

Research on High-Voltage Ripple Test of Pure Electric Vehicles under Multiple Operating Conditions

Kunjun LI, Yong YANG, Shaohua LUO, Yi WANG, Shengqi LI

China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd, Chongqing, China

mail:likunjun@caeri.com.cn

Abstract: With the further development of the national electric vehicle industry, the ownership and production and sales of electric vehicles have also been increasing year by year. The safety issues associated with electric vehicles are a concern for consumers, with electric safety being an important part of their anxiety. With the application of the 800V high-voltage platform in electric vehicles, high-voltage ripple is also prone to greater harm. At present, there are relevant standards and research on high-voltage ripple of components abroad, but there is relatively little research and standards in China. On the other hand, there is relatively little research on high-voltage ripple test at the vehicle level both domestically and internationally. This paper analyzes the causes of high-voltage ripple in pure electric vehicles, and based on this, designs a multi condition high-voltage ripple test scheme. Through test data and theoretical analysis, the multi condition test scheme is further optimized, and two vehicle models are tested. The test results show that the optimized multi condition high-voltage ripple test scheme can help test engineers locate the worst-case of the vehicle faster and more accurately.

Keywords: Electric vehicles; High voltage ripple; Test

纯电动汽车多工况高压纹波测试研究

李坤峻, 杨勇, 罗少华, 王毅, 李盛麟

中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 中国, 401122

mail:likunjun@caeri.com.cn

摘要: 随着国家电动汽车产业的进一步发展, 电动汽车的保有量和产销量也逐年上升。与之伴随的电动汽车的安全问题牵动着消费者的心弦, 其中电安全是重要的焦虑部分。随着电动汽车的800V高压平台的应用, 高压纹波也容易产生更大的危害。目前国外对零部件的高压纹波有相关标准研究, 但是国内相关标准研究较少。另一方面, 国内外对整车级的高压纹波测试研究较少。本文分析了高压纹波在纯电动汽车中的形成原因, 并以此为依据设计了多工况高压纹波测试方案, 并通过测试数据和理论分析进一步优化多工况测试方案, 测试了两款车型, 测试结果说明优化后的多工况高压纹波测试方案可以帮助测试工程师更快更准确地定位车辆的最恶劣情况。

关键词: 电动汽车; 高压纹波; 测试

1 引言

近年来, 国家持续推进电动汽车产业发展, 先后出台相关政策, 进一步推动绿色低碳发展目标的实现^[1]。当前电动汽车已经成为中国汽车产业中最为重要的组成部分, 电动汽车的安全性与可靠性受到广泛关注。但是, 电动汽车补能基础设施不完善、用户充放电难、里程焦虑等问题亟待解决, 同时伴随着频繁发生的电动汽车事故, 进一步加深用户安全焦虑, 影响消费者的购车信心。随着技术发展和实际应用需求, 电动汽车高压电路电压等级成倍向大功率增长, 目前市面上已经推出了800V的高压平台, 随之而来的是对电安全的更高要求。实际车辆在不同工况下

由于负载功率快速变化, DCDC 和电驱系统等器件的逆变、整流、变频等功能, 电路中存在的寄生电容和电感, 充电时电网纹波引起的车辆母线高压纹波等原因, 导致高压直流输入侧产生不同频率的谐波, 并在整车高压内网上相互耦合, 对电动汽车的行驶安全产生负面影响, 例如电池管理系统 (Battery Management System, BMS) 传感器测量精度超调, 导致电池电量估算偏差和偶发动力中断; 功率模块和电容持续发热, 降低器件使用周期, 甚至过热烧毁; 部件输入电压振荡不稳定从而导致部件输出失真、超调, 产生噪声; 电池包、高压电控单元出现谐振, 引起瞬时电流过大, 导致局部过热或起火等^[2-3]。

高压纹波的测评是研究电动汽车电安全的重要组成部分, 目前国内外有许多对零部件纹波的研究, 纹波频率对电池容量会产生影响, 同一型号的电池单体容量在纯直流循环中最大差异为 0.04Ah (即平均容量的 1.6%), 加载耦合交直流信号后, 单体容量最大差异为 0.17Ah (即平均容量的 7.3%)^[4]。纹波幅值也会对电池容量有影响, 对于振幅为 $\pm 4\text{C}$ 、频率为 100Hz 的交流电流, 电池的容量损失小, 但在低频 (0.1Hz) 下会引起显著的容量损失^[5]。纹波频率对电池功率有影响, 在 1200 个循环中, 与使用纯直流信号加载的电池相比, 使用 14.8kHz 的交流波形进行循环的电池容量衰减约为 2.4%, 功率衰减约为 5%^[4]。国外通过 ISO 21498-2 对 B 级电路的高压零部件有相关纹波测试与注入要求, 还有企业标准 VW80300 和 LV123 对高压部件进行规定, 但国内暂时没有高压纹波相关标准要求。实际上, 高压零部件在整车里共用一个内网, 可能存在耦合, 仅对零部件的测试要求可能无法评估整车高压纹波情况, 因此需要对整车级高压纹波进行研究。

本文针对纯电动汽车的高压纹波进行研究, 解释了高压纹波在纯电动汽车中的形成原因, 设计了多工况高压纹波测试, 研究了车辆不同充电工况下和不同驱动工况下的高压纹波情况, 优化了多工况高压纹波测试方案, 两款车型的实车测试结果说明优化后的多工况高压纹波测试方案可以帮助测试工程师更快更准确地定位车辆的最恶劣状态。

2 纯电动汽车高压纹波

2.1 纹波定义

纹波是直流稳定电源的电压波动造成的一种现象, 直流稳定电源在多数情况下是由交流电源经整流滤波后得来的, 由于滤波不干净, 就会有剩余的交流成分, 这种剩余的交流成分就称之为纹波, 其示意图如图 1 所示。纹波可以是电压波纹或电流纹波。它的形态一般为频率高于工频 (中国是 50Hz) 的类似正弦波的谐波, 另一种则是宽度很窄的脉冲波^[6]。

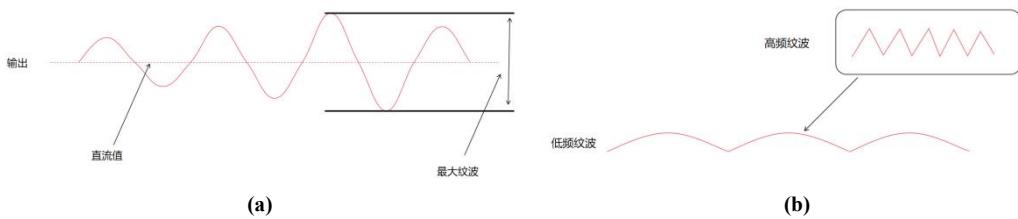


Figure 1. Ripple diagram (a) low frequency ripple (b) high frequency ripple

图 1. 纹波示意图 (a)低频纹波(b)高频纹波

2.2 纯电动汽车高压纹波形成原因

纯电动汽车整车高压架构主要由电池包、电机、MCU、DCDC、压缩机、PTC、交直流充电口、充电桩(on-board charger, OBC)组成, 其示意图如图 2 所示。

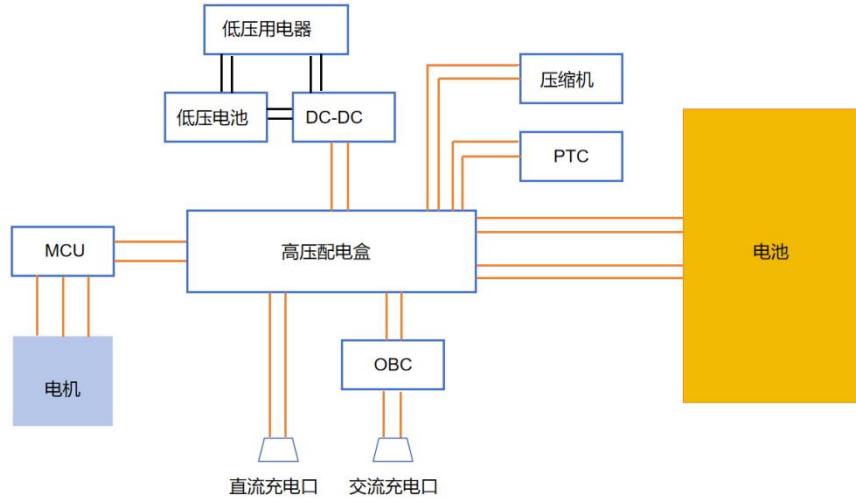


Figure 2. Schematic diagram of high-voltage architecture for electric vehicles

图 2. 电动汽车整车高压架构示意图

纹波主要来自开关器件的逆变、整流、变频等功能^[7]，负载功率快速变化，电路中存在的寄生电容和电感。而纯电动汽车内部主要开关器件是 DCDC、MCU 和 OBC，而外部设备也可能引入高压纹波，即直流充电桩进行充电时由于自身将交流电转换为直流电产生电网纹波从而引起电动汽车母线电压上的高压纹波^[8-9]。

DCDC^[10]是将电池的高压电转换为 12V 的低压直流电的开关器件。车辆动力电池包内部储存的是高压直流电，而车辆照明、娱乐、仪表等低压设备通常是 12V 的供电电压，因此需要一个设备，将高压直流电转换成 12V 的低压直流电，来为车辆低压设备提供电能，这个工作就是由 DCDC 来完成的。DCDC 不仅可以为车辆电压设备提供电能，当车辆蓄电池电量过低时，DCDC 也会为蓄电池进行充电，起到了一个“发电机”的作用。其工作原理是 DC/DC 转换器会把电压转换成高频方波电压，然后通过电容电感的滤波处理，得到需要的直流低压。但这个过程中，如果滤波性能不好，会产生高频率的高压纹波。虽然我们希望 DCDC 的输出为一个恒定的电压，但实际输出电压是不断变化的，电源纹波主要来源于 DC-DC 电源的开关器件，当开关器件以一定频率开通和闭合时，在输出电容上就产生了同频率的开关纹波，开关纹波的频率一般在 100kHz 到 1MHz 之间。

MCU^[11-15]是为电机将电池的直流电转换为交流电的开关器件。三相交流感应电机是主流汽车行业的首选，作为新一代电动汽车的主要驱动。这种类型的电动机提供了工程师所追求的恒定扭矩，其结构相对简单，几乎不需要维护，坚固且高度可靠。然而，使用这样的电机带来了一些非常具体的挑战。显而易见的是，电池中储存的驱动电机的电力是直流电，而电机需要交流三相信号。为了克服这一点，使用 MCU 转换三相交流电来驱动电机。MCU 的一个重要特征是，它能够将不同的电压和频率的直流电转换为交流电，从而控制电机速度，最终控制车辆速度。但是，MCU 内部功率器件的不断开关可能会产生峰峰值高达上百安的大振幅纹波电流，并产生峰峰值高达上百伏的大幅值纹波电压。这些存在于连接到同一高压总线的其他高压组件的电源输入中，如 DCDC、充电器或高压电池。

OBC^[16-17]是车辆在交流充电时将电网的交流电转换为直流电并输送进电池包的器件，内部功率器件的不断开关可能产生高压纹波。OBC 主要有两种类型：单相和三相。标准单相 OBC 的功率通常为 3.6kW 至 7.2kW，而三相车载充电器的容量为 22kW。

3 多工况下整车高压纹波测试

3.1 多工况高压纹波方案一

在进行整车高压纹波测试时，我们应该尽可能找到最恶劣状态，即在该场景下，高压纹波电压最大，对车辆状态影响最深。为了确定出最恶劣状态，需要结合高压纹波在纯电动汽车中的产生原因进行分析，找到可能的最恶劣状态对应的实车工况，定好测试方案，从而确定高压纹波对整车的影响。纯电动汽车按照使用状态可

以大致分为充电工况和非充电工况。

在充电工况下，电网的交流电转换为车辆电池包的直流电时必须通过 AC/DC 转换，比如直流充电时通过直流充电桩进行转换，或者交流充电时通过 OBC 进行转换，而电网或直流充电桩的质量参差不齐，该场景有可能成为最恶劣状态。此时，车辆处于静止状态，MCU 通常不启动或者小功率启动，DCDC 的功率相对较低，通过调节车载低压用电器的开关而造成的高压纹波在高压网络中占比较小，测试方案中不考虑低压用电器的开启状态。而高压网络中的负载切换可能产生较大高压纹波，因此考虑 PTC 和压缩机的开启状态。

在非充电工况下，车辆可以大致分为静止状态和运动状态，在运动状态下，电驱系统处于驱动或动能回收状态，导致 MCU 在频繁开关中，可能产生较大高压纹波，而且其他高压组件和多数低压器件可以在运动状态中开启，车辆在运动状态下产生较大的高压纹波幅值的概率远大于静止状态下的概率。因此考虑车辆在不同速度下的测试工况，将车辆调至运动模式，分别测试加速、减速、匀速下的工况。综上，结合整车高压纹波形成原因和车辆使用场景，提出多工况高压纹波测试方案一如表 1 所示。

Table 1. Multi condition high-voltage ripple test scheme one
表 1. 多工况高压纹波测试方案一

序号	测试工况	车辆设置	测量信号
case1	低温直流充电+PTC	车辆在-7±2°C环境下浸置 2 小时，充电时打开空调，将温度调至最高	
case2	高温直流充电+压缩机	车辆在 38±2°C环境下浸置 2 小时，充电时打开空调，将温度调至最高	
case3	低温交流充电+PTC	车辆在-7±2°C环境下浸置 2 小时，充电时打开空调，将温度调至最高	
case4	高温交流充电+压缩机	车辆在 38±2°C环境下浸置 2 小时，充电时打开空调，将温度调至最高	高压母线电压
case5	60km/h 匀速	驾驶模式运动，车辆以 60km/h 车速匀速行驶	
case6	0-60km/h 加速	驾驶模式运动，车辆起步在 6S 内从 0 加速达到 60km/h 车速	
case7	60-0km/h 减速	驾驶模式运动，车辆以 60km/h 车速匀速行驶，在 6S 内从 60km/h 减速至 0	

车辆在带有环境模拟的转毂试验室内测试，其中转毂阻力按照车辆在道路滑行的参数进行设定，转毂的最高车速为 250km/h，速度测量精度≤0.02km/h，试验室内置的直流充电桩功率为 300kW，内置的交流充电桩功率为 7kW，可以控制-42~60°C的温度和 10%~95%R.H.的湿度。按照表 1 的工况，对车型一测试结果如图 3-5 所示：



Figure3. Bus voltage of Model 1: (a) under low-temperature DC charging+PTC heating conditions; (b) Under high-temperature DC charging and compressor cooling conditions

图 3. 车型一的母线电压：(a)在低温直流充电+PTC 制热的工况下；(b)在高温直流充电+压缩机制冷的工况下



Figure4. Bus voltage of Model 1: (a) under low-temperature AC charging+PTC heating conditions; (b) Under high-temperature AC charging and compressor cooling conditions

图 4. 车型一的母线电压: (a)在低温交流充电+PTC 制热的工况下; (b)在高温交流充电+压缩机制冷的工况下

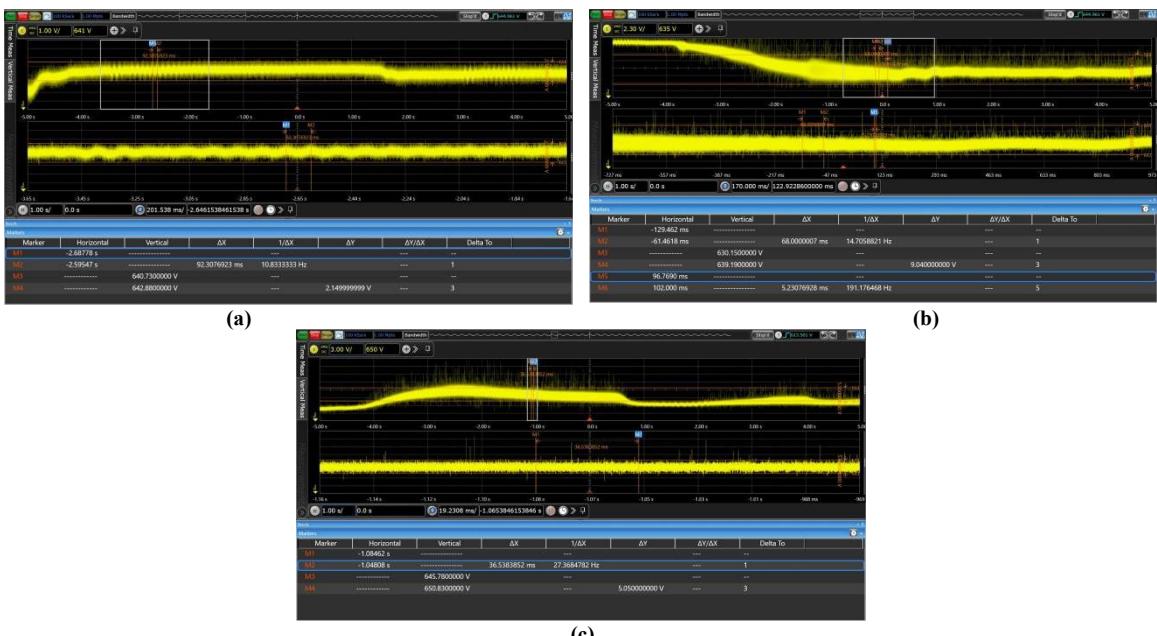


Figure5. Bus voltage of Model 1: (a) 60km/h constant speed; (b) 0-60km/h acceleration; (c) 60-0km/h deceleration

图 5. 车型一的母线电压: (a)60km/h 匀速; (b)0-60km/h 加速; (c)60-0km/h 减速

由图 3 可知, 车辆在低温直流充电和 PTC 制热的工况下的最大高压纹波电压峰峰值为 3.900V, 在高温直流充电和压缩机制冷的工况下的最大高压纹波电压峰峰值为 2.130V。并且直流充电时, 车型一母线上叠加了约 50Hz 的纹波信号, 该信号应该来自于车辆充电桩, 但是其幅值较小, 对车辆其他高压组件无明显影响, 此外开启 PTC 而造成的大高压纹波电压大于开启压缩机而造成的大高压纹波电压。

由图 4 可知, 车辆在低温交流充电和 PTC 制热的工况下的最大高压纹波电压峰峰值为 3.750V, 在高温交流充电和压缩机制冷的工况下的最大高压纹波电压峰峰值为 2.030V。将图 4 与图 3 对比可知, 车型一在充电时开启 PTC 而造成的大高压纹波电压大于开启压缩机而造成的大高压纹波电压, 而且交流充电时的最大高压纹波电压整体小于直流充电时的最大电压。

由图 5 可知, 车辆在 60km/h 匀速的工况下的最大高压纹波电压峰峰值为 2.150V, 在 0-60km/h 加速的工况下的最大高压纹波电压峰峰值为 9.040V, 在 60-0km/h 减速的工况下的最大高压纹波电压峰峰值为 5.050V。车辆匀速行驶时该车辆母线电压上的最大纹波电压较小, 应该是因为电驱系统功率较小, 因此考虑将该工况移除最恶劣状态的备选。此外, 加速状态下, 电驱系统功率较大, 从而在母线上产生了较大的纹波电压, 而减速过

程中，虽然电驱系统没有工作，但是动能回收使得电驱系统发电，MCU 将交流电转换为直流电并储存到动力电池中，因此同样在母线上产生了纹波电压，并且减速过程中的最大高压纹波电压明显小于加速过程中的最大高压纹波电压。

3.2 多工况高压纹波方案二

研究中发现纹波信号可能导致谐振，因此需要观察纹波在频域上的情况。实际测试中，示波器通常用来测量信号，因此可以采用示波器自带的 FFT 变换功能。示波器的 FFT 变换功能可以直接得到电压有效值，但评价纹波电压大小时通常采用幅值，因此需要推导幅值与有效值的关系。

原始信号可以分解成多个不同频率的正弦函数的累加，即式(1)如所示。

$$f(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

单一频率的正弦电压信号可以表示如公式(2)所示，其中 U_m 是正弦电压信号幅值。

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_n) \quad (2)$$

有效值是能够给同一负载电阻提供相同电功率的等效直流电的数值，可以用公式(3)表示

$$\int_0^T \frac{u^2(t)}{R} dt = \frac{U^2}{R} T \quad (3)$$

计算得出有效值 U 如下

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 U_m \quad (4)$$

在 3.2 节的试验中发现，车辆的电驱系统对高压纹波的幅值大小有明显作用，因此考虑增加车辆运动状态的工况，并涵盖实车可能使用场景，对测试工况进一步优化，提出以下的测试工况：

Table 2. Multi condition high-voltage ripple test scheme two
表 2. 多工况高压纹波测试方案二

序号	测试工况	车辆设置	测量信号
case1	0-60km/h 加速	驾驶模式运动，车辆起步在 6S 内从 0 加速达到 60km/h 车速	
case2	80-120km/h 加速	驾驶模式运动，车辆以 80km/h 车速匀速行驶，在 6S 内从 80km/h 加速至 120km/h 车速	
case3	120-80km/h 减速	驾驶模式运动，车辆以 120km/h 车速匀速行驶，在 6S 内从 120km/h 减速至 80km/h 车速	
case4	60-0km/h 减速	驾驶模式运动，车辆以 60km/h 车速匀速行驶，在 6S 内从 60km/h 减速至 0	高压母线电压
case5	低温直流充电+PTC 制热	车辆在 -7±2°C 环境下浸置 2 小时，充电时打开空调，将温度调至最高	
case6	高温直流充电+压缩机制冷	车辆在 38±2°C 环境下浸置 2 小时，充电时打开空调，将温度调至最高	

按照表 2 对另两款车型进行测试，测试波形如图 6 至图 11 所示，测试结果如表 3 和表 4 所示。

Table 3. Test results of high-voltage ripple under multiple operating conditions for Model 2
表 3. 车型二的多工况高压纹波测试结果

测试工况	最大高压纹波电压峰峰值(V)	频域峰值点的电压有效值(V)	频域峰值点的频率
0-60km/h 加速	11.917	2.106	19.475kHz
80-120km/h 加速	15.347	0.409	8.159kHz
120-80km/h 减速	3.363	0.129	7.593kHz
60-0km/h 减速	2.498	0.079	19.475kHz
低温直流充电+PTC 制热	1.268	0.014	30.588Hz
高温直流充电+压缩机制冷	4.213	0.037	23.854kHz

Table 4. Test results of high-voltage ripple under multiple operating conditions for Model 3
表 4. 车型三的多工况高压纹波测试结果

测试工况	最大高压纹波电压峰峰值(V)	频域峰值点的电压有效值(V)	频域峰值点对应频率
0-60km/h 加速	18.491	1.018	19.475kHz
80-120km/h 加速	28.979	0.938	19.475kHz
120-80km/h 减速	11.592	0.276	19.475kHz
60-0km/h 减速	16.205	1.525	19.475kHz
低温直流充电+PTC 制热	1.231	0.010	29.219Hz
高温直流充电+压缩机制冷	6.221	0.059	33.96kHz

由表 3 和表 4 可知, 在时域上, 两台车的最大高压纹波电压峰峰值均出现在 80-120km/h 工况下, 但频域上的峰值点对应的工况却不同, 车型二的最大频域峰值点电压在 0-60km/h 工况下, 车型三的最大频域峰值点电压在 60-0km/h 工况下, 两款车在频域上的最恶劣状态均不与时域上的最恶劣状态重合, 说明了高压纹波测试不能只看时域电压峰峰值, 其可能叠加了较多噪声, 不属于纹波范围, 证明了高压纹波测试频域分析的必要性。

由表 4 可知, 前四个工况下的频域峰值点对应频率相同, 说明了电驱系统在产生高压纹波的过程中占大量比重, 但其对应的峰峰值没有随着电驱系统的扭矩和转速增加而增加, 说明了内网高压纹波的耦合有叠加也有抑制, 证明了整车高压纹波测试的必要性。表 3 也能说明这个结论, 因为车型二在 80-120km/h 加速工况下和 120-80km/h 减速工况下的频域峰值点没有和另外两个峰值点保持一致, 即高速运动状态下内网有 19.475kHz 的抑制成分, 使得该频率点的电压峰值减小, 从而使得其他频率点成为峰值。

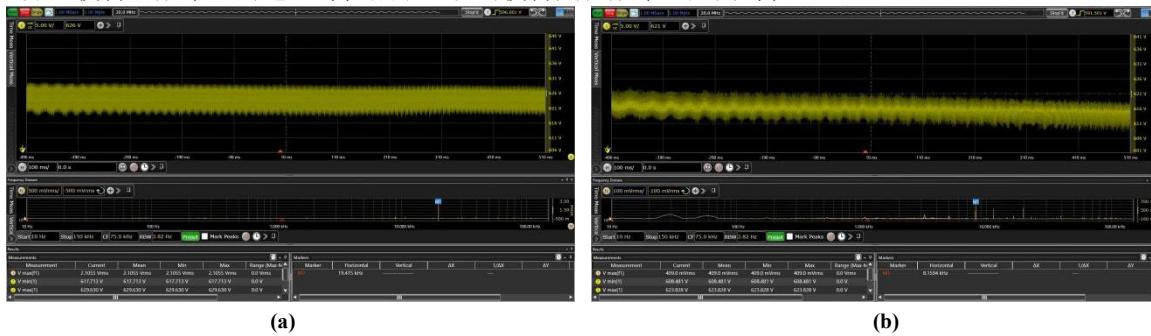


Figure 6. Bus voltage of model 2: (a) 0-60km/h acceleration; (b) 80-120km/h acceleration

图 6. 车型二的母线电压: (a)0-60km/h 加速; (b)80-120km/h 加速

综上, 测试结果说明了不同车型的高压纹波电压最恶劣状态对应的工况不同, 也说明了优化后的多工况高压纹波测试方案可以让测试工程师更快更准确地定位不同车型的最恶劣状态, 加快测试进度。频域分析的引入, 可以发现车辆在不同工况下频域峰值点的频率不同, 便于定位高压纹波的产生原因并抑制, 说明了频域分析的必要性。



Figure7. Bus voltage of model 2: (a)120-80km/h deceleration; (b)60-0km/h deceleration

图 7.车型二的母线电压: (a)120-80km/h 减速; (b)60-0km/h 减速

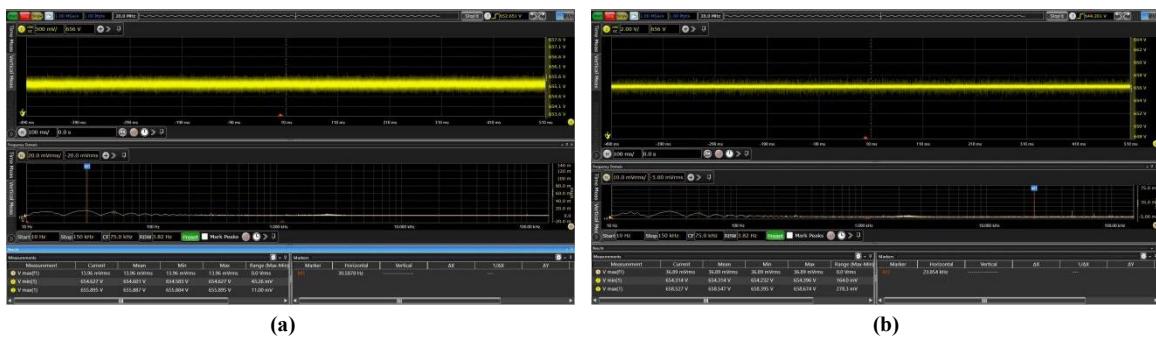


Figure8. Bus voltage of model 2: (a)low temperature DC charging+PTC heating; (b)high temperature DC charging+compressor cooling

图 8.车型二的母线电压: (a)低温直流充电+PTC 制热; (b)高温直流充电+压缩机制冷

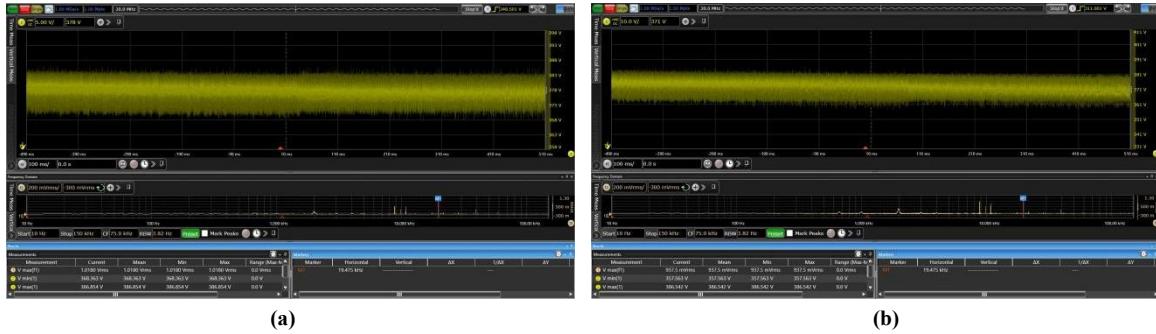


Figure9. Bus voltage of model 3: (a)0-60km/h acceleration; (b)80-120km/h acceleration

图 9.车型三的母线电压: (a)0-60km/h 加速; (b)80-120km/h 加速

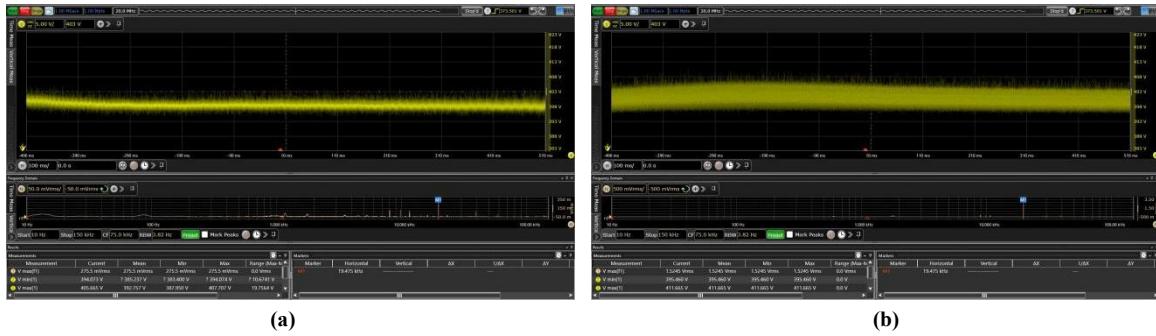


Figure10. Bus voltage of model 3: (a)120-80km/h deceleration; (b)60-0km/h deceleration
图 10. 车型三的母线电压: (a)120-80km/h 减速; (b)60-0km/h 减速

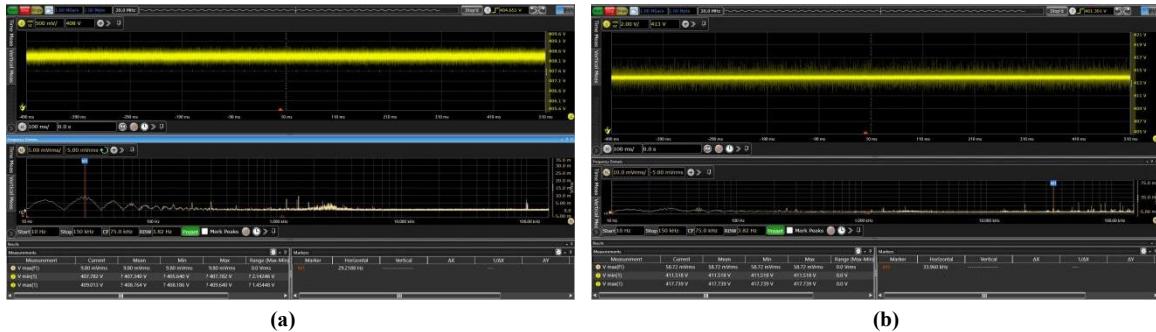


Figure11. Bus voltage of model 3: (a) low temperature DC charging+PTC heating; (b) high temperature DC charging+compressor cooling
图 11. 车型三的母线电压: (a)低温直流充电+PTC 制热; (b)高温直流充电+压缩机制冷

4 结论

本文解释了纯电动汽车高压纹波的形成原因，设计了多工况高压纹波测试方案，实车测试数据一方面印证了纯电动汽车高压纹波的产生主要是由于开关器件和负载通断，另一方面为优化多工况高压纹波测试方案提供依据，优化后的多工况高压纹波测试方案可以让测试工程师更快更准确地定位不同车型的最恶劣状态，加快测试进度。

致 谢 (Acknowledgement)

本研究工作得以顺利完成，离不开“电子电气架构测试评估与整车集成应用技术研究”课题的支持，课题编号为 2021YFB2500904。

参考文献(Reference)

- [1] Yang Dapi. Current Status and Trends of Key Technologies Development for New Energy Electric Vehicles [J] Automotive knowledge, 2024: 17-19.
- [2] ZHAO Lingxiao,PAN Qixin,SI Ke, et al. Research on high voltage ripple test method of electric drive system of electric vehicle[J]. China's high-tech industry, 2024(12): 85-87.
- [3] Liu Qin. Ripple current heating technology and its impact on the performance of new energy vehicles [J]. Automobiles and New Power, 2023, (03): 35-37.
- [4] Kotub Uddin,Andrew D. Moore,Anup Barai, et al. The effects of high frequency current ripple on electric vehicle battery performance[J]. Applied Energy, 2016, 178: 142-154.
- [5] Hollenkamp A F Banerjee P C et al. Ghassemi A. Impact of high-amplitude alternating current on LiFePO₄ battery life performance: Investigation of AC-preheating and microcycling effects[J]. Applied Energy, 2022, 314(118940).
- [6] Yan Zhibiao, Sike, Zhao Lingxiao. Experimental analysis of voltage ripple in high-voltage system components of electric vehicles [J]

Automotive components, 2023, (10): 30-33.

- [7] Zhang Qian, Han Hui, Wang Ke. Methods for Suppressing Ripple in Switching Power Supply Circuits [J] Automotive Electrical Appliances, 2019, (03): 44-45, 48.
- [8] Research and Application of Harmonic Suppression in Electric Vehicle Charging Station[D]. Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [9] Zhao Gonghao, Liu Hongpeng, Yuan Dan, etc. Risk assessment of electric vehicle charging safety based on fuzzy comprehensive evaluation [J] Computer Measurement and Control, 2024, (04): 300-307.
- [10] Design of Ripple Based DC-DC Converter with Fast Transient Response[D]. University of Electronic Science and Technology, 2022.
- [11] Fan Xue, Lai Jianbin, He Wei, etc. Research on the Evaluation Method of Ripple Motor [J] Automotive Electrical Appliances, 2023, (11): 69-73, 78.
- [12] Zhou Man, Wang Lixian, Jiang Huaqiao, etc Low cost ripple square wave conversion strategy based on motor bus current [J] Micro motor, 2024, (04): 46-51.
- [13] Zhang Lu. Overview of Bus Capacitor for New Energy Vehicle Motor Drivers [J] Practical Automotive Technology, 2022, (02): 170-172.
- [14] Chen Jun, Yin Zhaokai, Sun Xinhuan, etc. Research on Ripple Current of Bus Capacitor in Electric Vehicle Motor Controller [J] Micro motor, 2023, (03): 63-66, 82.
- [15] Cao Xiao, Liu Wang, Tang Xionghui, etc. Research on capacitor ripple current suppression of dual motor controller [J] Mechanical and Electrical Information, 2022, (19): 1-7.
- [16] Research on Multi-mode Bidirectional On-board Charger for Electric Vehicle[D]. China University of Mining and Technology, 2022.
- [17] Research on Single-phase Integrated On-board Charging System for Electric Vehicles[D]. Southeast University, 2023.