

电动汽车驱动电机系统电磁兼容性优化研究

张 帅, 曹 钟, 郭 松, 刘青松, 周 航, 胡在双

(招商局检测车辆技术研究院有限公司, 重庆 401329)

摘 要:针对某型号驱动电机系统电磁辐射发射超标问题,本文从电路布局与走线、滤波设计及屏蔽效能方面进行分析,并给出改进措施。经过复测验证,改进后的驱动电机系统电磁辐射发射值满足 GB/T 18488—2024 限值要求,可为同类产品的电磁兼容设计提供技术参考。

关键词:驱动电机; 辐射发射; 滤波设计; 屏蔽效能

中图分类号: U463.6

文献标志码: A

DOI: 10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.03.005

Research on Electromagnetic Compatibility Optimization of Electric Vehicle Drive Motor System

ZHANG Shuai, CAO Zhong, GUO Song, LIU Qingsong, ZHOU Hang, HU Zaishuang

(China Merchants Testing Vehicle Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401329, China)

Abstract: Aiming at the problem of excessive electromagnetic radiation emission in a drive motor system model, this paper analyzes from the perspectives of circuit layout and routing, filtering design, and shielding effectiveness while proposing improvement measures. Retesting verification demonstrates that the optimized drive motor system's electromagnetic radiation emission values comply with the GB/T 18488—2024 limit requirements. This research can provide technical references for the electromagnetic compatibility design of similar products.

Key words: drive motor; radiation emission; filtering design; shielding effectiveness

驱动电机系统(含电机、控制器及减速器)作为电动汽车的动力核心部件,其电磁兼容性直接影响整车的可靠性。电动汽车内部的电子器件架构如图1所示。相较于传统燃油车,驱动电机的高频开关特性易产生宽频带电磁噪声,从而对车载电子设备及周边环境造成干扰^[1-3]。为满足新版标准 GB/T 18488—2024《电动汽车用驱动电机系统》^[4]对电磁兼容性的要求,本文以某型号驱动电机系统为研究对象,结合加载工况下的电磁辐射发射测试数据,探索其超标机理与优化方法。

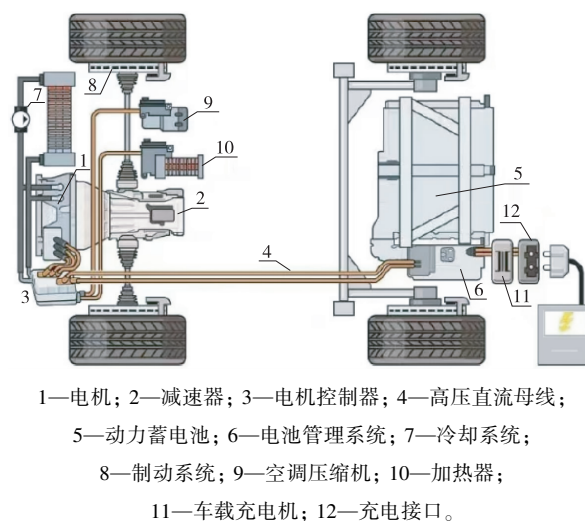


图1 电动汽车内部电子器件架构

收稿日期: 2025-03-14。

基金项目: 招商局检测车辆技术研究院有限公司资助项目(23AKC15)。

第一作者: 张 帅(1990—),男,硕士,工程师,主要从事电磁兼容检测与研究工作。E-mail: cjzhangshuai@cmhk.com。

GB/T 18488—2024 代替了 GB/T 18488. 1—2015《电动汽车用驱动电机系统 第 1 部分:技术条件》和 GB/T 18488. 2—2015《电动汽车用驱动电机系统 第 2 部分:试验方法》,在内容上新增了驱动电机系统的电磁兼容 (Electromagnetic Compatibility, EMC) 试验要求,涵盖辐射发射、辐射抗扰度和电源线瞬态传导抗扰度测试^[4]。本文重点针对某型号驱动电机系统在 30 MHz~1 GHz 频段的辐射发射超标现象,通过整改设计与试验验证,提出一套系统性解决方案。

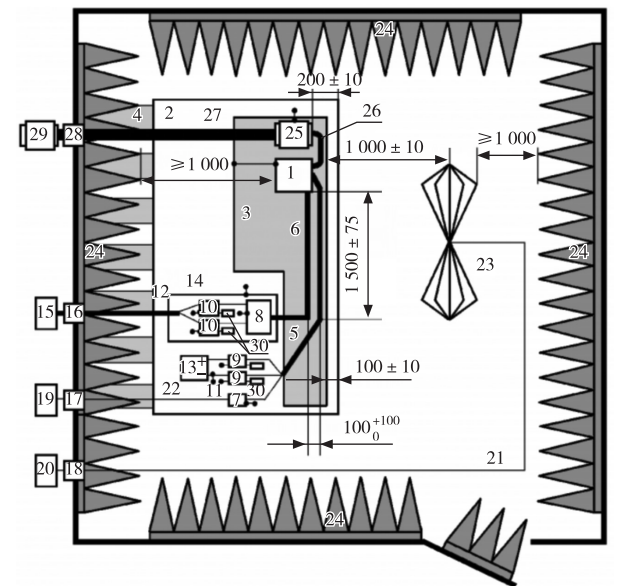
1 电磁辐射发射测试方法

GB/T 18488—2024 第 6. 6. 1. 1 节规定,电磁辐射发射试验测试布置和试验方法按照 GB/T 18655—2018 中 I. 4“零部件/模块的辐射发射—ALSE 法”进行^[4]。因此,本文采用 ALSE (Absorber Lined Shielded Enclosure) 方法在电波暗室进行测试,测试布置如图 2 所示(图中数值单位为 mm)^[5]。测试时,待电机控制器通信正常后,由测功机带动电机转动。上位机发出转矩指令,经 CAN 总线传输至电机控制器,再由电机控制器将指令发送至电机,从而控制电机工作。依据 GB/T 18488—2024 中对样品试验状态的要求^[4],驱动电机系统需处于加载的工作状态,且转速为额定转速的 50%,转矩为持续转矩的 50%,机械输出负载达到持续功率的 25%。若转速或转矩达不到试验状态,可调整转矩或转速,确保机械输出负载达到持续功率的 25%。为满足标准要求,被测件加载工况设为转速 3 200 r/min,转矩 160 N·m。测试时,30~200 MHz 频率范围内使用双锥天线,200 MHz~1 GHz 频率范围使用对数周期天线,发射限值见表 1^[6]。

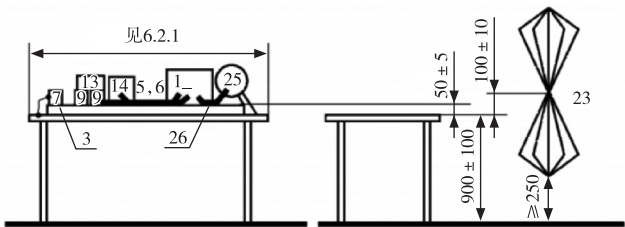
表 1 发射限值要求

频率 f /MHz	发射限值 $E/(dB\mu V \cdot m^{-1})$
30~75	$62-25.13lg(f/30)$
75~400	$52+15.13lg(f/75)$
400~1 000	63

注:在 30~75 MHz 频率范围内,限值随频率的对数呈线性减小;在 75~400 MHz 频率范围内,限值随频率的对数呈线性增加。



(a) 俯视图(水平极化)



(b) 主视图 (c) 侧视图(垂直极化)

- 1—被测件; 2—接地平面; 3—材料支撑($\epsilon_r \leq 1.4$, 厚度 50 mm);
4—接地带; 5—LV 线束; 6—HV 线束(HV+、HV-);
7—LV 负载模拟器; 8—阻抗匹配网络; 9—LV AN; 10—HV AN;
11—LV 电源线; 12—HV 电源线; 13—LV 电源 24 V;
14—附加屏蔽盒; 15—屏蔽 HV 电源; 16—电源线滤波器;
17—光纤馈通; 18—壁板连接器; 19—激励和监测系统;
20—测量设备; 21—优质同轴电缆(50 Ω); 22—光纤;
23—双锥天线; 24—射频吸波材料; 25—电机; 26—电机三相线;
27—机械连接; 28—过滤的机械轴承;
29—制动或驱动电机; 30—50 Ω 负载。

图 2 测试布置

电磁辐射发射测试结果如图 3 和图 4 所示。从图 3 可以看出,垂直极化方向,30~35 MHz 频段的辐射场强超出限值最高达 5 dB μ V/m,而 50~70 MHz 频段的超限幅度进一步增大,最高达 15 dB μ V/m,需进行针对性优化。从图 4 可以看出,垂直极化方向,200~1 000 MHz 频段的测试结果均低于限值,满足标准要求。

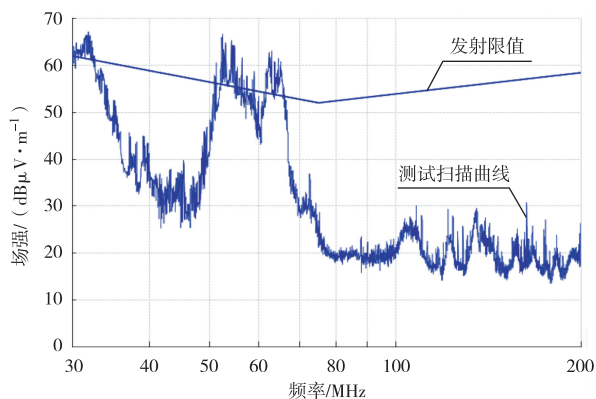


图3 30~200 MHz 测试数据(垂直极化)

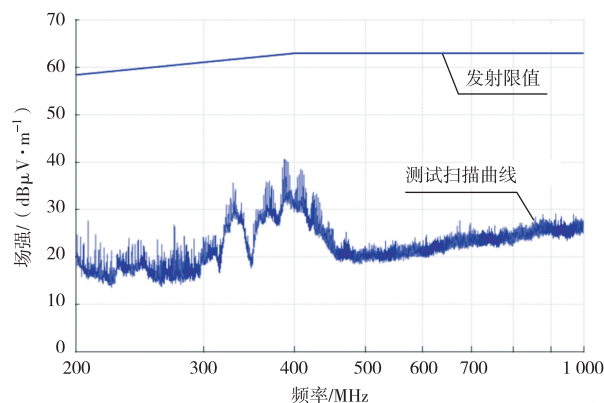


图4 200~1 000 MHz 测试数据(垂直极化)

2 超标成因分析及解决措施

驱动电机系统辐射发射超标的原因较为复杂,主要涉及电路布局与走线、滤波设计、屏蔽效能^[7-10]。

2.1 电路布局与走线

功率元件与信号线路的耦合路径是干扰传播的主要原因。采用电源平面分割技术,将数字电源(12 V/5 V)、模拟电源(± 15 V)与功率电源(高压母线)进行物理隔离,以避免耦合干扰。逆变器开关器件的高频通断会产生瞬态电压和电流,其高次谐波会通过线缆进行辐射。建议采用多层印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)设计,分离电源层与信号层,缩短高速信号的回流路径,并避免平行布线,以降低串扰。电源层可使用感值较低的电感,可减弱电感引起的瞬态变化能量,从而减少电磁辐射发射。高速信号和敏感设备信号还需要采用差分走线、阻抗匹配技术,以提高电磁兼容性能。

2.2 滤波设计

滤波设计的核心是抑制驱动电机系统高频噪声

产生的电磁辐射干扰。在绝缘栅双极晶体管(Insulate-Gate Bipolar Transistor, IGBT)模块供电入口处配置 π 型滤波(如100 μ F 电解电容+10 nF 陶瓷电容+10 μ H 磁屏蔽电感),布局时确保电解电容、电感、陶瓷电容呈直线排列,且路径总长小于15 mm,以降低寄生电感;在控制器芯片电源引脚处布置0.1 μ F 陶瓷电容(0402 封装)和10 μ F 钽电容,形成分布式去耦网络,有效抑制100 kHz~100 MHz 频段的噪声。信号端通过RC滤波或施密特触发器来消除高频抖动。此外,也可在电源供电端口增加X/Y电容和铁氧体磁环,以降低共模干扰。

2.3 屏蔽效能

屏蔽效能可以定量评价屏蔽体对电磁波的衰减程度,用于衡量高压线束金属屏蔽层对电磁干扰信号的屏蔽效果^[11]。屏蔽效能参数(表面转移阻抗^[12]、屏蔽衰减和耦合衰减)直接影响辐射发射性能。当驱动电机系统工作时,高压线束的屏蔽层分布着感应电流,表面转移阻抗会将这些电流转化成电压,向外辐射电磁波。因此,表面转移阻抗越低的线束屏蔽层对内部干扰电流的抑制能力越强,电磁辐射发射水平越低。屏蔽衰减是指屏蔽层将内部信号向外辐射的衰减能力。屏蔽衰减数值越大,电磁辐射发射被抑制的效果越好。耦合衰减反映线束间电磁干扰的抑制能力,间接影响辐射发射。耦合衰减数值越高,线束间的串扰越小,辐射发射越可控。

3 整改设计与验证

对于驱动电机系统加载工况下的电磁辐射发射超标问题,结合高压部件电路结构和高压线束的屏蔽效能,进行了以下整改:

1) 优化硬件。在母线正负端口分别增加100 nF的X电容和1 nF的Y电容,三相交流电源线套铁氧体磁环。在电机控制器DC/AC控制板每个引脚处添加去耦电容,滤除旁路外部高频信号,将干扰源的耦合路径切断在后级电路的输入端口前。

2) 调整软件。通过脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)逐步降低IGBT开关频率(从20 kHz降至10 kHz),将谐波能量分散到更宽频段,以降低测量频段的谐波幅值。

3) 提高线束屏蔽效能。原高压正负母线和三相交流电源线的编织网密度过低,导致屏蔽效能下降。更换为表面转移阻抗降至原值的 50%,且屏蔽衰减提升 5 dB、耦合衰减提升 10 dB 的屏蔽层。

4) 优化接地设计。遵循就近接地原则,减少接地回路阻抗,防止屏蔽层形成天线效应。如果接地不充分,线束的屏蔽层会吸收内部原有的电磁干扰信号,并再次传导后向外辐射。屏蔽层与机壳金属连接器之间应进行 360 度搭接,改进“猪尾巴”的搭接方式。在电机及控制器壳体接缝处粘贴铜箔,减少孔缝的电磁泄漏。

完成以上整改设计后,进行了复测验证。测试结果显示,整改设计后的驱动电机系统电磁辐射发射测试数据明显降低(最大降低了约 20 dB μ V/m),尤其是频率在 30~70 MHz 处的谐波得到了有效抑制,测试结果符合 GB/T 18488—2024 规定的限值要求^[4]。整改后的辐射发射测试曲线如图 5 和图 6 所示。

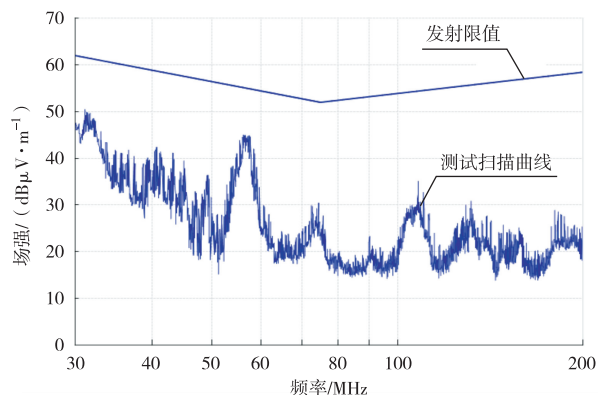


图5 整改后 30~200 MHz 测试数据(垂直极化)

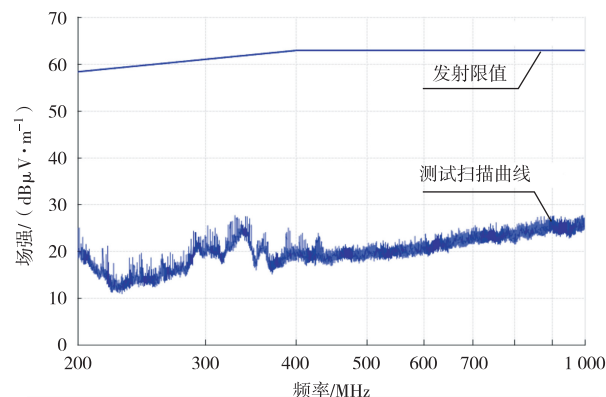


图6 整改后 200~1 000 MHz 测试数据(垂直极化)

4 结束语

本文通过一系列改进措施,解决了某驱动电机系统的辐射发射超标问题,可为 EMC 正向设计提供参考。建议在研发初期融入 EMC 理念,如采用分层 PCB 布局、隔离供电及最小化环路面积设计,以降低后期整改成本。

参考文献:

- [1] 王再宙,刘帅,张春香,等. 纯电动汽车驱动电机匹配及传动比优化研究[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2024, 48(6): 641-648.
- [2] 冯敏. 电动汽车驱动系统功率模块传导电磁干扰研究[D]. 新乡:河南师范大学, 2023.
- [3] 陈鲁豪. 电动汽车驱动用永磁同步电机电磁辐射分析[D]. 南京:南京理工大学, 2023.
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车用驱动电机系统:GB/T 18488—2024[S]. 北京:中国标准出版社, 2024: 1-48.
- [5] 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/T 18655—2018[S]. 北京:中国标准出版社, 2018: 89.
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部. 道路车辆 电磁兼容性要求和试验方法:GB 34660—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017: 5.
- [7] 张峻涛. 高压直流电机驱动系统电磁兼容设计改进技术研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(3): 59-67.
- [8] 胡凯. 电驱电磁兼容性能优化[J]. 中国高新科技, 2024 (16): 102-104.
- [9] 张广利,杨泗鹏,王志中,等. 纯电动客车集成控制器电磁干扰抑制[J]. 客车技术与研究, 2019, 41(1): 35-37.
- [10] 魏思琦. PWM 电机驱动系统辐射干扰预测方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022.
- [11] 文亚洲. 电动汽车高速连接系统屏蔽效能研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2024.
- [12] 杨明杰. 新能源汽车高压连接系统屏蔽效能的测试方法研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2024.