



专题：智能网联汽车与车联网

智能网联汽车测试方案研究与展望

吴冬升, 李凤娜, 夏宁馨, 李大成

(高新兴科技集团股份有限公司, 广东 广州 510663)

摘 要: 对智能网联汽车开展全方位的测试评价, 是智能网联汽车安全上路与产业顺利落地的重要保障。基于智能网联汽车的测试现状、测试技术路径、测试评价规范和标准, 在满足智能网联汽车现有道路测试要求及未来多应用融合方面, 创新性地提出智能网联汽车测试方案总体架构, 并详细阐述虚拟仿真测试、网联测试、自动驾驶功能测试、大规模并发测试、互联互通测试 5 个业务应用。最后结合我国智能网联汽车的实际应用与行业需求, 对智能网联汽车测试的未来发展方向进行展望。

关键词: 智能网联汽车; 虚拟仿真测试; 网联测试; 自动驾驶功能测试; 大规模并发测试; 互联互通测试

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023039

Research and prospect of intelligent connected vehicle test scheme

WU Dongsheng, LI Fengna, XIA Ningxin, LI Dacheng

Gosuncn Technology Group Co., Ltd., Guangzhou 510663, China

Abstract: The comprehensive test and evaluation of intelligent connected vehicles is an important guarantee for the safety of intelligent connected vehicles on the road and the smooth landing of the industry. Based on the test status, test technology path, test evaluation specifications and standards of intelligent connected vehicles, the overall architecture of intelligent connected vehicle test scheme was proposed innovatively in terms of meeting the existing road test requirements of intelligent connected vehicles and future multi-application integration. And the virtual simulation test, network connection test, automatic driving function test, large-scale concurrent test and interconnection test five business applications were elaborated. Finally, combining the practical application and industry demands of intelligent connected vehicles, the future development directions of intelligent connected vehicle test were prospected.

Key words: intelligent connected vehicle, virtual simulation test, network connection test, automatic driving function test, large-scale concurrent test, interconnection test

0 引言

智能网联汽车作为新一轮科技革命的重要载体, 已成为全球汽车产业转型升级的战略发展方

向。目前智能网联汽车正处于技术研发到测试应用再到商业化运营的全新发展阶段。以道路测试和示范运行为主要路径的智能网联汽车测试已成为智能网联汽车核心技术研发与商业模式探索中的共



性需求，也是智能网联汽车商用化的必由之路。

2018年4月，工业和信息化部等联合出台《智能网联汽车道路测试管理规范（试行）》；2018年8月，全国汽车标准化技术委员会等行业组织共同编制《智能网联汽车自动驾驶功能测试规程（试行）》；2021年7月，《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范（试行）》发布。除管理规范外，国内外还陆续出台测试评价标准，如GB 7258、JT/T 1178、JT/T 325、JT/T 1094等^[1]。上述多项文件的陆续出台，一方面为智能网联汽车测试评价工作的开展提供政策依据，另一方面规范促进智能网联汽车技术应用与产业发展。

目前传统的汽车试验场及相关测试评价方法和工具主要针对传统汽车的单车性能测试，随着智能网联汽车普及与应用扩大，传统试验场已无法满足智能网联汽车测试需求，这就需要开发全新的测试评价方法、测试标准流程、测试用例以及支撑工具平台，构建软硬件一体的专属智能网联汽车的测试体系。

当前智能网联汽车测试包括道路测试与仿真测试两条主要技术路径。道路测试又分为封闭场

地测试与真实开放道路测试。仿真测试是加速智能网联汽车技术研发和安全保证的核心环节，封闭场地测试是研发过程的有效验证手段，真实开放道路测试是检测系统性能的必要步骤，也是商用化的前提。本文将面向智能网联“车-路-网-云”一体化建设，提出智能网联汽车测试综合解决方案，探讨未来智能网联汽车测试的发展方向。

1 智能网联汽车测试方案总体架构

通过构建“车-路-网-云”一体化系统，打造涵盖虚拟仿真测试、网联测试、自动驾驶功能测试、大规模并发测试、互联互通测试五大测试业务的智能网联汽车测试场，建立机制化、安全化、高效化的测试场管理体系，支持产业上下游企业开展智能网联汽车测试运行及创新示范应用。智能网联汽车测试方案整体规划主要分为测试场地、基础设施、平台系统与测试业务4个部分，具体如图1所示。

测试场地包括模拟城市道路、模拟高速公路、模拟特殊道路等内容。

基础设施包括摄像机、激光雷达、毫米波雷达等前端感知设备，多接入边缘计算（multi-access

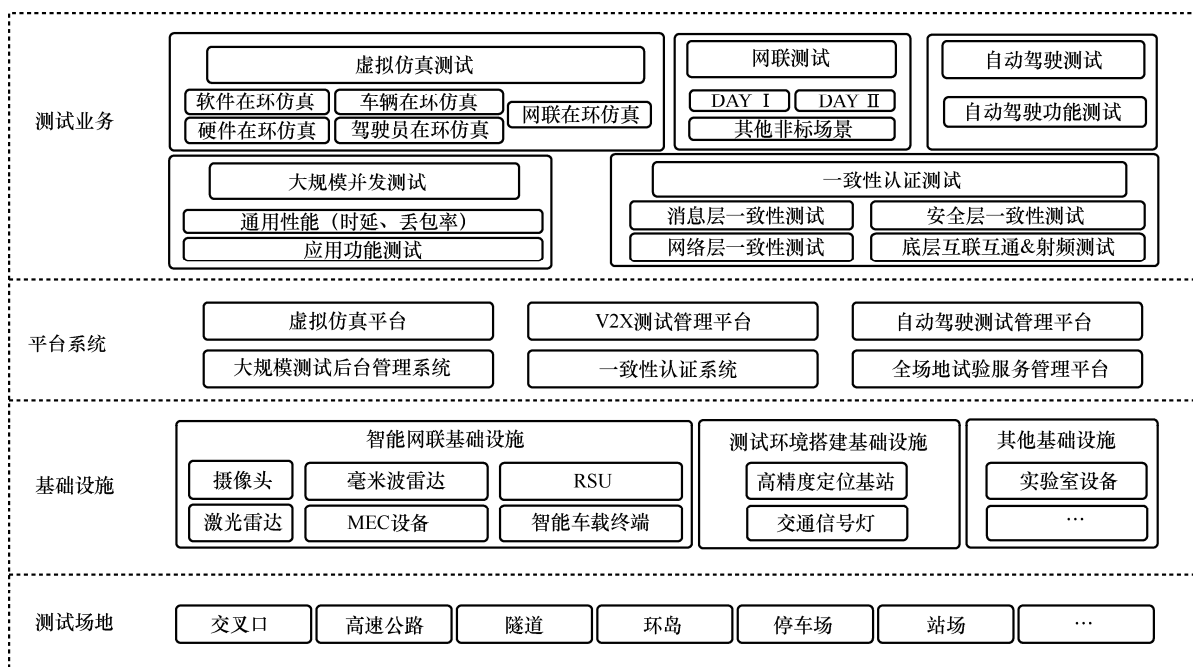


图1 智能网联汽车测试方案整体规划

edge computing, MEC), 设备路侧单元 (road side unit, RSU) 以及配套的高精度定位基站、交通信号灯、实验室设备等。

平台系统则包括虚拟仿真平台、车联网(vehicle to everything, V2X) 测试管理平台、自动驾驶测试管理平台、大规模测试后台管理系统、一致性认证系统、全场地试验服务管理平台。基于前五大应用平台可针对性地实现五大测试业务, 基于最后的全场地试验服务管理平台则可实现测试场环境的全交通要素呈现以及对全场地的全景监控管理。

2 业务应用测试

2.1 虚拟仿真测试

2.1.1 测试方案

智能网联汽车需在商业化运营前完成大量道路测试, 测试过程需百万千米的实车测试, 耗时耗力, 且测试过程中受各因素制约, 需要基于场景库的仿真测试实现^[2]。

虚拟仿真测试主要采用硬件设备、网络环境和仿真模型所构建的计算平台来模拟车辆的实际道路运行情况。根据所需资源和测试目标, 分为

软件在环仿真、硬件在环仿真、车辆在环仿真、驾驶员在环仿真和网联在环仿真^[3]。通过实际道路打造的基于数字孪生的网联虚拟仿真测试平台, 可接入感知设备和交通信号灯、智慧灯杆、交通标志标牌等道路基础设施, 基于智能计算单元开展融合感知计算, 完成“人-车-路-网”全息仿真映射, 然后依据相关测试标准构造可配置的网联测试场景应用, 完成智能网联车辆感知、决策、控制的闭环仿真测试。基于数字孪生的网联虚拟仿真测试平台如图2所示。

2.1.2 测试流程

整个仿真测试流程包括仿真数据输入、仿真测试环境搭建、仿真测试场景集构建, 以及仿真测试与评估。仿真测试与评估流程如图3所示。

(1) 仿真数据输入

具体的测试输入内容包括被测算法及仿真模型、自动驾驶功能定义及运行设计条件 (operation design condition, ODC)、安全要求及接受准则、企业模拟仿真自测数据等。

(2) 仿真测试环境搭建

将基于 ODC 覆盖的方法建立的测试场景集作



图2 基于数字孪生的网联虚拟仿真测试平台

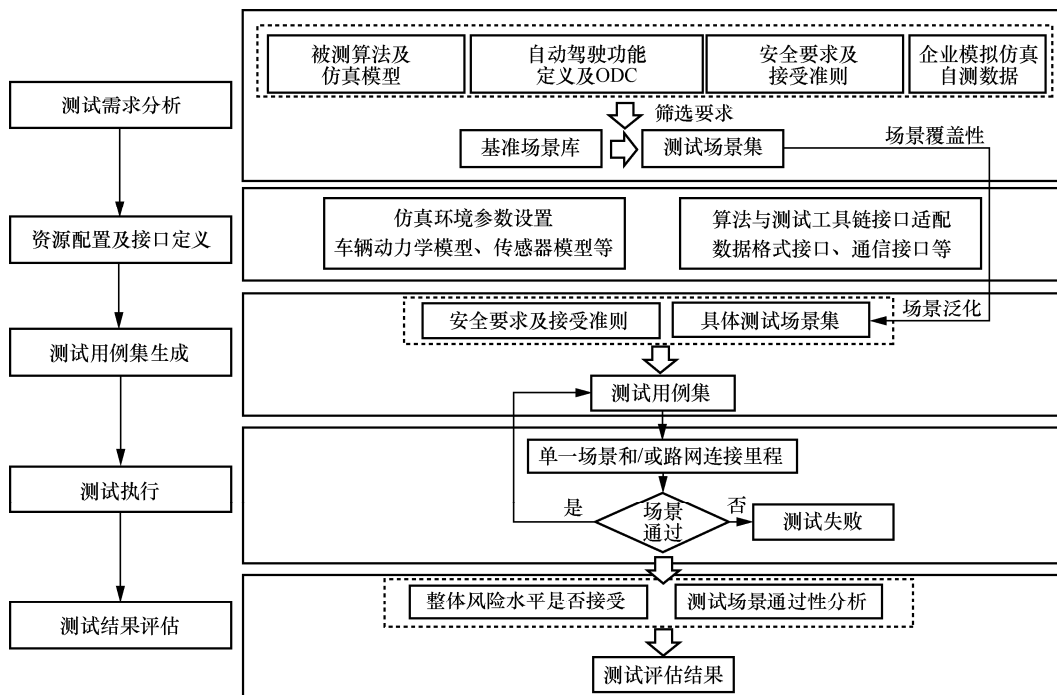


图3 仿真测试与评估流程

为输入，导入传感器模型和车辆动力学模型，在场景覆盖度分析、场景泛化策略分析等测试策略指导下，对交通流模型提供的模拟交通流进行融合，通过场景分析、地图分析、仿真运算、模型耦合、时间同步等操作，实现测试场景的仿真，建立能满足自动驾驶算法测试要求的测试环境^[4]。

(3) 仿真测试场景集构建

首先依托自然驾驶、交通事故、技术标准规范等方面的数据，构建由多源数据驱动的涵盖高速、城市等场景的基准场景库；然后开展被测车辆的自动驾驶功能定义、ODC 和安全要求等的分析工作，完成场景筛选以构建测试场景集；最后完成逻辑场景泛化以提取具体测试场景集^[4]。

(4) 仿真测试与评估

基于构建的仿真测试环境与仿真测试场景集，开展测试执行与评价，在测试执行过程中，可完成单一场景和/或路网连续里程仿真测试，然后对比输出的测试结果与评价标准，一方面判断整体风险水平能否接受，另一方面得到测试场景通过性。

2.2 网联测试

2.2.1 测试方案

网联测试主要根据 T/CSAE 53—2020^[5]、T/CSAE 157—2020^[6]中的场景，以及行业对网联赋能自动驾驶的进一步需求，在实际道路场景中因地制宜地开展针对网联功能的测试。

网联测试系统的搭建，包括车、路、网、云 4 个部分。网联测试系统架构如图 4 所示。基于此构建的完整测试环境，可实现多种典型交通场景复现，同时相关数据还可与平台对接，实现数据的汇聚分析，助力测试场景数据库构建。

2.2.2 测试流程

(1) 明确测试场景库技术要求

面向 V2X 网联应用的场景库技术要求及测试方法，是基于 V2V (vehicle to vehicle)、V2I (vehicle to infrastructure) 及 V2P (vehicle to pedestrian) 场景的场景库技术要求，以车载设备或其中的 V2X 软件模块为被测对象的在环测试系统架构及接口技术测试，适用于 V2V、V2I 及 V2P 场景库数据构建，以及基于场景库的仿

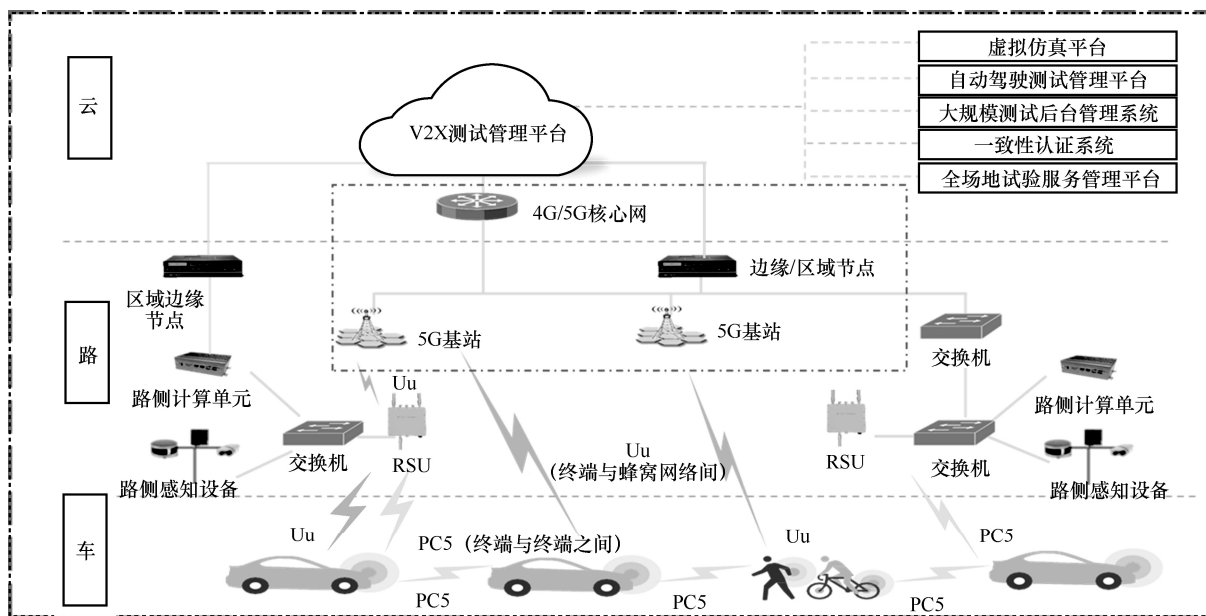


图4 网联测试系统架构

真在环测试。V2X 网联场景库由多条测试用例组成。测试用例包括场景描述、场景数据、场景结果 3 类数据。

(2) 具体测试流程

场景库向测试系统发送测试用例数据；测试系统根据测试用例中的场景描述数据，初始化测试参数，并分解为主车状态数据、主车位置数据及网联环境数据；测试系统通过接口将主车状态数据、主车位置数据发给被测对象。同时测试系统通过接口将场景的环境数据经安全层、网络层、消息层和物理层调制发给被测对象；被测对象通过相应接口收到数据后，触发相应预警信息，并通过接口返回到测试系统，对比测试系统和测试用例中的预期结果，进而输出测试结果。测试流程如图 5 所示。

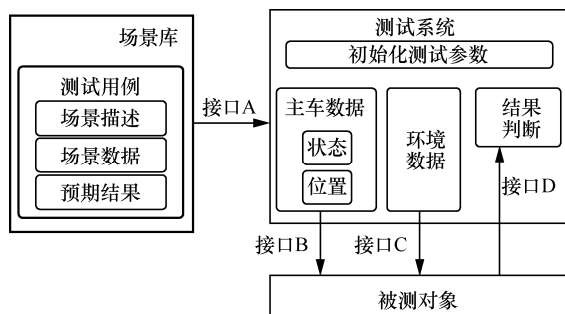


图5 测试流程

测试开始前测试系统需采集当前测试用例下被测车辆预期预警信息，用于评价测试过程中被测车辆是否正确预警。测试过程中如无特殊要求，被测车辆应沿当前车道中心线行驶，测试系统应实时采集、检测测试数据，验证被测车辆网联功能能否通过视觉、听觉或触觉正确预警，且预警结果是否符合相应测试用例要求。

2.3 自动驾驶功能测试

2.3.1 测试方案

自动驾驶功能测试主要根据《智能网联汽车自动驾驶功能测试规程（试行）》^[7]中的 14 个测试项目及对应的测试标准，在封闭道路中开展针对智能网联汽车的自动驾驶功能的测试与评价。自动驾驶功能测试系统的搭建，依托自动驾驶测试管理平台实现对自动驾驶车辆的车辆接入管理、车辆位置监控、测试指令下发、车辆行为监控，基于对自动驾驶车辆行为的实时监测，完成对车辆的测试数据分析与测试结果输出。自动驾驶功能测试示意图如图 6 所示。

2.3.2 测试流程

测试执行过程中车辆操作分为两部分：一是无外界干扰物状态下行驶，测试车辆由静止启动

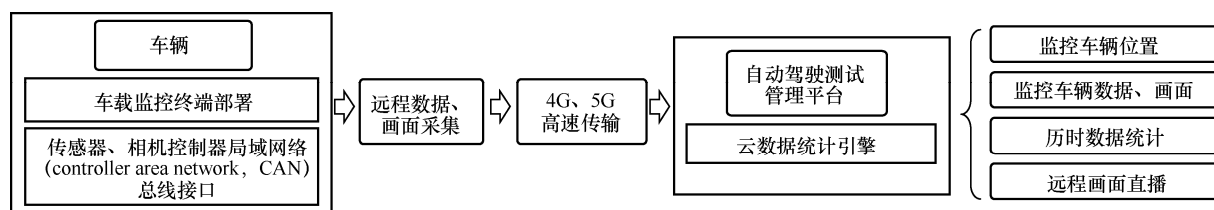


图6 自动驾驶功能测试示意图

达到目标车速，驶向指定终点；二是有外界干扰物状态（即在道路上融合功能测试场景）下行驶，验证测试车辆能否准确识别、判断道路场景，并做出相应反应到达指定地点。测试步骤如下。

（1）记录测试车辆的起始里程数、环境温度 T 、风速 V 、光照强度、天气情况。

（2）测试车辆开启自动驾驶模式并选定终点，车辆由静止加速至指定车速，在静止前开始采集数据。

（3）驾驶员注意力集中，实时监测测试车辆状态，出现危险能及时接管车辆。

（4）测试人员实时记录测试车辆的运行情况，通过功能场景测试区域时，观察车辆通过情况，记录车辆行驶中在有外界干扰物时的异常反应。

（5）在测试车辆到达指定地点时，记录里程值，路试结束，或给出下一目的地继续测试。

（6）测试车辆出现碰撞事故或者存在碰撞风险，驾驶员接管停车，记录此时的里程值，实验结束。

（7）测试车辆行驶过程中出现问题但不影响继续行驶时，测试可继续进行直至驶向终点，测试员准确记录异常情况、时间及地点。

（8）测试车辆在自动驾驶模式中累计行驶里程达 1 000 km，实验结束。

2.4 大规模并发测试

2.4.1 测试方案

大规模并发测试主要通过部署百余台智能网联车载终端和智能网联路侧终端，完成具备大规模密集通信条件的实际外场测试环境的构建工作，然后依托大规模测试后台管理系统，开展大规模并发测试工作，在实际的应用场景中完成对智能网联系列产品的通信性能与应用功能的测试与评价工作。

大规模并发测试系统主要包括设备端和平台端两部分。其中设备端包括终端设备和用于搭载终端设备的轮式无人地面车，终端设备主要包括车载单元（on board unit, OBU）和 RSU，分为被测设备和背景设备，被测设备为测试场景的主体。平台端则为大规模测试后台管理系统，具备设备控制、状态监测、测试报告、测试回放、实时分析、前端展示等功能。大规模并发测试示意图如图 7 所示。

测试场景的规划主要包括通信性能测试和应用功能测试两部分。通信性能测试方面，基于大规模并发测试系统可完成端到端时延、空口时延、验签时延、丢包率、收发包间隔等技术指标。应用功能测试方面，可在压力环境下测试前向碰撞预警、交叉路口碰撞预警、盲区预警、交通信号灯提醒、

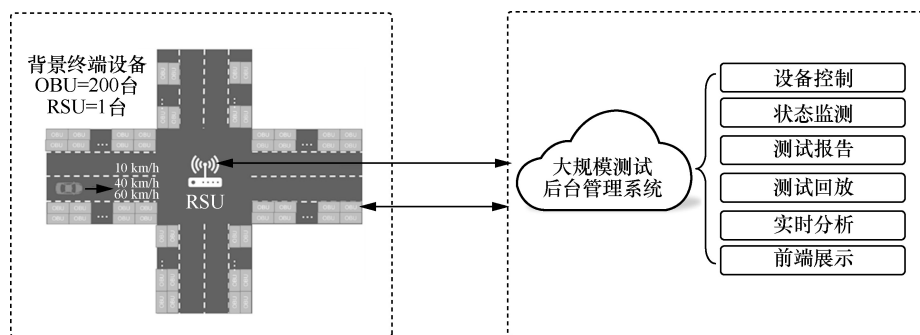


图7 大规模并发测试示意图

弱势交通参与者预警等 V2V 和 V2I 应用功能。

2.4.2 测试流程

(1) 背景设备测试参数配置

将背景 OBU 和 RSU 频段设置为 5 905~5 925 MHz, 将按照标准格式进行大规模测试消息发送。OBU 发送两种字节长度固定的消息, 模拟真实场景下基础安全消息 (basic safety message, BSM) 发送; RSU 发送 4 种不同字节长度的消息, 模拟真实场景下道路安全消息 (road safety message, RSM)、路侧信息 (road side information, RSI)、交通信号灯相位与时序消息 (signal phase and timing message, SPAT)、地图信息 MAP 发送^[8]。

(2) 测试设备部署

测试需要使用两台 V2X 测试设备, 两台测试设备均能接收背景 OBU 的 V2X 消息后开展后台分析工作, 两台设备中的一台作为发射端, 另一台作为接收端。两台测试设备均支持通过 PC5 口发送测试数据包。在测试过程中, 用作接收端的测试设备主要通过提取测试包中的对应字段得到丢包率与时延数据。

(3) 测试用例设计与结果演示

基于实际的道路交通通行情况对直行路段与交叉路口的交通情况进行模拟, 开展大规模并发测试。下面以单车行驶场景为例进行演示说明: A 车从起点驶向终点, 车速为 30 km/h, B 车静止于起点, 由 A 车向 B 车发包, 单车行驶场景测试结果见表 1。

2.5 互联互通测试

2.5.1 测试方案

V2X 互联互通测试, 可在贴近 V2X 实际应用的场景中对备选产品进行全面评价, 涵盖识别率测试、准确率测试、识别距离测试、识别时间测

试、传输速率测试等, 可有效解决不同厂商设备通信差异问题, 构建准入体系, 保障所有 V2X 设备均可在实际环境中稳定、安全、可靠地运行。

互联互通测试需结合现有道路和网联基础设施布置情况、地形、周边环境等基本条件, 充分考虑利用现有设施与设备。测试方案需要对每个测试项目的测试路线回路和多个测试项目之间的路线干扰情况进行综合考虑, 使得测试既能达到法规要求, 又能最大限度地提高试验场的测试容量^[9]。

互联互通测试方案示意图如图 8 所示, 其中背景设备测试控制接口主要用于控制背景设备发送特定的背景消息, 或者从背景设备收集回传数据; 被测设备测试控制接口主要用于通知被测设备启动特定测试流程, 或者从被测设备收集回传数据; 背景设备可以是背景车辆, 也可以是路侧设备; 被测设备可以是 OBU、RSU, 也可以是 MEC 设备。

2.5.2 测试流程

下面以安全层一致性测试为例说明具体测试流程, 安全层一致性测试用例^[10]如下。

测试编号: TC_OBU_SPDU_TS_BV_10。

被测对象类型: OBU。

测试项目: 被测器件 (device under test, DUT) 签发安全协议数据单元 (secured protocol data unit, SPDU) 测试。

测试子项目: 数字证书签名信息测试。

测试目的: 验证 DUT 产生的 SPDU 中数字证书签名信息是否正确。

预置条件:

(1) DUT 已加电启动。

(2) DUT 已与全球导航卫星系统 (global navi-

表 1 单车行驶场景测试结果

测试例	发送配置				测试结果		
	发包间隔/ms	发包数量/个	包大小/byte	收包率	最小时延/ms	最大时延/ms	平均时延/ms
A 车从起点驶向终点, B 车静止于起点	100	300	300	97.67%	10	44	22.6
	100	300	300	92.33%	10	44	21.6
	400	80	300	98.75%	18	77	43.8
	400	80	300	97.50%	10	66	36.6



gation satellite system, GNSS) 完成同步。

(3) DUT 或测试系统无线信号捕获工具范围内无其他同类型设备。

(4) DUT 已预置测试系统提供的安全证书及可信根证书列表消息。

(5) 除接收测试系统发出的相关指令外, DUT 不会主动发送消息。

测试结构: 如图 8 所示。

测试步骤:

步骤 1 配置 DUT 发送 SPDU 消息。

步骤 2 验证 DUT 发送的 SPDU 是否可依据正则八位字节编码规则 (canonical octet encoding rules, COER) 正确编码。

步骤 3 验证 DUT 发送的 SPDU 消息中数字证书签名信息是否正确。

预期结果:

步骤 2 中, 测试系统 (test system, TS) 接收到的 SPDU 可以 COER 正确解码。

步骤 3 中, SPDU 消息结构正确, 且签名信息满足如下要求。

- 签名算法为 SM2。

- 签名信息正确。

在整个安全层一致性测试中, 每个测试用例由测试编号、被测对象类型、测试项目、测试目的、预置条件、测试结构、测试步骤、预期结果等构成。在设计时, 测试用例同时包括合法的输入条件与不合法的输入条件, 并能够满足所有互联互通测试需求, 反映实际过程中的问题。

3 发展展望

针对智能网联, 国家战略规划、行业标准规范、整体产业布局、产业融合指导意见陆续出台, 伴随各主要城市示范区相继设立, 智能网联汽车已经完成关键一步的跨越, 未来在政策指引、标准规范以及示范区应用实践的結合下, 智能网联汽车有望迎来加速发展。其中, 智能网联汽车测试已成为智能网联技术研发创新和商业模式探索的共性需求, 也是智能网联汽车真正实现商业化的必由之路。

为加快智能网联化汽车技术和产业发展, 提供良好的测试场环境和条件, 我国相关部委、地方政府、研究机构及整车厂在 2015 年前后开始积极参与智能网联汽车测试及示范基地的建设及运营, 开

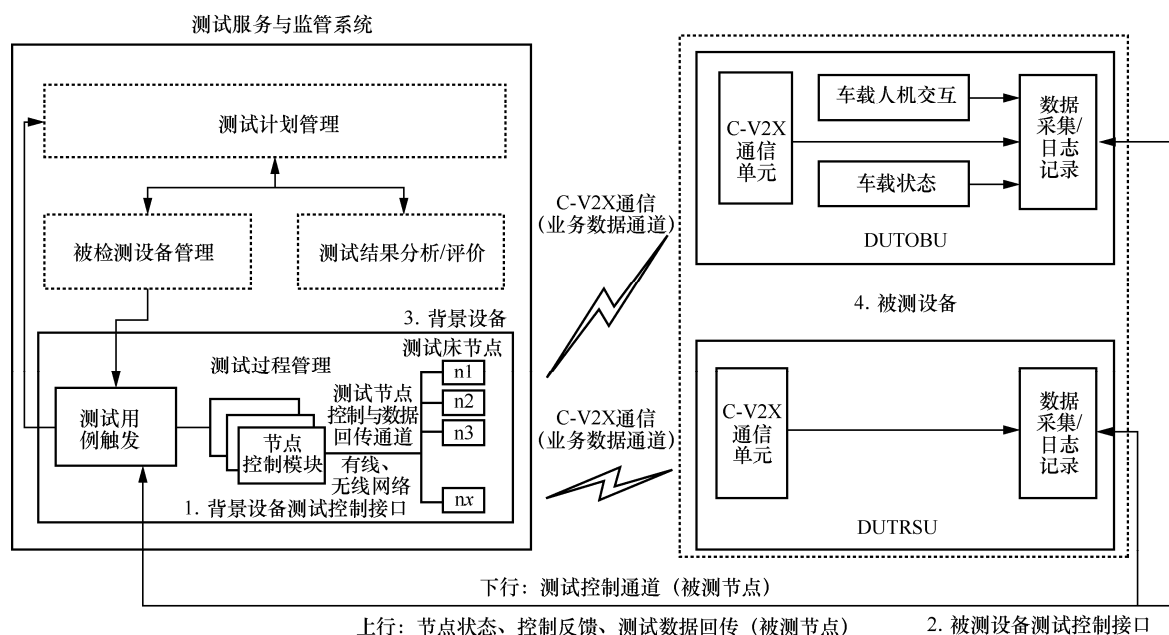


图 8 互联互通测试方案示意图

展 V2X 与自动驾驶安全性、舒适性、敏捷性和智能性等全方面的智能网联汽车测试评价^[11]。

随着车路协同技术路线的成熟,未来需要打造“车-路-网-云”一体化的智能网联汽车测试场。首先,通过布局智能网联汽车测试环境,支持智能网联汽车产业上下游企业开展智能网联汽车测试运行及创新示范应用。其次,开展智能网联汽车测试前瞻性、共性技术研究,突破面向产业应用特定需求的关键技术,提升自主创新能力,并制定相关技术标准和建设规范,推动相关产业规范化发展。再次,构建测试场景数据库,开展智能网联数据运营,提升数据价值。最后,形成国内示范性智能网联和自动驾驶测试场,抢占智能网联汽车行业制高点,推动建设智能网联产业聚集区。

参考文献:

- [1] 李国永. 智能网联汽车测试评价及问题分析[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(9): 9-13.
LI G Y. Test evaluation and problem analysis for intelligent connected vehicles[J]. Automobile Applied Technology, 2022, 47(9): 9-13.
- [2] 康诚, 严欣, 唐晓峰. 智能网联汽车自动驾驶仿真测试技术研究综述[J]. 时代汽车, 2022(22): 4-6.
KANG C, YAN X, TANG X F. Summary of research on simulation test technology of intelligent networked vehicle automatic driving[J]. Auto Time, 2022(22): 4-6.
- [3] 朱珩, 王秀峰, 刘晨楠, 等. 智能网联商用车测试技术与展望[J]. 智能网联汽车, 2022(3): 91-96.
ZHU H, WANG X F, LIU C N, et al. Research and prospect of intelligent networked commercial vehicle testing technology[J]. Intelligent Connected Vehicles, 2022(3): 91-96.
- [4] 刘法旺, 何丰, 周时莹, 等. 基于场景的智能网联汽车模拟仿真测试评估方法与实践[J]. 汽车工程学报, 2022: 已录用.
LIU F W, HE F, ZHOU S Y, et al. Scenario-based virtual testing and assessment method and practice for intelligent and connected vehicles[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022: accepted.
- [5] 中国汽车工程学会. 合作式智能运输系统 车用通信系统 应用层及应用数据交互标准(第一阶段): T/CSAE 53—2020[S]. 2020.
China SAE. Cooperative intelligent transportation system vehicular communication: application layer specification and data exchange standard (phase I): T/CSAE 53—2020[S]. 2020.
- [6] 中国智能网联汽车产业创新联盟. 合作式智能运输系统 车用通信系统 应用层及应用数据交互标准(第二阶段): T/CSAE 157—2020[S]. 2020.
CAICV. Cooperative intelligent transportation system vehicular communication: application layer specification and data exchange standard (phase II): T/CSAE 157—2020[S]. 2020.
- [7] 中国智能网联汽车产业创新联盟, 全国汽车标准化技术委员会智能网联汽车分技术委员会. 智能网联汽车自动驾驶功能测试规程(试行)[Z]. 2018.
CAICV, SAC/TC114/SC34. Test rules for autonomous driving function of intelligent networked vehicles (trial)[Z]. 2018.
- [8] 夏小涵, 林晓伯, 邱佳慧, 等. 基于 LTE-V2X 的大规模通信场景网络层性能测试与分析[J]. 邮电设计技术, 2021(10): 20-24.
XIA X H, LIN X B, QIU J H, et al. Performance test and analysis of network layer in large-scale communication scenario based on LTE-V2X[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2021(10): 20-24.
- [9] 刘平, 刘春杰, 赵铁拓. 智能网联试验场规划设计及测试技术[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(11): 328-330.
LIU P, LIU C J, ZHAO T T. Planning, design and testing technology of intelligent network connection test site[J]. Highway Traffic Science and Technology (Applied Technology Edition), 2019, 15(11): 328-330.
- [10] 中国信息通信研究院. 基于 LTE 的车联网无线通信技术通信安全协议一致性测试用例[Z]. 2020.
CAICT. Communication security protocol consistency test case on communication security protocol consistency test of LTE-based vehicular communication technology[Z]. 2020.
- [11] 邓晓峰, 王润民, 徐志刚, 等. 我国智能网联汽车测试及示范基地发展现状[J]. 汽车工业研究, 2019(1): 6-13.
DENG X F, WANG R M, XU Z G, et al. Development status of intelligent networked automobile testing and demonstration base in China[J]. Auto Industry Research, 2019(1): 6-13.

[作者简介]



吴冬升(1975—), 男, 博士, 高新兴科技集团股份有限公司高级副总裁, 国家企业技术中心(高新兴)副主任, 主要研究方向为智慧城市、智慧交通、5G、智能网联、自动驾驶、大数据、人工智能等。

李凤娜(1983—), 女, 高新兴科技集团股份有限公司智能网联方案支撑部总监, 主要研究方向为智慧交通、智能网联、ETC、电子车牌、智慧停车、智慧城市融合创新等。

夏宁馨(1996—), 女, 高新兴科技集团股份有限公司解决方案经理, 主要研究方向为智能网联、智慧交通、智慧城市等。

李大成(1978—), 男, 高新兴科技集团股份有限公司智能网联事业部副总经理、正高级工程师, 主要研究方向为智慧交通、智能网联、智慧城市、人工智能等。