新能源汽车纹波特性研究与安全评估——基于某车型实车工况的系统测试与分析

王殿学

（安徽江淮汽车集团股份有限公司，合肥 230000）

【欢迎引用】王殿学．新能源汽车纹波特性研究与安全评估——基于某车型实车工况的系统测试与分析[J]. 汽车文摘，2026(9): 58-62.

【Cite this paper】WANG D X. Research on Ripple Characteristics and Safety Assessment of High-Voltage Internal Network in New Energy Vehicles—System Testing and Analysis Based on Real Vehicle Conditions of a Certain Model[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(9): 58-62.

【摘要】为了应对新能源汽车电气系统向高电压、高功率密度及高集成化快速演进的挑战，并解决内网纹波对整车电气安全、电磁兼容（EMC）性能及核心部件可靠性造成的关键影响，以某款量产新能源汽车为研究对象，依据国际标准ISO 21498-2:2024及扩展测试方案，构建了覆盖全工况、多状态的高压纹波测试体系。通过实车动态测试，深入分析了纹波在时域与频域的特性、分布规律及关键影响因素。测试结束表明该车型高压内网纹波安全系数等级为高，验证了整车高压系统优良的稳定性与鲁棒性。同时进一步揭示了工况负载、电池荷电状态（SOC）、电力电子开关动作及系统寄生参数对纹波的耦合影响机制，并从控制策略、硬件设计与测试验证3个维度提出了系统性的纹波抑制与优化方案。研究成果为新能源汽车高压系统的正向设计、性能优化及标准完善提供了重要的理论依据与工程实践参考。

关键词：新能源汽车；内网纹波；实车测试；安全评估；系统优化

中图分类号：U467.1　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20260141

Research on Ripple Characteristics and Safety Assessment of High-Voltage Internal Network in New Energy Vehicles—System Testing and Analysis Based on Real Vehicle Conditions of a Certain Model

Wang Dianxue

（Anhui Jianghuai Automobile Group Co., Ltd., Hefei 230000）

【Abstract】To address the challenges posed by the rapid evolution of new energy vehicle (NEV) electrical systems toward higher voltages, higher power density, and greater integration, and to mitigate the critical impacts of in-network ripple on overall vehicle electrical safety, Electromagnetic Compatibility (EMC), and core component reliability, this study investigates a mass-produced NEV. Based on the ISO 21498-2: 2024 international standard and an extended testing protocol, a high-voltage ripple test system covering full operating conditions and multiple states was established. Through dynamic real-vehicle testing, the time-domain and frequency-domain characteristics, distribution patterns, and key influencing factors of the ripple were analyzed in depth. The results indicate that the safety factor level of the high-voltage in-network ripple for this vehicle model is high, verifying the excellent stability and robustness of the vehicle's high-voltage system. Furthermore, the study reveals the coupling mechanisms of operating conditions, battery State of Charge (SOC), power electronics switching actions, and system parasitic parameters on the ripple. Systematic ripple suppression and optimization schemes are proposed from 3 dimensions: control strategy, hardware design, and test verification. The research findings provide important theoretical basis and engineering practice references for the forward design, performance optimization, and standard improvement of NEV high-voltage systems.

Key words: New Energy Vehicle (NEV), In-network ripple, Real-vehicle testing, Safety assessment, System optimization

作者简介：王殿学（1987—），男，中级工程师，主要研究方向汽车性能测试，wdx2184@jac.com.cn。

0 引言

由动力电池、电机控制器(Motor Control Unit,MCU)、DCDC转换器、车载充电机(On-Board Charger,OBC)及高压辅助部件构成的高压电气网络是新能源汽车的核心。随着800 V高压平台及SiC/GaN器件的应用,系统开关频率与功率密度显著提升,高压内网纹波问题愈发突出,其直接关联到电气安全、电磁兼容(Electromagnetic Compatibility,EMC)性能及部件寿命[1]。

在标准体系方面,国际标准ISO 21498-2:2024《电动道路车辆—B级电压系统及部件的电气规范和测试第2部分:部件的电气测试》已成为核心规范,其明确了10~150 kHz频段的测试方法与限值。VW80300等企业标准则更为严苛,引入了频域分段管控[2]。在产生机理方面,纹波主要源于逆变器的高频开关、负载功率的剧烈波动以及系统阻抗不匹配引发的谐振放大。虽然SiC器件降低了开关损耗,但其极高的dv/dt带来了更严峻的电磁干扰与纹波挑战[3]。

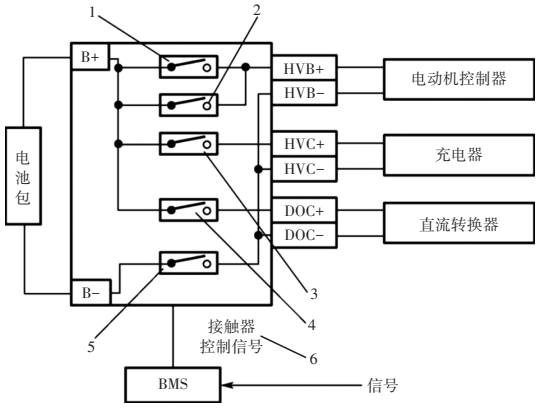
现有研究多聚焦于零部件级或单一工况分析。张涛等[1]虽构建了测试体系,但未覆盖全生命周期;陈立等[2]侧重于理论建模,缺乏实车多场景数据的验证。针对整车级、全工况、多电池荷电状态(State Of Charge,SOC)状态下纹波的系统性实车测试、耦合机理分析及安全评估的研究仍有待深化。因此,本文依托ISO 21498:2024及拓展测试方案构建高压纹波测试体系,分析纹波时频域特性、分布规律与影响因素和优化方案。

1 研究方法

1.1 测试原理与对象

本文以某款插电式混合动力新能源汽车为研究平台,该车型采用400 V高压平台,如图1所示,包括电池包及控制器(Battery Management System,BMS)、主正继电器、主负继电器、直流转换器、交直流充电机、电机控制器以及其他高压部件;所有高压部件均通过高压线束进行连接,实现基本功能。电力电子器件(如各类继电器)的高频开关动作、负载功率的瞬态剧变以及系统分布参数(寄生电感、电容、电阻)的耦合效应,会在直流母线上叠加复杂的周期性交流分量,产生高压纹波。本研究重点监测电池输出总正、总负端的电压波动情况。

主要开展以下研究:(1)测试体系构建:依据ISO 21498—2:2024及扩展性研究,设计涵盖7种典型行驶工况与3种SOC状态的完整测试矩阵。(2)实车数据采集:搭建高精度测试平台,采集不同工况下的高压纹波时域数据,并通过傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT)变换进行频域分析。(3)特性规律分析:系统分析工况、SOC等因素对纹波幅值、频率分布的影响规律,识别关键风险工况。(4)安全评估验证:基于时域与频域双维度标准,对测试结果进行量化安全评估,并与行业标杆数据对标。(5)抑制策略提出:基于机理分析与测试结果,提出涵盖控制、硬件、测试的全流程纹波优化方案。



1-主正继电器电机控制器回路,2-预充回路继电器,3-主正继电器充电回路,4-主正继电器直流转换器回路,5-主负继电器,6-高压+数据通信,HVB为高压采样板,HVC为高压接触器,DOC为直流转换器。

图1 新能源汽车高压电气原理

1.2 测试流程与标准

依据ISO 21498-2:2024标准,测试频率范围覆盖10~150 kHz。扩展设计强用户感知工况,包含典型行驶工况与3种SOC状态的测试矩阵。

1.3 测试条件

测试车型为某款量产插电式混合动力SUV,采用400 V高压平台,配备集成式电驱动总成。环境条件设置为环境温度(23±2)℃,湿度为45%~75%,试验在四驱轴耦合试验舱内进行。SOC状态为高电量(SOC≥60%)、中电量(30%≤SOC≤60%)、低电量(SOC≤30%)。采用《汽车道路试验方法通则》[7]规定的道路阻力公式进行加载。

$$F = F_0 + F_1 \cdot v + F_2 \cdot v^2 \quad (1)$$

式中:v为车辆行驶速度,F_0为常数行驶阻力项,F_0=100.5 N;F_1为一次方速度阻力系数,F_1=0.128 N/(km·h^{-1});F_2为二次方速度阻力系数,F_2=0.048 N/(km·h^{-2})。

1.4 测试工况设计

为全面覆盖车辆运行状态,设计7类核心工况:

(1)停车工况:车辆静止,D挡,空调分别处于最大制冷、最大制热模式。(2)急加速工况:D挡,100%加速踏板开度,0~100 km/h加速。(3)匀速工况:D挡,车速稳定100 km/h,空调分别处于最大制冷、最大制热模式。(4)超车工况:D挡,100%加速踏板开度,80~120 km/h加速。(5)滑行工况:D挡,松开加速踏板,120~40 km/h滑行(开启能量回收)。(6)紧急制动工况:D挡,100 km/h减束至0紧急制动(开启能量回收)。(7)爬坡工况:D挡,模拟10%坡度,包含0~80 km/h加速及80 km/h等速(空调最大制冷或制热)。

1.5 测试设备与方法

核心设备包括:(1)高带宽数字示波器(带宽≥200 MHz,采样率为10^6~10^9采样点/s);(2)高压差分探头(量程为±1 000 V,带宽为200 MHz,在1 MHz频率下共模抑制比≥100 dB);(3)整车控制器局域网总线(Controller Area Network,CAN)记录仪(同步采集车速、扭矩、SOC、空调状态等信号);(4)四驱轴耦合动力试验台。

测试方法包括:(1)测点选择:在动力电池包输出总正、总负端接入差分探头,确保测点距离高压母线节点<10 cm;(2)设备设置:示波器耦合方式设为交流耦合(Alternating Current Coupling,AC Coupling),带宽限制关闭,采样率设为1 MHz,触发方式为自动;(3)数据采集:每个工况稳定运行后,连续采集≥10 s数据,确保覆盖工况全过程;(4)数据处理:截取每个工况中1 s内纹波峰峰值(V_{pp})的最大值作为该工况的代表值。

2 测试结果分析

2.1 全工况纹波测试结果(时域)

样车在不同工况及SOC状态下的V_{pp}测试结果汇总,如表1所示。最大值为15.86 V,出现在中电量(SOC=45%)的急加速工况。

2.2 关键影响因素分析

2.2.1 工况对纹波的影响

从表1可见,工况是影响纹波幅值的主要因素,根据V_{pp}数值,分为3个等级:(1)高风险工况(V_{pp}>14 V):急加速、爬坡。此工况下,电机需求扭矩瞬间或持续达到峰值,微控制器单元(Microcontroller Unit,MCU)逆变器输出功率最大,电池大电流放电,导致纹波幅值最高。(2)中风险工况(10 V<V_{pp}≤14 V):停车(空调)、超车。停车工况纹波主要由电动压缩机或正温度系数加热器(Positive Temperature Coefficient,PTC)的变频起停引起;超车工况为中高速大负载动态过程,纹波幅值次之。(3)低风险工况(V_{pp}≤10 V):匀速、滑行、制动。匀速时功率稳定;滑行/制动时电机处于发电或低负载状态,功率波动小,纹波幅值最低。

表1 样车高压内网纹波测试结果

工况序号	测试工况	高电量(SOC≥60%)	中电量(30%<SOC<60%)	低电量(SOC≤30%)	全工况最大值
1	停车(制冷)	11.72	12.14	9.88	12.14
2	急加速	14.91	15.86	15.23	15.86
3	匀速(制冷)	6.85	7.22	6.91	7.22
4	超车	10.68	11.35	10.97	11.35
5	滑行	7.01	7.46	7.15	7.46
6	紧急制动	8.22	8.79	8.34	8.79
7	爬坡(等速)	15.03	15.41	15.17	15.41

如图2所示,典型的高频尖峰脉冲特征,叠加在直流母线上,脉冲间隔与电机控制器开关频率直接相关。

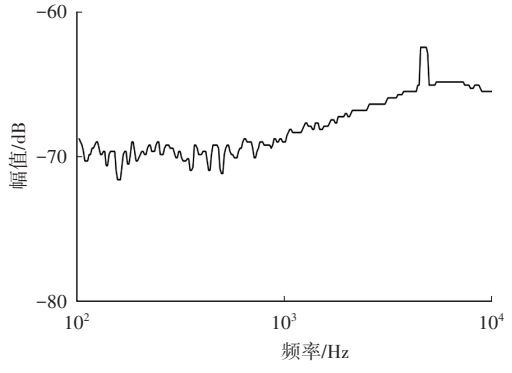


图2 急加速工况(中电量)纹波时域波形

2.2.2 SOC状态对纹波的影响

电池SOC通过影响电池内阻、端电压及系统控制策略影响纹波:(1)中电量(30%<SOC<60%):纹波幅值普遍最高。此区间为电池放电平台区,内阻相对稳定,但在大功率输出时,电压跌落与电流波动最为剧烈,且系统未启动功率限制,允许最大性能输出,故纹波最大;(2)高电量(SOC≥60%)普遍最高。电池端电压高、内阻小,电流波动相对平滑,纹波幅值略低于中电量;(3)低电量(SOC≤30%)高、内阻小,电池电压低、内阻增大,系统为保护电池会主动限制峰值功率输出,因此纹波幅值较中电量略有抑制。

2.3 纹波频域特性分析

对全工况最大值波形进行频谱分析,结果如图3所示。图3表明,能量主要集中在8~20 kHz频段,主峰位于12.5 kHz,与MCU载波频率一致,证实纹波主要

源于逆变器脉宽调制(Pulse Width Modulation,PWM)开关动作。在25 kHz、37.5 kHz处存在明显谐波衰减。

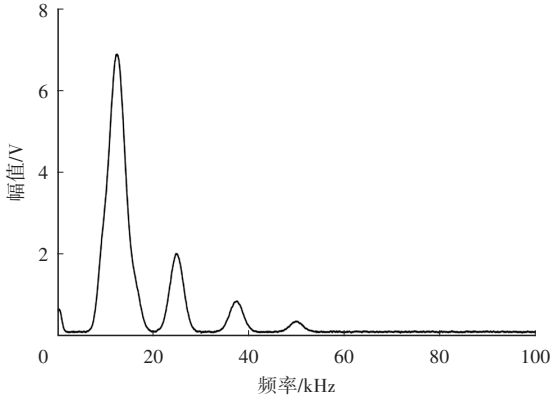


图3 最大纹波工况频域分析

2.4 安全评估与对标分析

通过对该样车测试结果的分析,结合行业竞品数据,当前样车在急加速工况下最大纹波的安全裕度满足相关安全要求。

(1)拓展标准评估:样车全工况最大纹波为15.86 V,低于20 V的企业合格限值,判定为合格。

(2)行业对标:与同级别、同电压平台的量产车型公开数据对比,样车纹波水平(15.86 V)处于行业优秀区间(优秀:<18 V;良好:18~24 V;一般:>24 V)。

3 纹波产生机理与耦合影响研究

3.1 纹波产生的核心机理

3.1.1 电力电子开关动作

MCU中的逆变器将直流电转为三相交流电驱动电机,其核心是绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Biopolar Transistor,IGBT)或SiC器件按特定规律高频通断。在此过程中,母线寄生电感会产生巨大的感应电动势,形成电压尖峰。

3.1.2 负载功率瞬态波动

车辆在急加速、爬坡时,负载功率急剧攀升,导致电池充放电电流发生剧烈变化。根据欧姆定律,电流发生剧变在电池内阻和线路阻抗上产生巨大的电压波动,直接叠加为纹波。

3.1.3 系统寄生参数谐振

高压母线、连接器、部件内部存在寄生电感(L)与寄生电容(C)。当纹波的某次谐波频率接近系统的固有谐振频率时,会发生谐振放大效应,使该频率下的纹波幅值急剧升高,形成风险峰值。

3.2 多因素耦合影响规律

基于主效应分析,界定各关键因素对纹波幅值的影响权重。其中,工况负载占据了65%的影响比重;SOC状态的影响权重约为20%,高压辅助负载(如空调等设备)和系统寄生参数的影响则相对较小,分别仅占10%和5%。当车辆处于急加速等大功率工况,且同时伴随中电量(30%<SOC<60%)状态时,这两者叠加会导致纹波幅值迅速攀升并达到峰值。在弱耦合状态下(如车辆处于匀速行驶等低负载工况时),系统的整体波动较为平缓,此时SOC状态的变化对纹波幅值的影响低。

4 高压纹波抑制与优化策略

基于上述测试结果,针对中电量急加速工况这一关键风险点提出高压纹波抑制与优化策略。

4.1 控制策略参数化优化

通过调制算法、电流环动态响应及谐振抑制3个核心维度对控制策略的参数进行优化。

(1)PWM参数修正:针对12.5 kHz的载波频率,在空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modualtion,SVPWM)中引入死区时间补偿算法。将死区时间从默认的2.0 μs优化调整为1.5 μs,以减少低频谐波畸变。

(2)电流环控制参数整定:在电机矢量控制中,将电流环比例增益从0.80调整为0.65,积分时间从0.01 s调整为0.015 s。通过降低响应速度以换取电流平滑性,仿真预测可使纹波电流降低约15%。

(3)主动阻尼控制:在控制器软件中增加陷波滤波器(Notch Filter),中心频率设定为12.5 kHz,带宽为5 kHz,深度为-10 dB,用于抑制特定频段的谐振峰值。

4.2 硬件电路拓扑与参数设计

通过硬件电路布置、增强滤波能力以及去耦布局优化,构建低阻抗、高稳定性的硬件基础平台。

(1)母排优化:采用三明治叠层母排结构,将正负极间距由20 mm缩小至10 mm,理论计算可使回路寄生电感从50 nH降低至30 nH。

(2)滤波器设计:在MCU直流输入端增加二级LC滤波。

(3)电感:选用环形铁硅铝磁芯,感值设计为10 μH,饱和电流200 A。

(4)电容:采用WIMA品牌薄膜电容,容值40 μF(4×10 μF并联),耐压600 V(直流电压),等效串联电阻小于10 mΩ。

(5)去耦电容布局:IGBT模块直流端并联2个4.7 μF的高频陶瓷电容(等效串联电感小于5 nH),

紧贴模块安装，以吸收高频尖峰。

4.3 测试验证闭环

上述硬件方案实施后，在相同工况（中电量急加速）下复测。时域V_{pp}降至12 V以下，频域12.5 kHz处幅值衰减至少6 dB。证明相关优化策略与硬件布局方案有效。

5 结束语

本文通过实车测试，分析某车型高压内网纹波的分布规律。研究表明，中电量、急加速工况是纹波控制的最难点。通过引入具体的控制参数调整（如死区时间、Kp/Ti参数）及硬件LC滤波方案（10 μH电感+40 μF电容），为关键指标达标提供了优化路径。

然而，本研究仍存在一定局限性，主要体现在试验数据主要基于单一车型平台，不同高压架构（如800 V平台）下的纹波耦合特性尚需进一步验证；测试主要覆盖了常温及典型动态工况，对极端温度及全生命周期老化后的参数漂移对纹波的影响涉及较少。鉴于此，未来的研究工作将重点围绕以下方向：一是拓展多电压平台与架构的适用性验证，引入800 V高压碳化硅（SiC）平台进行对比测试，深入探究不同电压等级及宽禁带器件高频开关特性对纹波耦合机制的影响；二是开展全生命周期可靠性与极端环境适应性研究，从而提出更具鲁棒性的全生命周期纹波抑制策略，为新能源汽车高压系统的长期稳定运行提供数据支撑。

参 考 文 献

[1] 张涛, 刘刚, 王健. 新能源汽车高压纹波: 机理、标准与测试全解析[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(2): 45-62.

[2] 陈立, 李卫国. 高集成度电驱动系统高压纹波的系统级风险分析与控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44 (18): 6789-6801.

[3] ISO. Electrically Propelled Road Vehicles—Electrical Specifications and Tests for Voltage Class B Systems and Components—Part 2: Electrical Tests for Components: ISO 21498-2: 2024[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2024.

[4] 赵晓东, 孙伟. 基于SiC器件的电动汽车电驱动系统纹波与EMI协同优化[J]. 电工技术学报, 2025, 40(5): 987-1001.

[5] 单新平, 赵凌霄, 张中君. 新能源汽车空调系统电压纹波特性及优化措施[J]. 汽车工程, 2025, 47 (3): 456-463.

[6] 黄志强, 吴海峰. 新能源汽车高压纹波精准测试技术研究[J]. 安全与电磁兼容, 2026(1): 78-83.

[7] 国家技术监督局. 汽车道路试验方法通则: GB/T 12534—1990[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.

（责任编辑 **梵玲**）

《汽车工程师》征稿启事

《汽车工程师》于1974年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主管、中国第一汽车股份有限公司主办的国内外公开发行的汽车应用技术类学术期刊，为RCCSE中国准核心学术期刊、CACJ中国应用型扩展期刊，被哥白尼精选数据库、EBSCO学术数据库、欧洲学术出版中心（EuroPub）数据库、J-Gate数据库收录。

《汽车工程师》以报道汽车产品设计领域的技术研究成果为主，专注于技术开发与应用层面的创新成果，提供汽车设计创新解决方案。《汽车工程师》将把握电动化、智能化、网联化、共享化的汽车技术主流发展趋势，努力吸收优质稿源，为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。重点征稿方向包括：锂离子电池与新体系电池、动力电池热管理与热失控、燃料电池及其关键零部件、车用电机及其控制器、自动驾驶汽车环境感知与感知融合、自动驾驶汽车定位与建图、自动驾驶汽车测试、人工驾驶-无人驾驶车辆混行条件下的自动驾驶控制、智能线控底盘、一体化底盘、功能安全和预期功能安全。

热忱欢迎汽车行业的专家学者不吝赐稿，反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将优先发表，我们期待与您共同践行“把论文写在祖国大地上”的指示精神，为强大中国汽车工业作贡献！

本刊使用协同采编系统处理稿件，请登陆期刊网站注册后投稿，投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的作者指南，网址：http://tjqc.cbpt.cnki.net。

《汽车工程师》编辑部