

轨道交通信号系统车载产品车辆接口仿真测试方法研究与优化

贾璇

通号城市轨道交通技术有限公司 北京 100070

摘要：城市轨道交通正朝着高密度、高速度、智能化方向快速发展，信号系统作为保障行车安全的核心装备，其车载ATP、ATO、TCMS接口单元等设备的可靠性直接决定运营安全。车载产品需通过硬线、MVB、CAN、以太网等方式，与车辆牵引、制动、车门、广播等系统进行实时信息交互。传统实车测试存在成本高昂、周期冗长、极端与故障场景覆盖有限等短板，车辆接口仿真测试可精准模拟接口电气特性、通信协议与全维度故障模式，成为验证车载产品功能安全与接口兼容性的核心技术。本文系统梳理车载产品与车辆接口的类型及技术特性，剖析当前仿真测试的核心痛点，构建分层建模、协议栈精准仿真、全场景故障注入一体化测试方法体系，结合地铁全自动运行工程案例验证方法有效性，并展望数字孪生、AI驱动、云化测试等未来发展方向，为轨道交通信号系统车载接口测试提供技术参考。

关键词：轨道交通；信号系统；车载产品；车辆接口；仿真测试；MVB总线；故障注入；硬件在环（HIL）

引言

截至2025年底，我国城轨运营里程超1.2万公里，GoA4级线路占比超18%。车载与车辆接口协议不匹配、信号延迟超标易致停车精度不足等问题，传统测试存局限。本文聚焦接口仿真测试，提出分层建模、协议栈精准仿真、全场景故障注入的一体化体系，经GoA4工程验证，并展望数字孪生等方向。

1 研究背景及国内外现状

1.1 研究背景与意义

在城市轨道交通信号系统中，车载设备是衔接地面控制中心与车辆执行机构的关键枢纽，需实时采集车辆速度、位置、制动压力等状态信息，同时下发牵引力调节、制动触发、车门开关等控制指令。依据GB/T 12758-2023《城市轨道交通信号系统通用技术条件》，车载设备与车辆接口交互延迟需 $\leq 100\text{ms}$ ，信号传输误码率需 $\leq 10^{-6}$ ，且安全相关功能需满足SIL4最高安全完整性等级要求^[1]。

传统车载产品测试依赖真实车辆或静态调试台联调，存在三大难以突破的瓶颈：（1）成本高：实车测试占用线路与车辆资源，单日测试成本可达数十万元，研发与调试投入巨大；（2）风险高：制动失效、总线中断等故障注入测试，易引发设备损坏或安全事故；（3）覆盖不足：高速过弯、极端天气、电气扰动等极限工况难以在实车环境复现，测试存在安全盲区。

车辆接口仿真测试以虚拟车辆模型替代物理车辆，

可在实验室环境下完整复现接口信号、通信协议与各类故障场景，测算可降低40%-60%测试成本，实现100%场景覆盖^[2]。因此，开展车载产品车辆接口仿真测试方法研究，对提升信号系统可靠性、降低工程成本具有重要的工程应用价值。

1.2 国内外研究现状

国外轨道交通仿真测试技术起步较早，阿尔斯通TrainSim平台可实现车辆动力学与信号系统联合仿真；西门子基于dSPACE仿真器，采用硬件在环（HIL）技术模拟MVB总线信号，完成车载ATP与车辆接口交互逻辑验证^[3]。

国内中国铁道科学研究院研发CTCS-3级列控系统仿真测试平台，支持车载设备接口故障注入测试；西南交通大学针对地铁场景，构建基于OMNeT++的MVB总线通信仿真模型^[4]。但现有研究仍存在明显不足：接口模型精细化程度不足，重通信协议层、轻电气特性仿真；故障场景覆盖不全面，缺乏数据丢包、时序偏移等软故障的系统性建模；测试评价体系缺失，未形成统一的接口兼容性评估标准。

2 车载产品与车辆接口概述

2.1 车载产品核心组成

车载信号系统以ATP、ATO、TCMS接口单元、HMI人机界面为核心：（1）ATP：负责速度监控、超速防护、紧急制动触发，是列车安全防护核心；（2）ATO：实现自动驾驶、精准停车、节能运行，提升运营效率与

舒适度；(3) TCMS接口单元：作为车载信号与车辆系统的网关，完成多协议信号转换与数据转发^[5]；(4) HMI：实时显示列车运行状态，为司机提供操作提示与故障告警。其中TCMS接口单元需兼容MVB、CAN、RS485等多种通信协议，处理200余路硬线信号，是接口交互的核心枢纽。

2.2 车辆接口类型及技术特性

车载产品与车辆接口分为硬线接口和总线接口两大类，技术特性如下：(1) 硬线接口：以紧急制动指令、牵引允许、零速信号为典型，传输直流24V/110V信号，响应时间 $\leq 50\text{ms}$ ，电压波动 $\pm 10\%$ ，满足SIL4安全要求；(2) MVB总线：遵循IEC61375-1标准，传输速率1.5Mbps，支持周期过程数据与事件触发消息数据，配备冗余通道，主备通道切换时间 $\leq 20\text{ms}$ ，其作为安全相关通信通道，可支持的安全完整性等级(SIL)通常为2级；(3) CAN总线：遵循ISO11898标准，速率500kbps，具备错误重发机制，安全等级SIL2；(4) 以太网：遵循IEC61375-3-4(TRDP)协议，速率100Mbps，确定性延迟 $\leq 10\text{ms}$ ，采用VLAN隔离，安全等级SIL3^[6]。

2.3 接口交互典型场景

以列车进站停车为例，ATO与车辆接口交互流程为：ATO通过TCMS获取零速信号确认列车停稳→通过MVB总线发送开门指令→车辆门控系统反馈车门状态→车门未正常开启时触发再开门指令，超时5s则上报故障，全流程需严格满足时序与安全要求^[7]。

3 车辆接口仿真测试核心挑战

3.1 接口协议复杂度高

MVB等总线协议具备严格时序约束，过程数据需按固定周期传输，消息数据支持事件触发，主备通道切换时间 $\leq 20\text{ms}$ 。仿真模型需精准复现帧结构、CRC16校验、错误处理等协议栈细节，否则易出现“仿真正常、实车异常”的假阳性测试结果。

3.2 实时性要求严苛

车载设备对接口信号响应有硬性指标，如紧急制动指令传输延迟 $\leq 30\text{ms}$ ，总执行时间 $\leq 150\text{ms}$ 。传统仿真工具步长难以满足微秒级时序需求，需依托实时操作系统或FPGA硬件加速保障仿真精度^[8]。

3.3 故障场景多样且难复现

车辆接口故障分为三类：电气故障(电压波动、信号线短路/断路)、通信故障(总线丢包、错误帧)、时序故障(信号滞后、周期抖动)，各类故障均会导致设备误动作、指令失效等问题，需全维度覆盖仿真。

3.4 多接口并发交互耦合

车载产品需同步处理硬线、MVB、CAN等多接口信号，且信号间存在强耦合关系，如牵引允许硬线有效时，MVB牵引力指令才会被车辆执行。多接口并发调度易引发资源竞争与时序混乱，对仿真调度能力提出高要求。

4 车辆接口仿真测试方法体系

本文构建分层建模+硬件在环(HIL)一体化测试架构，分为三层协同工作：(1) 车辆模型层：模拟车辆动力学特性、车门/制动等设备状态；(2) 接口仿真层：实现硬线信号生成、总线协议栈精准仿真；(3) 测试执行层：完成故障注入、数据采集、测试结果自动判定。硬件平台采用dSPACE SCALEXIO实时仿真器，配备MVB/CAN专用接口卡，确保仿真周期 $\leq 1\text{ms}$ ，满足实时性要求^[9]。

4.1 核心仿真模块实现

4.1.1 硬线接口仿真

采用可编程电源+继电器矩阵实现硬线信号仿真：电压0-30V连续可调，精度 $\pm 0.1\text{V}$ ；支持0-5A电流负载，模拟传感器输出；通过继电器切换实现短路、断路等故障注入，精准复现紧急制动等硬线信号状态。

4.1.2 总线接口仿真

基于IEC61375-1标准实现MVB总线仿真，采用主帧-从帧交互模式，支持64ms/128ms/256ms可配置周期过程数据、单播/广播消息数据，主备通道快速切换(时间 $\leq 20\text{ms}$)；通过C语言实现链路层协议，完成帧结构定义、CRC16校验与数据发送，保障协议仿真精度^[10]。

4.1.3 全场景故障注入

采用信号扰动+协议篡改方式实现故障注入：电气层面叠加噪声、模拟电压跌落；通信层面控制帧丢失概率、注入错误帧；时序层面可调设置信号延迟、周期抖动，覆盖所有典型故障模式。

4.2 测试用例设计

依据ISO26262功能安全标准，采用等价类划分与边界值分析方法，设计四类测试用例：(1) 正常功能测试：验证接口信号传输准确性与交互逻辑；(2) 故障注入测试：验证车载设备容错能力与故障处理逻辑；(3) 极限工况测试：模拟高速、极端天气等场景下的接口性能；(4) 兼容性测试：适配不同车辆厂商的接口协议差异。

5 工程案例分析

5.1 项目背景

为验证第4章所构建的仿真测试方法体系的有效性，将其应用于某城市地铁GoA4级全自动运行(FAO)系统。车载ATO需通过MVB总线与车辆TCMS交互，实现 $\pm 30\text{cm}$ 精准停车，需验证车门控制、制动触发等场景的接口兼容性。

5.2 仿真环境搭建

(1) 硬件:dSPACE SCALEXIO实时机、Duagon D113 MVB接口卡、CANoe总线分析仪;(2) 软件:MATLAB/Simulink车辆模型、CANoe总线仿真、TestStand测试管理平台;(3) 核心工作:完成ATO的MVB开门指令、车门状态端口与仿真模型的精准映射。

5.3 测试过程与结果

(1) 正常场景:开门指令传输延迟28ms,车门状态反馈正确率100%,满足标准要求;(2) 故障场景:模拟10%MVB丢包率,ATO触发重试机制,车门正常开启,容错逻辑达标;(3) 极限工况:80km/h高速下紧急制动,响应时间120ms,优于150ms标准限值。

5.4 测试结论

通过仿真测试发现并修复2项关键问题:MVB总线高负载下牵引力指令丢包、低温环境车门状态反馈延迟,经优化后问题彻底解决。该方法将测试覆盖率从60%提升至95%,测试成本降低50%以上,验证了方法的实用性与有效性。

6 未来发展趋势

6.1 数字孪生虚实融合测试

构建物理车辆与虚拟模型实时映射的数字孪生系统,依托5G实现低延迟远程交互,实现接口信号的实时双向映射与历史追溯,覆盖研发、调试、运维全生命周期测试。

6.2 AI驱动智能测试

基于机器学习算法分析历史测试数据,自动生成高风险组合故障场景,并利用AI学习历史接口通信模式,自动生成异常的时序信号或报文进行智能故障注入,提升测试效率,实现测试用例自主优化。

6.3 标准化与云化测试

推动《轨道交通车载设备接口仿真测试规范》等标准制定,搭建云测试平台实现资源共享,降低中小企业测试门槛,推动行业技术标准化。

7 结论

车辆接口仿真测试是保障轨道交通信号系统车载产品安全可靠的关键手段。本文提出的分层建模+协议精准

仿真+全场景故障注入一体化方法体系,可有效解决接口协议复杂、实时性要求高、故障场景多、多接口并发耦合等核心挑战。经地铁全自动运行工程验证,该方法显著提升测试覆盖率、降低测试成本,具备强工程应用价值。未来随着数字孪生、AI、云计算技术的深度融合,仿真测试将向智能化、云化、标准化方向演进,为轨道交通信号系统自主可控提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1]国家市场监督管理总局,国家标准化委员会.GB/T 12758-2023 城市轨道交通信号系统通用技术条件[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [2]李华,张勇,王剑.轨道交通车载信号系统硬件在环仿真测试平台设计[J].铁道学报,2020,42(5):78-85.
- [3]Alstom. TrainSim: Advanced Simulation Platform for Railway Systems [EB/OL]. (2021-03-15)[2023-10-01].
- [4]Siemens. Hardware-in-the-Loop Testing for Rail Vehicles [R]. Munich: Siemens AG, 2020.
- [5]王心仪,程剑锋,刘育君,等. CTCS-3级列控车载设备自动化仿真测试平台优化研究[J]. 铁道标准设计,2024,68(11):177-184.
- [6]西南交通大学. 基于OMNeT++的MVB总线通信仿真模型[J]. 交通运输工程学报,2021,21(3):156-165.
- [7]王明,刘军. 数字孪生在轨道交通信号系统测试中的应用[J]. 自动化学报,2022,48(6):1320-1330.
- [8]Zhang L,Wang Y. AI-driven Fault Injection for Railway Signal System Testing [C]//IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE,2021:2345-2352.
- [9]中国城市轨道交通协会.T/CAMET04011-2020城市轨道交通信号系统测试规范[S].北京:中国铁道出版社,2020.
- [10]IEC. IEC 61375-1:2026 Electronic railway equipment — Train communication network (TCN) — Part 1: General architecture[S]. Geneva: IEC, 2026.