型确定仿真系统中每个部分的实现方式 |
| 8 | 应确定各部件之间的接口数据格式及实现方式 |
| 9 | 应确定采用的仿真语言 |
| 10 | 应确定每个仿真模型的调用周期 |
| 11 | 应确定仿真模型校验和校核的方法 |
| 12 | 应确定仿真模型校验和校核的过程 |
| 13 | 应分析和确定仿真中的不确定因素 |
| 14 | 应编写仿真系统设计报告，包含上述条目，见 5.7.1 |

| | |
|----|-----------------|
| 15 | 应编写仿真大纲，见 5.7.2 |
|----|-----------------|

8.3 仿真模型要求

仿真模型一般要求见表 8.2。

表 8.2 仿真模型要求

| 序号 | 要求 |
|----|------------------------------------|
| 1 | 应包含算法、被控对象模型、敏感模型、执行机构模型、环境模型及配置管理 |
| 2 | 应对确认建立模型所需要的数据和所使用的软件以及输入条件的预处理 |
| 3 | 应确保模型的功能、特性、接口与实物一致 |
| 4 | 应定义模型的基本结构和数学描述 |
| 5 | 应对模型的性能、准确度、逼真度、稳定性、有效范围做出规定 |
| 6 | 应指明模型中所使用的数据和输入输出变量的量纲 |
| 7 | 应对其使用的坐标系做出规定 |
| 8 | 应提供模型的正确使用方法说明 |
| 9 | 应记录校核验证所使用的技术和校验的范围 |
| 10 | 应记录校核验证的条件（如：需要的数据和软件） |
| 11 | 应记录模型校验的结果（如：是否满足仿真要求） |
| 12 | 应对模型及其数据、文档进行配置管理，例如文件版本、模型的更新 |

8.4 仿真设施要求

仿真设施的一般要求见表 8.3。

表 8.3 仿真设施要求

| 序号 | 要求 |
|----|------------------------------------|
| 1 | 应列出对计算能力的特殊要求（例如：支撑软件、内存容量、硬盘容量、处理 |

| | |
|----|----------------------------|
| | 器等) |
| 2 | 应能够检测和控制仿真的运行 |
| 3 | 应能够记录和显示仿真运行的状态 |
| 4 | 应能够比较相同格式的数据 (如: 比较两次仿真结果) |
| 5 | 应能够对仿真输出数据进行在线或离线分析 |
| 6 | 应能够提供对仿真系统进行调试的方法 |
| 7 | 应能够接入外部时钟或为外部提供时钟, 达到系统同步 |
| 8 | 应能够支持实时和非实时仿真 |
| 9 | 应能够对仿真系统中的所有设备进行校验 |
| 10 | 应能够对仿真系统中的所有设备进行校验 |
| 11 | 应确保具有设备的使用方法 (含使用限制) |
| 12 | 应确保仿真设备的技术指标在允许范围内 |
| 13 | 应对设施及相关文档进行配置管理 |

8.5 仿真开展要求

仿真开展一般要求见表 8.4。

表 8.4 仿真开展要求

| 序号 | 要求 |
|----|------------------------------------|
| 1 | 应确认所有输入的数据, 包含其正确性、物理意义及量纲 |
| 2 | 应确认仿真模型和设施已经过校验 |
| 3 | 应按仿真大纲规定的测试用例开展 |
| 4 | 应确保仿真过程没有超出模型的运算范围 (例如: 高度范围和测量范围) |
| 5 | 应记录仿真结果所对应的条件 |

| | |
|----|-------------------------------------|
| 6 | 应对仿真结果及时处理，对仿真进行修改和补充 |
| 7 | 应分析仿真中出现的问题（错误和警告）和解决方法 |
| 8 | 应进行记录和解释仿真过程中出现的错误和警告信息，对严重的问题要及时上报 |
| 9 | 应对仿真和分析过程记录，以形成仿真结果报告 |
| 10 | 应保证多次运行的一致性，多次重复仿真的一致率不应低于 90%。 |

8.6 仿真结果分析要求

仿真结果分析一般要求见表 8.5。

表 8.5 仿真结果分析要求

| 序号 | 要求 |
|----|----------------------------|
| 1 | 应说明和记录分析所用的数据和来源 |
| 2 | 需分析主动驾驶系统的稳定性是否满足要求 |
| 3 | 需分析自动驾驶系统的性能指标是否满足要求 |
| 4 | 需分析自动驾驶系统是够符合自动驾驶汽车的参数不确定性 |
| 5 | 需分析自动驾驶系统的抗干扰能力是否满足要求 |
| 6 | 需分析自动驾驶系统对单机故障的适应能力是否满足要求 |
| 7 | 需分析是否达到了仿真的目的 |

8.7 文档需求

8.7.1 仿真系统设计报告要求

仿真系统设计报告一般要求见表 8.6。

表 8.6 仿真系统设计报告要求

| 序号 | 要求 |
|----|---------------|
| 1 | 应确认仿真系统的功能和性能 |

| | |
|---|----------------------------------|
| 2 | 应记录仿真系统的构成 |
| 3 | 应记录仿真设施及其功能 |
| 4 | 应记录仿真软件及其功能 |
| 5 | 应确认仿真系统的内外部接口 |
| 6 | 应记录专门为本次仿真设计或修改的设备/软件的设计结果 |
| 7 | 应记录每个仿真设施的名称、编号、尺寸、位置、状态及其他重要的属性 |
| 8 | 应包括硬件相关文档 |
| 9 | 应包括软件相关文档 |

8.7.2 仿真大纲要求

仿真大纲一般要求见表 8.7。

表 8.7 仿真大纲要求

| 序号 | 要求 |
|----|---------------------------|
| 1 | 应确认仿真目的 |
| 2 | 应记录仿真的输入 |
| 3 | 应确认仿真的输出 |
| 4 | 应确认仿真内容 |
| 5 | 应记录仿真方案 |
| 6 | 应制定仿真运行步骤 |
| 7 | 应记录校核和验证的要求、计划和方法 |
| 8 | 应确认仿真中需要存储的数据内容、精度及格式 |
| 9 | 应记录仿真的时间表 |
| 10 | 应确认仿真环境（场地、能源、温度以及其他环境条件） |

| | |
|----|------------|
| 11 | 应记录仿真的人员安排 |
|----|------------|

8.7.3 仿真结果分析报告

完成仿真试验后，应对仿真开展过程和结果进行总结，形成仿真开展过程和结果进行总结，形成仿真结果分析报告，其一般要求见表 8.8。

表 8.8 仿真结果分析报告要求

| 序号 | 要求 |
|----|-----------------------------|
| 1 | 应给出仿真概况 |
| 2 | 应说明仿真输入数据及来源 |
| 3 | 应说明仿真中采用的模型 |
| 4 | 应记录数学模型的校验结果 |
| 5 | 应记录仿真中硬件设备的技术状态 |
| 6 | 应说明模型验证和采用的技术、验证和确认的结果及状态 |
| 7 | 应说明仿真中没有被验证的方面 |
| 8 | 应进行仿真误差分析，说明仿真中不确定因素及对仿真的影响 |
| 9 | 应分析说明仿真结果，包含分析和统计过程记录文档 |
| 10 | 应说明仿真的修改和补充 |
| 11 | 应说明仿真中出现的问题（错误和警告）和解决方法 |
| 12 | 应对仿真和分析是否恰当做出评价 |
| 13 | 应记录仿真结果分析 |

9 自动驾驶汽车仿真测试方法与要求

9.1 数字虚拟测试

9.1.1 概述

数值虚拟环境建立在车辆模型，驾驶人模型、环境模型和感知传感器模型的一体化虚拟测试环境下，其机构如图 9.1 所示，主要针对自动驾驶汽车的前期开发验证、危险场景下的

测试、以及大量随机场景样本下的补充验证。

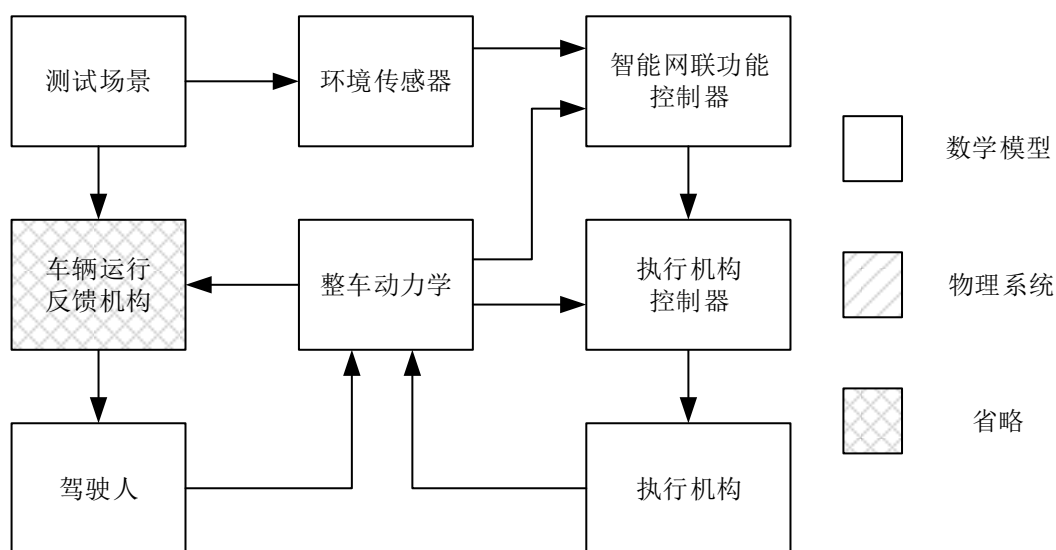


图 9.1 数字虚拟环境测试系统架构

9.1.2 目的

- 1) 自动驾驶汽车的前期功能定义、验证及可行性分析。
- 2) 原型功能的测试分析，技术指标定义，方案对比论证；
- 3) 模型框架定义，原型算法开发测试；
- 4) 集成虚拟场景下的快速验证和前期测试；
- 5) 危险极端场景下的汽车性能的测试分析；
- 6) 随机重构场景下的快速测试验证；
- 7) 自动驾驶汽车在大样本测试场景下的稳定性测试分析；

9.1.3 输入

- 1) 输入一般包括以下内容：
- 2) 自动驾驶系统控制算法；
- 3) 测试场景信息；
- 4) 被控对象数学模型；
- 5) 仿真任务需求；
- 6) 需要验证的控制系统关键指标和控制系统关键参数。

9.1.4 输出

输出一般包括以下内容：

- 1) 对应测试场景下的各种参数和仿真结果；
- 2) 仿真结果的分析结论；
- 3) 自动驾驶系统的性能评估；
- 4) 与自动驾驶系统要求相关的仿真系统的设计验证；
- 5) 仿真结果分析报告。

9.1.5 仿真要求

9.1.5.1 仿真模型要求

(1) 仿真模型包括控制算法、交通模型、环境模型、车辆动力学模型、车辆感知系统模型；

- (2) 仿真模型应具备一定的精度，能够真实的反应物理系统的真实情况；
- (3) 仿真模型应具备一定的运算性能，能够以较快的运算速度进行运行；
- (4) 仿真模型应提供多层接口，并与实际部件接口原理类似；
- (4) 仿真模型应能够根据测试场景的不同以及测试车辆的不同进行实时切换。

9.1.5.2 仿真设施要求

- (1) 仿真设施包含仿真计算及配套仿真支撑软件
- (2) 仿真设施的运算性能不低于运行该仿真测试的最低需求；
- (3) 仿真设施应具备实时存储功能以确保实验结果的有效存储；
- (4) 仿真设施的仿真步长应具备根据仿真需求实时调整的能力；
- (5) 仿真设施应提供 API 接口，供自动化测试软件进行测试流程控制；
- (5) 仿真系统应具备良好的稳定性，能够满足长时间不间断自动化测试的要求。

9.2 硬件在环仿真测试

9.2.1 概述

硬件在环模拟测试是指在虚拟仿真环境测试的基础上，将实物嵌入模型回路之中，使得提高模型的逼真度，并在此基础上进行进一步的测试分析。根据实物和模型部分的不同，可以分为传感器在环，控制器在环，执行机构在环等，如图 9.2 所示。

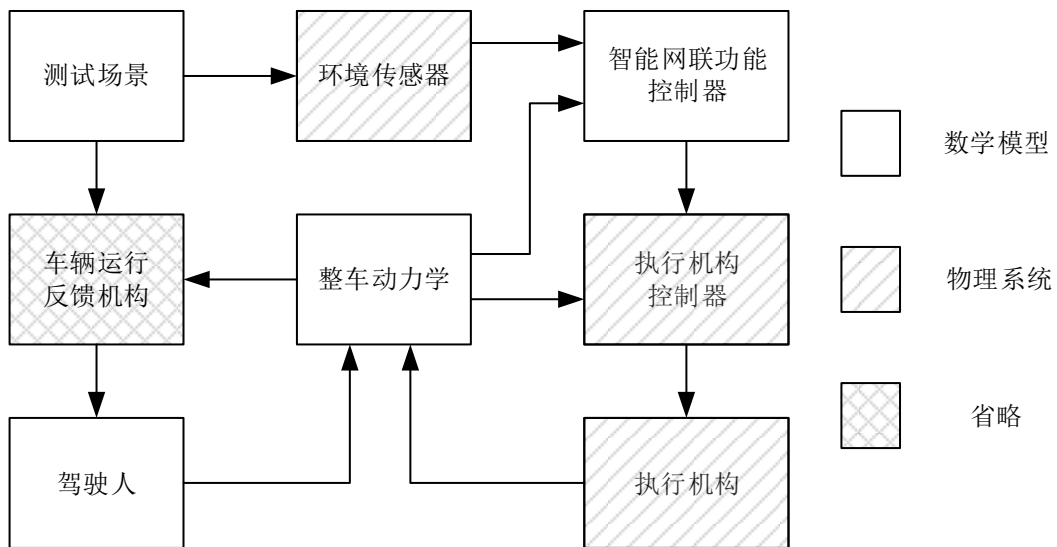


图 9.2 硬件在环仿真测试系统架构

9.2.2 目的

- 1) 减少各部件在数学建模精度对仿真测试结果的影响；
- 2) 对于各部件的性能进行部件级测试验证；
- 3) 验证各部件的关键指标和参数；
- 4) 测试控制算法的实时效率；
- 5) 标定各部件控制算法参数；
- 6) 为模型部分提供真实的物理信号，测试算法接口稳定性；
- 7) 部件级故障注入，初步测试系统故障诊断功能；

9.2.3 输入

输入一般包括以下内容：

- 1) 输入一般包括以下内容；
- 2) 自动驾驶系统控制算法；
- 3) 测试场景信息；
- 4) 被控对象数学模型；
- 5) 仿真任务需求；
- 6) 需要验证的控制系统关键指标和控制系统关键参数。

9.2.4 输出

输出一般包括以下内容：

- 1) 对应测试场景下的各种参数和仿真结果；
- 2) 仿真结果的分析结论；
- 3) 自动驾驶系统的性能评估；
- 4) 与自动驾驶系统要求相关的仿真系统的设计验证；
- 5) 仿真结果分析报告。

9.2.5 要求

9.2.5.1 仿真模型要求

仿真模型要求参照 9.1.5.1 中仿真模型的要求标准

9.2.5.2 仿真设施要求

- 1) 仿真设施主要包括仿真电脑、仿真支撑软件及所测试的仿真硬件系统；
- 2) 仿真电脑和仿真支撑软件的要求参照 9.1.5.1 中仿真设施的要求标准；
- 3) 仿真设施还应具备与仿真硬件系统之间相对应的连接接口，形成闭环；
- 4) 仿真硬件应能够模拟真实情况下的硬件系统工作情况，其误差必须控制在一定范围内；
- 5) 仿真硬件应与目标测试车型一致，其性能必须满足车载规范；
- 6) 仿真硬件的工作环境，安装位置，获取的模拟数据与实际工况相符；
- 7) 仿真硬件中控制器/控制模型应与仿真模型之间采用标准通讯协议（CAN、LIN、MOST、FlexRay、Ethernet 等）
- 8) 控制器在环仿真中控制器应支持算法的更新与标定、应经过前期测试验证具备完整功能逻辑、应与目标车辆参数匹配。

9.3 车辆在环模拟测试

9.3.1 概述

车辆在环模拟测试是在车辆为完整的实物配置下，即传感器，控制器和执行器均为实际的物理系统，同时装备于完整的车辆系统之中，在可控的环境下对自动驾驶汽车进行测试，如图 9.3。包括通过转鼓实现的车辆动态测试，电波暗室下的车辆通讯测试等。

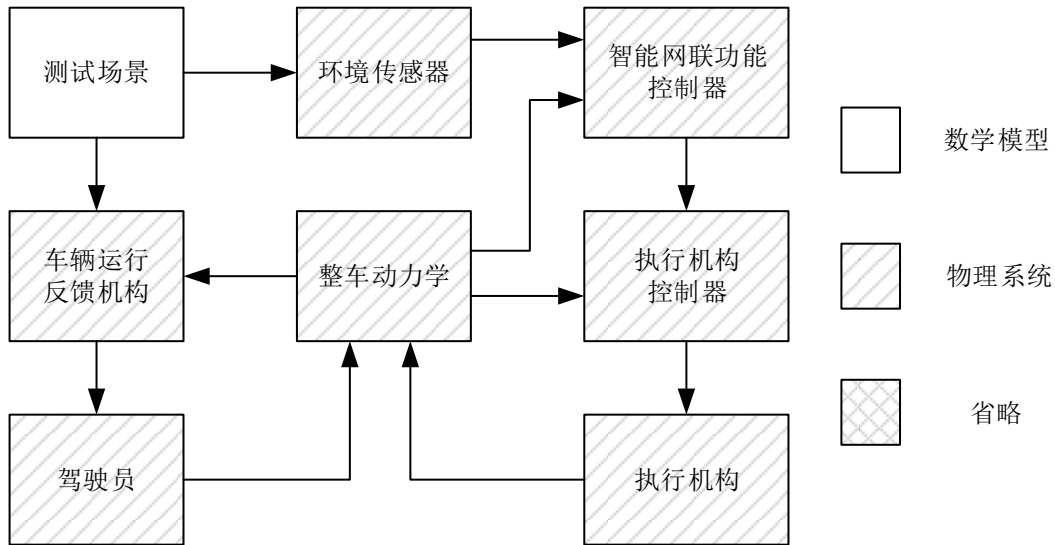


图9.3 车辆在环系统结构图

9.3.2 目的

- 1) 在可控环境下，对车辆系统性能进行较为准确和高效的评估；
- 2) 可以部分程度检验车辆的动态性能，使得测试结果更为准确；
- 3) 能够检验系统中传感器，控制器和执行器间实物的通讯和兼容情况；
- 4) 快速高效地进行多工况的测试，且容易复现，测试的可追溯性好；
- 5) 系统能够给驾驶员较为真实的反馈，减少测试环境偏差影响其状态；
- 6) 能够对系统性能进行定向地测试，避免环境因素的干扰，系统的电磁兼容等测试更为准确；

9.3.3 输入

输入一般包括以下内容：

- 1) 输入一般包括以下内容：
- 2) 自动驾驶系统控制算法；
- 3) 测试场景信息；
- 4) 被控对象数学模型；
- 5) 仿真任务需求；
- 6) 需要验证的控制系统关键指标和控制系统关键参数。

9.3.4 输出

输出一般包括以下内容：

- 1) 对应测试场景下的各种参数和仿真结果；
- 2) 仿真结果的分析结论；
- 3) 自动驾驶系统的性能评估；
- 4) 与自动驾驶系统要求相关的仿真系统的设计验证；
- 5) 仿真结果分析报告。

9.3.5 要求

1) 测试对象为完整的车辆系统，传感器，控制器和执行器均为真实物体系统，且以集成到整车之中；

2) 传感器通过物理系统获取感知信号，信号可以根据测试场景通过物体系统模拟传感器所需的感知信号。也可以通过实际系统根据实车状态和所需场景，搭建对应目标的物理系统，供传感器采集信号。

- 3) 车辆所处工况应与测试场景中的被测对象具有较高一致性;
- 4) 通过转鼓等实现车辆在可控环境下的动态测试, 提高测试的有效性;
- 5) 采用转向力感模拟电机, 运动平台等使得车辆给与驾驶员的反馈更加真实;

10 自动驾驶汽车仿真测试评价方法

10.1 概述

针对自动驾驶汽车驾驶具体的行驶任务, 对应测试场景的危险程度, 场景在实际交通中出现的频次, 两次人工自动驾驶系统之间的车辆行驶距离以及自动驾驶具体功能的特点和性能指标, 选取不同的测试评价指标。并通过量化和归一的方式对其进行综合评价。

10.2 评价方法

自动驾驶汽车仿真测试评价方法包括基于功能的评价方法和基于场景的评价方法。基于功能的评价方法是指针对特定的自动驾驶功能, 在给定测试场景的前提下, 判断测试的自动驾驶功能是否可以在该场景中安全行驶; 基于场景的评价方式是指将测试车辆置于测试场景之中, 在自动驾驶汽车能够安全行驶的前提下, 判断该场景的复杂程度, 例如周围环境的复杂程度, 自动驾驶汽车驾驶任务的复杂程度等。

10.3 通过性评价指标

通过性评价指标针对自动驾驶汽车做出判断以及规定场景内必须实现的目标的评价, 例如自动驾驶汽车的安全性、完备性、经济性、人工干预度等均采用通过性评价指标, 量化上采取 0/1 机制。

10.4 性能评价指标

性能评价指标表征自动驾驶汽车在具体测试场景下预期功能实现的程度。即将具体测试场景下自动驾驶汽车的某些参数值或其推导值作为评价指标。主要针对已实现具体功能的场景下评价其性能, 以及某些极端工况下仅实现部分功能, 但系统逻辑正确的情况。对于自动驾驶汽车的安全性、智能性、舒适性、拟人性等可以采用性能评价指标, 量化上采用差值机制。

11 附录（参考场景）

| 测试分类 | 测试场景 | 细分场景 |
|-------------|-------|-------------------|
| 认知与交通法规遵守能力 | 交通标志 | 警告标志 |
| | | 禁令标志 |
| | | 指示标志 |
| | | 指路标志 |
| | | 旅游区标志 |
| | | 道路施工标志 |
| | 交通标线 | 指示标线 |
| | | 禁止标线 |
| | | 警告标线 |
| | | 减速标线 |
| | | 立面标记 |
| | 交通信号灯 | 红灯 |
| | | 绿灯 |
| 综合驾驶能力 | 起步 | 正常起步 |
| | | 上坡起步 |
| | | 下坡起步 |
| | | 路口红灯变绿灯起步 |
| | 停车 | 前方拥堵缓行停车 |
| | | 到达终点停车 |
| | 跟车 | 前车匀速前进 |
| | | 前车速度变化前进 |
| | | 前车匀速突然急刹 |
| | | 另一车道有车向本车道切入 |
| | 变道 | 正常变道 |
| | | 目标车道后方有快速车 |
| | | 目标车道后方有加速车 |
| | | 目标车道前方有车 |
| | | 另一车道有车同时向目标车道变道 |
| | 路口直行 | 绿灯，无障碍物 |
| | | 绿灯，路口对向车道车辆左转 |
| | | 绿灯，路口右侧车道车辆右转 |
| | | 绿灯，同向车辆掉头 |
| | | 绿灯，相邻车道车辆切入 |
| | | 无红绿灯，无障碍物 |
| | | 无红绿灯，路口对向车道车辆左转 |
| | | 无红绿灯，路口对向行人通过人行横道 |

| | | |
|-------------|-----------------|-------------------|
| | | 无红绿灯，路口右侧车道车辆右转 |
| | | 无红绿灯，路口右侧车道车辆直行 |
| | | 无红绿灯，路口左侧车道车辆左转 |
| | | 无红绿灯，路口左侧车道车辆直行 |
| | | 无红绿灯，路口本侧行人通过人行横道 |
| | | 无红绿灯，同向车辆掉头 |
| | | 无红绿灯，相邻车道车辆切入 |
| | 路口左转 | 绿灯，无障碍物 |
| | | 绿灯，路口对向车道车辆右转 |
| | | 绿灯，路口对向车道车辆直行 |
| | | 绿灯，路口左侧行人通过人行横道 |
| | | 绿灯，通向车辆掉头 |
| | | 无红绿灯，无障碍物 |
| | | 无红绿灯，路口对向车道车辆右转 |
| | | 无红绿灯，路口对向车道车辆直行 |
| | | 无红绿灯，路口左侧行人通过人行横道 |
| | | 无红绿灯，路口右侧车道车辆直行 |
| | | 无红绿灯，路口左侧车道车辆直行 |
| | | 无红绿灯，路口本侧行人通过人行横道 |
| | | 无红绿灯，同向车辆掉头 |
| | 路口右转 | 绿灯，无障碍物 |
| | | 绿灯，路口对向车道车辆左转 |
| | | 绿灯，路口右侧行人通过人行横道 |
| | | 绿灯，路口左侧车道车辆直行 |
| | | 绿灯，路口本侧行人通过人行横道 |
| | | 绿灯，同向车辆掉头 |
| | | 无红绿灯，无障碍物 |
| | | 无红绿灯，路口对向车道车辆左转 |
| | | 无红绿灯，路口右侧行人通过人行横道 |
| | | 无红绿灯，路口左侧车道车辆直行 |
| | | 无红绿灯，路口本侧行人通过人行横道 |
| | | 无红绿灯，路口左侧车道车辆直行 |
| | | 无红绿灯，路口本侧行人通过人行横道 |
| 无红绿灯，同向车辆掉头 | | |
| 路口掉头 | 绿灯，无障碍物 | |
| | 绿灯，路口对向车道车辆直行 | |
| | 绿灯，路口右侧车道车辆左转 | |
| | 绿灯，路口左侧车道车辆右转 | |
| | 绿灯，路口本侧行人通过人行横道 | |

| | | |
|------|---------|-------------------|
| | | 无红绿灯，无障碍物 |
| | | 无红绿灯，路口对向车道车辆直行 |
| | | 无红绿灯，路口右侧车道车辆左转 |
| | | 无红绿灯，路口左侧车道车辆右转 |
| | | 无红绿灯，路口本侧行人通过人行横道 |
| | 通过人行横道 | 红灯，无行人 |
| | | 红灯，行人通过人行横道 |
| | | 绿灯，无行人 |
| | | 绿灯，行人通过人行横道 |
| | | 绿灯，无行人 |
| | | 绿灯，行人人行横道横穿马路 |
| | 通过环岛 | |
| | 通过隧道 | |
| | 通过学校区域 | |
| | 通过公共汽车站 | |
| | 应急车辆避让 | |
| | 超车 | |
| 夜间行驶 | | |

12 附录

