

浅析铁氧体抑制元件的特性参数及应用

周志敏

摘要：本文在简介铁氧体抑制元件的基础上，重点论述了铁氧体抑制元件磁性能参数、铁氧体抑制元件的阻抗、插入损耗及铁氧体抑制元件应用。

关键词：磁性，特性，应用

Characteristic Parameters and Application of Ferrite Suppressor

ZHOU Zhimin

Abstract: On the basis of a brief introduction of ferrite restraining elements, this paper focuses on the magnetic performance parameters of ferrite restraining elements, the impedance, insertion loss of ferrite restraining elements and the application of ferrite restraining elements.

Keywords: Magnetic, Characteristic, Application

1 铁氧体抑制元件

铁氧体是一种立方晶格结构的亚铁磁性材料，是利用高导磁性材料掺合其他一种或多种镁、锌、镍等金属在2000℃烧结而成，它的制造工艺和机械性能与陶瓷相似。其电磁性能与添加金属成分以及烧结过程中的时间，温度与气体成分有关。铁氧体的颜色为黑灰色，故又称黑磁或磁性瓷。铁氧体的分子结构为 $MO\cdot Fe_2O_3$ ，其中 MO 为金属氧化物，通常是 MnO 或 ZnO 。

铁氧体抑制元件是近几年发展起来的新型的价廉物美的干扰抑制器件，其作用相当于低通滤波器，较好地解决了电源线、信号线和连接器的高频干扰抑制问题，而且具有使用简单、方便、有效、占用空间不大等一系列优点，用铁氧体抗干扰磁心来抑制EMI是经济简便而有效的方法，已广泛应用于各种军用或民用电子设备中。

铁氧体在低频段的阻抗由电感的感抗构成，低频时 R 很小，磁芯的磁导率较高，因此电感量较大，电感起主要作用，铁氧体抗干扰磁心呈现出非常低的感性阻抗值，不影响数据线或信号线上有用信号的传输。EMI被反射而受到抑制；此时磁芯的损耗较小，整个器件是一个低损耗、高Q特性的电感，这种电感容易造成谐振，因此在低频段有时可能出现使用铁氧体磁珠后干扰增强现象。

铁氧体在高频段的阻抗由电阻成分构成，随着频率升高，磁芯的磁导率降低，导致电感的电感量减小，感抗成分减小，此时磁芯的损耗增加，电阻成分增加，导致总的阻抗增加，从10MHz左右开始，阻抗增大，其感抗分量仍保持很小，电阻分量却迅速增加，当有高频能量穿过磁性材料时，电阻分量就会把这些能量转化为热能耗散掉。这样就构成一个低通滤波器，使高频噪音信号有大的衰减，而对低频有用信号的阻抗可以忽略，不影响电路的正常工作，这种滤波器优于普通纯电抗滤波器。

不同的铁氧体抑制元件有不同的最佳抑制频率范围，通常磁导率越高抑制的频率就越低。此外，铁氧体的体积越大，抑制效果越好。在体积一定时，长而细的形状比短而粗的抑制效果好，内径越小抑制效果越好。但在有直流或交流偏流的情况下存在铁氧体饱和问题，抑制元件横截面越大，越不易饱和，可承受的偏流越大。

例如磁导率为850的铁氧体，在10MHz时阻抗小于 10Ω ，而超过100MHz后阻抗大于 100Ω ，使高频干扰大大衰减。这样，就构成了一个低通滤波器。低频时电阻很小，电感起主要作用，EMI被反射而受到抑制；高频时 R 增大，EMI被吸收并转换成热能。

2 铁氧体抑制元件磁性能参数

衡量铁氧体磁性材料磁性能的参数有磁导率 μ ，饱和磁通密度 B_s ，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 等。对于抑制 EMI 用的铁氧体材料，其磁导率 μ 和饱和磁通密度 B_s 是最重要的磁性参数。磁导率定义为磁通密度随磁场强度的变化率。

$$\mu = \Delta B / \Delta H$$

对于磁性材料来说，磁导率不是一个常数，它与磁场的大小、频率的高低有关。当铁氧体受到一个外磁场 H 作用时，例如当电流流经绕在铁氧体磁环上的线圈时，铁氧体磁环被磁化。随着磁场 H 的增加，磁通密度 B 增加。当磁场 H 增加到一定值时， B 值趋于平稳，这时称作饱和。对于软磁材料，饱和磁场 H 只有十分之几到几个奥斯特。随着饱和的接近，铁氧体的磁导率迅速下降并接近于空气的导磁率（相对磁导率为 1），铁氧体的 $B-H$ 曲线如图 1 所示。

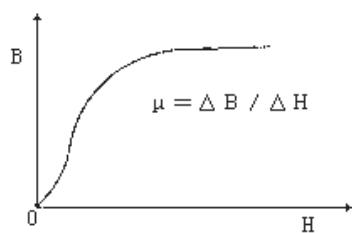


图 1 铁氧体的 $B-H$ 曲线

铁氧体的磁导率可以表示为复数：

$$\mu = \mu_1 - j\mu_2$$

实数部分 μ_1 代表无功磁导率，它构成磁性材料的电感。
虚数部分 μ_2 代表损耗，如图 2 所示。

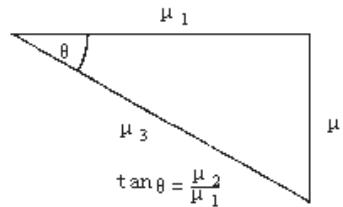


图 2 铁氧体的复数磁导率

在一定的频率范围内 μ_1 值（在某一磁场下的磁导率）保持不变，然后随频率的升高磁导率 μ_1 有一最大值。频率再增加时， μ_1 迅速下降。代表材料损耗的虚数磁导率 μ_2 在低频时数值较小，随着频率增加，材料的损耗增加， μ_2 增加。损耗电阻 R 和感抗 $j\omega L$ 都是频率的函数。后者会产

生谐振，造成新的干扰，而铁氧体磁珠则没有这种现象，抗干扰磁心制作的电感阻抗特性如图 3 所示。

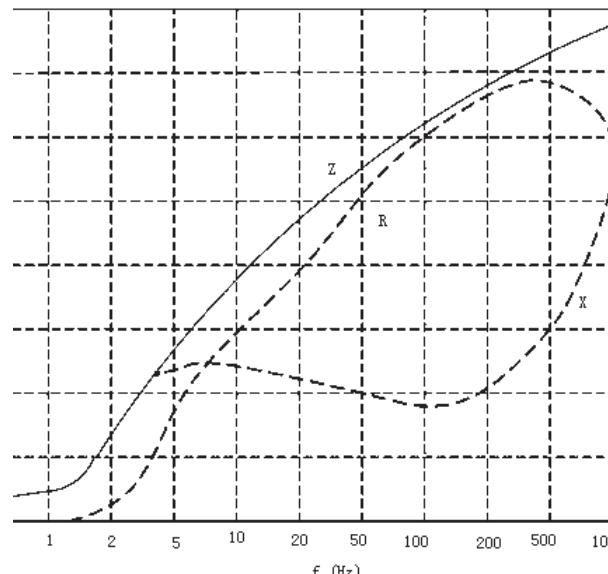


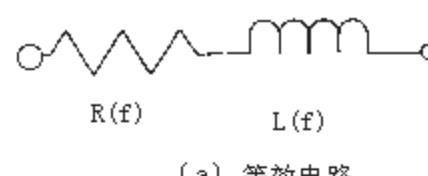
图 3 抗干扰磁心制作的电感的阻抗特性

3 铁氧体抑制元件的阻抗和插入损耗

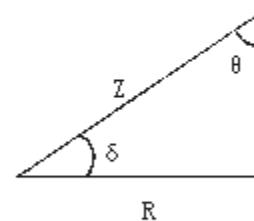
当铁氧体元件用在交流电路时，铁氧体元件是一个有损耗的电感器，它的等效电路可视为由电感 L 和损耗电阻 R 组成的串联电路，如图 4 所示。铁氧体元件的等效阻抗 Z 是频率的函数：

$$Z(f) = R(f) + j\omega L(f) = K\omega\mu_2(f) + jK\omega\mu_1(f)$$

式中： K 是一个常数，与磁芯尺寸和匝数有关， ω 为角频率。



(a) 等效电路



(b) 阻抗矢量图

图 4 铁氧体抑制元件的等效电路和阻抗矢量图

铁氧体磁珠的损耗电阻 R 和感抗 $j\omega L$ 都是频率的函数，随着频率的增加，由于电阻分量增加，使阻抗增加，电阻逐渐成为主要部分。铁氧体抑制元件应用时的等效电路如图 5 所示，图 5 中的 Z 为抑制元件的阻抗， Z_S 和 Z_L 分别为源阻抗和负载阻抗。铁氧体抑制元件通常用插入损耗表示抑制元件对 EMI 信号的衰减能力。铁氧体抑制器件的插入损耗越大，表示器件对 EMI 噪音抑制能力越强。铁氧体抑制元件的插入损耗的定义：

$$I_L = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 20 \log \frac{U_1}{U_2}$$

式中： P_1 、 U_1 分别为抑制元件接入前，负载上的功率和电压； P_2 、 U_2 分别为抑制元件接入后，负载上的功率和电压。

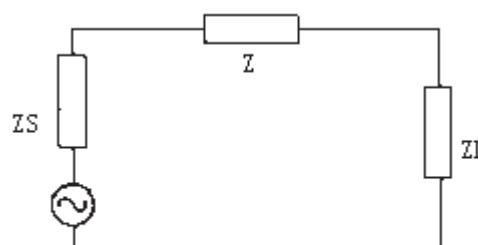


图 5 铁氧体抑制元件应用电路

铁氧体抑制元件的插入损耗和铁氧体抑制元件的阻抗有如下关系：

$$I_L = 20 \log \frac{Z_S + Z_L + Z}{Z_S + Z_L} (\text{dB})$$

在源阻抗和负载阻抗一定时，铁氧体抑制元件的阻抗越大，抑制效果越好。由于铁氧体抑制元件的阻抗是频率的函数，所以插入损耗也是频率的函数。铁氧体抑制元件的阻抗包括感抗和电阻部分，两部分对插入损耗都有影响。在低频时，铁氧体的 μ 值较小，损耗电阻较小，主要是感抗起作用。在高频端，铁氧体的实数部分 μ_1 值开始下降，而虚数部分 μ_2 值增大，所以感抗损耗起主要作用。低频时 EMI 信号被反射而受到抑制，在高频端 EMI 信号被吸收并转换成热能。

4 铁氧体抑制元件的应用

铁氧体抑制元件广泛应用于印制电路板、电源线和数据线上，如在印制板的电源线入口端加上铁氧体抑制元件，就可以滤除高频干扰。铁氧体磁环或磁珠专用于抑制信号

线、电源线上的高频干扰和尖峰干扰，它也具有吸收静电放电脉冲干扰的能力。

EMI 设计的首要方法是抑源法，这个设计思想是将噪音限制在小的区域，避免高频噪音耦合到其他电路。开关电源 PCB 上的 EMI 源来自周期开关的数字电路。其高频电流在电源线和地之间产生一个共模电压降造成共模干扰。电源线或信号线会将开关的高频噪声传导或辐射出去，在电源线和地之间加一个去耦电容，使高频噪音短路，但是去耦电容常常会引起高频谐振，造成新的干扰。由于磁珠对高频电流呈现较大的阻抗，可以阻止电源向电路提供高频电流而增强去耦电容的效果，需要注意的是磁珠的位置，正确安装位置如图 6 所示，绝对不能放在去耦电容靠近器件的一侧。

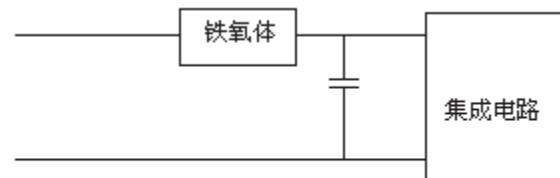


图 6 铁氧体在失去耦合电路中的安装位置

在电源线上应用铁氧体元件时因有 DC 偏流存在，铁氧体的阻抗和插入损耗随着 DC 偏流的增加而减少。当偏流增加到一定值时，铁氧体抑制元件会出现饱和现象，在设计时要考虑饱和插入损耗降低的问题。铁氧体的磁导率越低，插入损耗受 DC 偏流的影响越小，越不易饱和。所以在选择用在电源线上的铁氧体抑制元件时，要选择磁导率低的材料和横截面积大的元件。在开关电源中，EMI 信号会通过信号线传入到驱动电路，使其不能正常工作或性能降低，将铁氧体磁珠应用于信号传输线中可有效的抑制高频噪音。

在电子设备的电路设计时，电源和地的输入端需考虑设计有铁氧体磁心和预留焊装空间，这样可以在产品的调试和试验中根据具体情况进行焊装。速度较高的电路采用贴片式磁珠，如选用日本 MURATA 的贴片式 EMC 专用磁珠，而要求不高的电路也可以采用珠形磁珠。

铁氧体抑制元件由于安装的位置不同，其抑制效果会有很大区别，铁氧体抑制元件应当安装在靠近干扰源的地方，对于输入 / 输出电路应尽量靠近屏蔽壳的进、出口处，

以避免噪音在经过铁氧体抑制元件之前耦合到其他地方，铁氧体磁管穿在电缆上后要用热缩管封好。对铁氧体磁环和磁珠构成的吸收滤波器，除了应选用高磁导率的有耗材料外，还要注意它的应用场合。它们在线路中对高频成分

所呈现的电阻大约是十至几百欧姆，因此它在高阻抗电路中的作用并不明显，相反，在低阻抗电路（如功率分配、电源或射频电路）中使用将非常有效。

上接154页

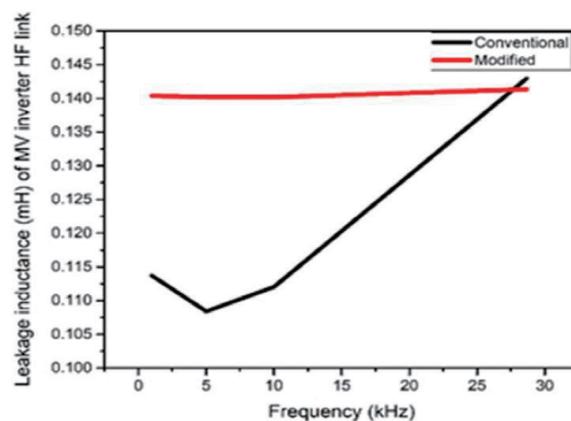


图 15 360° 扇形绕组的环形变压器，基于高频链路的中压逆变器系统的改进和传统设计的漏电感比较

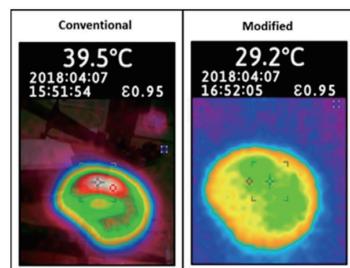


图 16 360° 扇形绕组的环形变压器，基于高频链路的中压逆变器系统的传统和改进设计之间的温度比较

构，例如双有源桥拓扑结构。实验结果与计算分析很好吻合。因此，验证了转换器的可行性。

7 结论

总体而言，具有所提出的改进变压器设计的 MV 逆变器具有最小化的总电路输入一输出电容，大约为 20pF，而温度升高保持在 29.5°C 以下，而且不使用任何额外的电路冷却剂。改进后的设计无疑是减少波形失真的有力解决方案。这导致可再生能源的电能质量得到改善，并且电力系统中涉及的设备和负载的使用寿命也得到增加。因此，具有改进设计变压器的 MV 逆变器比具有相同功率的其他可用功率逆变器更稳健。这些实验测量结果与数学推导一致，证明变压器的形状和绕组方案对绕组间电容有很大的影响，并且当电能质量改善受到关注时，功率逆变器不能忽略。

最后，利用原型实现的总体结果对由快速电压瞬变引起的共模噪声电流提供了非常高的阻抗，这使得 MV 逆变器对于可再生能源应用是可行的。对于未来的研究，将对具有更高电感耦合和更可控 THD 的先进原型的优化设计方法进行研究。