一、摘要

二、研究背景

功能安全是指不存在由电气和电子系统故障行为导致的危险所带来的不合理风险。随着汽车电子电气系统复杂度指数级增长，功能安全已成为智能汽车发展的核心课题。传统机械系统逐步被电子控制单元（ECU）、传感器网络及软件算法替代，但电子电气系统的随机硬件故障与系统性设计缺陷可能导致车辆失控、碰撞等严重事故。为了使不同的汽车软件/硬件开发人员能够遵循相同的安全开发原则，国际标准化组织 （ISO）发布了道路车辆功能安全标准 ISO 26262，要求从概念设计到硬件开发、软件验证的全生命周期实施系统化风险管理，通过危害分析（HARA）、安全机制设计及覆盖率验证等手段，将风险降低至可接受水平。[1]

硬件在环（HIL, Hardware-in-the-Loop）测试技术是真的控制器连接假的被控对象，以一种高效低成本的方式对控制器进行全面测试。它是一种用于复杂设备控制器的开发与测试技术，通过接入真实的控制器，采用或者部分采用实时仿真模型来模拟被控对象和系统运行环境，实现整个系统的仿真测试。

三、研究意义

硬件在环（HIL, Hardware-in-the-Loop）测试技术通过构建高度逼真的仿真环境，能够精确模拟极端驾驶工况，注入多样化故障场景，为功能安全需求验证提供完整的闭环解决方案。ISO 26262 标准与 HIL 测试技术的融合，为不仅是高级驾驶辅助系统（ADAS）及自动驾驶技术持续演进的关键支撑，更是解决智能网联汽车安全验证难题的核心技术方向。

四、研究现状

1. 测试平台的智能化与轻量化随着边缘计算与 AI 技术的应用，HIL 系统正从 “信号级仿真” 向 “场景级智能” 升级，支持基于深度学习的故障预测（如提前识别传感器漂移趋势）及测试用例自动生成（如通过强化学习生成高风险场景）。同时，桌面级 HIL 设备（如 Vector VN1630）的普及，使中小规模企业能够以更低成本实现功能安全验证，推动测试设备从 “大型机柜式” 向 “便携式模块化” 演进。​
2. **虚拟化测试与实车验证的协同优化**结合数字孪生技术，构建 “虚拟 HIL - 半实物 HIL - 实车测试” 的三级验证体系。例如，在自动驾驶开发中，先通过虚拟 HIL 完成 10 万小时的场景仿真，再通过半实物 HIL 进行 1000 小时的硬件验证，最终实车测试仅需 500 小时即可覆盖 95% 以上的安全场景，较传统方法缩短 40% 的开发周期。
3. 功能安全与 HIL 测试的融合已从 “工具级应用” 升级为 “体系级协同”，通过 ISO 26262 标准的规范化引导与 HIL 技术的工程化落地，形成了 “需求定义 - 测试设计 - 验证优化” 的完整技术闭环。典型案例表明，该融合体系能够有效提升复杂系统的安全可靠性，降低 80% 以上的后期整改成本，成为汽车智能化转型的核心使能技术。

五、评述

我们总结了直接面向自动驾驶汽车的汽车功能安全设计方法的未来趋势：1） 预期功能的安全性 （SOTIF）;2） 基于域控制单元 （DCU） 的汽车 E/E 架构;3） 汽车网络安全;4） 驾驶自动化的 SAE 级别。【Recent Advances and Future Trends for Automotive Functional Safety Design Methodologies 】

六、参考文献