

# 抑制 EMI 的铁氧体电感元件

## Inductive Ferrite Components for EMI Suppressor

王耕福

**摘要**：综述铁氧体磁芯及其制成的电感元件在抑制 EMI 方面所起的作用、工作原理，以及元件阻抗特性的各种影响因素，并介绍了近年来开发的抑制 EMI 的各种新型电感元件及新的应用。

**关键词**：电磁波干扰 (EMI)，铁氧体，电感元件

中图分类号：TM55 文献标识码：B 文章编号：1606-7517(2015)07-6-109

### 1 引言

随着电子技术飞速发展，电磁波干扰 (EMI) 问题越来越引起人们的重视。电磁波干扰 (又称噪声) 会造成通信障害、图象畸变，数据错误，从而引起电子设备的误动作。各种电气和电子设备往往是噪声发生源。线性电源向开关电源转变，随着开关频率不断提高，增加了高频谐波干扰；一台计算机内部充满了不要的电磁波，时钟频率达 GHz 领域的计算机，已成为噪声主要发生源；空间各种无线电杂波，通过天线或传输电缆线、宽带信号接口进入电子设备，并使传输图象发生畸变。不易受外来噪声干扰又不向周围发射噪声已成为各种电子设备必须达到的要求。在这里，抑制 EMI 的元件是必不可少的。而铁氧体电感元件优良的抗噪声特性，已成为抑制 EMI 最重要并已获得普遍采用的电磁元件。

噪声传播方式主要有传导和辐射二种。传导噪声往往从电源线、信号线或地线进入，主要有差模型和共模型两种。差模噪声电流与信号电源同相位，且呈现低频特性，通常在几百 kHz 以下；共模噪声电流与相线、零线同相位，并和大地形成回路，具有高频特性，通常在几 MHz 到 30MHz，且共模干扰随频率提高而增大。辐射噪声往往从设备壳体缝隙或传输电缆线向外发射，也可从电缆线、天线、电源线、信号线或者 PCB 基板侵入设备，辐射噪声频率往往在 30MHz 以上，直到 GHz 频段。必须指出，辐射噪声侵入传输线后也会转为传导噪声。此外，电子设备内部的静电耦合和电磁耦合使噪声扩展。干扰源可能是瞬时的、随机变化 (如通信、广播传输)，或者是周期性信号 (如开关电源)。

前者频谱是连续的，后者呈线状谱；实际二者都是宽频带的，即由基波与高频谐波组成。对于辐射干扰，可采用导体或电磁体屏蔽方法予以抑制；对传导干扰则采用吸收、反射或旁路方法抑制。铁氧体磁芯及电感元件具有屏蔽、吸收、反射噪声的作用；而且具有宽频带、阻抗一频率曲线可调节等优点，可解决传导干扰、辐射干扰的很多问题，因此几乎可用于抑制 EMI 的任何方面。例如在导线或传输电缆线上可套上铁氧体磁珠，管形磁芯或夹钳型电缆磁芯进行屏蔽和抑制传导干扰；在 PCB 板上可串联磁珠电感器、积层型片式磁珠、SMD 扼流圈等元件来抑制干扰；在电源线或信号线输入端，宽带信号或多媒体接口中，可采用铁氧体磁芯制成的共模扼流圈抑制 EMI。此外，在汽车电子装置或整流马达导线上使用开路磁芯电感器可抑制高频电火花引起的 RF 干扰。

### 2 铁氧体磁芯的阻抗一频率特性

软磁铁氧体材料特征是在低频时呈现低损耗，并有恒定的磁导率；截止频率时磁导率迅速下降，损耗增加，并在铁磁谐振频率损耗达最大值。当导线穿过铁氧体磁芯组成穿芯磁珠电感器时，在电路中可看作一个绕组电阻  $R_N$ 。磁芯损耗电阻  $R_s$  和电感  $L_s$  串联组成。当主要考虑磁芯损耗时，可将  $R_N$  忽略不计。于是在串联等效电路中，复数阻抗  $\bar{Z}$  包括损耗电阻  $R_s$  和感抗  $j\omega L$  两部分：

$$\bar{Z} = R_s + j\omega L = R_s + jX_L \quad (1)$$

$$\bar{Z} = \sqrt{R_s^2 + (\omega L)^2}$$

式中： $\omega = 2\pi f$

$$X_L = \omega L$$

图1示出铁氧体穿芯磁珠的阻抗-频率关系曲线。看到在低频时感抗  $X_L$  呈现最大值，高频时阻抗几乎全部成为电阻性的，此时铁氧体磁芯可看作随频率变化的电阻器。利用铁氧体磁芯低频的感抗特性，可阻碍（或反射）不希望干扰杂波；高频时电阻性特征可吸收 EMI，转化成热量散射。

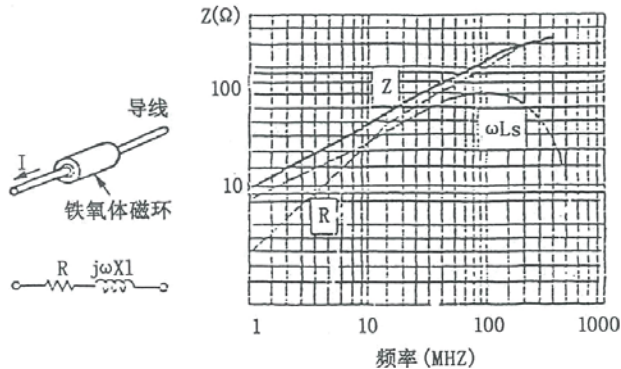


图1 铁氧体磁珠的阻抗-频率特性

铁氧体磁芯的阻抗-频率特性与铁氧体材料磁导率和损耗特性有密切关系。在高频时铁氧体磁导率呈现复数特性，串联复数磁导率  $\bar{\mu}$  通常由实部  $\mu_s'$ （代表感抗）和虚部  $\mu_s''$ （代表损耗）组成，可表示为：

$$\bar{\mu} = \mu_s' - j\mu_s'' \quad (2)$$

$$\text{损耗角正切 } \tan \delta = \frac{\mu_s''}{\mu_s'}$$

$$\text{而感抗 } \omega L_s = \omega L_0 \mu_s'$$

$$\text{损耗电阻 } R_s = \omega L_0 \mu_s''$$

则串联阻抗

$$\bar{Z} = R_s + j\omega L_s = j\omega L_0 (\mu_s' - j\mu_s'') \quad (3)$$

式中： $L_0$  是空心电感值

$$L_0 = \frac{4\pi N^2}{C_1} \times 10^{-7} \text{ (H)} \quad (4)$$

$C_1$  是磁心有效参数  $C_1 = \frac{l_c}{A_c}$  (1/m)

$l_c$  是磁心有效长度 (m)

$A_c$  是磁心有效截面积 (m<sup>2</sup>)

$N$  是线圈匝数

阻抗绝对值

$$|Z| = \omega L_0 \sqrt{\mu_s'^2 + \mu_s''^2} \quad (5)$$

或

$$|Z| = 4\pi N^2 \omega \frac{A_c}{L_c} \sqrt{\mu_s'^2 + \mu_s''^2} \quad (6)$$

上式可见，铁氧体磁芯的阻抗与材料磁导率 ( $\mu$ ) 有关，而且与磁芯几何尺寸 ( $A_c/L_c$ ) 和匝数 ( $N$ ) 有关。

图2示出铁氧体材料的复数磁导率-频率关系和阻抗-频率曲线的比较，通常阻抗最高峰出现在铁氧体截止频率  $f_r$  的附近。因此阻抗峰值频率与磁导率关系符合 Snoek 定律，即高磁导率材料阻抗峰值频率较低，低磁导率材料阻抗峰值频率较高。图3是荷兰 Ferroxcube 公司某些 MnZn 铁氧体材料阻抗峰值频率与磁导率关系，图中各种牌号对应的磁导率值见表1。

图4是部分 NiZn 系铁氧体材料的阻抗-频率曲线。通常 MnZn 系铁氧体材料有高的磁导率和低的电阻率。可

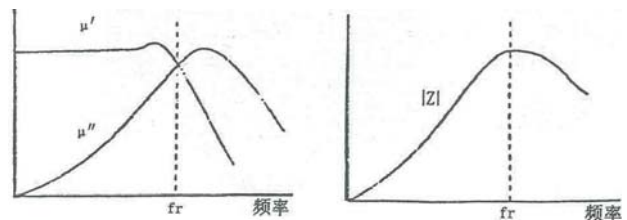


图2 磁导率、阻抗与频率关系曲线

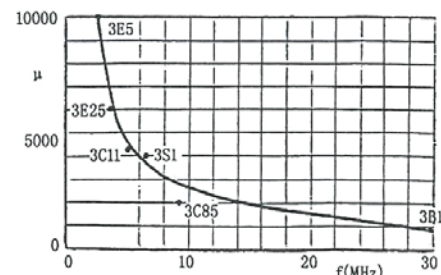
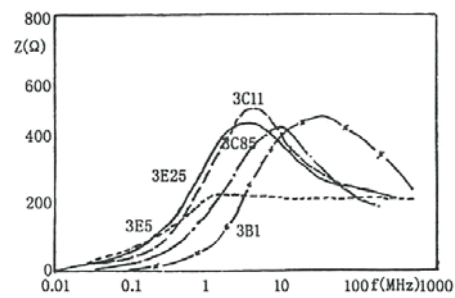


图3 MnZn铁氧体阻抗峰值频率与磁导率  $\mu$  关系 (Ferroxcube)

表1 荷兰 Ferroxcube 公司材料牌号

牌 号	初磁导率 $\mu_i$	材 料
3E5	10000	MnZn
3E25	6000	MnZn
3C11	4300	MnZn
3S1	4000	MnZn
3C85	2000	MnZn
3B1	900	MnZn

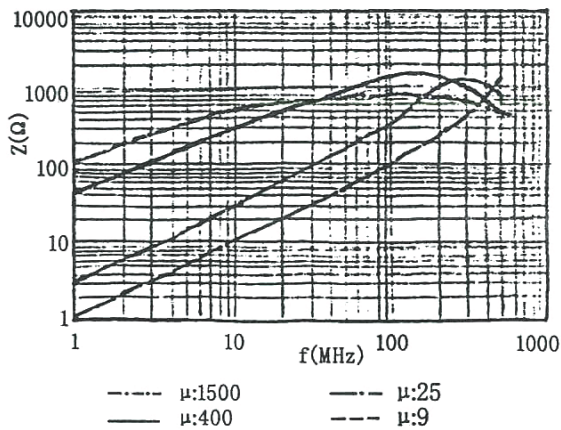


图4 部分NiZn铁氧体材料阻抗—频率曲线

有效抑制 20MHz 以下的低频杂波干扰；而 NiZn 系铁氧体材料有低的磁导率和高电阻率，在 20MHz—1GHz 高频对抑制 EMI 有重要作用。

### 3 磁芯尺寸对阻抗特性的影响

抑制 EMI 的铁氧体磁芯通常采用环形或磁珠型磁芯。对环形磁芯来说，当外径为  $D$ ，内径为  $d$ ，高度（厚度）为  $h$  时，磁芯另件有效参数表示为：

$$C_1 = \frac{l_c}{A_c} = \frac{2\pi}{h \ln \frac{D}{d}}$$

根据公式 (3)，得到

$$L_0 = \frac{4\pi N^2 \times 10^{-7}}{C_1} = 2hN^2 \ln \frac{D}{d} \times 10^{-7}$$

或

$$L_0 = 4.6N^2 h \cdot \lg \frac{D}{d} \times 10^{-7} (\text{H}) \quad (7)$$

将公式 (7) 与公式 (5) 相结合可见，铁氧体环形电感器的阻抗正比于磁芯高度（环形厚度或磁珠长度）及外径 / 内径比值。两倍长度的磁珠则其阻抗也为两倍，但改变环形磁芯外径 / 内径比值两倍时，阻抗只增加约 40%。图 5 示出磁珠和管形磁芯尺寸对阻抗特性影响。对相同材料的磁芯，当长度增大时，阻抗  $Z$  明显增大了，当采用双孔或多孔磁芯来代替单孔磁珠型磁芯时，阻抗  $Z$  也明显增大了，如图 6 所示。

### 4 DC 和低频交流偏磁对阻抗的影响

在大的直流或低频交流偏磁作用下，任何磁性材料性能将下降。当大的 DC 偏磁与交流磁化叠加在一起时，铁

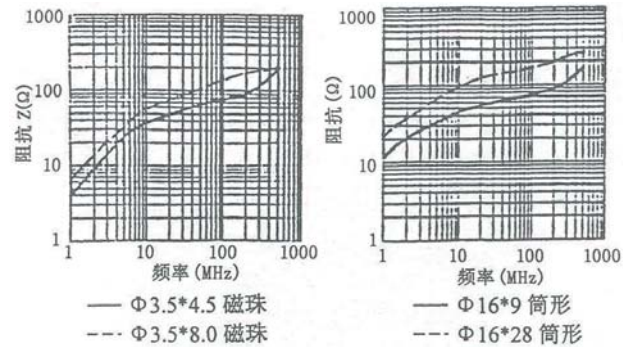


图5 磁芯尺寸对阻抗—频率特性影响

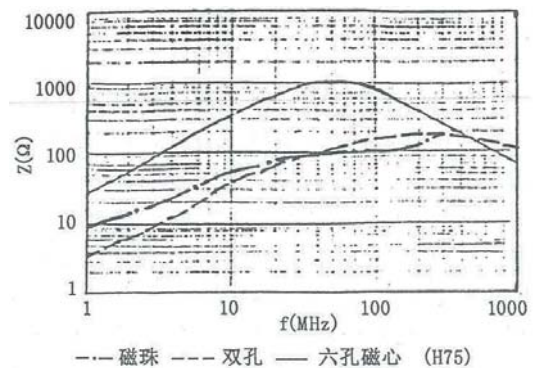


图6 铁氧体磁珠和多孔磁芯阻抗特性

氧体材料磁导率将下降。若磁芯工作于饱和区域时，磁导率  $\mu$  趋近于 1（接近自由空间），结果铁氧体的阻抗作用猛烈下降。磁芯提供很小的噪声衰减作用。图 7 是片式磁珠 DC 偏磁对阻抗特性的影响，当 DC 偏磁从 0mA 增大到 500mA 时，阻抗最大值从 600Ω 下降到 400Ω 左右，而且阻抗峰值向高频方向移动。

### 5 电缆线上的铁氧体磁芯

数字设备的输入 / 输出电缆线作为一个小天线，将电

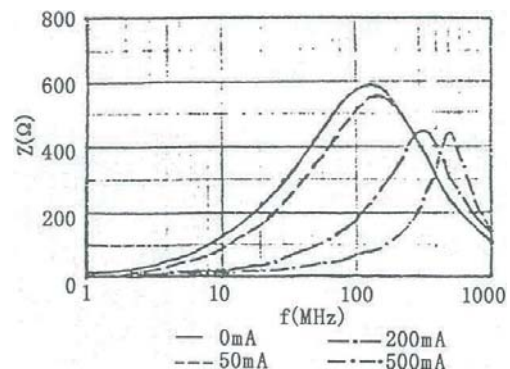


图7 DC 偏磁对磁珠阻抗特性影响

子设备内部的噪声传导或辐射到设备壳体外，同时接收外来的辐射噪声干扰数字设备动作，如计算机与周边设备的连结电缆飞传真机或 OA 设备的电缆线上都有噪声干扰问题。用环形铁氧体磁芯（或套筒形磁芯）或扁环形磁芯（见图 8）套在圆形电缆线或扁形电缆线上，可对传导干扰或辐射干扰起有效抑制作用。多股电缆线的特征是同相位的噪声电流沿电缆线以相同方向流动，在磁芯内部感应出相同方向的磁场。铁氧体磁芯的阻抗作用使噪声能量转换成热量而消散；对于从信号线进入而从地线回程的正常信号由于磁场方向相反而抵消，传输不产生影响（见图 9）。

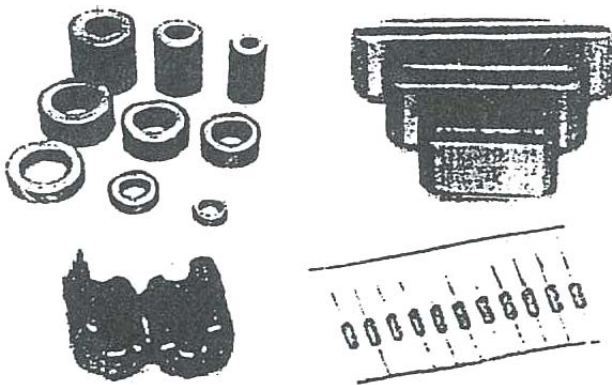


图 8 抗干扰铁氧体磁芯

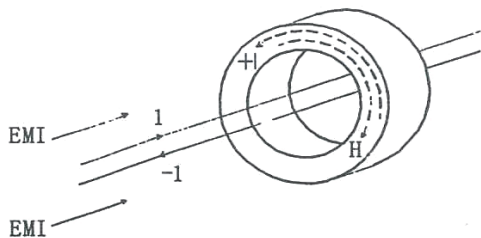


图 9 电缆铁氧体磁芯抑制 EMI 原理

电缆线上的铁氧体磁芯通常选择较高磁导率的 NiZn 系铁氧体材料，可有效地起到屏蔽和抑制传导共模噪声的作用。铁氧体环形磁芯的内径应尽可能与电缆线或导线束的外径相密合，可减少漏磁对阻抗的负作用。提高阻抗可增大铁氧体磁芯长度。对安装在软电缆线上大质量的铁氧体磁芯为防止损坏，可用热缩性树脂封装或用塑料壳体保护。如一种夹钳形电缆磁芯，是用两个半磁环组合后，外装塑料壳体组成（见图 8）。对柔性电缆线也可用大直径环缠绕几匝来提高阻抗。

图 10 示出增加匝数后环形磁芯阻抗增大的情况。但过

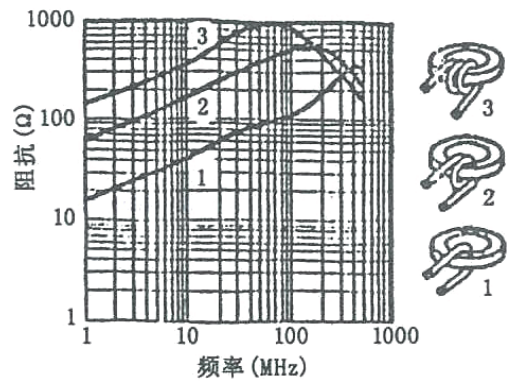


图 10 匝数对环形磁芯阻抗特性影响

多的匝数会增加匝间电容，降低高频阻抗，通常对单一零件匝数不超过 3 匝为好。

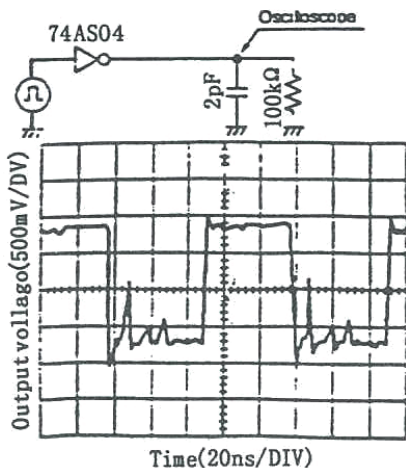
## 6 印刷线路板上的铁氧体磁珠

铁氧体磁珠适于中等电平信号的传导通路中作用，主要有铁氧体串芯磁珠，积层型片式磁珠和磁珠排。它们串在导线上作滤波元件，或者粘贴在印刷线路板上，起抑制传导噪声和屏蔽辐射噪声等作用。例如，已经日益普及的个人计算机、游戏机等均需提供色彩鲜明、清新的图象。计算机的数字信号要通过数字—模拟转换器转换成高速模拟信号输出给图象显示器。由于计算机时钟振荡器和电路杂散电容容易激起高频噪声，因此常常在时钟振荡器电源输入端应用铁氧体磁珠来抑制 EMI；同时为防止不希望的噪声干扰图象，在数字—模拟转换器输出端也常将一个铁氧体磁珠和一个滤波电容相并联，以提供高频噪声滤波。

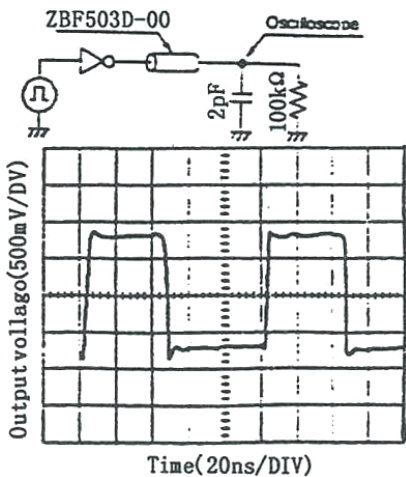
在计算机的电源部分，整流二极管从导通到关断，在电源输出电路上会感应出大的快速瞬态的电压脉冲或“尖峰”，并形成数倍开关频率的谐波噪声。如果在整流二极管的导线上串接铁氧体磁珠，由于铁氧体磁珠的高阻抗，可减缓二极管电流的变化速度，减少感应的 EMI 和消除脉冲波形的“振铃”现象。以图 11 所示，串入铁氧体磁珠后，脉冲波形畸变减少了。

此外，在计算机多路数据输入 / 输出线上，插入片式磁珠排，可提供 4 线或 8 线噪声滤波，这样比单一片式磁珠有更小的安装空间，并节省组装时间。

今后，携带电话、无线 LAN 使用频率向 GHz 频段发展。GHz 频段的噪声不仅在导线中传播，而且向周围空间发射。新发展的片式铁氧体磁珠，采用特殊的铁氧体材料和螺旋线结构，可实现 GHz 频段的高阻抗，同时尺寸进一



(a) 未加铁氧体磁珠



(b) 串入铁氧体磁珠后

图 11 串入铁氧体磁珠对脉冲波形的影响

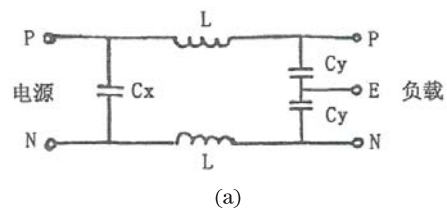
步向微小化发展，如已出现 0603 型 (0.6\*0.3mm)、0402 型 (0.4\*0.2mm) 的微小磁珠。另外，DVD 放象 / 录象机的出现，对图象要求高质量，而光信号受 EMI 影响会使图象品质恶化，在光传感器部分使用高频铁氧体磁珠也已成为必不可少 EMI 抑制元件。

## 7 电源线上的共模扼流圈

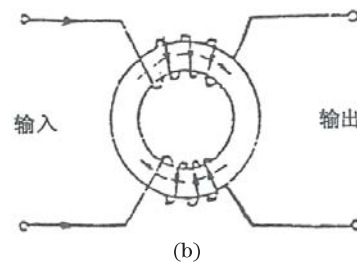
开关电源在各种电子设备中已广泛采用。开关晶体管是最强的噪声发生源；由于开关电压变化产生差模噪声，而电源线与大地形成电容耦合时则产生共模噪声。当测试其合成噪声时发现，低频带 (10kHz- 数 100kHz) 噪声成分受差模支配，高频带 (数 100kHz-50MHz) 噪声受共模噪声支配。随着开关频率提高，辐射噪声增强。电源电缆

线中差模噪声电流在往复二根线中产生的磁场相互抵消，因此电源电缆中辐射噪声几乎全部为共模噪声成分。

为抑制 EMI，电源线滤波器通常由铁氧体磁芯制成的共模扼流圈与 CX、CY 电容器组成 (如图 12a 所示)。共模扼流圈与两个 CY 电容器组合，可抑制共模噪声，而 CX 电容器可实现差模噪声衰减。共模扼流圈是绕在铁氧体环形磁芯 (或日形等闭合磁路) 上两个相同匝数的绕组组成。绕组方向是这样设计的：相同方向的共模噪声电流经相线和零线进入扼流圈时，因磁场叠加产生大的电抗；而从相线输入、经零线输出的差模信号电流，则因大小相等方向相反磁通的相互抵消而不受影响 (图 12b)。实际当两个线圈匝数有误差时，对差模噪声电流也产生小的阻抗作用。图 13 是实际生产的共模扼流圈的阻抗一频率曲线，看到在低频呈现大的共模阻抗和小的差模阻抗值。电源线共模扼流圈有插针型和表面贴装型两种。AC 电源线常采用插针型，可通过最大电流达 30A；DC-DC 模块式电源为



(a)



(b)

图 12 共模噪声滤波器原理图

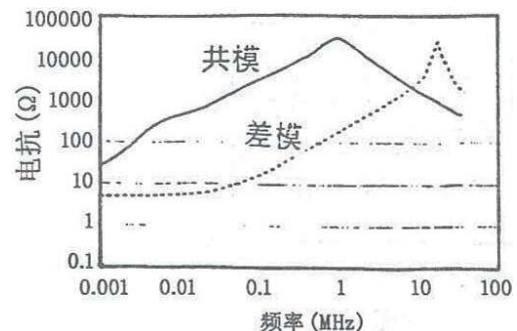


图 13 共模扼流圈的阻抗一频率曲线



图 14 电源线共模扼流圈外形结构

减小尺寸，通常采用表面贴装型(SMD)的电源线扼流圈，最小尺寸有 3225 型、4532 型，高度为 2—3mm，可通过最大电流达 10A。主要用于笔记本电脑等薄型电子设备中。图 14 示出部分 SMD 共模扼流圈的外形结构。

电源线共模扼流圈的铁氧体磁芯，常采用高磁导率 MnZn 系铁氧体材料，其磁导率通常为 5000—15000，在 10kHz—30MHz 有高的阻抗。前面图 3 已示出不同磁导率的铁氧体材料，其阻抗最高峰出现在不同的频区。磁导率为 10000 的 3E5 材料，阻抗最高峰在 1MHz 附近；磁导率为 2000 的 3C85 材料，阻抗最高峰在 10MHz 附近；磁导率为 900 的 3 1 材料，阻抗最高峰在 30—40MHz 附近。应根据实际使用要求来选择不同铁氧体材料。磁芯形状应采用闭合磁路，以减小漏磁。环形磁芯应用较普遍，因为有低的价格和漏磁最小，但绕线只能采用手工或专用绕线机；日字型磁芯最近得到广泛采用，因为可用骨架绕组，提高了生产效率；且两组线圈之间可用隔板分开，改善了绝缘特性。表面贴装型电源扼流圈，可采用工、环型组合磁芯。

## 8 信号线上的共模扼流圈

信号线共模扼流圈通常采用表面贴装型(SMD)，品种很多，主要有绕线型和薄膜型两类。一般信号的共模噪声抑制可采用绕线型 SMD 共模扼流圈。近年来，随宽带接入技术发展，数字用户线(XDSL)接口中常需用这类 SMD 共模扼流圈，可阻碍噪声通过以保证无畸变地传输宽带数字信号。在调制解调器(Modem)、电话线分离器中也得到采用。

随着汽车电子发展，车载局域网(CAN)在高级轿车中得到采用。由于 CAN 导入可使控制系统的电线束数量和重量大幅度减少。CAN 的传送电缆是使用绞扭线，用所谓“差动传送”方式进行高速数据传送。考虑到车载电子设备中 IC 和振荡回路元件成为噪声发生源，以及电缆线较长时，

信号传送过程中会产生位相误差和振幅不同产生不平衡成分，电缆线作为“天线”还会接收或发射噪声，因此必须在电缆线结点处插入共模滤波器作为噪声抑制元件。考虑到汽车动作过程严酷的环境条件，SMD 共模扼流圈应能经受 -40℃—+150℃ 温度，并在振动条件下工作，因此必须采用温度特性好的铁氧体磁芯制成结构可靠的绕线型共模扼流圈。

关于薄膜型 SMD 共模扼流圈，具有小型、轻量，电极间距小等优点，更适合高密度组装的小型、薄型、便携化的电子设备抑制共模噪声要求。作为计算机与其周边设备、数码相机等均使用高速差动传输接口，如。IEEE1394、USB2.0 等，对于传送 400Mbps、重复频率为 200MHz 的脉冲波，如果仅使用阻抗为 10Ω 程度(100MHz)的铁氧体磁珠，不能期待完全阻止噪声；如果插入阻抗为 2000Ω(100MHz)的共模滤波器，则对噪声抑制效果大。而对高速差动信号无影响。图 15 示出在高速差动信号传输路线上插入共模扼流圈的效果模拟图。对共模滤波器要测定其共模阻抗和差模阻抗值。适当的共模阻抗值对差动信号几乎无影响，但共模阻抗过大也会引起高速信号波形畸变；差模阻抗应尽可能小，否则会引起信号波形畸变或衰减，发生动作误差。如对传送 400Mbps 信号，共模阻抗值应在 160Ω—200Ω(100MHz)，差模阻抗应有 15Ω—以下(100MHz)。

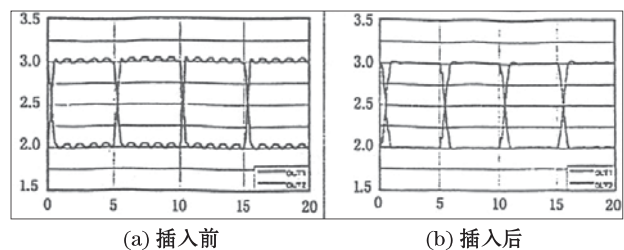


图 15 信号线共模滤波器插入后的效果

随着数字电视开始发送和使用，用于数字电视、DVD 等数字式 AV 机器相互连结的是高品位多媒体接口(HDMI)。HDMI 可将高清晰度视觉信号和多通道的音频信号非压缩性地高品质传送，为防止信号畸变，共模噪声滤波器是必不可少的。由于 HDMI 最大数据传送速度是 USB2.0 的三倍以上，对共模滤波器增加了高频特性要求。图 16 示出经过改进的共模滤波器(虚线所示)，高速差动信号可无畸变传送(插入损耗小于 3)频段已扩大到 6GHz。

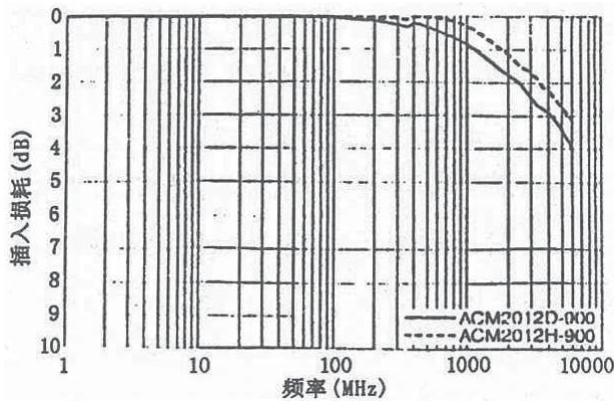


图 16 共模滤波器扩大传送频率 (TDK)

参考资料：

- (1) Ferroxcube "Application Note" 2002. 7
- (2) steward Technical Information "Use of Ferrites"
- (3) TDK Science Box 2005.1
- (4) 中村晃 "TDK Technical Report" 2003.3
- (5) TDK Techno Magazine vol. 13. 2004