

# 基于数字孪生的网联 自动驾驶测试方法研究

## Test Method of Connected and Automated Vehicles Based on Digital Twin

葛雨明 /GE Yuming<sup>1</sup>, 汪洋 /WANG Yang<sup>2</sup>, 韩庆文 /HAN Qingwen<sup>2</sup>

(1. 中国信息通信研究院, 北京 100191;

2. 重庆大学, 重庆 400030)

(1. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China;

2. Chongqing University, Chongqing 400030, China)



**摘要:** 数字孪生 (DT) 可以虚拟化地呈现出系统的整个生命周期, 非常适合在自动驾驶测试中使用。提出了在有限环境下利用 DT 进行网联自动驾驶测试的方法, 即在自动驾驶的仿真测试环境中, 利用 DT 的映射实现虚拟复杂道路场景下真实的网联自动驾驶车辆测试。相关实验说明, 该方法能够有效地支持开展网联自动驾驶测试。

**关键词:** 自动驾驶; DT; 虚拟仿真

**Abstract:** The Digital Twin (DT) provides virtual representations of systems along their lifecycle, and should be used in autonomous driving test. In this paper, a method of using DT to carry out networked couplet autonomous driving test in a finite environment is proposed: In the simulation test environment of automatic driving, the test of real automatic driving vehicles under the virtual complex road scene can be realized by using the DT mapping. The experimental results show that this method can effectively support the development of the autonomous driving test.

**Keywords:** autonomous driving; DT; virtual simulation

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001006

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200220.2219.002.html>

网络出版日期: 2020-02-21

收稿日期: 2019-12-22

数字孪生 (DT) 是物理系统 (物理孪生) 的数字化表示, 能够模拟运行系统的整个生命周期并与物理孪生进行同步的映射<sup>[1]</sup>。DT 的概念始于 2002 年, 最初被用于航空航天领域。最近, 其他一些工业部门如制造业、工业工程, 以及机器人领域也逐步开始了解和尝试这项技术<sup>[2]</sup>。

随着自动驾驶的发展, 对 DT 功能的测试和验证成为自动驾驶汽车研发的重大挑战之一<sup>[3]</sup>。一些研究人员认

为使用仿真测试可以很好地解决这一难题<sup>[4]</sup>, 例如在虚拟仿真中, 进行的软件测试 (SIL)、硬件在环测试 (HIL)、车辆在环测试 (VEHIL) 以及混合仿真测试<sup>[5]</sup>。它可以快速模拟任何场景, 但不能验证真实的情况。相比仿真测试, 传统汽车行业更依赖现场测试。然而, 真正的道路测试在极端情况下是昂贵且费时的, 有一些场景甚至无法进行测试<sup>[6-7]</sup>。2017 年, M-City 发布了一份研究报告<sup>[8]</sup>, 提出了一种数据驱动的方法来评估自动驾驶汽车。与纯虚拟仿真不同的是, 它使用真实世界的驾驶数据来构建测试场景。这是一种面向

DT 的方法, 但这种方法是从主动安全的角度发展起来的, 没有引入车用无线通信 (V2X) 技术。

V2X 技术不仅可以为道路车辆提供非视距的感知信息, 还可以在车辆和云数据中心之间建立通信链路; 因此, 我们认为 V2X 技术可以作为连接物理空间和网络空间的纽带, 在基于 DT 的自动驾驶测试中发挥重要作用。V2X 技术可以将场景信息发送到道路的被测车辆上, 并提供道路虚拟测试功能。尽管 DT 被认为是一项颠覆性的技术, 但它仍处于概念阶段, 只有少数研究专门讨论了其在制造领域的

基金项目:

国家重点研发计划资助 (2018YFB0105200)

构建和实现方法。所以，目前还没有成熟的基于DT的自动驾驶测试方案。

近几年，中国信息通信研究院研发布局了基于DT的网联自动驾驶测试原型系统，利用V2X技术实现传感器数据上传和虚拟场景信息发布的全过程，并进行了道路车辆测试。相应的测试结果表明，该系统能够支持低延迟的网联自动驾驶测试。

### 1 基于DT的网联自动驾驶测试框架

在实践中，不同行业对于DT的定义和理解可能不同。自动驾驶开发人员将其视为一套增强现实方案。在某种意义上，面向DT的测试系统是指通过通信网络在现实世界(物理空间)收集数据，利用网络空间的大规模数据处理技术对数据进行分析，并将结果反馈到物理空间来解决现实世界问题的信息物理系统(CPS)。每个CPS包括智能机器、存储系统和生产设施，

它们可以自主和智能地交换信息，做出决策并触发行动，能够互相控制<sup>[9]</sup>。

基于DT的网联自动驾驶测试方法包括2个关键步骤：一是采集真实的驾驶数据，二是生成复杂场景。道路车辆通过传感器和V2X采集和发布行驶信息，并完成数据融合处理，然后将相应的信息上传到仿真平台。仿真平台根据实时驾驶信息选择测试场景，并将相应的信息反馈给道路车辆。道路车辆控制系统对场景信息进行响应，并将响应输出并上传到仿真平台。仿真平台对测试结果进行判断，生成测试报告。如图1所示，该测试方案包括3层，即实地测试层、网络传输层和实验测试层。

(1) 实地测试层。实地测试层包括3部分：被测车辆、虚拟汽车与平视显示器(HUD)、真实的测试场地等。

车辆行驶信息由车内传感器采集，真实驾驶环境信息由周围车辆和

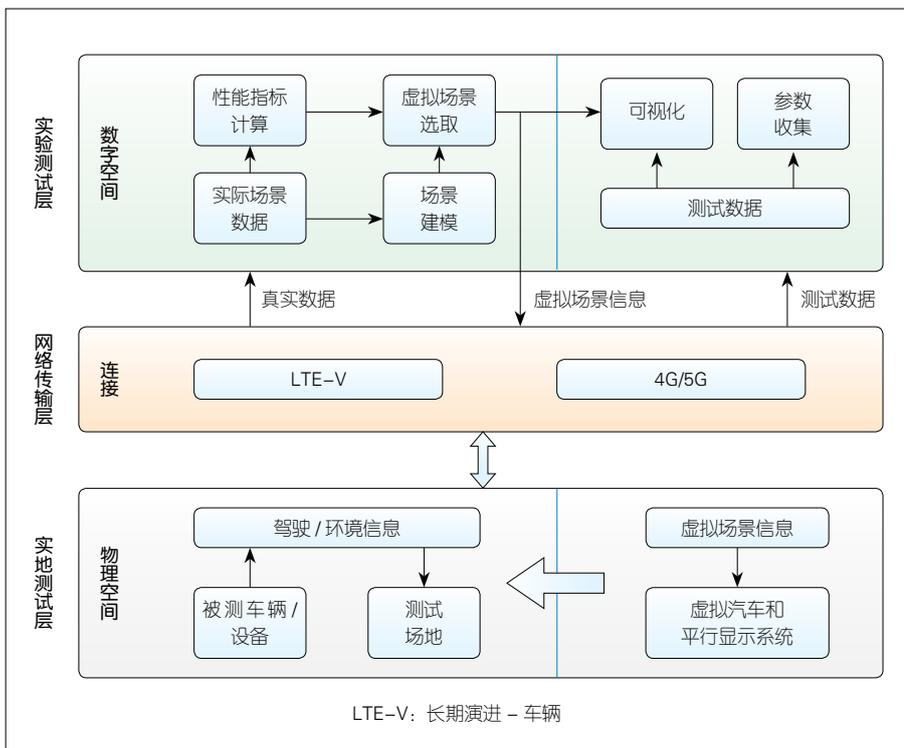
雷达、摄像头等路侧设备采集，虚拟场景信息由云数据库提供，并在HUD上显示。这里假设所有车辆都配备了LTE-V2X和4G/5G模块。

(2) 网络传输层。网络传输层包括2种通信方式：一种是LTE-V2X的直连通信链路，另一种是4G/5G蜂窝通信链路。LTE-V2X用于采集环境信息，如道路信息、周围车辆行驶状态、行人状态等，4G/5G用于建立物理空间和虚拟空间之间的连接。显然，网络传输层的性能会对自动驾驶测试的实时性产生致命的影响，可以通过车辆控制器的响应延迟来体现。这里我们将基本性能参数做了如下的定义。

- 被测车辆速度：0~130 km/h；
- 通信覆盖半径：>300 m；
- 车辆状态信息更新频率：10~20 Hz；
- 数据速率(下行)>100 Mbit/s，数据速率(上行)>20 Mbit/s；
- 传输延迟<20 ms。

此外，表1列出了需要通过V2X发送的参考消息内容，以用于开展网联自动驾驶测试。

(3) 实验测试层。实验测试层包括通道建模、性能指标计算、虚拟化和性能采集3个部分。在场景生成过程中，要考虑道路环境(车道、车道线、路面、天气和光照、场景要素)、交通状况(车流、行人拥挤、自适应巡航控制)、交通参与者(车辆、行人、障碍物)和环境传感器(雷达、摄像机、全球定位系统/地图、无线通信)等影响因素，构建1:1的数字场景模型。模拟器应支持复杂的道路场景建模，如图2所示。测试过程中，测试人员会选择测试场景，并将相应的场景信息通过4G/5G网络发送到被测车辆。



▲图1 基于数字孪生的网联自动驾驶测试框架

### 2 测试场景设计

该测试方案包括纯虚拟测试、传

传感器数据测试和实车测试 3 个阶段，如图 3 所示。

### 2.1 纯虚拟测试

DT 测试方案的第 1 阶段是纯虚拟测试。这种测试与传统的虚拟仿真类似，主要步骤如下：

- 第 1 步，根据测试要求和数据构建道路场景；
- 第 2 步，设置车辆参数（行驶参数和传感器参数）；
- 第 3 步，增加混合交通干扰；
- 第 4 步，添加控制算法；
- 第 5 步，启动实验仿真。

### 2.2 传感器数据测试

测试的第 2 阶段是基于真实传感器数据的测试，如图 4 所示。在此过程中，真实世界的传感器数据被收集并通过蜂窝网络发送到数据中心。远程的驾驶系统根据传感器数据进行决策，并将决策信息反馈给测试系统。

### 2.3 实车测试

在这个阶段，使用真实车辆作为被测装置。车辆信息通过 4G/5G 网络发送到虚拟仿真器。图 5 中显示了 2 个典型的仿真场景。在虚拟仿真测试的基础上，加入交通流和自动驾驶算法来模拟真实场景，并及时回传给真实的自动驾驶车辆。控制器的决策结果将送回中央控制仿真器，测试将在自动驾驶算法的控制下完成。

## 3 测试结果演示及分析

### 3.1 测试结果演示

为了验证测试架构的有效性，我们在中国信息通信研究院办公地进行了基于 DT 的网联自动驾驶测试原型系统的搭建，相关测试的具体情况如图 6 所示。

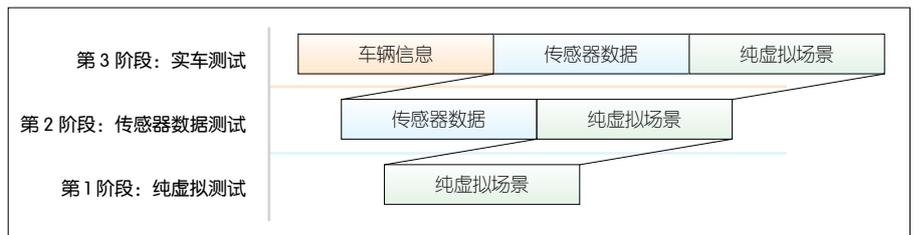
▼ 表 1 基于数字孪生的网联自动驾驶测试的参考消息内容

消息传输方向	信息	说明
虚拟空间至物理空间	交通参与者列表	由虚拟仿真生成
虚拟空间至物理空间	交通参与者 ID	唯一 ID，由虚拟仿真器分配
虚拟空间至物理空间	时间	时间戳
虚拟空间至物理空间	位置（经度和纬度）	交通参与者的水平位置信息
虚拟空间至物理空间	位置（海拔）	交通参与者的垂直位置信息
虚拟空间至物理空间	交通参与者信息	交通参与者的定制信息
虚拟空间至物理空间	车辆 ID	唯一 ID，由虚拟仿真器分配
虚拟空间至物理空间	车辆控制器	测试开始：模拟器生成测试场景，通知被测车辆开始测试； 测试中断：检测到异常事件，模拟器通知测试车停车； 车辆行驶到指定位置：模拟器通知被测车辆移动到指定位置并停止
虚拟空间至物理空间	时间	时间戳
虚拟空间至物理空间	目标位置（经度和纬度）	目标水平位置信息
虚拟空间至物理空间	目标位置（海拔）	目标垂直位置信息
物理空间至虚拟空间	车辆 ID	被测车辆的唯一 ID，由虚拟仿真器分配
物理空间至虚拟空间	时间	时间戳
物理空间至虚拟空间	位置（经度和纬度）	被测车辆的水平位置信息
物理空间至虚拟空间	位置（海拔）	被测车辆的垂直位置信息
物理空间至虚拟空间	车辆状态信息	被测车辆的定制信息

ID：身份标识号



▲ 图 2 道路场景仿真模拟模拟器



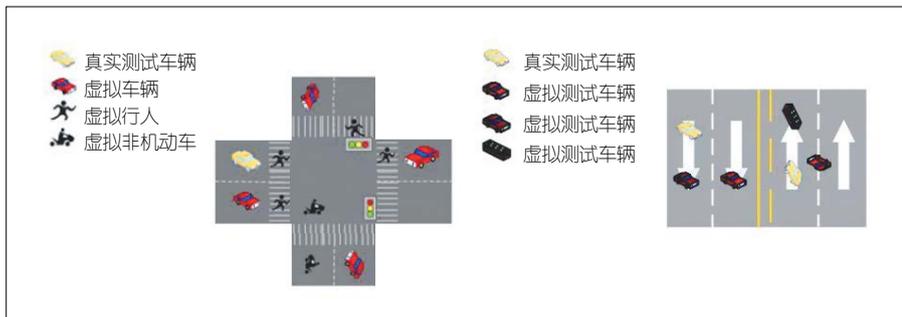
▲ 图 3 测试阶段

由车载传感器和路侧单元收集被测车辆周围环境的信息。每台设备根据其配置捕获周围信息，然后将收集

到的同一时间戳标签下的数据与网络上的其他设备同步。物理系统的信息上传到运行 DT 应用程序的服务器。



▲图 4 传感器数据测试



▲图 5 2 种典型的实车测试评估场景

图 6 c) 中显示的是前向碰撞警告应用验证过程。虚拟物体显示在中控模拟器中，真实的车辆行为会通过摄像头反馈到中控台。

### 3.2 测试结果分析

通过基于 DT 的网联自动驾驶测试原型系统的试验，我们认为 V2X 技术不仅可以支撑车辆行驶安全、效率提升等应用功能，还可以用于网联自动驾驶测试。此外，自动驾驶测试也

可以被认为是 V2X 技术的重要应用场景之一。

虽然该测试方案已经被证明是有效的，但它只是一个基本的原型系统，还有很大的改进空间。

(1) 汽车产业界对自动驾驶的响应延迟判断尚未达成一致。也就是说，我们不确定所提出的方案是否能满足自动驾驶的响应延迟要求。随着自动驾驶的发展，相应的通信性能要求需要被定义。基于 DT 的网联自动

驾驶测试也将被认为是 4G/5G 通信网络的一种应用。应在此基础上对测试流程继续改进。

(2) 在该方案中，车内测试人员看不到在网络空间生成的虚拟场景，用户体验不佳，因此，虚拟现实 (VR) / 现实增强 (AR) 的结合可以是之后的研究方向。

(3) 需要保证生成的虚拟场景与真实的交通场景相吻合。到目前为止，交通数据库并不完备。也就是说，当前不能确保测试场景能够覆盖和表现真实的交通场景。随着交通数据库的完善，测试场景库也将不断完善。

(4) 作为通信场景的一种应用，基于 DT 的网联自动驾驶测试必须基于统一的通信协议来实现，且需要定义数据集和数据交换格式；因此，我们需要制订相应的消息层协议，以保证在不同的测试示范区能够对不同厂商的产品进行测试。

(5) 如何选择与真实场景相匹配的测试场景。自动驾驶测试的关键点之一是场景的选择。显然，所有虚拟测试场景都是从真实的交通场景衍生出来的。为了识别自主控制算法的弱点，我们总是选择最坏的场景来构建虚拟场景库，因此，虚拟测试不能准确评估真实情况下的风险或概率。然而到目前为止，我们还不能提供真实道路场景测试与虚拟场景测试之间可信的映射关系。换言之，我们应该建立一种基于 DT 的网联自动驾驶性能评估体系，用于政府标准化的测试，或是推断自动驾驶车辆的预期安全性能等。

## 4 结束语

随着 V2X 技术的发展，汽车行业正在考虑将 V2X 相关应用功能嵌入到产品中。V2X 并不局限于车辆行驶安全、交通效率提升等应用，它是一项



▲图 6 测试结果演示

在其他应用领域也很有前景的技术。在基于 DT 的网联自动驾驶测试方案中，V2X 技术起到了连接虚拟空间和物理空间的重要作用。

文章中我们介绍了一种基于 DT 的网联自动驾驶测试框架；使用 4G/5G 网络在虚拟和物理空间之间建立通信链路，使用 V2X 技术采集车辆信息和道路信息。相关实验结果表明，该架构能够有效地支撑自动驾驶测试。之后，我们还将完善场景库，优化控制机制。上述相关研究工作对加快自动驾驶技术成熟和商业化推广应用也有着重要意义。

### 致谢

本论文所涉及项目的研究过程中，中国信息通信研究院于润东工程师、王妙琼工程师、李璐工程师承担了其中大量试验工作，对他们谨致谢意！

### 参考文献

- [1] SOUZA V. A Digital Twin Architecture Based on the Industrial Internet of Things Technologies[C]// 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). USA: IEEE, 2019
- [2] NEGRI E, FUMAGALLI L, MACCHI M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 1(11):939-948
- [3] TAO J, LI Y, WOTAWA F, et al. On the Industrial Application of Combinatorial Testing for Autonomous Driving Functions[C]//2019 IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW). China: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ICSTW.2019.00058
- [4] IVANOV A M, SHADRIN S. Development of Autonomous Vehicles' Testing System[EB/OL]. [2020-12-22] https://www.researchgate.net/publication/323350483\_Development\_of\_autonomous\_vehicles'\_testing\_system
- [5] HUANG W, WANG K, LV Y, et al. Autonomous Vehicles Testing Methods Review[C]//IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. Brazil: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795548
- [6] HUANG W, WEN D, GENG J, et al. Task-Specific Performance Evaluation of UGVs: Case Studies at the IVFC[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 1969-1979. DOI: 10.1109/TITS.2014.2308540
- [7] WANG F, WANG X, LI L, et al. Digital and Construction of A Digital Vehicle Proving Ground[C]//IEEE Intelligent Vehicles Sym-

- posium. USA: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/IVS.2003.1212968
- [8] ZHAO D, PENG H. From the Lab to the Street: Solving the Challenge of Accelerating Automated Vehicle Testing[EB/OL]. (2017-01-15)[2019-12-22]. https://arxiv.org/abs/1707.04792
- [9] TAN Y, YANG W, YOSHIDA K, et al. Application of IoT-Aided Simulation to Manufacturing Systems in Cyber-Physical System[J]. Machines, 2019, 7(1): 2. DOI: 10.3390/machines7010002

### 作者简介



**葛雨明**，高级工程师，中国信息通信研究院主任工程师、IMT-2020（5G）推进组 C-V2X 工作组组长、工业互联网联盟（IIC）汽车特设组联执主席、工业互联网产业联盟（AII）国际合作与对外交流组主席等；主要从事车联网、自动驾驶、工业互联网领域的相关政策、产业、标准和前沿技术研究工作；发表论文 20 余篇、中英文行业白皮书 10 余篇，参与出版中文专著 7 本、英文专著 1 本。



**汪洋**，重庆大学在读硕士研究生；研究方向为车辆信息处理、车网信息交互。



**韩庆文**，重庆大学微电子与通信工程学院副教授、博士；主要从事车联网相关研究，包括车网信息交互、智能网联汽车测试、车辆信息处理；发表论文 20 余篇，拥有发明专利 10 余项。