

EMI 滤波器控制核电磁脉冲的实验研究

上海埃德电磁技术有限公司 柳光福 葛光楣 刘启明
南京工程学院 石立华 周碧华
武汉第二船舶设计院 欧阳肃立

[摘要] 通过对多种 EMI 滤波器加载 EMP 信号的实验, 检验了瞬变抑制或压敏电阻等辅助元件对 EMP 的控制能力。初步研究结果表明, 某种精心设计的 EMI 滤波器, 不用瞬变抑制或压敏电阻之类的辅助元件, 对 EMP 仍有很好的抑制能力; 对穿心滤波器控制核电磁脉冲滤波器(EMP)的试验分析表明, 它是一种既能控制 EMP, 又能衰减 EMI 的优秀滤波器。

[关键词] 电磁干扰(EMI); 电磁脉冲(EMP); 滤波器

[中图分类号] TN713 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-141X(2000)02-0001-05

1 前言

大量实测和理论研究证明, 发生核爆炸, 特别是发生高空核爆炸时, 要伴随出现短时间(在 ns 数量级)强烈的电磁辐射, 我们把这种特殊的电磁现象称为电磁脉冲(EMP)。经测算, 一次十万吨当量的高空核爆炸, 所产生的全部能量约为 4.2×10^{15} 焦耳。其中, 以电磁能量辐射出去的约为 10^{11} 焦耳, 是全部能量的百分之二十三, 这是非常巨大的能量, 它能使受 EMP 影响的边远地区的电子设备承受到 1 焦耳以上 EMP 能量的冲击。

远小于 1 焦耳的 EMP 能量就足以使很多电子元件完全丧失工作能力。例如, 只需 2×10^{-5} 焦耳的 EMP 能量冲击, 便能使集成电路 MC71S 失效; 只需 2×10^{-7} 焦耳就能使微波二极管 1N238 烧毁。

骚扰电子电路并使之不能稳定工作的 EMP 能量更低, 例如, 只需 4×10^{-10}

焦耳的 EMP 能量, 便能使 SF-50 的 J-K 触发器乱跳; 只需 2×10^{-9} 焦耳的 EMP 能量, 便能使计算机内的 FC2001 存储器的取存出错。因此, 研究 EMP 对电子元件和设备的损坏和它们的防护, 意义十分重大。

为防止 EMP 对电子设备和系统的毁坏, 在它们的电源线和信号线上要设置滤波器, 这种滤波器便称作 EMP 滤波器。

按传统的办法, 在 EMI 滤波器上添加瞬变抑制(TVS)或压敏电阻(MOV)元件, 就可作成 EMP 滤波器, 这种 EMP 滤波器既能防护 EMP 对电子设备和系统的损坏, 也能防护一定条件下雷电(如感应雷电信号)引起的破坏。但是, 这样制作的 EMP 滤波器所能承受的 EMP 的能量是很有限的。对用 TVS 作成的 EMP 滤波器而言, 由于 TVS 所能承受的冲击能量有限, 遇到能量大的 EMP, 会引起箝位电流急剧增大, 功耗剧增, 一旦超过它的功耗极值, TVS

就会损坏，引起 EMP 滤波器的失效，再也不能防护 EMP 对设备和系统的破坏。对 MOV 元件而言，它能承受的冲击能量会比 TVS 大一些，可是，每经受一次 EMP 或雷电的冲击，它的性能会发生下降。经受 10 次左右的冲击便有可能失效，丧失对 EMP 和雷电的防护能力。

为了提高设备和系统的可靠性，根据某项工程要求，我们设计了一种 EMI 滤波器，这种滤波器不允许用 TVS 和 MOV 辅助元件，却要能把一定条件下

的 EMP 衰减到安全的电平。为了达到这个目的，我们进行了一系列试验研究。

2 实验布置

为了弄清楚 EMI 滤波器衰减 EMP 的能力，我们进行了认真的分析和试验。实验的布置如图 1 所示。

首先，把 EMI 滤波器安置在标准规定的 EMI 滤波器插入损耗测试屏蔽盒内，用

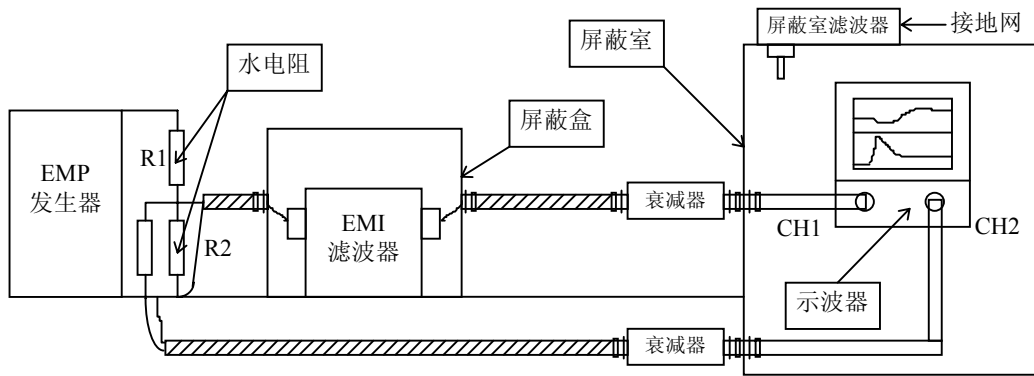


图 1 试验装置

屏蔽电缆把被测滤波器的输入和输出分别与 EMP 发生器和数字示波器相连接。这样安排是为了避免 EMP 发生器产生的电磁辐射在输入和输出电缆上生成感应电压，影响到测试结果。

其次，用作实验的源是输出幅度可达 25 万伏的双子数波形 EMP 发生器。输出 EMP 幅值的高低可以通过输入电压来控制。为了得到适合的 EMP 幅值作为 EMI 滤波器的输入电压，还在 EMP 发生器的输出端，采用并接水电阻分压的方法来进一步调控滤波器的输入电压。

第三，为了保证被试 EMI 滤波器

输入和输出端电压幅值的准确记录，把数字示波器放置在电磁屏蔽室内，免除 EMP 发生器产生的辐射对测量结果造成的影响。来自滤波器输入端和输出端的采样信号还要通过合适的衰减器，经过穿墙器后接到数字示波器的输入端口，保证记录到的波形在示波器的量程范围内。还可以用计算机对输入和输出端电压幅值进行处理，然后，把输入和输出端波形直观形象地展示在一幅图形中。

3 普通 EMI 滤波器的实验

把一只单相 250V/50Hz, 50A 普通 EMI 滤波器安装到图 1 所示的 EMI 滤

波器位置上。这只滤波器的网络结构和插入损耗示于图 2。这种滤波器由共模(CM)电感、共模抑制电容(Cy)和差模抑制电容(Cx)组成。实验时,把 EMP 加在输入端的相线(L)或中线(N)端子与地(即外壳)之间。为了保证实验准确无误,与 EMP 源连接的电缆和 EMI 滤波器屏蔽壳上的连接器都应采用能承受高电压的产品。在实验前,曾用 1 万伏直流电压进行检查,无击穿和电晕现象发生。

图 3 是数字示波器记录到普通 EMI 滤波器输入和输出端的波形。其输入端的 EMP 幅值为 1670V, 输出端波形的幅值为 632V, 输入波形和输出波形的出现时刻有明显的延迟。从上面数据看,这种 EMI 滤波器对 EMP 的抑制能力不理想。因为当 L 与地或 N 与地之间加上 EMP 后,有很大的电流流过共模电感的一组线圈,共模电感的平衡条件破坏,电感量急剧下降,使图 2 中

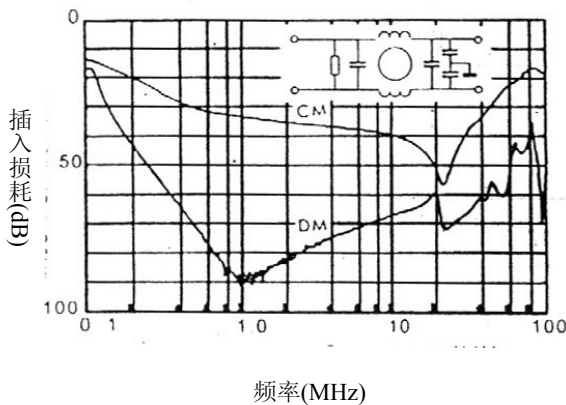


图 2 通用 EMI 滤波器的网络结构和插入损耗

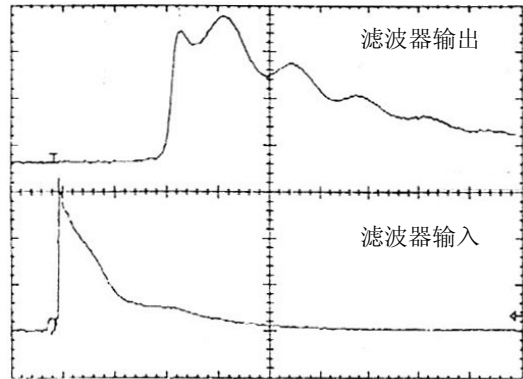


图3 测得图 2 所示滤波器的输入输出波形

EMI 滤波器的共模(CM)插入损耗大大降低,对 EMP 的控制能力变得很差。另外,其输入和输出端子之间存在有电磁耦合,其频率越高,这个耦合会越强。由于几千伏的 EMP 信号的上升前沿仅为 10ns 左右,就会有能量从滤波器的输入端直接耦合到它的输出端。这也是它控制 EMP 的能力变得十分差的原因之一。显然,它不能同时实现控制 EMI 和 EMP 的任务。

4 高性能 EMI 滤波器试验

在分析用普通 EMI 滤波器加载 EMP 所作试验的结果后,我们改进设计,研制了一种单相 250V/50Hz、60A 的 EMI 滤波器。其网络结构和插入损耗如图 4 所示。这是一种含有差模电感和共模电感的多级 EMI 滤波器,其 Cy 电容器采用穿心电容器。按上述 EMI 滤波器的安装和加载 EMP 的方法进行实验,并把输入端和输出端的波形送到计算机进行处理,使能在同一幅图里把它们的波形进行比较,得到的结果如图

5 所示。当输入 EMP 幅值为 3500V 时，滤波器输出的幅值为 320V。显而易见，它控制 EMP 的能力优于普通 EMI 滤波器。这是因为特殊研制的差模电感过负载能力强，使滤波器低端的插入损耗明显改善。在无需加入 TVS 和 MOV 元件的条件下，就能实现对 EMP 信号的良好控制。这正是用户所要求的 EMP 滤波器。

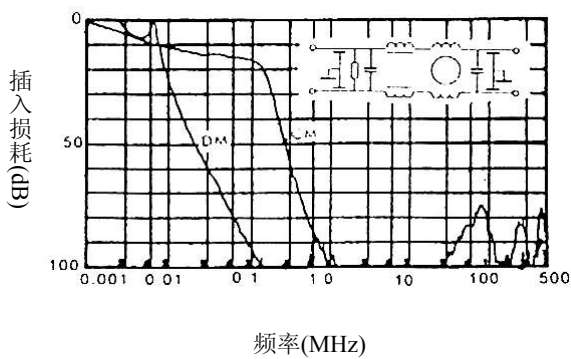


图 4 高性能 EMI 滤波器的网络结构和插入损耗

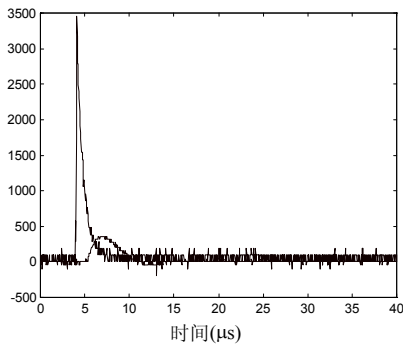


图 5 测得图 4 所示滤波器的输入输出波形

5 穿心滤波器的试验与分析

是否还有能更好控制 EMP 信号的滤波器？虽然图 4 所示网络和插入损耗的 EMI 滤波器已能把 EMP 信号控制到用户要求的水平，但是，它仍存在有

缺陷。这就是在进行图 1 所示的实验时，其输入和输出端子之间存在有电磁耦合，降低了对 EMP 的衰减，可以在使用安装时设法改善。例如，利用设备或系统已有的屏蔽，把滤波器的输入和输出端子隔离开，使它们之间的电磁耦合被控制到最小，这就是一种易行有效的方法。

由此使我们想到，有各式各样的穿心滤波器广泛用于通讯、导航、雷达、航空航天、舰船、坦克、方舱等电子设备和系统中。它们在实际应用中的明显特点是，穿心滤波器的外壳有机地与设备或系统的屏蔽融为一体，使滤波器的输入和输出端子之间的电磁隔离良好。那么，它们控制 EMP 的能力如何？为了弄清这个问题，我们选了两组本公司生产的、其结构相同而参数不同的穿心滤波器进行控制 EMP 的试验。它们的等效电路和参数示于图 6。图 7 是其测试时的安装示意图。这种安装方法如实地反映了实际应用情况。

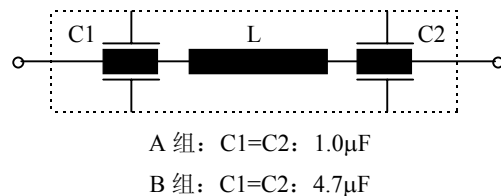


图 6 穿心滤波器的参数和等效电路

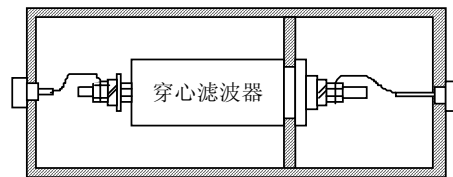


图 7 穿心滤波器的安装示意图

试验 A 组参数穿心滤波器时记录到的输入和输出波形示于图 8。当输入

EMP 的幅值为 6912V 时，其输出幅值为 300V，输出波形明显延迟，且持续时间比输入波形展宽了很多。若仅考察幅度的变化，已达到了 23 倍以上的衰减，可见它对 EMP 的抑制能力很好。

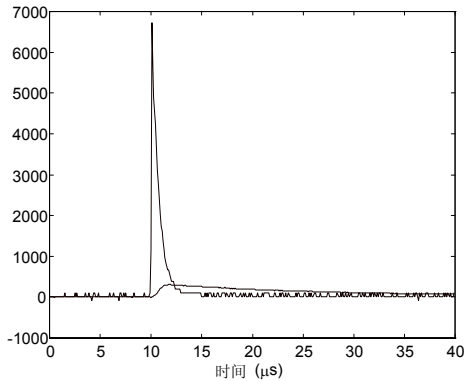


图 8 A 组参数滤波器的输入输出波形

试验 B 组参数穿心滤波器时记录下的波形见图 9。它输入的 EMP 幅值为 7440V 时，测得的输出幅度为 100V，比输入幅度降低了 74.7 倍。其控制 EMP 的能力比 A 组参数的滤波器更为优越。

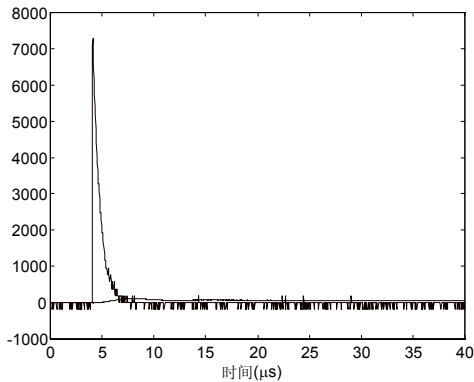


图 9 B 组参数滤波器的输入输出波形

6 结果分析

除中心导体的直径稍有不同外，这两组穿心滤波器的几何尺寸是相同

的。也就是说，它们的分布参数，即分布电感和分布电容是大致相同的。它们间的主要差别是，两端集中参数电容器的容量不同，A 组参数时为 $2 \times 1 \mu\text{F}$ ；B 组参数时为 $2 \times 4.7 \mu\text{F}$ 。比较二者的插入损耗特性，B 组参数滤波器低频端的插入损耗比 A 组参数的好很多。上面的实验结果十分明显地说明，其穿心滤波器的电容量越大，其控制 EMP 的能力就越强。这是因为当 EMP 这样快速瞬变的信号加在滤波器输入端的电容器上后，电容器上的电压是不会立刻跟着变化的，其电压的变化要遵循下面的规律，即

$$\Delta V = \Delta Q / C$$

式中，

ΔV 为电容器电压的变化率；

ΔQ 为电容器上电荷的变化率；

C 为电容量。

从上式不难看出，对一定幅度的 EMP 而言， ΔQ 是一个常数。因此，电容量越大，电压的变化，即 ΔV 就会越小。这就是为什么 B 组参数滤波器对 EMP 的控制能力比 A 组参数好的原因。

上述试验中，加于 A 组参数 B 组参数上的 EMP 电压幅度都大大超过它们的试验电压，这是违反有关标准的规定的。按传统概念，滤波器的试验电压已经十分接近它的击穿电压。任何超过滤波器击穿电压的试验都是严格禁止的，因为它会招致滤波器的击穿损坏，以至在很多标准中反复提醒注意，多作试验电压的测试有损器件的寿命。我们在研究了这种滤波器的结构和参数，分析 EMP 信号的特性后，多次加载超出滤波器击穿电压很多的 EMP 信号，全面测试证明，滤波器的参数没有观察到

任何变化。

7 结论

通过上述的试验和分析, 我们看到, 在不使用 MOV 和 TVS 元件的条件下, 设计得好的 EMI 滤波器同样既能控制 EMI, 又能把 EMP 的幅度控制到很低的电平, 满足有关设备和系统的要求。

在对穿心滤波器进行 EMP 试验和

分析中证实, 可以加载比其击穿电压很多的 EMP 幅值而不会损坏任何参数。这是我们在实践中的发现, 从而改写了不能加载超过试验电压幅度的 EMP 信号的传统概念。在应用条件允许用大容量的穿心滤波器时, 可以把 EMP 控制到相当低的电平。在实用中, 要注意滤波器的安装、电缆的敷设和接地, 否则, 可能难以得到好的抑制效果。

参考文献

- [1] 陈穷主编. 电磁兼容性工程设计手册. 北京: 国防工业出版社, 1993 年 10 月
- [2] (USA) Roger R. Block. The "Grounds" for Lightning and EMP Protection. Published by PolyPhaser Corporation, Second Edition, Revised 1993
- [3] Torbjorn Karlsson: EMP Simulation by Pulse Injection, EMC, 1985