

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.04.008

引用格式:胡凯, 姜立标, 商壮壮, 等. 电动汽车电驱系统电磁兼容性能优化研究[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(4): 97-107.



电动汽车电驱系统电磁兼容性能优化研究

胡 凯¹, 姜立标², 商壮壮¹, 何国新¹

(1. 广汽埃安新能源汽车股份有限公司, 广州 511430; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641)

摘要: 随着电动汽车的普及, 功率器件高频开关带来的电磁兼容性 (electromagnetic compatibility, EMC) 问题也愈发被公众重视, 研究对噪声干扰传递路径进行机理分析, 搭建电机驱动系统的传导干扰仿真模型, 基于实车控制策略 (space vector pulse width modulation, SVPWM)。实现闭环控制; 在电磁屏蔽室内搭建电机驱动系统传导及辐射干扰实验测试平台, 通过优化滤波、屏蔽、接地和回路设计, 实现对电驱系统电磁兼容性能的优化。研究结果表明, 优化后的电驱系统在辐射发射、传导电流和传导电压等方面电磁兼容性能得到显著提升。该研究对于改善电驱电磁兼容性能提供有力数据支撑具有重要的指导意义。

关键词: 电驱; 电磁兼容性; 电磁干扰; 噪声耦合; 辐射发射

中图分类号:U463

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)04-097-11

Electromagnetic compatibility performance optimization of E-axle drive

HU Kai¹, JIANG Libiao², SHANG Zhuangzhuang¹, HE Guoxin¹

(1. GAC AION New Energy Automobile Co. Ltd., Guangzhou 511430, P. R. China; 2. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China.)

Abstract: With the increasing adoption of electric vehicles, the electro magnetic compatibility(EMC) issues caused by high-frequency switching of power devices have become increasingly important. This paper analyzes the noise interference transmission path mechanism and establishes a conduction interference simulation model for the motor drive system. Closed-loop control is implemented based on the real vehicle control strategy using space vector pulse width modulation(SVPWM). An experimental test platform for conduction and radiation interference is constructed within an electromagnetic shielding chamber. By optimizing filtering, shielding, grounding, and loop design, the electromagnetic compatibility performance of the electric drive system is substantially improved. The results indicate that the optimized system exhibits significant enhancements in radiation emission, conduction current, and conduction voltage performance. This research provides robust data support for improving the electromagnetic compatibility performance of electric drives and offers valuable guidance for practical applications.

收稿日期:2024-10-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(62002263)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(62002263).

作者简介:胡凯(1969—),男,高级工程师,主要从事新能源汽车电驱方向研究,(E-mail)hukai@aion.com.cn。

Keywords: electric E-axle drive; electromagnetic compatibility(EMC); electromagnetic interference(EMI); noise coupling; radiated emissions

近年来,电动汽车作为新能源汽车的代表,在全球范围内得到了广泛的关注和发展。其零排放、高能效等优势促进可持续交通和环境保护。然而,随着电动汽车的不断普及和推广,面临的挑战也逐渐显现出来。

电机驱动系统主要包括:逆变器、高压线束、驱动电机、三相母排和差减等部分。电动汽车电机驱动系统的运行电压等级较高,且系统回路中的开关电子器件工作频率也较高,导致逆变器中(insulated gate bipolar transistion, IGBT)在高速开断过程中产生很高的 du/dt , di/dt 以及高次谐波^[1]。针对电驱系统电磁干扰问题,国内外学者进行了大量研究,李彪等^[2]阐述了 IGBT 快速开关对电驱传导及辐射影响机理,提出构建电驱传导模型的可行方案。欧阳杰等^[3-4]通过实验发现了逆变系统运行过程中产生较大的脉冲电流通过线缆进入系统回路中,对系统造成严重的传导干扰问题。Zhong, 窦汝振, 王朝晖等^[5-7]同时将 1 个辅助开关和 3 个谐振电感加入到实验系统,测试了 100 kW 的三相逆变器干扰特性,证实了软开关技术在减小系统电磁干扰中的可行性。DONG 等^[8]在传统汽车中使用了新型的驱动系统,并实验研究了电磁干扰问题对传统汽车的影响。陈斌, 付国良等^[9-10]验证了瞬态变化对系统产生严重的电磁干扰问题。

研究旨在综合研究电动汽车电驱系统的 EMC(electro magnetic compatibility) 性能及优化方法,以进一步提升行驶车辆和驾乘人员的安全性,减少电子设备的电磁干扰,为电动汽车电驱系统的 EMC 性能提升提供新的支撑和实践参考,同时为电动汽车的安全和稳定运行作出贡献。

1 电磁兼容性能影响因素分析

电驱总成主要由逆变器、电机、电源电路、控制驱动电路、功率模块和输入-输出高压线束组成。电机工作所需要的三相交流电是由动力电池输出的电流经逆变器转化而成。逆变器由 6 个 IGBT 功率开关管组成,开关状态是通过控制驱动电路中的驱动信号输出来控制的,功率器件的快速开关是产生电磁干扰的主要噪声源。大多数电动汽车中使用电机的类型均为三相永磁同步电动机,电磁兼容性能受多种因素影响,包括:电磁辐射、电磁干扰、天线耦合、接地和回路设计、设备的物理结构和布局等。这些因素直接关系到电驱对周围设备的干扰程度和在电磁环境中的稳定运行,因此,设计和优化过程需要对这些因素进行深入分析和评估。

1.1 传导干扰分析

电驱系统主要干扰源来自 IGBT 功率开关器件及续流二极管快速通断产生的电压变化 du/dt 和电流变化 di/dt 。电压的快速变化会对电容不断进行充放电,噪声电流就此产生;电流的快速变化,在铜排等有杂散电感的路径上传递时产生干扰电压,要想抑制电驱系统对外的电磁干扰,需要对这 2 类干扰进行抑制。

1.2 共模干扰产生分析机理

电驱系统在开关瞬间,IGBT 模块桥臂上下交错导通,会发生点电位的跳跃,开关瞬间巨大的能量会对寄生电容充电或放电,产生共模电流,共模电流大小如下所示

$$i_{\text{hcm}} = C_p (du/dt) = C_p (U_{\text{dc}} / (t_{\text{on}} + t_{\text{off}})), \quad (1)$$

式中: i_{hcm} 为每个桥臂共模电流; C_p 为 IGBT 与散热片之间寄生电容; U_{dc} 为直流侧电压; $t_{\text{on}}, t_{\text{off}}$ 为 IGBT 开通与关断时间。

图 1 为共模噪声耦合路径,IGBT 在开关过程中,瞬间的电压跳变和系统内部的寄生电容相互作用产生,这些电容有:线束对地、铜排对地、IGBT 散热器对地,电机绕组对地产生的寄生电容 C ,电压的跳变作用于系统寄生电容,产生较大的放电电流,形成共模电流,共模噪声是电驱系统甚至整车辐射干扰的主要来源。图 2 为差模噪声耦合路径,由 IGBT 在开关过程中产生的 di/dt 与系统的杂散电感相互作用形成,电机控制器的杂感主要由 IGBT 的引脚、电控内部铜排、外部线缆以及电机绕组电感组成,回路上流通的差模电流经线缆对外形成辐射干扰。

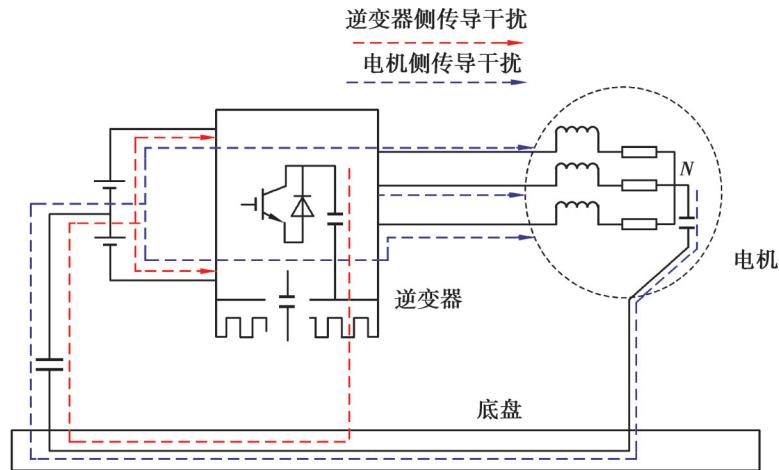


图1 共模噪声耦合路径

Fig. 1 Common mode noise coupling path

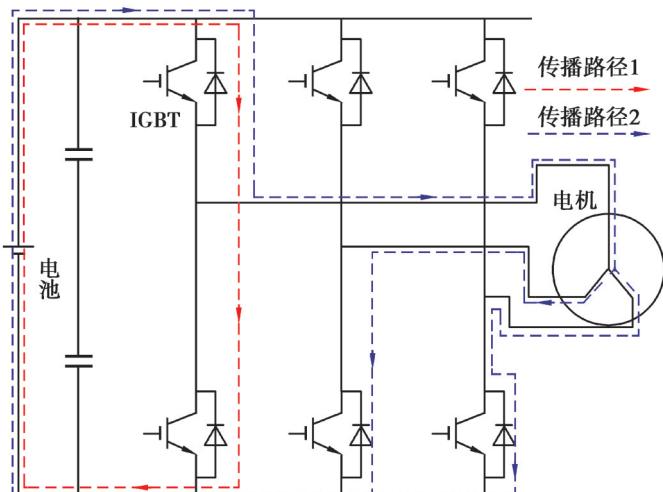


图2 差模噪声耦合路径

Fig. 2 Differential mode noise coupling path

研究以某整车厂开发的多合一电驱总成(如图3所示)为研究对象进行分析,基于矢量拟合算法,构建电机高频等效电路模型,通过阻抗分析仪测试,构建IGBT高频等效电路模型,通过电磁仿真工具提取铜排杂散参数,最终建立电驱系统电磁兼容的等效电路模型。通过仿真分析了电驱电磁干扰噪声传递以及耦合路径,在噪声传递路径上设计电磁干扰滤波器,经过测试验证方案合理性,使电驱系统电磁发射满足国标要求。基于等效电路模型提出优化方案,为电驱的设计与应用提供可靠的经验参考,确保其运行在复杂电磁环境中的稳定性和可靠性。



图3 电驱示意图

Fig. 3 Schematic diagram of electric drive

1.3 辐射发射

辐射发射对电磁兼容性能有显著影响^[4-5],需要在电子设备设计和工程实践中充分重视。电动汽车辐射发射是宽频电磁辐射,频率范围涵盖电磁频谱的各个区域,包括无线电波和微波等。首先,辐射发射若未经有效控制,可能导致电磁能量向外散播并影响周围环境。这将对其他电子设备、通信系统及无线电接收器造成干扰,干扰现象会导致设备功能故障、误操作或通信失效等问题,严重影响 EMC 性能。其次,在国标、行标中设定电子设备辐射发射的限值,辐射发射水平若超出规定标准限值,即不满足相应的标准要求,设备无法通过电磁兼容测试和认证,限制其合规性与市场准入。

为有效降低电驱系统辐射发射水平需要采取多种手段。在电路设计阶段,可选用合适的滤波器、屏蔽和耦合方法,减少辐射发射。此外,系统接地的设计和布局,可有效降低电磁辐射。最终,通过使用合格的电磁兼容性能测试设备测试,验证设备是否达到预期的辐射发射水平^[6]。为确保最佳电磁兼容性能,重视并控制辐射发射至关重要,通过正向设计和工程实践相结合,有效降低辐射发射水平,确保设备在电磁环境中与其他设备均能正常工作,满足相关标准和法规要求。

1.4 传导电压法

传导电压法主要用于测量电子设备内部电源线和其他连接线路上可能产生的共模电压。通过测量这些线路上的传导电压,可以评估设备的共模抑制能力及其在真实工作环境中对电磁干扰的敏感性^[9-10]。在传导电压法的测试过程中,测量设备的电源线或其他连接线路上的传导电压,通过测量共模电压的幅度和频响特性,可以评估设备的电磁兼容性能。传导电压法的应用涉及电源线、信号线和接地结构等方面,这些都是设备内部干扰和抗干扰的重要因素。通过测量和分析设备内部线路的传导电压,确定线路的共模阻抗特性及接地结构的影响,优化设备的布线和设计,提高电磁兼容性能^[11]。

因此,传导电压法在电磁兼容性能评估中起着关键作用,为设备设计和工程实践提供重要的数据支持。通过测量共模电压,揭示设备对共模噪声的响应,帮助工程师改进设计,选择合适的阻抗匹配和接地结构,提高设备的电磁兼容性。综上所述,传导电压法是评估电磁兼容性能的重要手段,对确保设备满足相关标准和规范具有重要意义。

2 性能优化

2.1 辐射发射的优化

对于辐射发射中的问题,以优化 0.15~30 MHz 频段的辐射发射问题为例,电驱的辐射发射在 1~2 MHz 频段准峰值 QP 超测试限制,如图 4(a)所示。因此,需要针对该超标频段噪声源及传递路径进行解耦分析,首先,针对辐射发射问题,对电驱的电路布局和屏蔽设计进行优化,通过重新布置电路元件和导线,减小电路的回流面积和长度,降低了辐射发射的量级。此外,加强了对噪声源电路的屏蔽和隔离,减少其对周围环境的辐射。其次,优化了电驱的接地设计,良好的接地系统可以降低辐射发射的强度。通过合适的接地布局和导线连接,减少接地回路的不完整或与干扰源的共用,有效改善整个电驱系统的辐射发射性能。此外,还采用滤波器和抑制组件来抑制辐射发射。针对 1.5 MHz 频率点附近的辐射发射问题,选择合适的滤波器,有效衰减对应频点附近的辐射能量。在组件选择方面,特别关注高频噪声抑制,选用高频特性良好的组件,提高辐射发射抑制效果。整改后,进行了再次测试以验证优化措施的有效性。通过全面测试,确保在整个 0.15~30 MHz 频段范围内,特别是 1.5 MHz 频率点附近,电驱的辐射发射都满足相应的电磁兼容性能要求,如图 4(b)所示。证明了优化措施的可行性和有效性。

总体而言,通过对辐射发射问题的优化措施,包括电路布局和屏蔽设计的优化、接地系统的改进以及滤波器和抑制组件的应用,成功降低了电驱系统的辐射发射电磁兼容性能。这些改进措施不仅有助于确保电驱系统满足相应的电磁兼容国标要求,还提高了其抗干扰能力,减少对周围设备和系统的影响,提升电驱的可靠性和稳定性。

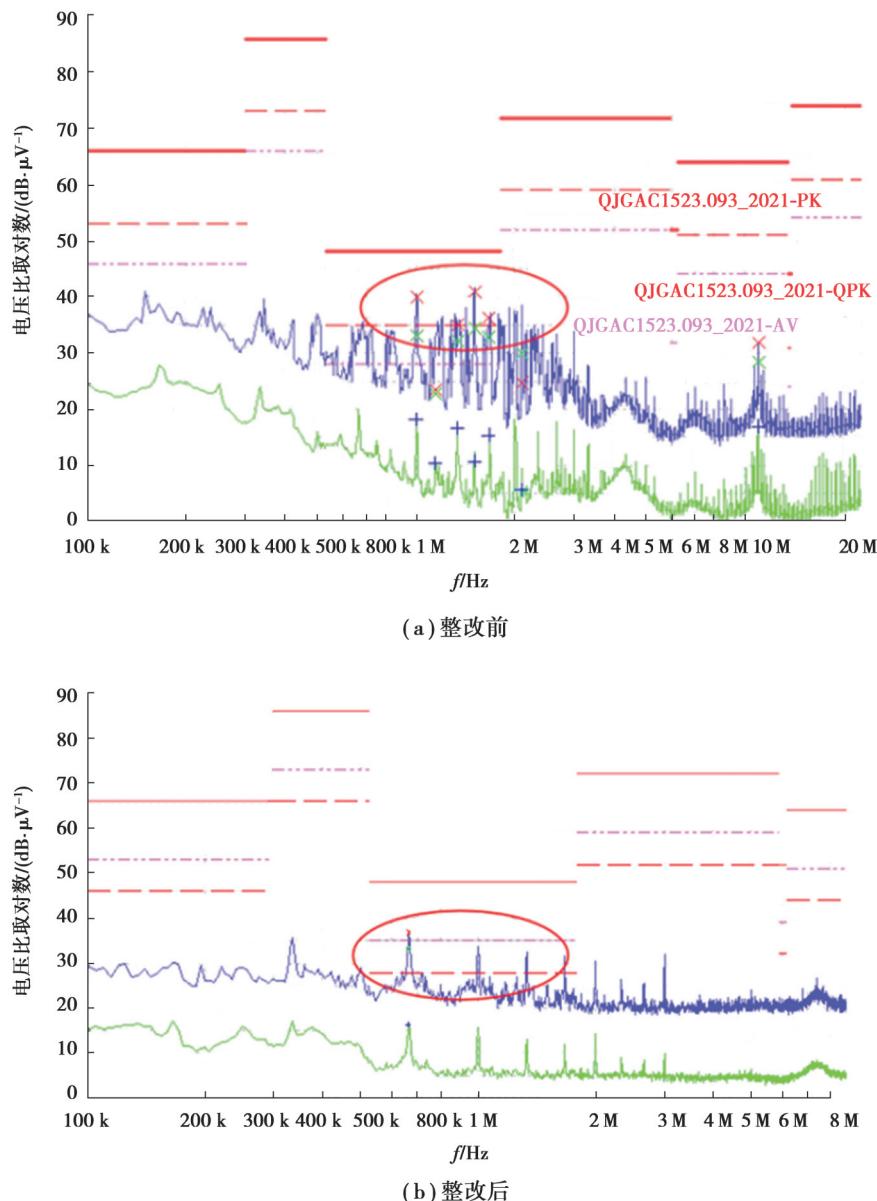


图4 辐射发射整改前后对比图

Fig. 4 Comparison before and after radiation emission rectification

2.2 针对传导电压法的优化

研究通过矢量拟合算法构建电机阻抗模型,通过实测获取IGBT寄生参数。

2.2.1 矢量拟合基本原理

电网络理论中,线性电路的网络函数可表达为一有理函数

$$f(s) = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_m s^m}{1 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_n s^n}, \quad (2)$$

可将此函数写成极点、留数形式,即

$$f(s) \approx \sum_{n=1}^N \frac{r_n}{s - p_n} + d + es, \quad (3)$$

其中:留数 r_n 和极点 p_n 是实数或共轭复数对; d 和 e 是实数。

2.2.2 矢量拟合法求解过程

给定一组测试数据 $f(s_k)$ ($k=1, 2, \dots, P$), 当极点 p_n 给定时, 式(3)变成关于待求参数 r_n, d 和 e 的线性函数, 采用矢量拟合法可解出式(3)中所有参数 r_n, p_n, d 和 e , 其求解过程如下。

设 $\bar{p}_n (n=1,2,\dots,N)$ 是函数 $f(s)$ 给定的一组初始极点, 同时引入辅助函数 $\sigma(s)$, 将 $\sigma(s)$ 与 $f(s)$ 相乘, 假设 $\sigma(s)f(s)$ 与 $\sigma(s)$ 有相同的极点 \bar{p}_n , 可得方程

$$\begin{bmatrix} \sigma(s)f(s) \\ \sigma(s) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \frac{r_n}{s - \bar{p}_n} + d + se \\ \sum_{n=1}^N \frac{\tilde{r}_n}{s - \bar{p}_n} + 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

在上式中, 有理函数 $\sigma(s)f(s)$ 和 $\sigma(s)$ 具有相同的极点 \bar{p}_n , \tilde{r}_n 是未知函数 $\sigma(s)$ 的留数, 此外, 函数 $\sigma(s)$ 的 $d+se$ 项被强制为 1。将式(4)中第 2 行两端同乘 $f(s)$ 并与第 1 行进行减法运算, 可得关于待求参数 r_n, \tilde{r}_n, d 和 e 的线性方程。

$$\left(\sum_{n=1}^N \frac{r_n}{s - \bar{p}_n} + d + se \right) - \sum_{n=1}^N \frac{\tilde{r}_n}{s - \bar{p}_n} f(s) = f(s), \quad (5)$$

将一组测试数据 $f(s_k) (k=1,2,\dots,P)$ 及其对应频点 s_k 代入式(5), 可得一组线性方程, 矩阵形式为

$$Ax = b, \quad (6)$$

其中, 系数矩阵 $A_{px(2N+2)}$ 的第 k 行元素为

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & s_k & \frac{-f(s_k)}{s_k - \bar{p}_1} & \dots & \frac{-f(s_k)}{s_k - \bar{p}_N} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

解向量 x 和已知向量 b 分别为

$$x = [r_1, r_2, \dots, r_N, d, e, \tilde{r}_1, \tilde{r}_2, \dots, \tilde{r}_N]^T, \quad (8)$$

$$b = [f(s_1), f(s_2), \dots, f(s_k), \dots, f(s_p)]^T, \quad (9)$$

假设第 i 和 $i+1$ 极点或留数为一组共轭复数对时

$$\begin{cases} p_i = p' + jp^n, p_{i+1} = p' - jp^n, \\ r_i = r' + jr^n, r_{i+1} = r' - jr^n, \end{cases} \quad (10)$$

则矩阵 A 中对应元素为

$$\begin{cases} A_{ki} = \frac{1}{s_k - \bar{p}_i} + \frac{1}{s_k - \bar{p}_{i+1}}, \\ A_{k(i+1)} = \frac{j}{s_k - \bar{p}_i} + \frac{j}{s_k - \bar{p}_{i+1}}, \end{cases} \quad (11)$$

此时矩阵 x 相应的留数分别是 r' 和 r^n 。

对于式(4), 一般有 $P > 2N + 2$, 因此它是超定的, 可以用最小二乘法求解得到 r_n, d, e 和 \tilde{r}_n 。但是, 由给定的初始极点 \bar{p}_n 求解式(4)计算得到的 r_n, d 和 e 并不准确, 需要修正初始极点 \bar{p}_n , 求解下次迭代过程中 \bar{p}_n 的初始值, 使 $f(s_k)$ 逐步逼近 $f(s)$ 。

2.3 电机典型结构阻抗解耦计算

对于驱动电机, 由于寄生参数的影响, 三相间是互相联系的, 不能直接拟合三相阻抗参数。为建立电机高频 EMI(electro-magnetic interference)模型, 能准确表征其端口共模、差模阻抗特性, 采用典型前端结构, 对三相共模、差模阻抗的测试结果进行解耦计算。电机单相模型和电机整体模型如图 5 和 6 所示。

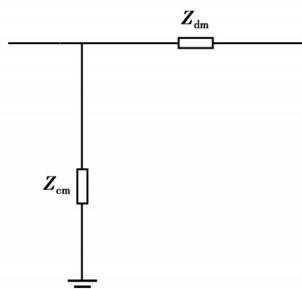


图 5 典型前端结构电机单相模型

Fig. 5 Typical front-end structure single-phase model

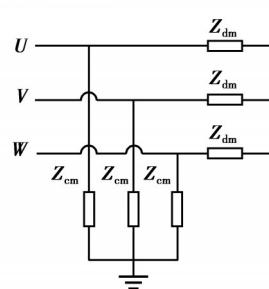


图 6 典型前端结构电机整体模型

Fig. 6 Typical front-end structure whole model

分析图5的电路结构,有

$$Z_{CM} = \frac{1}{3} Z_{cm} , \quad (12)$$

$$Z_{DM} = \frac{3Z_{dm} Z_{cm}}{2(Z_{dm} + Z_{cm})} , \quad (13)$$

其中: Z_{dm} 和 Z_{cm} 分别表示为电机单相差模阻抗和单相共模阻抗, Z_{DM} 和 Z_{CM} 分别表示电机三相差模和共模总阻抗。联立上式,可得单相阻抗

$$Z_{cm} = 3Z_{CM} , \quad (14)$$

$$Z_{dm} = \frac{6Z_{DM} Z_{CM}}{9Z_{CM} - 2Z_{DM}} , \quad (15)$$

根据以上公式进行三相阻抗解耦,分别在 Simplorer 中建立电机单相差模阻抗电路模型,如图 7 和图 8 所示。

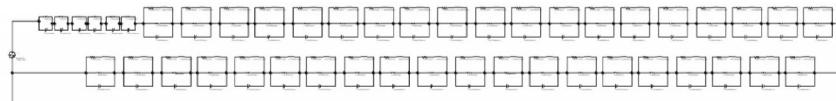


图 7 电机单相差模阻抗电路模型

Fig. 7 Motor single phase differential mode impedance circuit model

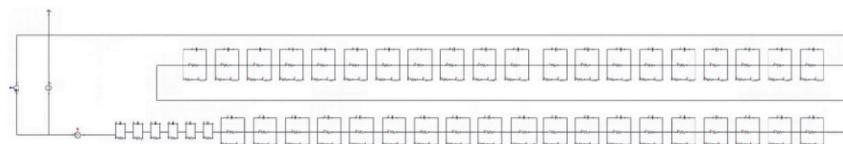


图 8 电机单相差模阻抗电路模型

Fig. 8 Motor single phase differential mode impedance circuit model

2.4 IGBT 寄生参数提取

采用阻抗分析仪进行阻抗测试,其原理是向被测端口注入单频点的电压信号,检测回路电流,依次测试阻抗的幅值和相位,扫描形成阻抗的幅频曲线和相频曲线,即扫频过程如图 9 所示。



图 9 IGBT 寄生参数测试图

Fig. 9 IGBT parasitic parameter test

主要测试 IGBT 到铜排的阻抗(包括寄生电感、寄生电阻)以及 IGBT 到基板的阻抗(包括寄生电容、寄生电感、寄生电阻),如图 10 所示,其中基板一般为铜基板或铝基板,和散热板一体,实际测试端口为散热板。测得 IGBT 各引脚寄生参数如表 1 所示。

2.3 和 2.4 小节详细介绍了高压系统各模块高频等效电路提取新方法,将电驱总成 EMC 试验平台各系统高频电路模型按图 11~12 搭建,构建电驱高压系统高频等效电路模型,由电源模型、高压 LISN、铜排及线束模型、IGBT 寄生参数模型、电机阻抗模型以及电机 ECE 模型组成。

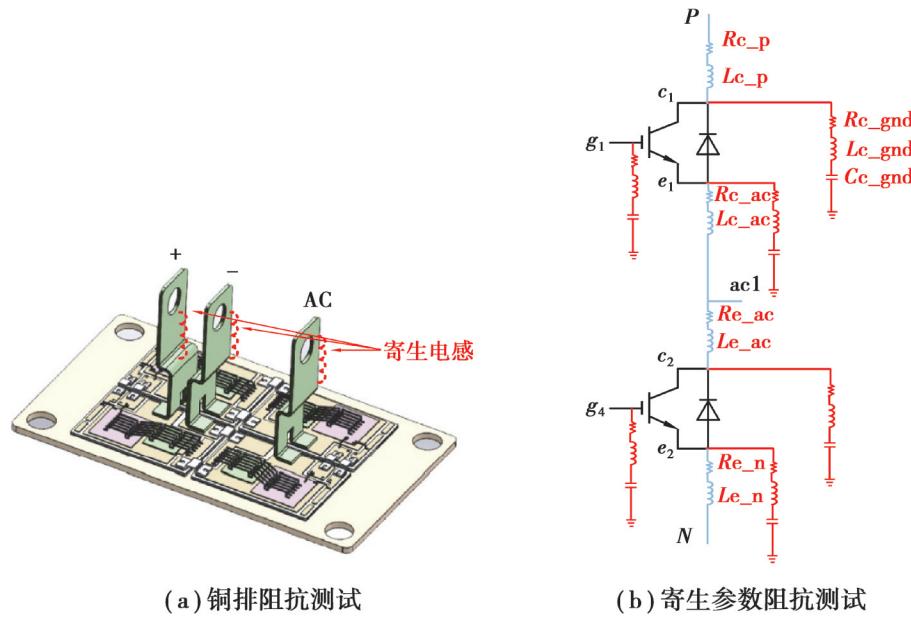


图 10 阻抗测试方法

Fig. 10 IGBT module impedance testing methods

表 1 IGBT 模块寄生参数提取

Table 1 IGBT module parasitic parameter extraction

参数	值/mΩ	参数	值/mΩ	参数	值/mΩ
R_{c_p}	1.59	L_{c_p}	58.66	R_{c_gnd}	0.43
R_{c_ac}	1.42	L_{e_ac}	46.21	L_{c_gnd}	30.57
R_{e_n}	0.88	L_{c_ac}	69.21	C_{c_gnd}	763.72
R_{e_ac}	0.95	L_{e_n}	24.05		

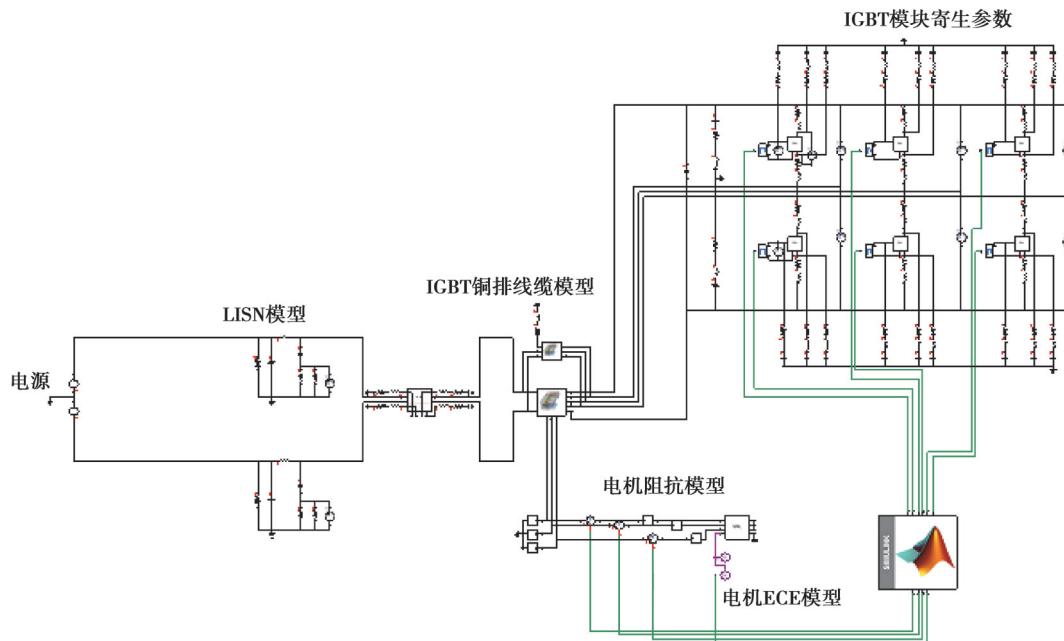


图 11 电驱系统高频等效电路模型

Fig. 11 High frequency equivalent circuit model of electric drive system

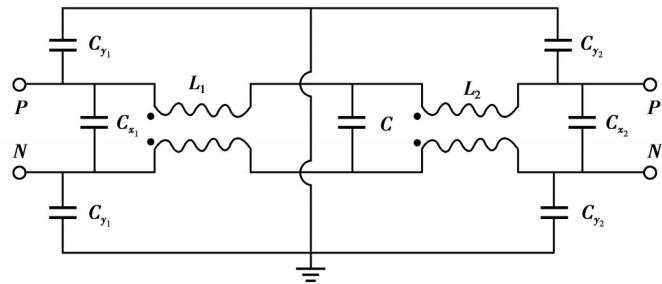


图 12 电驱系统滤波器拓扑图
Fig. 12 Filter topology of electric drive system

通过构建的电驱系统电磁兼容高频等效电路模型,发现在30~60 MHz频段内噪声比较强,需要对滤波器进行优化,经过仿真分析,端口增加一组X电容(2.2和1 nF)对超标频段有较强抑制作用,传导电压法优化前后对比如图13所示。

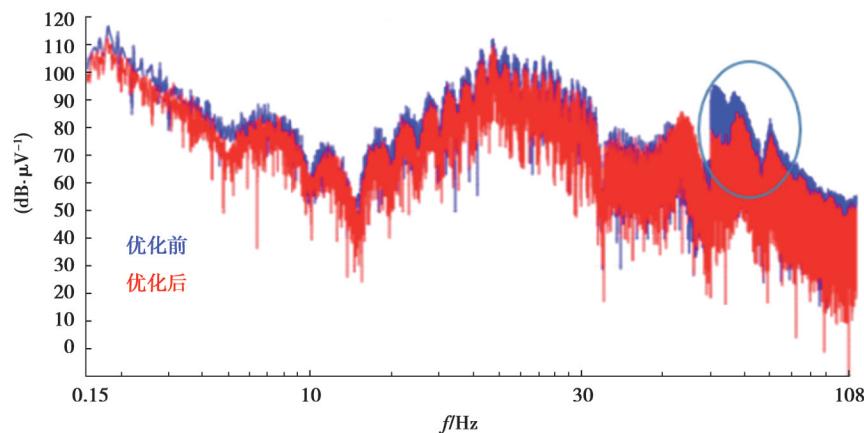


图 13 传导电压法优化前后对比
Fig. 13 Comparison before and after the optimization of the conducted voltage method

2.5 搭建测试平台进行验证

由于电机功率大小对噪声强弱有较大影响,需要搭建如图14所示的带载测试台架,关键的测试设备有电源柜以及电力测功机,在进行电驱系统带载试验时,为系统提供稳定的输入功率,电源柜相当于电动汽车的电池组,为电机提供动力输入。试验平台参数设置如下:电源柜输出电压320 V,冷却方式:水冷,转速2 000 r·min⁻¹,扭矩46 Nm,LISN额定电流100 A(直流),匹配阻抗50 Ω。

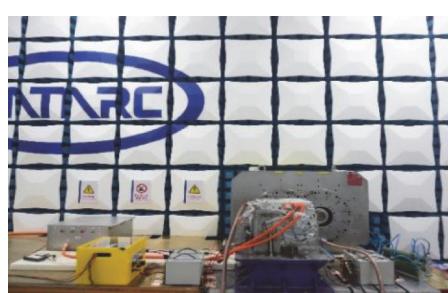


图 14 传导电压法测试布置图
Fig. 14 Test setup for conducted voltage method

2.6 试验结果及分析

对电驱系统在150~108 MHz的传导电磁干扰进行测量,结果如图15(a)所示,结果表示在30~60 MHz及

70 MHz有较强干扰,依据仿真分析结果,在端口增加一组2.2和1 nF的X电容,有较好的抑制效果。测试结果如图15(b)所示,超标频段30~60 MHz频段的噪声明显抑制下来,因此,构建电驱系统高频等效模型仿真结果与实测结果基本一致,对电驱系统电磁兼容性能开发进行性能评估、优化及器件选型,并预测整改结果。

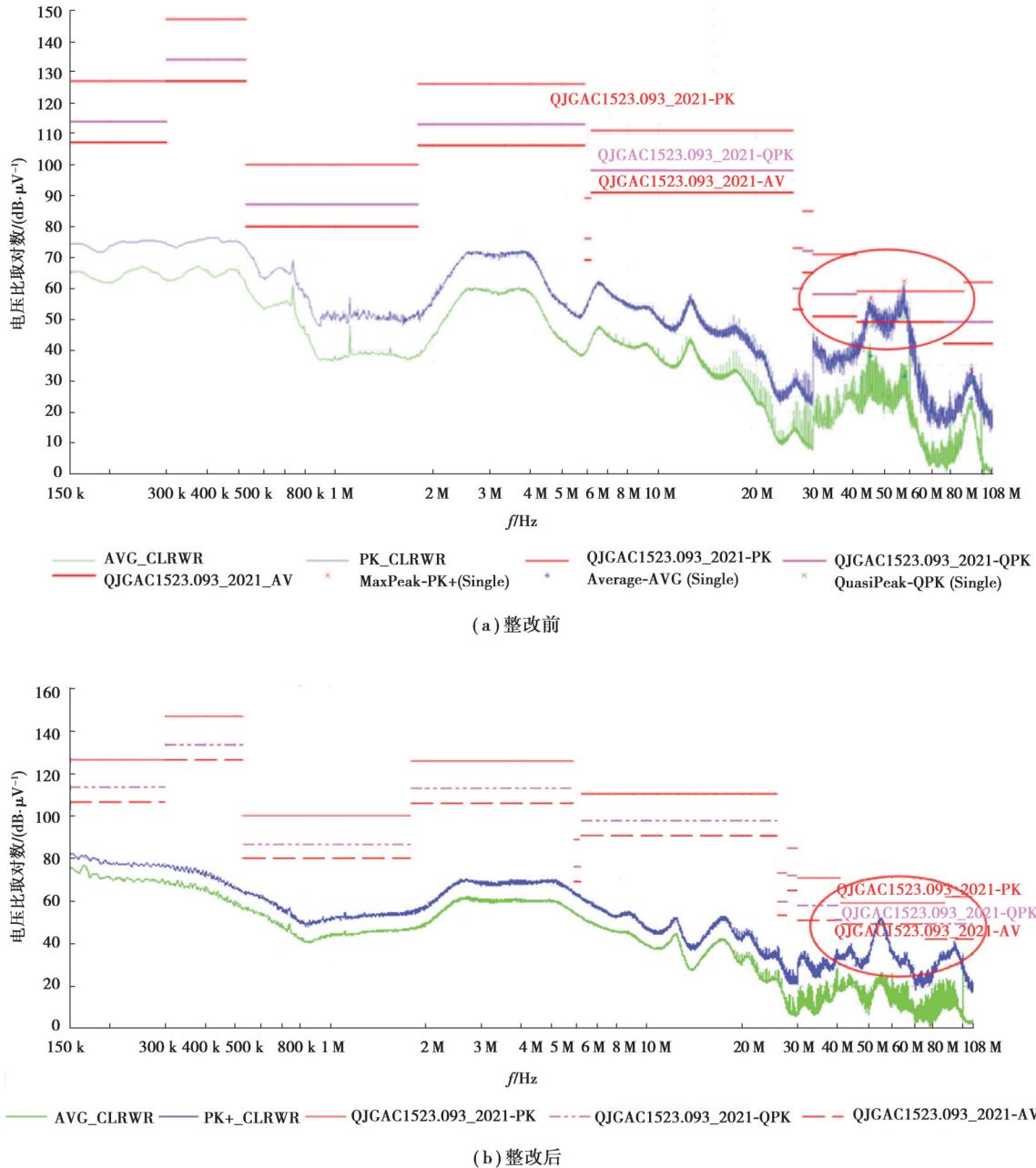


图15 高压传导电压法整改前后对比

Fig. 15 Comparison before and after the rectification by the high voltage conducted voltage method

3 结 论

通过对辐射发射和传导电压法等不同运行工况下电驱系统的电磁兼容性能进行仿真模型搭建及试验验证。利用矢量拟合算法构建电机高频等效电路模型,用阻抗分析仪提取IGBT高频分布参数,构建电驱系统高频等效电路模型。利用仿真模型实现对电驱传导电压法超标频段精准预测,进而在滤波器设计上提供指

导。通过搭建电驱EMI测试台架,验证了所构建的电驱系统高频等效电路模型的准确性。

经过这些优化措施,成功提升了电驱的电磁兼容性能,显著降低共模噪声的干扰,确保通过电磁兼容性能测试。研究不仅有助于提升电驱系统的电磁兼容性能,也为电驱系统的设计、优化和应用提供重要参考,促进电驱系统在电磁兼容性能方面的发展。

参考文献

- [1] 王云,韩烨,季国田,等.电驱动系统级EMC性能仿真分析[J].中国汽车,2021,31(8): 4-7.
Wang Y, Han Y, Ji G T, et al. Simulation analysis of EMC performance of electric drive system[J]. China Auto, 2021, 31(8): 4-7. (in Chinese)
- [2] 李彪,吴昭,贾晋,等.纯电动汽车电机驱动系统传导电磁干扰研究[J].机电产品开发与创新,2018,31(3): 61-64.
Li B, Wu Z, Jia J, et al. Study on the conducted electromagnetic interference of electric automotive motor drive system[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2018, 31(3): 61-64. (in Chinese)
- [3] 周洪澄,余潇然,王豫,等.电控可重构极化调控超表面研究进展[J].雷达学报,2024,13(3): 696-713.
Zhou H C, Yu X R, Wang Y, et al. Research progress of electronically controlled reconfigurable polarization manipulation using metasurface[J]. Journal of Radars, 2024, 13(3): 696-713. (in Chinese)
- [4] 欧阳杰.电动汽车电力驱动系统电磁兼容研究[D].苏州:苏州大学,2015.
Ouyang J. Research on electromagnetic compatibility of electric drive system of electric vehicle[D]. Suzhou: Soochow University, 2015. (in Chinese)
- [5] Zhong E K, Lipo T A. Improvements in EMC performance of inverter-fed motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(6): 1247-1256.
- [6] 窦汝振,温旭辉,张琴,等.减小异步电机驱动系统共模电压的空间矢量脉宽调制控制方法研究[J].中小型电机,2005,32(5): 30-33.
Dou R Z, Wen X H, Zhang Q, et al. Research on a SVPWM control method for the common-mode voltage reduction of the induction motor drive[J]. S& M Electric Machines, 2005, 32(5): 30-33. (in Chinese)
- [7] 王朝晖,李川,李津,等.电动汽车传导充电安全接触电流测试研究[J].汽车电器,2023(7): 3-5.
Wang Z H, Li C, Li J, et al. Research on touch current testing for electric vehicle conductive charging safety[J]. Auto Electric Parts, 2023(7): 3-5. (in Chinese)
- [8] Dong W, Choi J Y, Lee F C, et al. Comprehensive evaluation of auxiliary resonant commutated pole inverter for electric vehicle applications[C]//2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2002: 625-630.
- [9] 陈斌,姜建国,孙旭东.PWM逆变器-感应电机驱动系统中接地电流EMI问题的分析[J].中国电机工程学报,2003,23(2): 58-62.
Chen B, Jiang J G, Sun X D. Analysis ofemi due to grounding current in a pwm inverted-induction motor drive system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 58-62. (in Chinese)
- [10] 付国良,蓝贤平,李军剑,等.电动汽车高压母线Y电容对漏电流的影响分析[J].安全与电磁兼容,2024(1): 83-87.
Fu G L, Lan X P, Li J, et al. Analysis of the influence of Y capacitor on leakage current in high-voltage busbar of electric vehicles[J]. Safety & EMC, 2024(1): 83-87. (in Chinese)
- [11] 许向国,李华.零部件传导发射(电压法)的测量不确定度评定[J].环境技术,2022,40(4): 162-165.
Xu X G, Li H. Title evaluation for the measurement uncertainty of conducted emission (voltage method) from components[J]. Environmental Technology, 2022, 40(4): 162-165. (in Chinese)

(编辑 侯湘)