DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.350　　**中图分类号**：TM552　　**文献标志码**：A

EMI 滤波器宽频段建模与滤波特性优化

傅恺宁[1,2](中国电源学会会员)，连振珠[1]，陈　为[3](中国电源学会会士)

(1.厦门理工学院电气工程与自动化学院，厦门 361024；2.厦门市高端电力装备及智能控制重点实验室，厦门 361024；3.福州大学电气工程与自动化学院，福州 350108)

摘要：电磁干扰 EMI(electromagnetic interference)滤波器是抑制电磁干扰的有效手段，受高频寄生参数的影响，EMI 滤波器对较高频段范围内的电磁干扰难以有效抑制。分析 EMI 滤波元件(共模电感和 X 电容)的高频寄生参数特性，建立反映滤波元件宽频段阻抗特性的高频模型，进一步分析铁氧体磁芯的磁导率频变特性对寄生参数抵消效果的影响，分析共模电感等效并联电容的提取方法，优化共模电感抵消电容的选取，实现共模电感的宽频段噪声滤波。通过有限元仿真预测整个 EMI 滤波器的宽频段噪声滤波特性，结合插入损耗仿真与测试，验证所提 EMI 滤波器频域建模方法和所提考虑磁导率频变特性的共模电感抵消电容选取依据的有效性。

关键词：电磁干扰滤波器；寄生参数抵消；插入损耗；频域建模；磁芯高频特性

Modeling of EMI Filter in Wide-band Frequency Range and Optimization of Filtering Characteristics

FU Kaining[1,2], *Member*, *CPSS*, LIAN Zhenzhu[1], CHEN Wei[3], *Fellow*, *CPSS*

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Xiamen Key Laboratory of High-end Power Equipment and Intelligent Control, Xiamen 361024, China; 3. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The electromagnetic interference (EMI) filter is an effective approach to suppressing EMI. However, due to the influence of high-frequency parasitic parameters, EMI filters are difficult to effectively suppress high-frequency EMI noises. In this paper, the characteristics of high-frequency parasitic parameters of EMI filter components including common-mode (CM) inductor and X capacitor are analyzed, and a high-frequency model exhibiting the wide-band impedance characteristics of filter components is established. Moreover, the influence of frequency-varying permeability of ferrite cores on the parasitic parameter cancellation effect is analyzed. The extraction method for the equivalent parallel capacitance of the CM inductor is investigated, the selection of CM inductor cancellation capacitance is optimized, and the wide-band noise filtering of the CM inductor is realized. The wide-band noise filtering characteristics of the whole EMI filter are predicted by finite element simulation. Combined with the simulation and experimental test of insertion loss, the effectiveness of the proposed EMI filter frequency-domain modeling method and the selection basis of CM inductor cancellation capacitance considering the frequency variation of permeability was verified.

Keywords: Electromagnetic interference (EMI) filter**;** parasitic parameter cancellation**;** insertion loss**;** frequency-domain modeling**;** high-frequency characteristics of magnetic core

收稿日期：2024-06-25；**修回日期**：2024-07-25，2024-08-09；
录用日期：2024-08-13；**网络首发日期**：2024-09-03
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51777036)；厦门市自然科学基金资助项目(3502Z202372043)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51777036 and Natural Science Foundation of Xiamen, China under the grant 3502Z202372043

随着宽禁带电力电子器件的快速发展，电力电子系统正朝着高频、高功率密度的方向发展。相比传统硅基器件，采用宽禁带器件(碳化硅与氮化镓)，可以使开关频率提高至几百 kHz 甚至到 MHz。然而，高开关频率常伴随严重的电磁干扰 EMI (electro-magnetic interference)问题。电磁干扰滤波

器是抑制电磁干扰的有效手段，但高频滤波特性却因受滤波元件寄生参数的影响而恶化。

针对 EMI 滤波器的研究主要可以分为 EMI 滤波器宽频段建模方法研究[1-5]、EMI 滤波元件寄生参数抵消技术研究[6-8]和 EMI 滤波元件近场泄漏与改善研究[9-17]。其中，针对 EMI 滤波器宽频段建模方法研究，文献[1]采用部分元等效电路 PEEC(partial element equivalent circuit)的建模方法，建立考虑磁芯高频特性的 EMI 滤波器全电路频域仿真模型，实现传导 EMI 抑制特性的宽频段预测；文献[2-3]指出磁性元件不仅存在磁场泄漏，同时还产生电场泄漏，并且电场泄漏显著影响较高频段的共模传输特性，以此建立了兼顾电磁耦合的近场耦合宽频段模型；文献[4]以反激变换器为例，详细分析滤波电感产生的泄漏电磁场对传导电磁干扰和辐射电磁干扰的作用机理。针对 EMI 滤波元件的寄生参数抵消技术研究，文献[6]提出了通过设计接地层结构与采用交叉布置并联电容的形式实现共模电感寄生电容的抵消，并通过设计PCB线路结构 实现 X 电容引线电感的抵消[7]，进一步研究多种寄生参数抵消技术共用的适用条件[8]，改善整个 EMI 滤波器的高频滤波特性。这些方法是基于实测来获取滤波元件的高频参数，但缺乏在设计阶段就能准确获取高频寄生参数大小并抵消相应滤波器寄生参数的研究。针对 EMI 滤波元件近场泄漏与改善研究，文献[9]提出通过优化滤波电感的绕组绕制方法，可以有效消除轴向的泄漏磁场；文献[10]提出通过磁芯组合以及绕组绕制方式进行设计，不仅可以降低共模电感的差模磁场泄漏，还可以显著提高差模电感量，提高抗干扰能力；文献[11]提出采用平面磁集成的方式，可以实现共模电感的差共模集成，同时充分利用 PCB 绕组的设计特点，在电感的 PCB 绕组中插入电介质板，构造集成分立电容，实现 EMI 滤波器的小型化和轻量化设计。

对此，研究滤波元件的电磁参数特性并建立其等效电路模型，对于实现滤波元件自阻抗特性的宽频段预测与寄生参数抵消具有重要意义。同时，设计电磁干扰滤波性能良好的 EMI 滤波器，对提高电力电子系统的开关频率至关重要。本文重点分析共模电感的高频阻抗特性，研究锰锌铁氧体材料磁导率频变特性对共模电感阻抗特性的影响，建立反映共模电感宽频段阻抗特性的高频模型，进一步研究考虑共模电感磁导率频变特性的等效并联电容提取方法。通过有限元仿真与插入损耗测试验证所提 EMI 滤波器宽频段频域建模与滤波特性优化方法的有效性。

1　EMI 滤波元件寄生参数特性分析

EMI 滤波元件受自身高频寄生参数的影响，难以有效抑制较高频率范围内的电磁噪声，同时也使得 EMI 滤波器的滤波特性难以被精准预测。对此，首先需要建立反映滤波元件阻抗特性的宽频段(10 kHz~100 MHz)模型，依据模型进行寄生参数抵消，改善滤波元件的高频滤波特性，实现 EMI 滤波器宽频段滤波特性的精准预测与优化。

1.1　滤波电容阻抗特性分析

滤波电容阻抗特性曲线如图1所示。可以发现，滤波电容的阻抗特性在整个 10 kHz~100 MHz 频率范围内并不能始终保持理想的线性特性，如在 10 kHz~2 MHz 频率范围内呈现容性特性，因此，在这个频率范围内可以忽略寄生参数对电容阻抗特性的影响。对于更高的频率范围，受引线电感 ESL (equivalent series inductance)的影响，滤波电容在 2~100 MHz 频率范围内呈现电感性特性，此时

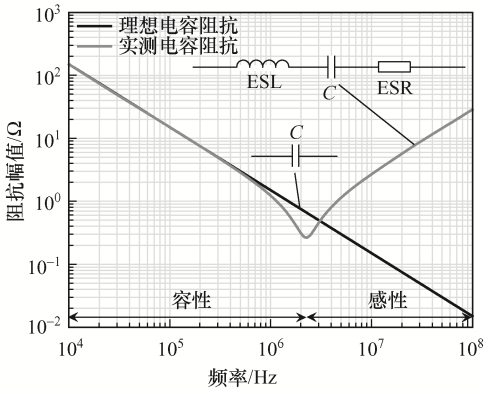


图 1　滤波电容阻抗特性

Fig. 1 Impedance characteristics of filter capacitor

滤波电容的滤波特性恶化。因此，电容的高频阻抗特性可以用引线电感 ESL、寄生电阻 ESR(equivalent series resistance)以及滤波电容 C 三者串联组成的模型来表示。

1.2 共模电感阻抗特性分析

共模电感的差模、共模阻抗曲线如图 2 所示。由于共模电感采用两线分绕的绕组结构，可以利用共模电感的漏感作为差模电感，实现差模、共模电感的集成。

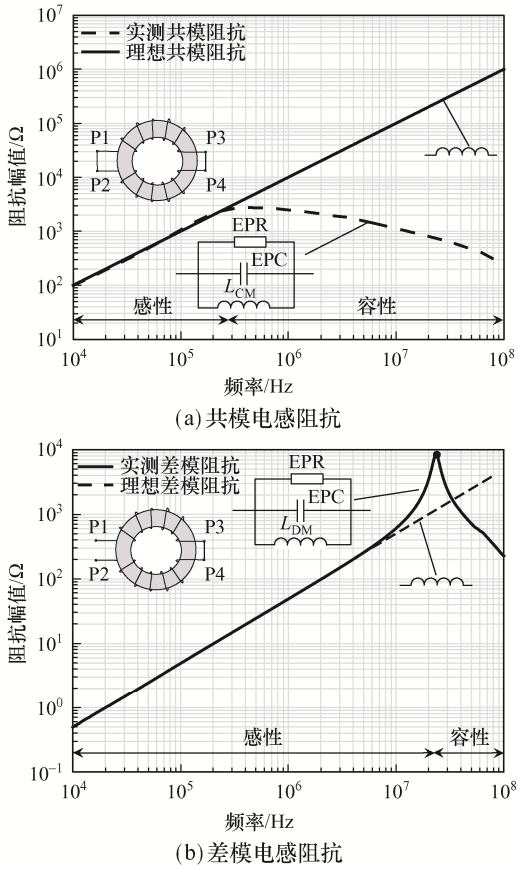


图 2 共模电感阻抗特性

Fig. 2 Impedance characteristics of common-mode inductor

图 2(a)所示的是共模电感阻抗曲线，由于共模电感的磁芯通常采用高磁导率材料，如锰锌铁氧体等，且共模磁通仅在磁芯内部形成闭合回路，因此共模阻抗受磁芯的磁导率影响较大。在 10~200 kHz 范围内，由于磁导率基本维持在恒定数值，使得共模阻抗保持线性的纯电感特性。对于更高的频率范围，共模阻抗受寄生电容 EPC 和磁芯材料磁导率非线性变化的影响，共模阻抗在 200 kHz~100 MHz 范围内表现出容性特性。值得注意的是，由于此频率范围内的磁芯参数呈现非线性特性，使得共模电感分量 L_{CM} 也相应存在频变特性，图 2(a)中实测阻抗的频率转折点(200 kHz)并非共模阻抗的谐振点。

图 2(b)所示的是差模电感阻抗曲线，由于差模磁通经空气形成闭合回路，因此差模阻抗受磁芯高频参数影响较小，因此在 10 kHz~10 MHz 范围内都保持纯电感特性。随着频率升高，差模电感 L_{DM} 与寄生电容 EPC 产生并联谐振。此外，由于差模电感分量 L_{DM} 基本保持恒定(阻抗幅值的斜率为 110 倍阻抗/Dec)，则绕组层间电位将保持恒定，使得 EPC 也将保持恒定，因此差模阻抗的谐振点为 25 MHz。

2 EMI 滤波元件高频模型

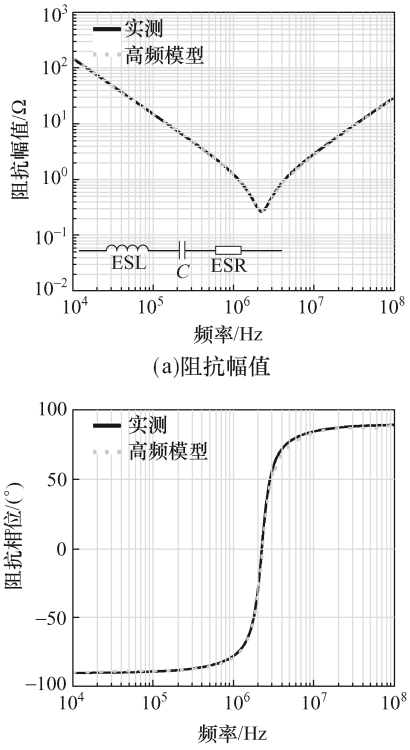
为了准确表征滤波元件的高频阻抗特性，可以采用集总电路建模，通过对比高频模型的阻抗特性与实测曲线来验证滤波元件高频模型的正确性。

2.1 滤波电容高频模型

实测与采用高频模型的电容阻抗幅值和相位曲线如图 3 所示。可以发现，在 10~300 kHz 时，电容的阻抗特性表现为纯电容特性，可以依据这个频率段的阻抗特性来计算模型参数中电容 C。谐振点 f 是由滤波电容 C 和引线电感 ESL 串联谐振引起的，根据谐振点频率可计算引线电感 ESL，谐振点处的阻抗为寄生电阻ESR。对比图3(a)和(b)发现，实测与采用高频模型的阻抗幅值和相位曲线二者基本完全吻合，即证明采用的电容高频模型可以准确表征电容的阻抗特性。

2.2 共模电感高频模型

共模电感既可以抑制共模干扰，又可以利用漏感抑制差模干扰，因此共模电感模型包含共模电感分量与差模电感分量。共模电感的高频等效电路模型如图 4 所示。图中：L_{DM} 和 L_{CM} 分别为差模电感分量和共模电感分量；R_{DM} 和 R_{CM} 分别为差模电感分量和共模电感分量的等效磁芯损耗电阻；C_{DM} 和

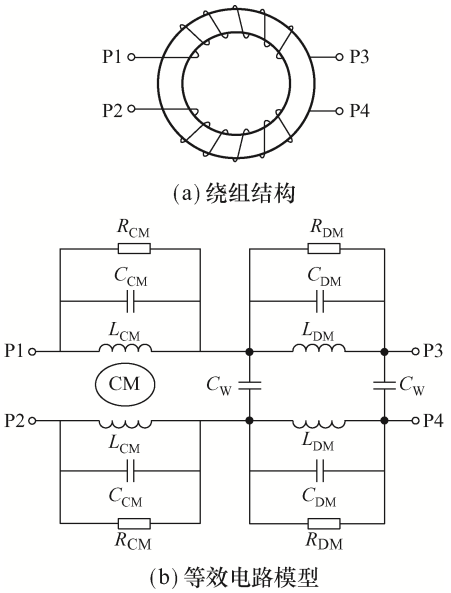


(a)阻抗幅值

(b) 阻抗相位

图 3　电容阻抗特性曲线

Fig. 3 Curve of impedance characteristics of capacitors



(a) 绕组结构

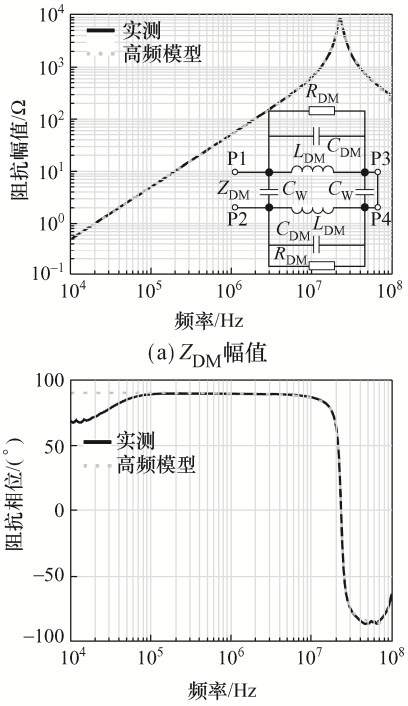
(b) 等效电路模型

图 4　共模电感

Fig. 4 Common-mode inductor

C_{CM} 分别为差模电感分量和共模电感分量对应的绕组匝间、绕组与磁芯间的寄生电容；C_W 为差模电感两绕组间的寄生电容。

实测与采用高频模型的差模阻抗 Z_{DM} 的曲线如图 5 所示。对比图 5 发现，二者基本吻合，说明高频模型可以准确表征差模电感的阻抗特性。由于差模电感是由以空气为路径的漏磁通形成的，且空气磁阻远大于磁芯磁阻，使得差模磁通磁势主要降落在空气磁阻上，因此差模电感分量 L_{DM} 受磁芯材料高频特性的影响较小。



(a) Z_{DM}幅值

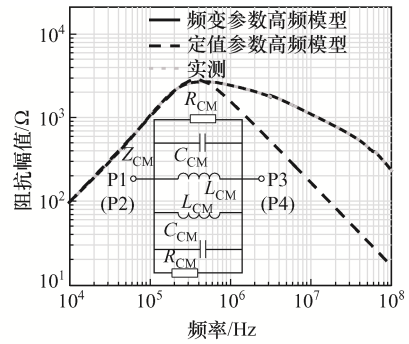
(b) Z_{DM}相位

图 5　差模阻抗 Z_{DM} 特性

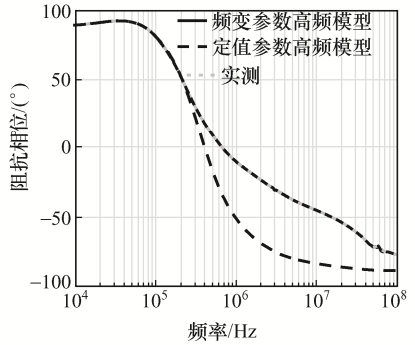
Fig. 5 Characteristics of differential-mode impedance Z_{DM}

实测与高频模型输出的共模阻抗 Z_{CM} 曲线的对比如图 6 所示。可以发现，模型参数 L_{CM} 采用定值时，模型输出的阻抗曲线与实测曲线存在较大差异，这是因为产生共模电感分量的磁通是以磁芯为闭合路径，磁势主要降落在磁芯磁阻上引起的。因此共模分量 L_{CM} 受磁芯材料非线性特性影响而呈现频变特性。

对此，图 7 给出了被测共模电感分量 L_{CM} 的频变特性曲线，可以发现共模电感分量 L_{CM} 在 200 kHz~100 MHz 范围内呈现非线性特性。因此，图 6 中模型参数采用频变特性的 L_{CM} 可以很好地表征共模电感的阻抗特性。必须指出的是，由于共模电感分量 L_{CM} 呈现随频率变化特性，使得难以依据阻抗曲线



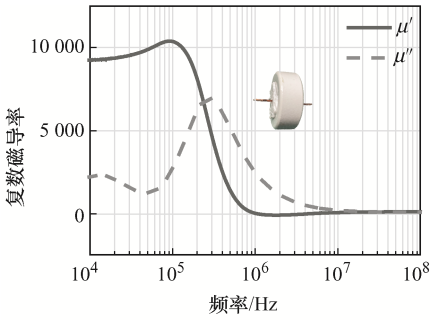
(a) Z_{CM}阻抗



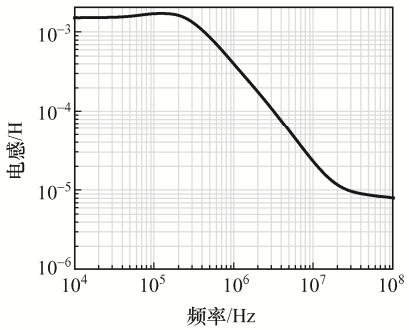
(b) Z_{CM}相位

图 6 共模阻抗 Z_{CM} 特性

Fig. 6 Characteristics of common-mode impedance Z_{CM}



(a) 磁芯复数磁导率



(b) 共模电感分量

图 7 电感分量特性

Fig. 7 Inductance characteristics

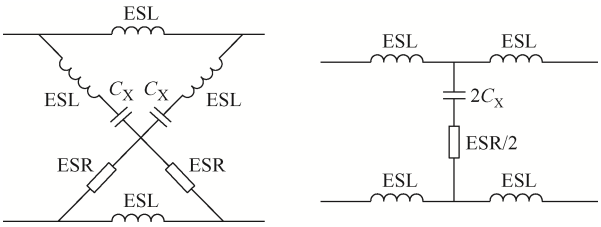
的转折点来计算共模电感的等效并联电容，进而在后续等效并联的寄生参数抵消效果上会存在较大偏差。

3 EMI 滤波器寄生参数抵消

基于以上分析可知，共模电感和滤波电容受高频寄生参数的影响，对高频段电磁干扰的抑制效果较差。因此，基于滤波元件的高频模型，可以运用寄生参数抵消技术来改善滤波元件的高频滤波特性[7-8]。

3.1 滤波电容的 ESL 抵消

电容的寄生电感抵消如图 8 所示。为了消除滤波电容的引线电感ESL，可以采用交叉布置的形式[7]，如图 8(a)所示。这是因为通过星三角变换，可以将图 8(a)所示的等效电路转换成图 8(b)所示的电路，进而有机会在中间支路上实现寄生电感 ESL 的相互抵消((ESL+ESR+1/C_X−ESL)/2)，同时构造出对 EMI 滤波有益的 4 个支路阻抗 ESL。



(a) 电感寄生电容抵消　　(b) 等效转换电路

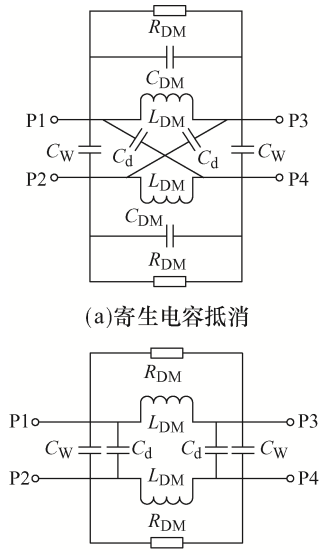
图 8 电容的寄生电感抵消

Fig. 8 Cancellation of parasitic inductance of capacitors

3.2 共模电感的寄生电容抵消

图 9 为差模电感分量的寄生电容抵消原理，引入 2 个交叉布置的补偿电容 C_d，其容值大小与寄生电容 C_{DM} 一致，运用星三角变换可以得到图 9(b)所示的等效电路，发现采用寄生参数抵消技术不仅消除差模电感的寄生电容 C_{DM}，同时还构造有益于差模滤波的支路电容 C_W//C_d。

共模电感的寄生电容抵消原理如图 10 所示。图 10(a)为共模电感分量的寄生电容抵消原理，通过在电感与地之间插入一个值为$(n+1)^2C_{CM}/n$ 的电容[8]，其中 n 为选取插地电容后单侧绕组的匝数比，进一步化简可得到如图 10(b)所示的等效电路。由此发现，不仅可以消除共模电感的寄生电容 C_{CM}，

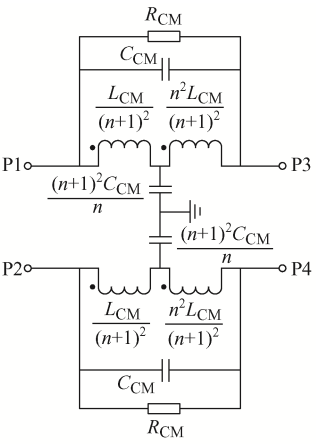


(a)寄生电容抵消

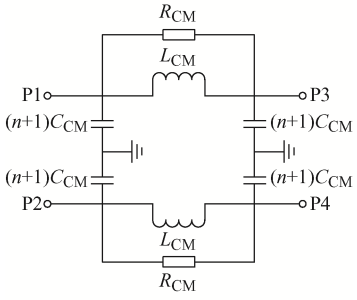
(b)转换后等效电路

图 9　差模电感寄生电容抵消原理

Fig. 9 Cancellation principle of parasitic capacitance of differential-mode inductors



(a)共模电感寄生电容抵消



(b)转换后等效电路

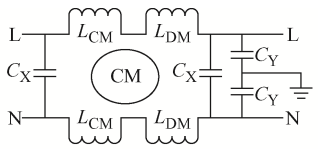
图 10　共模电感寄生电容抵消原理

Fig. 10 Cancellation principle of parasitic capacitance of common-mode inductors

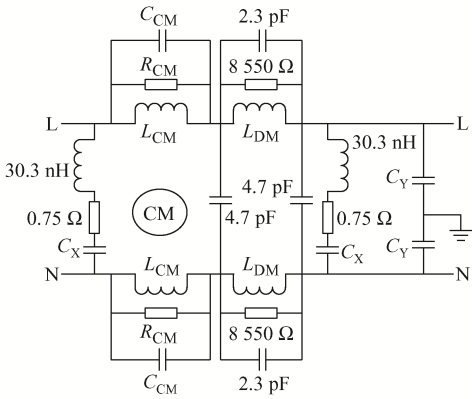
同时还可以进一步构造有益于噪声滤波的支路电容$(n+1)C_{CM}$。

4　实验验证

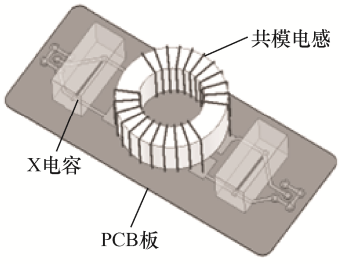
为验证本文提出的滤波元件高频模型与滤波特性仿真方法对实现寄生参数抵消特性精准预测的有效性，将通过 EMI 滤波器的全电路仿真进行验证。EMI 滤波器的等效电路如图 11 所示，采用一阶 π 型电路，EMI 滤波器元件(共模电感与 X 电容)与第 3 节所分析元器件相同，滤波电感采用两线分绕的差、共模集成电感，单侧绕组的匝数 N=11，磁芯采用 Ferroxube 公司的TX32/19/133E10-M 环形锰锌铁氧体磁环，X 电容 C_X=0.1 μF，Y 电容 C_Y=1 nF。由于 Y 电容体积较小，受到高频磁场的影响较小，不需要对其进行寄生参数的抵消，而 X 电容的体积较大，引线受高频磁场影响较大，需要运用到寄生参数抵消技术。



(a)滤波器等效电路



(b)含寄生参数的滤波器等效电路



(c)滤波器仿真建模

图 11　EMI 滤波器宽频段建模

Fig. 11 Wide-band frequency modeling of EMI filters

由于差模磁通经空气形成闭合回路，因此差模磁通路径上的磁阻基本取决于空气磁阻大小，使其磁导率随频率变化并不像图 7(a)所示的锰锌铁氧体材料较为明显。因此，差模电感量在 10 kHz~20 MHz 范围内基本为恒定数值，可以通过测量差模电感的阻抗特性曲线来计算差模电感的寄生电容，并运用图 9 所示方法进行寄生参数抵消。

然而，对于共模电感的磁芯通常采用高磁导率材料如锰锌铁氧体，其磁导率在 100 kHz~100 MHz 范围内存在明显的频变特性。基于第 1 节和第 2 节的分析可知，共模电感的寄生电容受磁芯高频参数的影响存在频变特性，不能直接依据阻抗曲线的转折点来确定 C_{CM} 的大小。对此，在进行共模电感寄生参数抵消前，需要合理评估寄生电容的大小。这是因为，结合第 3 节中的共模电感的寄生电容抵消方法可知，抵消电容的选取直接决定着 C_{CM} 的抵消效果，是存在未完全抵消、完全抵消，还是处于过补偿。针对这种情况，结合图 7(b)所示的共模电感分量曲线可知，随着频率升高，磁导率不断降低，共模电感分量 L_{CM} 产生的阻抗也不断降低。

寄生电容 C_{CM} 随频率变化曲线如图 12 所示。结合共模电感的高频模型，在已测 L_{CM} 的前提下，可以从测量的端口阻抗的虚部中换算得到共模电感分量的寄生电容 C_{CM} 随频率变化的曲线。可以发现在 10 kHz~10 MHz 范围内，寄生电容 C_{CM} 的换算值存在较大变化，这主要是由于磁芯的磁导率在此范围内保持较大值，测量的共模阻抗虚部可基本体现 L_{CM} 分量，使得换算得到的 C_{CM} 存在较大误差。随着频率的增加，磁芯相对磁导率快速下降，基本维持在 1 的附近，此时共模阻抗的虚部基本体现为绕组寄生电容 C_{CM} 的分量特性。在绕组寄生电容抵消的电容选取环节中，需要依据 C_{CM} 来进行抵消电容的容值选取。因此 C_{CM} 的容值确定应为 10~100 MHz 范围内 C_{CM} 的均值，因此后续抵消电容选取为 10 pF。

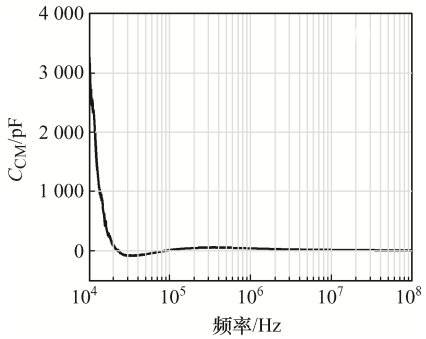


图 12 寄生电容 C_{CM} 随频率变化曲线

Fig. 12 Curve of parasitic capacitance C_{CM} versus frequency

4.1 模型验证寄生参数抵消效果

为了评估 EMI 滤波器的噪声抑制效果，通常采用插入损耗来评估，滤波器插入损耗的测试原理如图 13 所示。EMI 滤波器插入损耗曲线如图 14 所示，图 14(a)和(b)分别是通过电路模型计算得到的运用寄生参数抵消前后 EMI 滤波器的差模插入损耗和共模插入损耗。由图 14(a)可以发现，运用寄生参数抵消技术可以显著改善差模噪声在 2~100 MHz 范围内的噪声滤除效果。由图 14(b)也可以发现，运用寄生参数抵消技术可以进一步改善 2~100 MHz 范围内的噪声滤除效果。

4.2 仿真预测寄生参数抵消效果

通过仿真手段可以提取滤波元件的寄生参数，并运用寄生参数抵消来改善滤波元件的高频滤波特性，实现 EMI 滤波器的精细化设计。图 15 为滤波器插入损耗的测试实物，测量插入损耗的仪器是网络分析仪 KEYSIGHT E5080A。

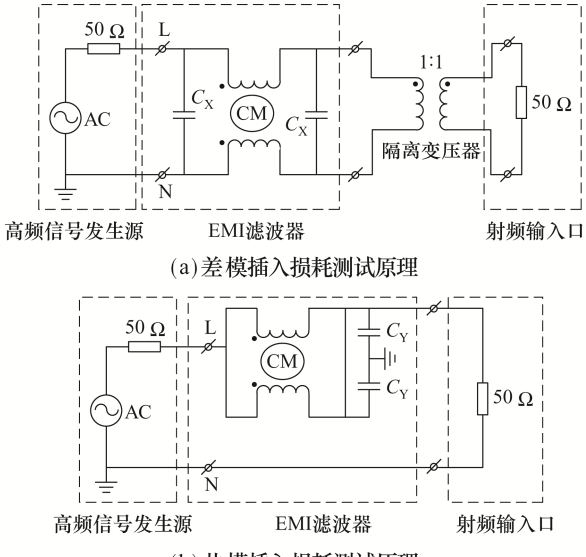
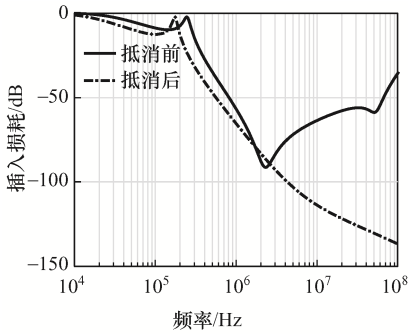
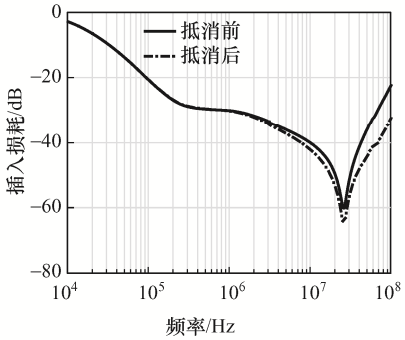


图 13 EMI 滤波器插入损耗测试原理

Fig. 13 Schematic of insertion loss test of EMI filters



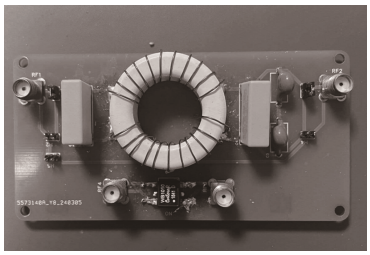
(a)差模插入损耗



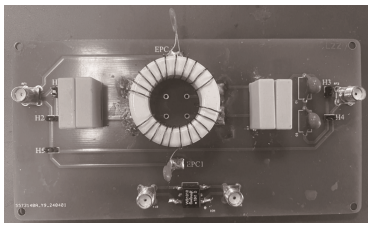
(b)共模插入损耗

图 14　EMI 滤波器插入损耗

Fig. 14 Insertion loss of EMI filter



(a) 原始 EMI 滤波器



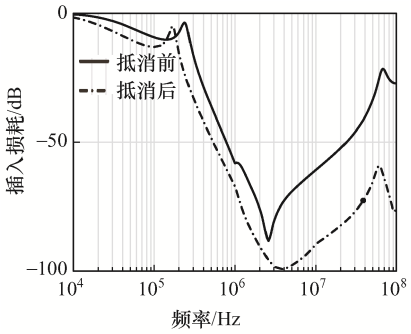
(b) 寄生参数抵消测试用 EMI 滤波器

图 15　EMI 滤波器插入损耗测试实物

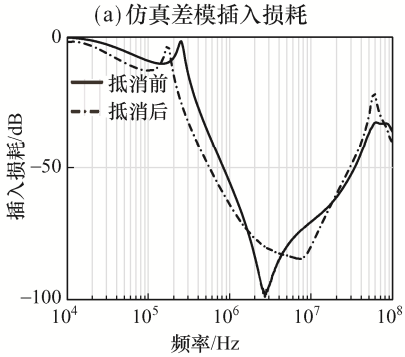
Fig. 15 Insertion loss test physical object of EMI filter

图16所示的是通过有限元仿真预测与改善 EMI 滤波器的差模插入损耗特性。可以发现，通过仿真可以很好地预测 EMI 滤波的噪声滤除效果，同时也可以准确验证采用寄生参数抵消方法的可行性。

图 17 为 EMI 滤波器共模插入损耗的仿真与实测曲线，可以发现，仿真在 10 kHz~100 MHz 范围



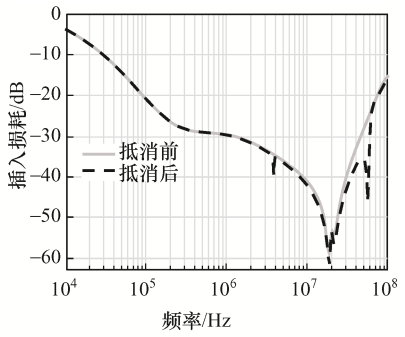
(a)仿真差模插入损耗



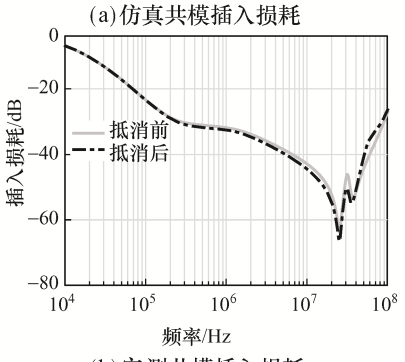
(b)实测差模插入损耗

图 16　差模插入损耗波形

Fig. 16 Differential-mode insertion loss waveforms



(a)仿真共模插入损耗



(b)实测共模插入损耗

图 17　共模插入损耗波形

Fig. 17 Common-mode insertion loss waveforms

内可以准确预测共模插入损耗特性，同时采用 10 pF 的抵消电容可以进一步改善共模插入损耗特性，因此所提仿真方法可以依据仿真结果来指导实

际 EMI 滤波器的寄生参数抵消方案设计。必须指出的是，EMI 滤波特性的优化效果取决于寄生参数的抵消效果，同时也要考虑抵消前滤波元件的寄生参数大小。10~100 MHz 范围内 C_{CM} 的均值为 2.5 pF，为应对频率变化带来的复杂性，采用这个均值作为 C_{CM} 的代表数值来选取抵消电容。由于寄生电容自身容值很小，因此本文在抵消前后的性能优化效果相差仅为 2~3 dB。本文所提出的方法可以预测 EMI 滤波器的噪声滤除特性，所建立的宽频段仿真模型能提前预判实际寄生参数抵消效果。

基于以上分析，本文的主要贡献如下：

(1)在 EMI 滤波器宽频段建模方面，本文考虑锰锌铁氧体材料磁芯的高频磁参数非线性对共模阻抗特性的影响，建立反映共模电感阻抗特性的宽频段模型，拓宽滤波元件阻抗特性与整个 EMI 滤波器滤波特性的预测范围(10 kHz~100 MHz)。

(2)考虑磁性材料磁导率频变特性对共模电感寄生电容提取结果的影响，进一步优化了共模电感抵消电容的选取。

(3)结合有限元精确预测滤波元件的阻抗特性，并运用所提的抵消电容选取方法，通过仿真手段精准预测整个 EMI 滤波器滤波性能的改善程度。

5 结论

本文研究了 EMI 滤波器的寄生参数抵消方案，通过理论分析、有限元仿真与插入损耗测试，验证本文所提滤波元件建模、预测与优化方法的可行性。具体结论如下：

(1)对于采用高磁导率的锰锌铁氧体磁芯共模电感，受磁芯磁导率频变特性影响，共模电感分量存在非线性变化，同时显著影响在 100 kHz 以后的共模阻抗特性。

(2)采用频变电感分量搭建的共模电感高频模型可以在宽频段范围(10 kHz~100 MHz)内表征共模电感的阻抗特性。

(3)考虑磁导率频变特性的共模电感抵消电容选取方法可以优化共模电感的滤波性能。

参考文献：

[1] Kovačević I F, Friedli T, Müsing A M, et al. 3-D electromagnetic modeling of parasitics and mutual coupling in EMI filters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 135-149.

[2] 杨玉岗, 许平静. EMI 滤波器高频寄生参数分析[J]. 电源技术, 2010, 34(9): 953-955.
Yang Yugang, Xu Pingjing. Parasitic parameters analysis of EMI filter [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2010, 34(9): 953-955. (in Chinese)

[3] 谢静逸, 陈为, 陈庆彬, 等. 考虑电磁场耦合的磁性元件近场耦合模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4652-4665.
Xie Jingyi, Chen Wei, Chen Qingbin, et al. Magnetic components near field coupling model considering electromagnetic field coupling [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4652-4665. (in Chinese)

[4] Borsalani J, Dastfan A, Ghalibafan J. An integrated EMI choke with improved DM inductance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 1646-1658.

[5] 叶鑫, 陆子健, 刘艺涛. 基于交错多地层结构的平面磁集成 LCL-EMI 滤波器设计与实现[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 243-250.
Ye Xin, Lu Zijian, Liu Yitao. Design and implementation of planar magnetic integrated LCL-EMI filter based on interleaved multi-GND-layer structure [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 243-250. (in Chinese)

[6] Chen Rengang, van Wyk J D, Wang Shuo, et al. Improving the Characteristics of integrated EMI filters by embedded conductive layers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(3): 611-619.

[7] Wang Shuo, Lee F C, Odendaal W G. Cancellation of capacitor parasitic parameters for noise reduction application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(4): 1125-1132.

[8] Wang Shuo, Lee F C, van Wyk J D, et al. A study of integration of parasitic cancellation techniques for EMI filter design with discrete components [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 3094-3102.

[9] 邱智勇, 傅恺宁, 陈为. 环形电感磁场泄漏分析与改善[J/OL]. 电源学报, 1-12. (2024-04-28) [2024-06-24]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20240426.1316.071.html.
Qiu Zhiyong, Fu Kaining, Chen Wei. Analysis and improvement of magnetic field leakage of annular inductors [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-12. (2024-04-28) [2024-06-24]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20240426.1316.071.html. (in Chinese)

[10] 杨玉岗, 冯本成, 王长华, 等. 一种新型的平面无源集成 EMI 滤波器结构[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 108-113, 119.
Yang Yugang, Feng Bencheng, Wang Changhua, et al. A novel structure of planar passive integrated EMI filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 108-113, 119. (in Chinese)

[11] Li Yiming, Wang Shuo, Sheng Honggang, et al. Investigate and reduce capacitive couplings in a flyback adapter with a DC-bus filter to reduce EMI [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 6963-6973.

[12] 徐浩东, 罗嗣勇, 毕闯, 等. 基于 SiC MOSFET 同步 Buck DC-DC 变换器的宽频混合 EMI 滤波器设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(10): 3060-3069.
Xu Haodong, Luo Siyong, Bi Chuang, et al. Design of broadband hybrid EMI filter in synchronous Buck DC-DC converter with SiC MOSFETs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(10): 3060-3069. (in Chinese)

[13] Chen Qingbin, Zhang Dandan, Chen Wei. EMI characteristics analysis and suppression technique of magnetic near-field coupling in power delivery adapter [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 7767.

[14] Yao Juntao, Wang Shuo, Luo Zheng. Modeling, analysis, and reduction of radiated EMI due to the voltage across input and output cables in an automotive non-isolated power converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5455-5465.

[15] Borsalani J, Dastfan A, Ghalibafan J. An integrated EMI choke with improved DM inductance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 1646-1658.

[16] Zhang Zhiliang, He Binghui, Hu Dongdong, et al. Common-mode noise modeling and reduction for 1-MHz eGaN multioutput DC-DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3239-3254.

[17] Zhang Boyi, Wang Shuo. Analysis and reduction of the near magnetic field emission from toroidal inductors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6251-6268.



傅恺宁

作者简介：

傅恺宁(1993—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，讲师。研究方向：高频磁性元件电磁兼容与诊断。E-mail：fkn@xmut.edu.cn。

连振珠(2000—)，女，硕士研究生。研究方向：EMI 滤波器电磁特性。E-mail：2323542595@qq.com。

陈为(1958—)，男，中国电源学会会士，博士，教授。研究方向：电力电子功率变换、高频磁技术、电磁兼容诊断与滤波器、电磁场分析与应用、电磁检测等。E-mail：chw@fzu.edu.cn。

(责任编辑：陈国珍)