

电动汽车整车控制器开发研究

韦明章, 廖平

(柳州五菱新能源汽车有限公司, 广西柳州 545027)

摘要:为应对电动汽车整车控制器(VCU)软件开发中复杂度激增与功能安全要求严苛的双重挑战,本文构建了一套融合汽车开放系统架构(AUTOSAR)、基于模型设计(MBD)方法与ISO 26262功能安全标准的系统性开发与验证方案。通过建立涵盖系统架构、软硬件协同设计及测试验证的多维分析框架,并结合量产实践,深入阐述了VCU的七大核心功能模块及其协同控制策略。研究表明,该多层次测试验证体系能够显著提升VCU的开发效率与质量,从而为应对“软件定义汽车”趋势下的技术挑战提供了清晰的发展路径。

关键词:VCU; 系统架构; 控制策略; AUTOSAR; MBP; 功能安全; HIL

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.02.002

Study on the Development of Vehicle Control Unit for Electric Vehicles

WEI Mingzhang, LIAO Ping

(Liuzhou Wuling New Energy Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545027, China)

Abstract:To address the dual challenges of escalating software complexity and stringent functional safety requirements in electric vehicle VCU software development, this paper constructs a systematic development and verification solution that integrates the AUTOSAR, the MBP methodology, and the ISO 26262 functional safety standard. By establishing a multi-dimensional analysis framework that encompasses system architecture, software-hardware co-design, and test verification, and by incorporating mass production practices, this study elaborates on the seven core functional modules of the VCU and their cooperative control strategies. The study demonstrates that this multi-level test and verification system significantly enhances the efficiency and quality of VCU development, thereby offering a clear development pathway to address the technical challenges in the "software-defined vehicle" era.

Key words:VCU; system architecture; control strategy; AUTOSAR; MBP; functional safety; HIL

整车控制器(Vehicle Control Unit, VCU)作为电动汽车动力系统的核心控制单元,负责整车的能源分配、动力协调与安全管理,其性能直接影响车辆的动力性、经济性、平顺性与安全性。随着汽车电子电气架构从分布式向域集中和中央计算架构演进,VCU的功能持续扩展,软件复杂度急剧上升,这一趋势对系统实时性、功能安全和网络安全提出更高要求。尽管汽车开放系统架构(AUTomotive Open System Architecture, AUTOSAR)标准实现了软硬件解耦^[1],基于模型的设计(Model-Based Design, MBP)^[2]提高了控制策略的开发效率,ISO 26262^[3]和ISO/SAE 21434构建了安全标准^[4],但新一代VCU的开发仍面临多

物理系统耦合、跨域协同和持续集成等多重挑战。

本文将系统梳理VCU的关键技术体系,涵盖系统架构设计、核心功能模块、软硬件实现、测试验证等环节,并展望当前挑战与未来发展方向。在技术架构层面,本文首先明确VCU在动力域中的核心决策与通信枢纽地位,系统阐述七大功能模块的耦合机制与协同策略。在此基础上,构建符合AUTOSAR标准及功能安全要求的VCU软硬件协同设计框架,以满足ASIL-D等级要求。同时,整合从模型在环(Model-in-the-Loop, MIL)到硬件在环(Hardware-in-the-Loop, HIL)的多阶段V模型验证体系,确保系统的功能安全与可靠性。

收稿日期:2025-08-12。

第一作者:韦明章(1983—),男,工程师,主要从事新能源汽车整车控制器及其策略开发工作。E-mail:weimingzhang@wuling.com.cn。

1 VCU 系统架构与核心功能

1.1 VCU 系统架构

电动汽车的电子电气架构正经历从分布式向域集中式的变革^[5], 这影响了 VCU 的定位。表 1 对比了不同架构下 VCU 的形态与功能。在典型的域集中架构中, VCU 的核心定位可归纳为三个方面: 信息枢纽、决策中心与指令分发源。

表 1 不同电子电气架构 VCU 的定位对比

项目	分布式架构	集中式架构
物理形态	独立 VCU、电子控制单元	集成于动力域控制器中的一个高性能计算单元
核心功能	实现车辆控制逻辑, 如扭矩请求、换挡	负责系统级的协同、优化与安全
通信方式	主要通过 CAN/LIN 与各电子控制单元点对点通信	通过 CANFD、车载以太网与各子系统及域进行高速数据交互
优点	设计简单, 供应商依赖度高	资源集中、算力提升、易于远程升级、降低整车线束成本和复杂度
缺点	功能协同困难、软件更新繁琐、成本高	软件复杂度上升, 对系统实时性、功能安全和网络安全要求极高

1.2 VCU 核心功能模块分析

VCU 的功能体系^[6]是一个多变量、强耦合的复杂系统, 其核心功能可系统性地划分为 7 个关键模块 (见图 1)。各模块在数据流与控制流上高度互联, 通过协同优化策略实现整车层面的综合性能最优。

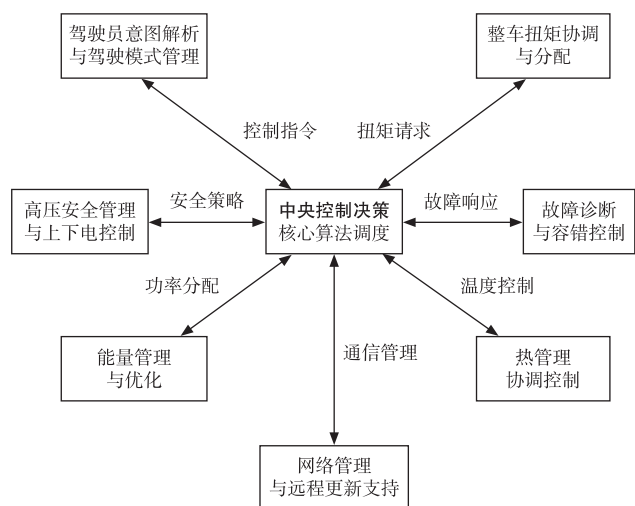


图 1 VCU 核心功能模块

1) 驾驶员意图解析与驾驶模式管理。加速/制动踏板等驾驶员操作信号是 VCU 控制的输入基础, 这些信号通常由双路冗余传感器采集。此外, VCU 支持 NORMAL、ECO、SPORT 等多种驾驶模式, 不同模式对应差异化的动力响应曲线。以某量产 A 级车型为例, 该车 SPORT 模式下的 VCU 扭矩映射策略使车辆在踏板开度 50% 时即可输出峰值扭矩的 85%, 相较于 NORMAL 模式, 其 0~100 km/h 加速时间缩短了 0.8 s。同时, VCU 协同热管理系统提前激活更为强效的冷却策略, 将电机持续峰值功率的输出时间延长约 30%。

2) 整车扭矩协调与分配。扭矩控制是 VCU 最核心的功能。VCU 根据驾驶员需求扭矩、车辆当前状态及系统限制, 计算整车需求扭矩。为验证扭矩分配策略的平顺性, 可在 HIL 台架上模拟低附着力路面单轮打滑的工况。通过注入轮速传感器信号, 监测 VCU 发出的扭矩限制指令与车身电子稳定系统 (Electronic Stability Program, ESP) 制动压力的协同响应。从识别到打滑到扭矩调整完毕, 整体响应时间应小于 100 ms, 且不出现明显的车身抖动。

3) 故障诊断与容错控制。VCU 具备完整的故障诊断与处理能力。其能实时监测传感器、执行器与通信链路状态, 实现故障检测、隔离与识别, 并依据故障等级采取相应措施。例如, 当检测到主加速踏板传感器与冗余传感器信号差值超限时, VCU 可在 10 ms 内判定为单路故障, 自动切换至冗余信号, 同时限制整车扭矩输出至跛行模式 (即最高限速 50 km/h), 并向驾驶员发出维修提示, 从而在功能安全与可用性之间取得平衡。

4) 热管理协调控制。电池与电驱系统的热稳定性直接影响整车性能与寿命。VCU 监控电池包、电机系统的温度状态, 并综合环境温度、驾驶强度与空调需求, 智能调控冷却泵、风扇、空调系统的工作模式^[7]。在高温快充场景中, VCU 优先保证电池冷却以维持充电速率。主动式热管理策略可将直流快充时间缩短达 10 min, 并将电芯间温差控制在 2 °C 以内, 从而延长电池寿命。

5) 网络管理与远程更新支持。VCU 负责整车网络的通信管理, 包括 CAN/LIN 总线的睡眠/唤醒协调、网关路由配置及通信故障诊断。同时支持统一诊断服务协议及远程升级功能, 以实现功能迭代与缺陷修复, 使 VCU 成为“软件定义汽车”^[8]的重要载体。

6) 能量管理与优化。能量管理旨在实现续航里程最大化,并延长关键部件寿命。VCU 协调驱动功率、附件功耗与充电功率之间的关系,在满足驾驶需求的前提下实现能效最优。一项基于预测性能量管理(Predictive Energy Management, PEM)^[9]的实车测试表明,在拥有长下坡路段的行程中,VCU 可将电池荷电状态在坡顶调整至略高于日常使用上限,在长下坡中充分利用回馈制动能量,避免因电池满充而无法回收能量,使整体行程能耗降低约 7%。

7) 高压安全管理与上下电控制。VCU 负责执行高压互锁回路监测、绝缘电阻检测、预充电控制及主继电器时序管理等安全功能。这些功能的设计符合 ISO 6469 等安全标准^[10-12],并通过 ASIL-C/D 级别的功能安全认证。安全功能依赖硬件与软件的协同设计。例如,软件任务调度和硬件驱动响应需满足最高安全等级 ASIL-D 的时序约束,为此需通过硬件看门狗和独立监控芯片实现。

2 VCU 硬件平台设计

1) 微控制器选型。VCU 的硬件框架如图 2 所示,其以高性能微控制器(Microcontroller Unit, MCU)为核心。该 MCU 通常采用多核架构,集成了多路控制器局域网、车载以太网、高精度模数转换器、脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)与定时器等接口。同时,其内置加密引擎与内存保护单元(Memory Protection Unit, MPU),支持 ASIL-D 功能安全等级,并集成硬件看门狗、时钟监控与电压监控模块。

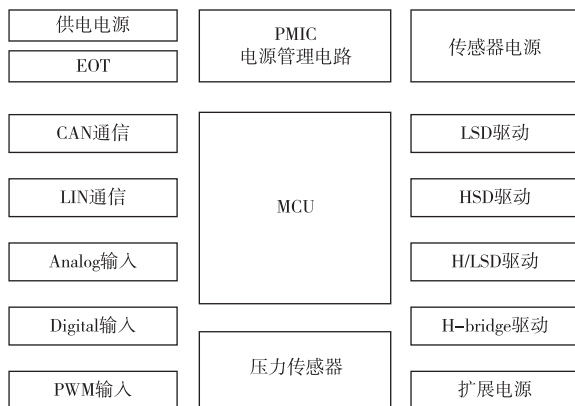


图 2 VCU 硬件框图

MCU 的选型需要在性能、安全与成本之间进行权衡。目前,英飞凌 AURIX™ TC3xx 系列在传统高功能安全控制领域占据主导地位;恩智浦 S32G 系列则擅长处理复杂网络通信和服务化网关,更侧重于自适

应 AUTOSAR 和面向服务的架构(Service-Oriented Architecture, SOA)。对于下一代 VCU,采用高实时性 MCU 与高性能 MPU 相结合的异构方案已成为趋势,但这同时也增加了软件架构与异构系统间交互的复杂性。

2) 电源管理设计。VCU 的车规级电源系统需适应 6~18 V 的宽电压输入范围,并符合 ISO 7637-2 瞬态抗扰度标准^[13]。其采用多级电源架构:前端 DC/DC 转换器将蓄电池电压降至 5 V 中间电压,再经低压降稳压器分别生成 1.2 V 的 MCU 核心电压、3.3 V 的 I/O 电压等。同时,通过设计低功耗休眠模式(如 Stop Mode),有效降低整车静态电流,从而延长蓄电池使用寿命。

3) 输入信号调理电路。输入电路用于处理模拟量、数字量与 PWM 信号,且具有抗干扰与冗余能力。模拟电路一般采用差分放大、电阻-电容(Resistor-Capacitor, RC)滤波与瞬态电压抑制电路,以提升信噪比与电磁兼容性能。数字电路加入 RC 滤波与软件去抖逻辑,防止误触发。此外,采用冗余设计,将关键传感器分别接入独立模数转换通道,VCU 通过一致性比对判断信号有效性。

4) 输出驱动电路。输出电路主要驱动继电器、指示灯与比例阀,其驱动方式包括高边/低边驱动、PWM 驱动和隔离保护。

5) 通信接口配置。VCU 配备 CAN/CANFD、车载以太网、LIN 总线和 OBD-II 接口等多种通信接口,以适应不同速率与功能需求。

6) 安全监控与看门狗。VCU 集成多重安全监控机制,如独立硬件看门狗、电压与时钟监控电路、存储器保护和安全状态机等,确保系统运行可靠性。

7) 机械结构与热设计。VCU 外壳采用铝压铸或高强度工程塑料,以满足 IP6K9K 防护等级要求。连接器选用 TE、Molex 等汽车级产品,以确保在振动与温度变化下的连接可靠性。散热设计需依据功耗分布合理规划散热路径,并加装散热片或导热垫。印刷电路板的布局需严格遵循高速信号完整性与电磁兼容性规范,以确保最终产品通过 CISPR25、ISO11452 等标准要求的测试。

3 VCU 软件架构与开发方法

3.1 基于 AUTOSAR 的分层架构

AUTOSAR 已成为汽车嵌入式系统开发的事实标

准,该标准通过分层架构(见图 3)实现软硬件解耦与组件复用。VCU 软件采用标准 AUTOSAR,分为应用层、运行环境和基础软件层。

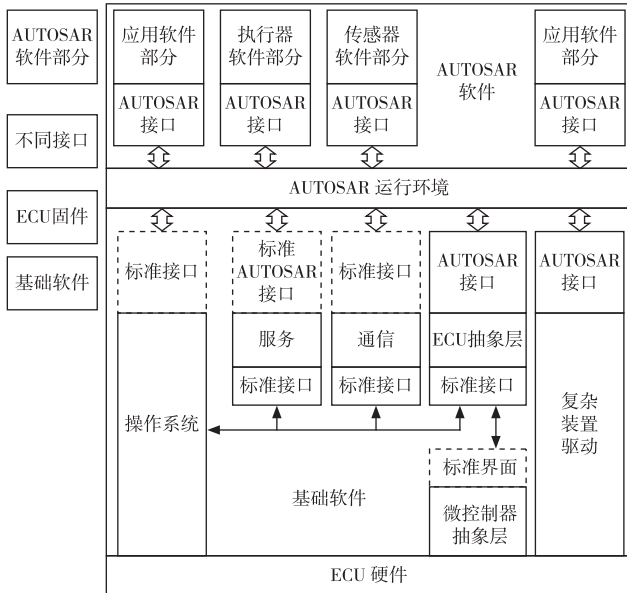


图 3 AUTOSAR 分层架构

AUTOSAR 虽实现了软硬件解耦,但也存在不足,如配置复杂度高、生成的代码对 MCU 的资源占用较高、静态调度机制缺乏灵活性。因此,行业正探索 AUTOSAR 经典平台(Classic Platform, CP)与 AUTOSAR 自适应平台(Adaptive Platform, AP)共存的混合架构。其中,CP 用于高实时性、高安全性的底层控制,如扭矩控制、功能安全监控等;AP 则用于支持 SOA、PEM、AI 算法等先进应用。两者通过 SOME/IP 等协议通信。

3.2 基于模型的设计

MBD 已是 VCU 控制策略开发的核心范式^[14],其标准流程包括:需求建模、算法建模与仿真、自动代码生成、软件在环(Software-in-the-Loop, SIL)与处理器在环(Processor-in-the-Loop, PIL)测试。

MBD 流程集成了早期验证,使其在 MIL 阶段即可利用 Simulink Test 等工具实现大规模与自动化的测试用例覆盖。自动生成的代码需通过 SIL 和 PIL 测试,以严格验证生成代码与模型的功能一致性和在目标 MCU 上的运行时性能,从而在模型阶段发现并解决缺陷,大幅降低后期修改成本。

3.3 开发工具链集成

VCU 开发依赖于高度集成的工具链生态系统,

工具链的协同使用实现了从需求到部署的端到端追溯与自动化测试,提升了开发质量与效率。然而,来自 MathWorks、dSPACE、Vector、ETAS 等厂商的异构工具链,其集成与数据交换一直是行业痛点。为此,业界正积极推动基于 ASAM OSI 和 ASAM XIL 等标准化接口的应用,旨在打破工具壁垒,构建更流畅的研发数据流。

4 测试与验证体系

VCU 的开发遵循功能安全标准 ISO 26262 所要求的 V 模型流程,并建立了贯穿从需求分析到量产全生命周期的测试验证体系,以保障其功能完整性、性能可靠性和安全合规性。本研究建立了从虚拟仿真到实物验证的多层级测试体系,如图 4 所示。

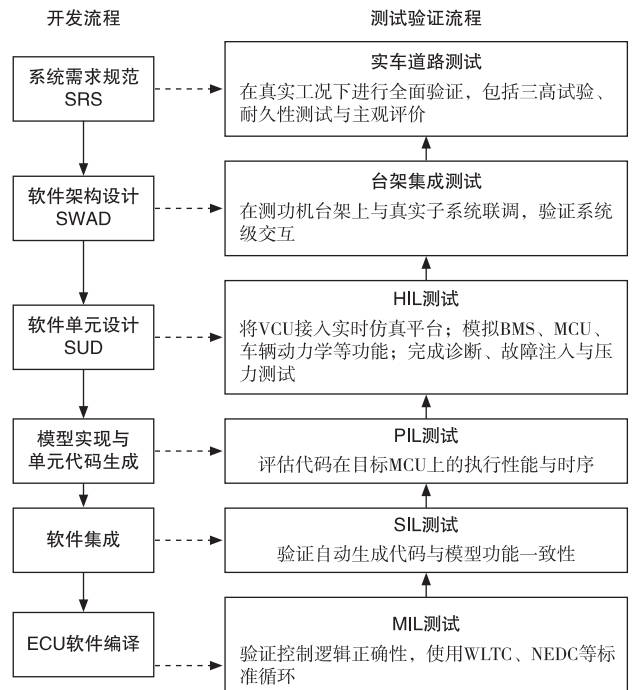


图 4 VCU 多层测试体系

4.1 MIL 测试

MIL 测试在开发初期进行,主要在仿真环境中验证控制策略的逻辑正确性和功能完整性,不涉及自动生成的代码和实际硬件。具体测试方案如下:在 MATLAB/Simulink 环境中搭建 VCU 控制算法模型,建立高保真的车辆动力学模型、电池模型及电机模型作为被控对象。设计覆盖正常操作、边界条件和故障场景的测试用例,以全面评估控制策略的各项表现。

本研究针对扭矩管理、能量管理和热管理策略开

发了1 200余个测试用例,实现了对135项功能需求的100%覆盖。仿真结果显示,预测性能量管理算法在综合工况下可将能耗降低7.2%。

4.2 SIL与PIL测试

SIL测试用于验证自动生成代码与模型的一致性,PIL测试则用于验证其在目标处理器上的性能。测试流程如下:首先,在PC环境中执行自动生成的C代码,将其输出与原始模型进行对比,完成SIL测试。随后,将代码下载到VCU硬件中,使其通过串口或CAN接口与PC上的被控对象模型进行通信,完成PIL测试。整个测试涵盖了功能一致性、数值精度、运行效率和资源使用情况。PIL测试结果表明,关键

功能在最坏情况下的执行时间为2.1 ms,满足10 ms任务周期的实时性要求,且CPU的负载率保持在65%以下。

4.3 HIL测试

HIL测试是VCU验证中最为关键的环节,能在虚拟整车环境中全面验证VCU软硬件集成后的功能、性能与安全特性。本研究采用dSPACE平台构建HIL测试环境,表2总结了HIL测试的主要内容和成果。通过HIL测试,共发现并修复了58个潜在缺陷,其中包含3个ASIL-D等级的安全相关缺陷,显著降低了实车测试阶段的风险。

表2 HIL测试内容与成果

测试类型	测试内容	测试用例数	通过率/%	关键指标
功能测试	正常工况下的所有功能	4 100	99.8	需求覆盖率100%
故障注入测试	模拟传感器/执行器/通信故障	1 600	100	故障响应时间<50 ms
耐久测试	连续运行测试	等效100万 km	99.9	无重大故障
性能测试	系统资源与实时性	240	100	CPU负载<70%

4.4 实车测试与验证

实车测试是VCU验证的最后环节,旨在真实环境中评估系统的整体性能与功能完整性。测试内容包括以下4个方面:

1) 三高测试。在高温(吐鲁番,40℃)、高寒(黑河,-30℃)、高原环境下测试VCU的适应性和可靠性。

2) 强化道路测试。在试验场进行坏路、振动、冲击等极端工况测试。

3) 性能标定测试。包括驾驶性、能量经济性和热管理策略三个方面。其中驾驶性标定涵盖踏板映射表、扭矩响应与滤波、驾驶模式、能量回收与机械制动融合等内容;能量经济性标定则在保证驾驶性的前提下,以最大化续航里程为目标,开展动态分配扭矩、预测性能量管理、附件能量管理和低压能量管理等工作;热管理标定旨在确保电池、电机等关键部件始终运行在最佳温度区间。

4) 用户场景测试。模拟真实用户使用场景进行长周期测试。

本研究累计完成100万 km实车测试,VCU软件缺陷率低于0.02缺陷/千行代码,各项关键性能指标

均达到设计目标。

4.5 测试自动化与持续集成

为提升测试效率,本研究建立了自动化的测试框架和持续集成流程。该流程实现了85%以上的测试用例自动化,每日夜间可自动执行超过3 000个回归测试用例。同时,任何代码变更都会自动触发相关测试,所有测试结果均能自动生成报告并分发。

这套完善的测试验证体系确保了VCU的高质量和高可靠性,为成功量产奠定了坚实基础。

5 技术挑战与发展趋势

5.1 当前主要挑战

尽管VCU技术体系日益成熟,其发展仍面临挑战:系统复杂性的指数级增长与传统开发范式之间存在矛盾。图5展示了多维度挑战,其核心可归纳为“软件定义汽车”所要求的快速迭代能力与汽车产品对绝对可靠性要求之间存在的固有矛盾。解决方法并非二选一,而是通过引入开发、安全与运维融合的理念^[15],在持续集成和持续部署管道中深度集成自动化安全测试与合规性检查,实现敏捷与可靠的共生。

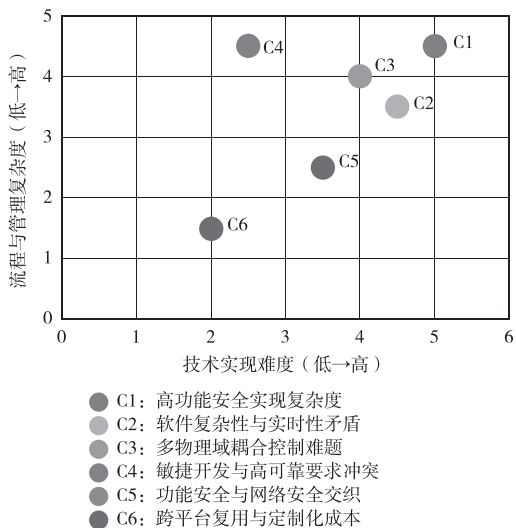


图 5 VCU 核心挑战多维分析图

5.2 发展方向

基于行业技术发展趋势分析,VCU 的发展方向可概括为以下 3 点:

1) 架构演进。VCU 的功能将逐步分解与重组。部分基础控制功能(如扭矩分配)将下沉至底层,而 VCU 本身则更多地承担动力域管理器的角色,并与智驾、座舱等其他域控制器进行策略协同。

2) 智能化与 AI 驱动。AI 的应用将从辅助角色走向核心必备。例如,强化学习可用于实时能量管理策略的优化,深度学习模型则用于预测电机和电池的剩余寿命以实现预测性维护,这些都将显著提升整车能效和可靠性。

3) 产业与供应链。未来,整车厂与供应链将形成一种共生模式:整车厂主导核心应用层软件和架构定义,供应链则提供标准化的硬件平台、基础软件和集成服务。因此,国产化替代将是保障供应链安全、降低成本的关键战略。

6 结束语

本文通过对 VCU 技术体系的系统性梳理,构建了一个涵盖系统架构、功能模块、软硬件设计与测试验证四大维度的分析框架。VCU 的开发已从单一的嵌入式控制器设计,演进为一个需要统筹机械、电子、电气、软件、网络、安全等多学科的复杂系统工程。

未来,VCU 将朝着域集中化、服务化、智能化与可进化方向演进。VCU 的技术水平将直接反映车企的系统工程能力、软件算法实力和生态合作成效。本

研究为理解这一核心领域提供了框架,未来的工作将聚焦于具体算法的创新与实证,以及新架构下跨域功能融合的实践探索。

参考文献:

[1] 阴晓峰,刘武东. 汽车电子系统软件开发新标准 AUTOSAR [J]. 西华大学学报(自然科学版),2010, 29(2): 102-106.

[2] The MathWorks, Inc. Simulink: model based and system based design[M]. Natick: The MathWorks, Inc, 2002.

[3] 刘佳熙,郭辉,李君. 汽车电子电气系统的功能安全标准 ISO 26262[J]. 上海汽车, 2011(10): 57-61.

[4] LI Y F, LIU W Q, LIU Q, et al. Complying with ISO 26262 and ISO/SAE 21434: a safety and security co-analysis method for intelligent connected vehicle [J]. Sensors, 2024, 24(6): 1848.

[5] 邵宁华,张庆余,王增喜,等. 汽车电子电气架构发展演进[J]. 科学技术创新, 2020(35): 98-100.

[6] 刘定焯. 新能源汽车整车控制器(VCU)控制策略的功能设计阐述[J]. 百科论坛电子杂志, 2020(9): 330.

[7] 方财义,汪韩送,罗高乔,等. 纯电动汽车热管理系统的研究[J]. 电子设计工程, 2014, 22(4): 137-139.

[8] 赵世佳. 汽车产业进入“软件定义”时代[J]. 中国工业评论, 2018(2): 42-49.

[9] 欧阳,周舟,唐国强,等. 自适应路况的插电式混合动力汽车能量管理策略[J]. 中国公路学报, 2016, 29(9): 152-158.

[10] ISO. Electrically propelled road vehicles—Safety specifications Part1: Rechargeable energy storage system (RESS): ISO 6469-1:2019[S]. 3th ed. Geneva:ISO, 2019: 1-26.

[11] ISO. Electrically propelled road vehicles—safety specifications—Part2: Vehicle operational safety: ISO 6469-2:2022 [S]. 4th ed. Geneva:ISO, 2022: 1-8.

[12] ISO. Electrically propelled road vehicles—Safety specifications Part3: Electrical safety: ISO 6469-3: 2021 [S]. 4th ed. Geneva:ISO, 2021: 1-24.

[13] ISO. Road vehicles—electrical disturbances from conduction and coupling—Part2: Electrical transient conduction along supply lines only: ISO 7637-2:2011[S]. 3th ed. Geneva: ISO, 2011: 1-43.

[14] 许保同,杨国亮,吴奇. 基于 Simulink 的纯电动汽车 VCU 控制策略设计方法[J]. 汽车工程师, 2016(5): 19-21.

[15] 刘羿希,何俊,吴波,等. DevSecOps 中软件安全性测试技术综述[J]. 计算机应用, 2024, 44(11): 3470-3478.