

# 基于噪声仿真的 EMI 滤波器研究

邱燕,肖岚,曹海港

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 210016)

**摘要:** 提出一种依据仿真得到的开关电源噪声进行电磁干扰(EMI)滤波器设计的方法。针对 Boost 功率因数校正变换器,应用 SABER 软件仿真不同寄生参数下的噪声幅值,得到了影响共模噪声和差模噪声的主要因素:差模噪声主要是由功率器件的高频模型引起的,而共模噪声则与无源器件的高频模型以及 MOSFET 对地漏电容相关,且随着漏电容的增加而增加。在考虑功率器件的高频模型、MOSFET 的对地漏电容以及无源器件的高频寄生参数等影响的情况下,采用噪声仿真的方法分离出变换器的共模噪声和差模噪声。在此基础上,应用插入电压增益的方法,计算出共模滤波器和差模滤波器的截止频率,设计了 EMI 滤波器。实验验证了仿真的准确性以及滤波器设计方法的正确性。

**关键词:** EMI 滤波器; 仿真; 插入电压增益; 共模滤波器; 差模滤波器

**中图分类号:** TN 713

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2010)09-0096-05

## 0 引言

开关电源体积小,重量轻,功率密度大,越来越多地应用于生产和生活的各个领域。但开关器件的高频开关动作会带来很高的  $di/dt$  和  $du/dt$ ,它们通过寄生电感和寄生电容等耦合,在交流电源线中产生严重的电磁干扰(EMI)。这些电磁噪声不仅会注入电网,污染电网,同时还会影响同一电网中其他电子、电气设备的正常工作。

为了抑制电磁噪声,使电源满足相应的标准要求,在电源设备中插入 EMI 滤波器。滤波器可以抑制经电源线进入敏感设备或系统的电磁干扰,同时还可以抑制设备或者系统自身的传导干扰发射,以防止其污染电网。

文献[1-4]提出了用插入损耗以及经验来设计滤波器、计算滤波器参数的方法。但是插入损耗是在噪声源阻抗和负载阻抗都是  $50\ \Omega$  的条件下定义的,实际变换器在使用时,其干扰源阻抗和网侧负载阻抗都不可能达到理想的  $50\ \Omega$ 。这会影响滤波器在实际使用时的滤波效果。而要靠经验,对初学者而言比较难,而且所得到的滤波器不是最优化的。文献[5-12]提出在噪声分离的基础上设计滤波器。根据噪声分离得到的基准,用滤波器的共模和差模等效模型,分 5 个步骤设计滤波器,快速准确,可以作为一种模式进行推广。但是测试需要线性阻抗稳定网络 LISN(Line Impedance Stabilizing Network)、干扰接收机和噪声分离器,这些设备太昂贵,普通实验室不具备这样的条件,因此可以考虑通过仿真得到噪声频谱,文献[13-17]研究用软件仿真的方法得到噪声频谱,抽取了印刷电路板 PCB(Printed Circuit Board)

寄生参数,从器件物理原理出发,建立功率管的高频模型,但是过程复杂。

本文综合 EMI 电源滤波器已有的研究方法,通过建立仿真模型,对比仿真参数对仿真结果的影响,得到影响共模和差模噪声的主要因素。在此基础上,用插入电压增益的方法设计 EMI 滤波器,实验验证了滤波器设计方法的正确性。

## 1 滤波器工作原理

图 1 为一个单相 EMI 滤波器的基本结构,它是由电感、电容等无源器件组成的低通网络。其中,  $C_{X1}$ 、 $C_{X2}$  为差模电容,取值范围为  $0.47 \sim 5\ \mu\text{F}$ ;  $C_{Y1}$ 、 $C_{Y2}$  为共模电容,为满足相关标准中对地漏电流的要求,在  $2200 \sim 4700\ \text{pF}$  之间取值;  $L_C$  为共模电感,一般是零点几毫亨到几十毫亨;  $L_D$  为差模电感,一般在几十微亨,可以由共模电感的漏感来提供。

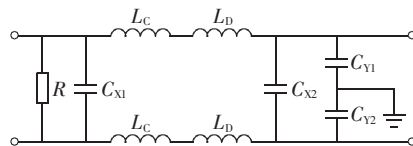


图 1 EMI 滤波器拓扑

Fig.1 Topology of EMI filter

由于滤波器中单一元件通常只对共模干扰或者差模干扰起滤除作用,因此,需要分开考虑滤波器的共模特性和差模特性,即将图 1 所示的滤波器拓扑等效为图 2 的共模和差模等效电路。

共模等效电路是 L 型低通滤波器,其衰减斜率为  $40\ \text{dB/dec}$ ,转折频率为

$$f_{\text{CM}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{CM}}C_{\text{CM}}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_C + L_D/2)(2C_{Y1})}} \quad (1)$$

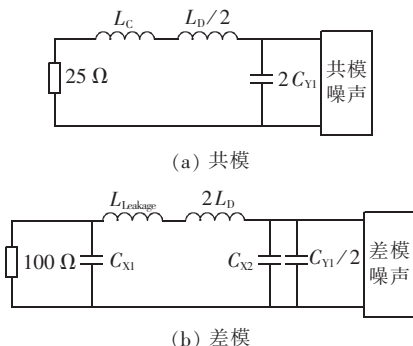


图2 共模和差模等效电路

Fig.2 Equivalent circuits of common-mode and differential-mode filter

其中,  $L_{CM}$ 、 $C_{CM}$  分别为共模等效电路的电感、电容。

差模等效电路是  $\Pi$  型低通滤波器, 其衰减斜率为  $60 \text{ dB/dec}$ 。转折频率为

$$f_{DM} = \frac{2}{2\pi\sqrt{L_{DM}C_{DM}}} = \frac{2}{2\pi\sqrt{(L_{Leakage} + 2L_D)C_{X1}}} \quad (2)$$

其中,  $L_{DM}$ 、 $C_{DM}$  分别为差模等效电路的电感、电容;  $L_{Leakage}$  为共模电感的漏感。

## 2 滤波器设计方法

本文用插入电压增益  $k_u$  来设计滤波器。

共模和差模滤波等效电路的插入电压增益曲线如图3所示, 共模的插入电压增益在转折频率后以  $40 \text{ dB/dec}$  增加, 差模以  $60 \text{ dB/dec}$  增加。

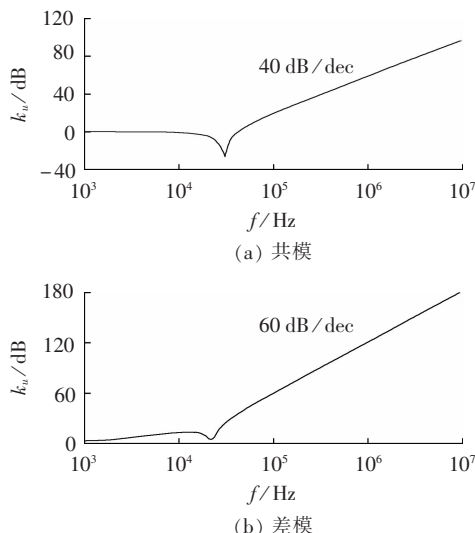


图3 共模和差模插入增益幅频曲线

Fig.3 Amplitude-frequency curves of common-mode and differential-mode insertion gain

根据定义的插入增益, 单级滤波器的设计可以遵循5个步骤。

a. 通过仿真或者测试得到未加入滤波器时变换器产生的干扰噪声频谱; 分别得到共模干扰噪声频谱  $U_{CM}$  和差模干扰噪声频谱  $U_{DM}$ 。

b. 计算需要的衰减曲线  $U_{req,CM}$ 、 $U_{req,DM}$ :

$$20\log U_{req,CM} = 20\log(U_{CM} - U_{Limit}) + 6 \text{ dB} \quad (3)$$

$$20\log U_{req,DM} = 20\log(U_{DM} - U_{Limit}) + 6 \text{ dB} \quad (4)$$

其中,  $U_{CM}$ 、 $U_{DM}$  为未加入滤波器时测得的干扰值;  $U_{Limit}$  为标准值;  $6 \text{ dB}$  为安全裕量。

c. 计算共模和差模等效电路的转折频率: 对于共模滤波器, 用斜率为  $40 \text{ dB/dec}$  的直线与所需要的衰减曲线相切, 斜线与频率轴的交点即共模转折频率  $f_{CM}$ , 如图4(a)所示; 差模用  $60 \text{ dB/dec}$  的直线相切, 如图4(b)所示。

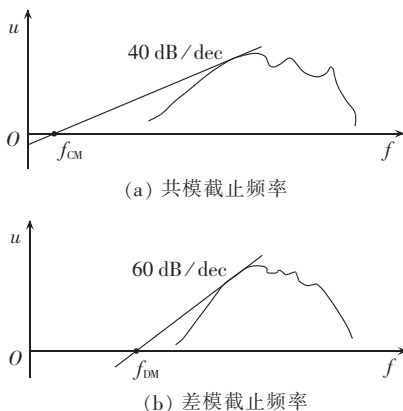


图4 截止频率计算

Fig.4 Calculation of cut-off frequency

d. 设计共模参数和差模参数: 对于共模滤波电路, 先选择共模电容以满足标准规定的对地漏电流的要求, 然后根据式(1)计算共模电感值; 差模滤波器的设计过程与之相似。

e. 测试滤波器设计是否满足要求: 将设计好的滤波器插入到 LISN 与受试设备 EUT (Equipment Under Test) 之间, 测试干扰值。若干扰值满足标准要求, 则滤波器设计满足要求; 否则, 调整滤波器参数, 直到加入滤波器后干扰值满足标准要求。

## 3 设计实例与实验结果

以一台功率为  $350 \text{ W}$ 、开关频率为  $113 \text{ kHz}$  的有源功率因数校正 APFC (Active Power Factor Correction) 变换器为例, 建立变换器的高频模型, 设计 EMI 滤波器, 并用实验验证。选择器件如下: 功率场效应管型号 IFR460; 功率二极管型号 DSEI30-06; 电解电容  $440 \mu\text{F}$ ; 电感  $550 \mu\text{H}$ 。

电感、电容和电阻的高频模型参数用 LCR 测试仪测试得到。其中, PFC 电感  $L_B$  为  $550 \mu\text{H}$ , 相应的寄生电容为  $3.8 \text{ pF}$ , 寄生电阻为  $6 \text{ m}\Omega$ ; 整流侧电容  $C_{BL}$  为  $0.1 \text{ mF}$ , 对应的寄生电感为  $6.58 \text{ nH}$ , 寄生电阻为  $52.3 \text{ m}\Omega$ ; 输出侧电容  $C_B$  为  $440 \mu\text{F}$ , 对应的寄生电感为  $10 \text{ nH}$ , 寄生电阻为  $0.1 \Omega$ ; 负载电阻  $R_L$  为  $105 \Omega$ , 其对应的寄生电感为  $1.18 \mu\text{H}$ , 寄生电容为  $1.75 \text{ pF}$ 。

首先仿真理想情况下的噪声电压频谱。在此情况下, 无源器件不加入其高频模型, 功率开关管用理想模型, 其仿真结果如图5(a)所示。接着, 将功率开

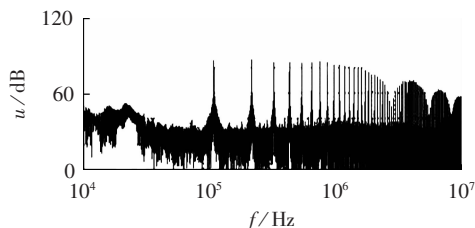
关管换成 SABER 软件中的实际模型,仿真结果如图 5(b)所示。比较这 2 个波形图可以看出,在低频段,图 5(a)所示的噪声明显比图 5(b)所示的低;在高频段则没有很大的变化。这说明开关器件的实际模型对 EMI 噪声的低频段影响较大,而对高频段影响较小。

然后将无源器件的高频模型加入到仿真模型中,并在 MOSFET 对地端加上 20 pF 的电容,得到的噪声仿真如图 5(c)所示。比较图 5(b)(c)可以看出,在低频段,频谱没有很大的变化;而在高频段,则有大约 20 dB 的提升。由此可以看出,无源器件的高频特性对 EMI 噪声低频段的影响不大,但对其高频段的影响很大。

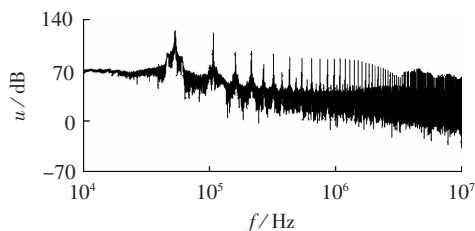
调整 MOSFET 对地寄生电容值作进一步的比较。MOSFET 电容为 60 pF、100 pF 时的噪声频谱分别如图 5(d)(e)所示。比较图 5(c)(d)(e)可以看出,噪声频谱的低频段基本不变,但其高频段则随着寄生电容的增加而增加。由此可知 EMI 噪声的高频段主要是由 MOSFET 的对地寄生电容引起的。因此,要抑制共模噪声,对于单个开关管的散热器要分开使用,不要共用。

对建立的高频模型进行时域仿真后再进行 FFT 变换,得到插入滤波器前噪声仿真频谱,如图 5(f)所示。然后分离出共模噪声频谱,见图 5(g)(图中,曲线 1 为 EMI 限值曲线,曲线 2 为加 6 dB 安全裕量后的 EMI 限值曲线,下同),差模噪声频谱见图 5(h)。

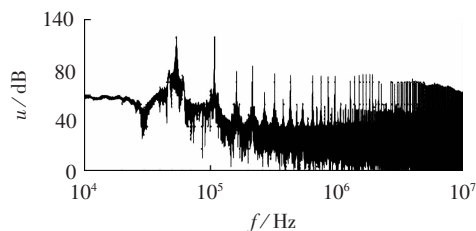
依照上述插入电压增益的方法设计滤波器,得到滤波器的参数为:共模电感 4.3 mH;差模电感 100  $\mu$ H;共模电容 3300 pF;差模电容 1  $\mu$ F。



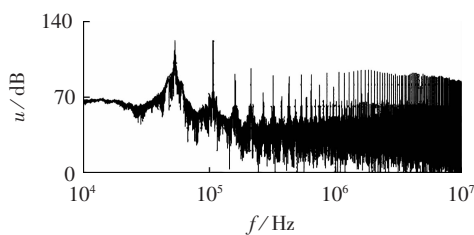
(a) 理想情况下总噪声频谱



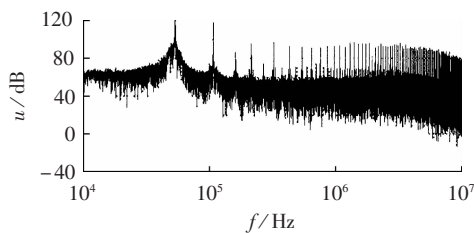
(b) 未加入寄生参数时总噪声频谱



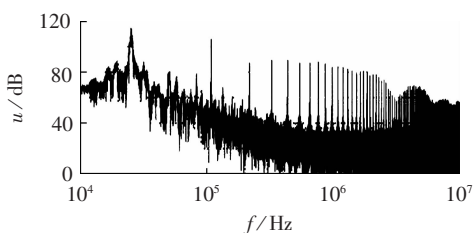
(c) 对地寄生电容为 20 pF 时总噪声频谱



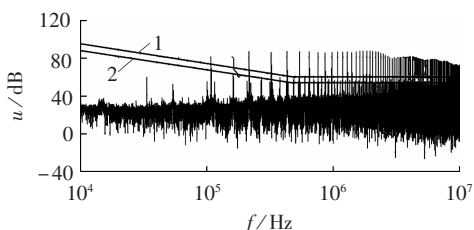
(d) 对地寄生电容为 60 pF 时总噪声频谱



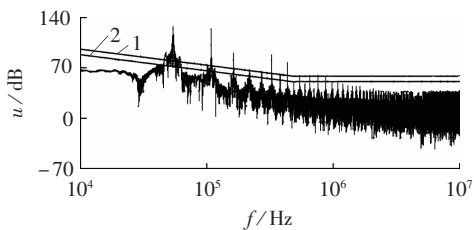
(e) 对地寄生电容为 100 pF 时总噪声频谱



(f) FFT 变换后总噪声频谱



(g) 共模噪声频谱



(h) 差模噪声频谱

图 5 插入滤波器前噪声仿真频谱

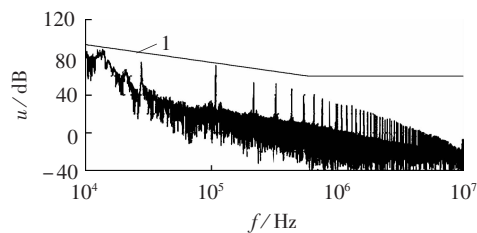
Fig.5 Simulative spectrums before inserting filter

将滤波器插入到电路中,得到如图 6 所示的总噪声、共模噪声及差模噪声仿真频谱。可见,干扰能很好地满足标准要求。

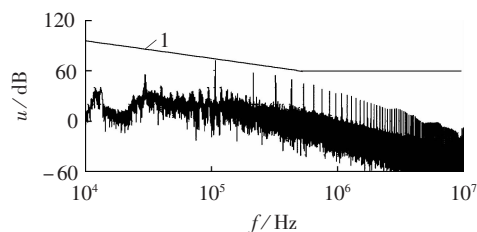
用 SCR3502 接收机测量得到的实验波形如图 7 所示,其中图 7(a)(b)分别是滤波器插入前、后相线噪声频谱。

由实验波形可看出,滤波器设计合理,能够很好地使电路满足标准要求,且留有一定的裕量。

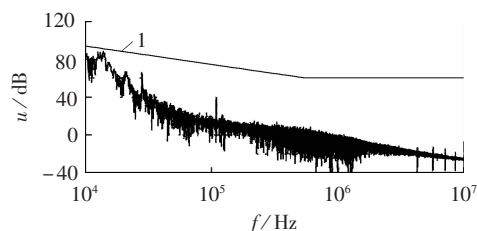
通过实验结果和仿真结果对比分析可以看出,仿真结果在高频段与实验吻合得很好,而在开关频率 113 kHz 处,仿真得到的噪声比实际噪声约大 10 dB。这有几点原因造成:首先,仿真时没有加入 PCB



(a) 总噪声频谱



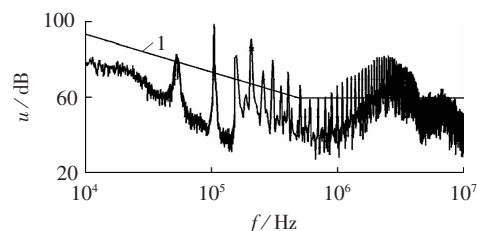
(b) 共模噪声频谱



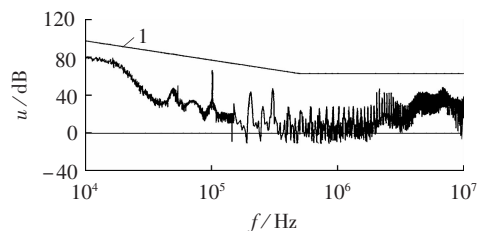
(c) 差模噪声频谱

图6 插入滤波器后噪声仿真频谱

Fig.6 Simulative spectrums after inserting filter



(a) 滤波器插入前总噪声频谱



(b) 滤波器插入后总噪声频谱

图7 滤波器插入前、后总噪声频谱

Fig.7 Total noise spectrums before and after inserting filter

的寄生模型;其次,SABER 软件中的功率器件模型并不能完全反映器件真实的高频模型,仿真模型中的有源器件直接用的是 SABER 软件中的模型,不能很好地反映其真实的工作特性。而加入滤波器后的仿真频谱与实际测量频谱吻合较好的原因是实际制作滤波器时考虑了仿真的失真性,稍微增大了共模电感值和差模电感值。

## 4 结语

本文详细论述了用插入电压增益的方法设计滤波器的步骤;针对噪声分离实验室难以实现的现状,用仿真方法得到的噪声频谱来设计滤波器;针对应用广泛的 APFC 电路,仿真不同高频参数下的噪声幅值。可见功率器的真实模型会影响差模噪声,而共模噪声主要与 MOSFET 对地漏电容相关。在此基础上设计滤波器,并通过实验验证了滤波器设计的合理性。

## 参考文献:

- [1] 王丽. EMI 电源滤波器的设计和研究[D]. 北京:北京航空航天大学电气工程学院,2007.  
WANG Li. Design and study of EMI source filter[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2007.
- [2] 高峰涛,张姝瑶,王涵. EMI 滤波器特性分析[J]. 电子科技,2008,21(9):5-7.  
GAO Fengtao,ZHANG Shuyao,WANG Han. Analysis of the character of EMI filter[J]. Electronic Technology,2008,21(9):5-7.
- [3] 贾科林,王京梅,毕闯. EMI 滤波器的设计与仿真[J]. 安全与电磁兼容,2007(3):68-72.  
JIA Kelin,WANG Jingmei,BI Chuang. Procedure of designing EMI filter and simulation[J]. Safety and EMC,2007(3):68-72.
- [4] 区健昌. EMI 滤波器和开关电源防护设计[J]. 安全与电磁兼容,2002(2):23-26.  
OU Jianchang. Prevention design of EMI filters and power converters[J]. Safety and EMC,2002(2):23-26.
- [5] 魏应冬,吴燮华. 开关电源 EMI 电源滤波器原理与设计研究[J]. 电源应用技术,2005,8(2):36-40.  
WEI Yingdong,WU Xiehua. Study on principle and design for EMI filters of switching power supply[J]. Power Supply Technologies and Applications,2005,8(2):36-40.
- [6] SHIH F,CHEN D,WU Y,et al. A procedure for designing EMI filters for AC line applications[J]. IEEE Trans on Power Electronics,1996,11(1):170-181.
- [7] WEI Zhang,ZHANG M T,LEE F C. Conducted EMI analysis of a Boost PFC circuit[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. Atlanta,USA:IEEE,1997:223-229.
- [8] YE S,EBERLE W,LIU Y. A novel EMI filter design method for switching power supplies[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2004,19(6):1668-1678.
- [9] CAPONET M C,PROFUMO F,TENCONI A. EMI filters design for power electronics[C]//Power Electronics Specialists Conference. Cairns,Queensland,Australia:[s.n.],2002:2027-2032.
- [10] ZHANG D,CHEN D,SABLE D. A new method to characterize EMI filters[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. Anaheim,California,USA:[s.n.],1998:929-933.
- [11] WANG S,LEE F C. Characterization,evaluation,and design of noise separator for conducted EMI noise diagnosis[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2005,20(4):974-982.
- [12] TING G,CHEN D,LEE F C. Separation of the common-mode and differential-mode conducted EMI noise[J]. IEEE Trans on Power Electronics,1996,11(3):480-488.
- [13] 杨光. 高频开关电源的 EMI 建模与仿真研究[D]. 北京:北京邮电大学通信网络综合技术研究所,2008.  
YANG Guang. Research on EMI modeling and simulation of high frequency switching mode power supply[D]. Beijing:Beijing University of Post and Telecommunications,2008.
- [14] 袁义生. 功率变换器电磁干扰的建模[D]. 杭州:浙江大学电气

- 工程学院,2002.
- YUAN Yisheng. Electromagnetic interference modeling for power converters[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [15] 袁义生,钱照明. 分析传导 EMI 的功率 MOSFET 建模[J]. 浙江大学学报:工学版,2003,37(2):198-214.
- YUAN Yisheng, QIAN Zhaoming. Modeling of power MOSFET for conducting EMI analysis[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2003, 37(2): 198-214.
- [16] 袁义生,穆斯塔法,钱照明. 用于传导 EMI 仿真的功率二极管高频模型的研究[J]. 电力电子技术,2001,35(6):84-94.
- YUAN Yisheng, CHIKACH M K, QIAN Zhaoming. Study of the model of PIN diode for conducted EMI simulation[J]. Power Electronics, 2001, 35(6): 84-94.
- [17] 袁义生,钱照明. 功率变换器传导 EMI 的精确建模[J]. 电力电子技术,2003,37(1):21-24.
- YUAN Yisheng, QIAN Zhaoming. Accurate modeling of conducted EMI of power converters[J]. Power Electronics, 2003, 37(1): 21-24.

(编辑: 柏英武)

#### 作者简介:

邱 燕(1986-),女,江苏吴江人,硕士研究生,研究方向为功率电子变换器(**E-mail**: qiuyan\_jess@yahoo.com);

肖 岚(1971-),女,四川梁平人,教授,博士研究生导师,研究方向为功率电子变换器、航空电源和新能源发电。

## EMI filter design based on noise simulation

QIU Yan, XIAO Lan, CAO Haigang

(College of Aeronautics & Astronautics, Nanjing University  
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The method of EMI(Electro Magnetic Interference) filter design based on the simulative noise of switching power supply is put forward. The noise amplitudes under different parasitic parameters are simulated with SABER software for the Boost Power Factor Corrector and it is found that: the differential-mode noise is mainly induced by the high frequency models of power devices and the common-mode noise is mainly related to the high-frequency parameters of passive devices, which increases with the increase of the drain-to-ground capacitance of MOSFET. With the consideration of the aforementioned causes, the common-mode noise is separated from the differential-mode noise by noise simulation, based on which, the cut-off frequency of common-mode filter or differential-mode filter is calculated with insertion voltage gain method. The EMI filter is thus designed. The experimental results show the correctness of the proposed design method.

**Key words:** EMI filter; simulation; insertion voltage gain; common-mode filter; differential-mode filter