

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.08.017

基于共模扼流圈高频模型的 Boost PFC 的 EMI 滤波器设计^{*}

陈 浩, 胡耀威, 王 磊, 陈冬冬, 陈国柱^{*}
(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对 Boost PFC 变换器存在的传导电磁干扰问题,对 Boost PFC 变换器在加入平衡电容前后的共模、差模干扰传导路径进行了分析,进而对混合传导电磁干扰的成因及抑制方法进行了研究。对共模扼流圈的非理想因素及现有高频模型的局限性进行了归纳,综合考虑了磁芯材料频率特性及绕组寄生电容的影响,建立了一种改进的 Foster 网络串联模型,并提出了一种基于共模扼流圈阻抗特性优化的 EMI 滤波器设计方案,利用一套 1.25 kW 的 Boost PFC 变换器样机进行了对比实验验证。研究表明:将所设计的 EMI 滤波器加入电路后,待测装置能顺利通过传导干扰测试。

关键词:传导电磁干扰;平衡电容;高频模型;EMI 滤波器

中图分类号:TM477;TP461

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)08-0868-05

EMI filter for boost PFC converters based on high-frequency model of common-mode chokes

CHEN Hao, HU Yao-wei, WANG Lei, CHEN Dong-dong, CHEN Guo-zhu
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem of conducted electromagnetic interference in Boost PFC converters, through the analysis of its common-mode and differential-mode interference conduction paths in Boost PFC converters with or without the balanced capacitor, the causes and suppression methods of mixed-mode conducted electromagnetic interference in Boost PFC converters were studied. Considering the frequency characteristics of the core material and winding parasitic capacitors, the non-ideal factors of common-mode chokes and the limitations of the existing high-frequency model were summarized. An improved Foster network series model was established and an EMI filter design scheme based on optimization of high-frequency impedance characteristics. Experiments were carried out using a prototype of 1.25 kW Boost PFC converter. The results indicate that after the designed EMI filter was added to the circuit, the device under test can pass the conducted interference test successfully.

Key words: conducted electromagnetic interference; balanced capacitor; high frequency model; EMI filter

0 引 言

随着电磁干扰问题日益严重,国际上陆续出台了相关的技术规范,如国际无线电干扰特别委员会 CIS-PR 提出的 CISPR22,欧洲标准规定的 EN55022 以及我

国颁布的 GB9254 等^[1]。

为了使电力电子设备通过相关的传导电磁干扰测试,工程师们常采用在设备的电源进线处加入 EMI 滤波器的方式^[2]。但是,由于共模扼流圈的磁芯材料特性随频率变化以及绕组寄生电容的存在,

收稿日期:2018-01-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777186)

作者简介:陈 浩(1993-),男,福建福州人,硕士研究生,主要从事电磁兼容与电能质量方面的研究。E-mail: haochen_zju@163.com

通信联系人:陈国柱,男,教授,博士生导师。E-mail: zjuem@zju.edu.cn

其阻抗高频特性不理想,会造成 EMI 滤波器在高频段的衰减不足,进而导致无法通过传导电磁干扰测试^[3]。为了更准确地评估 EMI 滤波器的滤波性能,需要建立共模扼流圈在 150 kHz ~ 30 MHz 传导干扰测试范围内的高频模型。陈恒林等^[4]提出采用 Foster 网络串联模型对共模扼流圈的共模阻抗进行拟合,其缺陷是没有考虑磁芯材料频率特性的影响;崔永生等^[5]在建模过程中假设磁芯磁导率随频率变化的设计是线性的,当磁芯材料磁导率非线性严重时模型就不准确了;CUELLAR C N 等^[6]提出的模型能较好地反应磁芯材料频率特性的影响,但其建模的前提是需要对磁芯材料的磁导率进行精确的测量,对仪器的要求比较高。

本文提出一种基于共模扼流圈阻抗特性优化的 EMI 滤波器设计方法,并通过实验进行验证。

1 Boost PFC 的传导电磁干扰问题

由于 Boost PFC 变换器存在固有的混合传导电磁干扰,在设计 EMI 滤波器前,要先对其进行分离与抑制。

1.1 混合传导电磁干扰分析

根据传导电磁干扰机理的不同,可将其归类为共模干扰和差模干扰两大类。在 Boost PFC 变换器中,共模干扰主要由开关管漏极和地之间的寄生电容 C_p 上的位移电流引起;差模干扰主要由电感电流的纹波引起。

Boost PFC 变换器在输入电压正半周期时的传导电磁干扰路径如图 1(a) 所示。其中, LISN 网络被简化为 2 个 50 Ω 的电阻。可以看出:共模干扰电流 i_{CM} 此时仅流过 N 线;差模干扰电流 i_{DM} 同时流过 L 线和 N 线。

通过 LISN 网络测量得到的电压分别为:

$$v_1 = -50i_{DM} \quad (1)$$

$$v_2 = 50(i_{DM} - 2i_{CM}) \quad (2)$$

据此得到的共模、差模干扰电压为:

$$v_{DM} = \frac{v_1 - v_2}{2} = -50(i_{DM} - i_{CM}) \quad (3)$$

$$v_{CM} = \frac{v_1 + v_2}{2} = -50i_{CM} \quad (4)$$

可见,此时共模干扰电压 v_{CM} 仅与共模干扰电流 i_{CM} 有关;而差模干扰电压 v_{DM} 不仅与差模干扰电流 i_{DM} 有关,还与共模干扰电流 i_{CM} 有关,即线路中存在混合干扰。其原因是电路结构的不平衡, N 线上的电流比 L

线上的电流大了 $2i_{CM}$ 。

混合传导电磁干扰一方面会引起共模扼流圈磁芯饱和,导致 EMI 滤波器的性能下降;另一方面,由于噪声信号没有分离,无法分别针对共模、差模干扰信号进行电路的建模与分析,导致 EMI 滤波器设计困难。

1.2 平衡电容对混合传导电磁干扰的抑制

为了改善电路结构的不平衡,在整流桥后加入一个平衡电容 C_B 。加入平衡电容后 Boost PFC 变换器的传导电磁干扰路径如图 1(b) 所示。

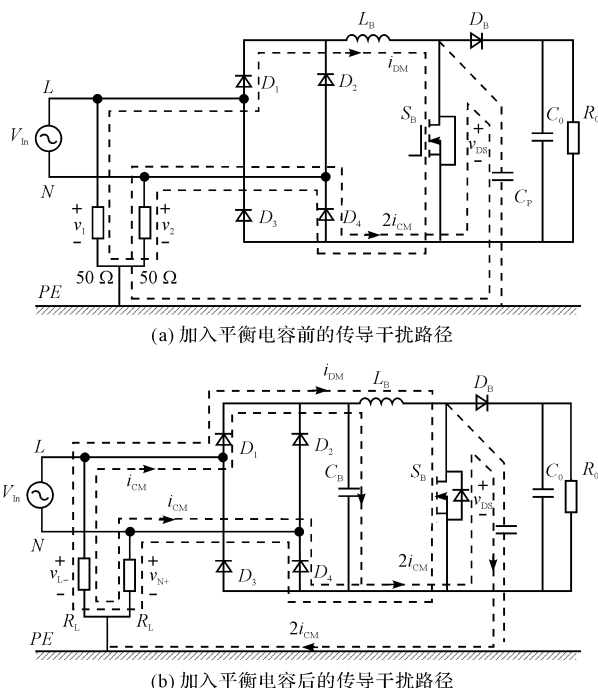


图1 Boost PFC 变换器的传导干扰路径

此时,测量得到的电压分别为:

$$v_1 = -50(i_{CM} + i_{DM}) \quad (5)$$

$$v_2 = -50(i_{CM} - i_{DM}) \quad (6)$$

类似的,可得到相应的共模、差模干扰电压:

$$v_{DM} = \frac{v_1 - v_2}{2} = -50i_{DM} \quad (7)$$

$$v_{CM} = \frac{v_1 + v_2}{2} = -50i_{CM} \quad (8)$$

由于平衡电容 C_B 给共模干扰电流 i_{CM} 提供了一条低阻抗传导路径,此时 L 线和 N 线上流过的共模干扰电流大小相等,方向相同;两根线上流过的差模干扰电流大小相等,方向相反。因此,这种情况下共模干扰电压 v_{CM} 仅与共模干扰电流 i_{CM} 有关;差模干扰电压 v_{DM} 仅与差模干扰电流 i_{DM} 有关。可见,平衡电容 C_B 可以改善原电路中的不平衡状况,避免共模干扰转换为差模

干扰,对原电路中的混合干扰有抑制作用。

2 共模扼流圈的高频建模

共模扼流圈是 EMI 滤波器中的重要元件。共模扼流圈的频率特性与理想电感有显著差异,主要有以下 2 个原因:(1)共模扼流圈的绕组绕线之间,绕组与磁芯之间以及构成共模扼流圈的两个绕组之间均存在寄生电容;(2)共模扼流圈磁芯材料的磁导率随着频率的增大而下降。

为了更好地设计共模扼流圈,更精确地评估 EMI 滤波器的性能,需要建立共模扼流圈在 150 kHz ~ 30 MHz 频率段内的高频模型。

2.1 共模扼流圈的共模等效模型

由于共模扼流圈的电感值较大,其阻抗曲线在 10 MHz ~ 30 MHz 间常反映出传输线特性。通常采用 Foster 网络串联模型对其进行拟合。

由于共模扼流圈的磁芯材料常采用锰锌铁氧体或纳米晶等材料,在大于某一频率时,其磁导率会迅速下降,而 Foster 网络串联模型无法很好地反映阻抗非线性,故提出一种改进的 Foster 网络串联模型。

共模扼流圈的共模等效模型如图 2 所示。

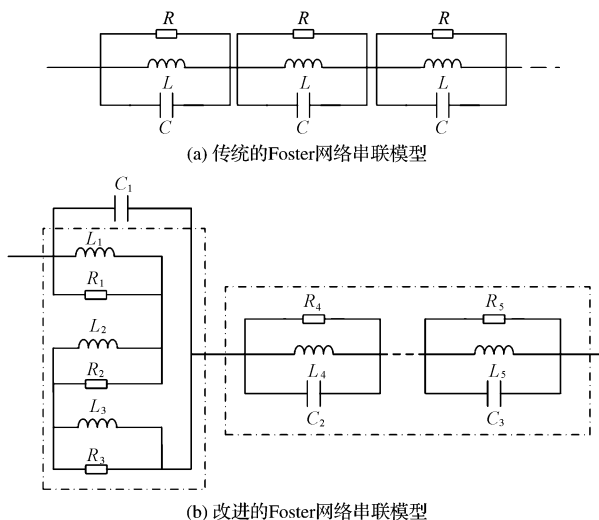


图 2 共模扼流圈的共模等效模型

其中, C_1 表征共模扼流圈的寄生电容的影响;左侧框内的部分表征共模扼流圈的磁芯特性;右侧框内的部分表征传输线特性,其级联个数取决于相应频段内阻抗曲线谐振峰的个数。

模型的拟合效果如图 3 所示。

由此可见,改进的 Foster 网络串联模型拟合效果更佳。

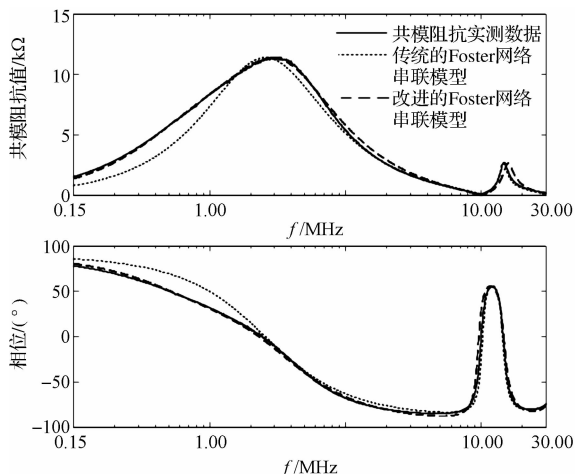


图 3 模型拟合效果对比

2.2 共模扼流圈的差模等效模型

在 EMI 滤波器中,可将共模扼流圈的漏磁通作为差模电感使用。漏磁通的磁势主要降落在共模扼流圈绕组间的空气磁阻上。由于空气磁导率的频率特性稳定,可以认为差模电感受磁芯材料频率特性的影响很小。且差模电感的感值较小,其阻抗曲线在传导干扰的测试频段一般不会出现传输线特性。故在 150 kHz ~ 30 MHz 频段内共模扼流圈的差模等效模型可用单级 Foster 网络模型来拟合。

3 EMI 滤波器的设计

基于上述研究结果,本研究针对 Boost PFC 变换器,提出一种基于共模扼流圈阻抗特性优化的 EMI 滤波器设计方法。待测装置为一台 1.25 kW,开关频率为 65 kHz 的 Boost PFC 变换器,如图 4 所示。

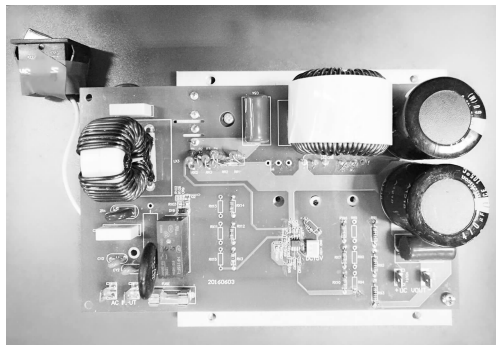


图 4 Boost PFC 变换器实物图

EMI 滤波器的设计步骤如下:

(1)在不加 EMI 滤波器时,通过 LISN 网络测量待测装置的共模、差模传导电磁干扰^[7],测量结果如图 5 所示。

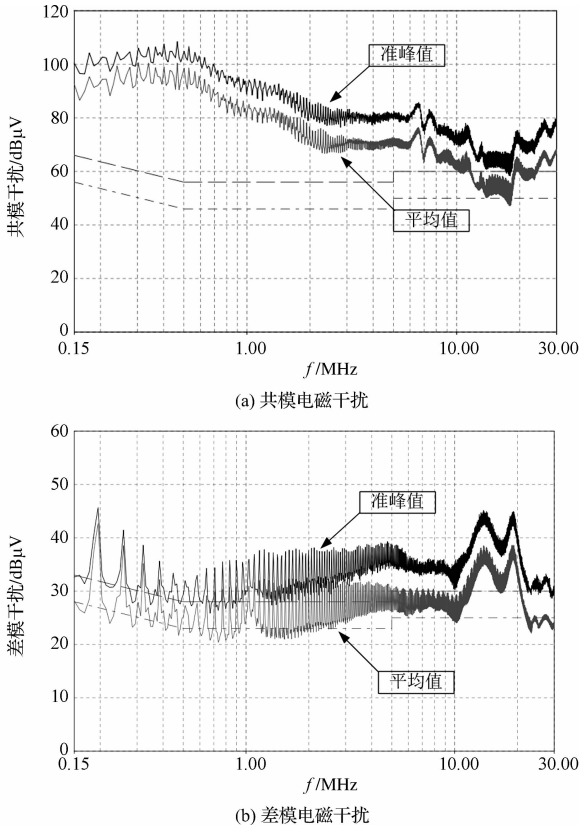


图5 未加 EMI 滤波器时的传导电磁干扰

(2) 将测量值与相应的标准值相减,考虑 6 dB 的裕量后,得到 EMI 滤波器在各频段所需要达到的共模、差模干扰衰减^[8]:

$$v_{\text{req,CM}} = v_{\text{CM}} - v_{\text{Limit,CM}} + 6\text{dB} \quad (9)$$

$$v_{\text{req,DM}} = v_{\text{DM}} - v_{\text{Limit,DM}} + 6\text{dB} \quad (10)$$

(3) EMI 滤波器的拓扑及其共模、差模高频等效电路如图 6 所示。

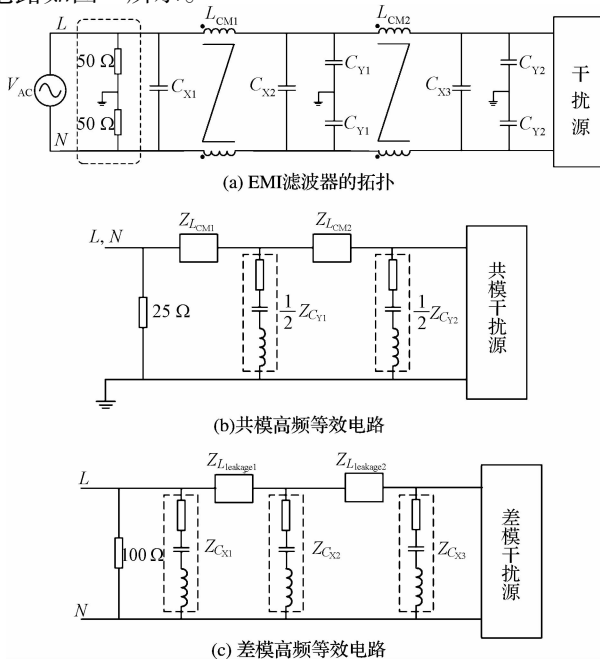


图6 EMI 滤波器的高频等效电路

图 6(b) 中的方框指代改进的 Foster 网络串联模型;图 6(c) 图中的方框指代单级 Foster 模型。

(4) 由共模等效电路,得到 EMI 滤波器的共模插入增益表达式为:

$$G_{\text{CM}}(s) = \frac{(Z_{C_{Y1}} + Z_1) \cdot (Z_{C_{Y2}} + Z_2)}{(Z_{C_{Y1}} + Z_{C_{Y2}})} \quad (11)$$

其中:

$$\begin{cases} Z_1 = 25 \Omega + Z_{L_{\text{CMI}}} \\ Z_2 = Z_{L_{\text{CM2}}} + \frac{Z_{C_{Y1}} \cdot Z_1}{Z_{C_{Y1}} + Z_1} \end{cases} \quad (12)$$

同样,差模插入增益表达式为:

$$G_{\text{DM}}(s) = \frac{(Z_{C_{X1}} + 100 \Omega) \cdot (Z_{C_{X2}} + Z_1) \cdot (Z_{C_{X3}} + Z_2)}{Z_{C_{X1}} \cdot Z_{C_{X2}} \cdot Z_{C_{X3}}} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{100 \Omega \cdot Z_{C_{X1}}}{100 \Omega + Z_{C_{X1}}} + Z_{L_{\text{leakage1}}} \\ Z_2 = Z_{L_{\text{leakage2}}} + \frac{Z_{C_{X2}} \cdot Z_1}{Z_{C_{X1}} + Z_1} \end{cases} \quad (14)$$

由于漏电流限制,Y 电容取值通常不能超过 3 300 pF^[9]。在本待测装置中,取 Y 电容为 1 nF。用阻抗分析仪 E4490A 对 Y 电容进行阻抗测量并拟合,Y 电容高频等效模型可用 RLC 串联模型表示。

(5) 根据公式(11),代入相应高频模型和数据,计算得到共模扼流圈在 150 kHz ~ 30 MHz 频段内所需达到的共模阻抗值。

根据该计算结果,结合上一小节的内容,可以有针对性地对共模扼流圈高频阻抗特性进行优化。

(6) 初步确定共模扼流圈后,可用阻抗分析仪 E4990A 测量得到其漏感即差模电感的阻抗曲线,再根据差模衰减值的求,计算得到 X 电容取值。

(7) 将设计完成的 EMI 滤波器加入原电路,进行传导电磁干扰测试,验证是否满足要求。

4 设计实例与实验结果

为验证上述设计方法,本研究自行绕制共模扼流圈进行对比测试。磁芯选用 Amornano 公司的纳米晶磁环,磁芯材料为 FeNbCuSiB,产品牌号为 ANB-CM322015-SF8,初始磁导率 $\geq 80\,000$ 。#1 扼流圈的匝数为 18 匝,测量得到的阻抗曲线如图 7 所示。

可见,虽然#1 扼流圈在低频段的阻抗值远大于设计要求,但是其阻抗曲线的第一个谐振峰对应的频率

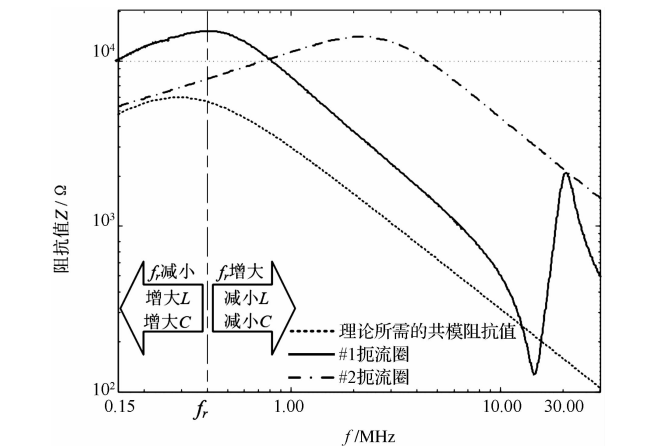


图 7 共模扼流圈共模阻抗测试值及变化趋势

f_r 较小, #1 扼流圈在高频段的阻抗值衰减严重。在 10 MHz ~ 20 MHz 的频率段 #1 扼流圈的阻抗值小于设计值, 不达标。笔者将采用 #1 扼流圈的 EMI 滤波器加入原待测装置, 测试结果如图 8(a) 所示。传导电磁干扰在低频段被衰减到很低的水平, 但在 4 MHz ~ 20 MHz 频段超标, 待测装置未能通过传导电磁干扰测试。

笔者利用本文提出的改进的 Foster 网络串联模型对其进行拟合及参数提取, 结果如表 1 所示。

表 1 共模扼流圈阻抗拟合结果

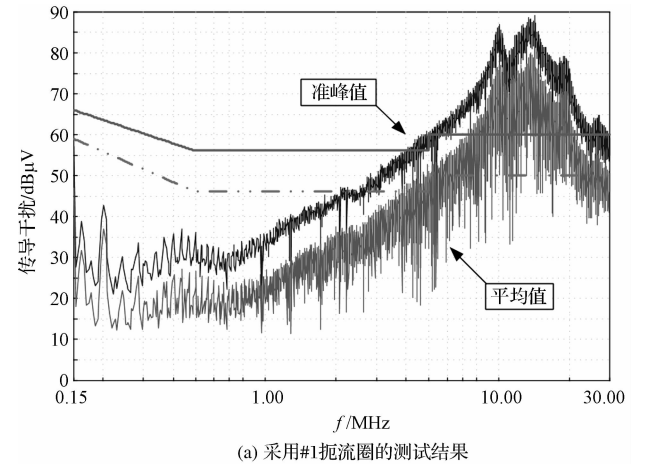
参数	#1 扼流圈	#2 扼流圈
第一级参数	$C_1 = 27 \text{ pF}$,	$C_1 = 11 \text{ pF}$,
	$L_1 = 20 \text{ mH}$,	$L_1 = 6.3 \text{ mH}$,
	$R_1 = 7.2 \text{ k}\Omega$,	$R_1 = 7.1 \text{ k}\Omega$,
	$L_2 = 3.5 \text{ mH}$,	$L_2 = 2.3 \text{ mH}$,
	$R_2 = 5.25 \text{ k}\Omega$,	$R_2 = 5.1 \text{ k}\Omega$,
	$L_3 = 0.11 \text{ mH}$,	$L_3 = 0.01 \text{ mH}$,
第二级参数	$R_3 = 4.1 \text{ k}\Omega$,	$R_3 = 3.4 \text{ k}\Omega$,
	$R_4 = 2.6 \text{ k}\Omega$,	
	$L_4 = 0.35 \text{ mH}$,	/
	$C_2 = 34.4 \text{ pF}$,	

本研究增大仿真模型中的 L 或 C 值, 保持模型中的其他参数不变, 此时谐振频率 f_r 减小, 阻抗曲线整体左移, 扼流圈的阻抗高频特性进一步恶化; 减小仿真模型中的 L 或 C 值, 保持其他参数不变, 此时谐振频率 f_r 增大, 阻抗曲线整体右移, 扼流圈的阻抗高频特性得到改善。

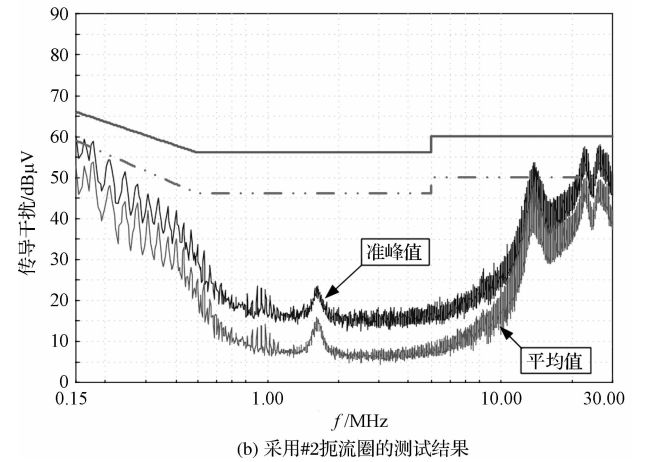
因此, 本研究适当减少共模扼流圈的绕制匝数为

10 匝, 并且将绕制方式从双层绕制改进为单层绕制, 此时 #2 扼流圈的阻抗曲线如图 7 所示。同样的, 对其进行阻抗测量、建模拟合及参数提取。由于 #2 扼流圈在 150 kHz ~ 30 MHz 间只有一个主谐振峰, 在高频段未表现出传输线特性, 故其第二级参数空缺。由拟合结果可知, #2 扼流圈的电感值减小, 且寄生电容也显著减小, 其阻抗高频特性得到改善。#2 扼流圈的阻抗值在 150 kHz ~ 30 MHz 全频段均达到设计要求。

本研究将采用 #2 扼流圈的 EMI 滤波器加入原待测装置, 传导电磁干扰测试结果如图 8(b) 所示。待测装置通过传导干扰测试。



(a) 采用#1扼流圈的测试结果



(b) 采用#2扼流圈的测试结果

图 8 传导干扰测试结果

5 结束语

本文针对共模扼流圈现有高频模型的缺陷, 提出了一种改进的 Foster 网络串联模型, 该模型可以很好 (下转第 899 页)

本文引用格式:

陈 浩, 胡耀威, 王 磊, 等. 基于共模扼流圈高频模型的 Boost PFC 的 EMI 滤波器设计[J]. 机电工程, 2018, 35(8): ◆-◆, ◆. CHEN Hao, HU Yao-wei, WANG Lei, et al. EMI filter for boost PFC converters based on high-frequency model of common-mode chokes[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(8): ◆-◆, ◆. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>