

抗 EMI 铁氧体材料及其元器件的应用

张继松

西南应用磁学研究所 四川绵阳 621000

摘要 :本文对抗 EMI 铁氧体材料的现状、工作原理、分类和特点作了简单描述,对其应用领域进行了较详细地介绍和分析。

关键词 :抗 EMI 铁氧体材料,工作原理,应用领域

1 前言

电磁干扰 (Electro-Magnetic-Interference, EMI) 系指电子设备不需要的电磁或噪声信号对需要的电磁信号的干扰。电磁干扰 (EMI) 对电子系统已构成最大威胁,严重影响了设备性能的提高与发挥,还对公共环境和人类的人身安全以及军事保密、国防安全造成了很大的危害。形成电磁干扰的主要因素是干扰源、传播途径和受扰设备三大方面。所以,抗电磁干扰的技术也根据这三大因素进行开发。

目前抑制干扰的几种措施基本上都是采用切断电磁干扰源和受扰设备之间的耦合通道,基本方法就是屏蔽、接地和滤波。而滤波技术是目前抑止电磁干扰最常见、最有效、也是最经济的一种手段。因为运用滤波技术的方法非常简单,只要在电气设备电源线或信号线的入口处插入抗 EMI 滤波器,或在有源和无源电子元器件的引线上套上一些很小的管形或环形的软磁铁氧体磁心,即可以把通过电源线传导的电磁干扰信号给予抑制;这种方法是利用了软磁铁氧体材料的电磁损耗机理既简便又有效地消除了传导和辐射的电磁噪声。

采用抗 EMI 铁氧体材料制作的各种磁心或滤波器件目前已经广泛应用于通信、视听设备、办公电子设备、汽车电子系统、信号电缆等许多电子相关领域。由于抗 EMI 软磁铁氧体材料既能抑制电气设备内部产生的电磁噪声,又抑制能外界电网传入的电磁干扰,因此,抗 EMI 软磁铁氧体材料及其元器件技术发展相当迅速,品种越来越繁多,同时,其应用领域也在不断的开拓。

2 发展现状

美国在二十世纪 70 年代就开始了软磁铁氧体抗电磁

干扰材料的研制,现在已能大量生产各类抗电磁干扰材料和器件。美国陶瓷-磁性公司主要产品集中在 NiZn 铁氧体材料方面,通过铁氧体的复数磁导率与频率的关系,改变不同成分配方以及掺杂来实现铁氧体阻抗的频率特性和衰减频域,从而制成宽频域抗 EMI 铁氧体材料和各种滤波器。美国 STEWAR 公司, FILTERCONCEPTS 公司分别研制成功数个系列的抗 EMI 软磁材料,并应用于 IBM 公司、ZENITH 公司和 MOTOROLA 公司的各种微型计算机、数字设备以及 ATT 信息系统上,取得了良好的效果。同时,也大量用于军用电子装备上。日本 TDK 公司市售有 5 大类抗 EMI 材料,也主要用于 PC 联网、数字设备中。富士公司则集中于 MMIC 及 IC 用抗电磁干扰滤波器材料及器件的开发。由于因特网、多媒体、有线宽带网及个人电脑的市场迅速增长,使用频率的扩展使得高频高磁导率 Ni-Zn 材料得到了快速发展。如 EPCOS 公司的 K6(1000)、K7(1500) 及 M13(2300);TDK 公司 L6E(1200)、L6(1500);FDK 公司 L62(1400)、L68(2000);Philips 公司 8C12(1200) 等。因为 NiZn 材料密度已超过 MnZn 高 μ 材料的理论极限,在宽频领域, NiZn 高 μ 材料在电子商务、远程教育、远程医疗、家庭办公的网络化、数字化服务等方面发挥着更大作用。

国际电工委员会 (IEC) 成立了世界上最早的国际性干扰组织 CISPR。这一组织到相继研究、开发、制定和控制电磁干扰的标准,这些标准涉及到工业、医疗设备、架空电力线、机动车辆、家用电器、照明设备、广播接收信息技术设备等广泛领域。目前强制性的电磁兼容标准 (EMC) 已经在世界范围内严格执行。

我国抗 EMI 材料研究开发起步较晚,始于 80 年代。主要在软磁铁氧体材料和器件方面进行了大量的研究。电子科技大学,电子 9 所,宜宾金川电子(国营 899 厂)合作先后开发出 6 种抗 EMI 材料和 5 个元器件系列,尔后又解决了纳米晶软磁抗 EMI 材料的内层耦合及绝缘问题,使纳米晶软磁材料在抗 EMI 中也得到有效应用。南京精研公司应对市场开发并试产了一种性能全面的 FHB 系列材料,除 μ_i 5000、 B_s 5000、 T_c 210,类同 TDK 公司的 DN50 材料外,还具有宽温平坦 $\mu-T$ 曲线,因而可达到 DNW45 材料的宽温高直流叠加要求,绵阳新欣电子公司代替日本西海 SK202G 粉料取得了较好效果,实测高频阻抗峰值在 5M 以上,优于 TDK 公司 HF90 和飞利浦公司 3S5 材料。西安三联电子公司还用该材料制作成 $152 \times 92 \times T52(\text{mm})$ 大环,磁导率 μ_i 和饱和磁通密度 B_s 均可达到 4500 以上,优于 EPCOS 公司适于制作大环的 T65 材料。天通股份有限公司相继开发了适合于 1-3MHz 领域的超高频变压器应用的超高频低损耗 MnZn 铁氧体 TP5B 材料和低功耗 NiZn 铁氧体 TN120L、TN140L 及 TN160L 材料。风华高科开发出宽温高磁导率 HT103 锰锌软磁铁氧体材料,横店东磁集团也开发出 R15K 低功耗 NiZn 铁氧体材料。

现在国内市场上抗 EMI 材料、抗 EMI 元件、抗 EMI 滤波器已有大量商品。而对用磁性和陶瓷材料制备的复合材料作为新型的抗电磁干扰材料,国内外都已有了了一定的理论探讨,国内电子科技大学也已开发出复合双性材料。

我国已于 2002 年明确制定了产品的强制性认证体系并在 2003 年 8 月 1 日开始实施。强制性认证体系的英文缩写是“CCC”,即 China Compulsory Certification。它是产品准许其出厂销售、进口和使用的证明标记。首批实施强制性产品认证的产品包括了各个门类的电子电气产品。四项认证中,与电磁防护有关的就占了两个——电磁兼容认证、安全与电磁兼容认证。

3 抗 EMI 软磁铁氧体材料

3.1 抗 EMI 软磁铁氧体材料工作原理

软磁铁氧体是由一种立方晶格结构的亚铁磁性材料制成的磁性元件。这种材料的分子结构为 $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$,其中 MO 为金属氧化物,通常是 MnO 或 ZnO。它的制造工艺和机械性能与陶瓷相似,颜色为灰黑色,常用于电磁干扰滤波器中,这种材料的特点是高频损耗非常大。

软磁铁氧体材料在抗 EMI 中的应用,主要是软磁铁氧体材料的磁导率(μ_i)和饱和磁感应强度(B_s)这两个最重要的磁性参数在起作用。

在作用于交流电路时,软磁铁氧体元件是一个有损耗的电感器,其等效电路可视为电感和损耗电阻组成的串联电路。电磁兼容铁氧体元件最重要的特性是其阻抗、电阻、电感和频率的关系,在低频段(小于 1MHz),阻抗小于 10n。随着频率的增加,由于电阻分量增加而使阻抗增加,电阻逐渐成为主要部分。当频率超过 10MHz 时,阻抗将大于 50n,这样就构成一个低通滤波器。低频有用信号的阻抗很小,而对高频信号产生很大的衰减。实际上,铁氧体元件可以看成是随频率变化的电阻器。在低于截止频率或低频端,它呈现非常低的感性阻抗值,只是一低阻抗电感器,不影响电路有用信号的传输,干扰信号被反射而受到抑制。当其工作在截止频率以上高频端时,从 200MHz 左右开始,阻抗增大,其感抗分量保持较小,电阻性分量迅速增加,EMI 干扰能量以热能形式吸收并耗散。衰减高频电磁波产生的干扰信号电平,

3.2 对抗 EMI 软磁铁氧体材料的性能要求

作为抗 EMI 滤波器,要求衰减速度快,频带范围宽,同时应保证工作频率范围内信号不失真,能适应各种环境使用。这就对其软磁铁氧体材料提出了以下要求:

1) LC 型,型, T 型抗 EMI 滤波器,要求软磁铁氧体材料的 μ_i 高, B_s 高。抗 EMI 滤波器的电器尽量减少匝数,以得到小的分布电容,改善高频性能,扩展频带范围。如果是作为滤除较低频率的 EMI 信号或电源噪声滤波器使用时,磁导率要求更高($\mu_i > 1500$);

2) 低 H_c , 从而减小磁滞损耗;

3) 高 ρ , 减小高频下涡流损耗;

4) 高 $\omega c(fr)$, 适当的截止频率,以展宽频段;

5) 高 T_c , 以适应各类工作环境;

6) 具有某一特定的损耗频率响应曲线,在需要衰减 EMI 信号的频段内损耗较大,EMI 衰减到最低电平,而在需要传输信号的频段内损耗较小,信号容易通过。不过,磁芯性能与其工作频率关系极大,而电磁波干扰信号的频率范围又相当宽,现在完全能满足上面六条要求的磁芯材料还没有见报道。目前主要开发的抗 EMI 滤波器材料系列主要分为铁氧体系列、纳米晶软磁系列,六角 Co2Z 系列,复合双性系列四大类。

3.3 抗 EMI 用软磁铁氧体材料特点

- (1) 磁导率较高；
- (2) 具有特定的损耗—频率响应曲线在需要衰减 EMI 信号的频段损耗较大，足以把 EMI 衰减到最低水平，而在需要传输信号的频段损耗小，信号很容易通过；
- (3) 具有较高的居里温度，即使因衰减 EMI 信号而发热的情况下，也能正常工作；
- (4) 具有较高的饱和磁通密度，在有直流偏置时也能正常工作；
- (5) 电阻率较高，以利于绝缘。

3.4 常用的抗 EMI 用软磁铁氧体材料

在电磁兼容设计中，软磁铁氧体材料的磁导率 μ 、比损耗 $\tan\delta/\mu_i$ 、饱和磁通密度 B_s 是重要的参数。近年来各种整机对高磁导率材料高频特性要求越来越高，要求磁导率 $\mu_i=8000\sim10000(100\text{kHz})$ ，比损耗 $\tan\delta/\mu_i<25\times10^{-6}(100\text{kHz})$ ， $B_s>380\text{mT}$ 。表 1 列出了世界相关国家抗 EMI 用软磁铁氧体材料的性能。

3.4.1 MnZn 软磁铁氧体材料

MnZn 软磁铁氧体材料产量大、用途广，适用于低频 1MHz 以下，它具有高 μ_i 、低损耗和高稳定性的优点。

例如 μ_i 可达 4×10^4 ， μ Q 积一般为 50-100 万 (100kHz)，最高可达 20-300 万。 B_s 可在 0.5 以上， H_c 可在 10A/m 以下， ρ 为 $10^{-10}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ， $\alpha\mu/\mu_i$ 与 D/μ_i 为 $10^{-5}\sim10^{-6}$ 。

3.4.2 NiZn 软磁铁氧体材料

NiZn 软磁铁氧体材料在 1MHz 以下的低频范围内，性能比不上 MnZn 系，但在 1MHz 以上，由于它具有多孔性及高电阻率，因而大大优于 MnZn 系而成为高频应用中性能最好的软磁材料。其电阻率 ρ 可达 $10^8\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ，高频损耗小 (例如 NiZn-40 在 1.5MHz 时， $\tan\delta/\mu_i\leq60\times10^{-6}$ ，即 $Q=400\sim500$)，故特别适用于高频 1-300MHz。而且 NiZn 材料的居里温度较 MnZn 高， B_s 可高至 0.5T， H_c 亦可小至 10A/m。此外，NiZn 系材料可以做到 λ 大，具有较大的非线性，可在高频或高频大功率以及磁致伸缩器件等应用，又由于 NiZn 材料在工艺上没有氧化问题，故制造工艺比 MnZn 材料简单。表 2 列出了常用的 NiZn 系铁氧体的性能指标。

表 1 世界相关国家抗 EMI 软磁铁氧体材料的性能

公司	牌号	μ_i	$B_s(\text{mT})$	$B_r(\text{mT})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	$F(\text{MHz})$	$\rho(\text{ }\Omega\cdot\text{cm})$
CM公司	25	125	425	260	225	1~1000	10^8
	28	450	330	210	175	1~600	-
Stewan公司	29	850	330	226	175	1~300	10^5
	27	1250	323	161	120	1~100	10^8
TDK		45~1500	280~310	150~280	100~300	1~1200	10^5
富士	RN	130	400	270	200	1~500	10^8
	HN	480	360	220	160	1~300	10^5
	NF	900	320	200	180	1~200	10^8
	BL	1000	310	150	130	1~100	10^8
东芝	FH	250~5000	1150	150	400	1~1500	
韩Core	CY	400~600	1200	130	420	1~2000	
	HK	300~5000	1180	160	450	1~100	
电子科大	CMC	3~15	100~300	150~200	180~250	1~2000	

表 2 常用的 NiZn 系铁氧体的性能指标

牌号	μ_i	$\tan\delta/\mu_i(\times10^{-6})$	$B_s(\text{T})$	$B_r(\text{T})$	$H_c(\text{A/m})$	适用频率
NX-5	5 ± 1	200(300MHz)	0.3	0.12	2000	300
NX-6	10 ± 2	650(50MHz)	0.18	0.09	2400	300
NX-20	24 ± 4	500(30MHz)	0.2	0.08	1200	50
NX-40	45 ± 9	60(2.5MHz)	0.29	0.09	320	40
NX-60	55 ± 7	300(25MHz)	0.33	0.23	480	25
NX-100	100 ± 20	200(15MHz)	0.3	0.2	240	12
NX-200	200 ± 40	100(3MHz)	0.31	0.21	120	3

中国电子科技集团公司第九研究所NiZn铁氧体材料性能见表3。

3.4.3 NiZnCu 软磁铁氧体材料

NiZn 软磁铁氧体材料可在 1MHz~300MHz 范围内使用，如果要进一步提高使用频率范围，可在 NiZn 材料中掺杂一定的 CuO，即得到 NiZnCu 软磁铁氧体材料，NiZnCu 铁氧体材料可工作 10MHz~1000MHz 的频率范围内，符合宽频抗电磁干扰材料的设计要求。CuO 的加入可以提高材料的 Q 值，但 μ 值却要降低，这是因为尖晶石铁氧体中少量的 Cu^{2+} 离子倾向于占据八面体位（B 位）。由于晶场的作用，位于八面体 B 位的 Cu^{2+} 离子产生能级分裂，同时改变了 Cu^{2+} 离子核外电子云的分布，造成 Cu^{2+} 离子周围的点阵发生畸变，正八面体畸变为沿 Z 轴方向伸长或缩短的八面体，增大铁氧体材料的应力各向异性，从而使材料 μ 值有所降低。同时，少量 CuO 的加入在一定程度上也可以降低材料的烧结温度。

4 抗 EMI 软磁铁氧体材料及元器件的应用

软磁铁氧体属于磁介质型吸波材料，MnZn 铁氧体抗 EMI 材料主要用于低频，NiZn 铁氧体 EMI 抑制材料主要用于高频，相应的抗 EMI 磁心相当于低通滤波器，能较好地解决电源线、信号线和连接器的高频干扰抑制问题。EMI 吸收磁环 / 磁珠的吸收干扰能力是用其阻抗特性来表征的。在低频段呈现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。在高频段，约为 0MHz 左右开始，阻抗增大，其感抗成分保持很小，电阻性分量却迅速增加，将高频段 EMI 干扰能量以热能形式吸收耗散。通常用两个关键点频率 5MHz 和 100MHz 处电阻值来标定 EMI 吸收磁环 / 磁珠的吸收特性。

抗 EMI 软磁铁氧体材料制作的信号线滤波器、电源线滤波器、EMI 抑制器等各种滤波器件可广泛应用于通信、音视频设备、办公电子设备、汽车电子系统、信号电缆等许多电子相关领域。抗 EMI 软磁铁氧体元器件的种类很多，滤波是

压缩干扰频谱的基本手段。抗 EMI 滤波器是 EMC 技术的基础元器件之一，功能独特，种类繁多。如：铁氧体磁珠电感器，H 形、T 形、L 形电路噪声滤波器，双孔、多孔、磁棒、磁管等不平衡变压器、扼流圈，电缆屏蔽用磁环等。

1) 在 PCB 上的应用

PCB 上的 EMI 源来自周期开关的数字电路，电源线或信号线会将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。在电路板的电源进口加上铁氧体抑制磁珠会有效地将高频噪音衰减掉，电源线会把外界电网的干扰、开关电压的噪音传到主机。在电源的出口和 PCB 电源线的入口设置铁氧体抑制元件，即可抑制电源与 PCB 之间高频干扰的传输，也可抑制 PCB 之间高频噪音的相互干扰。EMC 设计的首要方法是抑源法，即在 PCB 上的 EMI 源将 EMI 抑制掉。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，而这些电路通过连线可能产生更强的辐射。

2) 在电源线上的应用

电源线会把外界电网的干扰、开关电源的噪音传到主机。在电源的出口和 PCB 电源线的入口设置软磁铁氧体抑制元件，既可抑制电源与 PCB 之间的高频干扰的传输，也可抑 PCB 之间高频噪音的相互干扰。值得注意的是，在电源线上应用铁氧体元件时有 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 EMC 设计时要考虑饱和或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。所以用在电源线上的铁氧体抑制元件，要选择磁导率低的材料和横截面积大的元件。当偏流较大时，可将电源的出线（AC 的火线，DC 的十线）与回线（AC 的中线，DC 的地线）同时穿入一个磁管。这样可避免饱和，但这种方法只抑制共模噪音。

表 3 中国电子科技集团公司第九研究所 NiZn 铁氧体材料性能

材料 牌号	导磁率 μ_i ($\pm 20\%$)	比损耗 $\text{tg}\delta/\mu_i$ ($\times 10^{-6}$)	饱和磁感应强度 B_s mT	居里温度 T_c ()	温度系数 α_m PPm		电阻率 ρ W.cm
					(-55 ~ 25)	(25 ~ 125)	
R100DT	100	300 (15MHz)	260	250	800	300	10^7
R60DT	60	400 (20MHz)	260	300	80	300	10^7
R40DT	40	420 (30MHz)	260	300	80	300	10^7
R20DT	20	900 (80MHz)	240	300	80	300	10^7
R10DT	10	2000 (200MHz)	210	300	70	300	10^7

3) 在信号线上的应用

在计算机中, EMI 信号会通过主机到键盘的电缆传入到主机的驱动电路, 而后耦合到 CPU, 使其不能正常工作。主机的数据或噪音也可通过电缆线辐射出去。铁氧体磁珠可用在驱动电路与键盘之间, 将高频噪音抑制。由于键盘的工作频率在 1MHz 左右, 数据可以几乎无损耗地通过铁氧体磁珠。

扁平电缆也可用专用的软磁铁氧体抑制元件, 将噪音抑制在其辐射之前。

4) 在静电干扰上的应用

静电干扰属高频段的干扰 (1-2ns, 500MHz 以上), 铁氧体可缓变电压 (电流) 幅度。一般选取原则是磁导率低, 不易饱和, 可逆的铁氧体 (滞回曲线较窄, 软磁性材料优先), 原因是磁导率高容易饱和, 饱和后再对尖峰脉冲无大的影响, 主要思想还是靠电磁相互转化, 引起一个消减峰值的作用, 铁氧体本身不消耗功耗。

5) 在射频宽带器件中的应用

用高磁导率 NiCuZn 铁氧体材料制成的射频宽带器件, 主要功能是在宽频带范围内实现射频信号的能量传递和阻抗变换, 因而对于功率合成、功率分解、频率合成、信号编码、极性变换、网络匹配以及改善放大器的无耗反馈都起着十分重要的作用。这类器件包括传输线变压器、阻抗变换器、功率分配/合成器、混频器、定向耦合器、相位检波器等等, 由于它们具有频带宽、体积小、重量轻等特点而被广泛应用于雷达、电视、机顶盒、通信、仪器仪表、自动控制、电子对抗等领域。光纤同轴电缆混合 (HFC) 网络系统的改造与建设, 也大大刺激了对射频宽带铁氧体材料及器件的需求。HFC 网络系统需要大量的分支器、分配器、功分器、隔离器、放大器和宽带传输变压器等射频宽带器件, 而射频宽带 NiCuZn 铁氧体材料系列则是制造这些器件的关键。

6) 在 XDSL 和 LAN 通信变压器中的应用

采用高磁导率的 NiCuZn 铁氧体材料制备的共模扼流圈, 不仅有利于器件的小型化, 而且也能起到比 MnZn 系材料更好的干扰抑制。

7) 铁氧体抑制元件在移动通讯中的应用

移动通讯方面用的软磁铁氧体元件主要是无线寻呼用磁性天线, 手机用的是电磁兼容磁芯, 如高频段的防寄生振荡用磁芯、混频器用的磁芯、耦合线圈用磁芯, 以及片式电感等。

无绳和可视化电话机必须具有高清晰通话质量、有效防止窃听、抗干扰、通话范围大、功耗低、环保低辐射等

优势。因此需要具有抗干扰电磁兼容的高磁导率和低功率损耗软磁铁氧体功率材料和元件。

8) 在计算机片式电感中的应用

随着笔记本电脑里电子元件的时钟频率提高和小型化, 应用的元件也必须相应的高频化, 片式化, 因此, 需要 (1) 能降低电源线与地间产生噪声的铁氧体软磁共模滤波器; (2) 除去让数字信号失真的高次谐波噪声成份的片式磁珠滤波器; (3) 噪声屏蔽吸收体; (4) 夹持在电缆线上的噪声滤波器; (5) 电池供给的直流电压变为电路所需的直流电压用 DC-DC 变换器磁心; (6) 液晶背光源高交流电压用 DC-AC 逆变器; (7) 需大幅度降低磁损耗, 以达到电脑低发热、节能的铁氧体变压器磁心; (8) IEEE1394/USB 接口抗干扰片式磁珠、共模滤波器磁心。

随着无线网络技术的发展, 云端服务器市场需求日益增加。云端服务器电源中用到抗电磁干扰的锰锌高磁导率铁氧体材料。

9) 在新能源汽车中的应用

在有限的空间中组装入很多的电子电路的新能源汽车中, 电子电路容易受电磁波噪声的干扰, 采用 EMC 磁心是最好的对策。汽车导航系统被认为是汽车的“大脑”, 并且在日益计算机化, 用软磁铁氧体材料制成的 DC-AC 逆变器, DC-DC 变换器, EMC 噪声滤波器在汽车导航系统中得到充分应用。

10) 在太阳能光伏发电产业中的应用

光伏逆变器为太阳能光伏发电系统的重要组成部分之一, 主要功能是将太阳能模组输出的直流电转成交流电。EMC 滤波电感是光伏逆变器中的主要磁性元件之一。在太阳光伏发电站逆变器主电路中, 输入和输出端都应当接抗共模和差模干扰滤波电路, 其中滤波电感器参照抗电磁干扰标准设计。抗电磁干扰共模滤波电感器和差模滤波电感器, 都需要使用软磁铁氧体磁心。

11) 在风电产业中的应用

在风电产业中除了大量使用永磁材料外, 在电能转换过程中的变频器、转换器以及抗电磁干扰器件等都大量需要软磁铁氧体材料。

12) 在消费类电子产品中的应用

由于电磁波对各类电器的干扰造成环境电磁污染, 国内外已经把绿色环保提到首位工作, 禁止无电磁兼容和抗电磁干扰的电器出售, 因此抗电磁干扰的铁氧体抑制元件

被大量应用。

13) 在数字化视频和音频设备的应用

全球数字摄像机、数字照相机、数字录音机以及其它自动像机和音像设备发展很快。这些数码产品集液晶显示、磁记录和图像处理一身，因此需要体积小，抗噪声干扰好的磁性元件，极大多数采用贴片元件。

14) 在低频段微波暗室中的应用

由吸收体装饰的壁面构成的空间称为微波暗室。在暗室内可形成等效无反射的自由空间（无噪音区），从四周反射回来的电磁波要比直射电磁能量小得多，并可忽略不计。微波暗室主要用于雷达或通信天线、导弹、飞机、飞船、卫星等特性阻抗和耦合度的测量、宇航员用背肩式天线方向图的测量以及宇宙飞船的安装、测试和调整等，高磁导率 NiCuZn 铁氧体材料可以直接用于低频段微波暗室材料的制备，如果将其与某些非磁性物质进行适当的复合，可将中心吸波频率从几十 MHz 到数个 GHz 这一很宽的频段内进行调整。由高磁导率 NiCuZn 铁氧体材料及铁氧体吸收材料制作微波暗室的材料，这既可消除外界杂波干扰和提高测量精度与效率（室内可全天候工作），还可保守秘密。

15) 铁氧体吸收材料在隐身技术等军事中的应用

在飞机、导弹、坦克、战车、雷达、桥梁、仓库等移动与非移动各种军事武器装备和军事设施上面涂复吸收材料，就可以吸收侦察电波、衰减反射信号，从而突破敌方雷达的防区，这是反雷达侦察的一种有力手段，减少武器系统遭受红外制导导弹和激光武器袭击的一种方法。如美国 B-1 战略轰炸机由于涂复了吸收材料，其有效反射截面仅为 B-52 轰炸机的 1/50；在 OH-6 和 AH-1G 型眼镜蛇直升机发动机的整流罩上涂复吸收材料后可使发动机的红外辐射减弱 90% 左右。在 1990 年的海湾战争中，美国首批进入伊拉克境内的 F-117A 飞机就是涂复了吸收材料的隐形飞机，它们有效避开了伊拉克的雷达监测。据悉，瑞典海军近年来研制成功的世界上第一艘隐形战舰已投入使用，美、英、日、俄等国均已研制出自己的隐形坦克和其它隐形作战车辆。此外，还可用来隐蔽着落灯等机场导航设备及其它地面设备、舰船桅杆、甲板、潜艇的潜望镜支架和通气管道等设备。飞机机身对电磁波反射产生的假信号，可能导致高灵敏机载雷达假截获或假跟踪；一驾飞机或一艘舰船上的几部雷达同时工作时，雷达收发天线间的串扰有时十分严重，机上或舰上自带的干扰机也会干扰自带的

雷达或通信设备……。为减少诸如此类的干扰，国外常用铁氧体吸收材料优良的磁屏蔽来提高雷达或通信设备的性能。如在雷达或通信设备机身、天线和周围一切干扰物上涂复铁氧体吸收材料，则可使它们更灵敏、更准确地发现敌方目标；在雷达抛物线天线开口的四周壁上涂复铁氧体吸收材料，可减少副瓣对主瓣的干扰和增大发射天线的作用距离，对接收天线则起到降低假目标反射的干扰作用；在卫星通信系统中应用铁氧体吸收材料，将避免通信线路间的干扰，改善星载通信机和地面站的灵敏度，从而提高通信质量。由于高功率雷达、通信机、微波加热等设备的应用，防止电磁辐射或泄漏、保护操作人员的身体健康是一个全新而复杂的课题，铁氧体吸收材料就可达到这一目的。

另外，目前的家用电器普遍存在电磁辐射问题，通过合理使用铁氧体吸收材料及其元器件也可有效地加以抑制。

5 结语

随着人们对电磁干扰影响的重视，抗 EMI 软磁铁氧体材料及元器件已成为软磁铁氧体材料中产量增长最快的领域。全球抗 EMI 软磁铁氧体材料已经占据软磁铁氧体材料总产量的 38% 以上，而且这一比例还在继续扩大。我国由于以前对电磁干扰问题重视不够，导致国产设备在不同程度上都存在电磁干扰问题。随着国家电磁兼容 (EMC) 标准的颁布，和多媒体通信、数字通信网络、互联网、信息家电、4G 等的高速发展，电磁兼容 (EMC) 和抗电磁波干扰 (EMI) 领域对抗 EMI 元器件需求量增大，需要大量的宽频化和超高频化抗 EMI 软磁铁氧体材料。因此，为满足抗 EMI 性能要求，磁导率的频率特性、材料的饱和磁密、磁导率、功耗、直流偏置、磁滞系数和谐波失真的温度特性，以及阻抗、比损耗的频率特性、磁场特性等已成为抗 EMI 软磁铁氧体材料产业内同行的主攻方向。抗 EMI 软磁铁氧体材料国际市场年增幅达 25-40%，且价格不菲。作者曾在 1995 年出版的《磁性材料及器件》第 26 卷第 1 期《抗电磁波干扰及器件的开发动向》一文中预测，“到 2000 年，EMI 抑制将在我国发展成为一个新兴的产业”，如今，这一预测早已实现。随着宽频高阻抗系列材料的进步，我们更有理由相信抗 EMI 软磁铁氧体材料及元器件必将得到高速发展；加强对高性能抗 EMI 软磁铁氧体材料及元器件的研究开发也将取得良好的经济效益和社会效益。

（参考文献）略