

电源线滤波器

钱振宇

1 概述

当前电能的生产越来越多，用电的设备也越来越多，而在用电设备中又大量采用了低功耗、高集成度和高速的集成电路，其结果是设备的电磁干扰问题被大大突出出来了。

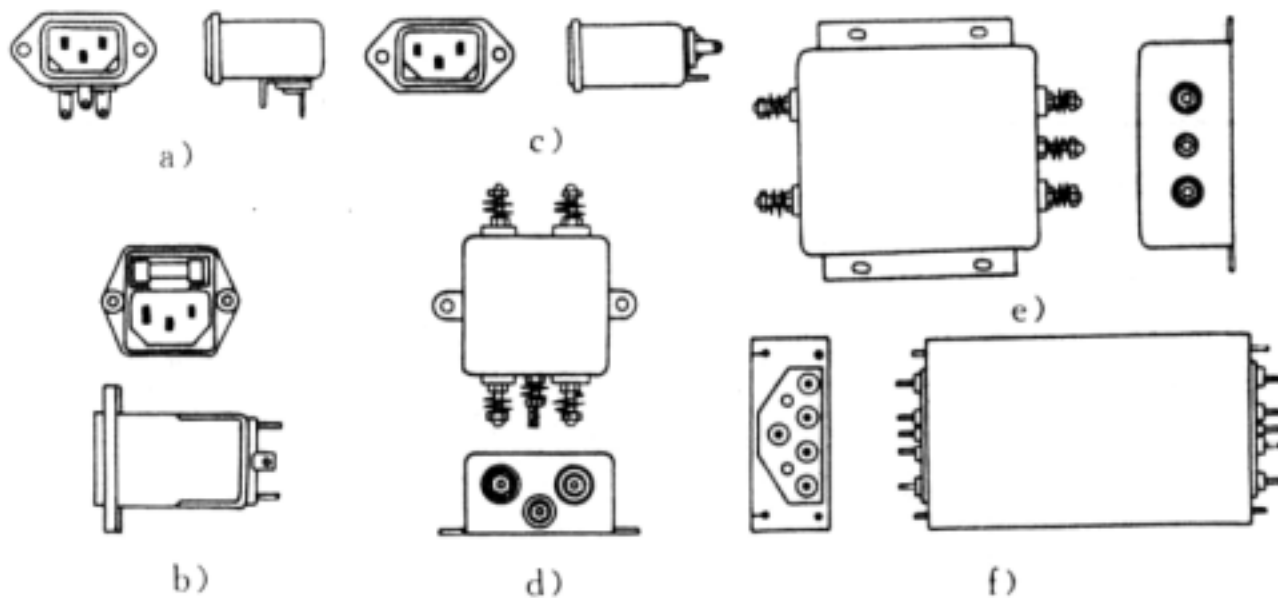
上述干扰和骚扰的传播途径中，电源线往往是最重要的媒介，因为电源线的长度（包括设备的电源进线和电力传输的架空线延伸在内）足以构成射频信号的有效被动天线（电源线的长度达到射频信号波长的 $1/4$ ）。此外，电网内的各种设备开、关和运行中形成的骚动也在电网中肆意流传。上述干扰对电网内的敏感设备的可靠工作造成威胁。

射频信号在电源线上的传输是以两种模式进行的，一种是共模型式，在线（L）—地（G）及中线（N）—地（G）两个路径上出现；另一种是差模型式，在线（L）—中线（N）中传播。

电源线滤波器则是安插在电源线和设备之间的一个专门用来抑制射频信号传播的器件。它的作用实际上是双方向性的，既能有效阻止外界的电磁干扰经电源线进入设备，又能阻挡设备自身工作中产生的电磁骚扰经电源线进入电网，传送到其他敏感设备。所以电源线滤波器是抗干扰和干扰抑制中都用得着的一种器件。

从标准的执行角度看，传导骚扰的测试频率范围是10kHz ~ 30MHz；而辐射骚扰的测试频率范围是30MHz ~ 1GHz。事实上设备电源线上的干扰和抗干扰问题不可能这样依频率来断然划分的。例如当设备电源线传导骚扰发射已经达标，但设备的辐射发射尚不合格，而设计人员对设备的结构一时又找不出更多破绽时，是不是还应当怀疑有经过电源线进行高频段的辐射发射（共模性质的发射）的可能性，必要时可通过对电源线滤波器的选择（选高频插入损耗高的滤波器）或在下面要提到的铁氧体抗干扰磁芯的选用（套在设备的电源线入口处），来提高其对辐射发射的抑制能力。

下图是常见的几种电源滤波器的结构型式。从图中看，滤波器有单相和三相的；从结构看，有带电源线插座的（通常是单相），也有安装式的。

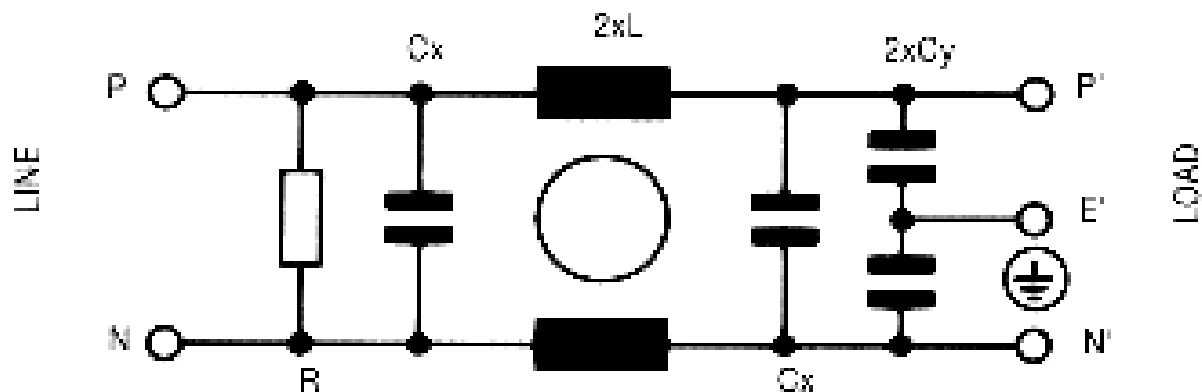


2 线路构成

电源线滤波器主要是由无源集中参数元件（电感、电容和电阻）构成的，它在工作时不消耗能量，它能滤波，主要是利用电容在高频时的低阻抗特性，将火线、中线上的高频干扰导入地线（共模干扰的抑制），或将火线上的高频干扰电流导入中线（差模干扰的抑制）；同时利用电感线圈在高频时的高阻抗特性，将高频干扰波反射回干扰源。针对后者，有人把这种电源线滤波器称为是“反射型”滤波器。

一个好的电源线滤波器不仅要在所希望的阻带范围内有良好的抑制特性，而且在其通带和过渡带中不产生明显的阻尼振荡，在现实的环境中能可靠地工作。

下图是典型的单相电源线滤波器的线路结构，其中电感和电容网络瞄准了存在于电网与负载（设备）之间的阻抗失配，尽可能地减少电磁干扰从干扰源向另一侧转移。



图中，两个线圈绕在同一磁芯上（同名端都在线圈左侧），这种接线对差模电流（包括电源电流）产生的磁通相互抵消，不会产生磁路饱和；而对共模电流则体现一个很大的电感，取得大的滤波效果，故这个电感被称为共模电感。共模电感不会产生磁路饱和的这个特点，使得我们在实际制作中经常采用高磁导率的铁氧体材料来制作共模电感。滤波器的这一结构特点使得滤波器在很大程度上是用来对付共模干扰的。

事实上，共模电感的两个线圈不可能完全对称，两个线圈产生的磁力线也不会全部集中在磁芯中，这都会产生一部分抵消不掉的漏磁通，因此还有一定的寄生差模电感存在，这对于克服差模干扰还是有好处的。

C_x 位于相线与中线之间，用于衰减差模干扰，故称为差模电容。电容量的大小仅涉及所用线路中容性差模电流的大小，为无功电流，对设备并无不利影响。故此值一般选得较大。

C_y 位于相线对地和中线对地处，与共模电感一起用于衰减共模干扰，故称为共模电容。因为 C_y 涉及直流耐压和工频耐压的检验，故 C_y 为高压电容（承受全部试验电压）。同时，该电容又涉及对地泄漏电流问题出于安全角度的考虑，漏电流的值要尽可能的小。按照使用场所的不同，在可移动设备上的滤波器的漏电流值应小于1mA（或更小），对于装在固定位置且接地设备上的滤波器，漏电流值应小于3.5mA，故电容量受到限制。对医疗仪器，为了减少对地泄漏电流的值，在不少实际使用的滤波器中，有时甚至没有这两个电容。

电阻R用来泄放可能积聚在电容器上的静电荷。电阻值太小会造成电阻的功耗和尺寸都比较大，不利于安装和实际使用。电源滤波器中电阻R的典型值为1M 。

注意此电阻不是必须的，在不少滤波器成品中无此电阻（但在医疗设备上用的滤波器，通常都有这个电阻）。

由于滤波器构成元件的参数值有限，特别是普通电源线滤波器的尺寸有限，构成元件的参数更是有限，因此电源线滤波器并不是理想的低通滤波器，通常在100kHz ~ 30MHz范围内比较有效。频率超过30MHz以后，由于滤波器中电感、电容的寄生参数开始起作用，滤波效能会有下降。

3 对电源线滤波器在设计和制作上的考虑

3.1 滤波器中各元件的基本参数和安全要求

. X电容

如上所说，开关电源中的滤波电容分成两组，分别是X和Y电容。其中X电容跨接在电源线上，是滤波器中主要用来抑制差模干扰的部件。X电容有几个特点：首先，由于电容器跨接在电源线上，因此额定电压应当与电网电压相当；其次，由于X电容的失效不会造成人员电击，所以在实际使用中X电容的容量相对Y电容来说可以选得大些，其典型容量是零点几 μF 至 $1\mu\text{F}$ ；再者，考虑到被试设备有不同安全要求，对于不同要求的设备应选择不同脉冲耐压的电容器。表中列出了对X电容的分级要求。其中X2级电容是最通常使用的；X1级电容也常使用，但价格比较高。

X电容的分级

分级	峰值脉冲电压要求	IEC-664安 装类别	应用场合	在老化试验前应施加 的峰值脉冲电压
X1	> 2.5kV, 4.0kV		有高压脉冲	C 1.0 μF , UP = 4kV
X2	2.5kV		一般用途	C 1.0 μF , UP = 2.5kV

. Y电容

Y电容通常用在电源进线或桥式整流输出（初级地）对次级地、机架、屏蔽或大地之间，用来对付共模干扰电压。对Y电容的要求也有几个特点：首先，Y电容失效会导致人员电击；其次，对Y电容有最大漏电流的限制（其范围在0.25mA ~ 3.5mA之间，由产品标准定）。由此可见，对Y电容除了有耐压的要求外，对电容量也有一定要求。表中是对Y电容的分级要求。

Y电容的分级

分级	绝缘类型	额定电压(VAC)	试验电压	老化试验前要施加的峰值脉冲电压
Y1	双层绝缘或加强绝缘	250V	3000VAC	8.0kV
Y2	基本绝缘或附加绝缘	150V , 250V	1500VAC	5.0kV

在两线230VAC输入或一般的通用电源，用一个Y1电容直接接在AC输入线或桥式整流器输出与电源次级之间。Y1电容必须满足耐压的要求（对进线电压为230VAC的，要用3000VAC，试验1分钟）。Y1电容通常不用在三线输入的情况下。

Y2电容不满足加强绝缘的要求，在多数两线输入要用两只2200pF的Y2电容串起来，用在初级、次级与接地的外壳之间，这样即使有一个Y2电容产生短路失效，也不致产生危险。串联联接的两个Y2电容也必须满足耐压的要求（对进线电压为230VAC的，要用3000VAC，试验1分钟）。

对电源输入为3线的场合，Y2电容可以直接接在AC电源线或桥式整流输出与大地之间，因为接大地线能够旁路掉Y2电容短路失效所产生的故障电流。Y2电容的额定电压为250VAC。

基于安全方面的原因（泄漏电流）限制，在230VAC的开关电源中，单个共模电容Y1的使用范围为1nF ~ 4.7nF，典型值为1nF或2.2nF。如果用两只Y2电容串联起来代替一个Y1电容时，每个电容的容量要加倍。

. 滤波电感

对电感器要关注三个关键参数：有效的阻抗特性；电流额定值和通过浪涌电流的能力。

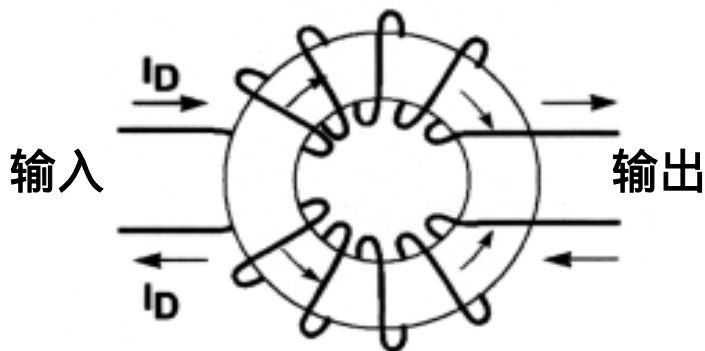
1) 差模电感

差模电感器较少用在滤波器中（尤其是开关电源的滤波器中），作为抑制差模与共模干扰的手段，一般仅见于5W以下的小功率电源。使用时要考虑到通过电流的峰值，常将分离电感放到每一边，以平衡高频阻抗。

在滤波器中即使使用差模电感，由于通过电流可以造成铁芯的饱和，所以电感量也不能太大（线圈的匝数不能太多），通常在零点几mH以下。

2) 共模电感

在传输功率比较大的情况下，滤波器里经常采用的都是共模电感器（如图所示），这是专为抑制共模干扰而设计的一种电感器。共模电感在一个铁芯绕了两个相同的绕组，这样，在差模电流作用下，它们所产生的磁场是相互抵消的，因而磁芯材料不受任何影响，不用担心磁芯会发生饱和现象。基于这一原因，共模电感器通常都采用频率特性好、导磁率高的铁氧体材料作为其制作材料。



共模滤波器要求采用相对较大的电感量。在大多数滤波器产品中，因为铁芯（常为环形）受制于既定的外形尺寸，绕制导线的粗细受制于通过电流的大小，其典型值压零点几mH至几mH之间。对于开关电源，因采用的铁芯外形不同（如U型磁芯），铁芯尺寸的限制也没有滤波器产品那么严格，因此共模电感的电感量在几个mH~二、三十mH。

需要指出的，从制作工艺上来说，共模电感上的两个线圈，不可能做到完全对称，故共模电感器本身也残留了部分差模电感的成分，因此共模电感器对抑制差模干扰也有一定作用，应该说是增加了共模电感器的功能，同对又不增加其成本。只是对于这种共模电感，当其通过的电流足够大时，仍有可能引起磁芯一定程度的饱和，从而引起共模抑制能力的减弱。

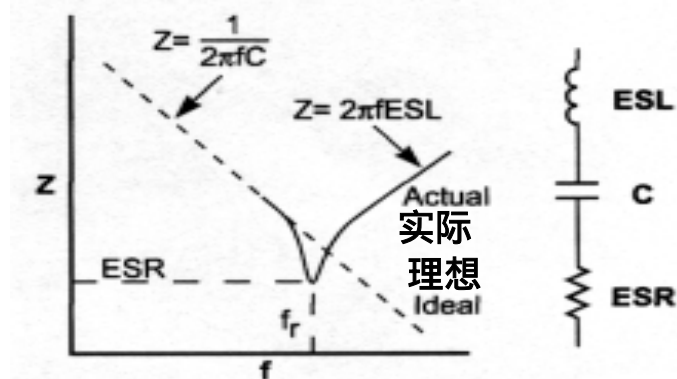
3.2 滤波器的实际线路

. 电容器

电容器的选择除注意额定电压和安全要求外，还要注意阻抗特性。

实际电容除有电容成分外，还有寄生电感和电阻成分，因此阻抗特性不同于理想情况（见右图）。等效串联电感（ESL）造成电容器有自谐振频率 f_r 。电容器在自谐振点上的阻抗决定于等效串联电阻（ESR）。超过自谐振频率 f_r ，电容器的实际作用类似于电感器。

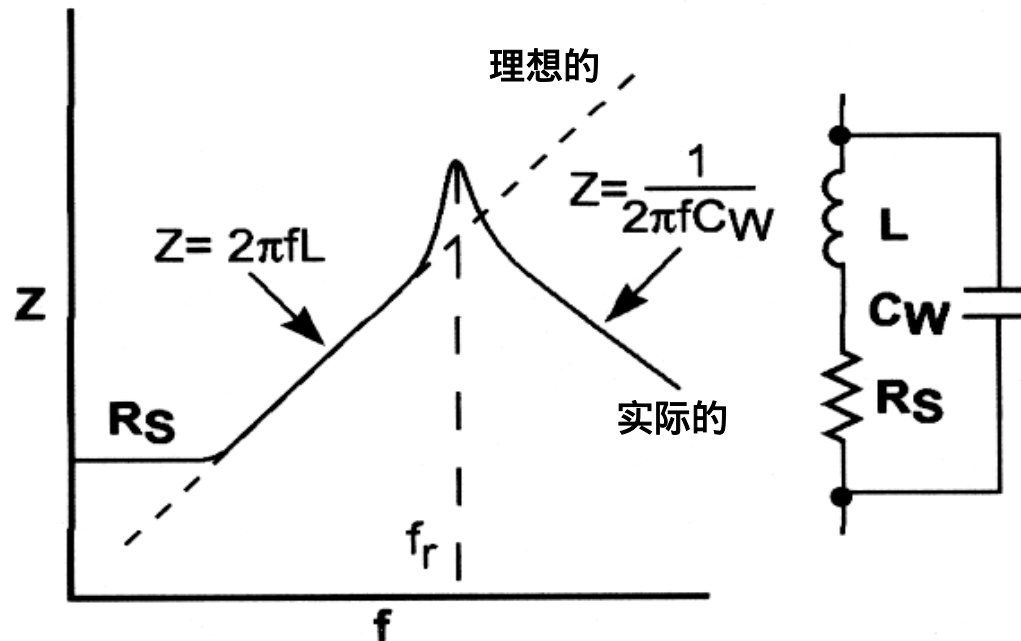
常用滤波电容有塑料薄膜电容器、塑料薄膜和纸混合的电容器，以及具有最高自谐振频率的陶瓷电容。



理想电容器与实际电容器的阻抗特性比较

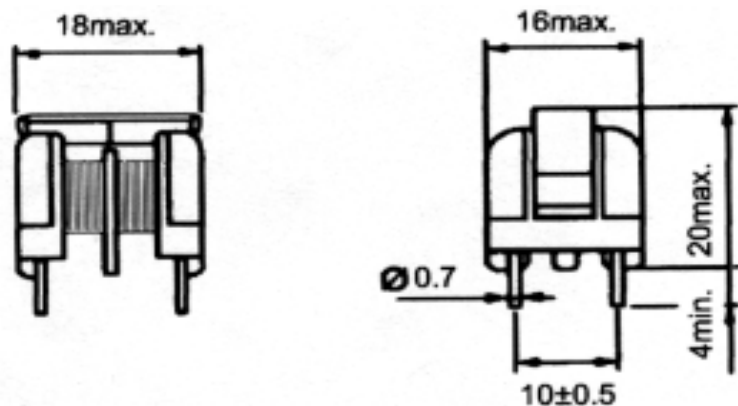
. 电感器

实际电感器由于寄生电容 C_W 和串联电阻 R_S ，产生了一个自谐振频率，见图中所示。低于谐振频率 f_r ，电感器的作用与普通电感器一样，是电感性的；而高于谐振频率 f_r ，电感器的作用与电容器相仿。

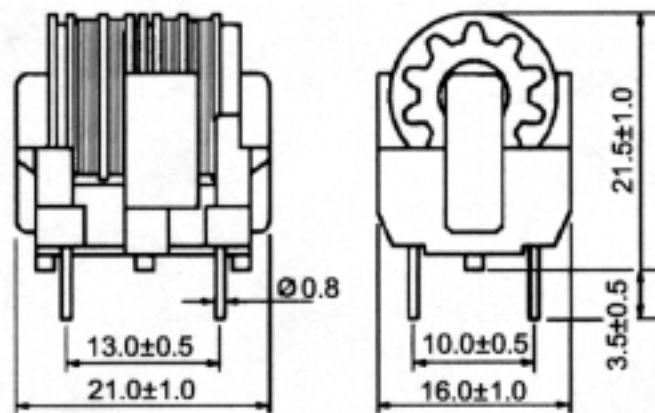


理想和实际的电感器阻抗特性

除了环形磁芯制成的共模电感器外。在开关电源中用得较多的是类似下图所示是两种分别称为“U型磁芯”和“管筒磁芯”的共模电感器，具有绕制方便，电感量大的特点。为了减小寄生电容，这两种共模电感器都采用了分段绕制的办法。

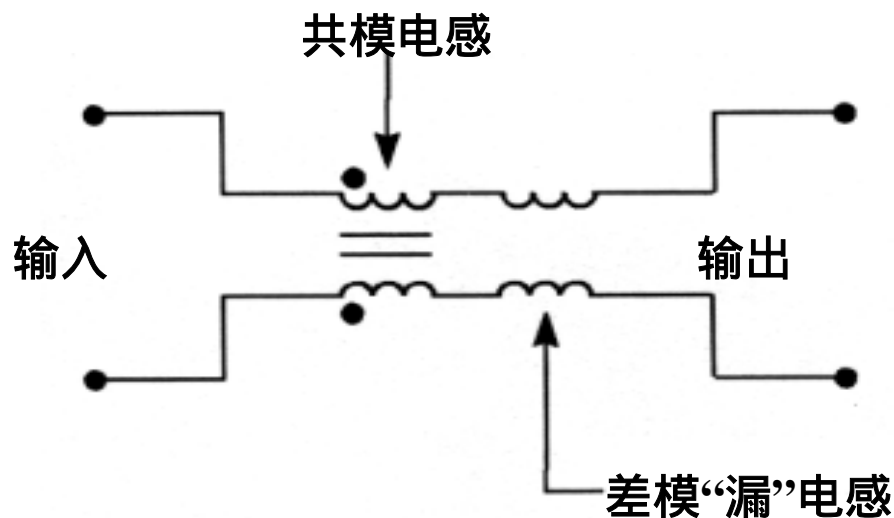


U型磁芯共模电感器图



管筒磁芯共模电感器

应该指出，前面讲到的共模电感器是一种过于理想化的共模电感器，实际上由于两个线圈的不对称，除了包含一个共模电感外，还等效串联了一个差模的漏感（见下图）。所以实际的共模电感器在一定程度上还能抑制差模干扰。在共模电感器中，每一个绕组的共模电感可以在另一个绕组开路的情况下测得的电感量。而寄生的差模电感可以在两个绕组进线端相互短路情况下，从两个输出端来测量。



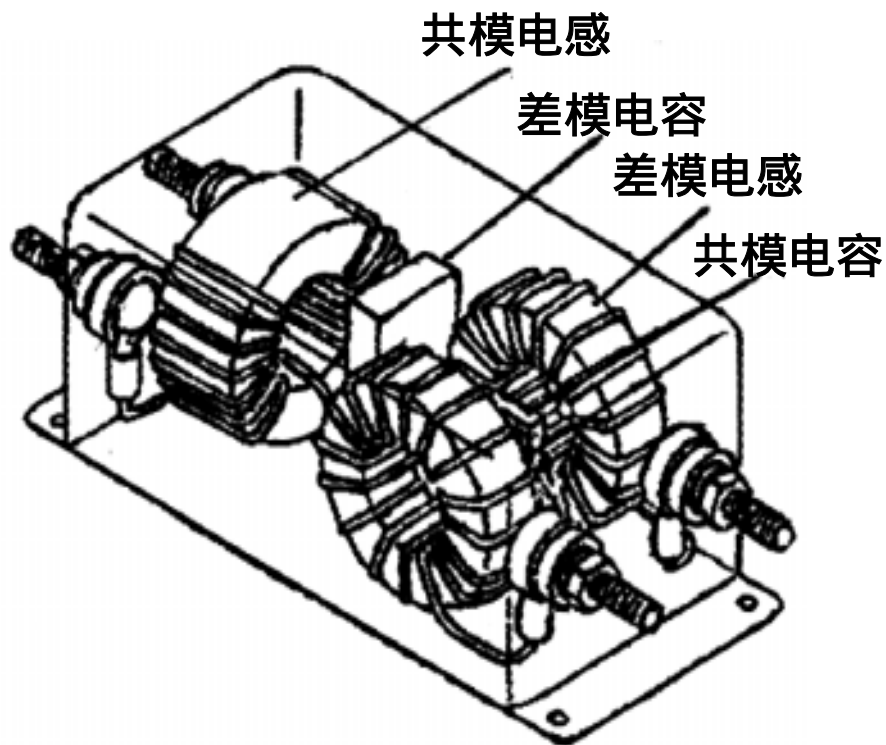
实际共模电感器的等效电路

3.3 滤波元器件的安装

最后要指出的是，当需要抑制的传导骚扰的频率比较高的时候（超过1MHz），元件的布局变得非常重要，不适当的布局会导致电容的ESL增高，引起传导骚扰的抑制情况变差，甚至有可能使噪声电压直接耦合到交流电源线上。通常要求滤波元器件的布局要比较紧凑，特别是共模电容的引脚必须非常地短，直接接到需要接电容的地方去。

右图是一个普通滤波器的内部结构，这一结构和布局的思路同样适用于开关电源输入滤波器的布局。这种滤波器具有共模和差模两种电感，以衰减两种噪声为目的。共模电感采用铁氧体环形磁芯；差模电感采用铁粉磁芯。由于铁粉磁芯抗饱和的能力较强，即使开关电源输入电流有强脉冲电流通过，电感量也不会下降太多，所以用它做差模电感最合适。

图中结构另一值得借鉴的地方是，输入与输出的彻底分开，避免了已经滤过波的输出线重新被输入端的干扰所沾污。



商品化电源滤波器的内部结构

3.4 滤波器中的器件规格和安全性能介绍

. X、Y滤波电容

从开关电源要顺利取得3C认证的角度出发，开关电源内部涉及到安全要求的一些器件首先要取得安全的认证，其中电源的输入滤波器首当其冲。因此，滤波电容必须符合安全认证的要求，开关电源的制造商必须要能出示滤波电容制造商所提供的认证证明，否则开关电源制造商就得承担所用滤波电容的安全检测费用。另外，在产品认证时，要申报安规电容的生产厂、产品的品牌及型号。今后生产中如变更厂牌，则要向认证机关重新申报。产品生产中如要变更安规电容的规格，则只允许换小，不可以换大，否则要重新申报。

· 共模和差模电感的制作材料

对于滤波器中的共模和差模电感，诚如前面在分析共模和差模电感中的电流情况时所说，差模电感在滤波器的设计中是用来通过工频或直流电流的，因此设计中避免磁路发生饱和是关键。

对共模电感来说，它在一个铁芯上拥有两个相同的绕组，在正常差模电流作用下，它们所产生的磁场是相互抵消的，因此磁芯材料不存在饱和的现象。基于这一原因，在共模电感设计中，电感器的高感抗和小的分布电容是关键。

1) 差模电感器

对差模电感器来说，非常关键的一点是，电感器在流过低频峰值电流或直流时，铁芯不饱和，同时对所需抑制频段内的干扰有尽可能高的电感量。基于这些要求，差模电感器的磁芯材料有以下特性：

- 恒导磁特性：在额定低频峰值偏流（或直流）安匝数的条件下，磁芯不饱和。同时具有高的线性增量磁导率和电感量，亦即有好的交直流叠加特性。
- 高的饱和磁感应强度 B_s 。
- 良好的频率特性。
- 良好的温度稳定性。

常用的差模电感器磁芯的材料有两类（按高频特性由优差顺序排列）：

带气隙的磁芯材料：铁氧体，非晶合金（FG型），坡莫合金（薄）及硅钢（薄）等。

不带气隙的磁芯材料：铁镍钼粉芯，恒导磁非晶合金，铁硅铝粉芯，铁粉芯等。

考虑到开关电源中的制作成本，目前用得最多的还是由铁粉芯材料制作的差模电感。

2) 共模电感器

在滤波器的组成器件中，共模电感器通常是最值得拿出来作专门讨论的：这里涉及到共模电感器的基本结构；减小电感器寄生电容的方法；共模电感器中的寄生差模电感；电感器磁芯的选用；以及通过电流对电感器滤波特性的影响等等。下面分别叙述：

共模电感器的基本结构

对于没有很高绝缘要求的信号线，可以采用双线并绕的方法构成共模电感器；但对于交流电源线，考虑到两根导线之间必须承受较高的电压，必须分开绕制。

减小电感器寄生电容的方法

在一般的滤波器中，共模电感器的作用主要是滤除低频共模干扰，高频时，由于寄生电容的存在，对干扰的抑制作用已经较小，主要依靠共模滤波电容。医疗设备由于受到漏电流的限制，有时不使用共模滤波电容，这时，要提高电感器的高频特性。

为了拓宽电感的工作频率范围，最关键的是减小寄生电容。电感器的寄生电容与线圈的绕制方法关系密切。

如果磁芯是导体的，应该设法减小导线与磁芯之间的电容。这可以通过使用介电常数低的材料，以及增加导线与磁芯之间的距离来实现。

从绕制角度看，应尽量单层绕制，在空间允许时，尽量使线圈为单层的，并使输入和输出远离。当线圈的匝数较多，必须多层绕制时，要向一个方向绕，边绕边重叠，不要绕完一层后，再往回绕。

另外，在一个磁芯上可以采取线圈分段绕制的办法，这样每段的电容较小，并且总的寄生电容是两段上的寄生电容的串联，总容量比每段的寄生容量小。采用分段绕法的另一个优点是每一段内的电压差减小了，这一点对于防止因高压脉冲造成线圈间的局部短路十分有效。

对于要求较高的滤波器，可以将一个大电感分解成一个较大的电感和若干电感量不同的小电感，将这些电感串联起来，可以使电感的带宽扩展。但这付出的代价是体积和成本。还要注意在电容并联时遇到的类似问题，即引入了额外的串联谐振点。在谐振点上电感的阻抗很小。

共模电感器里的寄生差模电感

理想的共模电感器上的两根导线产生的磁通完全抵消，磁芯永远不会饱和，并且对差模电流没有任何影响。但实际的共模电感器两组线圈产生的磁力线不会全集中在磁芯中，而会有一定的漏磁，这部分漏磁不会抵消掉，因此还是有一定的差模电感。寄生差模电感的好处：由于寄生差模电感的存在，共模电感器可以对差模干扰有一定的抑制作用。在设计滤波器时，可以将这种因素考虑进来。

寄生差模电感的存在，当有大电流流过电感器时会导致电感磁芯的饱和；而且从磁芯中泄漏出来的差模磁场还会形成新的辐射干扰源。

线圈的绕制方法，线圈周围物体的磁导率都会成为影响寄生差模电感的重要因素。例如，将共模电感器放进钢制小盒中，将会增加寄生的差模电感。

在测量差模电感时，可以将共模电感器一端的两根导线短接，在另一端上测量线圈的电感。

电感磁芯的选用

为了用较小的体积获得较大的电感量，往往使用导磁率较高的材料作磁芯。磁芯的导磁率越高，每匝的电感量越大。

另外，由于共模干扰的电流不大，但干扰频率相对较高，因此要求电感器的磁芯还应当是高频的材料，这样所制作出来的电感才具有高频和高电感量的特点，由此形成了对干扰频率的高阻抗。

基于这原因，对制作共模电感的软磁材料要求：

- 在重点干扰频段内有高的初始磁导率 μ_i ，可保证共模电感有高的电感量，或在同样的电感量下面有比较少的匝数和分布电容，以便达到有高的插入损耗。
- 高的饱和磁感应强度 B_S ，以便抵挡高幅值的尖峰干扰，而不会产生磁芯的饱和。
- 宽的 μ_i 频率特性。
- 好的温度特性（例如 - 40 ~ + 120 ）。。
- 在实际应用中，当有非平衡电流（如漏电或三相不平衡负载等原因）引起的偏磁情况下，仍能保持磁芯的高导磁率而不致进入饱和状态。

铁氧体是常用的一种磁芯，常被用于制作共模电感器的磁芯。

锰锌铁氧体则是最常用的磁芯材料，尽管近年又出现了 μ 值为20000~30000的新的铁氧体材料，考虑到工作温度，频率特性等综合因素，目前仍以使用 μ 值为4000~10000的铁氧体材料为主要材料。用锰锌铁氧体作磁芯时，由于这种材料导电率较高，故电容量较大。因此，锰锌铁氧体适合用在频率相对较低的场合（150kHz~30MHz）。

铁氧体中的另一种常用材料是镍锌材料，镍锌材料的磁导率较低，电阻较大。镍锌材料比较适合用在频率相对较高的场合。

但是近年铁基纳米晶磁环开始展现其竞争力，这是以铁为主要成份的合金粉末，粉末的尺寸在10nm（相当于一般磁性材料粉末的1/1000）左右，具有很高的导磁率（ μ 值为80000以上）。有-50~+130的工作温度范围和良好的0~1MHz的频率特性，使滤波器的共模滤波特性大大提高。只是价格较高（随着时间推移，价格也在逐步降低），主要用在需要很大电感量的场合制作共模电感器，特别是在中大型磁环的应用领域中（如三相、大功率以及电流不平衡（及有漏电）等的场合），其性价比已能优于高 μ 值的铁氧体材料。

另一种常用材料是铁粉磁芯，是由外表带氧化层的铁粉制成，由于铁粉相互隔开，形成了大量分布的间隙，因此不易饱和。铁粉磁芯不导电，因此线包与铁芯之间形成的寄生电容很小，但由于铁粉磁芯的磁导率低，一般只适合做差模电感。这时磁芯不饱和是关键因素，因为铁粉磁芯的磁导率较低，需要较多的匝数才能获得需要的电感量，导致了线包匝间寄生电容增大，但这对于频率较低的差模干扰并不是主要问题。

用锰锌铁氧体做共模电感磁芯的干扰抑制机理

导线在穿过铁氧体磁芯形成的电感其阻抗虽然是随着频率的升高而增加，但是在不同频率上，其机理是完全不同的。

低频时，阻抗由电感的感抗构成。在低频，磁芯的磁导率较高，因此电感量较大。并且这时磁芯的损耗较小，整个器件是一个低损耗、高Q特性的电感。电感本身并不消耗能量，而仅储存能量，因此，电感会与电路中的电容构成谐振电路，在某些频率上会使干扰增强。

高频时，阻抗由体现磁芯损耗的电阻成分构成。随着频率升高，磁芯的磁导率降低，导致电感的电感量减小，感抗成分减小。但是，这时磁芯的损耗增加，电阻成分增加，导致总的阻抗增加。当高频信号通过铁氧体时，电磁能量以热的形式耗散掉，从而减小了干扰。

在共模电感器制作时，增加穿过磁环的匝数可以增加低频的阻抗，但是由于寄生电容增加，高频的阻抗会减小。盲目增加匝数来增加衰减量是一个常见的错误。当需要抑制的干扰频带较宽时，可在两个磁环上绕不同的匝数，然后再将两个共模电感器串联起来，会是一个不错的方案。

电流对共模电感滤波特性的影响

当穿过铁氧体的导线中流过电流时，会在铁氧体磁芯中产生磁场，当磁场的强度超过一定量值时，磁芯发生饱和，使磁导率急剧降低，引起电感量减小。因此，当滤波器中流过较大的电流时，滤波器的低频插入损耗会发生变化。在高频时，尽管磁芯的磁导率已经较低，但是此时的共模电感主要靠磁芯的损耗特性工作，因此，电流对滤波器的高频特性影响不大。

共模电感的安装位置

滤波器中的共模电感在安装时要注意，由于高频高压下使用的变压器在其周围有很强的磁场，故滤波电感的安装位置要尽可能地远离磁通泄漏大的主变压器。

共模电感的设计方法：

· 导线规格

根据通过的额定电流，选择合适的电流密度，最后确定导线规格。

· 电感量L的确定

根据实测的传导情况（电子、电气设备本身工作时产生的传导骚扰及外界对设备形成的传导干扰）与我们的期望值（对设备所产生的传导骚扰来说，取标准规定的限值）的差值，折算出所需的插入损耗值（通常要留出6dB以上的设计余量）。并进而计算出所需的电感量值，只是由于设备的实际阻抗与标准规定的测试条件相差很大，计算的误差会较大，但不管怎样这些数据终究是设计的基础。

除了上面通过测量和计算的方法来确定共模电感的电感量外，对开关电源产品常常是按经验和习惯取电感量，一般取10~30mH（开关频率低的，如50kHz，电感量取大一些，如30mH；开关频率高的，如100kHz，电感量取小一些，如10mH）。

· 磁芯材料的选择

在材料选择上，主要根据电感量的大小，重点考虑的频段范围，对小型化的要求，以及负载的漏电和三相电流不平衡情况来选择磁芯材料。在普通开关电源用得较多的还是 μ 值为4000~10000的锰锌铁氧体。

· 电感器的设计

关于电感器的设计，可以借助磁芯材料生产厂家产品样本中提供的 nH/N^2 数据，由于电感量与匝数平方成正比，所以很容易得到需要绕制的匝数，若要修正，也很容易在1、2次内完成。

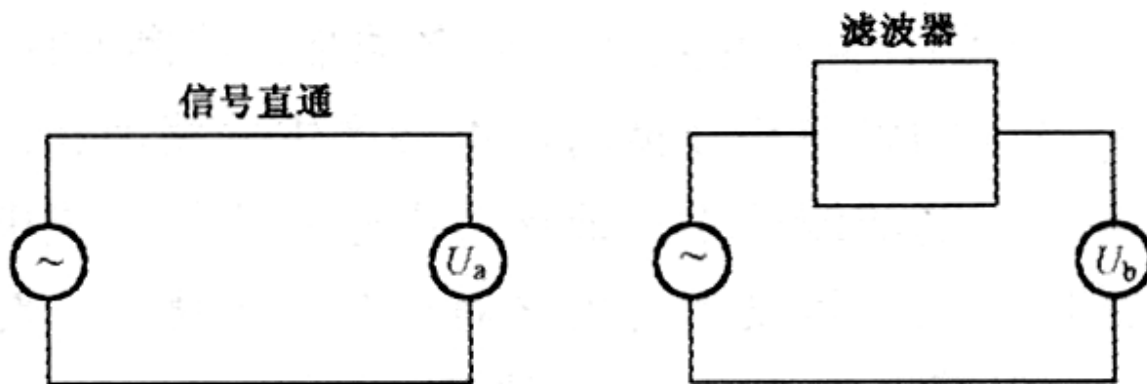
即使得不到厂家提供的 nH/N^2 数据，也可以通过试绕几匝线圈，然后测量电感值，来估算出 nH/N^2 数据。

对于环形磁芯，要根据它的内径尺寸校核能否容纳单层N匝导线。考虑到共模电感在一个磁芯上要容纳两个相同的线圈，两个线圈之间要有足够绝缘能力，因此这两个线圈不能相碰，比较好的办法是让每个线圈只占磁芯内径的4/10。

当电感器的电感量要求较大，绕的匝数较多，往往一层容纳不下，需要多层才能达到目的，这时电感器的分布电容较大，可能影响它正常作用的发挥，应该采用分段绕法。

4 滤波器的性能测试

滤波器的主要特性参数是插入损耗，这是指给定信号频率下，滤波器插入前后，在负载上测到的传输功率比。显然，滤波器的插入损耗应当越大越好。下图是滤波器插入损耗的测试原理图。



按CISPR的第17号出版物规定，测试系统的信号源内阻和测试设备的输入阻抗都是50Ω。

滤波器的性能用插入损耗来表示， U_a 和 U_b 分别代表插入滤波器前后在负载端测到的信号电压。因此，滤波器的插入损耗

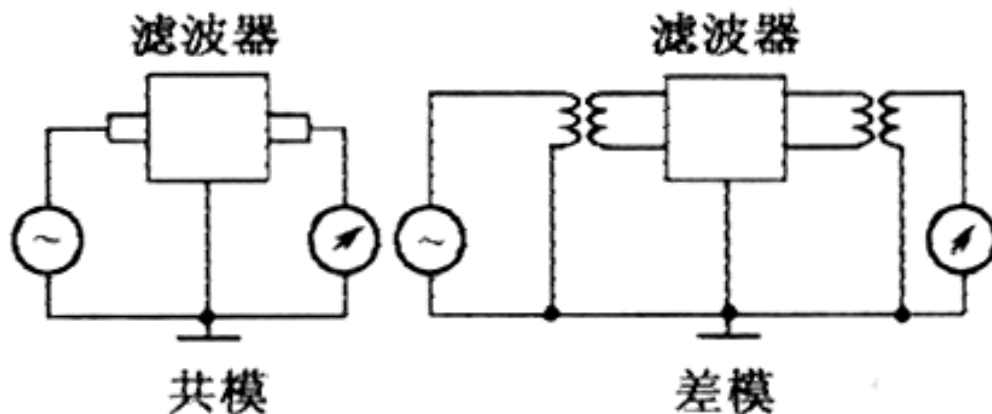
$$A = 10 \log (P_b / P_a)$$

式中， P_a 和 P_b 分别是滤波器插入前和插入后传到负载上去的功率。由于测试设备的输入阻抗不变，故插入损耗可用在测试设备上测到的电压值来表示：

$$\begin{aligned} A &= 10 \log [(V_b^2 / Z) / (V_a^2 / Z)] \\ &= 10 \log (V_b^2 / V_a^2) \\ &= 20 \log (V_b / V_a) \end{aligned}$$

测试要在整个感兴趣的频段上（例如对电磁骚扰的传导发射频率范围9kHz ~ 30MHz内）进行。

考虑到干扰有共模和差模之分，因此插入损耗也有共模和差模之分，测试的原理见下图所示。



具体方法如下：用跟踪发生器和频谱仪作为测试线路中的信号源和测试仪器。在不带滤波器时建立一个0dB参考点，然后插入滤波器，记录所需频率范围内提供的衰减。

测试中所有的信号连接线要用50Ω同轴导线；零dB参考点要在整个频率范围内测量，而不是仅在1~2点内测量；滤波器外壳要有良好的射频接地；要确保滤波器的接线有很好的隔离，以避免滤波器周围有射频耦合。

事实上滤波器的插入损耗值并不能精确预测滤波器在设备中的实际滤波效果（详见“滤波器的实际使用效果”），然而它可以作为滤波器进货检验时对产品的验证手段（验证的判断标准是，以标准方式测得的插入损耗值必须满足或超过手册上的数据。亦即手册上给出的数据应当是供应商能保证提供的最小值）。

5 滤波器的安装

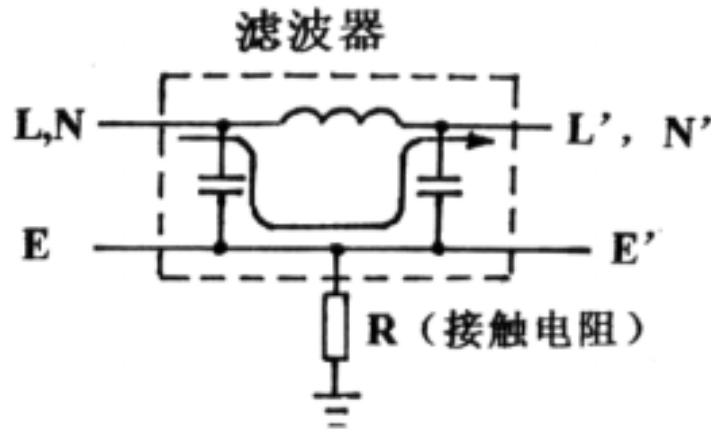
滤波器的滤波效果必须在安装正确时才能得到发挥。这里涉及滤波器的安装位置、接地和布线等一系列问题。

5.1 位置

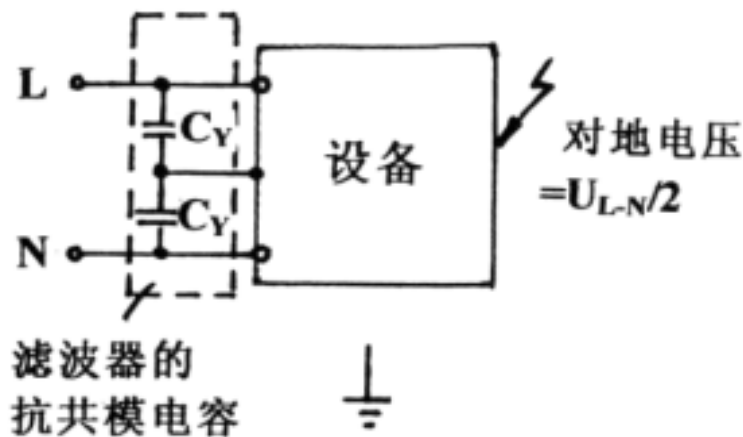
滤波器安装的最佳位置应当是在机箱开口处，嵌装一只带有电源进线插座的金属外壳滤波器，以便阻止干扰进入或逸出机箱。基于这种想法，一些在机箱内布置相当长的电源线后再接滤波器的做法显然是错误的，因为电源线中的干扰在经过滤波器之前已经有了在机内辐射的机会，对于这类干扰，滤波器已经无能为力。辐射出来的干扰会被内部线路所吸收，造成设备的误动作。同样，对于设备工作时产生的电磁骚扰，也会因机箱内布置的电源线通过对辐射的接收，最后再通过传导的方式被引至机箱外部。

5.2 接地

滤波器的接地必须良好。对于金属外壳的滤波器，外壳必须与设备机箱作低阻抗连接（滤波器不宜以单根导线接地，而要通过与设备外壳的大面积导电性连接的方式接地），然后设备机箱再以粗而短的导线与大地连接。这一点对于发挥滤波器的共模衰减能力非常重要。反之，滤波器接地不好，会使原先已经经过共模衰减的电磁干扰，由于接地不畅，重新进入已经滤了波的部分，参见下图所示。



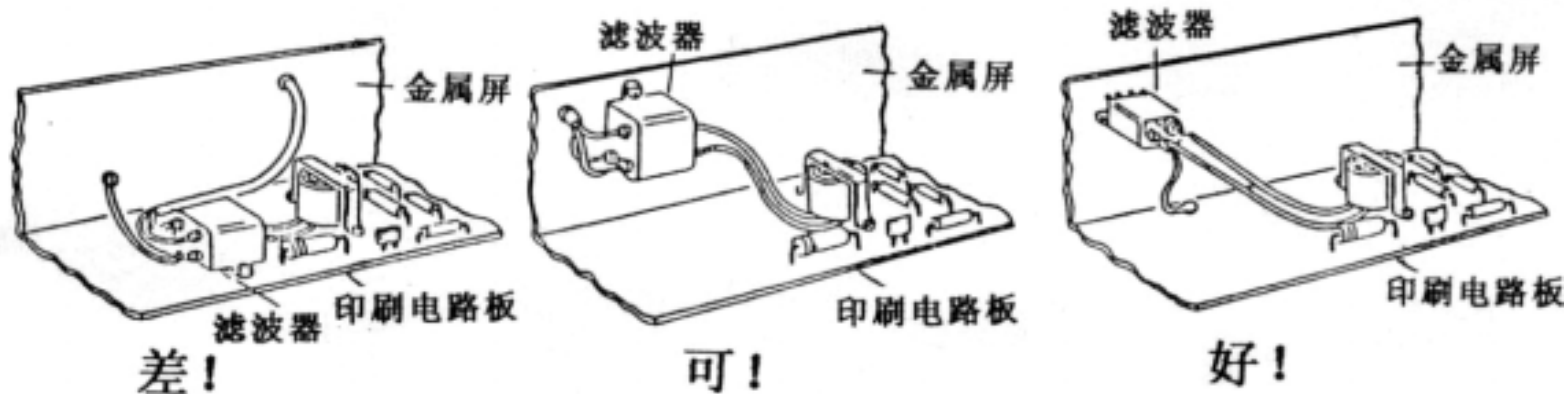
在下图给出了滤波器外壳必须接地的第二个原因。由于共模滤波的需要，滤波器中的一对共模电容必须存在。共模电容的公共连接点是滤波器的地，亦即是设备的外壳。滤波器正常工作时，共模电容公共连接点上的电压将是火线对中线电压的分压，由于两个共模电容的容量相等，公共点上的电压将是电源电压的一半。如果设备外壳不接地，则设备外壳就要带电，尽管共模电容的容量很小（几nF），人体在触摸时不会有生命危险，但毕竟有触电感觉，降低了安全感。



可见，滤波器的可靠接地，对于提高设备的抗干扰能力和保护人员安全都是必须的。

5.3 针对滤波器的布线

常见的一种布线不当是导线的集束捆扎法（图 a），由于滤波器的输入线和输出线扎在一起，线束间的射频耦合会使滤波效果严重受损。正确的做法是将滤波器的输入线和输出线分隔开来。机箱内部的线应当分门别类分开捆扎，而且留有足够的间距，怕干扰的线束应当靠底板布线（图 b）。而采用插座式滤波器则是最佳方案，因为输入和输出线分别处在两个电磁环境里，而滤波器的外壳和设备机箱保护良好接触（图 c）。



6 滤波器的实际使用效果

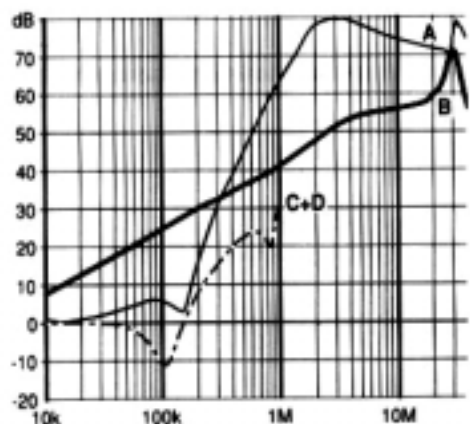
时常听到一些滤波器的用户反映，说是滤波器的实际使用效果不及想像中的那么有效。究其原因，部分可能是安装上的原因，使得滤波器的效用没有充分发挥出来；更大部分的原因则是实际使用环境中的滤波器与电源及设备（负载）的阻抗严重失配。

从滤波器的设计角度来看，考虑了电源线的共模阻抗相对较低（约在50左右），故针对这种阻抗不匹配的概念，在滤波器的进线侧都是采用高的共模阻抗（串联共模电感来达到），以便让干扰被阻挡在滤波器的“门外”。

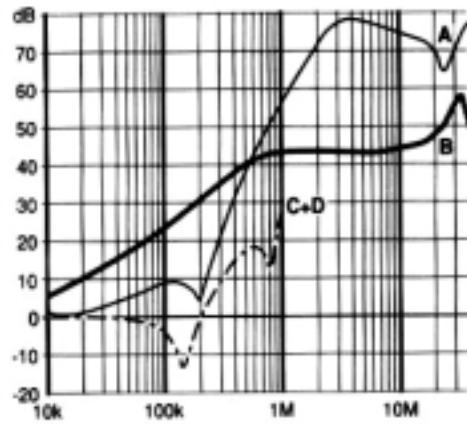
但是从负载（设备）侧来看，阻抗情况相当复杂（设备的输入阻抗有电感、电容，还有电阻性的），实际电路的阻抗很难估算，特别是在高频时（电磁干扰问题往往发生在高频），由于电路寄生参数的影响，电路的阻抗变化很大，而且电路的阻抗往往还与电路的工作状态有关，再加上不同频率上的电路阻抗也不一样，造成它与滤波器严重不匹配。因此，在实际使用中，究经哪一种滤波器更加有效，主要靠试验结果来确定。

下图是瑞士SCHAFFNER公司（国际著名滤波器制造商）对其FN612滤波器的测试结果。图中，曲线A和B分别代表在信号源阻抗和测试仪器（负载）输入阻抗都是50Ω情况下测得的差模（对称）和共模（非对称）干扰的衰减情况。C和D则是在严重失配下（曲线C是在源阻抗为0.1Ω、负载阻抗为100Ω；曲线D是在源阻抗为100Ω、负载阻抗为0.1Ω）测到的滤波器差模（对称）衰减特性。从图中可见，在阻抗严重失配时，滤波器衰减特性明显变差，甚至个别点上还出现衰减特性为负的，亦即在这些频点上，滤波器对干扰非但不衰减，甚至还出现了“放大”。

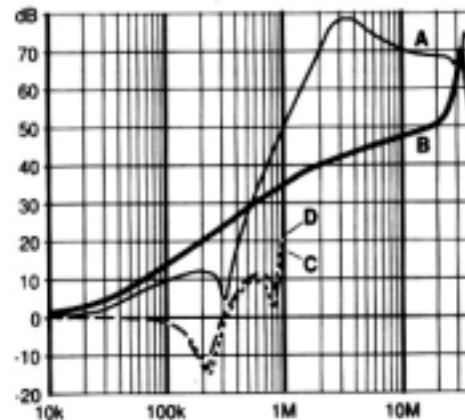
1 amp



3 amp



6 amp



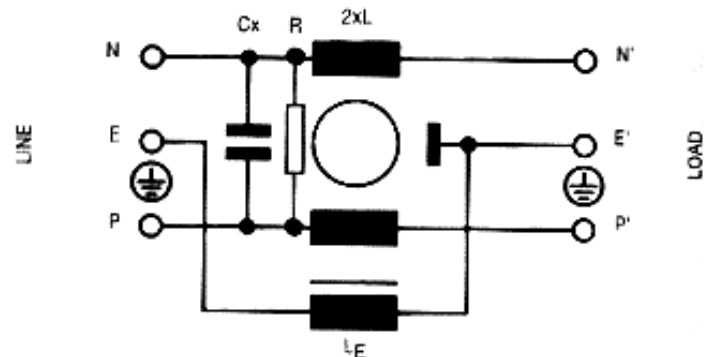
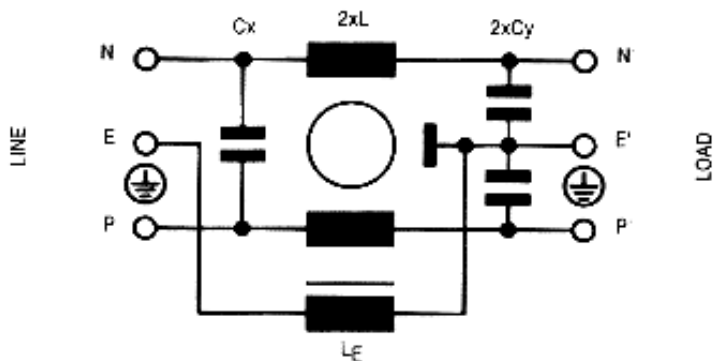
参照CISPR17：A = 50Ω / 50Ω 差模；B = 50Ω / 50Ω 共模；C = 0.1Ω / 100Ω 差模；D = 100Ω / 0.1Ω 差模

作为滤波器的制造商，在滤波器的设计时已经考虑了负载阻抗的复杂性，因此在负载侧既有高阻抗型（串联电感），也有低阻抗型（并联电容）。故使用者在为设备选择滤波器时，了解设备的输入阻抗当然是有用的，不过这种阻抗大都相当复杂（具有阻性及感性元件），并可能在射频范围内有很大变化，因此在任何应用中，都应当对若干种滤波器的系列产品进行评估，以确定最为有效的滤波器。

7 提高滤波器性能的一些措施

7.1 带有地线电感的滤波器

现时电源线（包括地线）都可能感受电磁干扰，一般滤波器可以减少相线和中线上的干扰，对地线上的干扰却无能为力，并因此可能引起设备失效。为了减少地线上的干扰，可以采用带有地线电感的滤波器，这个地线电感可提供地线干扰的额外衰减。下图是这种滤波器的线路图。使用时，单相电源的L、N和PE分别接图中滤波器的P、N和E。设备（连同滤波器在内）的外壳接大地。



使用带地线电感的滤波器要注意整个系统的协调。例如个人计算机使用了这种滤波器，如果计算机与打印机相联，后者由电网来供电，若打印机没有用接地线电感，那么干扰就可能从电网进入打印机，并沿数据电缆进入计算机，此时计算机的带地线电感滤波器就等于虚设。

7.2 提高滤波器共模和差模滤波性能的方法

采用基本电路的滤波器对干扰的滤波效果很有限，可用在要求较低の場合中。要提高滤波器的滤波效果，可以在基本电路的基础上增加一些器件，下面是一些常用办法：

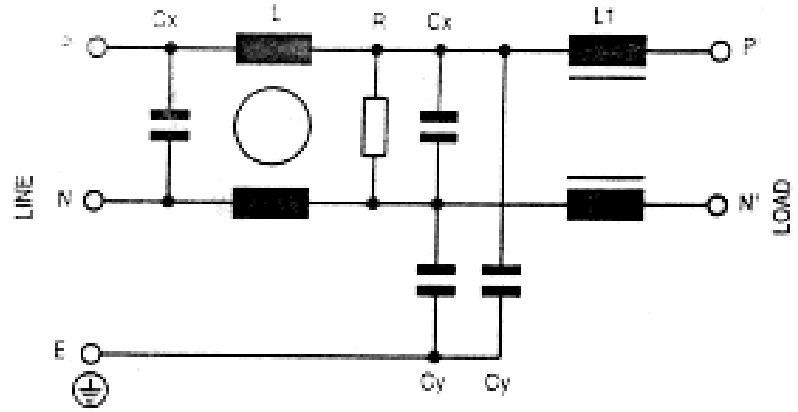
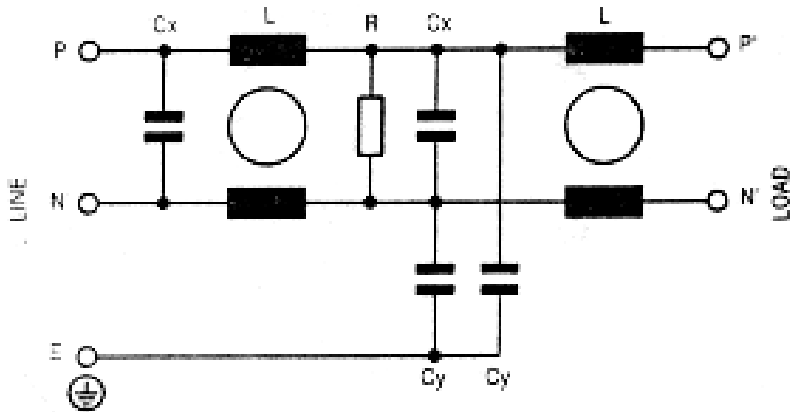
强化差模滤波方法之一，是在共模电感器后串联两只差模电感器，以增大差模电感；强化差模滤波另一种方法，是在共模滤波电容的右边增加两只差模电感器，同时在差模电感的右边再增加一只差模滤波电容。

为了强化共模滤波，可以在共模滤波电容右边增加一只共模电感器，对共模干扰构成T形滤波。

当为了同时强化共模和差模滤波，可以在共模电感器右边增加一只共模电感器、然后再加一只差模电容。

值得一提，通常不使用增加共模滤波电容的方法增强共模滤波效果，因为这涉及滤波器的对地泄漏电流问题。

下图是两个改善滤波器共模和差模滤波性能的实际例子。



**FN 2060两级多功能通用滤波器
(SCHAFNER公司产品)**

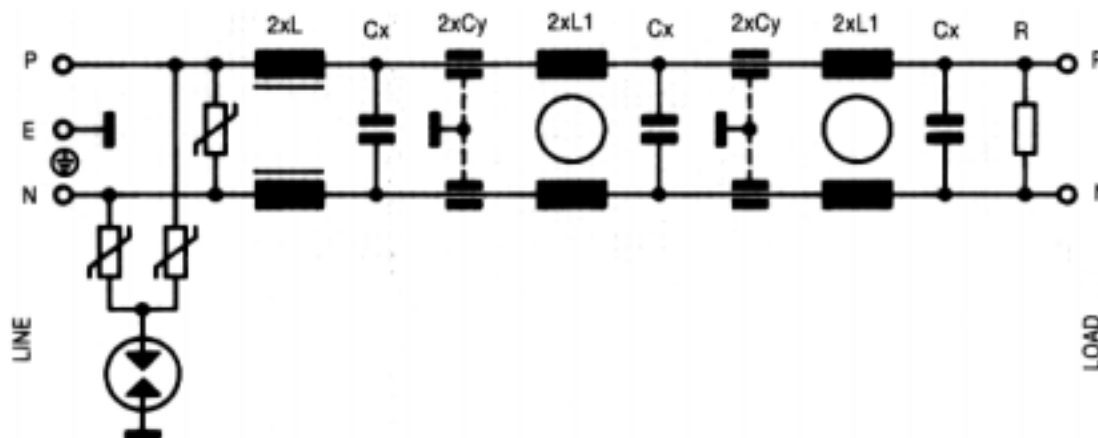
**FN 2080两级高性能滤波器
(SCHAFNER公司产品)**

对这两种滤波器，标准型的滤波器对地泄漏电流为0.4mA/相；B型（医用）对地泄漏电流为0.002mA/相；A型对地泄漏电流为0.040mA/相；

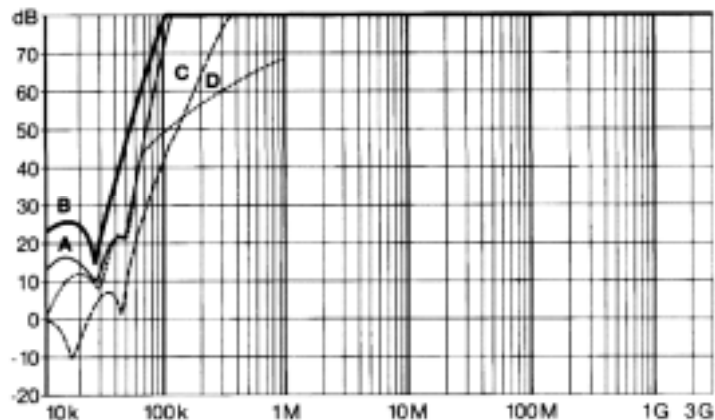
7.3 采用多级滤波器

单级滤波器结构简单、价格便宜，但使用中由于与电网以及设备阻抗的严重不匹配，对滤波性能有很大影响。采用多级滤波器可使这种情况得到一定程度的缓解。下面一张图是SCHAFNER公司的FN700Z三级高性能滤波器及其特性。从图中看，多级滤波器要明显优于单级，特别是在低频段的特性，多节滤波器要好得多，而且对 $0.1/100$ 和 $100/0.1$ 系统的滤波特性也大大优于单级滤波器。

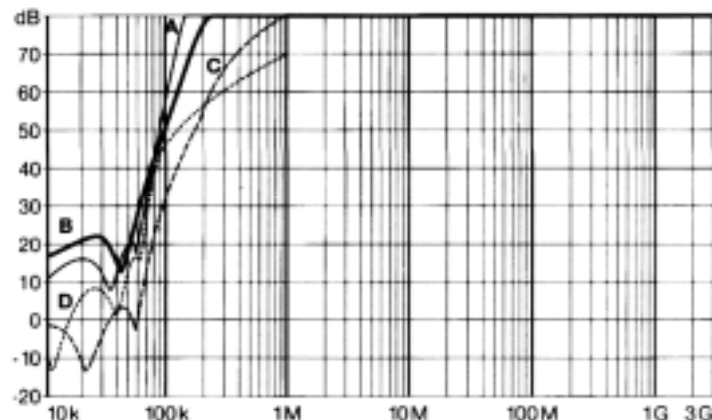
FN700Z三级高性能滤波器及其特性：



6 amp



10 amp



参照CISPR17：A = 50 /50 差模；B = 50 /50 共模；C = 0.1 /100 差模；D = 100 /0.1 差模

7.4 滤波器在有浪涌电压的场合下使用

普通滤波器对浪涌电压（特别是能量大、前沿长、持续时间长的浪涌）效果很差，这可以从阻抗失配，以及在浪涌波的作用下磁芯产生严重饱和等原因来解释。在滤波器里添加气体放电管和压敏电阻（也可以在滤波器外连接），用以改进滤波器对浪涌电压的抑制能力是个好办法，其实例已见于措施 的多级滤波器线路。一旦浪涌电压超过压敏电阻的压敏电压，压敏电阻便由平时的高阻抗（近似于电阻断开的情况）迅速转变为低阻抗，这样浪涌波就被箝位在压敏电压附近，浪涌波的大部分能量就通过压敏电阻被泄放掉，让设备得到了保护。

7.5 新型软磁材料的使用

滤波器低频段特性差的原因是受材料（铁氧体）的体积、重量、性价比、以及铁氧体的动态导磁率的限制。新型磁性材料（如纳米晶）的使用，它的高导磁率使滤波器在低频段仍有高的电感量，从而改进了滤波器在低频段的插入损耗。另外，高的饱和磁感应特性（ B_s ）使磁芯在大的脉冲电流下仍不致进入饱和区，而保持高的电感量和插入损耗。再有，高的材料居里点可使滤波器有较好的热稳定性。因此，用纳米晶磁芯和铁氧体磁芯做成的两级滤波器有可能做成宽频带、高插入损耗并兼顾滤波器的体积、重量和性价比等指标的高性能滤波器。

7.6 加接有损元件来改进普通滤波器的高频特性

普通滤波器是用电容和电感等无损元件来构成的，实际上是把阻带频率的信号反射回信号源。因此，普通滤波器又称为反射滤波器。当滤波器和信号源阻抗不匹配时，部分频点上的信号能量有可能被多次反射，使干扰电平加强。在滤波器上加接有损的铁氧体磁环、磁珠（套在滤波器的进线上）有望改进滤波器的高频滤波特性。有关铁氧体抗干扰磁芯的内容在本次讲座里另辟专题加以说明。

8 滤波器使用时的注意事项

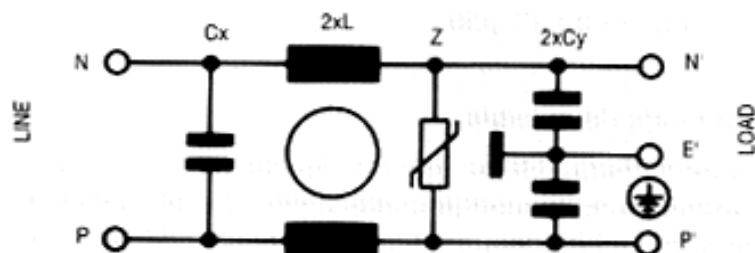
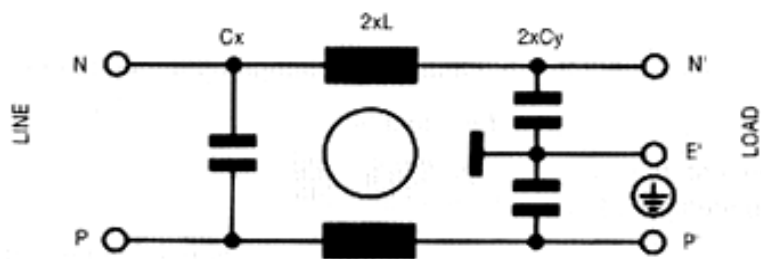
下面提出一些滤波器使用的注意事项：

- 1) 尽量选择有安全认证的电源线滤波器产品。
- 2) 选择滤波器除注意插入损耗外，还要注意额定电压和额定电流。工作电流超过额定电流时，不仅使滤波器过热，还会因电流过大造成磁芯饱和，造成实际电感量减小，影响低频段的滤波特性。
- 3) 滤波器要尽量安装在设备的电源线入口处，这样可使电网干扰一进入机箱就被滤除。同时，电源线的进线和出线要尽量远离，电源的进线与出线采用绞线，以避免高频干扰在线间直接耦合。为了体现滤波器的共模抑制作用，滤波器的外壳要可靠地接设备机箱，以及设备的机箱可靠与大地连接就显得至关重要。这里提到的一些做法对于防止设备内部产生的电磁骚扰经电源线向外传导和辐射发射也同样有效。

4) 滤波器对付高频传导干扰比较有效，而在对付雷击浪涌试验就不适用，必须在使用滤波器的同时配合使用压敏电阻等干扰吸收器件。在这种情况下经常碰到的问题是，浪涌试验通过了，而安全试验不过去了。事实上，采用压敏电阻的目的就是要对付超过正常电压的浪涌干扰，所以在作安全耐压试验时的工频高电压必然会使压敏电阻产生动作，造成耐压试验通不过的假像。正确的做法是，在做安全试验时应当将压敏电阻断开；而在做浪涌试验时再将压敏电阻接入。因为压敏电阻仅仅是用来对付浪涌电压，保护设备在浪涌的情况下不产生误动作，也不被击坏。

事实上，滤波器的制造商在对待有浪涌抑制和无浪涌抑制的滤波器的考核指标是完全不同的。通常无浪涌抑制的滤波器的P、N-E（火线、中线对地）耐压试验用2000VAC~2500VAC，P-N（火线对中线）用1700VDC或760VAC。一旦滤波器内部增加了压敏电阻后，考核指标就变了，今举SCHAFNER公司的FN332Z带浪涌保护的滤波器为例（见下一张图），它的P、N-E试验电压为2000VAC，而P-N为350VDC。又如FN700Z（高性能滤波器，在线间及线、地之间都带有浪涌保护，前面已经介绍过），规定P、N-E为590VAC，P-N为590VAC。这两种滤波器的耐压指标不同，可用内部浪涌抑制器件的参数不同来解释。

FN332Z带浪涌保护的滤波器：



型号	CX nF	CY nF	浪涌吸收 电流 A	吸收 能量 J	最大漏 电流 μ A/ 每相	最大工 作电压		工作 频率 Hz	测试电压	
						VAC	Hz		PN E VAC	P N VAC
标准 型	15	2.2	-	-	190	250	50/60	DC ~ 400	2000	1700
浪涌 保护 型	15	2.2	1200	26	190	250	50/60	DC ~ 400	2000	350

注：滤波电感：1A型为10mH；3A型为2mH；5A型为0.8mH；10A型为0.5mH。

5) 在电子产品小型化的今天，设计人员无一例外地希望滤波器的体积也越小越好。然而滤波器的体积主要是由滤波器中的电感决定，而电感的体积又取决于额定电流、滤波器的低频滤波特性。体积小的滤波器必然是在一定程度上牺牲了滤波器的电流容量或者低频特性。所以应当谨慎使用小体积的滤波器（用在干扰不是很大，且干扰频率偏低的场合）。

6) 在实际应用中，当发现电源线上有较强的电磁干扰时，往往会对原有的滤波器进行改造。常用的方法是增加两只对地的并联电容（这种做法是最容易的，即在滤波器的负载侧，火线对地和中线对地各加一个电容）。但有时会出现事与愿违的结果，即干扰问题反而比先前更严重。

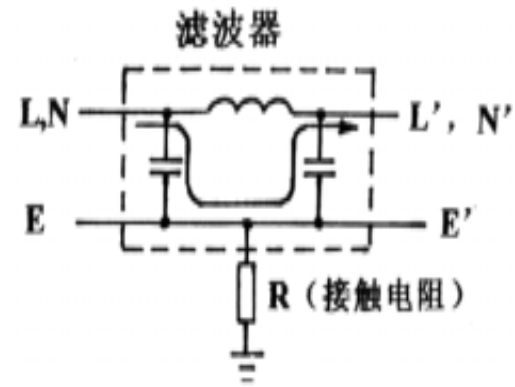
造成这种现象的原因有两个，一个是增加了电容后，引入了新的谐振点，造成滤波器插入损耗发生变差。其特征是所造成的干扰增强往往发生在频率较低の場合。

另一个是增加电容后，反而为干扰电流提供了一条旁路。对这种情况的分析可按照图1-11所示的意图，滤波器应通过两个电容的搭接而实现良好的接地。但由于滤波器壳与机箱之间，实际上是一个电容串到了输出端，使电感的作用减弱了。其特征是所造成的干扰增强往往发生在频率较高的场合。

对于后一种原因，如果不增加这个电容，就不构成型滤波电路，这时尽管滤波器的接地阻抗较大，但电感器多少还能起到一点衰减作用。

解决后一种原因的彻底方法是改善滤波器的接地，即要求滤波器与机箱之间实现良好的搭接，特别是射频搭接。

顺便指出，当设计人员对滤波器的搭接没有把握时，应当尽量避免使用型（或多级型）的滤波器。



另外，在滤波器“改造”中所加进的火线与中线对地电容，实际上还增加了设备外壳的对地泄漏电流，有可能会造成设备的安全指标超标，所以对这两个电容器容量的选择应当有所节制，不能任选。同样，在考虑了设备的工频耐压后，对这两个电容的耐压也有一定要求。基于这两方面的考虑，通常采用1nF、3kV（或耐压更高的）瓷片电容。当然，增加的这两个电容如果能用穿心电容，则可以获得比较理想的滤波效果。

7) 当考虑价格因素，要由用户自行搭制滤波器时，应注意这样一个事实，即滤波器的电路结构仅仅决定了它的低频特性，要想提高滤波器的高频特性，关键是制作工艺和器件的选择。

在内部结构上，滤波器的连线要按照电路结构向一个方向布置，在空间允许的条件下，电感与电容之间保持一定的距离，必要时，可设置一些隔离板，避免输入与输出之间有高频耦合。此外，滤波器的接地线要保持粗短，保证与地是低阻抗连接。

当用户要自行制作滤波器时，解决电磁干扰问题，除注意前面已经讲到的内容外，这里再提几点供在座各位参考：

电感器。为了控制电感的寄生电容，电感器尽量用单层方法绕制，必要时，可使用多个电感串联的方式来达到所需电感量。

对于共模电感，通常使用高频特性好的铁氧体材料来制作，由于抑制干扰的频率范围被定位在150kHz ~ 30MHz之间，故主要采用 μ 值为4000 ~ 10000的锰锌铁氧体。

对于差模电感，一般在滤波器里不单独采用，因为共模电感的两个线圈绕制的不对称，已经在共模电感里造就了一个寄生的差模电感，对差模干扰有一定的抑制作用。如果再存在差模干扰抑制不足，需要专门制作差模电感时，应考虑到差模干扰的频率一般偏低（例如在几MHz以下），以及工频电流流过差模电感时可能出现的磁芯饱和问题，故经常采用铁粉芯材料来制作差模电感。

差模滤波电容。电容的引线要尽量短（“短”意味着引线电感小）。要理解这个要求的含义：电容与需要滤波的导线（火线和零线）之间的连线尽量短。如果滤波器安装在线路板上，线路板上的走线也会等效成电容的引线。这时，要注意保证实际的电容引线最短。

共模电容。电容的引线要尽量短。对这个要求的理解和注意事项与差模电容相同。但是，滤波器的共模高频滤波特性主要靠共模电容保证，并且共模干扰的频率一般较高，因此共模滤波电容的高频特性更加重要。除了用高频陶瓷电容外，目前市上还有三端电容和穿心电容出售。使用三端电容可以明显改善高频滤波效果。但是要注意三端电容的正确使用方法。即，要使接地线尽量短，而其它两根线的长短对效果几乎没有影响。使用穿心电容，则滤波器本身的高频滤波性能可以得到更进一步的扩展。

在实际调试时，有时也能遇到自己制作的滤波器的滤波特性不尽人意的事情，就好像我们在介绍由于源阻抗、负载阻抗与标准规定的测试电路严重失配，滤波器衰减特性明显变差，甚至个别点上还出现衰减特性为负的，亦即在这些频点上，滤波器对干扰非但不衰减，甚至还出现了“放大”。解决这一问题的方法中，一个是改变滤波电路的参数，有意识将谐振频率移动到没有干扰的频率上；另一个是增加滤波器的电阻性损耗（降低Q值），具体办法是在差模电感上并联电阻，或在差模电容上串联电阻。

对用户自行设计的滤波器应遵循的设计原则是，不要过于追求滤波效果而造成成本过高，只要达到电磁兼容标准的限值要求，并有一定的余量（一般可控制在6dB左右）即可。

8) 三相电源滤波器

迄今为止，前面所讨论的都是单相电源滤波器，在结束本讲的时候，再举两例三相电源滤波器的结构，供有这方面需要的读者参考。下图是SCHAFFNER公司生产的FN256三相四线（三根相线加一根中线）滤波器和专供马达驱动用的FN251三相三线滤波器。

