



'2000 广州

中国电磁兼容标准暨质量认证 技术研讨会

标题：EMI 抑制滤波器的基本理论及应用

论文作者：樊文琪 高工

单位：信息产业部电子第五研究所质检中心

2000 年 5 月 14 日

EMI 抑制滤波器的基本理论及应用

引言 滤波是电磁兼容设计及电磁干扰对策的重要技术之一。目前电子元器件市场上有多种 EMI 抑制元件及现成的滤波器可供选择。EMC 工程技术人员应充分掌握滤波技术的基本原理和各种类型滤波器的基本特性和使用方法,根据实际工作中的具体情况合理选择滤波元件,设计有效的滤波器,从而实现 EMC 设计或 EMI 对策之目的。

1 滤波器的基本理论

1) 滤波的用途

电磁骚扰通过传导和辐射两种方式来传播。滤波即是为了抑制传导方式的电磁骚扰的一种技术措施。显而易见,由于良好的滤波直接抑制了骚扰能量在导线上的流通,所以它对通过载流导线的辐射骚扰抑制也能起到明显的抑制作用。不仅如此,滤波常常是屏蔽技术应用时必不可少的一个环节。

应用滤波技术抑制电磁骚扰,一般有两种情况。第一是自然需要,这是因为线路中某些零部件必然存在电磁噪声发射,需要做滤波的技术处理,这属于 EMI 设计的内容。第二是人为需要,在这种情况下,滤波即是针对产品前期设计不良而采取的一种应急措施,这应属于 EMC 对策的内容。对于后一种情况,势必引起产品制造成本上升,还有可能影响到产品的基本品质包括安全性和可靠性。所以,设计人员在产品的初始研发阶段就应该进行 EMC 设计,防止电磁噪声的产生和耦合,以尽可能从根本上解决电磁兼容方面的问题。

2) 滤波原理及滤波滤波器分类

滤波实际上是频域处理技术,即在线路中插入一种网络,该网络的转移阻抗是频率的函数,它使有用的频谱分量(如信号和有功功率)能够顺利通过,而限制无用的频谱分量(如噪声、信号的谐波及边带)的通过。根据对不同频段的信号或噪声通过或抑制的作用不同,可把滤波器分为低通滤波器(LPF)、高通滤波器(HPF)、带通滤波器(BPF)、带阻滤波器(BEF)和梳状滤波器(COMB-FILTER)等。由于大多数电子电器设备发射的噪声的频率往往高于有用信号的频率,因此,常见的 EMI 抑制滤波器多为低通滤波器。

3) 滤波元件

传统的无源模拟低通滤波器的基本组成单元是串联电感器、并联电容器和必要的串并联电阻器。一般地说,串联电感对低频信号和电源电流是低阻,而对高频噪声是高阻,由此限制了噪声的通过。并联电容对低频信号和电源电流是高阻,不形成低电阻短路,但为高频噪声提供低阻回流通道,因而可抑制高频噪声泄漏。电阻作为耗能或阻抗元件,合理地应用可吸收电磁噪声和改变线路阻抗。所以,可把 EMI 滤波器当作一个双端口网络来看,信号和低频噪声进入后,高频噪声得到抑制,从输出端口即可得到比较纯净的信号。

实际的滤波器可以是电感、电容单独使用,也可能是电感、电容及电阻混合使用,所以从结构上来分便形成了 C 型、T 型、L 型、 π 型甚至更复杂的多级滤波电路形式,如图 1。实际应用中应尽量采用结构简单的滤波器。这是因为按照网络理论,复杂电路结构形式的滤波器往往存在多个零点和多个极点,使用不当则易降低设备的工作稳定性。

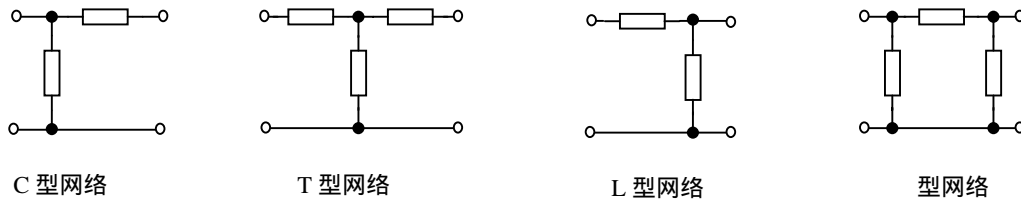


图 1 滤波器的结构形式

近些年，一些元器件生产厂商，如日本的 Murata（村田）、TDK 和瑞士的 Schaffner（夏弗纳）等，为 EMI 抑制专门开发生产了多种多样的产品，比如片状固态电容器、三端口电容器、片状铁氧体磁环与磁珠、共模扼流圈、环状同芯对称差模扼流圈等滤波元件，甚至还有应用起来十分方便的电源滤波器、块状组合式滤波器等。其实，这些新型元器件都可以等效为电感、电容、电阻或其组合，或者说它们是传统元器件的改进型，以更好地适用于 EMI 抑制的应用。

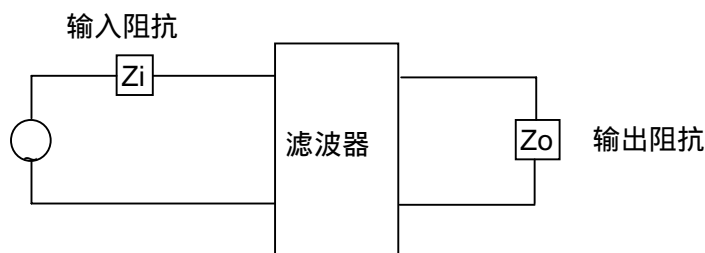
4) 滤波器的性能

通过简单的集中参数电路分析，我们可以得到滤波器的噪声抑制性能的理论值，但实际上并不存在理想的电容器、电感器和电阻器。随着频率的升高，由于分布参数或寄生元件特性的影响，滤波器的实际性能可能与理想情况相差较大。衡量一个滤波器的基本性能，一般是按照规定的方法测量其插入损耗，即分别在线路中插入和不插入滤波器的情况下，测量线路负载端的电压降——频率响应，两种情况下的测量值之比即为插入损耗。这种按标准规定的测量是在输入/输出阻抗为 50 Ω （即 50 Ω 系统）的条件下进行的。但是，在实际电路中输入/输出阻抗不会正好都是 50 Ω ，所以滤波器在线路中的实际特性与产品标称的“插入损耗”往往不同，这是使用时应该注意的。对于滤波器的性能测量，在应用中还有近似测量法和在线测量法，这样做是为了能更接近实际情况。

除了插入损耗外，选择滤波元件或滤波器时还应关注其阻抗特性、频率特性、额定电流与电压以及安全性、可靠性、外形尺寸、容量和体积等参数。

5) 滤波元件选择及滤波器应用的几点考虑

滤波器的输入、输出阻抗特性直接影响它的插入损耗特性。通常的情况下，在高阻抗电路中使用电容器来抑制噪声较为有效；而在低阻抗电路中使用电感器抑制噪声更为有效，如图 2 所示。使用电源滤波器时尤其要注意，应使输入、输出阻抗最大限度地失配，以获得最佳抑制效果。另外，比较而言，应用电感型的滤波器比较方便，因为电感器可直接串接在线路中，并不需要接地。而使用电容型的滤波器则需要将它跨接在信号线与地线之间，有时不仅应用不方便，而且可能因引线过长而影响使用效果。



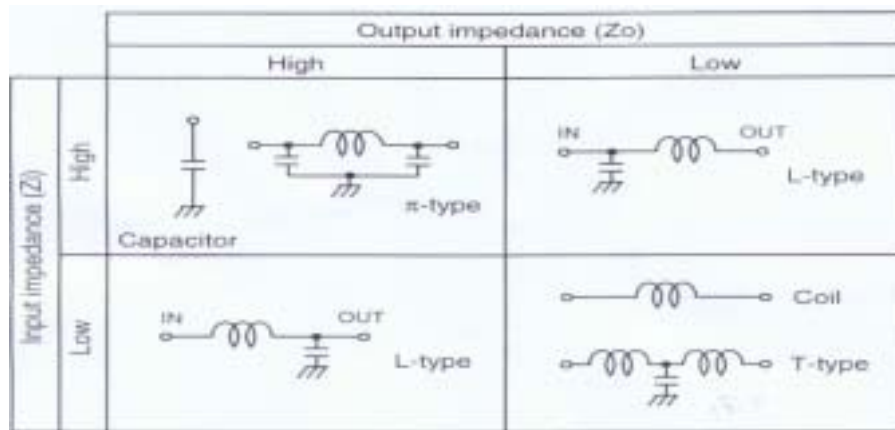


图 2 滤波器型式选择与源阻抗、负载阻抗之间的关系

差模噪声——它在信号线（或电源线）和接地线上以相反的方向进行传导，对这类噪声的抑制方法是在信号线上安装一个滤波器。而共模噪声——它在所有线路上都是同向传导的，对这类噪声应在每条携带噪声的线路上各安装一个滤波器。显然，对于共模噪声，若采用电容型滤波器将更显不便。

6) 滤波器的安装

滤波器的安装方法和工艺同样直接影响到滤波器的使用效果。安装时，一般应遵循以下原则：

选择适当的安装位置，一般地说电源滤波器应安装在设备或屏蔽壳体的入口处；

必要的情况下，应对滤波器加以屏蔽，其壳体与滤波器的地线相连。若设备具有金属外壳，则要求滤波器壳体与设备金属外壳良好搭接，并尽可能靠近设备壳体的接地点；

滤波器内部的各种引线（包括地线）及外部引线都应尽量短，以免在线路上耦合干扰，尤其要避免非屏蔽引线过长且暴露在强的电磁场中；

避免滤波器内部各电感、电容之间的不恰当耦合；

避免滤波器外部引线之间的耦合，一般要求其输入、输出两组引线不在同一侧引出，必要时在两组引线之间再加入屏蔽隔离层。

2 EMI 滤波元件与滤波器的种类及使用介绍

1) EMI 滤波元件与滤波器的种类

滤波器的种类繁多，除了一些传统的电感、电容及其组合外，还有多种新技术产品，其用法各不相同。根据应用场合不同，可把它们分为三大类：

在交、直流电源部分使用的滤波器：电源滤波器、磁环和磁珠等；

在信号线上使用的滤波器：信号滤波器、磁环和磁珠、穿心电容、滤波连接器（即滤波器阵列）等；

在印刷电路板上使用的滤波器：去耦电容、片状（表面安装式）滤波器、磁珠等。

2) 电容器与电容型滤波器

按照电容器内绝缘介质材料的种类，电容器可分为电解电容、纸介电容、聚酯酯电容、陶瓷（独石）电容、聚苯乙烯聚丙烯电容等，另还有新型的穿心电容、三端口电容等。不同类型的电容器其特性不同，它可能满足某一规范但不满

足其他规范。有时为了在较宽的频段提供滤波，经常将两种不同类型的电容器并联使用。表征电容器的主要技术参数包括：工作频率、寄生电阻、寄生电感、温度敏感性、失效方式以及容量与体积的比值等。只有首先掌握了这些特性，才能正确地选择滤波电容的种类及参数。

铝电解电容与钽电解电容

铝电解电容的容体比较大，串联电阻较大，感抗较大，对温度敏感。它适用于温度变化不大、工作频率不高（不高于 25kHz）的场合，可用于低频滤波。铝电解电容具有极性，安装时必须保证正确的极性，否则有爆炸的危险。

与铝电解电容相比，钽电解电容在串联电阻、感抗、对温度的稳定性等方面都有明显的优势。但是，它的工作电压较低。

纸介电容和聚酯薄膜电容

其容体比较小，串联电阻小，感抗值较大。它适用于电容量不大、工作频率不高（如 1MHz 以下）的场合，可用于低频滤波和旁路。使用管型纸介电容器或聚酯薄膜电容器时，可将其外壳与参考地相连，以使其外壳能起到屏蔽的作用而减少电场耦合的影响。

云母和陶瓷电容

其容体比很小，串联电阻小，电感值小，频率/容量特性稳定。它适用于电容量小、工作频率高（频率可达 500MHz）的场合，用于高频滤波、旁路、去耦。但这类电容承受瞬态高压脉冲能力较弱，因此不能将它随便跨接在低阻电源线上，除非是特殊设计的。

聚苯乙烯电容器

其串联电阻小，电感值小，电容量相对时间、温度、电压很稳定。它适用于要求频率稳定性高的场合，可用于高频滤波、旁路、去耦。

穿心电容（有时称作 Feed-through/旁路电容）

穿心电容的结构是地电极围绕在介质周围而信号线穿过介质。这种结构保证了它的电感值很小，高频性能极好，工作电流和工作电压也可以很高。它适用于高频及安装在屏蔽壳体上的场合。目前它被广泛应用于军用设备和移动通讯手机中。使用穿心电容时，应注意必须将其外壳良好接地，只有这样才能达到预期的滤波效果。见图 3。



图 3 Murata 公司生产的旁路电容及其等效电路和安装方法

三端电容

在高频线路中，因为一般的电容器的引线具有电感分量，所以影响了其高频特性。而三端口电容在结构上可以做到与电容器串联的剩余电感分量很小，因此其插入损耗特性优于两端口电容，从而改善了电容器的高频特性。三端口电容有引线式的和片状式的。见图 4。

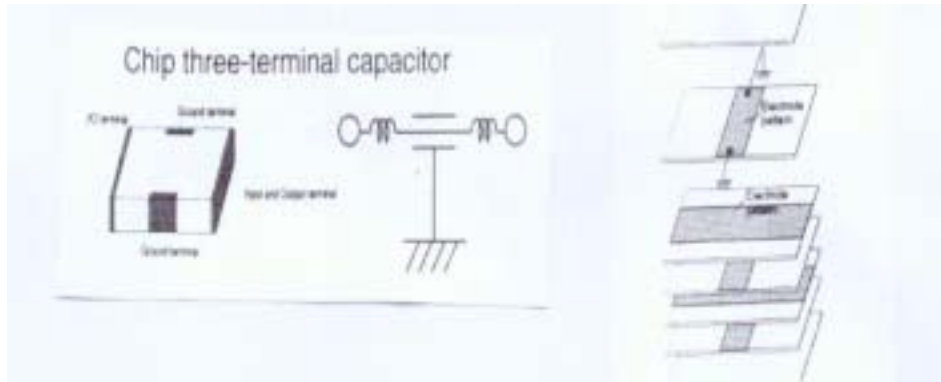


图4 Murata公司生产的三端电容及其等效电路

片状固态电容器阵列

片状固态电容器阵列可以看作是几个三端电容的集成，因而同样具有三端片状固态电容器一样的滤波特性。它也是通过其两端“地电极”而接地。村田公司现有4线、6线和8线式的片状固态电容器阵列供应。片状固态电容器阵列中各信号线之间的串扰很低，可达-40dB以上。显然，使用阵列式滤波器可明显简化印制板板的设计、减少对印制板的占用面积，同时也方便了滤波器的安装。见图5。

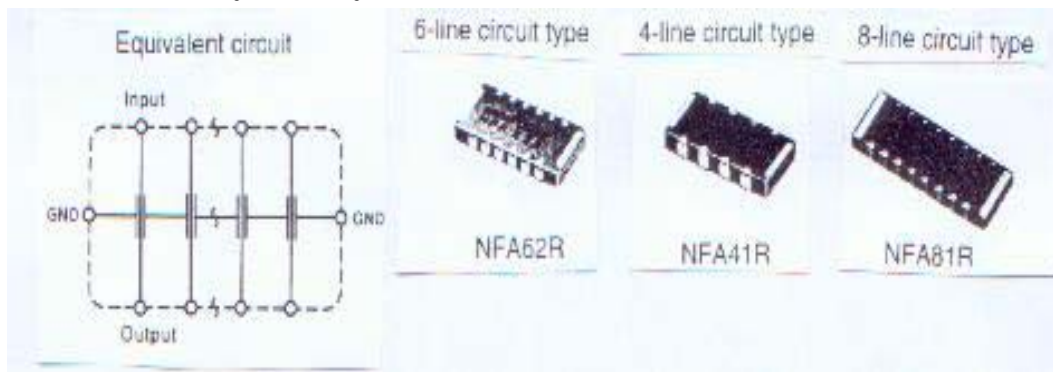


图5 Murata公司生产的片状电容器阵列及其等效电路

3) 电感器与电感型滤波器

线圈与其回流部分就可构成一个传统的电感器，通常有单线圈或多线圈式的。电感器可按其环绕的磁芯来分类，最常见的两种类型是空气磁芯和磁性磁芯。磁性磁芯电感器（简称磁芯电感）又可按其磁芯是开路或闭路作进一步分类。另外，目前广泛应用的铁氧体磁环（或磁珠），虽然在物理概念上讲起变压器的作用，它也更象一个随频率变化的可变电阻，但是人们通常还是把它当作电感器来考虑。

实际应用中的电感器，其绕制导线中必然含有寄生的串联电阻及绕线间的分布电容，因此应用中会在某些频率上产生谐振现象。衡量电感器性能的主要参数有：分布电容、有效电感、品质因数Q、自谐振频率和饱和电流等。这些都是应用中应该考虑的。

普通线圈式电感器

具有同样体积和匝数的开路磁芯电感比空气芯电感有大得多的电感量和Q值，闭路磁芯情况会更好。电感器的一个重要特性是产生杂散磁场和对杂

散磁场敏感。空气芯或开路磁芯电感器最容易引起干扰，因为其磁通从电感器扩展到相当大的距离。就对磁场的敏感度而言，磁芯电感器比空气芯电感器敏感得多，而开路磁芯是最敏感的，因为磁芯（低磁阻通路）集中了外部磁场并引起更多的磁通流过线圈。

普通电感型滤波器一般只用于低频滤波。在高频条件下，其插入损耗开始降低。这是因为随着频率的增加，当频率超过电感器的自谐振频率后，寄生电容的阻抗开始降低而引起电感器的阻抗降低。这样一来，高频噪声便得不到良好的抑制而通过电感器引起噪声泄漏。

铁氧体磁环电感器

空心铁氧体磁环可以套在导线上，而带引线的铁氧体磁珠则串联在导线中。带引线的铁氧体磁环具有简单的结构，如图 6 所示，因为通过磁芯可提供一个好的回流端，从而其寄生电容较小。不带引线的铁氧体磁环情况一样。所以，铁氧体磁环电感器具有良好的高频特性，其工作频率可达 1GHz 或更高。它可以应用在低阻抗电路中的高频滤波和去耦。

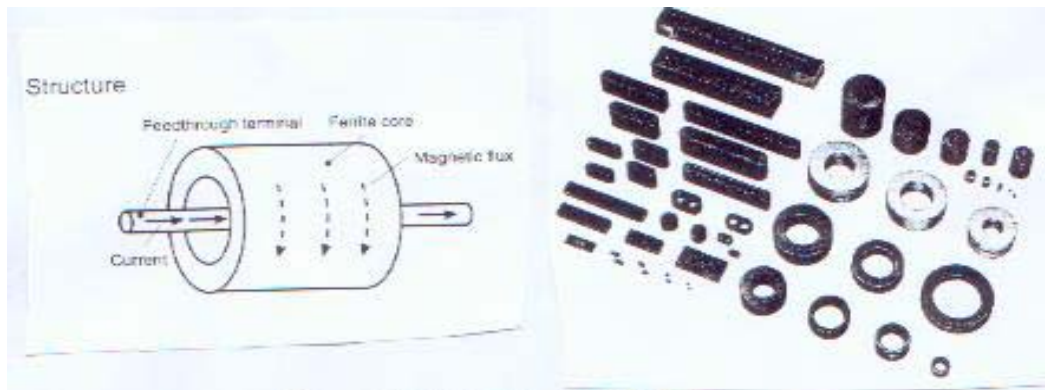


图 6 铁氧体磁环电感器的原理图

铁氧体磁环对抑制共模电流非常有用。如果配对的两根导线（信号线和地线）穿过铁氧体磁环，铁氧体磁环仅抑制不希望存在的 EMI 电流，而对有用的差模电流没有影响。铁氧体磁环套在同轴电缆上也同样有效。

铁氧体磁环最明显的缺点是阻抗不高。另外，在应用中还要注意到以下几点：

- a) 当环或珠的长度接近 $\lambda/4$ 时（ λ 为滤除噪声对应波长），它将变得无效。
- b) 铁氧体磁珠的端-端电容（典型值为 1~3pF）在某些频率上对其串联阻抗旁路，使其对噪声的衰减无效。
- c) 当磁感应强度超过一定范围时，铁氧体磁环出现饱和，效率降低。
- d) 当铁氧体磁环套在多根电缆上时，可能增加相邻导线之间的感性干扰。

片状铁氧体磁珠电感器

图 7 是一个片状铁氧体磁珠电感器的示意图。简单的片状铁氧体磁珠的内部引线是直线型的，所以它的阻抗值较小。而内部引线为盘绕式的片状铁氧体磁珠具有相对较高的阻抗值。

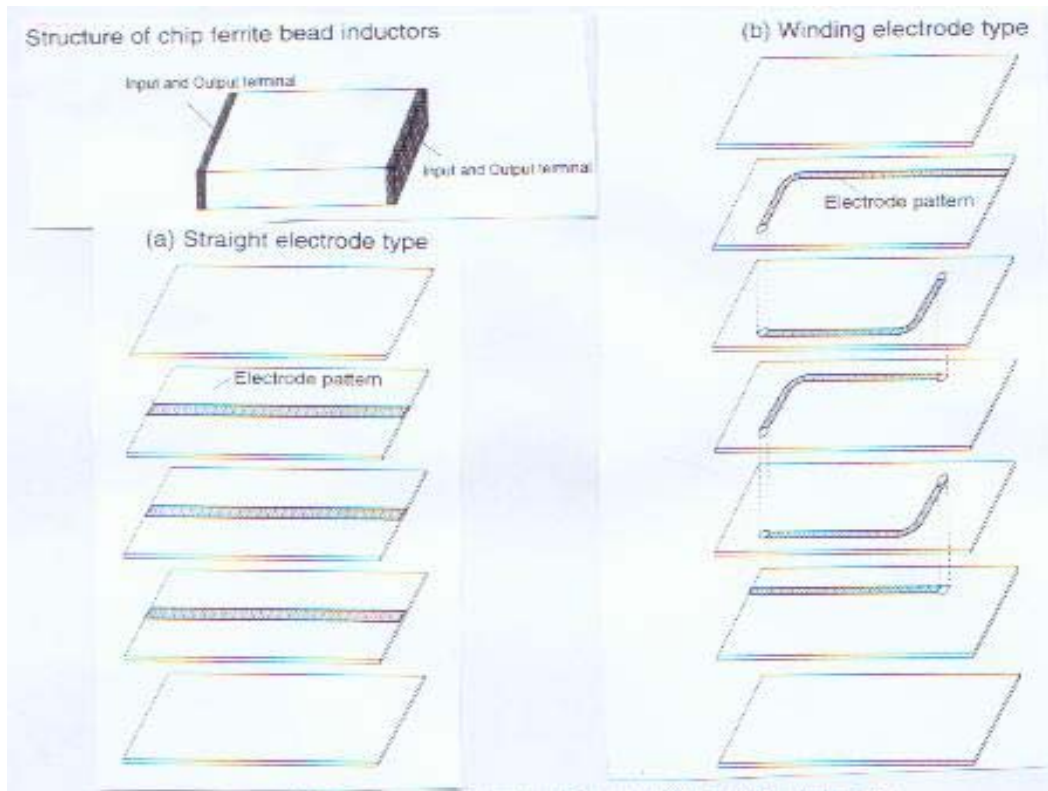


图 7 Murata 公司生产的片状铁氧体磁珠电感器

片状铁氧体电感器阵列

与片状固态电容器阵列一样，片状铁氧体电感器阵列也有 4 线、6 线和 8 线式的，同样也具有相似的优良特性。

交、直流扼流圈

共模扼流圈是由两个绕向相同、匝数相同的绕组及磁芯构成的电感器，一般常用双线并绕而成，如图 8 所示。信号电流或电源电流在两个绕组中流过时方向相反，产生的磁通量相互抵消，扼流圈呈现低阻抗。共模噪声电流（包括地环路引起的骚扰电流，也处称作纵向电流）流经两个绕组时方向相同，产生的磁通量同向相加，扼流圈呈现高阻抗，从而起到抑制共模噪声的作用。

在一些特别的情况下，电源滤波电路中也可能用到同芯闭环对称差模扼流圈，以抑制线路中频率较高的差模噪声。扼流圈在交、直流电源滤波电路和信号电路中都会用到。



图 8 共模扼流圈及其等效电路

4) 脉冲电压吸收器

对瞬态脉冲电压（如静电放电、浪涌、脉冲群等）的干扰，可采取滤波或吸收的措施。但滤波器对幅值较大的瞬态电压抑制能力有限，有效的办法就是采用脉冲电压吸收器。脉冲电压吸收器有避雷管、压敏电阻和瞬变电压吸收二极管（TVS）。目前市场上已有片状式的压敏电阻及 TVS 阵列供应。（因为严格地讲，脉冲电压吸收技术并不属于滤波的范畴，所以这里不再对其做详细介绍。如有需要，请参考相关资料及产品手册。）

5) 复合型滤波器

在实际应用中，若单一元件型滤波器达不到理想的滤波效果，就可以考虑使用复合型的滤波器。复合型滤波器可看作是若干个单一元件型滤波器的级联。现时市场上还有将几个滤波元件组合在一起的器件供应。下面对几种常用的复合型滤波器做简单介绍。

交流电源滤波器

典型的交流电源滤波器如图 9 所示。可以看出，它既可以防止从外部电源来的噪声进入设备，也抑制了设备自己的电磁发射进入共用电网。图示的这个交流电源滤波器用到了共模扼流圈以抑制共模噪声，另外还用到几个电容器。直接跨接在电源线两极之间的电容器用来抑制差模噪声，俗称 X 电容，而跨接在火线或零线与地线之间的一对电容器用来抑制共模噪声，俗称 Y 电容。

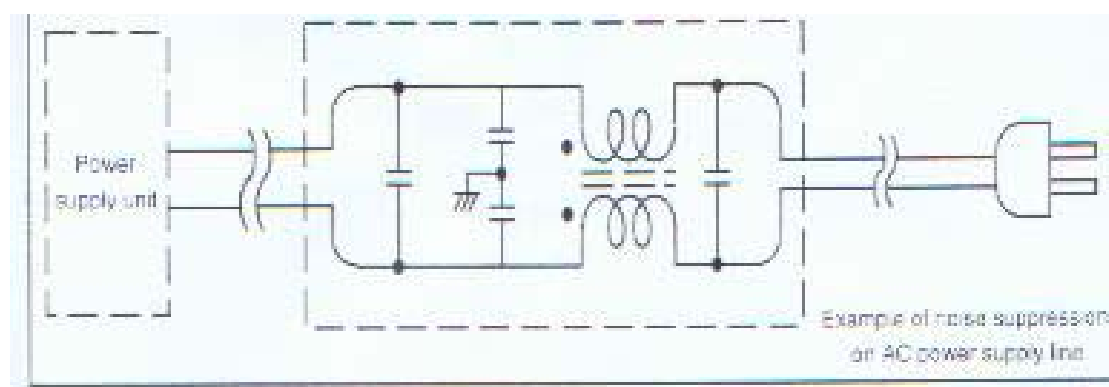


图 9 典型的交流电源滤波器的等效电路

信号线 EMI 抑制滤波器

信号线 EMI 抑制滤波器是特殊设计的品质优良的复合型滤波器件。图 10 所示的是村田公司的产品。用于高速信号线上的滤波器应具有“陡峭”的插入损耗特性曲线，要求它能将噪声从信号中分离出去，而不使信号波形产生失真。这是因为，在高速信号线中的噪声频率与信号频率比较接近，若采用三端电容器或其他简单的滤波器可能对信号和噪声同时进行压缩而造成信号波形的畸变。在这种情况下，就应采用特制的信号线 EMI 抑制滤波器。



图 10 Murata 公司生产的信号线 EMI 抑制滤波器

Block Type/块状型滤波器

这也是一种性能优良的滤波器件，它组合了铁氧体磁珠、穿心（旁路）电容和独石电容。它具有较高的额定电流和工作可靠性。图 11 所示的是村田公司的产品。



图 11 Murata 公司生产的 Block Type 滤波器

SMT T-Type/SMT T 型滤波器

如图 12 所示，这类 T 型滤波器是以三端电容为主体的组合了铁氧体磁珠的滤波器件。特别的设计和结构保证了它具有较高的额定电流和额定电压，并具有极宽的温度适应范围和工作可靠性。在有特殊要求的情况下，它特别适合在直流电源线和信号线上使用。



图 12 Murata 公司生产的 SMT T-Type 滤波器

具有浪涌吸收功能的 EMI 抑制滤波器

村田公司生产的这类型片状式的或引线式的三端滤波器，可以简单理解为压敏电阻与电容、电感的组合器件。见图 13。



图 13 Murata 公司生产的具有浪涌吸收功能的 EMI 抑制滤波器

其他特殊用途的滤波器件

目前市场上还有为一些特定用途而专门设计的滤波器件供应，详见其产品手册。