

无源低通 EMI 滤波器仿真及应用

许连, 廖志锐, 党广生, 阳欢, 陈晓宏
比亚迪汽车工业有限公司汽车工程研究院

【摘要】 IGBT、SiC 等功率器件大量地运用于电动汽车, 其高速通断时会产生大量的电磁噪声, 使得电动汽车电磁兼容问题日益突出。无源 EMI 滤波器为一种降低电磁噪声的重要手段, 也是产品整改的主要部分, 但过去不断尝试的整改方法效率低、成本高。本文根据 EMI 滤波器的原理和结构, 搭建出无源 EMI 滤波器仿真模型, 基于该模型进行 EMI 滤波器优化, 最终将优化后的方案应用于实际案例, 高效地解决了 EMI 问题。

【关键词】 功率器件, 电磁兼容, 无源 EMI 滤波器, 仿真

Simulation and Application of Passive Low Pass EMI Filter

Xu Lian, Liao Zhirui, Dang Guangsheng, Yang Huan, Chen Xiaohong
Auto Engineering Research Institute, BYD Auto Industry Company

Abstract: With the application of high-power electronic devices and wide bandgap power devices such as SiC, GaN, the problem of electromagnetic capacity of switching power supply becomes more and more prominent because of its high-speed on-off. A large amount of electromagnetic noise often exceeds the noise emission limit. As an important means to reduce noise, EMI filtering is still in-depth research, and the technical level is also improving. In this paper, based on the structure and principle of EMI filter, a set of true models of EMI filter is built, and the accuracy of the model is verified by testing. Finally, the simulation model is applied to the practical case, helping to solve the EMI problem efficiently.

Key words: power device, electromagnetic compatibility, passive EMI filter, simulation

前言

随着电动汽车不断向前发展, 电力电子设备向着更大功率、更高效率和更高功率密度发展, 快开断频率、宽禁带功率器件、高电压平台是业界普遍共识的、满足发展需求的技术方向。

电磁兼容 (EMC) 分为电磁骚扰 (EMI) 和电磁抗扰 (EMS), 而 EMI 主要原因为器件内部的电压和电流波动, 一般写作 dV/dt 和 dI/dt 。由此可见, 电压和电流的波动越大, 或者电压和电流的波动速度越快, 其 EMI 问题就越严重。在同样的电压和电流下, 更快的开断频率将导致开断速度变快, 从而使 EMI 变得更差; 更高的电压平台将使得电压和电流变大, 也会导致 EMI 变差; 而宽禁带功率器件, 由于其具有更快的开断特性, 同样使得 EMI 问题变得更加严重。图 1 显示了 SiC 功率器件的开断波形和绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 功率器件的开断波形的对比, 可以明显看出 SiC 功率器件具有更快的开断特性。总的来说, 电力电子设备的发展将带来更加严重的 EMI 问题。

基于电力电子设备的干扰特性, 低通 EMI 滤波作为解决电力电子设备 EMI 问题最常用也是最重要的手段之一, 主要分为无源 EMI 滤波器、有源 EMI 滤波器和混合型 EMI 滤波器。无源 EMI 滤波器又是最常见的 EMI 滤波器, 通常由无源电子元件网络组成, 如电容和电感等。其安装在设备的端口处, 可以有效阻止设备内部的 EMI 噪声向外传播^[1], 具有结构简单、效果好、成本低等优点, 也是本文讨论的重点, 若无特别说明, 后文的 EMI 滤波器均指无源低通 EMI

滤波器。

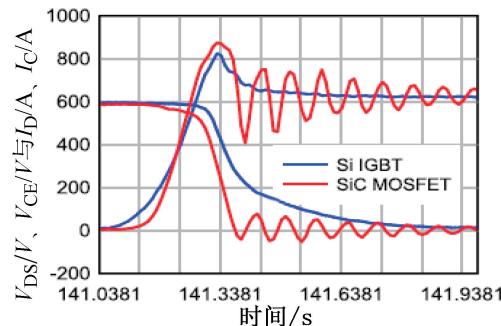


图 1 SiC 和 IGBT 功率器件的 V_{ce} 和 I_c 波形对比

EMI 滤波器在实际应用中, 为使其滤波效果达到需求, 往往是在现场进行多轮测试整改, 但反复试错也带来了时间和经济成本大的问题。通过建立滤波器的仿真模型, 基于模型进行优化, 最终将优化的结果应用于实际滤波器, 可以大幅提升整改效率, 也为后续的滤波器设计奠定了坚实的基础。本文提出了一种 EMI 滤波器的建模仿真方法, 并将方法运用到实际案例中, 成功地解决了项目开发中的 EMI 问题。

1 EMI 滤波器建模仿真

1.1 EMI 滤波器建模对象

本文建模对象为某新能源车型电驱系统上的 EMI 滤波器, 结构由磁环和封装的电容模组构成, 如图 2 所示。基于

该 EMI 滤波器的结构，将滤波器模型分为共模电感、滤波电容和电容模组内部的连接铜排三部分，如图 3 所示，分别对其建立模型。



图 2 EMI 滤波器结构

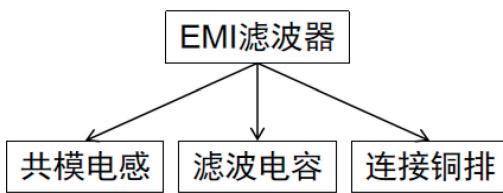


图 3 EMI 滤波器建模流程

1.2 EMI 滤波器建模理论

1.2.1 低通 EMI 滤波器的结构

无源低通 EMI 滤波器通常是由电容器和电感器组成的，主要用在干扰频谱比电源和有用信号频谱高的场合。低通滤波器的基本电路如图 4 所示，分为 C 型、L 型、倒 L 型、反 L 型、T 型以及 π 型等结构，不同的结构适用于不同的源阻抗和不同的负载阻抗。

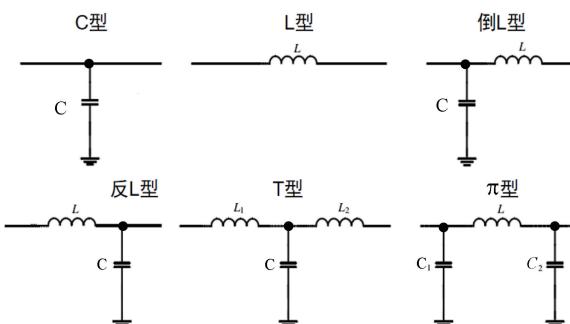


图 4 低通滤波器电路类型示例

EMI 根据传输模式的不同可分为共模骚扰和差模骚扰，实际应用中需要针对共模和差模分别制定滤波措施。一种典型的 EMI 滤波器拓扑结构如图 5 所示，共模电感 L 和共模电容 C_3 、 C_4 组成 LC 型滤波器，用于滤除电路中的共模噪声；共模电感的漏感形成差模电感，和差模电容 C_1 、 C_2 组成 π 型滤波器，用于滤除电路中的差模噪声。其中，共模电感又叫共模扼流圈，一般由在环形磁心上绕制的匝数相同、绕向相反的线圈构成。共模电容被习惯称为 Y 电容，使用时跨接在电源线和地线之间，一般成对出现；差模电容被习惯称为 X 电容，是跨接在电源线正负极之间的电容。基于漏电流的限制，Y 电容容值不能太大，一般是 nF 级，

而 X 电容因不会导致漏电流的问题，所以容值比 Y 电容要大，一般为 μF 级^[2]。

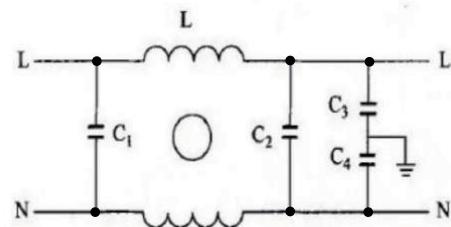


图 5 一种典型的 EMI 滤波器拓扑结构

1.2.2 EMI 滤波器的影响因素

滤波电容的实际效果往往和设计存在较大差异，尤其是在较高频段，这是因为滤波电容往往存在较大的寄生参数，导致其阻抗特性和理想元件的阻抗特性差异较大。图 6 所示为电容的阻抗等效模型，可以看出，其本身除了电容以外，还存在电感和电阻分量。其中，电感分量由滤波电容结构和引线决定，不同结构、材料的电容具有不同的电感，电容的引线越长，电感越大。电阻分量则是导电材料的固有属性^[3]。

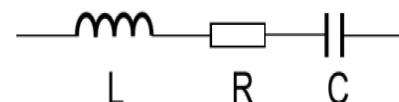


图 6 实际电容等效电路

实际电容的阻抗特性如图 7 所示，理想电容的阻抗特性是随着频率的上升线性下降的，而实际电容的阻抗存在一个谐振点。在谐振频率下，阻抗约等于电阻分量。在谐振点之前，阻抗表现为理想电容特性，阻抗随着频率的升高而减小；在谐振点之后，阻抗特性表现为电感阻抗特性，阻抗随着频率的升高而增大^[4]。

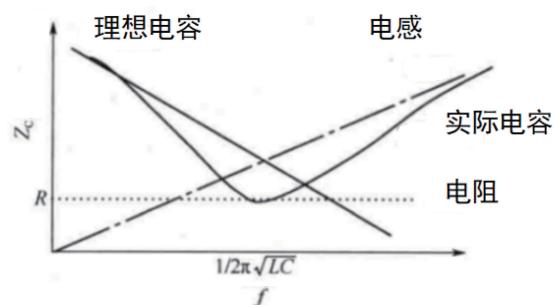


图 7 实际电容的阻抗特性

电感也存在着和滤波电容类似的情况，即高频段寄生参数存在导致的滤波性能下降。实际的电感等效电路如图 8 所示，除了电感参数，还存在寄生电容的分量，分别来自绕线圈每匝之间的电容和绕组与磁心之间的电容。

实际电感的阻抗特性如图 9 所示，理想电感的阻抗特性是随着频率的上升而线性上升的，但实际电感的阻抗因寄生电容原因会存在一个谐振点，在谐振频率之前呈感性，在谐振频率之后表现为容性。

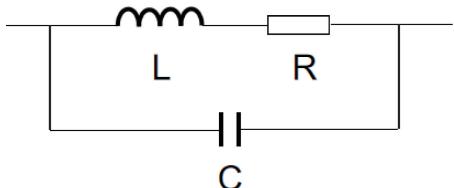


图 8 实际电感等效电路

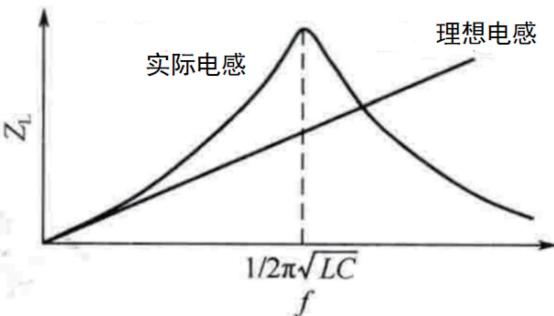


图 9 实际电感的阻抗特性

1.3 共模电感建模方法

共模电感的建模方法为测试拟合法，对磁环的阻抗特性进行测试，通过等效阻抗电路对阻抗进行拟合。图 10 为该磁环的阻抗特性曲线，磁环材料磁导率随频率升高而降低，阻抗在不同频段呈现不同的上升趋势特性。图 11 为阻抗等效电路，采用 3 组 RL 并联电路串联的方式进行拟合。图 12 为最终的拟合结果，可以看到拟合结果和测试结果基本重合，拟合精度较高。

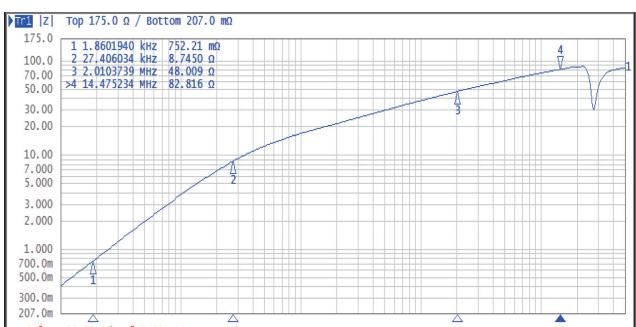


图 10 磁环的阻抗特性曲线

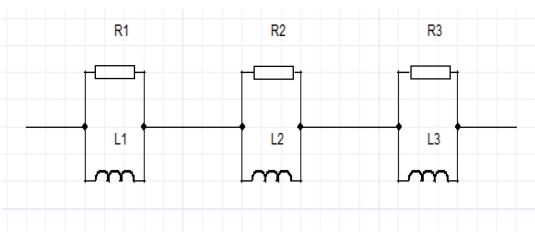


图 11 磁环阻抗等效电路

1.4 滤波电容建模方法

该 EMI 滤波器的电容模组拓扑如图 13 所示，分别由 1

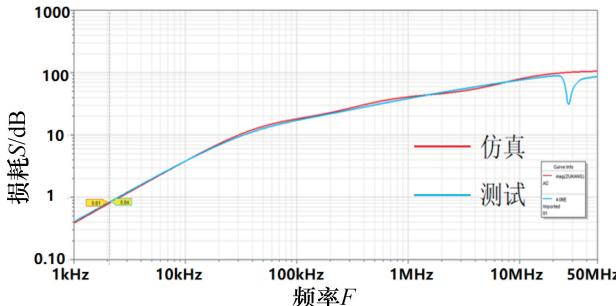


图 12 磁环阻抗拟合结果

个容值为 $530\mu\text{F}$ 、3 个容值为 10nF 的 X 电容和 2 组容值为 22nF 、3 组容值为 47nF 的 Y 电容组成。

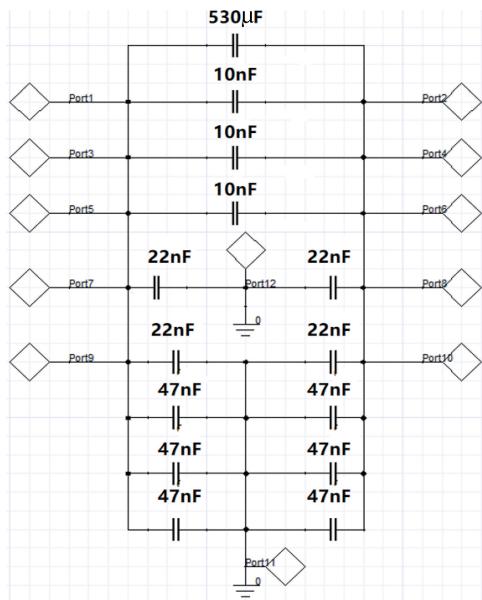
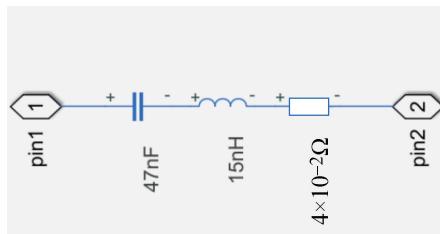


图 13 EMI 滤波器电容模组拓扑

根据前文分析可知，电容等效模型由电容本身和寄生电感 (ESL)、寄生电阻 (ESR) 分量构成，按照电容安装的实际引线长度，通过测试单个电容的阻抗特性曲线，可以获得其等效模型所需的寄生电感和寄生电阻参数。图 14 为容值是 47nF 的电容的阻抗特性曲线，通过其谐振点的阻抗可获得寄生电阻参数，通过串联谐振点公式 $f = 1/(2\pi\sqrt{CL})$ 计算可以得到寄生电感参数，最终的等效电路如图 15 所示。仿真和测试的对比结果如图 16 所示。按照此方法，可依次获取 EMI 滤波器电容模组的所有参数。

图 14 容值为 47nF 的电容的阻抗特性

图 15 容值为 47nF 的电容的等效电路

<input checked="" type="checkbox"/> Resistance	Units: mOhm	Matrix	1kHz	
<input checked="" type="checkbox"/> Inductance	Units: nH	Original	All Freqs	
<input type="checkbox"/> Self Terms				
View	Format	Passivity	Export	
Freq 1kHz	N_Source3	P_Source1	Shield_N_Source4	Shield_P_Source2
N_Source3	0.16254, 439.93099	0.00000, 268.26585	0.00000, 397.10410	0.00000, 268.12679
P_Source1	0.00000, 268.26585	0.16254, 439.93569	0.00000, 268.22188	0.00000, 396.47143
Shield_N_Source4	0.00000, 397.10410	0.00000, 268.22188	2.66521, 398.54028	0.00000, 268.13951
Shield_P_Source2	0.00000, 268.12679	0.00000, 396.47143	0.00000, 268.13951	2.66513, 395.95154

图 19 寄生电感和电阻参数

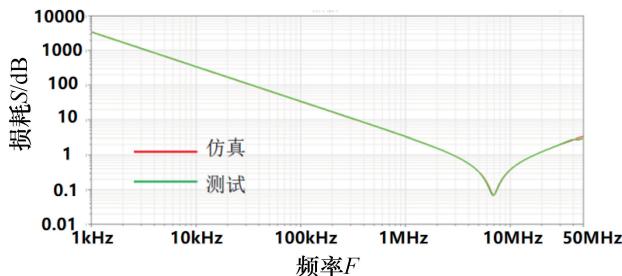


图 16 滤波电容仿真与测试对比

1.5 铜排建模方法

电容模组通过内部铜排将各电容连接在一起，如图 17 所示，铜排作为金属导体，同样存在寄生电容、寄生电感和寄生电阻 (RLC) 参数。利用仿真软件对其铜排结构的 RLC 参数进行提取，分别获得寄生电容参数如图 18 所示，寄生电感和寄生电阻参数如图 19 所示。

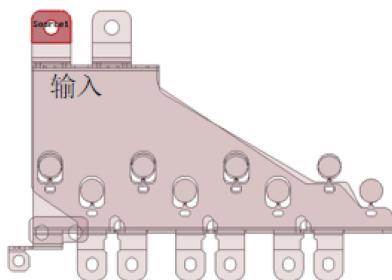


图 17 电容模组铜排

<input type="checkbox"/> Conductance	Units: mSie	Spice Matrix	1kHz
<input checked="" type="checkbox"/> Capacitance	Units: pF	Float/Infinity/Mat	All Freqs
<input type="checkbox"/> Self Terms			
View	Format	Passivity	Export
Freq 1kHz	N	P	Shield_N Shield_P
N	0.20234	0.00017	334.16012 0.16826
P	0.00017	0.21716	0.18110 334.09942
Shield_N	334.16012	0.18110	6.91591 7.73395
Shield_P	0.16826	334.09942	7.73395 6.90095

图 18 寄生电容参数

1.6 EMI 滤波器模型验证

将滤波电容和连接铜排的模型按照其拓扑关系，组合在同一个电路中，如图 20 所示。通过和测试的阻抗曲线对比

得到验证结果，总体上对应较好，如图 21 所示。

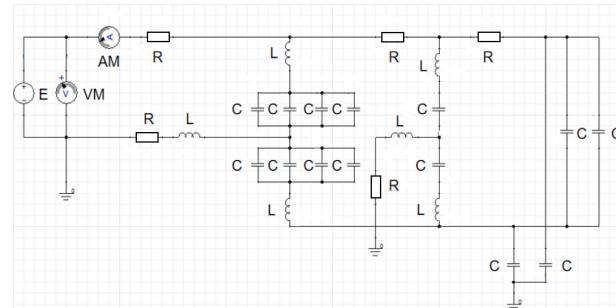


图 20 电容模组仿真模型

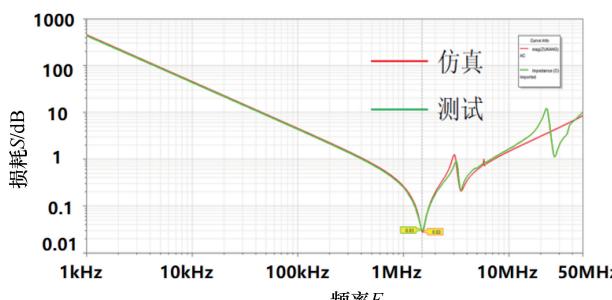


图 21 电容模组仿真与测试对比

2 EMI 滤波器仿真应用

2.1 案例描述

在某新能源车型电驱动系统产品的 EMI 发射测试中，需完成高压传导骚扰试验项目测试，该方法用于考核沿高压电源线传播的骚扰信号的特性，是高压系统产品必须进行的关键试验，试验方法依据国际标准 CISPR-25—2021 和国家标准 GB/T 18655—2018《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》中车载电子电气零部件传导发射的测试进行^[5]，试验布置如图 22 所示。



图 22 高压传导骚扰布置图

高压系统传导骚扰测试包括电压测试法和电流测试法，本次进行的是电压测试法，测试频段为 150kHz~108MHz，测试要求需满足峰值、准峰值和平均值在规定限值以下，限值要求见表 1 所列。

表 1 高压系统传导电压法测试限值

测试频段 /MHz	试验限值/dB		
	PK	QP	AV
0.15~0.53	127	114	107
0.53~5.9	100	87	80
5.9~26	89	76	69
26~30	73	60	53
30~41	71	58	51
41~54	59	58	49
54~68	59	—	49
68~76	59	50	43
76~108	59	49	42

测试结果如图 23 所示，在多个频段均有明显的超标，不符合要求，并且在高频段明显裕量不足，考虑到测试存在一致性差异的问题，需要对当前 EMC 水平进行优化提升。

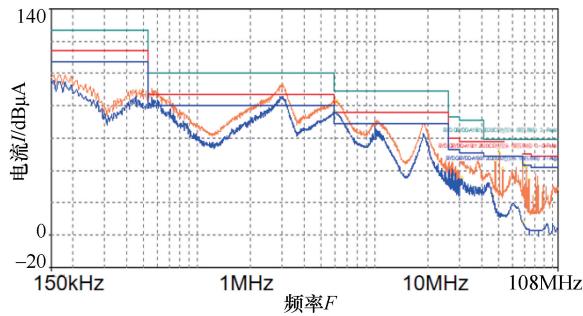


图 23 高压系统传导电压法测试结果

2.2 案例分析

高压系统传导骚扰电压法测试的方法是由接收机通过同轴电缆和高压人工电源网络上的测试端口相连，分别接收来自高压线缆上传递的电磁噪声，其原理如图 24 所示。通过检测流过 50Ω 电阻的噪声电流，并根据欧姆定律可以测算出噪声电压值。

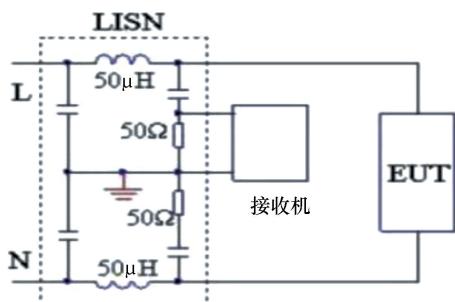


图 24 人工电源网络原理框图

电驱动系统是典型的三相逆变控制系统，作为逆变器重要组成单元的开关器件 IGBT，在电机控制器输出的高频驱动信号作用下，会快速地开通和关断，导致在电机系统中产生高频的 di/dt 以及高次谐波，产生大量电磁干扰噪声。通过分析其逆变系统骚扰传递路径，如图 25 所示，电磁噪声主要通过路径 1、2、3 传递，如果 EMI 滤波器匹配较好，绝大部分噪声可以通过路径 2 和 3 从箱体内回流，而不会造成噪声往路径 1 外溢的情况，即通过高压母线传导出去。而在本案例中，高压线上明显采集到过大的噪声，也说明了 EMI 滤波器的匹配较差，无法满足当前测试需求，需要进行整改设计。

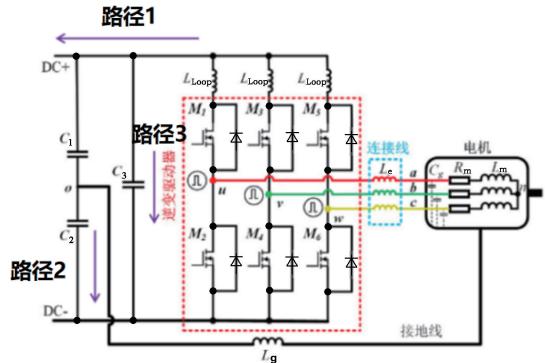


图 25 电驱系统电磁噪声传导路径

2.3 EMI 滤波器仿真优化

依据前文的建模方法，对该电控的 EMI 滤波器建立模型，如图 26 所示。在仿真软件上对其进行优化计算，得到图 27 所示模型。

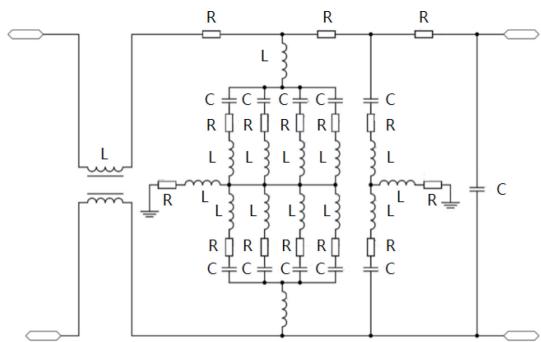


图 26 原始方案仿真模型

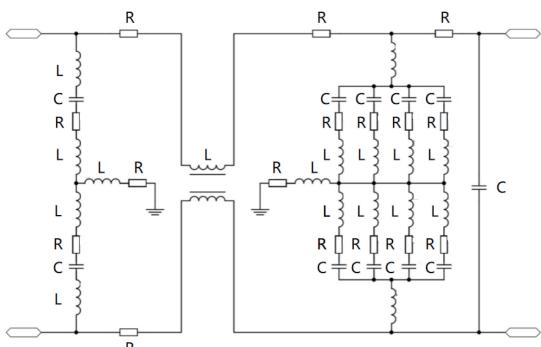


图 27 仿真优化模型

在仿真软件上对比 EMI 滤波器方案插入损耗，如图 28 所示。经仿真优化后的方案在 1MHz 频段以后，滤波性能几乎全面好于原始方案，将该方案直接应用在电控上，通过高

压系统传导骚扰电压测试得到的结果如图 29 所示。和插入损耗优化效果表现一致，干扰噪声在 1MHz 后均大幅降低，在高频段裕量也较充足。

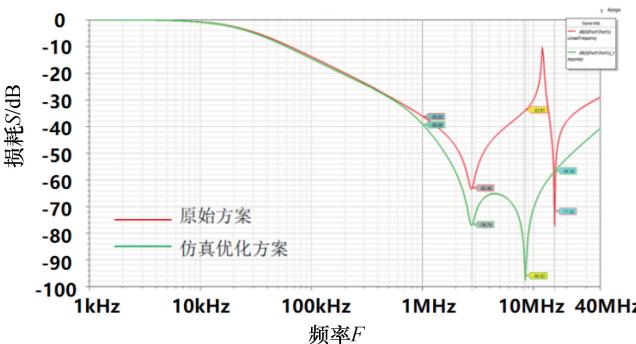


图 28 EMI 滤波器插入损耗对比

3 结论

本文通过对 EMI 滤波器的结构和原理进行分析，搭建了 EMI 滤波器的仿真模型，并通过测试对比验证，表明仿真模型具有较高的准确度，最后将仿真模型运用在实际案例中，顺利解决了高压产品的 EMI 问题。相较于传统的现场

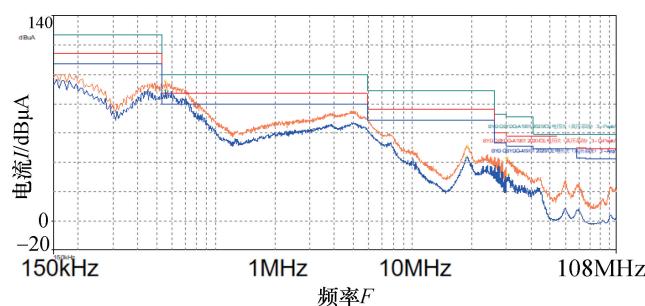


图 29 仿真优化方案的高压系统传导骚扰结果

测试整改，运用仿真手段可以大大缩减 EMI 滤波器的研发周期，有着更大的时间和经济成本优势。但是在建模的过程中需要首先对电容、电感的阻抗进行测试，然后再拟合为等效阻抗电路，若建立完整的元件的 EMC 特性数字孪生，则可以将优化过程提前到设计阶段，更进一步地缩短研发周期。

参 考 文 献

- [1] 曹丽萍. 开关电源 EMI 滤波器研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [2] 王武刚. 基于 EMI 滤波器设计的噪声源阻抗测试 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [3] 蒋茜若. 一种超宽带 EMI 滤波器设计 [D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [4] 杨继深. 电磁兼容 (EMC) 技术之产品研发及认证 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [5] 翟丽, 王志福, 李合非. 车辆电磁兼容基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [6] 范景华. 永磁同步电机电磁干扰特性及建模方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.