

抗传导EMI滤波器及其软磁铁氧体材料

须 栋
上海依林磁业有限公司

摘要：本文就（计算机、电子镇流器等电子电器共有的）电子电路中抗传导EMI滤波器及其铁氧体软磁材料做一讨论，意在正确选择，保证电路品质。

关键词：EMI滤波器，传导，铁氧体，阻抗，选择

1 引言

抑制电磁干扰基本方式有：第一种，屏蔽或吸收—用电磁波吸收材料或屏蔽材料把导体、元器件或电路设备从散射的电磁场中隔离；第二种，滤波—把铁氧体电感与容性元件连接组成LC低通滤波器，衰减掉高频干扰信号；第三种，穿心电感—把铁氧体磁环（珠、柱）单独套在其它元件的引线或电缆上，防止各种寄生振荡、衰减拾得的或传输的干扰信号。

功能要求：1. 电磁波能量会有效进入到电波吸收体材料内（减少反射能力）；2. 进入到电波吸收体材料内能量可快速、完全被衰减掉（电磁损耗材料、欧姆损耗材料、介电损耗材料、磁损耗材料）。

第二、第三种方法为抗传导干扰，占多效案例，本文就此应用的铁氧体材料选择做一论述。

2 铁氧体磁心抗EMI的工作原理

2.1 铁氧体磁心的复数阻抗

众所周知，铁氧体在交变磁场下使用时，其磁导率可用复数表示：

$$\mu = \mu' - j\mu''$$

式中实部 μ' 表示磁性材料的能量储存，它构成磁心器件的电感，虚部 μ'' 对应于磁损耗。损耗角正切为 $\tan\delta = \mu''/\mu'$ ，损耗因数为 $\tan\delta/\mu_i$ ，表示磁性材料中的损耗。它们都是频率的函数。随频率变化而变化。

若将磁导率为 μ 的铁氧体插入电感量为 L_0 的线圈中（假设线圈无损耗）。则该线圈的复数阻抗 Z 可表示为：

$$Z = j\omega L_0 \mu = j\omega L_0 (\mu' - j\mu'') = \omega L_0 \mu'' + j\omega L_0 \mu' = R + jX$$

式中， R 等效于电阻： $R = \omega L_0 \mu''$

X 等效于电抗： $X = \omega L_0 \mu'$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

ω 为角频率： $\omega = 2\pi f$

作为器件磁芯的阻抗。

$$Z = K\omega\mu'' + jK\omega\mu'$$

式中， K 为系数，与磁芯尺寸、绕线匝数、形状有关。

R 与 X 当然亦都是频率的函数，随着频率增高而迅速变大。铁氧体磁心作为抗EMI元件使用时，因工作信号频率与EMI频率相距甚远，低频端阻抗小，不影响工作信号通过，而EMI信号处在高频段，铁氧体磁心此时呈高阻抗，其中电抗部分 X 可储存EMI信号的能量，通过旁路电容将其释放掉，抑制该处的EMI信号，但不能完全消除或吸收，仍可能对电路工作形成干扰；电阻部分 R 则将EMI信号的能量变成热能，消耗散发掉。从而起到抑制、消除EMI的功能。

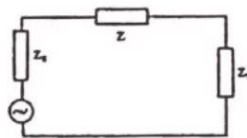


图1 抗EMI磁芯的等效电路

2.2 铁氧体磁心的插入损耗

铁氧体磁心作为抑制EMI元件应用时，都是和信号系统、负载串联使用，等效电路如图1所示。图中 Z 为铁氧体磁心的阻抗。 Z_S 和 Z_L 分别为源阻抗和负载阻抗。使用铁氧体元件后，EMI信号衰减（即插入损耗）可按下式计算：

2.3 铁氧体磁心的阻抗频率特性

众所周知，铁氧体磁心的材料成分，制造工艺不同，

其磁性能就不同，因此它们的阻抗频谱特性也不同。将四种磁芯在的阻抗频谱示于图2(a)、(h)。阻抗频谱系用HP4191A阻抗分析仪进行测试的。由图可见，四种磁芯的R、X都随频率的增高而增大，呈现出高阻抗的特性，但它们的高阻抗特性所处的频段各个相同， $x=R$ 的谐振频率点 f_0 也各不相同。若以 f_0 作为抗EMI铁氧体磁心阻抗频谱特件的频率表征值，再将它们在100kHz下测得的 μ 值相对应，结果如表1所示。

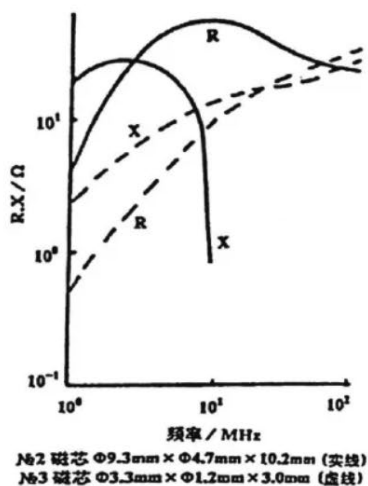
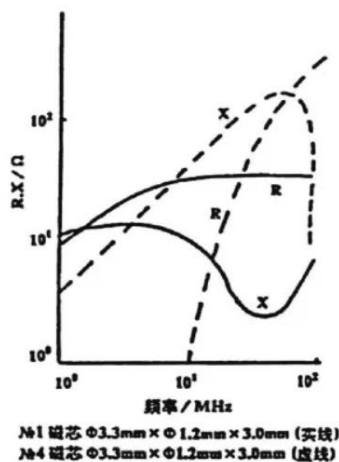


图2 四种铁氧体磁心的阻抗频谱特性

表1 四种铁氧体磁心的 μ_i 与 f_0

铁氧体磁心编号	μ_i (100kHz)	f_0 (X=R时)/MHz
1	3025	1.2
2	2050	2.8
3	517	21.5
4	143	66.5

2.4 铁氧体磁心尺寸与阻抗的关系

铁氧体磁心的阻抗值与其体积有关，通常体积大者阻抗高。为了适合各种场合的使用，不仅开发了多种适用的铁氧体材料，而且开发了多种形状的磁芯，同一种形状，也有多种尺寸，规格繁多。将其一例同种材料，相同内、外径，磁芯长度与阻抗的关系示于图3。

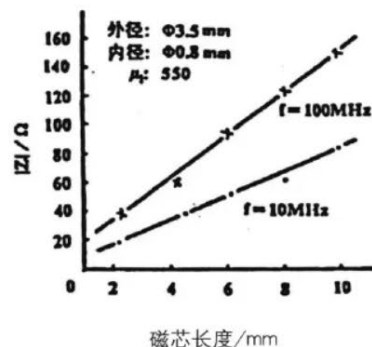


图3 铁氧体磁心尺寸与阻抗的关系

2.5 抗EMI磁芯在计算机上或照明电器上的应用效果

计算机上或照明电器上出现的电磁干扰有传导干扰和辐射干扰，其来源既有机外来的也有机器本身各部分电路产生的，欲抑制或消除这些干扰以达到相应类EMC标准要求，就要针对性地采取各种措施才能收到成效。为此人们从元器件、印制电路基板、电路构成、机壳屏蔽结构以及各种导电、绝缘、吸收材料多方位地进行深入开发研究，已取得显著效果。铁氧体磁心则主要在抑制各部位信号传输线路的电磁干扰方面发挥重要作用，当然同时起到降低EMI通过传输线向空间发射辐射干扰的作用。

将具有No3材料阻抗特性的磁桶Φ18mmXΦ10mmX12mm夹合形(带有强塑外壳)磁心应用于计算机信号电缆连接线上，在EMC测试系统对比测试其EMI电平的频谱

特性，结果见图4和图5。图4为未加铁氧体磁心的曲线，图5是加了铁氧体磁心的曲线。由图5可见，在图4中15MHz-20MHz附近出现的超出标准的EMI电平明显受到抑制，衰减最为5-10dB。这样，该台计算机顺利达到了EMC标准要求。

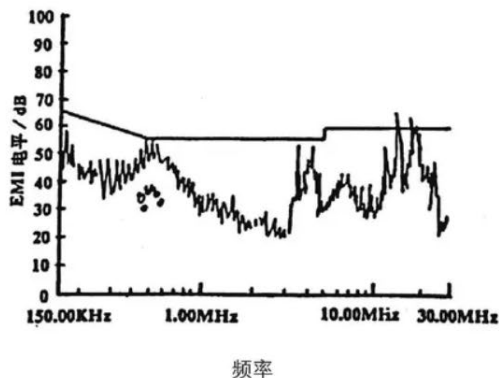


图4 电缆连接线未加铁氧体磁心的EMI电平频谱

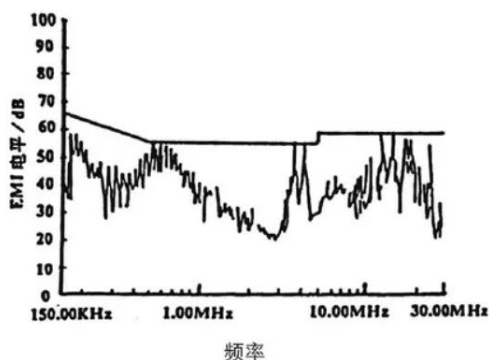


图5 电缆连接线上加铁氧体磁心的EMI电平频谱

3 铁氧体材料与EMI滤波器的选择

3.1 铁氧体材料选择

军用计算机和通信领域早在1980年代就很重视抗EMI问题，并付诸于实施。1990年代世界各大铁氧体磁心生产厂家就开始开发建立高阻抗系列材料。但在灯用电器上一直不重视，自2003年起国家强制执行3C认证开始，各企业才真实地作这方面的工作。材料的选择是个大问题，我在1997年的文章中提供了这方面的效据和方法。见表2：

表2 软磁材料与其抗EMI频段

	65	61	64	43	77	72	75
μ_i	100	125	250	850	2000	2500	5000
μ_{max}	370	450	375	3000	6000	4000	8000
B10/Cs	2150	2350	2200	2750	4600	4000	3900
Tc/℃	400	350	210	130	200	160	160
p/Ωcm	1*10 ⁸	1*10 ⁸	1*10 ⁸	1*10 ⁵	1*10 ²	1*10 ²	5*10 ²
Hc/Oe	2.35	1.60	1.40	0.30	0.22	0.18	0.16
抑制频段 /MHz	>200	>200	>200	40-200	40	<40	<40

由表2可知，磁导率高的材料抑制频率低。但在小于40MHz频率范围内又如何选择呢？

Snoek先生1948年给出了截止频率的公式 $f_c(\mu-1)=4/3\gamma M$ ， γ 为自旋磁矩比率，1980年Watson)先生经过大量软磁铁氧体频谱曲线的计算，拓展了截止频率的公式 $f_c\mu=3 \times 109\text{Hz}$ 。根据此公式我们可以得到表3数据。

表3 软磁铁氧体材料初始磁导率与截止频率的关系

μ_i	2000	7500	10000	12000	15000
$f_c(\text{kHz})$	1500	400	300	250	200

软磁铁氧体材料的截止频率点就是材料的吸波点，在这点软磁铁氧体材料由感抗特性转为阻抗特性。

3.2 EMI滤波器的设计与选择

EMI滤波器依照其抑制或吸收传导干扰的工作原理不同之处，可以分为吸收式EMI滤波器以及组合式EMI滤波器2种，分别概述如下：

吸收式EMI滤波器

吸收式抗EMI滤波器在结构上相当于一个绕线或穿心的磁心线圈，这类滤波器主要是利用磁性材料的阻抗频率特性来达到抑制EMI的目的，由于磁心线圈在高频段时的阻抗远大于其在低频段的阻抗，为了达到最佳的干扰滤除效果，吸收式抗EMI滤波器在干扰的中心频段具有最大的阻抗值。而滤波器阻抗的峰值频率点一般来说会与磁性材料的截止频率成正比，即与磁性材料的起始磁导率成反比。因此，为了满足滤除不同频段电磁干扰的要求，用于吸收式抗EMI滤波器的材料必须加以系列化。对于不同的抗EMI材料具有不同的阻抗峰值频率点，分别针对滤除不同频段的干扰。

吸收式抗EMI滤波器按其具体用途可分为小讯号滤波器、中间(intermediate)滤波器和电源滤波器三大类。

(1) 小讯号滤波器主要用于吸收多股并行讯号传输在线附加的干扰,如交换机数据联机、计算机主机与监视器之间的缆线、主机与磁盘驱动器排线干扰等等。此类滤波器一般制作成多孔平板状或扁平盒状,每条讯号线相当于都通过了1个单匝的磁心。对于不同的干扰频段,要求滤波器具有不同的阻抗峰值频率点,这可通过选择不同的材料来实现,而阻抗的大小则主要由磁心的长度来控制。

(2) 中间滤波器的安置必需要先得知电路上何种组件为干扰源,如晶体管或者是MOSFET所引起的过冲现象时,便可将滤波器直接安置于该干扰组件的接脚上。如果干扰源不易确定。但是干扰传输路径明确,此时便可将滤波器设置于该特定电路。扼流线圈也是属于此种滤波器,一般为环形外观,可让所有可能产生干扰的线路都穿过或环绕在磁心上。扼流线圈的优点是具有极宽的频带及阻抗,但是要配置扼流线圈,就必须要注意各线路之间的绝缘以及电容效应。

(3) 共模扼流线圈。在电源滤波组件方面,由于其线路上通过的电流较大,所以要注意磁心的负载同愿。此类滤波器包含了交换式电源中应用的共模扼流线圈、电源线路扼流线圈等。对于电源线路上专门的差模扼流圈,由于承受的偏置电流大,目前最理想的材料是选择复合磁粉芯,它是将金属软性磁粉经绝缘包裹压制回火而成,不但材料的抗饱和强度增大,而且磁心的电阻率比起单纯的金属软磁材料增大了几数倍,因此可以应用在较高的频段内。虽然磁粉芯的起始磁导率不是很高,但是可透过增加匝数的方式来获得高阻抗能力。共模扼流圈通常绕在高导磁率铁氧体芯上,其通常电感值为15mH~20mH。

组合式EMI滤波器

组合式EMI滤波器又称为反射式滤波器或复合LC型滤波器,根据在交流状态下电容的通高频阻低频、电感的通低频阻高频的特性,将电感和电容组合连接成电路,使其具有一定的滤波功能。而根据滤波程度的要求不同,选用的LC组合及对电感和电容值的要求也不同。

由于组合式滤波器容易在高频率时受到电感、电容的参数影响,有可能会产生谐振现象,使滤波器的滤波性能大幅下降。因此组合式EMI滤波器一般只适用于抑制频率

相对较低的干扰。不过因为其滤波效果可以由调整电感电容值参数来改变,只要调整得宜,组合式EMI滤波能够产生更佳的滤波效果,且频段变化也将更灵活。一般来说,在特定的应用中,吸收式EMI滤波器与组合式EMI滤波器也能够串联搭配使用。

EMI滤波器的设计方式

EMI噪声包含共模(CM)噪声和差模(DM)噪声两种。

共模噪声存在于所有交流相线和共模接地之间,其产生来源被认为是二电气回路之间绝缘泄漏电流以及电磁场耦合等;差模噪声存在于交流相线之间,产生来源是电流脉冲,交换组件的响铃电流以及二极管的反向恢复特性。这二种模式的传导噪声来源不同,传导途径也不同,因而共模滤波器和差模滤波器应当分别设计。

在一般常见的交换式电源中,由于主要的EMI干扰源来多自功率半导体组件的切换动作,因此产生的电磁发射EME(Electromagnetic Emission)通常是宽带的噪声,其频率范围从交换工作频率到几MHz。所以,传导型电磁环境(EME)的测量频率范围0.15MHz~30MHz,藉以符合国际标准的规范。

设计EMI滤波器,就是要对交换频率及其高次谐波的噪声给予足够的衰减。基于上述标准,通常情况下只要考虑将频率高于150kHz的EME衰减至合理范围内即可。

一般应用于数字处理领域的低通滤波器同样适用于电子电力装置中,换言之,EMI滤波器的使用主要是为了满足几个需求,这些需求包括了规定要求的阻带频率以及阻带衰减、降低对电源线路的频率衰减、低成本以及符合一般低通滤波器的模型。EMI滤波器通常置于交换式电源与电网相连的前端,是由串联电抗器和并联电容器组成的低通滤波器。

EMI滤波器的主要技术参数有:额定电压、额定电流、漏电流、测试电压、绝缘电阻、直流电阻、使用温度范围、工作温升Tr、插入损耗Adb、外形尺寸、重量等。上述参数中最重要的是插入损耗(亦称插入衰减),它是评价一款电磁干扰滤波器性能优劣的主要指针。

EMI滤波器之设计,首先必须获得滤波器所需提供的噪声衰减量,此可利用各种噪声分离器分别量测出待测物在未加任何滤波器组件下之共模和差模原始噪声。接着利用上述所得结果,计算出所需的滤波器组件值,然后将整个设计好的滤波器加在待测物电源输入的最前端,并量测

检查此时的噪声是否符合规范。以下就滤波器设计之步骤作介绍：

1)量测原始共模和差模噪声：噪声由电源传输阻抗稳定网络(LISN)取出以后，经过噪声分离器(Noise separator)可得到想要的噪声值，便可以频谱分析仪(spectrum analyzer)来进行量测。

2)计算衰减量：当取得共模或差模噪声量之后，便要计算相关的噪声衰减量，考虑到共模噪声与差模噪声，被衰减至规范标准时，有可能发生相位相同或相位相差而使得火线和中性线之总电压噪声大小超过规范的情况。为了避免这种情形发生，在计算衰减量时可先将标准设定于比规范限制小6dB之处，亦即使噪声抑制之要求更为严格，以避免滤波后噪声大小仍旧会超过规范限制。

3)计算滤波器组件值：滤波器组件之电感、电容值愈大，则其对噪声之衰减能力愈强，且可达到之转折频率愈低，对低频噪声之抑制效果愈佳，但相对地必须付出成本、体积增加的代价。由材料特性可知，当电感、电容之值愈大时，组件阻抗特性的自共振频率愈低，可持续衰减噪声之频率范围相对变窄，因此其值不可无限制增大。考虑电容值对体积的变化率较电感值来得小，而且市售之电容器都有固定之容值，较缺乏弹性，所以在决定共模和差模滤波器的组件值时，应该要优先考虑电容，在安规限制许可下，尽量选用较大的容值。

实际执行设计时的重点

理论上来说，在电路设计阶段时，便要尽可能靠本身的布线设计来消除EMI噪声，EMI滤波器的加入主要是为了消除在线路设计中所无法避免的EMI噪声，而非降低线路设计流程复杂度的武器，当然，产品设计有其时间压力，设计者无可避免的会依赖现有的工具来降低设计阶段的时间损耗，过渡依赖滤波器的话，可能会产生不少糟糕的设计，比如说过长的接地线、错误的滤波器配置等等。

如果工程师具有系统设计经验，通常会在开始设计时就把电源线路EMI滤波器包含在电路中，而不是等到设计结束，却未能透过EMI测试时，才试图把滤波器挤进原有的布线当中。如果他们的设计建立在原有的设计基础上，那么所需要的滤波器功能可能便可以直接从过去的设计中沿用下来。但要是涉及不同类型高频交换电路和较高工作频率的全新设计，那么可能会面临需要分析的新的EMI问题。在一般的情况之下，设计者会了解这些EMI具有差模

还是共模传导发射，并且实地进行测试，藉此了解在特定频率范围内需要达到多少衰减。

4 铁氧体器件制作工艺对磁性能的影响

铁氧体材料的EMI滤波器电感和高频变压器因其材料对应力的敏感性，制作过程中固定材料或密封材料对铁氧体磁心性能的影响我在1988年《磁性材料与器件》第3期上有过论述，再次显示有关数据。

表4 灌封前后器件阻抗比较

灌封材料	磁心来源	灌封前阻抗 (Ω)	灌封后阻抗 (Ω)	下降比率 (%)
1号环氧与	日本	400	368	8
1号固化剂	中国	410	328	20
1号环氧与	日本	400	368	8
1号固化剂	中国	410	344	16

表5 灌封前后材料磁导率的比较

灌封材料	磁心用材料	灌封前	灌封后	下降比率(%)
1号环氧与	MnZn-1	3202	375	88
1号固化剂	MnZn-2	3015	468	85
1号环氧与	MnZn-1	3168	420	86
2号固化剂	MnZn-2	3105	562	81

灌封后磁滞回线也变粗，变矮了，也就是Hc变大、Bs变小了。

经过探讨试验，调整环氧和固化剂的匹配、填充物的配比，找到一个较为合适灌封材料，其结果如表6。

其灌封前后磁滞回线基本重合，达到要求。

磁心固定对于LCR振荡回路中的电感器来说，是保证

表6 成果配方灌封材料应用的结果

器件编号	装配阻抗 (Ω)	灌封后阻抗 (Ω)	下降比率 (%)	清音效果 (-db)
1	410	400	2.1	63
2	425	410	2.5	62
3	400	390	2.5	63
4	405	390	3.7	63
5	400	380	5	64
6	410	390	4.9	63

其电感值长期不变,保证振荡频率长期不变,保证灯亮度长期不变,保证节能灯电子镇流器寿命的关键。

目前大部分厂家还是用塑料胶带、浸漆、卡夹,都不合适不科学,不能长期保证磁心线圈电感值不变或变化很小。塑料胶带受热膨胀后不会回复,绝缘漆受热膨胀干后与磁心分离,卡夹的弹性力不一致。

线包、线架浸绝缘漆,磁心之间采用与铁氧体材料热膨胀系数相近的凝固胶为好。这样才能保证材料的正确选择,EMI滤波器的正确设计后得到预期的抗EMI效果。

5 结束语

一个完整的电路,在实现主要功能的同时,还必须保证各器件之间互相不干扰,整个电路不受电网干扰、也不干扰电网和其它电子设备,这样才具备兼容性、实用性。选择好EMI滤波器,选择好滤波器所用铁氧体材料、磁心形状尺寸和加工工艺,才能真正达到设计要求和效果。

参考文献

- [1] E. Roess p. 129.1 in[2]
- [2] B. S., A. M., Ph. D. Handbook of modern ferromagnetic materials. p. 65
- [3] 须栋,等. [J]磁性材料及器件1988, (3)p. 8-11
- [4] 须株,等. [J]计算机工程1999, 10
- [5] 林宗辉《国际电子变压器》2008年03月刊
- [6] 刘九皋, 商机无限的EMI材料, 2010, 8

编者介绍

须栋,高级工程师,研究生导师,全国磁性元件与铁氧体材料标准化技术委员会委员。1982年毕业于兰州大学物理系磁学专业,长期从事磁性材料及器件研究、生产和应用。

历任:电子部32研究所下属上海华埔科技有限公司总经理,上海宝钢天通磁业有限公司总工程师。

现任:上海依林磁业有限公司总经理,桐乡市耀润电子有限公司总工程师。