

针对共模电感的纳米晶磁芯的阻尼振荡法应用

孙俊超¹, 窦熠² (译)

¹Bs & T Frankfurt am Main GmbH, 德国 法兰克福 60439

² 丹麦工业大学研究员

绪论

整流技术的广泛应用在系统中引入了更多的电磁干扰。通常情况, 工程师在系统中引入共模滤波器以解决这个问题。一般来说, 高磁导率的铁氧体多用于抑制传导干扰, 而地磁导率的铁氧体多用于屏蔽辐射干扰。纳米晶磁芯在此类应用中也表现出了良好的技术优势, 并且逐渐代替了一些原本基于铁氧体磁芯的应用。其中的典型代表就是在严酷环境中需要大电流支撑的电机驱动应用。针对于纳米晶磁芯的设计方法可以参考文献【1】。

共模电感是一个抑制共模干扰的有效手段, 并且其结构可以简便地适配在任意驱动系统的电源电缆上。流经电机绕组和机壳的寄生电容的共模电流会被此结构显著地抑制。这种等效的滤波效果可以通过叠加多个共模电感磁芯来增强, 并且饱和时间和寄生电容得以相应地增加和减小。

然而, 在共模电感的应用中如何有效地测量验证纳米晶磁芯仍旧是一个公认的难题。

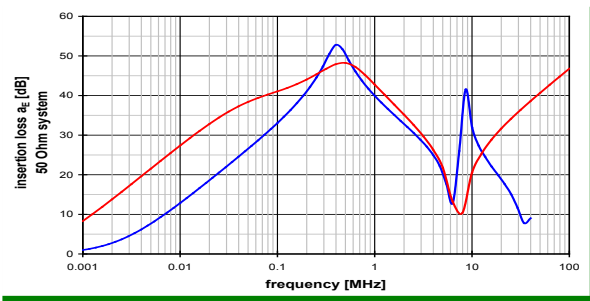


图1 共模电感的功能性工作原理: 纳米晶和铁氧体的对比

首先, 让我们先来回顾共模电感在设计时全频谱下的性能: 器件中的励磁电感通常负责抑制噪声源频率附近的干扰 (<150 kHz) 而漏感通常负责高频干扰的抑制 (>10 MHz); 而取决于励磁电感值和电容值的谐振峰的突出程度和相应的温度影响是其谐波吸收有效程度的关键设计参数。

其次, 纳米晶材料的高饱和特性可以让共模电感在体积压缩的情况下提供良好的噪声吸收能力。相比于铁氧体器件, 纳米晶器件可以在维持相同感值的情况下采用较少的绕组, 因而由于较小的寄生电容使其谐振峰也可以前移。此外, 纳米晶器件的饱和感值和漏感值都明显较小, 因而在高频开关的工作情况下可以视作完美的磁开关。

最后, 纳米晶材料的高居里温度使其在热损耗较大的电机驱动应用中能够维持良好的热稳定性。

纳米晶材料的优势已经得到了广泛认同, 但是其作为共模电感器件的测量和量化方法仍不明确, 尤其是在磁芯几何尺寸的影响下, 磁链和感值才是设计者关注的问题, 而非传统的磁感应强度和相对磁导率。并且, 几何尺寸作为器件的变量, 唯有制造者才能明确和量化。因而对于器件的设计者和最终的用户来讲, 制造商提供的典型值缺乏绝对的参考意义, 而极限值往往又难以确定。

在本文中, 针对于纳米晶器件的阻尼振荡法通过详细的运行描述和技术讨论得以呈现。并且此方法的使用案例和结果讨论也一同得以阐述。

适用情景

铁氧体材料的测试标准已在 IEC 62044-2 中得以阐述, 包括初始磁导率和电感系数等参数都是在室温下通过小信号测量得出 (23°C, 10 kHz 且 <25 mT, 切变化值不超过 20%)。然而, 一个针对于纳米晶磁芯的测试应该有所不同。

典型的纳米晶材料的数据手册可以参考文献【2】。

其中关于磁性特性的描述, 实际上只看到电感系数 (A_L), 并且是由标么值和给定测量情况下给出 (分别于 10kHz 和 100kHz)。此外, 测了条件也可看出是在 40mA 的激励下给出, 其对应的磁导率是再 2.5mA/cm 的情况下测量。另一参数 u_3 , 表示其测量条件为磁场强度为 3mA/cm。由此, 可以得到其具体的描述参数:

$I_{eff} \times N = 40\text{mA}$

$f = 10\text{kHz}$

测量值: $13.1\mu\text{H} < A_L < 21.9\mu\text{H}$

$f = 100\text{kHz}$

测量值: $10.1\mu\text{H} < A_L < 20.3\mu\text{H}$

公差: $-15\% + 45\%$ @ 10kHz 和 $-50\% + 35\%$ @ 100kHz

这些有限的测量结果导致了设计基准难以界定,并且使得来源不同的纳米晶磁芯比较变得更为不可能。总而言之,小信号测量对比纳米晶磁芯来说是重要切必要的,但是与完整地描述磁芯的性能仍相去甚远。显然,一个更好且更易实现的测量方法仍旧急需,而Bs-T Pulse解决方案能够提供一简单易行且高度开放透明测量途径去解决这一问题。

Bs&T 的技术与数据评估

基于IEEE 389的改进型阻尼振荡法是一套大信号和高电流激励的磁测量方案,并且,其电流回溯能够提供和描绘完整的重复励磁过程。而Bs&T pulse micro是基于此方案的软硬件集成测试设备。此设备的基本运行规律在文献【2】中已有描述。在阻尼振荡过程中,在电容贮藏的能量会完全释放并用于共模电感的励磁,并且此过程由晶闸管准且控制。在图2中一个原始测量的数据,包括电感和电流随时间变化的图像被给出,并且实际应用中,这些数据也会全部提供给客户以供日后的分析。

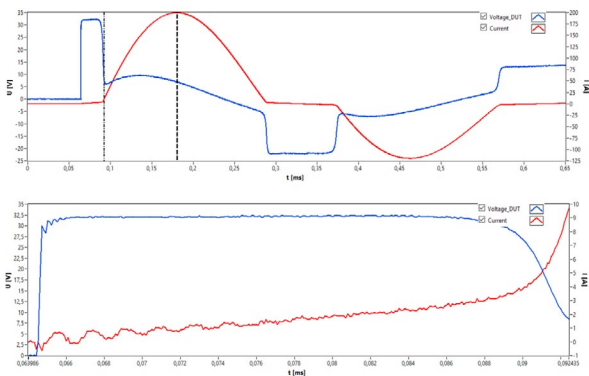


图2 Bs&T pulse 的原始测试示例:
(1) 完整的阻尼振荡波形 (2) 放大的初始阶段波形

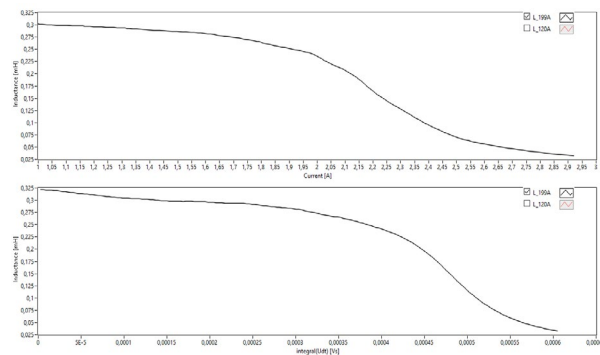
共模电感的描述

此示例中的被测物为一共模电感,由两个带绕磁芯和

三匝定制绕组(0.5m长/10mΩ直流电阻/34mΩ交流电阻)构成并且测量时直接与Bs&T设备连接。在此Bs&T micro设备中,储能电能为430μF因而阻尼振荡的谐振腔为一LC结构,包括储能电容和非线性的共模电感。

电感值(励磁)

被测物的差分电感可以直接由电压电流测量数据得出。在第一个电流振荡峰值附近,此差分电感关于电流激励的变化和关于磁链的变化,均可在图3中读出。此被测物的差分电感为270uH,并且其对于激励电流和磁链的非线性变化可以准确测量。



被测物: 2个叠放的V144纳米晶带材磁芯与3匝条带型绕组
图3 阻尼振荡法得出的差分电感值与励磁电流和励磁磁链的测量结果

B-H 曲线

在磁芯几何尺寸已知的情况下,非线性的B-H曲线可以直接绘制。在图4中,单极性的激励和双极性的激励均可以准确显示。在双极性的测量结果表明了其对于噪声的抑制能力。

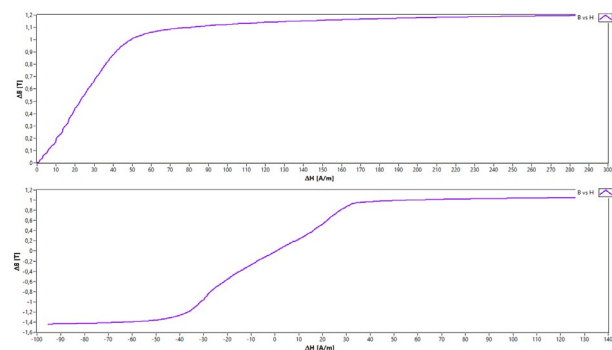


图4 阻尼振荡法得出的B-H曲线
(1) 单极性结果 (2) 双极性结果

饱和 / 漏电感值

被测物的饱和 / 漏电感值在半个振荡周期的计算值在图 5 中显示^[5]:

$$L_{sat} = (\tau/\pi)2/C = 15.6\mu\text{H}$$

$$\tau = 323.7\mu\text{s} - 66.7\mu\text{s} = 257\mu\text{s}; C = 430\mu\text{F}$$

$$L_{sat} = \mu_0 \mu_r N^2 / C_1 \sim 15.6\mu\text{H}$$

$$C_1 = l_c / A_e$$

此值可由 $\mu_r \sim 1$ 计算确认。

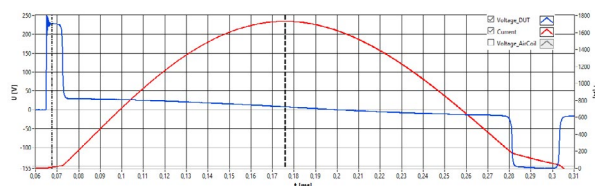


图 5 饱和状态下被测物漏感的测量结果 (仅显示半个正弦周期)

阻尼系数可有文献【8】的方法计算得到

$$a = \frac{\ln \frac{i_1}{i_2}}{t_2 - t_1}$$

其中 $a = \ln i_2 / i_1 / (t_2 - t_1) = 1800\text{Hz}$; $i_1 = 199\text{A}$ 在 t_1 为 0.18ms , $i_2 = 120\text{A}$; t_2 为 0.46ms ; $f = 1 / (t_2 - t_1) = 3.57\text{kHz}$ 。

至此, 该由纳米晶材料制成的共模电感的特性可以全部描绘:

- 小信号测量可得其在 10kHz 和 100kHz 下的 μ_3 值;
- 此外, 由 Bs&T pulse 的大信号测量提供了其信号抑制能力:
- 其差分电感对电流的变化可在图 3 中读出;
- 其在饱和阶段的漏感可以在图 5 中读出;
- 其阻尼系数和相应的谐振频率可以在图 5 中得出;
- 其典型的饱和磁通密度 (对应此几何尺寸下的归一化值) 为 1.2T , 可在图 4 中读出。

此外, 被测物的等效交流电阻, 通常在磁芯饱和阶段非常重要, 也能够在此电流达到峰值时 ($\frac{di}{dt} = 0$) 被读出。在这个测量示例中, 交流电阻的测量值为直流电阻的三倍。需要特殊说明的是, 在此测量中仅有感性部分的电压下降值才能用来反映各种磁性特性。此测量得出的交流电阻, 作为脉冲测量的副产品, 仍具有重要的意义, 因为损耗也在这种应用中有举足轻重的作用, 尤其是当该器件工作在饱和或接近饱和的状态。

带制的纳米晶磁芯大多数会被包裹在塑料外壳中, 因此从制造的角度来讲很难得到一个固定的包装系数 (由于带材的厚度大概仅有约 $22\mu\text{m}$)。虽然此参数很难得到, 但是一旦能够由制造商提供, 后续的测量鉴定就变得相对容易起来。

脉冲励磁的理论模型

最为经典的涡流模型是基于用恒定磁导率的均一介质建立的, 并且其不受激励的影响^[4]。然而实际上, 恒定磁导率和均一介质的假设都难以成立。Magnetic front 模型增加了对动态励磁速率 (dB/dt) 的描述, 能够提供合理的动态差分磁导率的结果^{[5][6]}。这个磁导率正比于电阻率和由伏秒描述的磁链并反比于带材的厚度和励磁速率 $dB/dt(\text{T}/\mu\text{s})$ 。这就意味着不同的脉冲能量会带来不同的电压和电流衰减, 并且反映出不同的 B-H 曲线, 也源于不同的励磁速率。

图 6 展示了同一个两个不同的电压和电流衰退曲线。该被测物由拉力退火的, 长度为 0.5m 带材绕制而成, 绕组为 8 匝。有趣的是, 同样的磁链, 可以反映出不同的电压幅值 (50V 和 220V), 和不同的脉冲长度, 并且反映出的电流波形也非常不同。由于饱和状态下的漏感的大小在同一被测物下应当相同, 这些曲线的不同应与电容贮存的能量大小有关。

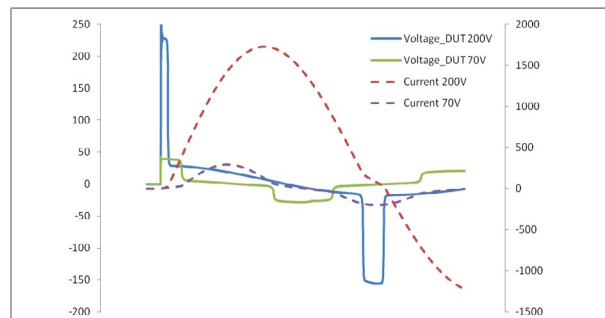


图 6 同一被测物在不同放电电压下的电压 / 电流衰退波形

磁芯的电阻率, 带材的厚度和磁链实际上属于材料的特性, 取决于化学组成和制造过程, 由磁芯生产商决定, 而磁芯的励磁速率却取决于应用, 换言之是由使用者来决定。由于共模电感承担的是脉冲励磁, 因此在不同的应用中, 不同的放电电压便能够表示为不同的磁感应强度的变化率。由 Bs&T pulse 测量出的脉冲结果能够提供的完整的磁芯性能, 并且其中的干扰能令能够由对应的磁链来抑制。因此该测量