

如何利用Standoff 来优化磁芯设计

Optimize the core design with standoff

欧阳过

深圳顺络电子股份有限公司

关键词: Standoff, 优化设计, 磁路, 电感, 变压器, 磁性器件

1 引言

在变压器和电感器等磁性器件中, Standoff 是一个必备设计, 起到稳定器件, 方便洗板, 散热, 以及促进爬锡等作用, 本文主要论述如何利用 Standoff 在磁芯设计中达到优化的效果。在网联科技, 物联网技术迅猛发展的今天, 轻薄化成为消费电子的主流, 而在很多 DC-DC 模块中, 我们可以看到, 功率电感器往往是众多器件中的大个子。所以, 此器件的设计成为关键, 如果能有效利用空间, 优化设计, 把电感的尺寸降下来, 会使我们的设计赢得加分机会。

2 理论推导

功率电感器的两个主要参数是 L(感值) 和 Isat(饱和电流), 可以用下列公式来表达它们之间的关系

$$L = \frac{N^2}{\frac{\mu_0 * \mu_i * A_c}{l_c} + \frac{\mu_0 * A_g}{l_g}} \quad \text{公式(1)}$$

N 是该电感器所用线圈的圈数, μ_0 为空气磁导率, 是一个常数 $4\pi * 10^{-7}$, μ_i 为该磁性材料的相对磁导率, A_c 为磁芯的有效面积, 单位为平方米 (m^2), l_c 为磁芯的有效磁路长度, 单位为米 (m), A_g 为气隙的有效截面积, 单位与 A_c 相同, l_g 为气隙的长度, 单位为米 (m). 由于 μ_i 从几十到几万分布, 所以决定电感值的主要因素是气隙大小, 尤其是锰锌铁氧体材料, 其相对磁导率在几千甚至上万, 气隙的影响尤其关键。

$$L = \frac{N^2 * \mu_0 * \mu_i * A_c}{l_c} \quad \text{公式(2)}$$

对于合金材料, 其气隙是分布气隙, 并不能实际量测出来, 我们往往用公式 (2) 来表达。其中 μ_i 是指材料的

等效磁导率, A_c 与 l_c 分别是该磁芯的等效截面积和等效磁路长度, 单位与公式 (1) 中相同。当然, 对于铁氧体磁芯, 虽然开的是物理气隙, 其原理也可以用上式来表达, 但实际计算仍以公式 (1) 为准。

在 IEC60205 中, 定义了 A_c 与 l_c 的求解方法, 如以下公式

$$\begin{aligned} C_1 &= \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{A_i} \\ C_2 &= \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{A_i^2} \end{aligned} \quad \text{公式(3)}$$

$$l_e = \frac{C_1^2}{C_2} \quad A_e = \frac{C_1}{C_2} \quad \text{公式(4)}$$

其原理就是将磁芯按闭合磁路方向分解成若干部分, 分别求出每个部分的磁路长度和截面积, 采用求和的方式求出常数 C_1 和 C_2 , 从而得到 A_c 与 l_c , 请注意, 在这个求和过程中不应该包含气隙部分, 因为气隙部分不会饱和, 哪怕是它的截面积再小。

$$Isat = \frac{B * N * A_e}{L} \quad \text{公式(5)}$$

Isat 是指该电感器能承载的最大纹波电流, 单位为安培 (A), B 为该磁芯材料的磁感应强度, 单位为特斯拉 (T), N 是该线圈的圈数. L 为该电感的感值, 单位为亨利 (H).

B 值由该磁性材料决定, 比如铁粉芯最大可以做到 1.0T, 而铁氧体目前最大的据称有 0.6T, 如东磁的 DMR28, 以及天通的 TPB16, 铁氧体材料的 B 跟温度有关, 温度越高, B 值越低。而合金材料则在其工作温度范围内 B 值恒定。A_c 则由磁芯结构有关, L 与圈数和磁性材料的有效磁导率有关。反应磁性材料特性的是相对磁导率, 这里之所以不讲相对磁导率, 是因为大功率电感一般都要开气隙 (包括合金材料的分布气隙), 在开气隙后, 磁性材料的相对磁导率对电感值不起关键作用, 气隙大小是决定因素, 所以

我们把气隙与磁性材料综合起来考虑，称之为有效磁导率。

从公式(5)可以看出

* 电感值往往有电路设计需要决定，而圈数也有空间大小以及铜损的需要来决定，在电路设计定好了以后，如果指定了磁性材料，该电感能承载的最大饱和电流由 A_e 决定，也就是说，要想该电感能通过更大的电流而不饱和，我们就要使该磁性的 A_e 尽可能地大，这就是说我们要优化设计，充分利用有限的空间。

* 笔者认为，在计算饱和电流时， A_e 不应该理解为闭合磁路上各个截面积的平均值或者有效值，而应该是最小截面积，即 A_{min} 。因为在电流和圈数($N*I$)确定的情况下，流过磁芯各个部分的磁通量(Φ)是一样的，截面积最小的部分将成为磁力线通路上的节点，最先饱和，而通过公式(1)我们可以看出，哪怕是一小段磁路的饱和，都会对电感量带来显著的变化。如果我们把磁路比作高速公路，把磁力线比作持续不断的恒定的车流量，也就是说，即时大部分路段都是4车道，只要有一个很短的距离是2车道或者3车道，都会造成整个高速公路的车流缓慢或者拥堵。所以，真正的磁芯优化设计应该是磁芯每个部分的截面积都是相等的或者近似相等的，既不能有磁路部分狭窄的“拥堵”，也不能有磁路部分过宽的浪费。

解决了理论问题，下面我们来讨论如何优化设计磁芯，也就是在固定尺寸的情况下尽量 A_e 做大，当然，这里着重讲的是如何有效利用磁芯的 Standoff 使设计更优。

情形一：常见 ERI 磁芯

图1所示是最常见的ERI类大功率电感器件，它有一个ER磁芯，一个I磁芯，和一个线圈组成。广泛使用于PC，服务器等的滤波电路中。这种电感的等效原理图如图2



图1

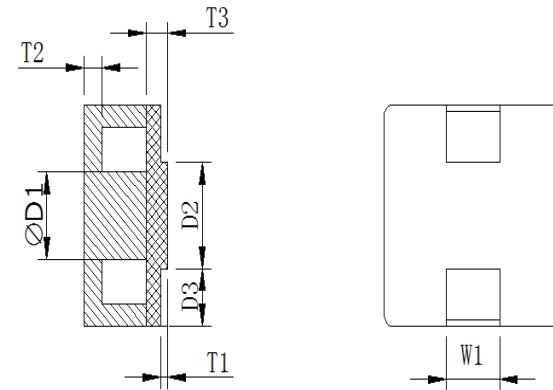


图2

该磁芯中柱是圆柱形，I磁芯上有两个深度为T1的槽，是为了把PAD藏在里面，其深度T1一般比PAD的厚度小0.1~0.15mm，如果太深，PAD会藏在磁芯槽里面，使得PAD与PCB上锡膏没有接触或者接触不充分，造成虚焊问题。(一般丝印锡膏的厚度为0.10mm)

如果太浅或者不开槽，则会带来以下问题。

1. 器件在PCB不稳，贴片后造成偏斜问题。
2. 空间的浪费，成品高度相当于在磁芯总高的基础上加上一个PAD的厚度。

理论上，如果不开槽，最优的设计是E磁芯的顶部厚度要与I磁芯的厚度相等，即

$$T_2 = T_3 = \frac{D_1}{4} \quad \text{公式(6)}$$

其由下列公式推导出来(芯柱截面为圆形)

$$\frac{\pi * D_1^2}{4} = \pi * D_1 * T_3$$

即磁芯中柱的截面积要等于磁芯顶部或者底部与中柱接触部分的侧面积。

既然开槽是必要的，那是否代表开槽的情况下 $T_3 = T_1 + T_2$? 答案是否定的，我们完全可以优化设计，利用standoff，做到既开槽，又不增加I磁芯高度。D2，也就是Standoff的宽度是关键。

$$\frac{\pi * D_1^2}{4} = \pi * D_2 * (T_3 - T_1) \quad \text{公式(7)}$$

实例1：假定外围为10*10mm的ERI磁芯结构，其中E磁芯中柱为4.8mm，扁平线圈厚度为0.40mm(引线当脚)，请设计磁芯，确保结构最优。

答：根据公式（6），首先E芯顶部厚度和I磁芯厚度理论最优为 $4.8/4=1.2\text{mm}$, PAD厚度 0.40mm , 槽深最好是 0.30mm , 根据公式（7）则最小Standoff宽度为， $D2=D1^2/4/(T3-T1)=4.8^2/4/(1.2-0.3)=6.40\text{mm}$.

这时，我们可以看出槽的进深 $D3=(10-D2)/2=1.8\text{mm}$, 也就是PAD的长度约为 1.8mm , 对于大电流器件来说，有点小，会担心有结电阻问题，所以这时候我们可以把W1尽量做大，因为I磁芯 0.30mm 厚度部分四个黄色的区域对A_o帮助不大，甚至于可以做成通槽（非通槽对PAD有陷位作用）。

情形二：无中柱类，UI/CI磁芯类。

此类电感的特点是大电流，低感值（nH级），广泛使用于服务器，个人电脑，包括CPU的供电，DDR供电等。

一般为扁平结构，高度尺寸要求严格，所以磁芯的优化设计尤为关键，可以毫不夸张地说， 0.10mm 在此类磁芯设计中是一个很大的尺寸。它的磁路是一个口字型，其原理图如下。

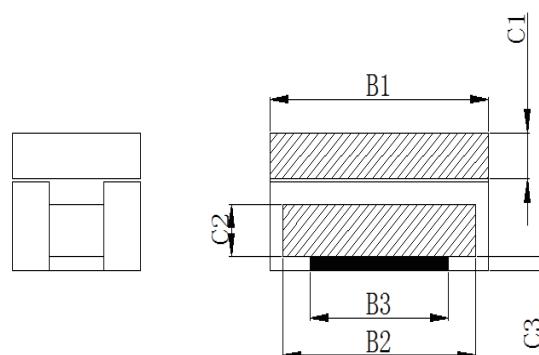


图3

这个电感由一个U型磁芯和一个I型磁芯以及一个扁平状铜导体组成（上图中未标出铜导体）。按我们上面结论，最优设计是口字型磁路上每个部分的截面积都相等。

$$\text{区域1面积: } A1=B1 \cdot C1$$

$$\text{区域2面积: } A2=B2 \cdot C2$$

$$\text{区域3面积: } A3=B3 \cdot C3$$

可以看出，由于我们要将铜导体包含在磁芯区域以内，因而有 $B2 < B1$ ，要想 $A1=A2$ ，则 $C2$ 要大于 $C1$ ，但很多时候，受高度尺寸限制， $C2$ 往往希望越小越好，所以我们就想到利用Standoff的面积，即区域3，这时公式应该是

$$A2+A3=A1$$

可以大大降低 $C2$ 尺寸，也就是降低整个电感成品的高度，尤其是对于铜导体厚度比较大的情形，这时候 $C3$ 很大，区域3的面积就显得很重要。根据实验结果，当铜导体厚度做到 0.60mm 时候，在同样的整体尺寸下，Standoff的利用可以让电感的饱和电流提升约4%。

一些看似不起眼的结构优化设计，却往往能解决一下关键的问题，在我们的日常工作中，这样的例子并不少见。

3 结束语

在产能过剩的大环境下，客户需求也越来越挑剔，我们呼唤磁性材料的变革性技术突破，然而，近20年来，磁性材料的发展并不尽如人意。这样，结构的优化，对整机客户的强有力技术服务支持将成为企业输赢的分水岭，让我们每天都进步一点，推动磁性器件产业一步步往前走。

作者简介

欧阳过，现任深圳顺络电子股份有限公司绕线事业部产品经理，毕业于北京广播学院，先后任职于台达、伊顿、村田等行业内知名公司，有超过15年磁性器件开发的经验。