

抗EMI滤波器设计与应用原理*

吴雪予

(中国西南应用磁学研究所 四川绵阳 621000)

(浙江天通电子股份有限公司 浙江海宁 314412)

摘要 铁氧体软磁材料用于电磁兼容性设计具有优良的电磁性能和价格优势。本文从噪声滤波器原型出发着重讨论了噪声滤波器设计和应用原理,简化和推导了扼流圈电感计算公式,提出了材料优值(K 值)概念。作为实例,利用电感计算公式和材料 K 值曲线计算了几种管形磁心阻抗,结果与实测值相符。此外,文中提出了噪声失配概念作为噪声滤波器(扼流圈)应用的理论基础。

关键词 电磁干扰 电磁兼容(EMC)性 噪声滤波器 材料 K 值 噪声失配

1 引言

由于诸如电脑以及移动电话之类的电子设备不断增加,科学、医疗、工业机器、机动运输设备点火装置对那些工作在其附近的电子设备的电磁干扰(EMI)已成为一种日益严重的环境污染。解决(降低)电磁污染或提高电子设备抗拒电磁污染能力的有效办法是采用电磁兼容性(EMC)设计。本文主要介绍在电磁兼容性设计中广泛使用的噪声滤波器设计方法及应用原理。

2 噪声滤波器原型

噪声滤波器一般采用图1所示的结构。设 S 为源, Z_A 为源阻抗,则插入损耗由下式计算:

$$L_I = 20 \lg [(Z_A + Z_B + Z_F) / (Z_A + Z_B)] \quad (1)$$

式中, Z_B 为负载阻抗, Z_F 为铁氧体磁心电感

(扼流圈)阻抗, $|Z_F| = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, $X_L = \omega L$ 。

铁氧体磁心阻抗是个复数,实部 R 由其复数磁导率虚部 μ'' 决定,代表磁心损耗部分;虚部 X_L 由其复数磁导率实部 μ' 决定,

代表储能部分。 R 、 X_L 都是频率的函数。图2是NiZn铁氧体磁心阻抗频率特性曲线。采用串联等效电路,扼流圈阻抗为

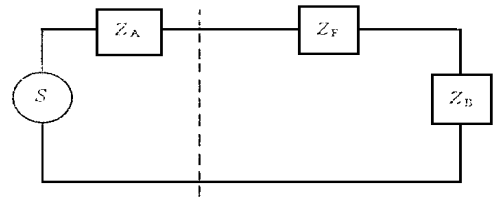


图1 噪声滤波器原型

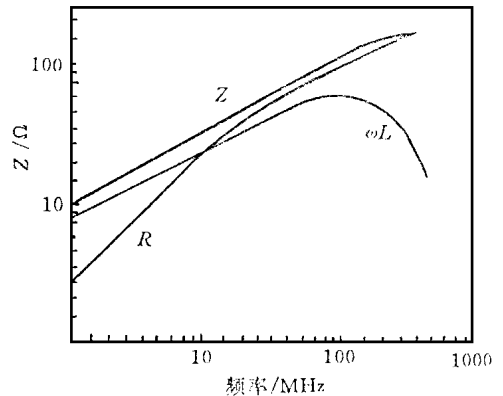


图2 NiZn材料阻抗频率特性

* 收稿日期: 1999-04-12

$$Z_F = R + jX_L, \quad X_L = \omega L,$$

$$|Z_F| = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

可以看出, 频率低于10MHz 时扼流圈阻抗 Z_F 主要由电感提供; 频率高于10MHz 之后, 扼流圈阻抗中电抗分量下降, 磁心损耗增加, 扼流圈阻抗 Z_F 主要由磁心有效电阻提供。

插损计算实例: 为简单计, 设源阻抗和负载阻抗都为1Ω, 即 $Z_A = Z_B = 1\Omega$, 扼流圈阻抗 $Z_F = 500\Omega$, 则滤波器插损:

$$L_1 = 20 \lg[(1 + 1 + 500)/(1 + 1)] = 48(\text{dB})$$

如果 $Z_A, Z_B \ll Z_F$, 上式可简化为

$$L_1 = 20 \lg[Z_F/(Z_A + Z_B)]$$

抗 EM I 滤波器通常具有低通特性, 所以上述简化符合实际情况。

3 扼流圈阻抗计算

下面以单匝管型磁心为基础首先推导一个扼流圈阻抗计算公式, 然后, 通过公式应用举例说明抗 EM I 器件设计计算的一般方法。

3.1 单匝管型磁心

扼流圈阻抗 Z_F 由单匝磁管构成, 图3为滤波器完整结构。图中磁管作为电抗器(扼流圈)对噪声提供抑制。设扼流圈低频损耗可以忽略, 则阻抗

$$Z_F = \omega L = 2\pi f L$$

式中, L 为磁心线圈电感量, f 为噪声频率, 通常用低通滤波器截止频率代入。

由空心线圈电感计算式:

$$L_0 = 4.6\mu_0 N^2 H \ln(D/d) \times 10^{-9} \quad (2)$$

得到带有磁心的线圈电感计算式:

$$L = 4.6\mu_i \mu_0 N^2 H \ln(D/d) \times 10^{-9} \quad (3)$$

式中, L 为磁心线圈电感量(H); μ_i 为磁心材料磁导率; D, d 为磁心外径, 内径(cm); H 为磁心高度(cm); $\mu_0 (= 0.4\pi \times 10^{-6})$ 为真空磁导率; N 为线圈匝数。(3)式除以(2)

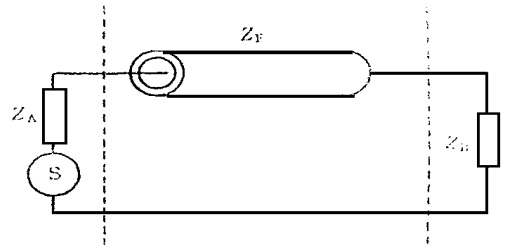


图3 滤波器完整结构

式得

$$L = \mu L_0 \quad (4)$$

在工作频率足够低或者小于材料谐振频率的情况下, 如果忽略磁心损耗, 则磁心在线路中提供的阻抗为

$$Z = \omega L = \omega \mu L_0 =$$

$$4.6\mu_0 K N^2 H \ln(D/d) \times 10^{-9} \quad (5)$$

式中, $K = \omega \mu_i$ 。为了使上式具有普遍性, 即既可用于环形磁心也可用于组合磁心, 我们可以用磁心常数 C_1 代入计算更加方便。环形试样磁心常数为 $C_1 = 2\pi/H \ln(D/d)$, 因此, (5)式进一步变换为

$$Z = \omega L = \omega \mu L_0 =$$

$$4\pi K N^2 / C_1 \times 10^{-9} (\text{CGS 制}) \quad (6)$$

$$Z = \omega L = \omega \mu L_0 =$$

$$K \mu_0 N^2 / C_1 \quad (\text{SI 制}) \quad (7)$$

我们称 K 为材料阻抗优值, K 作为扼流圈阻抗系数只与磁心电磁品质有关。由(6)式或(7)式可方便地进行任何形状尺寸闭路磁心扼流圈阻抗的快速计算。

3.2 磁心材料的 K 曲线

磁性材料制造商一般都会给出材料的磁谱曲线($\mu_i \sim f, \tan \delta / \mu_i \sim f$ 曲线), 由磁谱曲线按式 $K = \omega \mu_i$ 可以作出各种磁心的 K 曲线。作为例子, 图4分别给出美国 Steward 公司生产的28# NiZn 材料($\mu_i = 850$)、33# MnZn 材料($\mu_i = 2700$)和浙江天通电子公司高 μ 材料 TL7 ($\mu_i = 7500$) K 值随频率变化曲线。

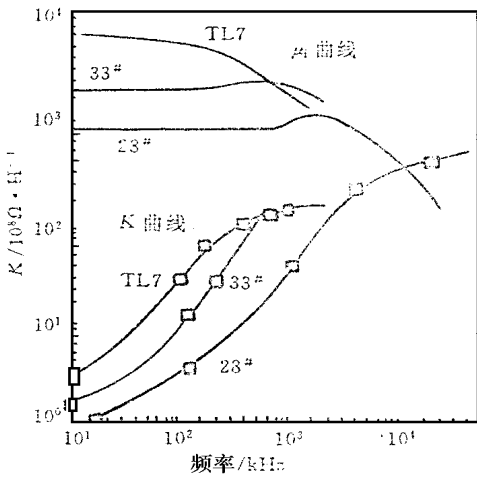


图4 美国 Steward 公司 28# NiZn 材料 K 曲线
(附 33# MnZn、TL7 材料 K 曲线)

3.3 利用 K 曲线快速计算扼流圈阻抗举例

采用 Steward 公司 28# NiZn、33# MnZn 和天通电子公司高 μ 材料 TL7, 利用 K 曲线快速设计计算频率分别为 25MHz、1MHz 和 100kHz 时噪声扼流圈阻抗。

(1) 管形磁心 28B 0137-000

外径 $D = 3.51\text{mm}$, 内径 $d = 1.30\text{mm}$, 高 $h = 3.25\text{mm}$, $C_1 = 1.90\text{mm}^{-1}$, 匝数 $N = 1$ 。查 K 曲线图, $K = 450 \times 10^8 \Omega/\text{H}$, 噪声扼流圈阻抗为

$$Z = K \mu_0 N^2 / C_1 = 450 \times 10^8 \times 1^2 \times 4\pi \times 10^{-7} / 1.90 \times 10^{-3} = 29.76(\Omega) \quad (\text{实测值 } 27\Omega)$$

(2) 管形磁心 33B 0137-000

$D = 3.51\text{mm}$, $d = 1.30\text{mm}$, $h = 3.25\text{mm}$, $C_1 = 1.90\text{mm}^{-1}$, $N = 1$ 。查 K 曲线图, $K = 170 \times 10^8 \Omega/\text{H}$, 噪声扼流圈阻抗为

$$Z = K \mu_0 N^2 / C_1 = 170 \times 10^8 \times 1^2 \times 4\pi \times 10^{-7} / 1.90 \times 10^{-3} = 11.24(\Omega) \quad (\text{实测值 } 11\Omega)$$

(3) 管形磁心 T4 × 2 × 2

$D = 4.0\text{mm}$, $d = 2.0\text{mm}$, $h = 2.0\text{mm}$, $C_1 = 5.1\text{mm}^{-1}$, $N = 1$ 。查 K 曲线图, $K = 39 \times 10^8 \Omega/\text{H}$, 噪声扼流圈阻抗为

$$Z = K \mu_0 N^2 / C_1 = 39 \times 10^8 \times 1^2 \times 4\pi \times 10^{-7} / 5.1 \times 10^{-3} = 0.96(\Omega) \quad (\text{实测值 } 0.994\Omega)$$

设计器件时, 根据噪声频率范围、要求的扼流圈电感, 选择磁性材料; 按照上述方法确定磁心尺寸和线圈匝数。

3.4 计算误差估计

我们在推导(6)式和(7)式时作了不计磁心损耗的假设, 实际上在高频下磁心损耗激增, 磁心损耗作为一个等效电阻成为扼流圈阻抗的有功分量。在计及磁心损耗时如何利用上述公式? 为了说明这个问题, 下面推导存在磁心损耗时使用(6)式和(7)式计算扼流圈阻抗带来的误差。

计及磁心损耗时扼流圈阻抗幅值

$$|Z| = \sqrt{X_L^2 + R^2} = R \sqrt{Q^2 + 1}$$

式中, Q 、 R 为扼流圈品质因数和等效电阻。当 $Q \gg 1$ 时(忽略磁心损耗), $Z \approx QR$ 。如计及磁心损耗, 设 $Q = 5$, 代入上式得

$$Z_1 = R \sqrt{Q^2 + 1} = 5.099R$$

$$Z_2 = 5R$$

$$\Delta Z / Z = (Z_1 - Z_2) / Z_2 =$$

$$(5.099 - 5.0)R / (5R) = 2\%$$

若 $Q = 3$, 代入计算得 $\Delta Z / Z = 5\%$ 。可见, 只要 Q 大于 3, 计算精度优于 5%, 多匝扼流圈 Q 较高(工艺上注意减小分布电容), 使用(6)式、(7)式计算扼流圈阻抗带来的误差会更小。

3.5 扼流圈噪声阻抗分析

要精确计算扼流圈相对于各噪声频率分量的阻抗既很困难也没有必要。噪声扼流圈(滤波器)通常具有低通特性, 设计时可根据电磁兼容性要求确定噪声扼流圈(滤波器)截止频率 f_{cn} , 然后, 在 f_{cn} 下从材料的 K

表1

f / kHz	1	10	100	200	300	500	666	1000
$Z_{\text{测量}} / \Omega$	0 070	0 126	0 994	1 95	2 76	4 04	4 80	6 04
$Z_{\text{计算}} / \Omega$	0 090	0 154	0 922	1 89	2 80	4 03	4 83	6 04
X_L / Ω	0 009	0 090	0 900	1 80	2 60	3 50	4 00	4 70
R / Ω	0 125	0 125	0 220	0 580	1 05	2 00	2 70	3 80
Q	0 11	1 07	5 13	3 34	2 49	1 75	1 36	1 25
$K / 10^8 \Omega \cdot \text{H}^{-1}$		4 6	39	73	99	127	137	137
Z / Ω		0 11	0 96	1 80	2 43	3 13	3 37	3 37

曲线上查到 K 值代入(7)式, 计算扼流圈噪声阻抗及选择磁心尺寸和线圈匝数 N 。

对于高 Q 扼流圈, (7)式有较好的计算精度; 当 Q 值较小时(如 $Q < 3$), (7)式计算的阻抗值比实际值要小。实际上在高频下磁心材料 μ 下降, 磁心损耗增加, 磁心有效电阻已成为扼流圈阻抗的主要成分。因此, 高频下扼流圈阻抗会比用截止频率 f_{cn} 计算的高得多。只要合理确定 f_{cn} , 按(7)式计算噪声阻抗的扼流圈抑制高频噪声会有很好的效果。

为了证明上述论点, 表1给出用 HP4284A LCR 分析仪对磁管 $T4 \times 2 \times 2$ (材料 TL7) 实测的一组数据。表中, K 值由图4所示曲线查得, Z 为由(7)式计算的单匝磁管扼流圈阻抗, 取 $f_{\text{cn}} = 100\text{kHz}$ 。在 $f = 100\text{kHz}$ 时, $Q = 5.13$, $Z = 0.96\Omega$, $Z_{\text{测量}} = 0.996\Omega$, 相对误差为 -3.6% ; 在 $f > 100\text{kHz}$ 时, $Q < 3$, $Z < Z_{\text{测量}}$ 。可见, $f > f_{\text{cn}}$ 时扼流圈噪声阻抗因磁心高频损耗增加其实际值 ($Z_{\text{测量}}$) 都大于(7)式计算值 (Z)。

3.6 确定 f_{cn} 的一般方法

扼流圈截止频率 f_{cn} 要根据电磁兼容性设计要求确定。对于骚扰源, 要求将骚扰电平降低到规定的范围; 对于接收器, 其接收品质体现在对噪声容限的要求上。对于一阶低通滤波器截止频率可按下式确定:

骚扰源: $f_{\text{cn}} = k_T \times$ (系统中最低骚扰频率);

接收机: $f_{\text{cn}} = k_R \times$ (电磁环境中最低骚扰频率)。

式中, k_T, k_R 根据电磁兼容性要求确定, 一般情况下取 $1/3$ 或 $1/5$ 。例如: 电源噪声扼流圈或电源输出滤波器截止频率取 $f_{\text{cn}} = 20 \sim 30\text{kHz}$ (当开关电源频率 $f = 100\text{kHz}$ 时); 信号噪声扼流圈截止频率取 $f_{\text{cn}} = 10 \sim 30\text{MHz}$ (对传输速率为 100Mbps 的信息技术设备)。

此外, 对于输入电流有特殊波形的设备, 例如接有直接整流-电容滤波的电源输入电路(未作功率因数校正(PFC)的开关电源和电子镇流器之类电器通常如此), 要滤除 $2 \sim 40$ 次电流谐波传导干扰, 噪声扼流圈截止频率 f_{cn} 可能取得更低一些。例如, 美国联邦通信委员会(FCC)规定电磁干扰起始频率为 300kHz ; 国际无线电干扰特别委员会(CISPR)规定为 150kHz ; 美国军标规定为 10kHz 。

4 噪声滤波器电路

当扼流圈插入电路后, 其提供的噪声抑制效果, 不但取决于扼流圈阻抗 Z_F 大小, 也与扼流圈所在电路前后阻抗(即源阻抗和负载阻抗)有关。网络分析指出: 在工作频率范

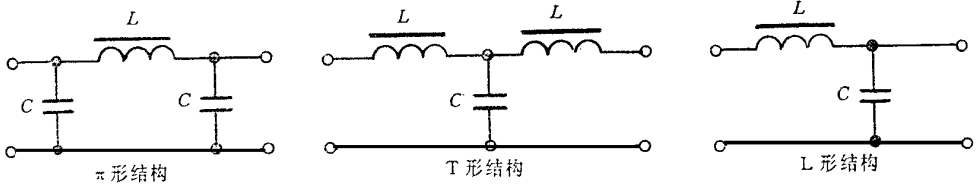


图5 噪声滤波器基本电路

围内, 传输线输入输出阻抗匹配, 可以最大限度传输信号功率; 对于噪声, 我们自然会想到插入噪声滤波器, 使其输入输出阻抗在噪声频率范围内失配, 以最大限度抑制噪声。因此, 噪声滤波器结构和构成元件的选择要由噪声滤波器所在电路的源阻抗和负载阻抗而定。从这个意义上说抗EMI滤波器实际上是噪声失配滤波器。这里, 我们特别提出噪声失配概念有利于对噪声与噪声滤波器相互作用的分析(见后面应用原理部分)。

噪声滤波器电路通常采用π形、T形、L形电路结构及他们的组合等, 作成低通滤波器, 基本电路结构形式如图5所示。

一般来说, 对于高频噪声, π形结构可以提供低的输入输出阻抗, 适于所在电路源阻抗和负载阻抗高的场合; T形结构可以提供高的输入输出阻抗, 适于所在电路源阻抗和负载阻抗低的场合; L形结构可以提供高输入阻抗和低输出阻抗(或者相反), 适于所在电路低源阻抗和高负载阻抗(或者相反)场合。

滤波器构成元件L、C值的确定要满足电路对噪声频率插入损耗要求, 可按下式近似计算:

$$L = Z / 2\pi f_c, C = 1 / 2\pi f_c Z$$

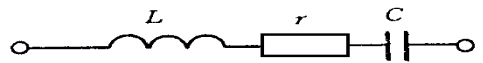
Z为噪声扼流圈阻抗, 滤波器输入或输出阻抗。

应该指出, L、C值计算只能是近似的。因为对于频率高到100kHz及其谐波, 电路

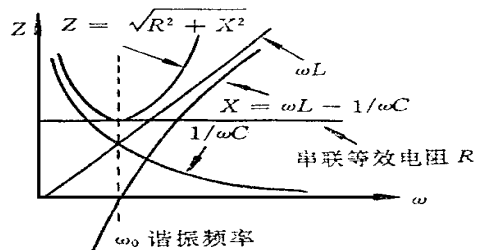
分布参数已经不能忽略, 噪声滤波器对噪声的抑制效果实际上往往由实验确定。为方便设计计算, 下面给出一个实际电容的阻抗频率特性和引线电感计算方法。考虑到电容损耗和引线电感影响, 实际电容等效电路和阻抗频率特性如图6所示。引线电感由下式计算:

$$L = 0.002 l [\ln(4l/d) - 1]$$

式中, d为导线直径(cm), l为导线长度(cm), L为电感量(μH)。例如, 长度l=1cm的∅0.31mm导线, L=0.0077μH, 当频率为1MHz时Z=0.049Ω, 频率为10MHz时Z=4.9Ω, 当l=2cm时, L=0.0182μH, 当频率为10MHz时, Z=11.44Ω。



(a) 实际电容的串联等效电路



(b) 实际电容的阻抗频率特性

图6

5 噪声滤波器应用原理

根据电磁兼容性要求选择, 使用噪声滤波器的方法或程式不是唯一的。这要作为电

磁兼容性设计过程的一部分,在电器设计、生产、调试中解决。尽管如此,在设计使用噪声滤波器之前,了解电磁骚扰传播方式、噪声频率范围和插入电路的电磁环境是有益的。

电磁骚扰的传播方式大致分两种:一种是传导干扰,另一种是辐射干扰。用于改善电路噪声容限的板上型噪声滤波器可设计在 $9\text{kHz}\sim 178\text{MHz}$ 频率范围内(根据电磁兼容有关标准)某一频段下工作。大体上可以认为:噪声频率低段表现为传导干扰(骚扰),噪声滤波器主要靠扼流圈感抗提供噪声抑制;在噪声频率高端,传导噪声功率被扼流圈等效电阻吸收和分布电容旁路,这时,辐射骚扰成为干扰的主要形式。辐射骚扰在附近元件、引线上感生噪声电流,严重时会引起电路自激,这在小型高密度电路元件组装情况下变得更加突出。

抗EM I器件大都作为低通滤波器插入电路中抑制或吸收噪声干扰。可根据需要抑制的噪声频率,设计或选择滤波器截止频率 f_{cn} 。

上面已经提及,噪声滤波器作为噪声失配器插入电路中。其作用是对高于信号频率的噪声严重失配。用噪声失配概念,滤波器的作用可以这样来理解:通过噪声滤波器,噪声或因分压(衰减)降低噪声输出电平;或因多次反射吸收噪声功率;或因通道相位改变破坏寄生振荡条件,从而改善了电路的噪声容限。

此外,设计、使用抗EM I器件要注意以下几个问题:

- (1) 了解电磁环境,合理选择频率范围;
- (2) 噪声滤波器所在电路中是否存在直

流或强交流,防止器件磁心饱和失效;

(3) 了解插入电路前后阻抗大小和性质使达到噪声失配,扼流圈阻抗一般为 $30\sim 500\Omega$,宜在低源阻抗和负载阻抗下使用;

(4) 注意分布电容和相邻元件、导线产生感性交扰;

(5) 控制器件温升,一般不要超过 60°C 。

6 结束语

电磁兼容设计中广泛使用噪声滤波器来降低骚扰源的干扰电平和改善接收器的接收品质(抗扰度)。噪声滤波器或作成独立器件插入电路,或以磁环、磁片等方式与电路连线,元件引线构成噪声扼流圈,同时借助于电路分布电容共同完成噪声滤波作用。

本文从噪声滤波器原型出发着重讨论了噪声扼流圈的简便设计,没有对噪声滤波器的使用作任何限定,而作为器件使用原理提出了噪声失配概念。电磁兼容已经发展成一门综合科学,为适应电磁机器高频化(数字化)、小型化,电磁兼容性设计已从分析方法逐步倾向于采用综合方法。正因为如此,我们认为,弄清抗EM I器件的抗扰原理比器件设计本身更为重要。

参考文献

- 1 Steward Ferrties for EM I Suppression. Steward 公司产品手册
- 2 吴雪予:电磁兼容(EMC)与抗电磁干扰器件.浙江天通电子股份有限公司内部资料

吴雪予 男,1963年毕业于成都电讯工程学院(电子科大),高级工程师。早年从事微波测量方法和微波仪器研究;80年代中期转为磁性测量方法研究及永磁、软磁测量仪器开发;近来,主要研究生产线批量产品电磁特性测量方法、磁性材料应用、抗EM I器件。发表论文十余篇。