

# 电动汽车整车EMI分析定位与整改技术

韩超超<sup>1,2</sup>, 雷剑梅<sup>1,2</sup>, 陈立东<sup>1,2</sup>, 王维<sup>1,2</sup>

(1. 汽车噪声、振动与安全技术国家重点实验室, 重庆 401122; 2. 重庆市汽车电磁兼容性能开发工程技术研究中心, 重庆 401122)

**摘要:**为快速实现电动汽车整车电磁干扰(EMI)测试超限值问题定位与后续整改, 首先对国内外电动汽车整车EMI测试相关标准进行了梳理和分析, 结合测试标准和实测工况要求, 设计了EMI测试超限值问题的分析定位方法。其次对电动汽车整车EMI传播及抑制原理进行了分析, 提出了对应在整车上实用、便捷的整改方法与思路。最后, 应用设计的EMI分析定位方法和整改技术, 针对某款电动车GB34660—2017宽带、窄带辐射测试结果超标进行了分析与整改, 最终通过测试。

**关键词:**电动汽车; 电磁干扰; 分析定位; 整改技术

**中图分类号:** U469.72; O441.4; TN713 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22499

## EMI Analysis & Location and Rectification Technology of Electric Vehicles

HAN Chaochao<sup>1,2</sup>, LEI Jianmei<sup>1,2</sup>, CHEN Lidong<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology, Chongqing 401122, China; 2. Chongqing Engineering Research Center for Automotive EMC Development, Chongqing 401122, China)

**Abstract:** To quickly realize the location and follow-up rectification of the over-limit problem in the electro magnetic interference (EMI) test of electric vehicles, firstly, the relevant standards for EMI testing of electric vehicles at home and abroad were sorted out and analyzed, and then combining the test standards and actual test conditions, a method for analyzing and locating the over-limit problem of EMI test was designed. Secondly, the principle for EMI transmission and suppression of electric vehicles was analyzed, and practical and convenient rectification technical methods corresponding to the entire vehicle were proposed. Finally, using the designed EMI analysis & location method and rectification technology, the GB34660—2017 broadband and narrowband radiation test results of a certain electric vehicle were analyzed and rectified, and finally the test was passed.

**Key words:** electric vehicle; electro magnetic interference(EMI); analysis & location; rectification technology

目前, 汽车在向着电动化、智能化、网联化的方向发展。智能网联汽车的发展将涉及到感知技术、信息融合技术、车载自组织网络技术、全辅助驾驶技术、无线通信技术、海量数据处理技术<sup>[1-3]</sup>。这些技术的实现对传感器采集精度、控制器的处理速度、执行器的执行准确度、通信的时延性及误码率等指标有着严苛的要求。以上器件受到外界电磁干扰, 可能会引起车的功能、性能不同等级降级, 严重的将会出现控制失控、通信中断等问题从而造成安全事故<sup>[4]</sup>。目前汽车所受到的电磁干扰一方面来自车外各种电子、电气、通讯设备电磁辐射; 一方面来自汽车电器设

备工作时自身所产生的电磁干扰(EMI), 包括传导骚扰、辐射骚扰以及耦合骚扰。尤其是电动汽车的三电系统<sup>[5-6]</sup>: 高压电池包、电机控制器、驱动电机带来了高压大电流问题, 包括车载充电机(on board charger, OBC)、直流-直流(direct current-direct current, DC-DC)电源等这些部件都会使得整车的电磁环境更加复杂、自兼容问题以及对外骚扰问题比较严重。

目前解决这些问题的思路主要从整车和零部件两个层面考虑, 整车方面要在整车电子电气架构设计初期, 从电器布局、电源和接地分配设计、线束设计选择方面来考虑电磁兼容(EMC)风

**基金项目:** 科技领域创新领军人才(CQYC201903016)

**作者简介:** 韩超超(1987—), 男, 硕士, 助理研究员, Email: slsyw@163.com

险因素并进行相应设计。零部件方面从电路原理图和印制电路板(PCB)、结构、接口等方面来考虑EMC风险因素并进行相应设计。为了能够解决这些问题,使整车EMC性能通过法规及相应标准要求,很多车企都已经引入整车EMC正向开发方法,包括整车和零部件2个层面,并引入计算机仿真技术手段进行风险预测分析。从目前来看,正向开发方法的应用,在很大程度上能够把整车装车后EMC不合格风险降到最低、节约时间成本,但不一定能够保证整车EMC测试项目(法规和非法规项)全部一次性通过,测试不合格项还是需要问题定位和问题整改。本文将针对电动汽车整车EMI问题定位和整改技术进行分析研究,主要包括相关标准分析、问题定位分析及整改技术3部分。

## 1 电动汽车整车EMI国内外标准梳理与分析

表1为目前电动车整车EMI类国内外标准<sup>[7-10]</sup>。

表1 整车EMI类国内外标准

Tab.1 Domestic and foreign standards of EMI for complete vehicles

国内外标准	参考或引用标准	频段范围	关于整车测试内容	备注
GB14023—2011	CISPR 12—2009	30 MHz ~ 1 GHz	测量整车对外辐射发射	公告项已取消
GB34660—2017	ECE R10Rev.3	30 MHz ~ 1 GHz	测量整车对外辐射发射	公告项
GB/T18387—2017	SAE J551—5:2012	150 kHz ~ 30 MHz	测量电动车辆电场和磁场辐射发射	公告项
GB/T18655—2018	CISPR 25—2016	150 kHz ~ 2.5 GHz	测试整车各个电器工作时对车载接收机的影响	
EC-ER10.05 (整车充电状态下传导骚扰类项目)	IEC61000—3—2		整车充电时对电网的谐波发射	交流慢充(输入电流≤16 A),问题较少
	IEC61000—3—3		整车充电时对电网电压的影响	交流慢充(输入电流≤16 A),问题较少
	IEC61000—6—3	150 kHz ~ 30 MHz	整车充电时L, N线上的传导骚扰	交流慢充,问题较多。
EC-ER10.05 (整车充电状态下辐射发射项目)		30 MHz ~ 1 GHz	测量整车充电状态下对外辐射发射	车辆点火开关处于OFF状态测试,问题较少。

如表1所示,EMI包含辐射发射和传导发射两大类。

涉及到整车辐射发射的标准有GB14023—2011,GB/T18387—2017,GB34660—2017(整车发射部分)及ECE R10.05,由于GB14023—2011公告项目已经被GB34660—2017取代,因此GB14023—2011可不再关注。GB/T18387—2017,GB34660—2017两个公告项目超标问题较多。

涉及到传导发射的标准有GB/T18655—2018,ECER10.05。GB/T18655—2018是测量整车电器工作时对车载接收机天线影响,可归到整车电器自兼容问题当中,车载接收机天线类型有:全球定位系统(GPS)、调幅/调频(AM/FM)、无线连接(WIFI)、蓝牙等。ECER10.05中整车充电状态下辐射发射、谐波发射、电压变化波动与闪烁测试问题一般较少,整车交流充电传导发射超标问题较多。

## 2 电动汽车整车EMI问题分析定位

### 2.1 GB/T18387—2017电磁场辐射发射问题分析定位

GB/T18387—2017电磁场辐射发射问题分析定位流程图如图1所示。

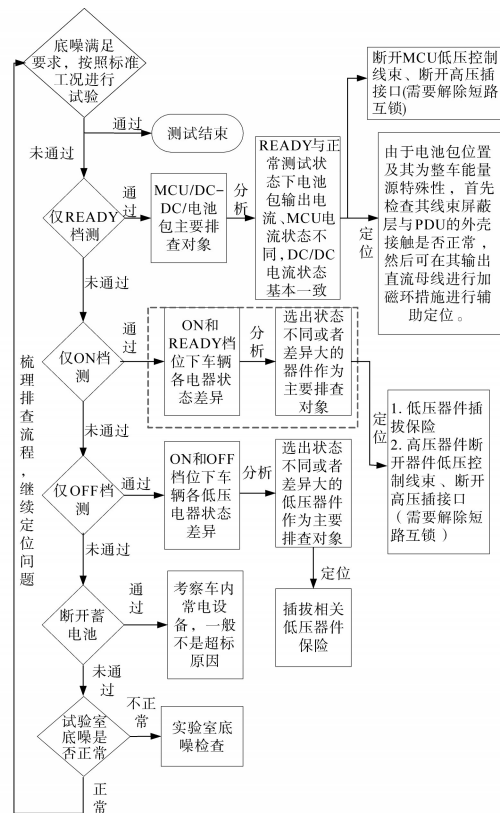


图1 GB/T18387—2017测试问题分析定位方法流程  
Fig.1 The process of GB/T18387—2017 test problem analysis and positioning method

图1中,虚线框内内容要根据实车状态具体分析,如果ON和READY状态无大的差异或者不好确定,可以直接跳过,进行后边的分析。

GB/T18387—2017测量点为车辆前、后、左、右4个位置,包括电场、磁场2个方面。首先车辆以40 km/h进行预测试,从预测结果中选出电场值、磁场值最大的位置点,再分别以16 km/h,70 km/h在最大值位置点进行电场、磁场测试,最后记录下数据,以上为1个完整的测试流程<sup>[7]</sup>。

综上,可以看出车辆上READY后保持在特定速度值下测试,并未对其他电器工况进行要求,如果测试结果不满足标准限值要求,通过分析以上测试工况中有哪些电器在工作,再结合驱动电机控制器(MCU)、DC-DC等高压器件拓扑结构及其工作频率特性,大多数超标原因与高压器件有关系。

2.2 GB34660—2017 整车辐射发射

GB34660—2017 整车辐射发射测试包括窄带测试与宽带测试。

对于电动汽车来说,窄带测试车辆应处于READY档位、车辆静止且应开启所有内部振荡器信号频率大于9 kHz或者具有重复信号的长时工作设备,使其正常工作。

对于电动汽车来说,宽带测试车辆驱动装置应处于整车运行状态,车速为40 km/h,且长时间工作、能够产生宽带骚扰的部件处于正常工作状态<sup>[8]</sup>。

由上可以看到,宽带、窄带测试工况对相应的车载电器件工作状态都有一定要求,最大区别在于电机是否运转在40 km/h。在问题分析定位时,宽带测试问题分析比窄带分析多出内容也在于此,可先进行窄带分析然后再进行宽带分析,后者也可以借鉴前者结论。

GB34660—2017 整车辐射发射窄带测试问题分析定位方法流程图如图2所示。GB34660—2017 整车辐射发射宽带测试问题分析定位方法流程图如图3所示。图2、图3中,虚线框内的内容是要根据整车的状态进行具体分析的,如果测试车辆在ON和READY状态下,车辆各电器运行状态无大的差异或者不好确定,可以直接跳过此步,进行后边的分析。

在以上分析中,对于不确定的或者潜在的骚扰器件,可以借助近场设备进行近场探测,来辅助定位。

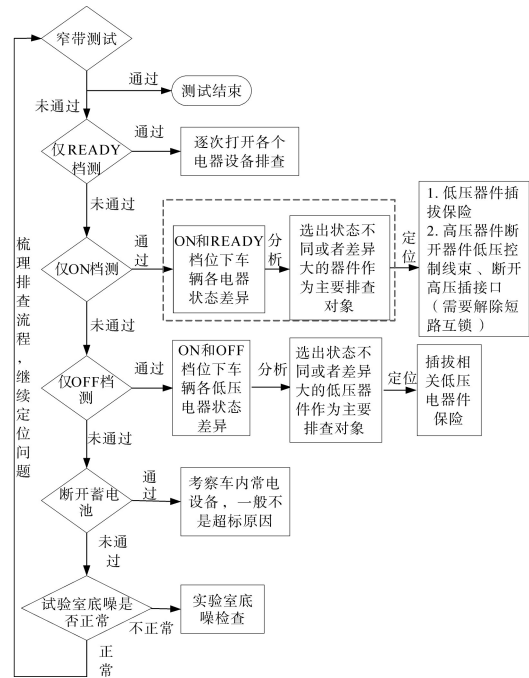


图2 GB34660—2017窄带测试问题分析定位方法流程

Fig.2 The process of GB34660—2017 narrowband test problem analysis and location method

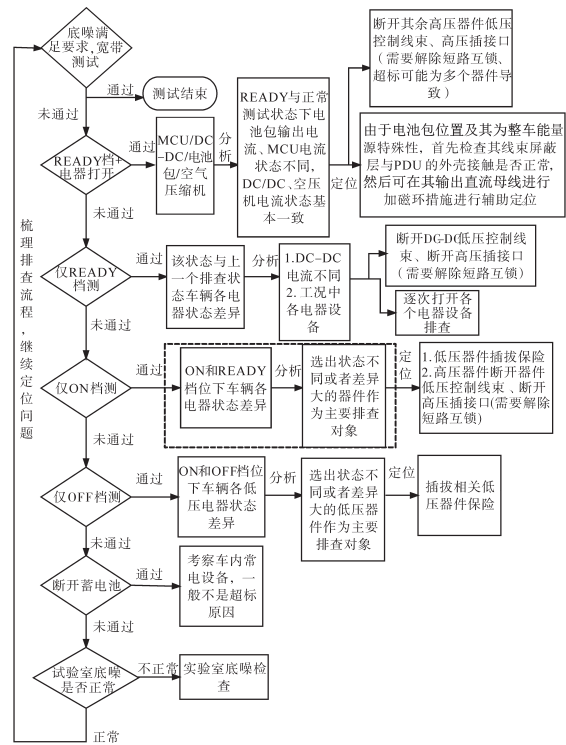


图3 GB34660—2017宽带测试问题分析定位方法流程

Fig.3 The process of GB34660—2017 broadband test problem analysis and positioning method

2.3 其他测试项目EMI问题分析定位

对于GB/T18655—2018中整车测试部分,主要是测试整车各个电器工作时对车载接收机的影响。测试结果超标,一般为操作的各个电器及

其线束产生辐射、传导骚扰所致。表1中整车充电传导类项目,一般超标原因是充电枪或者OBC导致。IEC61000—6—3整车充电传导发射项目是骚扰类项目,IEC61000—3—2电快速瞬变脉冲群(electrical fast transient, EFT)及IEC61000—3—3浪涌(Surge)项目是2个抗扰类项目。

对于测试超标分析定位如下:1)首先通过实际电路判断充电枪、OBC是否具备了相应的EMC措施及其参数是否选择正确;考虑整个充电系统搭铁、线束连接是否存在问题。2)若设计上符合要求,可对充电枪做单个零部件试验,其负载可使用大功率阻性负载。3)充电枪测试如果有问题,对充电枪电路进行再次分析,并对内部EMC关键电路进行相关测量:滤波电路及防护电路、芯片供电电压、芯片地线等。4)充电枪测试如果无问题,需要复查OBC电路,确认无问题,可选择从车上拆下单独做零部件试验或者多拿几个测试通过的充电枪与其配套做试验。

### 3 电动汽车整车EMI测试整改技术

#### 3.1 电动汽车EMI传播及抑制原理

图4为电动汽车EMI传播及抑制原理图。

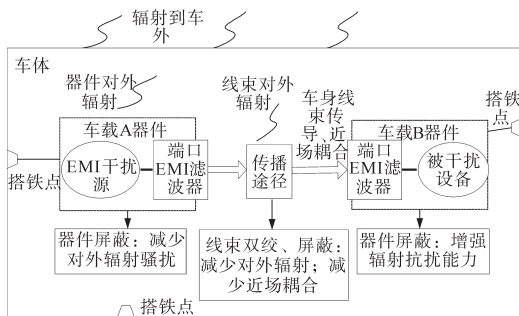


图4 电动汽车EMI传播及抑制原理图

Fig.4 Schematic diagram of electric vehicle EMI propagation and suppression

从EMC三要素<sup>[1]</sup>来对图4进行分析。首先,车内包括 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 等多个骚扰源器件:高压器件、低压器件中电机和大功率电源类器件。其次是 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 等多个敏感源器件,包括普通低压敏感器件、雷达和天线类等射频器件。最后,骚扰源器件通过对外辐射、耦合(器件为金属外壳或者带有金属散热器与金属车体之间)形成干扰;骚扰源线束通过传导、近场耦合、容性耦合等方式形成干扰,这些干扰被施加在敏感源设备及其线束中,同时没有被车体吸收的能量在车外空间形成辐射干扰。

解决以上这些问题,同样从EMC三要素入手,抑制骚扰源、切断传播途径、提高敏感源抗扰能力。对骚扰源采取端口滤波、屏蔽等措施,针对特殊敏感信号线束采用双绞、屏蔽等方式。对敏感源采取端口滤波与防护、屏蔽等措施,其中有无无线模块的敏感源不能采用屏蔽措施。对于外壳是金属的器件要合理设计与车身的搭铁点。

#### 3.2 电动汽车整车EMI测试超标整改技术

在定位到问题器件后,需要根据器件的工作频率、电压、电流等电特性以及外壳结构特点,将3.1小节中提到的解决方法转化为实车上对应的措施。

具体在整车上可采取的措施如下所示:

1)器件端口及线束的共模滤波,可以首先采用一定参数磁环加在端口线束位置等效测试。如果效果不明显,可以进一步自制Y电容滤波器、共模电感等加在相应端口位置。

2)器件端口及线束的差模滤波,一般采用自制的X电容滤波器、差模电感加在相应端口位置;信号线上可串联相应参数的磁珠滤波。

3)对于器件或者线束需要屏蔽的,一般采用铜箔或者一定密度的编织网进行包裹测试,屏蔽层高频双端接地,低频可以采用单端接地。

4)金属外壳器件尤其是高压器件,要注意其接地点位置及其电连续性,尽量保证其接地回路最小。

5)针对EFT测试项目超标时,在充电枪或者充电机内部电路上的电源线、信号线是否受到干扰影响问题,可在问题电路管脚增加电容滤波、电感滤波等来进行监测。

6)针对Surge测试项目超标,在充电枪或者OBC端口电路上考察其过压防护是否完善,一般采用TVS、压敏电阻、气体放电管等器件进行端口电路设计,同时应注意参数选型。

另外,除在器件端口外的其它内部电路需要变更的地方,提出相应的优化设计方案后,要同主机厂及其供应商商讨后共同进行,以免损坏器件。

#### 3.3 电动汽车EMI测试超标整改案例

某款电动车GB34660—2017测试结果如图5、图6所示。由图5、图6可知,电动汽车EMI窄带、宽带测试结果均超标,窄带主要超标频点为58.6 MHz, 118.8 MHz, 137.4 MHz;宽带超标频点为118.8 MHz, 137.35 MHz。

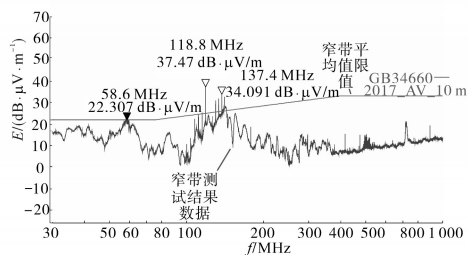


图5 窄带左侧垂直  
Fig.5 Narrowband-left vertical

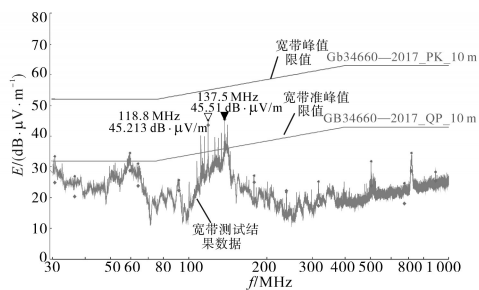


图6 宽带左侧垂直  
Fig.6 Broadband-left vertical

按照图2流程进行窄带问题分析,分析结果如下:118.8 MHz频点超标为大屏幕导致;58.6 MHz, 137.4 MHz频点超标为电机驱动控制器导致。

按照图3流程进行宽带问题分析,再结合窄带分析结果,得到如下结论:118.8 MHz频点超标为大屏幕导致;137.5 MHz频点超标为电机驱动控制器导致;58.6 MHz频点宽带限值高于窄带,该频点未超标。

针对超标频点可以定位到问题器件,在采取措施之前,要进一步对相应器件进行分析。

### 3.3.1 大屏整改措施分析

以薄膜晶体管-液晶显示器(thin film transistor-liquid crystal display, TFT-LCD)为例,分析其内部电路结构,如图7所示。由图7可知,内部电路时钟信号、图像数字高频信号都会导致EMI的产生,最终会通过接口及线束形成对外的辐射、传导干扰。

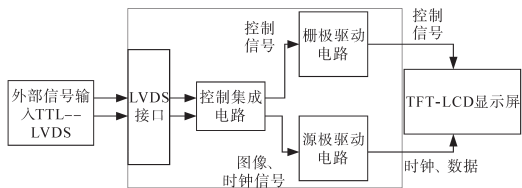


图7 TFT-LCD大屏内部电路框图  
Fig.7 Block diagram of internal circuit of TFT-LCD large screen

为了解决上述问题,在大屏接口线束增加北川工业RFC-20型号磁环,磁环参数如图8所示。

实物整改示意图如图9所示,虚线框处为所增加的磁环。

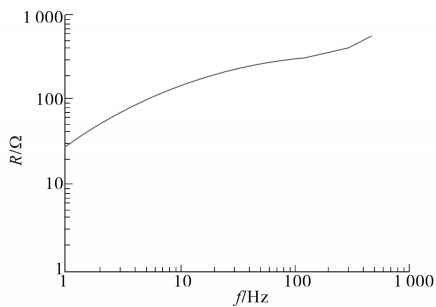


图8 RFC-20磁环参数  
Fig.8 The parameters of RFC-20 magnetic ring

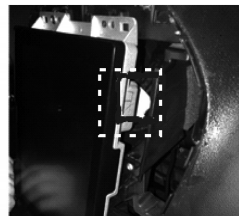


图9 大屏接插口套磁环  
Fig.9 Large screen connector sleeve magnetic ring

验证增加磁环措施有作用后,进行内部电路设计优化。控制集成电路输出串行时钟(serial clock, SCLK)信号、红绿蓝(red green blue, RGB)信号、时间脉冲(time pulse, TP)、数据极性反转信号(polarity, POL)到源极驱动电路。工作原理为:SCLK信号上升沿时,1个RGB信号像素数据传输到源极驱动电路,当一行像素传送完成后,输出TP脉冲,源极驱动器内部将全部数据转换为灰度电压后输出到显示屏。其中RGB信号最大频率可达370 MHz,信号线上目前电阻值为33 Ω,为了降低信号辐射能量,把电路RGB信号线上电阻换成220 Ω/100 MHz的磁珠,TFT排线用吸波纸包裹,测试通过。

### 3.3.2 MCU整改措施分析

电机驱动控制器(MCU)电路原理框图如图10所示,主要由控制电路、PWM驱动电路、全桥功率电路3部分组成。

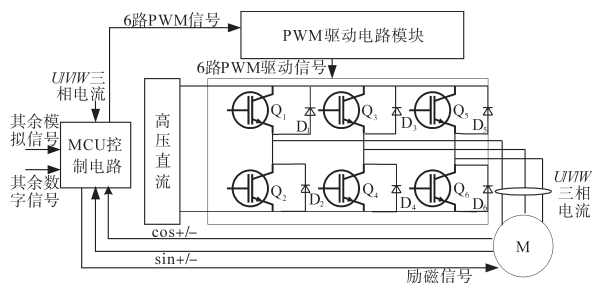


图10 电机驱动控制器原理框图  
Fig.10 Block diagram of motor drive controller principle

图10中,全桥功率电路是产生EMI的主要部分,旋变信号、数字电路、电源变换也都会产生EMI<sup>[6]</sup>,这些EMI既有共模信号也有差模信号(它们产生的机理不在本文中做具体阐述,具体可查阅文献[9]中分析),最终都以传导、辐射的形式传播,因而属于辐射发射超标。

干扰传播途径主要有如下3个:

1)从MCU低压控制电路接口及其线束辐射出去。

2)从U,V,W三相高压电源线辐射出去,高压电源线束及接口屏蔽层与金属外壳采用360°环接方式且接触良好,同时屏蔽效能满足设计要求。

3)从壳体缝隙辐射出去,经现场检查缝隙与螺孔间距均满足要求。

由上述分析可知,低压控制电路接口及线束是要重点关注的位置。在MCU控制电路端口线束上首先采用套磁环方式,数据有大幅改善。同时发现电机驱动控制器金属外壳通过电机后与车身形成搭接——非直接搭接方式,更改搭接点为最近位置,缩短“脏”信号流动路径和减小发射环路面积,并对MCU的4个螺栓固定点打磨。

综上,MCU采取了以下整改措施:

1)MCU低压控制线增加KGS磁环RFC-20,在50~200MHz时磁环电阻为200~300Ω。

2)MCU增加一处接地线,搭接到车身。

3)将MCU中4个固定螺丝孔接触面进行打磨,改善接地电连续性。

电机驱动控制器实物整改示意图如图11所示。图12为MCU整改后的窄带左侧垂直测试结果波形图,图13为宽带左侧垂直测试结果波形图。由图12、图13可知,测试结果符合限值要求。

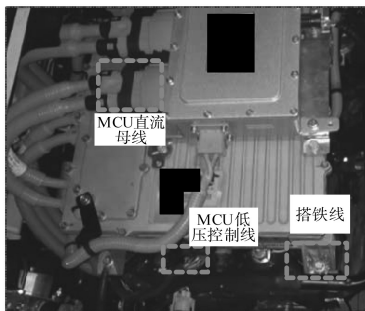


图11 电机驱动控制器整改示意图

Fig.11 Schematic of motor drive controller rectification

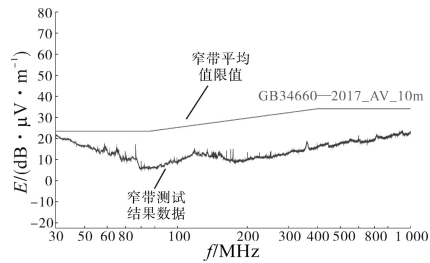


图12 窄带左侧垂直

Fig.12 Narrowband-left vertical

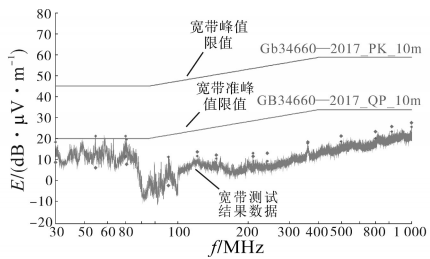


图13 宽带左侧垂直

Fig.13 Broadband-left vertical

## 4 结论

结合工程实际经验,对电动汽车整车EMI问题定位设计了一套流程化的方法,通过对电动汽车EMI传播及抑制技术理论分析后,提出了一套能够应用在工程上的快速、便捷整改技术方法,将此整改技术进行了电动汽车整车EMI测试,测试结果符合限值要求。在做整车EMI问题定位与整改时,方法流程不是一成不变的,需要结合实际情况灵活运用。

本文提到的整改技术是基于对车载电器件原则上不做过多改动而设计,最终工程化需要把这些措施转化到器件相应电路上,例如3.3小节大屏整改措施,这需要去研究器件的电路拓扑结构及EMC关键电路。

### 参考文献

- [1] 缪立新,王发平. V2X车联网关键技术研究及应用[J]. 汽车工程学报,2020,10(1):1-12.
- [2] 崔胜民. 智能网联汽车新技术[M]. 北京:化学工业出版社,2019.
- [3] 钱志鸿,田春生,郭银景,等. 智能网联交通系统的关键技术与发展[J]. 电子与信息学报,2020,42(1):2-19.
- [4] 雷剑梅. 智能网联汽车电磁兼容测试验证的新挑战[J]. 安全与电磁兼容,2019(5):9-12.
- [5] 汪泉弟,安宗裕,郑亚利,等. 电动汽车开关电源电磁兼容优化设计方法[J]. 电工技术学报,2014,29(9):225-231.

(下转第80页)

一步为配电网边缘智能化计算和高级应用奠定了基础,满足了智能配电网在运行状态评估、故障信息诊断挖掘、突发事件数据可信度识别等高级应用中高可靠性的需求。

参考文献

[1] 刘凯诚,钟鸣,曾平良,等.考虑分布式可再生电源和储能智能配电网可靠性评估综述[J].电测与仪表,2021,58(7):1-11.

[2] Mohammed Kemal, Ruben Sanchez, Rasmus Olsen, et al. On the trade-off-between timeliness and accuracy for low voltage distribution system grid monitoring utilizing smart meter data[J]. Elsevier Ltd, 2020, 121: 106090.

[3] 补敏,丁泽俊,钟锦群,等.基于配用电大数据的供电电压监测与分析研究[J].电力大数据,2019,22(3):1-7.

[4] 威尔江,彭道刚,关欣蕾,等.智能配电自动化远方终端数据采集系统设计[J].电气传动,2018,48(7):60-65.

[5] 田鹏,秦贺,侯乃乾,等.基于边缘计算和广域同步测量技术的配电网故障定位方法[J].电气工程学报,2020,15(1):83-88.

[6] 高鹏翔.基于多源数据融合的配电网运行故障特征信息提取技术研究[D].北京:华北电力大学,2019.

[7] 盛万兴,方恒福,沈玉兰,等.考虑量测时延时基于3种数据融合的配网状态估计[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(12):108-115.

[8] 周杨珺,梁朔,俞小勇,等.基于多源异构数据的配电网运行分析平台:系统架构与技术实现[J].南方电网技术,2018,12(8):59-64.

[9] 孙浩洋,张冀川,王鹏,等.面向配电网边缘计算技术[J].

电网技术,2019,43(12):4314-4321.

[10] Okay F Y, Ozdemir S. A fog computing based smart grid model[C]//2016 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), Hammamet: ISNCC, 2016: 1-6.

[11] 马洲俊,樊飞龙,王勇,等.基于多源异构数据的配电网故障信息挖掘与诊断[J].供用电,2018,35(8):31-39.

[12] Barik RK, Gudey SK, Reddy GG, et al. Fog grid: leveraging fog computing for enhanced smart grid network[C]//2017 14th IEEE India Council International Conference (INDICON), IEEE, 2017: 15-17.

[13] 王维嘉,孙亚运,孙洪亮,等.基于多目标优化技术的多源异构数据分类研究[J].计算机与数字工程,2020,48(1):130-136.

[14] 段惠,秦立军,赵显秋,等.含DG的智能配电网快速自愈技术研究[J].电测与仪表,2021,58(7):67-73.

[15] 道刚,赵晨洋,关欣蕾,等.基于IEC61850的智能配电网主站级通信系统研究[J].电气传动,2018,48(12):44-48.

[16] Shi W S, Cao J, Zhang Q, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(5): 637-646.

[17] 马立红,王海生,宁光涛,等.基于多源数据融合与分析的配电网可视化诊断系统的构建[J].电子技术与软件工程,2020(2):204-207.

[18] 杨权,白艳萍.模糊神经网络在多源数据融合中的应用研究[J].数学的实践与认识,2015,45(10):163-168.

[19] 臧翰林,李艳玲.基于D-S证据理论的直觉模糊群决策信息集结方法[J].计算机科学,2019,46(S1):102-105.

收稿日期:2020-05-25

修改稿日期:2020-06-10

(上接第68页)

[6] 汪泉弟,刘青松,安宗裕,等.混合动力客车低频电磁辐射机理及抑制方法[J].电工技术学报,2014,29(1):202-207.

[7] 全国汽车标准化技术委员会.电动车辆的电磁场发射强度的限值和测量方法:GB/T18387—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

[8] 中华人民共和国工业和信息化部.道路车辆电磁兼容性要求及实验方法:GB34660—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

[9] 全国无线电干扰标准化技术委员会.车辆、船和内燃机无线

电骚扰特性用于保护车载接收机的限值和测量方法:GB/T18655—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

[10] 联合国.关于车辆电磁兼容性能认证的统一规定:EEC-ER10.5—2014[S].

[11] 郑军奇.EMC电磁兼容设计与测试案例分析[M].北京:电子工业出版社,2014.

收稿日期:2019-09-29

修改稿日期:2019-10-21