

## 电源 EMI 滤波器的选用与安装

航空航天工业部第 615 所 柳光福

### 1 前言

在电子设备供电导线上存在各式各样的电磁干扰信号，也称为噪音信号，有的人就叫它 EMI（即 Electromagnetic Interference）信号。如广播、通讯、导航、雷达等发射的大功率信号要在电源线和电子设备的连接电缆上生成感应信号，启动电机会在其供电系统产生瞬态过程，使用医疗设备会产生多种多样的传导干扰和辐射干扰……这些都是人为制造的 EMI 信号。在自然界，有来自银河系的天电干扰噪音，有雷电现象。前者的频率范围很宽，后者的持续时间短却能量巨大……这是大自然的 EMI 信号。这些 EMI 信号，通过传导和辐射的方式，影响着在该环境里运行的电子设备和系统。

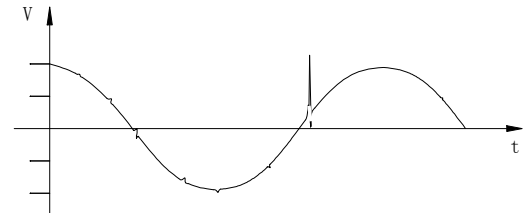


图 1 220V/50Hz 上的 EMI 信号

图 1 是用示波器在 220V/50Hz 供电线上记录到的随机 EMI 信号。从图 1 中清楚地看到，在 50Hz 正弦波上叠加有持续时间小于  $5\mu\text{s}$ 、幅度远大于 50V 的尖峰信号。这些干扰信号会通过设备的电源进入电路，影响到设备的可靠运行。我们把这些干扰信号称之为来自电子设备外部的 EMI 信号。

另一方面，几乎所有的电子设备，在完成其功能的同时，也要产生了形形色色的 EMI 信号。如含有数字电路的设备，它们都是用脉冲信号代表的逻辑关系来运行的。由傅里叶级数展开可知，仅时钟脉冲串的谐波频谱就占了很宽的频域。在很多设备里，除了时钟脉冲串以外，还有多种重复频率的脉冲串，这些脉冲串的多次谐波和非线性效应，使设备产生的 EMI 信号相当复杂。

事实上，每台电子设备中必不可少的稳压电源，就是一种潜在的 EMI 源。在由变压器，整流管，调整管组成的线性稳压电源内，因整流形成单向脉冲电会产生 EMI 信号。开关电源与线性稳压电源相比，它省去了笨重的电源变压器，具有体积小、效率高的明显优点，在军民用电子上得到相当广泛的应用。但它本身就是很强的 EMI 源，它产生的 EMI 信号既占有很宽的频率范围，幅度又大。这些 EMI 信号同样通过传导和辐射的方式去污染电磁环境，影响其他电子设备的工作。当 EMI 信号影响到模拟电路时，会使传输信号的信噪比变坏，以至要传输的信号被噪音淹没。当 EMI 信号的影响危及到逻辑电路的工作时，会导致错误的逻辑运算，得到错误的运算结果。在高电压和大电流条件下运行的设备和系统，其产生的 EMI 信号的影响会变得更加厉害和难以控制。

屏蔽是控制 EMI 信号辐射危害的最好帮手。在对付 EMI 信号的传导干扰和某些辐射干扰方面，EMI 滤波器是极有效的器件。几乎所有的电子设备都要求助于它来控制其运行时产生的 EMI 信号，因而得到非常广泛的应用。

电源 EMI 滤波器实际上是一种低通滤波器，它毫无衰减地把直流、50Hz 或 400Hz 的电功率传输到设备上，却能大大衰减经电源传入的 EMI 信号，保护设备免受其害。同时，又能有效地控制设备本身产生的 EMI 信号，防止它进入电网，污染电磁环境，危害其他设备。电源 EMI 滤波器是帮助电子设备和系统满足有关电磁兼容性标准，如 IEC、FCC、VDE、MIL-STD-461、D0/160、GJB151、GB9254 和 GB6833 等等不可少的器件。

电源 EMI 滤波器，又称为电磁干扰滤波器、电网滤波器、电网噪音滤波器、进线滤波器、噪音抑制滤波器等，或统称为 EMI 滤波器。在谈及电源 EMI 滤波器之前，让我们先来讨论共模（也叫作不对称）干扰信号和差模（也称作对称）干扰信号。

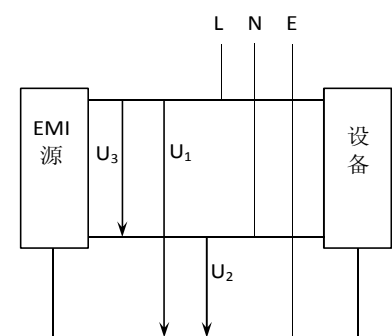


图 2 共模和差模干扰信号

### 2 共模和差模干扰信号

关于上述各式各样的 EMI 信号对电子设备的影响，可用图 2 所示的单相供电模型来说明。其中把相线(L)与地(E)和中线(N)与地(E)间存在的 EMI 信号称之为共模干扰信号，即图 2 的电压  $U_1$  和  $U_2$ 。对 L、N 线而言，共模干扰信号可视为在 L 和 N 线上传输的电位相等相位相同的信号。把 L 与 N 之间存在的干扰信号  $U_3$  称作差模干扰信号，也可把它视为在 L 和 N 线上有 180 度相位差的干扰信号。对供电系统的传导干扰信号，都可用共模和差模干扰信号来表示。并且可把 L-E 和 N-E 上的共模

干扰和 L-N 上的差模干扰看作独立的 EMI 源，把 L-E、N-E 和 L-N 看作独立网络端口，来分析 EMI 信号的特性和设计抑制 EMI 信号的滤波网络。

### 3 电源 EMI 滤波网络结构

图 3 是单相电源 EMI 滤波器的基本电路结构。它是由集中参数元件组成的无源网络，虚线框表示滤波器的金属屏蔽外壳。在图 3 的电路中，只有两只电感 L1 和 L2，三只电容器 CY1, CY2 和 CX。如果把把这个 EMI 滤波器插入到图 2 被干扰设备的供电电源入口处，即把滤波器的（电源）端接到被干扰设备的电源进线，滤波器的（负载）端接被干扰设备。这样 L1 和 CY1、L2 和 CY2，分别构成 L-E 和 N-E 两对独立端口间的低通滤波器，用来抑制供电系统存在的共模 EMI 信号，使之无法进入设备。其中，由于很多原因，L1 和 L2 的电感量是不相等的。于是，L1 和 L2 之差便是差模电感，它和 CX 又组成 L-N 独立端口间的一只低通滤波器，用来抑制电源上存在的差模 EMI 信号。从而实现对供电系统 EMI 信号的抑制，保护供电系统内的设备不受其影响。

由于图 3 的电路是无源网络，它具有互易性。当电源 EMI 滤波器安装在设备的电源入口处后，它既能有效地抑制图 2 所示供电系统存在的 EMI 信号（即电子设备外部的 EMI 信号）传入设备，又能大大衰减设备本身工作时产生的 EMI 信号传向供电系统，防止电磁环境被污染。图 3 所示的这个简单的网络，却同时具有控制电磁干扰的多种功能，对实现设备和系统的电磁兼容性起了重要的作用，因此应用非常普遍。

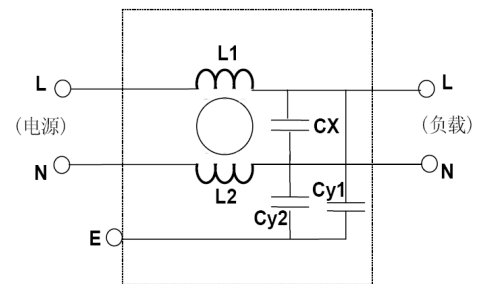


图 3 电源 EMI 滤波器的基本电路

### 4 电源 EMI 滤波器的主要技术参数

1) 额定电压。额定电压是电源 EMI 滤波器用在指定电源频率时的工作电压。如用在 50Hz 单相电源的滤波器，额定电压为 250V；用在 50Hz 三相电源的滤波器，额定电压为 440V。

250V/50Hz 单相电源 EMI 滤波器，只要额定电流容许，完全能用在 120V/60Hz 的供电系统。在一定的条件下，也可用于 115V/400Hz 单相供电系统。但要注意，因为 400Hz 频率是 50Hz 的 8 倍，电抗电流和漏电流都会成倍增加，要选择合适的 CX 和 CY 电容器。用于 440V/50Hz 三相供电系统的 EMI 滤波器，同样能用于 210V/60Hz 三相的供电系统。如同上面所说，在一定的条件下，还可用于 200V/400Hz 三相供电系统。

2) 额定电流。额定电流是在额定电压和指定环境温度条件下所允许的最大连续工作电流。有的指定环境温度为 40℃，有的为 45℃。额定电流涉及到滤波器的发热和功耗，要控制发热和功耗，就要选择合适的导线和磁性材料。关于滤波器的温升，UL 标准和欧洲标准都有明确的规定。

3) 漏电流。漏电流是指图 3 所示电源 EMI 滤波器电路，加载指定频率的额定电压，断开滤波器的 E 端与供电系统安全地的连接后，E 端到电源 L 或 N 端的电流。

如果滤波网络与滤波器外壳（即 E 端）间的绝缘措施都正确无误，则漏电流的大小取决于 CY 的电容量。由于漏电流的大小涉及人身安全，各国的安全标准都有严格规定。很多国家规定用于 250V/50Hz 系统的 EMI 滤波器，它的最大漏电流为 3.5mA。

4) 试验电压。对图 3 所示电源 EMI 滤波器电路的试验电压分有两种。一种是加在（电源）或（负载）的端子间，称为线-线试验电压。在图 3 所示的两组线圈 L1 和 L2 间绝缘措施都正确无误的情况下，线-线间的试验电压主要取决于电容器 CX 的耐压及安全性能。另一种试验电压是加在（电源）或（负载）任一端子（L 或 N）与 E 端之间，称为线-地试验电压。在绝缘措施都正确无误的情况下，它主要是检查电容器 CY 的耐压。试验电压又分为 AC 和 DC 两种，具体的频率，幅值和持续时间，相应的技术文件有明确规定。

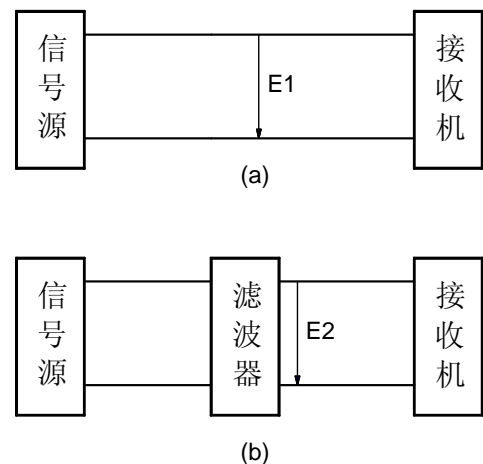


图 4 插入损耗定义

5 插入损耗

插入损耗是滤波器的重要技术参数之一。对电源 EMI 滤波器也是如此。设计人员考虑的中心问题就是，在保证滤波器安全、环境、机械和可靠性能满足有关标准要求的前提下，实现能把设备产生的电磁干扰能控制到标准允许的范围内的插入损耗。

关于插入损耗的定义，可用图 4 来说明。图 4(a)所示，当未接滤波器时，接收机测得信号源的输出电压为 E1。当把 EMI 滤波器插入到信号源和接收机之间后，如图 4(b)所示，这时在靠近 EMI 滤波器输出端口处测得信号源的电压为 E2。如果信号源的输出阻抗等于接收机的输入阻抗，都是 50Ω，则 EMI 滤波器的插入损耗可从插入损耗=20log(E1/E2)中计算。

由于电源 EMI 滤波器既能抑制共模 EMI 信号，又能抑制差模 EMI 信号，所以电源 EMI 滤波器既有共模（表示为 CM）插入损耗，又具有差模（表示为 DM）插入损耗。如上海埃德电磁技术有限公司的 DNF05-H-6A EMI 滤波器，按有关标准测得的插入损耗示于图 5。

另一方面，电源 EMI 滤波器产品标准或说明书中给出的插入损耗曲线，都是按有关标准规定，在 50Ω 系统内测得的。实际应用中，是把 EMI 滤波器安装到设备的电源入口处。这时 EMI 滤波器输入和输出端的阻抗已不是测得图 5 插入损耗曲线时的 50Ω，所以 EMI 滤波器对干扰信号的衰减，不会等于产品标准或说明书中给出的插入损耗。如果选用 EMI 滤波器的网络结构和参数合理，加上安装得当，则有可能实现优于标准中规定的插入损耗。反之，如果网络搭配和参数的选取不当，安装又有问题，则有可能得不到好的应用效果。

检验 EMI 滤波器插入损耗是否满足要求的最可靠方法，是把 EMI 滤波器安装到位后，进行电磁兼容性测试，能把 EMI 信号控制到相关标准规定的极限值以内的滤波器的插入损耗，才是好的插入损耗。在试验中，可以根据经验，分析设备 EMI 信号的幅值和频谱分布情况，来调整滤波器的网络参数和结构，最终把 EMI 信号电平控制到有关标准要求的极限值以内，按这种办法设计的电源 EMI 滤波器才是好的滤波器。

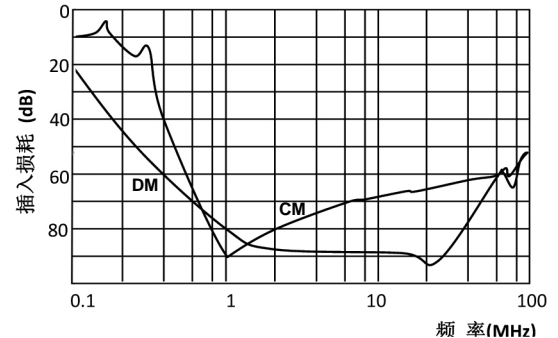
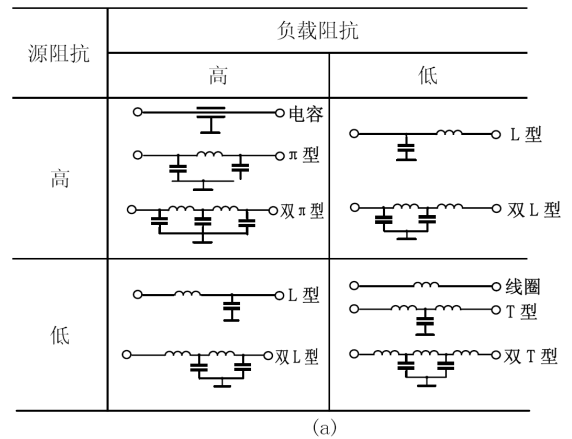
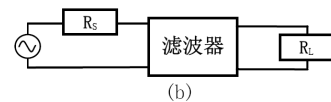


图 5 DNF05-H-6A 的插入损耗曲线



(a)



(b)

图 6 滤波器阻抗连接示意图

6 电源 EMI 滤波器的应用技巧

电源 EMI 滤波器是无源网络，具有互易性，即把负载接在 EMI 滤波器的（电源）端，还是接在（负载）端都是可以的。在实际应用中，要达到有效地抑制 EMI 信号的目的。必须根据滤波器两端将要连接的 EMI 源阻抗和负载阻抗的特性，来合理选取滤波网络结构。无论怎样复杂的电源 EMI 滤波器，都可以把它的共模和差模滤波网络抽象出来，简化为图 6 中所示的低通滤波网络。按图 6 所示的源阻抗和负载阻抗的组合，来选择 EMI 滤波器的网络结构。才能得到满意的抑制 EMI 的效果。

大家知道，当滤波器的输出阻抗 (Zo) 和与它端接的负载阻抗 RL 不相等时，在这个端口上会产生反射。反射系数定义为  $\rho = (Zo - RL) / (Zo + RL)$ ，Zo 与 RL 相差越大，ρ 就越大，端口产生的反射也就越大。对被控制的干扰信号，当 EMI 滤波器两端阻抗都处于失配状态时，EMI 信号会在它的输入和输出端口产生很强的反射。这样一来，滤波器对 EMI 信号的衰减，等于滤波器的固有插入损耗加上反射损耗。在 EMI 滤波器的实际使用中，可用此技巧来实现对 EMI 信号有效的抑制。这就是为什么选用 EMI 滤波器时，一定要仔细分析其端口阻抗的搭配，使产生尽可能大的反射，达到对 EMI 信号的有效控制的原因。

7 EMI 滤波器的应用举例

二十多年来，我们在用 EMI 滤波器来解决电磁干扰方面积累了一些经验，下面是其中三个例子。

例 1。这个故事发生在上世纪九十年代中期。某单位为了向国外军事代表团演示某著名战役的实际指挥和战役的具体进

展情况，拟在 5×20 平方米的示范屏上，用微机控制灯、光和电动机带动模型等手段进行仿真。各分机的调试顺利完成后，却在系统调试时碰到了麻烦。当插入或拔出电烙铁，开或关示波器时，便会发生程序执行错误，甚至出现死机的情况。或当建筑物周围有汽车开过的时候，也会发生上述情况。国外军事代表团来华日期临近，这个使人烦恼的问题却还未能解决。我们得知这一情况后，携带了一些常用的电源 EMI 滤波器赶到现场。通过与设计技术人员共同分析，为有效控制存在的电磁干扰，在供电电路的关键部位正确地安装了数只电源 EMI 滤波器后，则整个演示系统便能在任何条件下、按设置的程序运行，不再发生上述怪现象。原来系统存在的电磁干扰被有效抑制，使系统实现了电磁兼容性，保证该单位如期成功地接待国外军事代表团。

例 2。为了节能，变频调速电梯越来越受到青睐。可是，变频调速系统的运行，要产生严重的 EMI，却未引起有关工程技术人员的高度重视。最近，某电梯安装公司碰到了一件他们从来没有碰到的怪事。一台进口的变频调速电梯安装在某大学六层科研大楼顶上，虽然它既节能，又运行平稳。但是，这台电梯却严重影响了科研工作的进展，科研人员对它却很有意见。首先，变频调速电梯工作时，会使位于一楼的某液体闪烁计数器的运行失常，在变频调速电梯安装前后采集到的试验数据完全两样；其次，安装了这个变频调速电梯后，位于一楼的高效液相计（HPLC）测得的结果与未安装该电梯前的结果不能吻合。研究人员花了两个多月的时间才找到了原因，原来是安装变频调速电梯后产生的电磁干扰引起了上述测试仪器的的工作异常。由于变频调速电梯是在三相 380V/50Hz，最大工作电流 60A 的 PWM 状态下运行，系统内没有设置有效抑制 EMI 的措施，由此产生的电磁干扰十分惊人。经现场勘测，在远离大楼 35 米的地面用收音机就能明显地识别出它产生的干扰噪音。面对如此严重的电磁干扰现象，我们在适当的地方安装了 EMI 滤波器后，就把变频调速电梯工作产生的 EMI 信号控制到容许的范围内，使大楼内的液体闪烁计数器和高效液相计（HPLC）能在变频调速电梯工作时正常地运行，因为在它们之间实现了电磁兼容性。

例 3。某工程从国外进口了发电机组，配的是自行研制的微机控制系统。在预检其电磁兼容性时发现，其微机控制系统的 EMI 信号电平超标 30 多分贝。若这个 EMI 信号电平不能被控制到有关标准容许的极限电平以下，就不能对国外进口的机组进行验收。而我们解决这个 EMI 问题的时间非常紧逼。当晚乘飞机到目的地，要求到第二天早上 10 点钟前，完成对我方微机控制系统超标 EMI 电平的控制。由于我们与有关技术人员早已对系统配置作了细致的调查和估算，硬是在众目睽睽之下，在规定的时间内，圆满完成对我方微机控制系统 EMI 信号的控制，使之远远低于有关标准规定的极限值，为顺利验收外方机组创造了条件。

很遗憾，上面这些用 EMI 滤波器来控制设备和系统电磁干扰的例子都是马后炮。既费时，又多化钱。若设计人员事先就关注 EMI，设置 EMI 滤波器来控制相应的 EMI 信号，就可能实现电磁兼容性设计。随着电子设备和系统越来越复杂，控制电磁干扰会成为我们共同关注的问题。

## 8 电源 EMI 滤波器的安装

设计和制造得好的 EMI 滤波器，也可能因安装不当而降低它对 EMI 信号的抑制能力。图 7(a)、(b)和(c)中所示电源 EMI 滤波器的安装方法是有问题的。问题的本质在于，滤波器的输入端电线和它的输出端电线之间存在有明显的电磁耦合路径。这样一来，存在于滤波器某一端的 EMI 信号会逃脱滤波器对它的抑制，不经过滤波器的衰减而直接耦合到滤波器的另一端去。

在电子设备或系统内安装 EMI 滤波器时，首先要注意的是，在捆扎设备电缆时，千万不能把滤波器（电源）端和（负载）端的电线捆扎在一起，因为这无疑加剧了滤波器输入输出端之间的电磁耦合。严重破坏了滤波器和设备屏蔽对 EMI 信号的抑制能力。

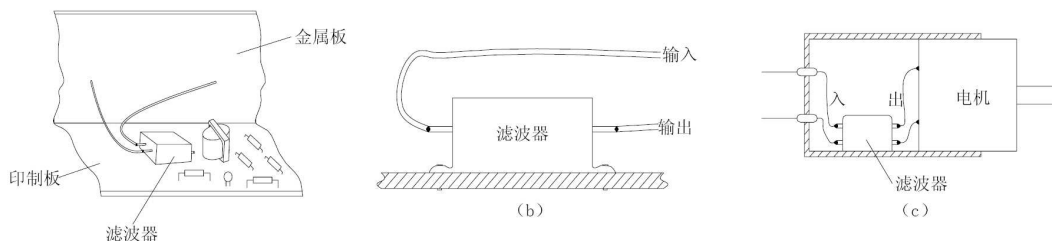


图 7 不正确安装

其次，要求滤波器的外壳与设备机壳之间有良好的电气连接。也就是说，要处理好滤波器的接地。最好不要象图 7(a)

所示的那样，把滤波器安装在塑料板上和其他绝缘物体上。要尽量避免使用长接地线。因为过长的接地线意味着接地有不可忽略的电感和电阻，它会严重破坏滤波器对干扰信号的抑制能力。较好方法是，用金属螺钉与星形弹簧垫圈把滤波器的屏蔽牢牢地固定在设备电源入口处的机壳上。

推荐用于安装电源 EMI 滤波器的方法示于图 8(a)、(b)、(c)。这些安装方法的特点是借助设备的屏蔽，把电源 EMI 滤波器的电源端和负载端有效地隔离开来，把滤波器输入和输出端之间可能存在的电磁耦合控制到最低程度，使 EMI 信号无法逃脱 EMI 滤波器对它的控制，从而把 EMI 信号控制到安全的电平。

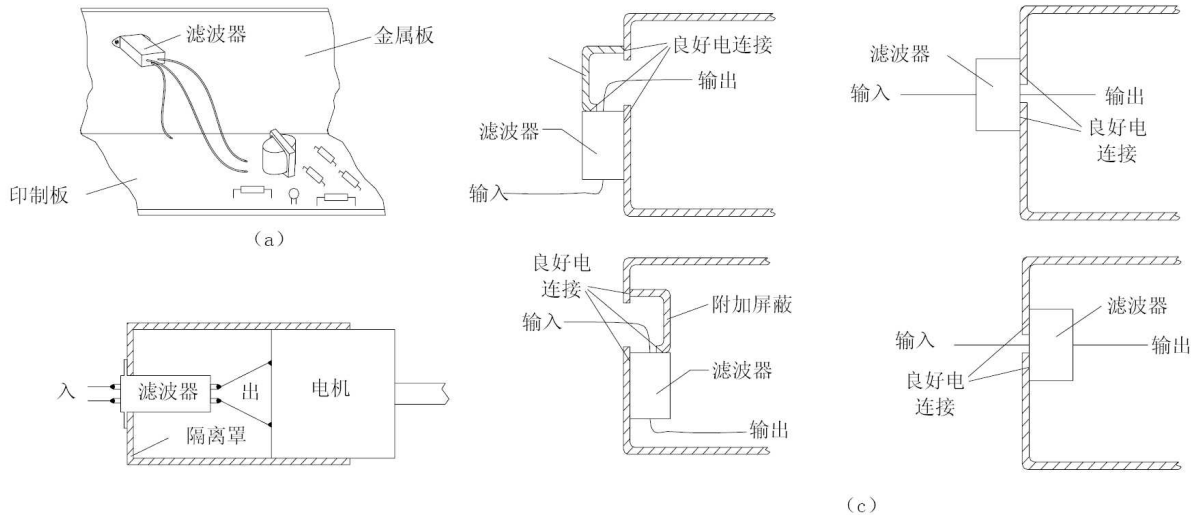


图8 滤波器的正确安装

## 9 结语

选用电源 EMI 滤波器，首先，要考核它的安全性能参数（即漏电流和试验电压），因为它关系到设备操作人员的人身安全。其次，要使电源 EMI 滤波器实现对 EMI 信号的最佳抑制，必须根据它要接入电路的阻抗，以产生最大可能的失配为好，来选取电源 EMI 滤波器的网络结构。第三，电源 EMI 滤波器的安装切不可马马虎虎，要同时处理好滤波器输入、输出之间的电磁隔离和接地。否则，性能很好的滤波器也可能因安装不当而不能把 EMI 信号电平控制到希望的范围。为了实现设备和系统的电磁兼容性，工程技术人员在着手进行设备或系统设计的初期，就要周密考虑，选好用好电源 EMI 滤波器。

## 参考文献

- ① 陈穷、蒋全兴、柳光福等，电磁兼容性工程设计手册，国防工业出版社
- ② 陈穷、林国贤、柳光福等，电磁兼容性设计手册，航空工业出版社

本文选自《安全与电磁兼容》1992年第1期15-23页，略有增改