

具有激光加工气隙的嵌入式电感器

Jim Quilici

Radial Electronics 公司

能效是电子和电子封装发展的主要动力。为了管理功耗，智能手机、平板电脑、电子阅读器等便携式设备通常使用多个电源电压和 DC/DC 转换器。这些转换器大多数都基于开关模式电源转换 (SMPC)。在功率转换器中，电感器和电子变压器用于在开关周期期间临时存储能量。它们还具有过滤噪音的功能。功率磁性通常是电路中最大和最昂贵的器件。将磁性元件集成到功率转换器模块或系统板中可以显著减小功率转换器功能的尺寸和成本。

嵌入式磁性元件提供了将磁性功能集成到 PCB 基板中的方法。铁磁芯被嵌入 PCB 基板中，而电感绕组使用光刻和标准 PCB 工艺来实现。器件不是一次构建一次，而是排列在 PCB 面板上，并使用自动化和批处理工艺制造。在大多数情况下，嵌入式磁芯将是环形的，因为就每圈提供的高电感并包含感应磁通量而言，这是最有效的形状。另外，与其他芯形状相比，环形线圈是相对容易制造的形状并且通常便宜。常见的材料是压制陶瓷铁氧体和带缠绕的非晶金属。

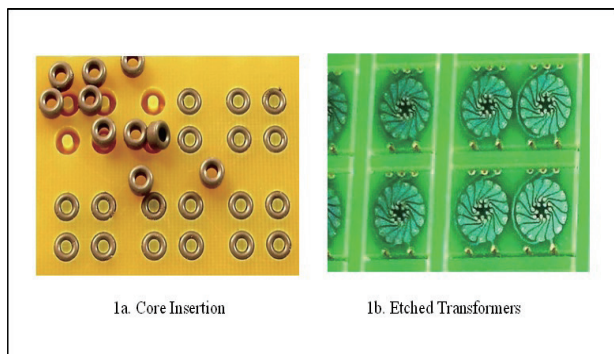


图 1 嵌入式磁性结构

如上所述，电感器和变压器被用于功率转换器中，以在开关动作期间临时存储能量。磁性材料的关键指标是它们存储磁通量能量的能力。当电流被驱动通过缠绕在磁芯材料上的导体时，它会产生磁场 (H)，该磁场在下面的磁芯材料中感应出磁通量 (B)。电流能量暂时转换为磁通

量并存储在磁芯内。通量 B 基本上是磁芯内的场密度。B 具有特斯拉 (T) (或高斯 G, 10000G=1T) 的单位, H 是磁场强度的量度, 单位为奥斯特 (Oe, 1A/m=4×10⁻³Oe)。B 和 H 与电压和电流密切相关, 其中磁通密度与施加的电压成比例, 并且磁化力 H 与电流成比例。磁场和磁通之间的关系与材料磁导率 μ 相关联。

$$(1) B = \mu H$$

磁通密度也可以用电感和驱动电流表示, 通过以下关系表征:

$$(2) B = L_I / N A_c$$

其中 L 是电感, I 是驱动电流, N 是绕组数, A_c 是磁芯的横截面积。

设计人员通常使用 B-H 曲线来分析驱动电压和驱动电流之间的关系。图 2 表明磁性材料具有磁通饱和和水平 B_{SAT}, 这是磁芯达到峰值磁通密度的状态。此时, 无论驱动电压的幅度如何, 磁芯都无法存储更多能量。对于铁氧体材料, 饱和发生在 0.350 至 0.550T 的范围内 (特斯拉是磁通密度的单位), 这取决于组分。具有高磁导率的磁芯将以适度的电流饱和。为了允许更高的驱动电流, 通常在磁通路径中引入气隙。这有效地降低了磁芯材料的渗透性并导致绕组的电感减小。如图 2 所示, 磁芯气隙使 B-H 曲线变平。降低电感允许磁芯存储来自更高驱动电流的能量。

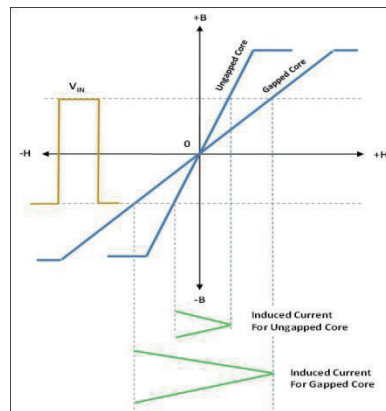


图 2 无气隙和有气隙铁氧体磁芯的典型 B-H 图

通过在磁芯放置一个小切口产生气隙。振荡是降低电感并使磁芯在达到饱和之前以更高电流驱动的常用方法。它可以在不同的工作温度和驱动电流下稳定磁芯的性能。基本上，气隙磁芯会降低有效渗透率。气隙磁芯的相对磁导率可通过以下公式计算：

$$(3) \mu_r' = \mu_r / (1 + g \times \mu_r / l_g)$$

其中 g 是气隙距离， l_g 是围绕磁芯圆周的通量的路径长度。在许多情况下，通过气隙减少渗透率将超过 10 倍。创造具有高渗透性的材料和磁芯结构，然后通过气隙减少它们似乎适得其反。但是，这对于增加稳定性和允许更高的驱动电流是必要的。粉末铁芯材料一直是可以使用选项，这些材料通常被描述为具有分布气隙。这些材料通常具有小于 100 的渗透性，并且由于其构造中使用的贵金属，而供应商数量有限，因此通常更昂贵。对于传统的铁氧体，我们可以施加气隙以实现 100 到 1000 之间的磁导率值，这减少了实现特定电感所需的绕组数量。减少绕组数量有利于减少绕组中的电阻损耗。粉末状铁材料通常表现出更高的铁损，这也会影响功率转换器的效率。磁芯损耗是磁芯材料中交变磁场的结果。磁芯损耗是由磁芯材料中的磁滞、涡流和剩余损耗引起的，并且作为热耗散掉。

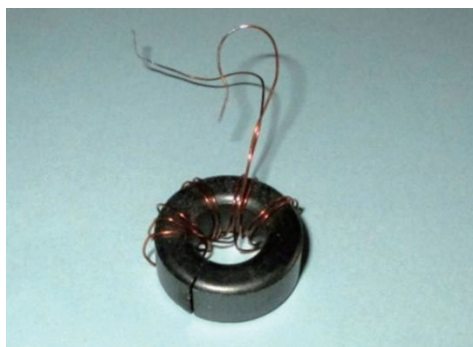


图 3 有气隙的环形线圈的示例

图 4 显示了 2000 渗透率锰锌 (MnZn) 材料的渗透率与温度的典型图表，该材料通常用于电力应用。在这里，我们看到温度变化很大。对磁芯进行切割可将磁导率降低至约 350，并在整个温度范围内使特性变平。这对于需要在低于 0°C 的温度下运行的应用非常重要。

这带给我们一种设计方法。一旦设计人员确定了应用

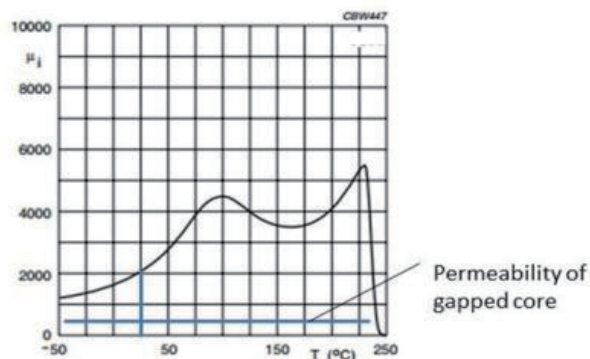


图 4 铁氧体磁导率与温度的关系 (25°C 时磁导率 1500°)

所需的电感，就需要设计更高的电感值，预计磁芯有气隙后电感会减小。

对于功率转换器，嵌入式磁性元件可用于高达 60W 的应用。功率容量主要取决于适合嵌入 PCB 基板的磁芯尺寸。PCB 结构受 PCB 厚度和磁芯高度 (厚度) 的限制。实际应用包括微处理器、电池充电器和 LED 照明的电源。市场上有许多半导体 SMPC 控制器专门为这些应用量身定制。大多数这些设备的开关速度范围为 500kHz 至 2MHz。在这些开关速度下，通常使用 1μH 至 10μH 范围内的电感器。对于这项调查，我们设计了一个测试试样，指标范围为 2.2μH 至 10μH。10μH 配置是本文的重点。通常，对于功率应用，最好选择磁导率在 2K 至 3K 范围内的 MnZn 铁氧体材料，因为它们具有磁芯损耗特性。然而，在这个气隙实验中，选择具有 5K 渗透率的磁芯仅仅是因为该值在作者的库存中可用。在该特定实验中，这种渗透率差异不显著。一旦施加气隙，每圈的磁芯电感由气隙决定。初始磁导率的差异仅仅是最终电感的微小差异。

