

消除 EFT 滤波器寄生参数的研究

朱宜强¹, 刘晓清², 闫景瑞², 赵 阳²

(1. 芜湖职业技术学院, 安徽 芜湖 241000)

(2. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 随着高速数字印刷电路、无线射频识别系统以及射频器件的迅速发展, 电子设备产生的大量电磁干扰的情况, 严重影响其它设备的正常运行, 甚至出现误操作等问题. 国家食品药品监督管理局也正式公布医用设备电磁兼容标准 YY 0505-2012, 并于 2014 年 1 月 1 日正式实施, 医疗产品的 EFT(电快速脉冲群)抗干扰能力成为关键之一. 本文研究了 EFT 干扰信号的能量分布以及单个元件的寄生参数消除方法, 并提出了提高 EFT 滤波器在较高频段的滤波特性的方法, 最后以实验论证.

[关键词] 电快速脉冲群, 滤波, 寄生参数

[中图分类号] TM503 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)02-0030-05

Research on Cancellation of Parasitic Parameters for EFT Filters

Zhu Yiqiang¹, Liu Xiaoqing², Yan Jingrui², Zhao Yang²

(1. Wuhu Institute of Technology, Wuhu 241000, China)

(2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: With the rapid development of high-speed digital printed circuit, radio frequency identification systems, and RF devices, a lot of electromagnetic interference generated by electronic equipment cases have serious effect on the normal operation of other equipment, or even misuse and other problems. Office of the State Food and Drug Administration officially determines electromagnetic compatibility standards for medical equipment YY 0505-2012 which was formally implemented on January 1, 2014, so medical products' anti-jamming capability for EFT (Electrical Fast Transient) has become one of the key problem. This paper studies the energy distribution of EFT interference signal and the method of Cancellation of Parasitic Parameters for single element, a method is proposed to improve the filter characteristic of EFT filter at higher frequency and finally an experiment is made to prove the method.

Key words: electric fast burst, filter, parasitic parameters

当前, 高速发展的电子与信息技术正推动着医疗产品集成化的进程. 近年来, 我国面临着旧式医疗产品的更新换代, 同时新型功能的医疗产品的不断面市. 而在这些医疗产品不断改善我们生活品质, 提高我们生活水平的同时电子化医疗产品也引起越来越多的 EMC(电磁兼容)问题. 为了避免医疗产品因电磁兼容问题对患者带来的伤害, 国家食品药品监督管理局专门制定了医用电磁兼容标准 YY0505-2012(等同于 IEC 制定的 IEC61000-4-4 标准)并于 2014 年 1 月 1 日正式实施. EFT 滤波器是抑制电快速脉冲群的有效手段^[1-2], 因 EFT 滤波器寄生参数的影响, 普通的 EFT 滤波器对高频段的电快速脉冲群干扰的抑制效果不佳. 为改善滤波器性能, EFT 滤波器寄生参数的提取和消除是十分必要的. 但现阶段对于 EFT 滤波器高频段的研究还比较空缺.

1 电快速瞬变脉冲群(EFT)机理分析

单个脉冲的持续时间远小于整个脉冲群的持续周期, 故一般忽略脉冲间的相互影响. 同时, 脉冲之间基本一致, 具有极高的相似性, 本文以单个脉冲代替脉冲群为例进行研究^[3].

收稿日期: 2016-02-29.

基金项目: 江苏省教育厅高校科研成果产业化推进项目(JHB2011-20).

通讯联系人: 赵阳, 教授, 博士生导师, 研究方向: 电磁兼容. E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

图1为标准规定的单个电快速脉冲群的波形,将单个电快速脉冲群的脉冲定义为双指数的脉冲信号,式(1)为单个脉冲双指数的表达式

$$V(t) = k_p V (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}). \quad (1)$$

式中, V 为脉冲的电压幅值(V); k_p 为标准 EFT 脉冲的补偿系数; τ_1 为波前系数(ns); τ_2 为波长系数(ns). 对双指数脉冲, 计算其中心频率:

$$f = \frac{1}{\pi t_r} = 64 \text{ MHz}. \quad (2)$$

式中, t_r 为脉冲上升时间. 表明单个脉冲频率范围高达上百 MHz. 对式(1)进行拉普拉斯变换得

$$V(s) = k_p V \left(\frac{1}{s + 1/\tau_1} - \frac{1}{s + 1/\tau_2} \right). \quad (3)$$

令

$$s = j\omega,$$

得

$$V(j\omega) = k_p V \left(\frac{1}{j\omega + 1/\tau_1} - \frac{1}{j\omega + 1/\tau_2} \right). \quad (4)$$

根据帕斯瓦尔方程, 可求 $\omega_1 \sim \omega_2$ 频段单位电阻吸收的脉冲能量为:

$$W = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} |V(j\omega)|^2 d\omega = \frac{V^2}{2\pi} \tau_1 \tau_2 \left(\arctan \tau_1 \omega_2 - \arctan \tau_1 \omega_1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \arctan \tau_2 \omega_2 + \frac{\tau_2}{\tau_1} \arctan \tau_2 \omega_1 \right). \quad (5)$$

当 $\omega_1=0, \omega_2=\infty$, 可求单位电阻吸收脉冲总能量为

$$W_0 = \frac{V^2(\tau_1 - \tau_2)^2}{4(\tau_1 + \tau_2)}. \quad (6)$$

代入不同的电压等级可算出对应于不同频段的脉冲能量分布情况, 如表1所示.

由表1可知, 能量最集中分布的频率范围是 1 MHz~10 MHz, 10 MHz~100 MHz 频段次之. 而大于 100 MHz 以及小于 1 MHz 的频率范围内能量分布较少. 在 1 MHz~100 MHz 的频率单位内, 电容和电感的寄生效应较显著, 故有必要消除 EFT 滤波器的寄生参数^[4].

2 等效负参数抵消自有寄生参数

2.1 负电感抵消 ESL 的原理^[5-6]:

当电容器的工作频率较高时, 其等效模型由自身电容、等效串联电阻 (Equivalent Series Resistance, ESR) 和等效串联电感 (Equivalent Series Inductance, ESL) 组成. 本文将用来消除寄生电感 ESL 的消除器件称为“消除器”. “消除器”的基本结构为 T 型结构, 可通过调整三个阻抗值完成消除寄生参数的目标, 图2为“消除器”的电气连接图.

图3中, 若 $Z_c = j\omega(-ESL)$, 则在电容器支路上串联一个电感值为 $-ESL$ 即可与寄生电感相互抵消. 而图2中, 通过将两个耦合电感的顺向串联的方法 (见图3(a)) 或利用满足 $L_s < L_m$ 条件的同侧并联 (见图3(b)), 都可以在电路中等效出一个“负电感”, 这两种方法都可以应用于电容器寄生电感的消除.

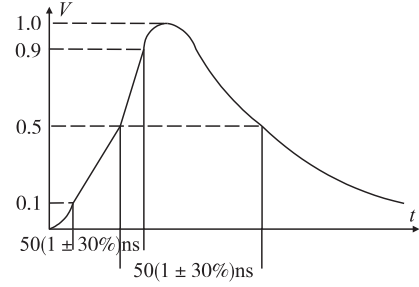


图1 标准规定的单个EFT脉冲波形

Fig.1 EFT single pulse waveform specified by the standard

表1 不同等级脉冲在不同频段的能量分布

Table 1 Energy distribution of different levels of pulse in different frequency

频段	能量/MJ			
	V=4 kV	V=2 kV	V=1 kV	V=0.5 kV
10 kHz~100 kHz	0.697	0.174	0.043 6	0.010 8
0.1 MHz~1 MHz	6.9	1.72	0.431	0.108
1 MHz~10 MHz	41.4	10.35	2.59	0.647
10 MHz~100 MHz	19.8	4.95	1.238	0.309
0.1 GHz~1 GHz	0.25	0.062 5	0.015 6	0.003 9

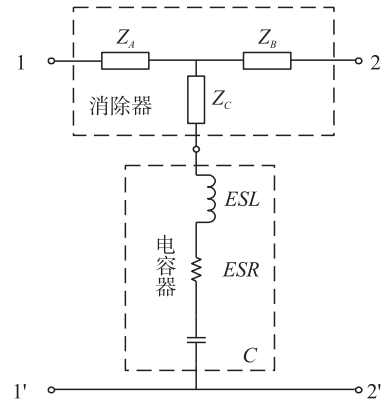


图2 电容器寄生电感的消除

Fig.2 Elimination of the parasitic inductance of the capacitor

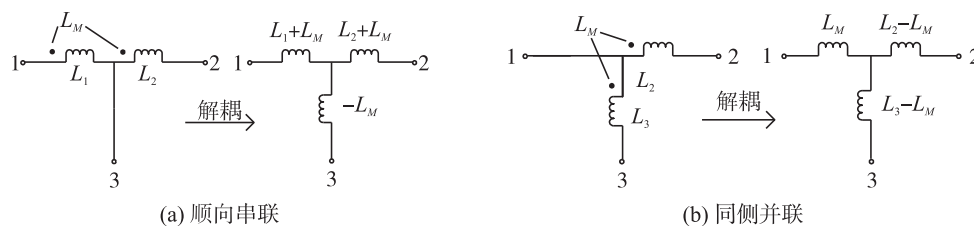


图3 产生负电感的消除器

Fig.3 Negative inductor eliminator

顺向串联时控制耦合电感的 L_M , 同侧并联耦合时控制合电感的 L_3-L_M 小于零, 使其都与 ESL 寄生电感的大小相等、方向相反, 可用于消除电容的寄生电感. 当同侧并联时, 耦合电感需同时控制 L_3 和 L_M 的大小, 操作较复杂, 本文仅选定顺向串联产生的耦合电感用作电容自有寄生电感的“消除器”.

2.2 负电容抵消EPC的原理^[7-8]:

电感自身的寄生电容对其滤波器高频特性影响也很严重, 因此可以通过消除 EPC 来提高滤波器的高频特性. 电感器的高频等效模型为理想电感 L 、寄生电容 EPC 与寄生电阻的并联 (见图 4(a)).

若在电感器支路上等效一个容值为 $-EPC$ 的负电容 C , 即 $\Delta C = C + EPC = 0$, 则可用来提高电感器高频特性 (见图 4(b)). 故可从电感器中间位置处引出抽头, 接入一个电容 C_α (见图 5(a)), 抽头绕组之间的耦合系数为 1, 将其解耦后如图 5(b) 所示^[9], 根据 $Y-\Delta$ 电路对其等效变换, 得图 5(c), 其中

$$Z_1 = \frac{1}{1/(j\omega L) + j\omega(-C_\alpha/4)}, \quad (7)$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_\alpha/2}. \quad (8)$$

根据上式可将 Z_1 当作一个电感为 L 与电容为 $-C_\alpha/4$ 之间的并联, 将 Z_2 作为一个电容 (如图 5(d)). 若取 $C_\alpha = 4EPC$, 则可消除 EPC 对电感器特性的影响.

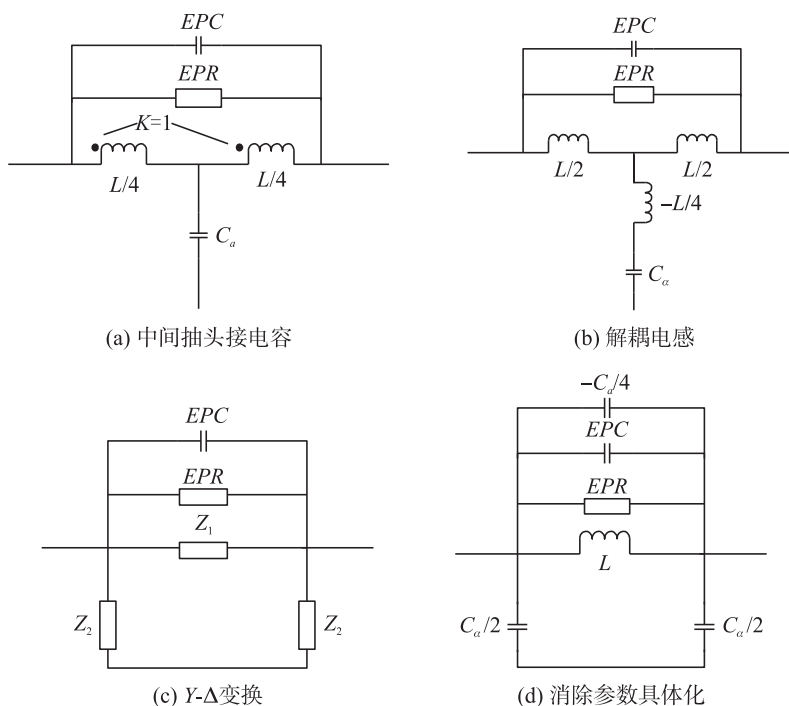


图5 电感器EPC的消除

Fig.5 Elimination of the EPC of the inductance

3 实验论证

滤波器的有以下几个比较重要的技术参数:额定电流、额定电压、工作温升、漏电流、绝缘电阻、测试电压、使用温度范围、直流电阻、插入损耗等.在上述参数中对滤波器来说最重要的参数是插入损耗^[10],其为评价 EFT 滤波器性能好坏的最重要的标准. EFT 滤波器的插入损耗(Insertion Loss, IL)是关于频率的函数(dB),它是指电路当中滤波器接入与否输入端传递到负载的功率的比值.

$$IL = -10 \lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = -10 \lg\left(\frac{U_1^2/Z}{U_2^2/Z}\right) = -20 \lg\left(\frac{U_1}{U_2}\right). \quad (9)$$

EFT 滤波器需要尽可能地抑制高频干扰噪声,应该要求插入滤波器之后的电压 U_2 尽可能小.因此,由式(9)可知,插入损耗 IL 绝对值愈大,抑制骚扰的能力愈好,即滤波效果愈好.为了验证寄生参数的消除效果,本文利用如图 6 所示的典型 EFT 滤波器为例来验证^[11],其中 N_1, N_2 的电感值为 20 mH, $C_1=C_2=20$ nF, $C_3=C_4=5$ nF.

图 7 为滤波器的差模模型消除寄生参数后的插入损耗对比图,图 8 为滤波器的共模模型消除寄生参数后的插入损耗对比图.可见消除寄生参数后,在 1 MHz~100 MHz 之间插入损耗的 IL 的绝对值增加了 10 dB~20 dB,表明其高频的滤波特性得以提高.

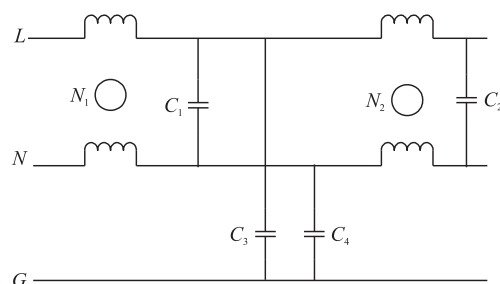


图6 典型EFT滤波器

Fig.6 Typical EFT filter

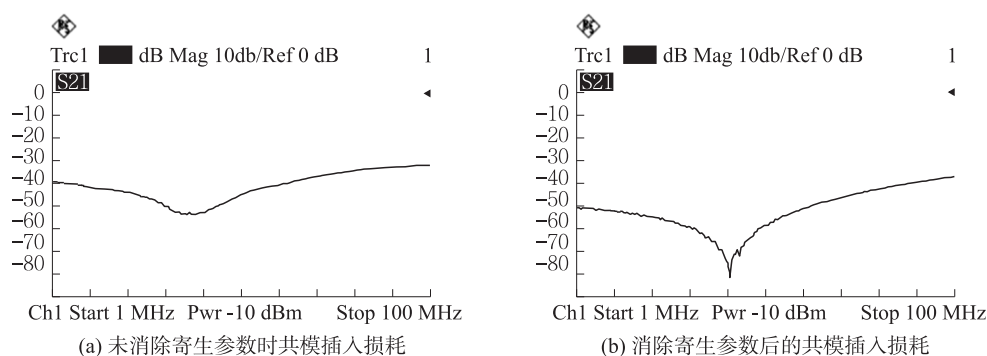


图7 滤波器的差模模型消除寄生参数后的插入损耗对比图

Fig.7 Comparison chart of insertion loss of common mode after the parasitic be eliminated

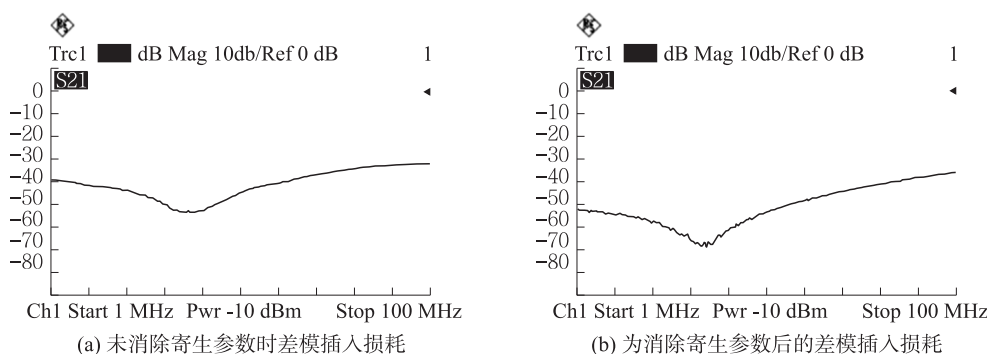


图8 滤波器的共模模型消除寄生参数后的插入损耗对比图

Fig.8 Comparison chart of insertion loss of differential mode after the parasitic be eliminated

4 结语

EFT 滤波器可将电力电子装置收到的 EMC 干扰降到电磁兼容标准范围内,但因 EFT 滤波器的电感和电容的寄生参数较大,对其高频性能有较大影响.因此,本文对 EFT 滤波器的寄生参数进行了研究,分析了 EFT 滤波器中寄生参数对插入损耗的影响,并在此基础上对 EFT 滤波器中的寄生参数进行消除,最

后通过消除寄生参数 EFT 滤波器的插入损耗来进行实验验证。

[参考文献](References)

- [1] CLAYTON R F. Introduction to electromagnetic compatibility[M]. 2nd ed. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2006: 326–343.
- [2] 朱文立. 快速瞬变脉冲群测试的失败原因及对策[J]. 安全与电磁兼容, 2007(2): 5–10.
ZHU W L. Cause analysis of EFT/B test failure and countermeasures[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2007(2): 5–10. (in Chinese)
- [3] 付润江, 金波, 杜勇. 电快速脉冲群干扰的频谱分析及消除方法[J]. 长江大学学报(自科版), 2005, 7(2): 245–247.
FU R J, JIN B, DU Y. Electrical fast burst interference and elimination of spectrum analysis[J]. Journal of Yangtze university (natural science edition), 2005, 7(2): 245–247. (in Chinese)
- [4] WANG S, CHEN R, LEE F C, et al. Improved passive filter configurations for high-frequency conducted EMI in power electronics[J]. European conference on power electronics & applications, 2005, 24(9): 16–32.
- [5] MCDOWELL A J, HUBING T H. Parasitic inductance cancellation for surface mount shunt capacitor filters[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2014, 56(1): 74–82.
- [6] WANG S, LEE F C, ODENDAAL W G. Cancellation of capacitor parasitic parameters for noise reduction application[J]. IEEE power electronics society, 2006, 21(4): 1 125–1 132.
- [7] SHUO W, LEE F C. Common-mode noise reduction for power factor correction circuit with parasitic capacitance cancellation[J]. IEEE transactions electromagnetic compat, 2007, 49: 537–542.
- [8] JAKUSHOKAS R, POPOVICH M, MEZHIBA A V, et al. Decoupling capacitors for multi-voltage power distribution systems[J]. IEEE transactions on very large scale integration systems, 2006, 14(3): 217–228.
- [9] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 238.
QIU G Y. Circuit[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 238. (in Chinese)
- [10] 滑瑞霞, 张磊, 龙慧. EMI 电源滤波器的插入损耗分析[J]. 电子科技, 2011, 24(1): 65–68.
HUA R X, ZHANG L, LONG H. Analysis of insertion loss of EMI power filter[J]. Electronic science, 2011, 24(1): 65–68. (in Chinese)
- [11] 邵羽达, 张宇环, 邓凌翔, 等. 电子设备电磁兼容中的 EFT 优化电感设计[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2011, 11(3): 10–12.
SHAO Y D, ZHANG Y H, DENG L X, et al. EFT inductor design optimization of electronic devices with electromagnetic compatibility[J]. Journal of Nanjing normal university (engineering and technology edition), 2011, 11(3): 10–12. (in Chinese)

[责任编辑: 陈 庆]