

共模及共模/差模一体化滤波电感磁饱和问题

蒋胜勇, 赖永学, 胡春元, 王 宏

(风华高科 肇庆海特电子有限公司, 广东肇庆 526060)

摘 要: 基于滤波电感的工作原理, 推导出电桥测出的漏电感与漏磁通的对应关系, 并通过实例计算分析了漏电感导致滤波电感发生了磁饱和。介绍了几种共模/差模一体化滤波电感的磁芯设计方案, 并着重介绍了 VOGT 公司的 RK 系列共模/差模一体磁芯。最后以常用的 EE 型磁芯为例, 将线圈绕在两个边柱上, 中柱开有适度的气隙, 即可制成一款简单实用的共模/差模一体化滤波电感用磁芯。

关键词: 共模; 共模/差模; 漏感; 磁饱和

中图分类号: TM552

文献标识码: B

文章编号: 1001-3830(2011)02-0062-03

1 引言

电子整机的 EMI 杂波窜入电网, 会污染电网, 电网中的 EMI 杂波窜入电子整机, 也可能会造成电子整机工作不稳定。世界各国都出台了相关的技术标准来检测进入市场的电子整机是否达到相关的 EMI 限制规范, 不达标产品不能在市场上销售。故绝大部分电子产品为了通过相关的 EMI 认证, 都会设计一个 EMI 滤波器, 一般放在市电接线输入端。在 EMI 滤波器或模块中, 滤波电感是其重要组成部分, 其性能的好坏很大程度上决定了整个 EMI 滤波器的性能。电源电路在工作中, 不但会产生共模干扰, 也会产生差模干扰, 在大多数抗 EMI 模块中, 只使用共模滤波电感而将差模滤波电感省掉, 很难取得很好的滤波效果, 而同时两种电感都使用, 又会使滤波电路成本较高。本文从共模电感工作原理入手, 介绍了几种共模/差模一体化滤波电感磁芯, 以实例的方式介绍了滤波电感磁饱和发生的原因。

2 共模滤波器的工作原理与分析

2.1 共模滤波电感的工作原理

图 1 是典型的 EMI 滤波模块电路图, 其中 L_1 是共模滤波电感, 从性能价格综合比较, 其磁芯材质多选用高磁导率的 MnZn 软磁铁氧体材料, 对

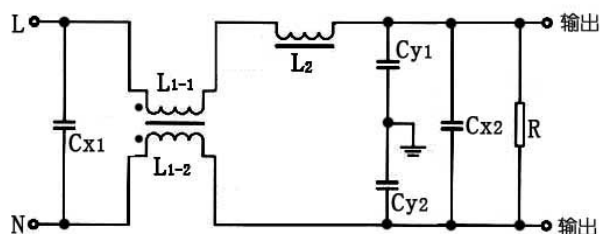


图 1 典型的 EMI 滤波器电路

10kHz~40MHz 范围的 EMI 信号有很强的滤除作用。 L_2 是差模滤波电感, 其线圈中要通过较大的工频工作电流, 且其产生的磁通不能由另一个绕组产生的磁通相互抵消, 故为了避免差模磁芯被工频电流“磁饱和”, 一般选用低磁导率、高饱和磁通密度的磁粉芯 (主要铁粉芯、铁硅铝、铁镍合金、MPP 等), 也有用开气隙的 MnZn 铁氧体或非晶磁芯的, 但从价格、性能方面比较, 以用铁粉芯和铁硅铝粉芯居多。

EMI 滤波模块中的共模滤波器磁芯以环形、ET 形、EE 形、UU 形居多, 它们有两个独立的铜线绕组。环形的共模滤波器两个绕组各绕在一半磁芯环上, 中间用绝缘片隔开。对于 ET 形、EE 形、UU 形的共模滤波电感, 为了减小分布电容, 一般会使用带有隔离槽的骨架。图 2 是一个典型的环形共模电感, 上面绕有两个匝数相等、绕向相反的绕组 N_1 、 N_2 。理论上流过两个独立绕组、流向相反的工频电流在磁芯中产生的磁通大小相等、方向相反, 如图 2 中长箭头所示, 刚好相互抵消而不会使磁芯饱和; 而当同方向流动的共模 EMI 信号流过共模滤波电感时, 两线圈中产生的磁通是相互加强

收稿日期: 2010-06-26 修回日期: 2010-12-21

通讯作者: 蒋胜勇 Tel: 0758-2718792

E-mail: chfhjisy@163.com

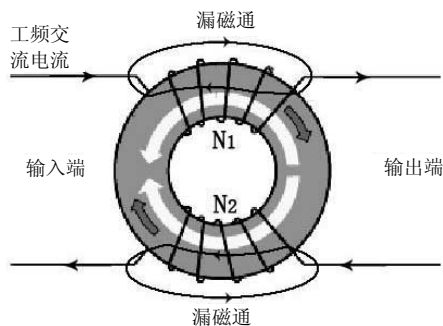


图2 环形共模电感^[1]

而能被磁环以将 EMI 能量转化成热量的形式而将其滤除掉,如图 2 中的短箭头所示。由于共模 EMI 信号只是一些相比于工频电流来说能量很弱、分布频带很宽、频率很高的信号,不会导致磁芯环的磁饱和。但实际中却有共模电感“磁饱和”的现象发生,这是为什么又如何避免呢?

2.2 绕组漏电感所对应的漏磁通

在分析共模电感为什么会出现饱和之前,先明确一下总磁通、主磁通、漏磁通的区别。电感量在量值上等于线圈中单位励磁电流所产生的磁通链数^[2]。在一个共模线圈上绕有两个铜线绕组 N_1 、 N_2 ,将其中一个绕组,如 N_2 开路,用电桥测量 N_1 两端的电感量得到一个较大的开路电感值 L_0 ,它所对应的磁通是绕组 N_1 产生的总磁通链数。

N_1 绕组漏感的标准测量方法是:将 N_2 绕组短接,然后再用电桥测量 N_1 两端的电感值,此时得到一个较小的电感量值,我们称它为线圈 N_1 的漏感值 $L_{l,1}$,它所对应的磁通是哪部分磁通呢?如图 3 所示,绕组 N_1 中流过测试电流(即励磁电流)产生磁通,我们称之为总磁通链数 $\Phi_{t,1}$ 。大部分磁通经过磁环来形成闭合路径,称之为 N_1 绕组的主磁通 $\Phi_{m,1}$,小部分经过空气闭合,称之为漏磁通 $\Phi_{l,1}$ 。

我们再来分析 N_1 绕组的漏感,如图 4 所示,将线圈 N_2 短路,线圈 N_1 中再通过测试电流仍然产

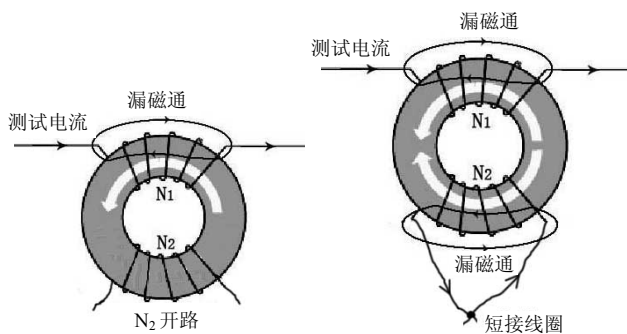


图3 N_1 绕组的开路电感

图4 N_1 绕组的漏感

生总磁通链数 $\Phi_{t,1}$,但以磁芯环为媒介流过绕组 N_2 的磁通为 $\Phi_{t,1} - \Phi_{l,1}$ 。据楞次定律,由于线圈 N_2 已短接,其上的感应电流必将产生与外部进入的磁通大小相等、方向相反的总磁通 $\Phi_{t,2}$,这样才能保证短接的 N_2 线圈中流过的净磁通链数为 0。绕组 N_2 产生的总磁通链数也有小部漏磁通 $\Phi_{l,2}$ 通过空气形成闭合回路。于是通过线图 N_1 的净磁通 $\Phi_{r,1}$:

$$\begin{aligned} \Phi_{r,1} &= \Phi_{t,1} - \Phi_{m,2} = \Phi_{t,1} - (\Phi_{t,2} - \Phi_{l,2}) \\ &= \Phi_{t,1} - [(\Phi_{t,1} - \Phi_{l,1}) - \Phi_{l,2}] = \Phi_{l,1} + \Phi_{l,2} \end{aligned}$$

于是,按照“电感量在数值上等于其所产生的磁通链数”的定义,当 N_2 线圈短接时在 N_1 线圈两端测得的漏感,其所对应的磁通是 $\Phi_{l,1} + \Phi_{l,2}$,而不仅仅是 $\Phi_{l,1}$,即测得的漏感量对应的是 N_1 线圈和 N_2 线圈漏磁通的总和,而不仅仅是 N_1 线圈的漏磁通。

2.3 共模电感磁饱和实例分析

某公司以 T25-15-10 磁芯环制作共模滤波电感,磁芯环材质采用 $\mu_r=10000$ 的高导锰锌软磁铁氧体。磁芯环磁路参数 $A_e=48.8\text{mm}^2$, $L_e=60.2\text{mm}$,电感因子 $A_L=10182\text{nH/N}^2$ 。应用于 220V 市电,额定工作电流 15A。在使用过程中发现在轻载下滤波效果很好,但用在额定功率时效果显著下降。

于是进行分析,磁环每个绕组的匝数 $N=12$,开路电感量均值为 1.45mH,绕组漏感均值为 $L_{\text{leak}}=12.9\mu\text{H}$,额定工作电流有效值 $I_{\text{rms}}=15\text{A}$ 。工作电流峰值 $I_p=1.414 \times 15\text{A}=21.21\text{A}$ 。据法拉第定律 $NB_p A_e = L_{\text{leak}} I_p$,将数据代入可算出磁环中的磁密峰值应达到 $B_p=467\text{mT}$ 。

对于磁导率为 10000 的高导 MnZn 软磁铁氧体,如广东风华高科肇庆海特电子有限公司的 HS103A,25°C 时饱和磁通密度 B_s 约为 380mT(测试条件 1194A/m),并且随着温度的升高 B_s 逐渐降低,到了 100°C 会降低至约 240mT,均低于 $B_p=467\text{mT}$ 。这就解释了为什么在额定负载时共模滤波器效果明显比轻载时差,是因为磁环在额定电流时被磁化饱和了。

有些应用场合,如 HID 灯的安定器、笔记本电脑的 AC-DC 电源,是将 EMI 滤波模块与主电路一起灌封在一个盒子里面的,即使共模扼流圈本身发热量甚微,但主电路的发热是会传导给共模滤波电感的,这会引发共模电感饱和和磁通密度的下降,增大了漏感使共模磁芯饱和的可能性。本例中应改变设计,可根据额定电流值适当减少绕组的匝数以

降低开路电感及漏感值，或者选用更大尺寸的磁芯。

3 共模/差模一体化滤波电感的磁饱和问题

一般共模电感器中的两个绕组都设计成相同的匝数，但由于绕制因素或其它制程工艺的差别，两个绕组的开路电感值不可能完全一样，存在一定的差异，这个差异可用作差模电感，用于滤除差模 EMI 信号。笔者用 Agilent E4980A (20Hz~2MHz) 电桥，以 10kHz、50mV 为测试条件，测试了某公司 10 个 ET24 共模电感，分别测试了两个绕组的电感及漏感，数据见表 1。

表 1 ET24 共模电感参数测试

编号	两绕组开路电感/mH			两绕组漏感/ μ H	
	L_{1-3}	L_{2-4}	ΔL_c	L_{1-3}	L_{2-4}
1	21.86	21.91	0.05	188.9	189.0
2	20.03	20.19	0.16	187.6	187.6
3	18.74	18.87	0.13	188.2	188.3
4	19.07	19.13	0.06	184.3	184.4
5	19.37	19.53	0.16	188.9	188.7
6	20.87	20.95	0.08	191.6	191.6
7	16.34	16.37	0.03	191.7	191.8
8	20.83	20.87	0.04	186.6	186.5
9	18.82	18.89	0.07	192.4	192.8
10	22.98	23.13	0.15	187.6	187.5
均值	19.89	19.98	0.09	188.8	188.8

当共模电感接入电路工作时，由于两绕组产生的磁通不能完全抵消，表 1 显示两绕组开路电感最大差值可达 0.16mH，于是就有一个差模磁通存在，这也是导致共模电感趋向饱和的原因之一，最恶劣的情况是与该绕组的漏感叠加在一起，这样更增大共模磁芯出现饱和的可能性。有些设计中故意将两绕组的匝数设计得不一样，以便获得较大的差模电感值，使共模滤波器起到共模/差模电感一体化的效果，这种情况下一定要注意避免过大差模电感值会使磁芯饱和的问题。

还有一类差模/共模一体化滤波电感，其两个绕组的匝数是一样的，但通过对磁芯结构的改良，将一小部分磁通通过“磁桥”分流，比较经典的设计如 VOGT 公司的 RK 系列共模/差模一体化滤波电感^[5]。如图 5 所示，它的框形主体是一个共模电感，中间的圆棒形磁条形成差模磁通的通路，十分巧妙地将共模与差模电感结合到一起。图 6 表明通

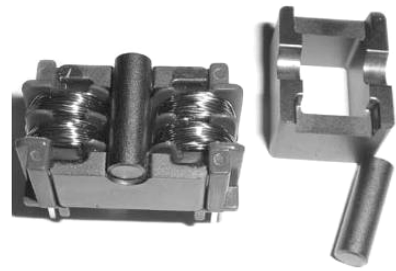


图 5 VOGT RK 系列滤波电感

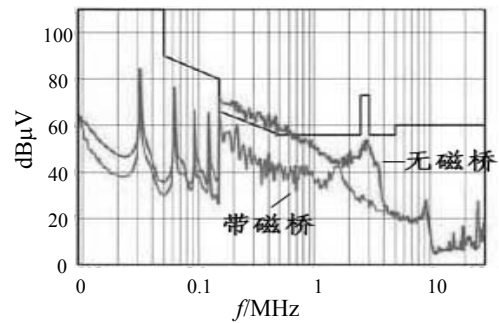


图 6 RK 磁芯有无“磁桥”的滤波效果图对比

过 RK 系列增加“磁桥”设计，得到的寄生“差模”电感使 RK 系列对 EMI 的总滤除效果得到了明显的提升。

此外其它设计者，通过另外的巧妙设计将共模/差模滤波电感设计在一个磁芯上。图 7、图 8 是另外两个差模/共模一体化滤波电感器设计实例。

如图 5、图 7、图 8 所示的这类共模/差模一体化的磁芯，按照标准漏感测试方法，将其中一个绕组短接，测得的漏感值要远大于没有“磁桥”设计

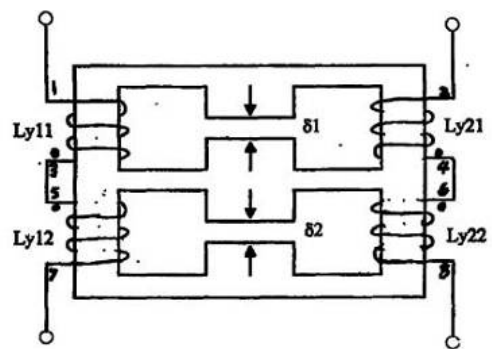


图 7 共/差模一体滤波电感器^[3]

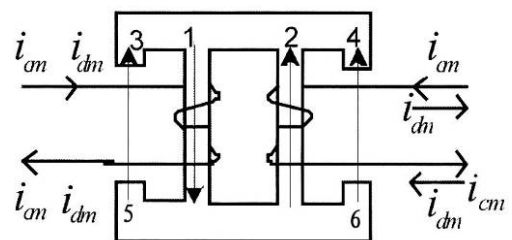


图 8 共/差模一体化滤波电感器^[4]

(下转 76 页)

大。一方面,要求不断开发新材料、新产品,另一方面,要加速生产工艺研究、提高生产自动化程度、提高生产效率、降低生产成本。而料浆的制备和自动化传输则是永磁铁氧体化生产的基础和关键工艺。课题组通过深入研究料浆特性、料浆适宜传输含水率^[3]、改进料浆制备工艺(采用旋转过滤法或塔式沉淀法)、采用隔膜泵传输技术、利用高强度复合管道和节点加固技术等,实现了料浆的全封闭、全自动管道传输。系统运行良好、稳定。提高了生产效率、实现了技术进步、改善了企业形象。

(上接 64 页)

的磁芯,并且还可根据实际需要调节“磁桥”与主体磁芯气隙的大小来灵活调节“漏感”的大小。这种情况下要注意的是漏感值越大,工频电流使磁芯饱和的可能性也就越大,故在设计时应注意漏感值与开路电感值的比值。为方便读者设计参考,笔者将 VOGT RK 系列有无磁桥时的共模/差模一体化滤波电感的漏感与开路电感列于表 2。从表中看出,加了“磁桥”设计后,在同样的开路电感下,漏感值增加了 3~4 倍,但其额定工作电流也相应要下降一些,以避免出现磁饱和。

表 2 RK17 磁芯共模/差模一体化滤波电感有无磁桥参数对比^[5]

开路电感/mH	漏感/ μH		(漏感/开路电感)%		额定电流/A	
	无磁桥	有磁桥	无磁桥	有磁桥	无磁桥	有磁桥
3.3	25	100	0.76	3.03	1.5	1
6.8	50	190	0.74	2.79	1.2	0.7
10	75	285	0.75	2.85	0.9	0.55
15	110	425	0.73	2.83	0.8	0.45
27	200	765	0.74	2.83	0.5	0.35
39	300	1100	0.77	2.82	0.45	0.3
47	350	1300	0.74	2.77	0.4	0.25

对于共模/差模一体化磁芯而言,“磁桥”分流的磁通大小(对应漏感)对磁芯是否会被工频电流饱和和磁化至关重要,分流的磁通越大,磁芯越易被饱和和磁化而导致磁芯失效。如将图 5 中的磁棒与主体磁芯制成一体磁芯,将图 7、图 8 中的气隙变为 0,则只要很小的工频电流就可使磁芯饱和和磁化。笔者以 EE20 磁芯(如图 9)为例,在没有切割的连体磁芯的两个边柱上各绕 10 匝铜线,测得开路电感为 199 μH ,将其中一个绕组短接,测得另一个绕组的漏感为 180 μH 。漏感/开路电感之比高达

参考文献:

- [1] 孙亦栋. 铁氧体工艺[M]. 北京: 电子工业出版社, 93-94.
- [2] 宛德福, 马兴隆. 磁性物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999 年, 258-259.
- [3] 埃贡·菲舍尔. 铁氧体磁体成型技术[Z]. 绵阳: 机电部磁性材料及器件专业情报网, 1990.

作者简介: 谢瑞兵(1967—), 男, 工程师, 1989 年毕业于山东大学物理系功能材料专业, 曾在国营金川无线电器材有限责任公司等多家企业从事铁氧体元器件生产工艺技术管理和开发工作, 现为宜宾职业技术学院现代制造工程系材料工程技术专业教师, 主要讲授“磁性物理学”、“铁氧体工艺”、“磁应用技术”等专业课程。

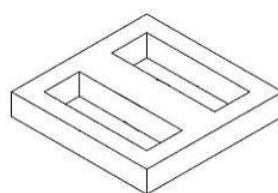


图 9 EE20 磁芯连体磁芯

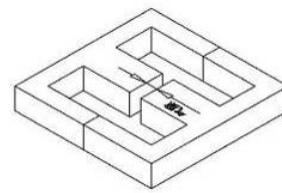


图 10 EE20 开气隙磁芯

90.5%,基本上可认为是一个差模滤波电感或者说是一个以差模滤波为主的滤波电感,选用低饱和磁通密度的 MnZn 高导材质极易被饱和,必须在中柱开气隙以大幅减少“磁桥”分流的磁通才行(图 10)。

4 总结

(1) 共模滤波电感器、共模/差模一体化电感器,设计中一般是以共模滤波为主、差模滤波为辅。且其选用的磁芯多为锰锌高导磁芯,为了避免磁芯的磁饱和,要注意漏感值与开路电感值的比值。

(2) 在将滤波电感与主电路集成在一起的应用场合,要注意温升会使锰锌高导磁芯的饱和磁通密度下降,磁饱和风险增加的问题。

(3) 将共模电感上的两个绕组设计成不同匝数,要注意避免磁通不对称引起的磁芯饱和现象。

参考文献:

- [1] www.epcos.com. magnetic components. issue4 october 2003.
- [2] 程守洙, 江之永. 普通物理学(第二册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982. 206-211.
- [3] 中华人民共和国国家知识产权局网站 www.sipo.gov.cn. 申莉萌, 王希天. EMI 滤波器的磁集成装置及其制备方法. 公开号 CN 101369480 A.
- [4] 郝文慧, 杨玉岗, 李兴珠, 等. 基于差共模滤波器滤波电感集成的研究[J]. 国际电子变压器, 2010, 06: 81.
- [5] VOGT Inductive Components and Modules 2007: 29-35.

作者简介: 蒋胜勇(1977—), 男, 学士, 电子材料工程师, 主要从事磁性材料的研发、生产工艺与应用研究。