

滤波电感在电源抗干扰中的应用

文章加入时间：2004年8月5日 14:33:26

摘要：从磁性材料的角度指出了共模与差模抗干扰滤波器中电感材料的选择原则。指出必须根据干扰信号的类型（共模或差模）选取对应的磁性材料，并按照所需抑制频段研制该材料的磁性能，使之适合该抑制频段需要，只有这样才能得到最佳的抗干扰效果。最后本文指出由于开关电源的微型化，促进抗干扰电感器向片式化和薄式化的发展。

关键词：电磁干扰（EMI）电磁兼容（EMC）共模、差模抗干扰滤波器

1 引言

随着开关电源类的数字电路的普及和发展，电子设备辐射和泄漏的电磁波不仅严重干扰其他电子设备正常工作，导致设备功能紊乱、传输错误、控制失灵，而且威胁着人类的健康与安全，已成为一种无形污染，并不逊色于水、空气、噪声等有形污染的危害。因此降低电子设备的电磁干扰(EMI)已成为世界电子行业关注的问题。为此欧洲共同体有关 EMC 委员会制定有关法令于 1992 年 1 月 1 日开始实施，历时 4 年后于 1996 年 1 月 1 日最终生效。该法令指出凡不符合欧洲和国际 EMC 标准规定的产品一律不得进入市场销售，违者重罚，同时把 EMC 认证和电气安全认证作为一些产品认证的首要条件。此举引起世界电子市场巨大的震动，EMC 成为影响国际贸易一个重要的指标。为了与国际接轨，我国也相继制定了有关 EMC 法规。为此我国多次召开电磁兼容标准与论证会，建议自 1997 年 1 月 1 日起在市场上流通的电子设备必须制定、设计对无线电干扰的抑制措施，安置抑制元器件，使产生的电磁干扰不超过标准规定的电平。于 2001 年 1 月 1 日起凡进入市场产品必须有 EMC 标志。这是我国电子产品参与国际市场竞争的第一步。

2 抗干扰滤波器特征

Rs	小	大	小	大
电路				
RL	小	大	大	小

表 1RS, RL 类别和大小

抗干扰滤波器与通常的信号滤波器之间有着概念上的区别。信号滤波器是在阻抗匹配的条件下工作，即通过滤波器要保持输入与输出信号振幅不变为前提，将其中部分频域作预期的处理和变换。而 EMI 滤波器用于抑制进入设备与出自设备的电磁干扰，具有双向抑制性。因此这就要求 EMI 滤波器的端口处与设备产生最大失配。这样才能使滤波器对电磁干扰的衰减等于自身网络的衰减再加上输入和输出端口所产生的反射，必须遵循如下规律，见表 1。其中 R_s 为电网输入阻抗，随着电量大小而变化； R_L 是 EMI 滤波器的输出阻抗，随负载大小而变。

从电学角度来说只有阻抗不匹配的条件下才能在滤波器内产生最大的吸收(或损耗)，用 EMC 俗语称之为“滤波器插入损耗”。EMI 滤波器主要是消除或降低传导干扰。实际上传导干扰又分为共模干扰和差模干扰，所谓共模干扰是指相线与地线之间干扰信号的相位相同、电位相等，而差模干扰是相线间干扰信号相位差 180° （电位相等）。因此滤波电路也分为抗

共模和抗差模干扰电路，参见图 1。

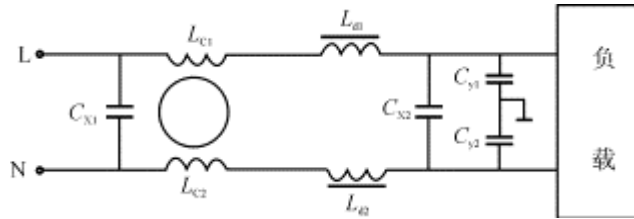


图1 抗共模和抗差模干扰电路

图中 LC1, LC2, Cy1, Cy2 构成共模滤波电路, LC1, LC2 为共模滤波电感, 而 Ld1, Ld2, Cx1, Cx2 构成差模电路。共模电感 Lc 一般数值 0.3mH~38mH, 共模电容 Cy, 只要控制在漏电流于 <1mA 条件下, 选择较大数值为准。而差模电感 Ld 一般在几十至几百微亨, 其电容应选耐压大于 1.4kV 的陶瓷或聚酯电容。Ld1, Ld2 差模电感、电容值越大, 低频效果越好。市场上购买的 EMI 滤波器大都是对共模干扰设计的, 对差模抑制效果很差。实际上开关电源中共模与差模干扰同时存在, 特别对于有源功率因数校正电路中差模干扰的强度很大。对于开关电源, EMI 滤波器对高频的 EMI 信号抑制比低频的 EMI 传导消除容易得多。常常利用共模电感的差值形成的差模电感就能消除 300kHz~30MHz 传导干扰电平。设计和选用滤波器一定要根据电路的实际需要而定。首先测出传导干扰电平与所规定的 EMC 标准极限比较, 一般 0.01MHz~0.1MHz 是差模干扰起主导作用, 0.1MHz~1MHz 是差模与共模干扰联合作用, 而 1MHz~30MHz 主要是共模干扰起作用。根据实验结果来判断和选择对超标信号有抑制作用的滤波器或器件。当然实际操作相当复杂, 要有相当高的技术水平和经验。

3 EMI 滤波器中电感材料的选择

降低电子设备的电磁干扰已成为电子产品是否有市场的关键问题。而软磁材料已成为 EMI 滤波器中不可少的元件, 并起着举足轻重的作用。现在用软磁材料制成的各种抑制 EMI 元器件广泛地应用于各种电子电路和设备之中。这是因为软磁材料具有它独特的性能, 致使其在抗电磁干扰领域发挥主要作用。然而, 电子产品生产厂家希望能得到通用 EMI 滤波器对所有的电子设备都能把干扰降低到标准以下, 这是不现实的。EMI 滤波器的设计要根据该电子设备的 EMC 标准, 即需要衰减 EMI 信号的频段范围和超标电平高低来选择, 特别是其中的软磁材料。因为软磁材料种类繁多, 各有自己的电磁特征。除了基本磁参数如 Bs, μ i 损耗外, 还要利用它们的电特性、电阻率、频宽、阻抗等。根据所需衰减干扰信号范围, 确定对应的滤波电路, 然后再精心挑选适合于该频段的磁性材料, 滤波电感才能达到最经济和最佳效果。想用一种材料满足各种抗干扰滤波器是不能达到预期效果的, 必需选用适合该频段的磁性材料。从材料的观点看, EMI 滤波器的作用是阻隔不需要的信号并以发热的形式消耗掉, 而让需要的信号无衰减或几乎不衰减地通过。值得指出的是以发热形式所消耗掉的能量并不是指线圈在电流作用下的焦耳热(即 I^2R)。故在绕制线圈时一定要选用足够大线径的铜线, 尽量减少这种能量的损耗。从电学观点可把滤波器中带有磁性材料的电感在频率较低时等效为纯电感 L 和纯电阻 R 的串联, 其阻抗 $Z=R+j\omega L$ 。对于平均直径为 D 的圆环, 根据安培定律和电磁感应定律可得到:

$$e=N1S \cdot dB/dt$$

$$H=N1I/l$$

式中 N1, I——为环形磁芯上激励线圈匝数和电流;

S——磁芯截面积;

l——平均磁路长度 (πD)。

用相量表示为： $\dot{H}_L = \dot{H}_L = \frac{N_1}{l} \dot{I}_L \dot{K} = j \frac{N_1 S}{l} \dot{I}_L$ 式中 $\mu = \mu' - j\mu''$

磁芯在低频时可等效为： $Z=R+j\omega L=E/Im$

$$R+j\omega L = j \frac{N_1^2 S}{l} \mu = j \frac{N_1^2 S}{l} (\mu' - j\mu'')$$

代入上式

$$L = \frac{N_1^2 S}{l} \mu' \quad (1)$$

$$R = \frac{N_1^2 S}{l} \mu'' \quad (2)$$

于是可以得到：

通过上式把磁学参数与电学参数直接联系起来。它表示磁性材料的磁性参数在电路中充当的角色。式(1)表述电路中的电感直接与磁材料的弹性磁导率 μ' 有关，表示器件的储能大小与频率无关的纯电感性。而电路中电阻 R 与磁性材料复数磁导率的虚数部分 μ'' 有关。式(2)则既与材料的涡流损耗、磁滞损耗及剩余损耗等有关，并且与频率也有关。反映在电学上就相当于等效电阻 R。最后都转变成器件的热能散发到空间，而 EMI 滤波器中的电感能够滤去干扰信号就是利用了磁性材料的这一特征。从另一个角度看，EMI 滤波电感发热是正常的，只要不影响电路的正常工作就行了。图 2 是滤波器电感在串联等效电路中 R 与频率关系曲线。相当于电感的插入损耗曲线。在低频段即 f

EMI 滤波器可分为共模抗干扰滤波器和差模抗干扰滤波器。因此对滤波电感的磁性能要求完全不同。现简述如下：

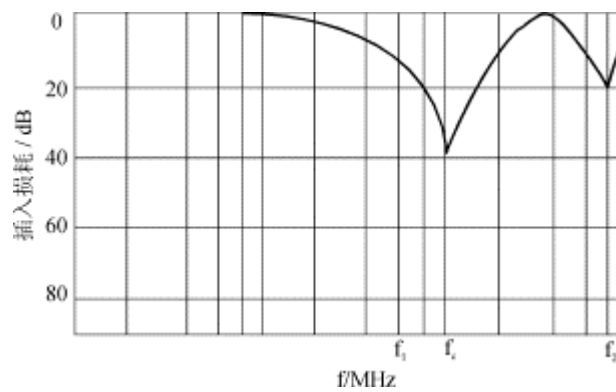


图 2 插入损耗与频率关系

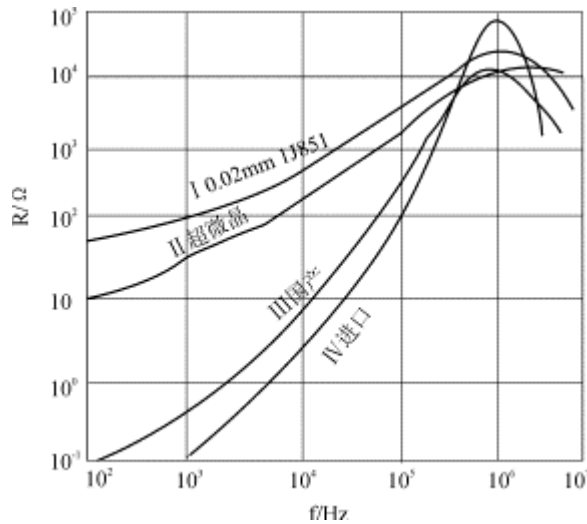


图3 不同磁性材料的频率与阻抗曲线

表2 不同磁性材料磁性能对比

	$\mu_0(\times 10^4)$	L(mH)	$\rho/(\Omega \cdot m)$
1J8510.02mm	3	25	60
超微晶	4	35	140
国产铁氧体	0.8	4.2	>105
进口铁氧体	0.5	3.4	>105

(1) 共模滤波电感材料的选择共模电感线圈如图1中Lc1, Lc2是绕在磁环上的两只独立的线圈, 所绕圈数相同, 绕向相反。使EMI滤波器接入电路后, 两只线圈产生的磁通在磁芯中相互抵消, 不会使磁芯饱和。由于干扰信号比较弱, 所以磁芯一般工作在低磁场的区域, 选用磁性材料要求具有较高的初始磁导率 μ_0 的材料做共模滤波电感。但也不是初始磁导率愈高愈好, 还要考虑磁性材料在电路中的电特性。为了说明, 下面选择不同类型高 μ_0 的软磁材料在同样条件下测其频率与阻抗关系曲线, 反映出电感磁芯的插入损耗变化趋势, 其性能如表2及图3所示。

曲线IV是外国专门用于抗共模干扰用的电感磁芯(Mn-Zn铁氧体), 与国产铁氧体相比较, 在低频段100Hz~10000Hz, 由于材料本身电阻率高, 交流等效电阻小, 说明在这个频段干扰信号损耗很小, 电流中主要以感抗起主要作用, 可见铁氧体材料对低频干扰信号没有一点抑制作用, 而超微晶和1J851材料由于材料电阻率比较低, 随频率的增加损耗也增加, 可以看出磁芯涡流损耗引起的等效电阻R比铁氧体大得多。在10kHz~100kHz的频段R不断增加, 对该频段的干扰信号的抑制也不断增强, 其中1J851和超微晶材料对干扰信号抑制衰减最大而铁氧体则很小。这对于线性滤波器来说, 工作频率在50Hz~60Hz或400Hz~800Hz的电源要消除或衰减频率小于10kHz的干扰信号, 最好选用金属磁性材料(或非晶超微晶)。而铁氧体在这个频段对干扰信号的吸收显然没

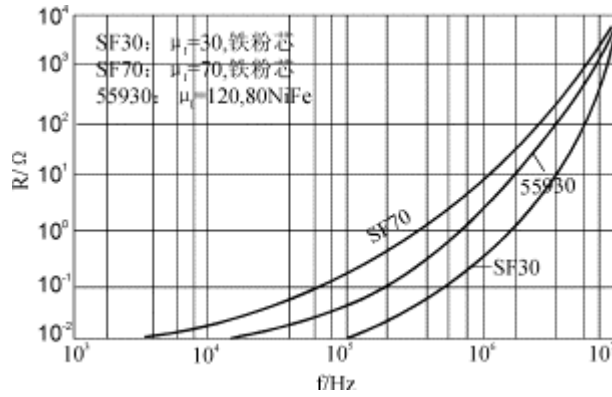


图 4 不同磁粉芯的阻抗随频率变化曲线

有金属磁性材料好。当在频段 100kHz~1MHz 附近，铁氧体材料 R 急增而金属磁性材料和超微晶仍然平稳上升，在 1MHz 时进口铁氧体达到峰值，R 最大，1J851 次之。而国产铁氧体居第 3 位，超微晶其峰值则在 7MHz 附近，变化却比较平缓。从曲线变化可以看出铁氧体虽然吸收的峰值在 1MHz 附近，但吸收区比较狭窄，而金属磁性材料吸收区比较宽，故不同材料对不同频率的吸收敏感性不一样。所以制造共模滤波器时选用的电感材料一定要根据电路要求的抑制频段范围来选择电感材料，这是非常重要的。同时从表 2 与图 3 曲线对比说明并不是电感量越高越好，而应考虑它的电参数，更不能增加线圈匝数来增加电感。因为这样会增加高频寄生电容。

(2) 差模滤波电感材料的选择与共模滤波电感完全不同，因为电感与负载是串联，输入电流或输出电流直接通过电感磁芯，其交流（直流）电流很大，当然不能用高磁导率的材料。为了适应差模抗干扰滤波器的电感磁芯的需要，最初采用铁氧体或金属磁性材料开气隙增加退磁方法，降低磁导率，增加磁芯抗饱和能力。但这对于电源输入端的交变电流抗干扰滤波显然是很不恰当的。不仅在开气隙处有很强的交变漏磁场引起的很大辐射干扰外，还在气隙断口处产生局部的损耗而发热，导致铁氧体磁性恶化甚至消失。因为铁氧体居里温度为 200℃，在此温度附近 μ_0 降低至零，此时已失去滤波作用。再者由于磁致伸缩在气隙处产生新的机械噪声，污染环境。为此人们采用新颖的复合磁粉芯。这是目前最理想的滤波电感材料，它是将金属软磁粉末经绝缘包裹压制退火而成，它相当于把一集中的气隙分散成微小孔穴均匀分布在磁芯中，不但材料的抗饱和强度增加，而且磁芯的电阻率比原来增加几个数量级且各向同性，改变了金属磁性材料不能在高频下使用的缺点。这就是在国外所有差模滤波电感都是用磁粉芯，而不用开口铁氧体磁芯的原因。

这里选取各种性能的磁粉芯测量频率—阻抗变化曲线（见图 4）。

图中的变化曲线表现出不同磁性能的电感，其阻抗与频率变化并不一样。铁粉芯 SF70 和 55930 在干扰频率 < 2kHz 时阻抗基本不变，表示没有吸收作用，而 SF30 在小于 60kHz 时对信号也没有吸收作用。在 2MHz 附近吸收迅速增强，在接近 10MHz 时吸收最强，而 SF70 在 100kHz 以后变化不大。可见不同性能的材料对干扰信号的吸收频段也不一样。国内外大量使用的电子调光设备大都采用移相式晶闸管调光。在晶闸管导通瞬间因电流突变会产生大量的高频谐波而引起电磁干扰，不单严重影响音响设备、灯具、摄录像等设备，还严重干扰电网系统。必须安装抗干扰电感（美国 Lee ColorTran, 英国 Lank, 日本龙田社 RDS 都采用这种方式来抑制干扰）。为方便起见，采用分析电流上升时间 t_r 来判断电感磁芯的抗干扰程度。不同材料的数据如表 3 所示。

表 3 不同磁性材料的磁性能及电流上升波形对比

在调光灯的工业检测中抑制干扰的效果可以用电子调光器开通时的电流上升时间 t_r 来表示。上升时间越长说明电路高次谐波成分越小，抑制效果越好。从表中不难看出国产 ZW-1 电感 t_r 时间可高达 $450 \mu s$ ，而磁导率只有 70。开口非晶带磁芯虽然磁导率最高 ($\mu_e=800$)，但电流上升时间太短，只有 $100 \mu s$ ，而又有严重的机械噪声。这说明加电感后抗干扰能力并不是磁导率高的好，也不是磁导率低的好，而与选用的磁性材料材质有关。为了进一步分析，对不同材料在同样条件下测量其干扰电压，图 5 是英国 Lank，国产 ZW-1 磁粉芯和通常开口磁芯的电源端干扰电压与频率曲线。

按照“电子调光设备无线电干扰允许值及测量方法”测量结果，不难看出国产 ZW-1 电感与英国 Lank 电感相比较，国产 ZW-1 电感抗干扰电平都在

材料	BS (T)	μS	$t_r(\mu s)$	电流上升波形
50NiFe 磁粉芯	1.3	120	≤ 150	
超微晶磁芯粉	0.8	50	200	
开口非晶带材	1.3	800	< 100	
英国 ZW-1	0.9	75	380	
国产 ZW-1	0.9	70	450	

f/MHz

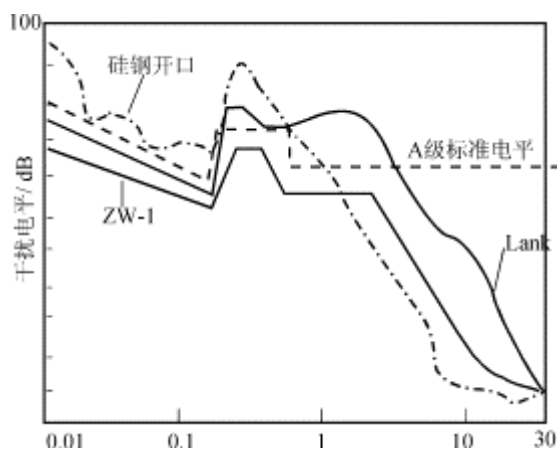


图 5 调光装置设备抗干扰曲线

A 级标准以下，而英国 Lank 电感在 $0.16\text{MHz} \sim 3.5\text{MHz}$ 频段超标，而开口硅钢片制作的抗干扰电感在频段 $0.01\text{MHz} \sim 1.2\text{MHz}$ 都超标。用开口磁芯做抗干扰电感不可能达标。目前国内的调光灯大多数都用铁氧体磁环做抗干扰电感，这显然是错误的。不但没有抑制干扰反而增加干扰，因为铁氧体总是工作在饱和区。

图 6 是程控交换机用的 100A 抗干扰滤波器衰减曲线。抗干扰衰减曲线 I 是进口同类滤波器，其干扰电平曲线在 $0.01\text{MHz} \sim 100\text{MHz}$ 范围内干扰电平的衰减比较均匀平缓。曲线 II 用开口铁氧体做滤波器，当频率为 $0.4\text{MHz} \sim 0.8\text{MHz}$ 时的峰值说明对该频段的干扰信号衰减小，达不到要求。后来用美国 Micrometals 公司铁粉芯代替，则在 $0.2\text{MHz} \sim 0.45\text{MHz}$ 频段抗干扰能力弱（如曲线 III），但要比开口铁氧体好些，仍不理想。因为对通讯电源最伤脑筋的是低频干扰。后来用专门研制的磁粉芯做成的滤波器干扰电平如曲线 IV，要比曲线 II、III 都好，甚至优于国外同类滤波器性能。从以上的例子可以看出在研制 EMI 滤波器时要特别注意滤波电感选择。不但要选用适当的磁材，还要选用适合于所需衰减频段的磁性能。所以磁性材料的选取在 EMI 滤波器中有着举足轻重的作用。

4 抗干扰滤波器的发展趋势

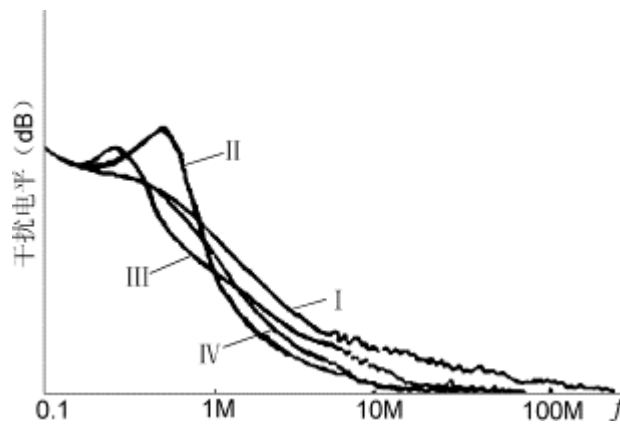


图6 100A 滤波器抗干扰曲线

当前电子线路向高速数字电路转移。高组装密度和高运算速度对 EMC 提出更高的要求。电子产品的微型化、多功能、移动化的发展又促使电子产品在组装方式上向表面贴装技术转移, 又进一步降低干扰。同时为了提高其动态响应, 降低干扰, 必须力求减小供电母线的引线电感。最有效的方法是将电源直接装在负载附近, 用分散供电方式 (即小功率源) 而不采用集中供电的形式 (大功率源), 这样大大减少引线的长度, 有效降低辐射干扰。所以今后几年美国将大力发展小功率 16W~25W 低压 (输出电压最低为 1.2V) DC/DC 开关电源。可见, 片式磁性器件是微型化的关键材料之一, 它可分为线绕型片式电感、叠层型片式电感、薄膜型片式电感。为此上海钢铁研究所已开始着手金属薄膜电感和薄膜变压器元件的研制。目前美国和日本的一些重要研究所都开始研究薄膜电感和薄膜变压器, 并与集成元件组合制成新颖的超小型、高可靠性、高抗干扰能力的电源模块。由此可见超小型电感和变压器将是 21 世纪磁性元件的发展方向。