

数字孪生技术在车载系统仿真测试中的应用

库陈胜

浙江吉利控股集团吉利汽车集团整车研究院，浙江 杭州 310052

DOI: 10.61369/TACS.2025140002

摘 要： 随着汽车产业向智能化、网联化、电动化、共享化的深刻变革，车载系统的复杂度呈指数级增长。传统的实物测试与经典仿真方法在效率、成本、覆盖度和安全性等方面面临严峻挑战。数字孪生技术，作为连接物理世界与数字世界的核心使能技术，为车载系统的研发、测试与验证带来了革命性的范式转移。本文系统论述了数字孪生技术的内涵与架构，深入剖析了其在车载系统仿真测试中的具体应用场景，包括整车级虚拟集成测试、自动驾驶感知-决策-控制闭环测试、电控系统硬件在环（HIL）测试增强、预测性维护与故障注入测试，以及基于云平台的协同测试。

关 键 词： 数字孪生；车载系统；仿真测试；自动驾驶；硬件在环（HIL）；虚拟验证

Application of Digital Twin Technology in Vehicle System Simulation Test

Ku Chensheng

Geely Automobile Group Vehicle Research Institute, Geely Holding Group, Hangzhou, Zhejiang 310052

Abstract： As the automotive industry undergoes profound transformations toward intelligence, connectivity, electrification, and sharing, the complexity of in-vehicle systems has grown exponentially. Traditional physical testing and classical simulation methods now face significant challenges in efficiency, cost, coverage, and safety. Digital twin technology, as a core enabler connecting the physical and digital worlds, has revolutionized the paradigms of in-vehicle system development, testing, and validation. This paper systematically discusses the essence and architecture of digital twin technology, and provides an in-depth analysis of its specific applications in in-vehicle system simulation testing. These include vehicle-level virtual integration testing, closed-loop testing for autonomous driving perception-decision-control, enhanced hardware-in-loop (HIL) testing for electronic control systems, predictive maintenance and fault injection testing, as well as cloud-based collaborative testing.

Keywords： digital twin; in-vehicle systems; simulation testing; autonomous driving; hardware-in-the-loop (HIL); virtual validation

引言

本文探讨了该技术应用过程中面临的数据、模型、标准和算力等关键挑战，并对未来发展趋势进行了展望。研究表明，数字孪生通过构建高保真、全生命周期的动态虚拟镜像，能够实现测试前移、场景无限、风险可控和效率倍增，正成为智能汽车时代不可或缺的核心测试验证手段。

当前，汽车已从传统的机械代步工具演进为集成了先进传感器、高性能计算单元、复杂软件算法和丰富生态服务的“移动智能终端”。高级驾驶辅助系统（ADAS）、自动驾驶（AD）、智能座舱、整车域控架构、车辆云平台（V2X）等成为产业竞争的焦点。^[1] 随之而来的是车载系统软件代码量已达数亿行，传感器与执行器网络错综复杂，系统间的交互与耦合度空前提高。

一、在这一背景下，传统的车载系统测试方法暴露出诸多局限性：

实物测试成本高昂且周期长：依赖实车路测，需要庞大的车队、专业的驾驶员和漫长的测试里程（如自动驾驶需积累数十亿公里路测数据），耗时耗资巨大。极端与危险场景难以复现：如

极端天气、罕见交通参与者的行为（“边缘案例”）、危险碰撞场景等，在真实世界中难以安全、可控、重复地测试。测试覆盖度不足：面对近乎无限的真实世界驾驶场景组合，有限的实车测试无法穷尽所有可能性，尤其是软件逻辑的边角情况。问题发现滞后：许多系统集成和交互问题往往在后期实车测试甚至量产上市后才暴露，导致修改成本急剧上升。

作者简介：库陈胜（1991—），男，河南濮阳，本科，高级系统架构设计师，从事汽车工程，计算机科学与技术研究。

数字孪生技术的兴起为破解上述困境提供了全新路径。它通过整合物理建模、传感器数据、历史数据和人工智能算法，在虚拟空间中构建一个与物理实体实时映射、交互、协同演进的“数字克隆体”。将这一技术应用于车载系统仿真测试，意味着可以在虚拟世界中，对尚未造出的车辆、尚未集成的系统、尚未发生的场景进行超前、全面、安全且高效的验证，从而驱动汽车研发测试模式的根本性变革。

二、数字孪生技术概述

（一）定义与核心特征：数字孪生指通过数字化技术，构建与物理实体（或过程）精确对应的虚拟模型，实现对其全生命周期的动态映射与镜像描述。

其核心特征包括

高保真性：模型在几何、物理、行为及规则等多个维度上高度还原物理实体，具备真实世界的细节与复杂关系。

虚实交互：通过实时数据流，实现物理实体与数字孪生体之间的双向交互与动态影响，形成闭环控制与优化。

全生命周期伴随：覆盖从设计、制造、测试到运营、维护乃至报废的全过程，数字孪生体随物理实体同步演进与更新。

数据与模型驱动：依托多源异构数据与动态仿真模型，实现状态监控、趋势预测、智能决策与持续优化。

数字孪生通过深度集成信息技术与运营技术，推动物理世界与数字空间的融合，成为实现智能制造、智慧城市及可持续管理的关键使能技术。

（二）车载系统数字孪生的技术架构

一个完整的车载系统数字孪生测试平台通常包含以下层次

物理层：真实的车辆、零部件、测试台架（如 HIL）、传感器、路侧设备等。

数据层：实时采集的车辆总线数据（CAN/LIN/以太网）、传感器原始数据（摄像头图像、激光雷达点云、雷达信号）、环境数据、云端下发的数据等，以及历史测试数据库和场景库。

模型层（数字孪生体的核心）：车辆动力学模型：精确模拟车辆的纵向、横向和垂向运动特性。传感器仿真模型：高保真模拟摄像头（考虑光照、天气、噪声）、激光雷达（模拟材质反射率、光束发散）、毫米波雷达、超声波雷达等感知信号的物理生成过程。^[2]

环境与场景模型：构建包含高精度地图、静态元素（道路、建筑、标识）、动态元素（车辆、行人、非机动车）及其行为逻辑的虚拟世界。

控制系统模型：包括被控对象（如电机、电池、制动系统）模型和控制器（ECU）的软件算法模型。软件在环（SIL）与硬件在环（HIL）

接口模型：实现虚拟环境与真实控制器代码或硬件的无缝对接。

功能层：提供场景编辑、测试用例管理、仿真任务调度、结果自动分析与评价、可视化呈现等应用功能。

交互层：人机交互界面，供测试工程师进行配置、监控和干预。

三、数字孪生在车载系统仿真测试中的核心应用场景

（一）整车级虚拟集成与性能评估

在车辆物理原型诞生之前，数字孪生技术可用于进行整车级的“虚拟集成”。将各子系统的数字模型（如动力总成、底盘、车身、电气架构、热管理系统等）在统一的多物理场仿真平台中进行耦合仿真。

应用价值：早期发现跨系统耦合问题，如电气负载平衡、电磁兼容（EMC）预测、热管理策略评估、NVH（噪声、振动与声振粗糙度）性能预估等。这避免了后期昂贵的物理样车修改，缩短了开发周期。例如，可以在虚拟环境中模拟极寒和极热条件下，电池包、电机和座舱空调系统的协同工作效能。

（二）自动驾驶系统的全栈仿真测试

这是数字孪生技术最具颠覆性的应用领域。通过构建包含高保真环境、传感器和车辆动力学的虚拟世界，为自动驾驶的感知、定位、决策、规划、控制全栈算法提供闭环测试环境。

感知算法测试：利用高保真的传感器仿真模型，生成带有精确真值标签的合成数据。可以方便地调整天气（雨、雪、雾、眩光）、光照（昼夜、隧道）、传感器污损等条件，系统性测试感知算法的鲁棒性和极限性能^[3]。对于激光雷达，可以模拟不同材料对不同波长激光的反射特性。

决策规划与控制算法测试：在无限丰富的虚拟场景中（包括海量常规场景和手工构建的“边缘案例”），测试自动驾驶系统的行为决策和轨迹规划能力。例如，模拟“鬼探头”、高速公路上前车掉落异物、交通信号灯故障等高风险场景。测试可以7x24小时不间断进行，加速算法迭代和验证。

V2X 协同测试：将单车数字孪生扩展为“车-路-云”协同的数字孪生体。模拟智能路侧设备（RSU）发送的信号灯相位、行人预警等信息，以及云端下发的全局交通调度指令，测试网联自动驾驶（CAV）功能的协同效能。

（三）增强型硬件在环（HIL）测试

传统 HIL 测试中，车辆和环境的模型相对简化。引入数字孪生后，HIL 系统可以接入更逼真的车辆动力学模型和包含高清渲染画面的虚拟驾驶环境。

应用价值：被测的实体 ECU（如自动驾驶域控制器、底盘域控制器）接收来自高保真传感器仿真模型生成的“刺激信号”（如模拟的摄像头视频流、激光雷达点云包），其输出的控制指令则驱动高精度的车辆模型在虚拟环境中运行，形成高度逼真的闭环。这极大地扩展了 HIL 测试的覆盖范围和保真度，特别是对于依赖复杂环境感知的智能驾驶控制器而言，测试的置信度大幅提升。

（四）预测性维护与故障注入测试

利用数字孪生体的实时映射能力，可以结合物理车辆的实时运行数据（如振动、温度、电流）和历史性能数据，对关键零部

件（如电池、电机、轴承）的健康状态进行实时诊断和剩余寿命预测。

应用价值：在测试阶段，这可用于设计更科学的耐久性测试方案。更重要的是，可以主动在数字孪生体或测试台架上注入各种软硬件故障模型（如传感器失灵、通信中断、执行器卡滞、软件死锁），观察被测系统（如整车故障诊断系统、功能安全机制）的响应是否符合预期（如触发正确的故障码、进入安全状态）。这为 ISO 26262 功能安全标准的验证提供了强大工具。

（五）基于云平台的规模化协同测试

将数字孪生测试平台部署在云端，可以实现资源的弹性伸缩和测试任务的并行分发其应用价值。

场景并行：同时启动成千上万个虚拟测试实例，每个实例运行不同的测试场景或参数组合，在极短时间内完成海量测试里程的积累（“加速测试”）。协同研发：分布在不同地理位置的开发团队（如主机厂、Tier1 供应商、算法公司）可以基于同一套数字孪生环境和数据标准进行协同开发与集成测试。^[4]

数据闭环：将实车路测中发现的罕见场景或问题案例，快速还原并“灌注”到数字孪生测试平台中，进行复现、分析和算法优化，形成“路测发现问题 - 仿真分析优化 - 回归测试验证”的高效数据闭环。

四、面临的挑战与未来展望

主要挑战：模型保真度与复杂度的平衡：构建全要素、全链路的高保真模型计算代价巨大。如何在不同测试阶段和目的下，选择合适的模型粒度（如感知仿真中，是使用基于物理的渲染还是游戏引擎渲染），是实践中需要权衡的关键。^[5]

数据获取、管理与标准化：构建和验证模型需要大量高质量、标注精细的物理世界数据。多源异构数据的融合、存储、管理以及场景描述语言（如 Open SCENARIO/Open DRIVE）的标准化仍需行业共同努力。

“仿真与现实的鸿沟”：无论仿真多么逼真，都无法完全替代真实世界的复杂性和不确定性。如何评估仿真测试结果的有效性，建立仿真与实车测试之间的置信度传递关系，是方法学上的

核心挑战。

算力成本：尤其是运行大规模高保真并行仿真，对云计算和 GPU 算力提出极高要求，成本不菲。

未来展望：人工智能与数字孪生深度融合：AI 将用于自动生成海量、有价值的测试场景（对抗式生成），自动优化测试用例，以及从仿真数据中自动挖掘缺陷模式。同时，AI 也将用于构建更智能、更拟真的交通参与者行为模型。

全生命周期数字线程贯通：从设计、仿真、测试、制造到运营服务的全生命周期数据被打通，形成连续、一致的数字线程。测试阶段产生的数字孪生体可以直接传递给生产阶段用于工艺优化，并传递给量产车用于个性化服务与 OTA 升级前的预验证。

开放协同的生态系统：行业将趋向于构建基于统一标准或中间件（如 ROS2、AUTOSAR Adaptive）的开放仿真测试生态，实现工具链、模型库和场景数据的共享，降低整体应用门槛。

实时数字孪生与车云一体化：随着 5G/6G 和车端算力的提升，未来可能实现与每辆量产车实时同步的“在线数字孪生”，为车队管理、智慧交通调度和个性化用户体验提供前所未有的支撑。

五、结语

数字孪生技术正在重塑车载系统的仿真测试范式。它通过构建一个与物理车辆紧密映射、高度逼真、可无限扩展的虚拟测试宇宙，成功地将测试活动大幅度前移、拓宽和深化。从整车集成到自动驾驶，从 HIL 测试到预测性维护，数字孪生不仅在提升测试效率、降低成本和风险方面展现出巨大价值，更在应对智能汽车复杂系统验证的根本性难题上提供了系统性解决方案。

尽管在模型精度、数据标准、置信度评估和算力成本等方面仍面临挑战，但随着相关技术的不断成熟和行业生态的协同进化，数字孪生必将从当前的研发测试工具，演变为贯穿智能汽车产品全生命周期和全价值链的核心基础设施。拥抱数字孪生，不仅是提升汽车产品研发竞争力的技术选择，更是面向未来智慧出行时代的战略必然。

参考文献

- [1] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.
- [2] 刘强, 姜洪权, 高跃, 等. 基于数字孪生的自动驾驶测试场景构建方法 [J]. 汽车工程, 2021, 43(5): 643-652.
- [3] Lu, Y., et al. Vehicle-in-the-Loop Testing Framework Integrating Digital Twin for ADAS Validation[J]. SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles, 2023, 6(1), 45-60.
- [4] 王建民, 陈志鹏, 杨春晖. 面向智能网联汽车的数字孪生系统架构与关键技术 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 203-216.
- [5] 李骏, 王志伟, 赵慧亮. 数字孪生驱动的新能源汽车电池管理系统半物理仿真测试平台 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(10): 102-113.