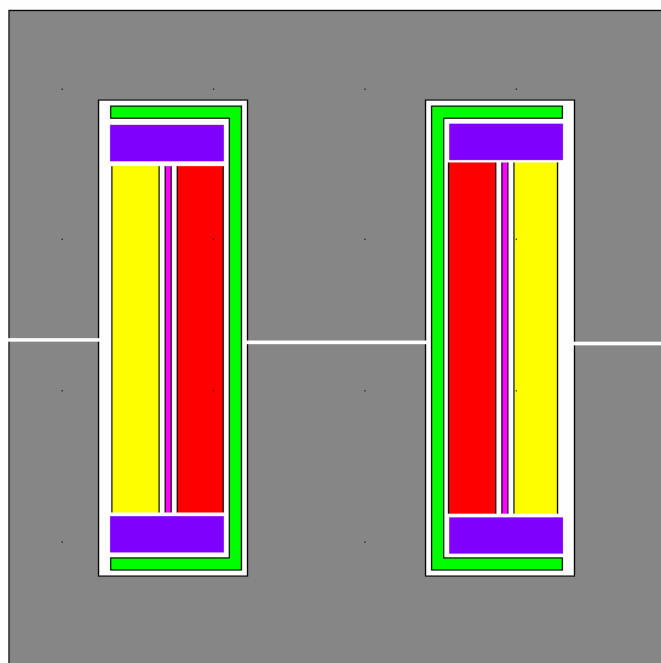
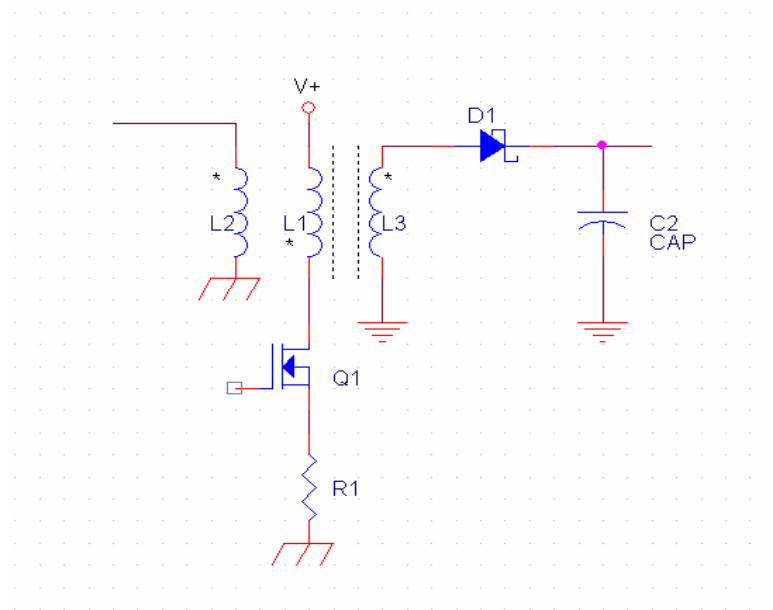


## 一、传统变压器篇

## 单路输出 Flyback 及常见的变压器绕组结构



红色：初级绕组

紫色：辅助绕组

黄色：次级绕组

特点：辅助绕组位夹在初级、次级中间

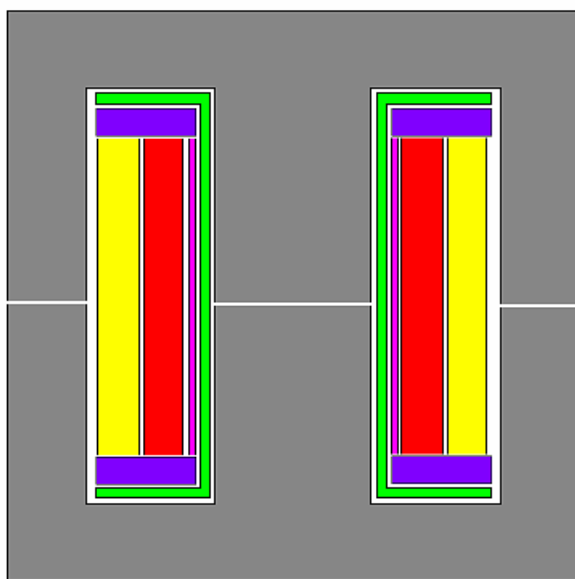
缺点：1, 临近效应很强，绕组交流损耗大

2, 初、次级间的漏感较大，吸收回路损耗较大，效率较低

优点：1, 工艺结构十分简单，易于制造

2, 初级外层接电位静止的 V+端，易于实现无 Y

## 改进的 Flyback 变压器绕组结构（简易型）



特点：辅助绕组位于线包最里层，初级在中间、次级在最外边

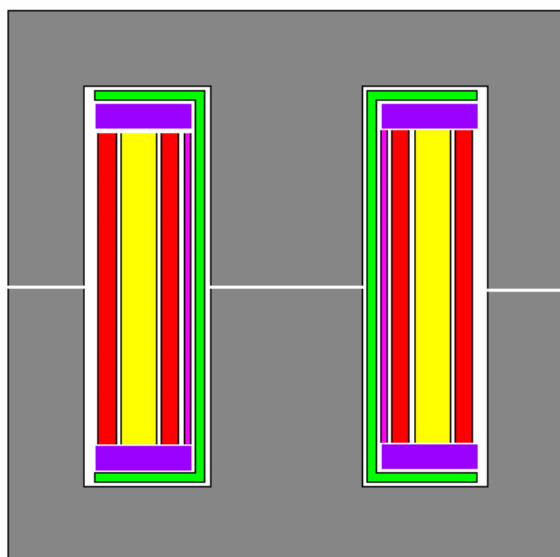
缺点：临近效应很强，绕组交流损耗大

优点：1，工艺结构十分简单，易于制造

2，初级外层接电位静止的  $V+$  端，易于实现无  $Y$

3，初次级间漏感较小，吸收回路损耗较小，效率较高

## 改进的 Flyback 变压器绕组结构(三明治型)



特点：辅助绕组位于线包最里层，然后分别是初级的一半，次级全部，初级的另一半；

缺点：1，次级临近效应很强，绕组交流损耗大

2，初级的一半绕组没有任何的静电位层供屏蔽用，无法实现无  $Y$

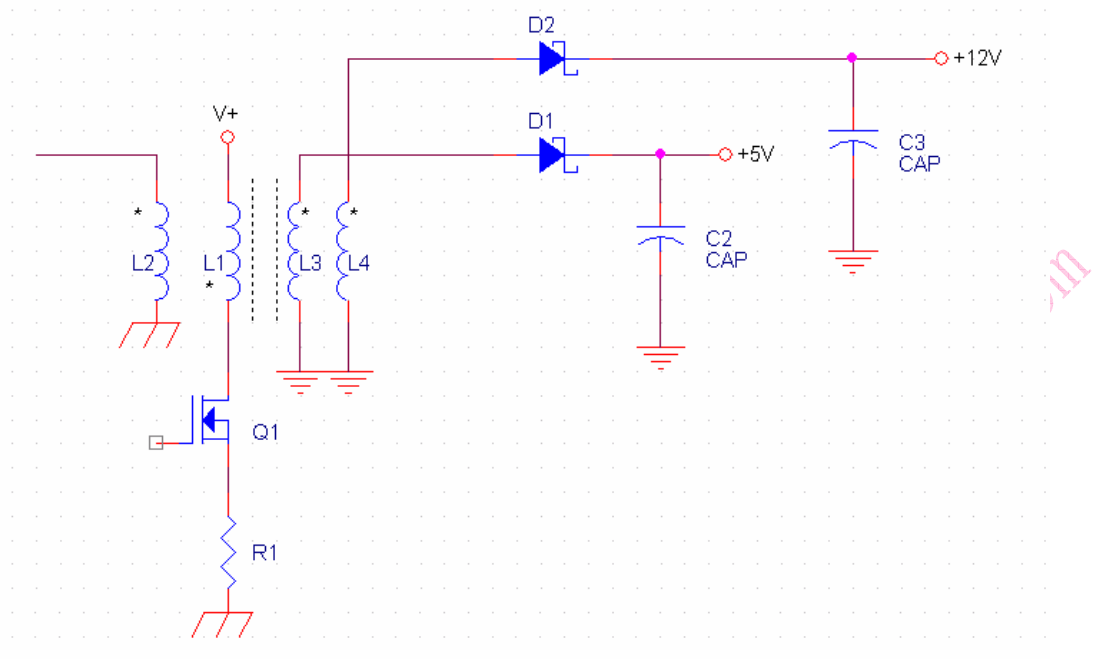
优点：1，工艺结构复杂，不利于制造；

2，初次级间漏感较小，吸收回路损耗较小，效率较高

3，初级临近效应较小，绕组交流损耗小

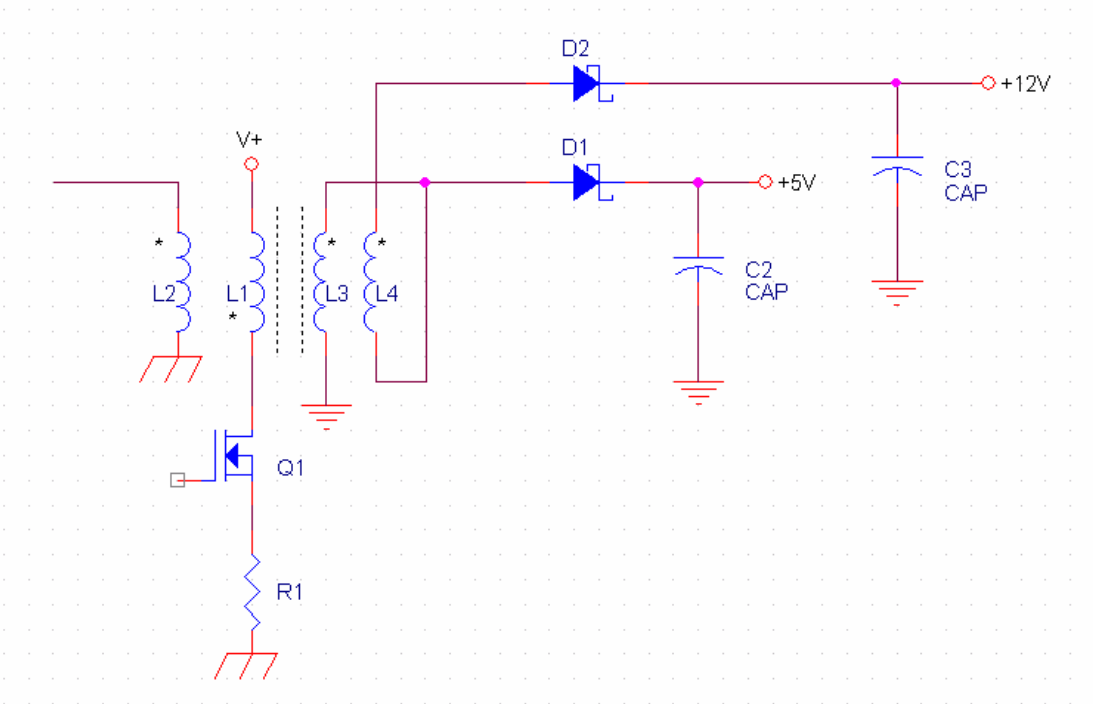
### Flyback 多路输出

L3 与 L4 之间的漏感，引起交叉调整。



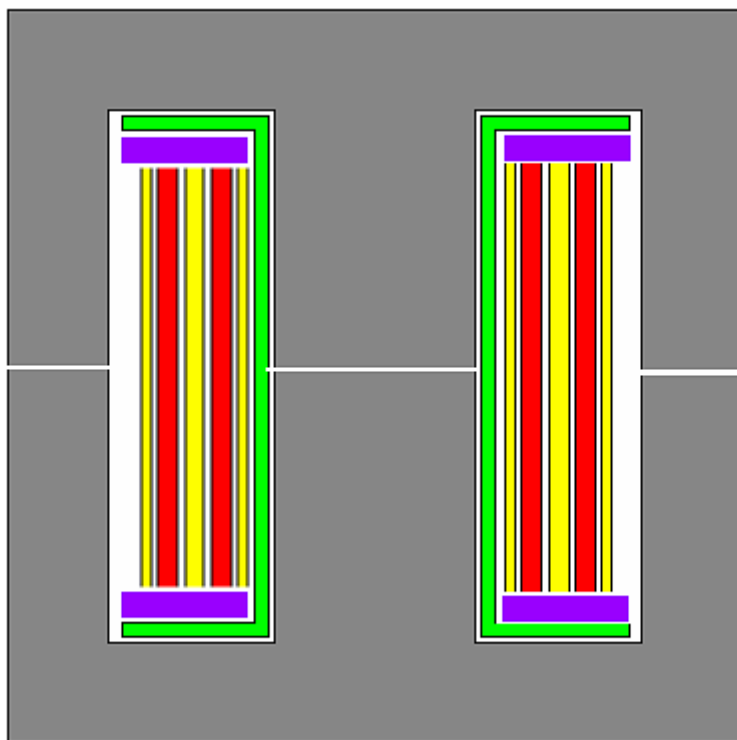
### 实用的多路输出型

高压输出绕组叠在低压绕组之上，双线并绕降低交叉调整



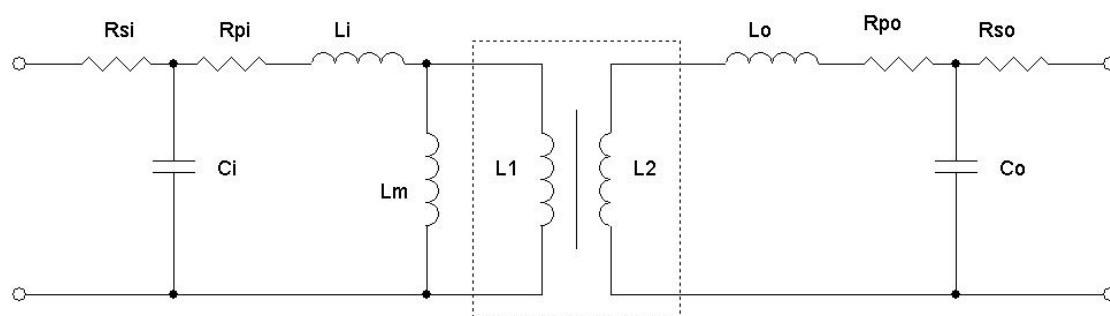
功率传输变压器（含正激、推挽、半桥、全桥）

合理的绕组结构，层厚小于  $2\Delta$



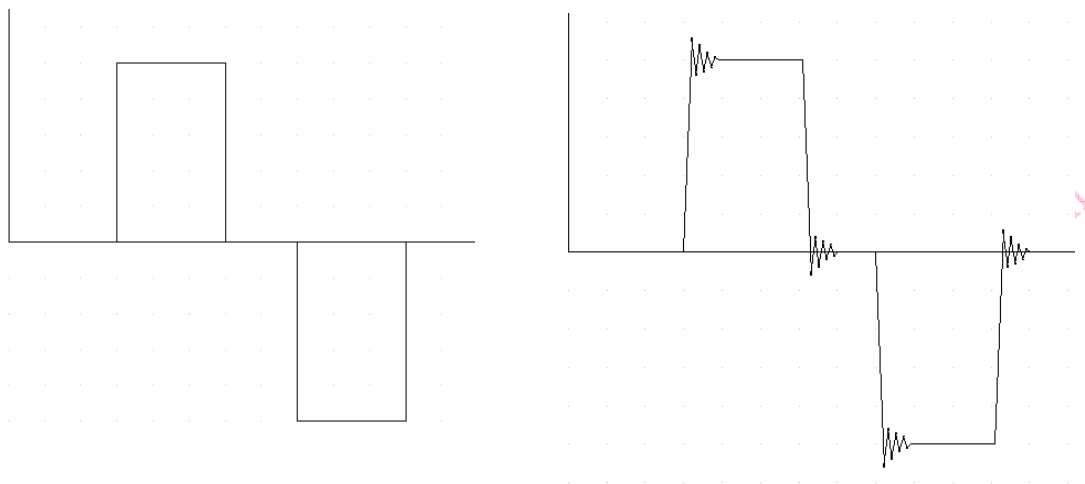
实际变压器的模型

虚线内为理想变压器



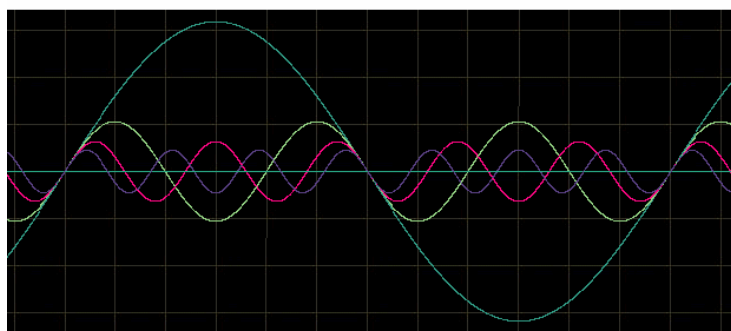
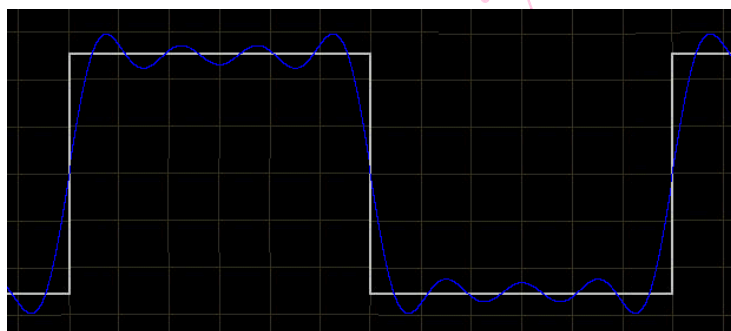
### 脉冲变压器信号传输失真

由于原边及幅边漏感，电阻分量的存在，脉冲在经过变压器后，产生延迟、斜率变缓、振铃、顶降

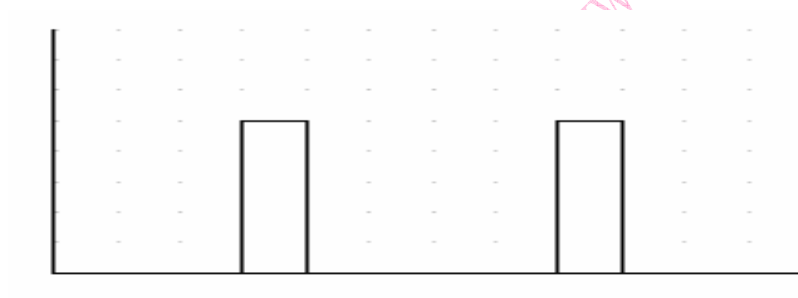
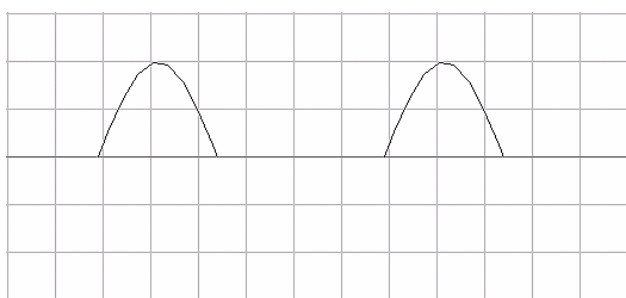
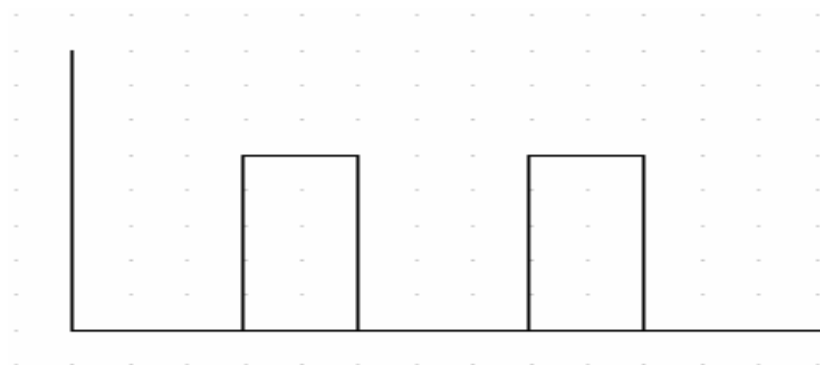


### 脉冲电流的分解

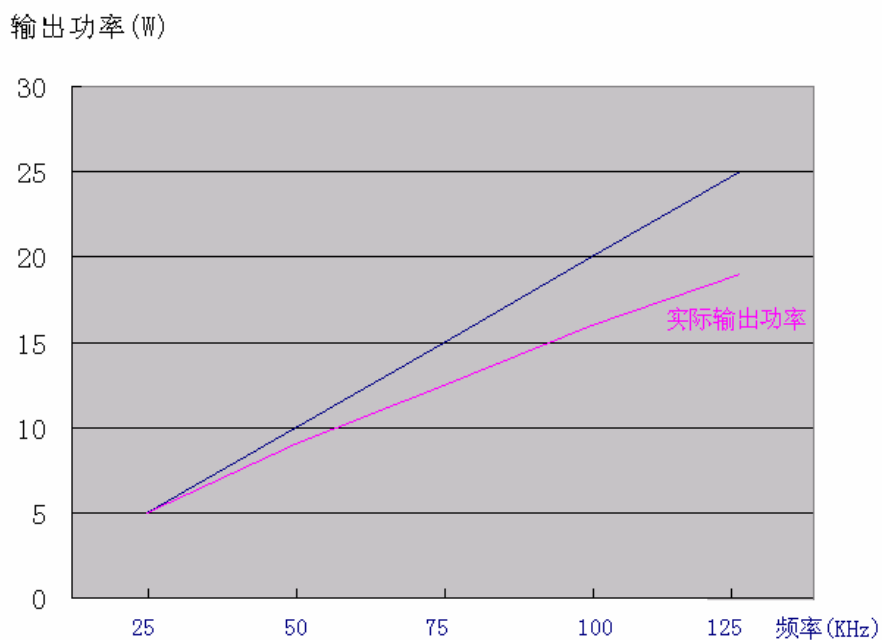
脉冲电流由基波电流及各高次谐波电流组成



占空比越小，基波分量越小，高次谐波分量越大，因此线径的选择（穿透深度\*2）不能只考虑基波电流的频率



输出功率与频率的关系（EE25 单端变换器为例）

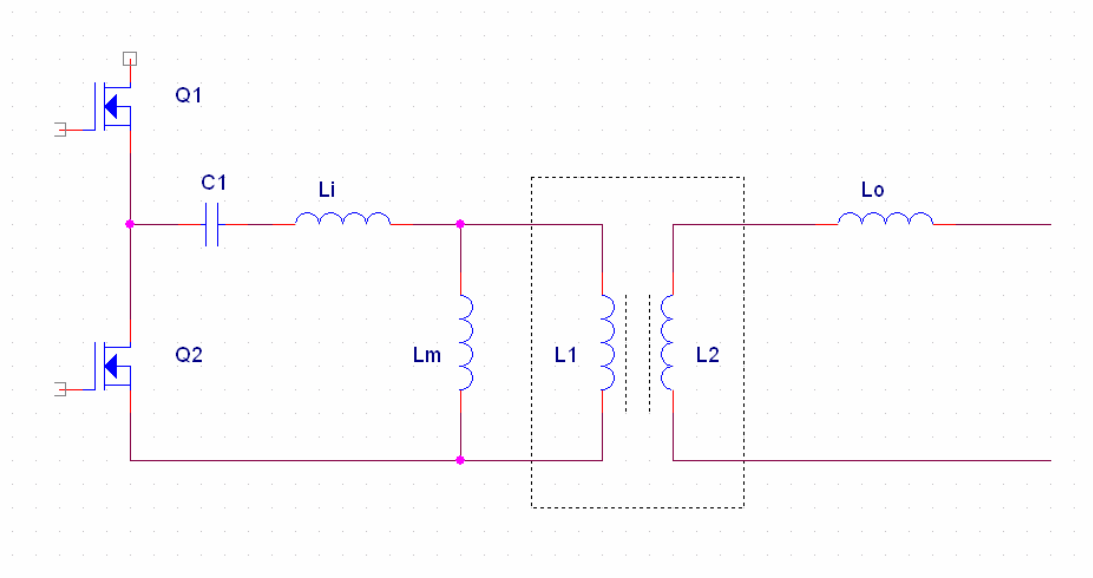


理论上，对于指定的磁芯，在相同的磁密下，输出功率与频率呈正比，但实际上并非如此，原因有：

- 1， 频率升高，穿透深度下降，需要用较小的线径，窗口利用率下降，且绕组层厚与穿透深度的比值增大，交流电阻大增，有效输出功率下降；
- 2， 频率增加，绝缘材料的耐压下降，为保证同样的绝缘强度，需要加大绝缘层厚度，进一步降低窗口利用率；
- 3， 频率到达某一程度后，磁芯损耗大增，需要适当降低磁通密度（具体请参考磁损表）

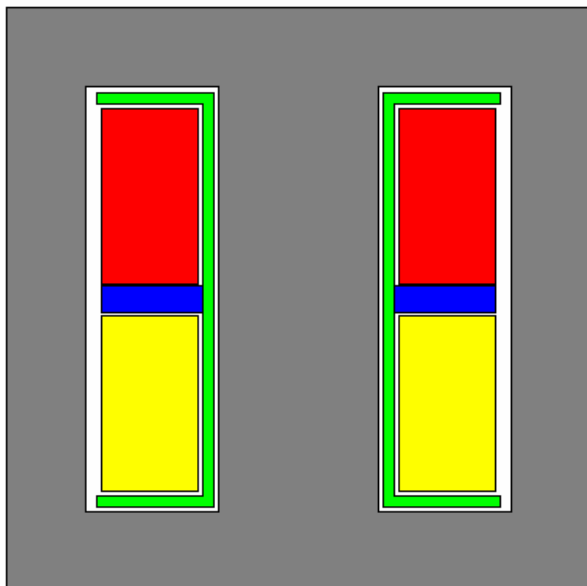
### LLC 变压器

LLC 电路结构（原理从略，请参考 CMG、古道斜阳的课件）



### LLC 集成磁件

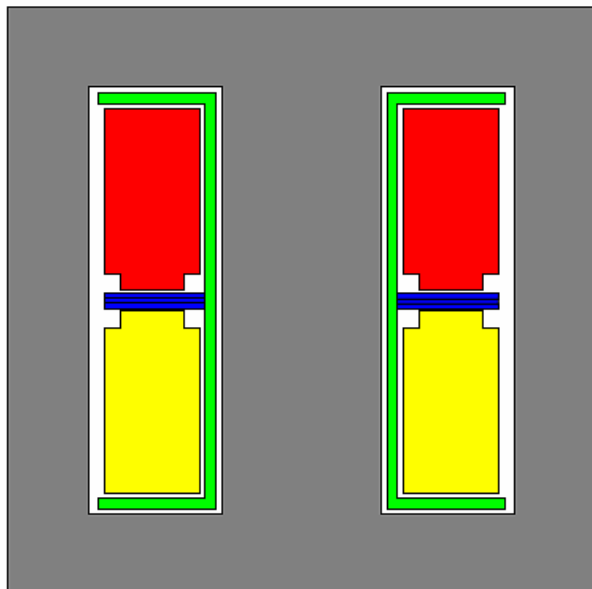
漏感由原边与副边之间的档墙宽度、磁芯的磁导率、以及中柱长度与窗口高度的比值决定





### 小漏感的 LLC 集成磁件

个别应用中，需要用到较小的漏感，挡墙的宽度较小，安全间距可利用下面的结构来满足。



其它减小漏感的方法：

- 1，磁芯的磁导率，换用高导的磁芯，漏感会减小；
- 2，减小中柱长度与窗口高度（指上图中窗口的水平方向）的比值，漏感会减小
- 3，采用逆磁性材料代替顺磁性材料制作档墙

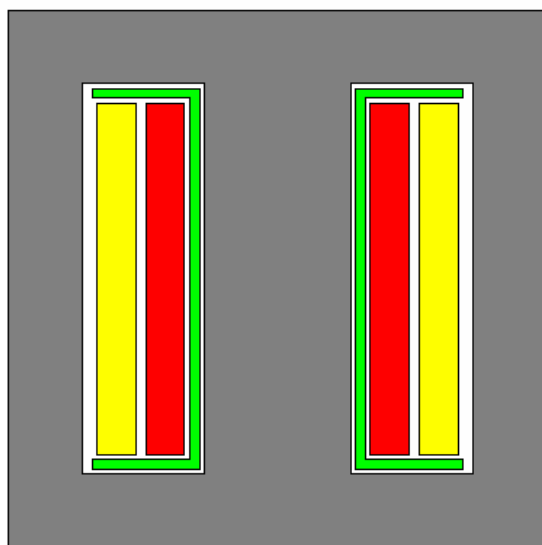
增大漏感的方法：

- 1，换用低导的磁芯
- 2，增大中柱长度与窗口高度的比值
- 3，用弱铁磁性的材料制作档墙，如混有磁粉的注塑垫片，可以大幅度降低档墙的占窗面积，增加变压器出力，具体实施需要考虑经济性；

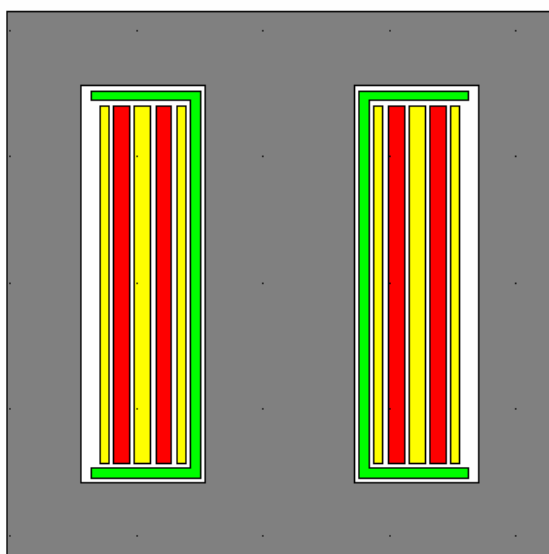
## 大功率的 LLC 变压器

LLC 磁集成变压器的问题：由于初次级绕组产生的磁场是独立分布的，各自的临近效应很强，不利于大功率应用场合，而且气隙处的 EMI 很不好处理，因此需要将漏感独立出去。

中功率的 LLC 集中参数变压器，按正弦变压器设计，可采用简单绕制工艺



大功率的 LLC 集中参数变压器，按正弦变压器设计，需要采用夹层工艺，中各初次级绕组磁场的磁场，降低临近效应，保证最小的交流电阻

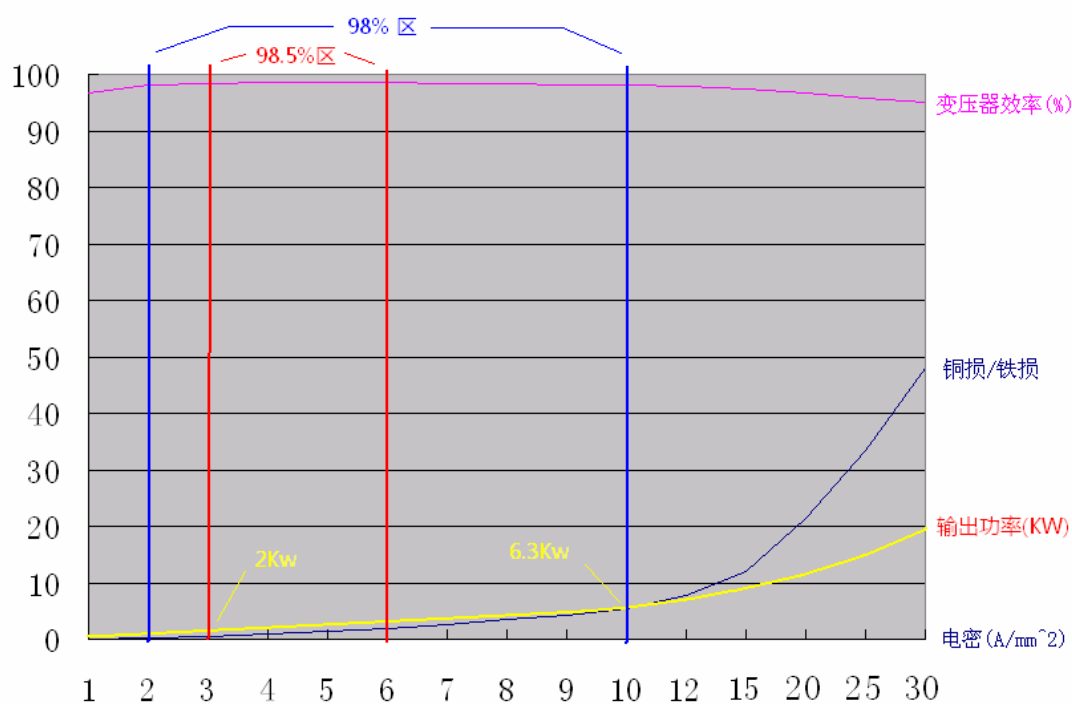


## 二、高功率密度变压器

为了直观，我们将一个 EE85 磁芯，在 2000GS 磁密，25KHz 频率下，不同电流密度时的效率、输出功率，铜损铁损比绘在同一表格内（注意：因为宽度不够，电流密度在 10 以上比例不同。）

可以发现，电流密度在 3-6A/mm<sup>2</sup> 范围内，变压器效率达到 98.5% 以上，而满足 98% 的效率，电流密度的范围达到 2-10A/mm<sup>2</sup>。

由于铁损基本固定，而铜损与输出功率的平方成正比，因此高功率密度变压器的实现，主要是解决绕组的散热问题，但应用中的方向却是相反的，我们所见到的高功率密度变压器，都是将绕组的热量“闷”在磁件的内部，绕组的热阻比较大，不利于提高功率密度，如 PQ，PM，以及平面变压器。



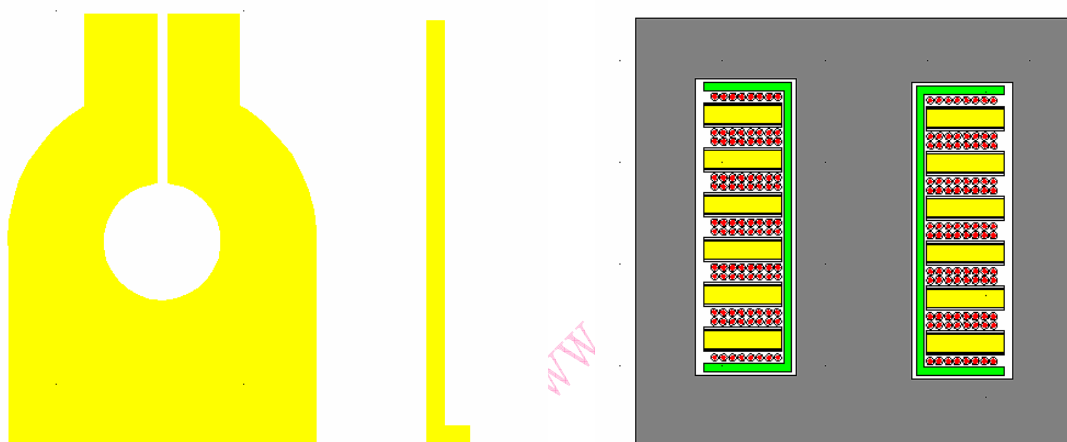
## 高功率密度变压器的解决措施

思路：强制对绕组进行冷却

1、液冷法，低压绕组利用中空的管状铜材料制作，用微形液压泵为低压绕组提供冷却循环液，可用变压器油。高压绕组的热能，通过传导散发到低压绕组，由冷却液一起带走。

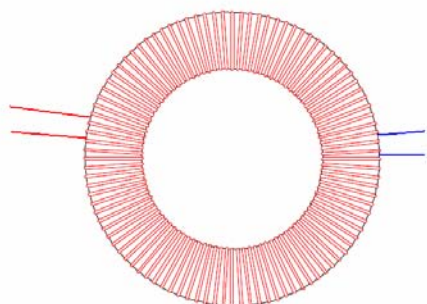
2、环形铜带绕组，低压绕组制成平面的环状，一个环为一匝，环的厚度为 2~3 倍穿透深度，初级绕组线径为 1~1.5 倍穿透深度，这样的组合交流电阻很小。

图例中的 6 个环，通过不同的铆接，可组合为 6 匝，3 匝，2 匝及 1 匝四种连接方式。环的倒角部份，通过云母片与散热器（可加风扇）连接散热，解决绕组的发热问题



## 3, 环形变压器

环形变压器具有夸张的绕组散热面积，是一种很好的散热结构。但由于磁芯的最佳工作温度约 90 度，要求绕组表面温度要适当小于 90 度，否则磁芯温度会过高。加上环形高导磁件容易饱和，可用的磁密较小，因此功率密度的提高受到限制。



4, 增加变压器的整体表面积 如平面变压器，通过将变压器压扁，提高表面积与体积的比值，降低热阻，获得较高的功率密度

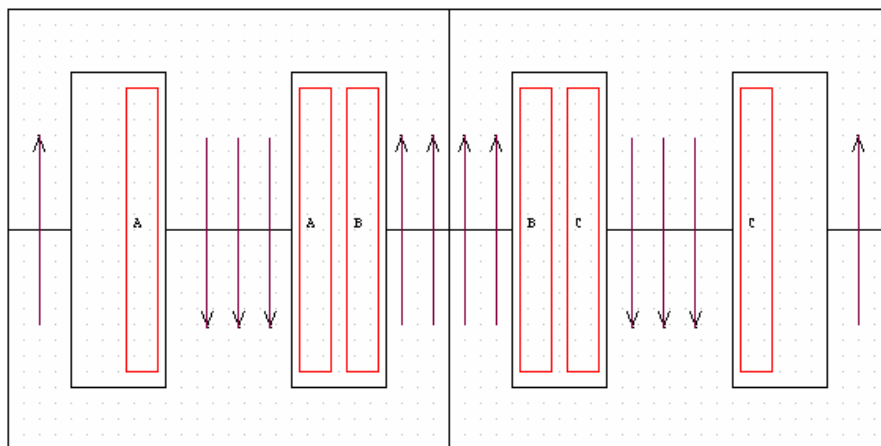
## 5, 王氏多磁路变压器

将多个小型磁件组合，通过接近 2 倍的绕组数量，大幅度提高变压器绕组自身的散热能力，达到高功率密度

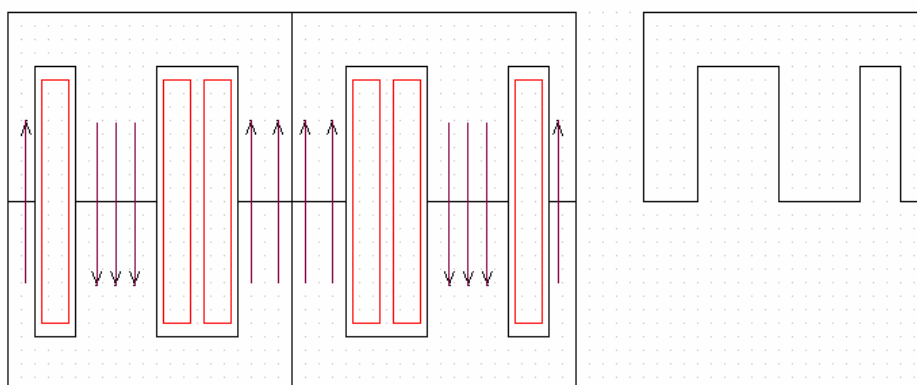
为简单起见，仅以两付磁芯拼合为例，实际应用中为更多的磁芯拼合为多磁路变压器。

特点：

- 1, 绕组数量增加为由  $N$  增加为  $2N-1$  ( $N$  为组合磁芯的数量)，绕组总（散热）表面积增大；
- 2, 每个绕组的厚度减半，在同等温升及冷却条件下，允许 1.414 倍的电流密度
- 3, 可以方便实现  $1/2, 1/3, 1/4, 1/5$  甚至更小的分数匝，利于让磁芯工作在最佳的磁通密度下（通常情况下，我们常常会受此困扰，如有时用 1600GS 需要 2.3 匝，一般只好取 2 匝，然后磁密提高到 1840GS，或是降低一些占空比，很是麻烦）
- 4, 因为精确的分数匝，利于多组输出的精确电压分布（利用同步整流及电子变压器定变比变换技术）



优化的多磁路变压器及磁芯



一己之见，可能存在错误，如对此文有不同看法，敬请提出宝贵意见，谢谢！

j.q.jiang@163.com