

图 5—2 平面变压器的绕组结构

5.2 LLC 谐振变换器平面集成磁件的设计^{[26][27][28][29]}

设计磁性器件的理论依据是电磁场方程，再加上各种限制条件。磁性器件铁芯的最大工作磁密要小于其饱和磁密，铁芯工作磁密的交变量要尽量小，以使铁芯损耗不至于太大。圆铜导线选取应根据三个原则，一，铜导线中流过的电流值应小于导线能通过的最大电流值，以免导线损坏或者失效。二，导线的直径要尽量小，以满足对铁芯窗口的匝数要求，并有利于减小磁件的体积和重量。三，在满足上述两个条件的前提下，线圈导线的截面积应尽可能的大，以使线圈的直流电阻和铜损尽可能小，并考虑集肤效应和临近效应影响，必要时采用多股线绕制和原、副边分层交替绕制。

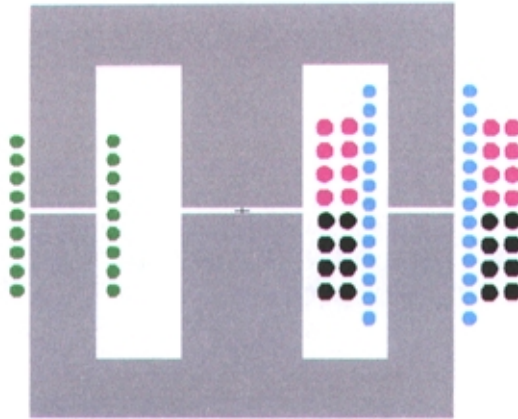
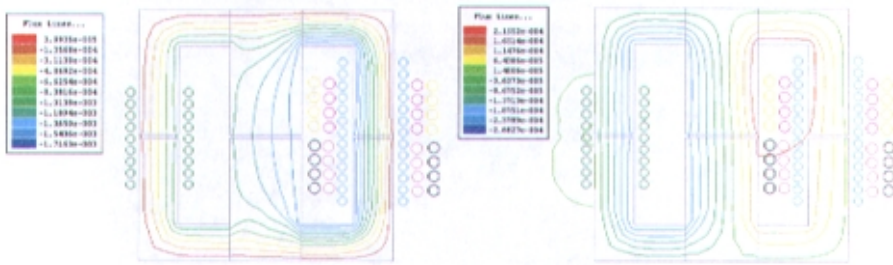


图 5—3 传统设计的集成磁件的截面图

上一章推导出的 LLC 谐振变压器的集成磁件，按传统集成磁件设计方法设计的结构如图 5—3 所示。磁心选用 Philips 公司的 E42/21/20 软磁铁氧体铁芯，线圈采用圆导线绕制，原边绕组 N_1 为 13 匝，副边 N_p 、 N_s 都为 4 匝，由于副边电流较大，采用两层并联结构。 N_1 、 N_p 线圈选用 AWG18， N_s 线圈选用 AWG13。左柱上绕制电感线圈，右柱上绕制变压器线圈，紧靠右柱的是原边绕组的 13 匝线圈，外边两层分为上下两部分，各对应两个 N_s 线圈，采用两匝并联缠绕方式。图 5—4 为它的磁力线仿真图。



(a) 变压器副边电流与原边电流方向相同 (b) 变压器副边电流与原边电流方向相反

图 5—4 传统集成磁芯磁力线仿真图

我们把上面的集成磁件设计成平面集成磁件。首先应该把圆型导体转换为平面型导体，转换时应保证导体截面积不变，先把圆导线转换成等截面积的正方形导线，如图 5—5(a)所示，然后在把正方形导线转换成相应的铜箔导线。铜箔非常薄，如果把一个圆导体转换成一个铜箔导体，那么铜箔将是非常宽的，这显然不适合磁件的宽度要求。因此，可以把它分成几个等宽度的

铜箔，再把这几个铜箔并联就可以了。在实际转换时，考虑到铜导线通过的最大电流密度一般为 $3\sim 5\text{A}/\text{mm}^2$ ，平面导线铜箔为 $10\sim 20\text{A}/\text{mm}^2$ ，转换后，相应铜箔的截面积要比圆导线的截面积小 $3\sim 4$ 倍。所以总的来说，绕组所占体积减小。这样得到的集成磁件如图 5—5(b)所示。 N_1 、 N_p 的每根导线变成两个平面导体并联，每个铜箔宽 0.6mm ，厚 0.2mm ，对于 N_s ，每根圆导线可转换成 5 个平面导体并联，导体宽 2mm ，厚 0.2mm 。

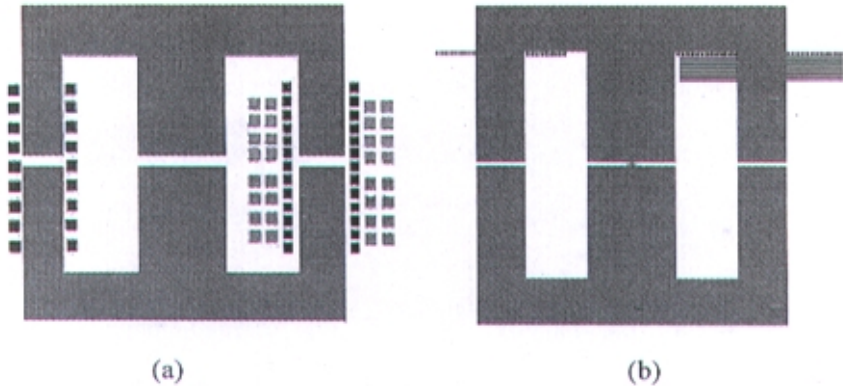


图 5—5 平面磁件转换的中间过程

在图中我们看到由于导体总的截面积减小，而且平面导体布置结构更紧凑，每根平面导体厚 0.2mm ，十二层平面导体的厚度为 2.4mm ，即使加上绝缘层厚度，与 E42/21/20 磁芯的窗高（窗高 29.6mm ，窗宽 8.65mm ）相比也是很小的，这使得 EE 磁芯的窗口利用率明显下降。而且使用 EE 磁芯，也不利于降低磁件的高度，下面研究把 EE 磁芯转换成 EI 磁芯。

我们选用的 EI 磁芯是 E/43/10/28。下面给出两磁芯的尺寸，铁芯参数的对照表（表 5—1 和表 5—2）。两种铁芯的截面积差不多，这是选用 E/43/10/28 最主要的原因是，可以保证磁件铁芯的最大工作磁通密度小于其饱和磁通密度。选用 E/43/10/28 后有效磁路长度减少较大，对集成磁件的电感量会产生影响，但由于铁芯的三个磁柱都有气隙，所以电感量的大小主要由气隙的磁路决定，受磁芯磁路的影响很小，可以忽略。因而选用 E/43/10/28 后磁芯有效磁路的减少对集成磁件的影响并不是很大。替换后，铁芯体积和质量都大大减小，达到了减小体积和重量的目的。由表一可以计算出，选用 E43/10/28 后，磁芯窗宽为 11.31mm ，窗高为 4.55mm ，因此可使导线宽度加宽，厚度

变薄, 现设定导线厚度都为 0.15mm, 原边线宽 0.8mm, 副边线宽 2.7mm。平面集成磁件结构如图 5—7 所示。该结构比传统磁件体积、高度、重量都小很多。图 5—8 为该结构的磁力线仿真图。通过与分立磁件和传统磁件的仿真图比较, 可以看出平面集成后, 磁芯磁通密度变化不大。因此集成后, 磁芯损耗不会变化太大。

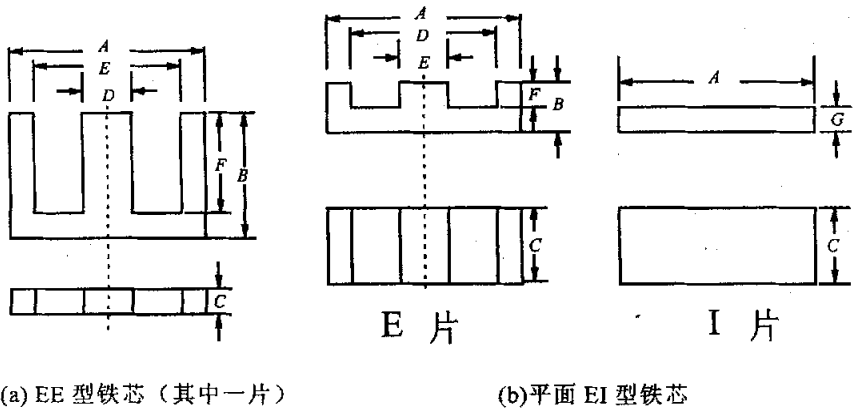


图 5—6 E 型铁芯和平面 EI 型铁芯的外形图

表 5—1 两种铁芯的尺寸

铁芯型号	尺寸/mm						
	A	B	C	D	E	F	G
E42/21/20	43 ⁰ _{-1.7}	21±0.2	20 ⁰ _{-0.8}	12.2 ⁰ _{-0.5}	29.5 ^{+1.4} ₀	14.8 ^{+0.6} ₀	无
E43/10/28	43.2±0.9	9.5±0.13	27.9±0.6	≥34.7	8.1±0.2	5.4±0.13	4.1±0.13

表 5—2 两种铁芯的铁芯参数

铁芯型号	铁芯参数				
	有效磁路长度 l_e /mm	铁芯有效截面积 A_e /mm ²	铁芯体积 V_e /(mm ³ /副)	铁芯系数 Σ (l/A)/mm ⁻¹	铁芯质量 m /(g/片)
E42/21/20	97.0	233	22700	0.414	56
E43/10/28	50.8	225	11500	0.226	24

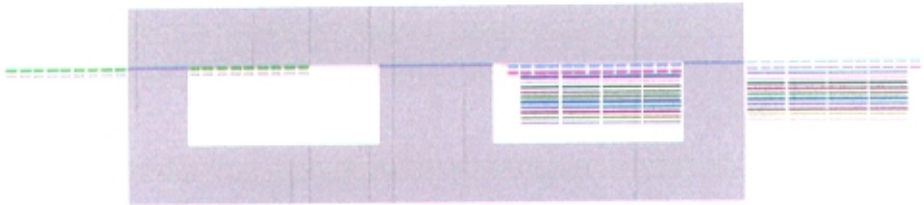
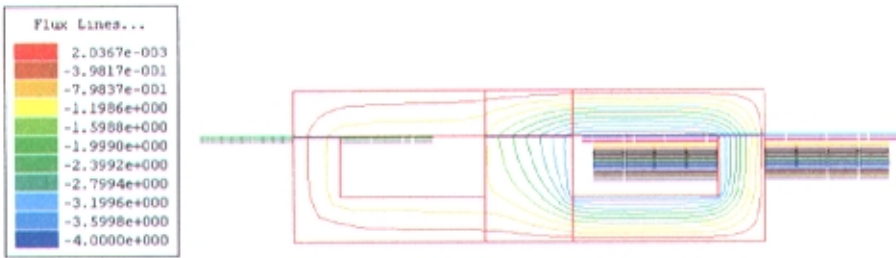
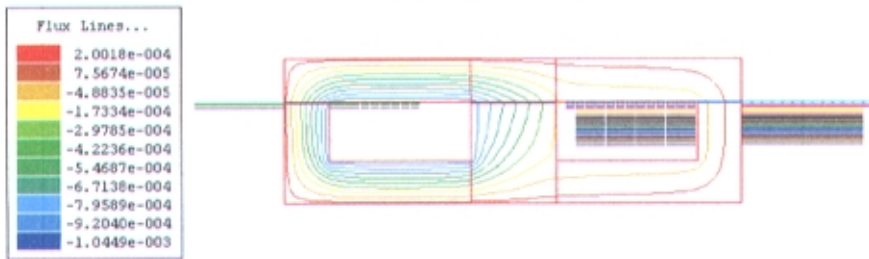


图 5—7 平面集成磁件截面图



(a) 变压器副边电流与原边电流方向相同



(b) 变压器副边电流与原边电流方向相反

图 5—8 平面集成磁件的磁力线仿真图

5.3 本章小节

本章研究了平面集成磁件的设计过程，通过把传统的集成磁件设计为平面集成磁件，磁芯损耗不会有太大的变化，但减小了磁件体积、高度、重量。