

# 用PLA51平面变压器设计增强功率密度和效率

Sebastien Marchio

威世公司

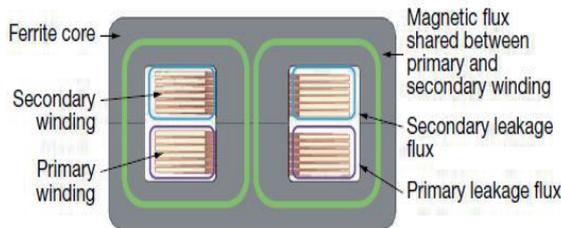
## 1 总体定义

如今，随着电动汽车和可再生能源等新技术的出现，开发电力转换器的需求迅速增长。设计师正在寻求更高的功率密度和效率，以及更小的尺寸和更轻的重量。开关频率的提高适合于实现这一目标，但是会导致其他限制，需要在设计磁性元件时进行管理，例如接近和趋肤效应。磁性元件面临的主要挑战是尽量减少功率损耗并改善热管理。

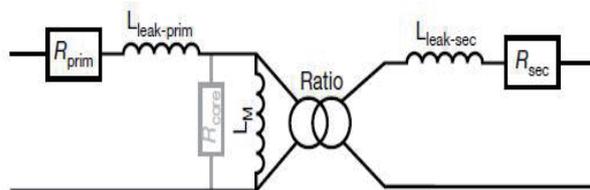
PLA51 是一种热塑性平面变压器，主要应用于 1kW 至 3kW 的变频器。该器件的平面技术比传统变压器更小巧，可实现更高的效率，同时提供更高的功率与尺寸比。凭借平面铁氧体磁芯的高效横截面，其绕组匝数得到最小化，铜损也减至最小，而磁芯的低体积有助于减少磁芯损耗。薄铜箔绕组的堆叠减少了趋肤效应和邻近效应的影响，同时可实现低漏电感值。

另外，与传统技术相比，平面技术更适合于散热器冷却设备。得益于磁芯的延伸表面和平坦的形状，它提供了高接触面积以提高传导散热，从而增加了可传输的功率密度。PLA51 也可以承受高温，因为其绝缘材料的额定等级为 H 180°C。另一方面，PLA51 的磁芯 - 包围所有绕组 - 作为自然屏障来限制辐射并避免 EMI/EMC 问题。

## 2 电参数定义



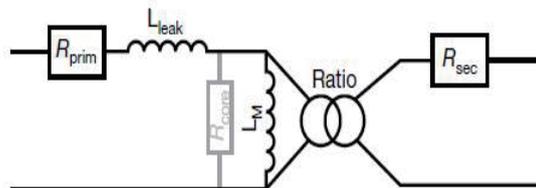
在转换器中，变压器的目的是转换能量，同时提供原边和副边电网之间的电流隔离，并通过匝数比来调整电压和电流水平。下面显示了具有不同参数位置的电力变压器的电气模型。



这里：

- $R_{prim}$  = 原边绕组电阻
- $R_{sec}$  = 副边绕组电阻
- $L_M$  = 互感
- $L_{leak-prim}$  = 原边漏感
- $L_{leak-sec}$  = 副边漏感
- $R_{磁芯}$  = 磁芯损耗

该模型通常被简化为如下图所示，其中漏电感在原边 ( $L_{leak}$ ) 被集中为一个。



电力平面变压器的主要电气参数定义如下。除非另有说明，否则参数均低于  $0.1V_{RMS}$  和 10kHz。

### 2.1 原边电感

原边电感是指原边绕组端子之间测得电感值。

它反映了原边和副边绕组之间的磁通量与原边漏磁通之和。

### 2.2 漏感

一个绕组的漏感反映了与其他绕组不共享的磁通量。测量是在绕组端子之间进行，同时分流其他绕组的端子。

对于直接电力传输（正向、桥接、推挽等），我们会经常考虑最小化原边漏感。因此，互感（反映原边和副边绕组之间共享的磁通量）可以视为原边电感。

其他特定的转换器拓扑结构需要一个与变压器原边绕组串联工作的电感器。该电感可以是变压器的一部分，并与其漏感匹配，从而节省额外的元件。聪明的解决方案可以根据要求进行设计。

### 2.3 匝数比

匝数比反映了副边绕组和原边绕组匝数之间的比率。

$$\text{Ratio} = \frac{N_{\text{sec}}}{N_{\text{prim}}}$$

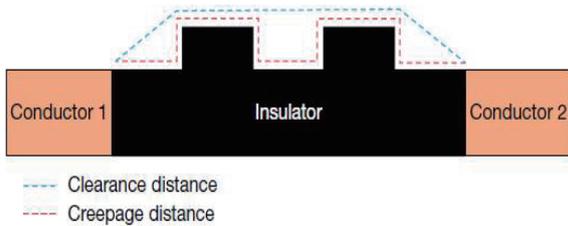
根据理想变压器（完美耦合）的假设，匝数比可以看作电压或电流的瞬时值的比值，如下所述。

$$\text{Ratio} = \frac{V_{\text{sec}}}{V_{\text{prim}}} = \frac{I_{\text{prim}}}{I_{\text{sec}}}$$

### 2.4 耐压测试

变压器的主要功能之一是确保原边电网和副边电网之间的绝缘。耐压测试的主要目标是确保符合爬电距离和间隙距离的施工法规。测试仪施加正弦波电压，并测量泄漏电流（设计持续 1 分钟）。频率可以是 50Hz 或 60Hz，取决于所用设备（欧洲或美国标准）。

爬电距离是沿着两个导电部件之间的固体绝缘材料的表面的最短距离。间隙距离是两个导电部件之间空气中的最短距离。



### 2.5 绝缘测试

绝缘电阻的测量在正常测试条件下是非破坏性的。

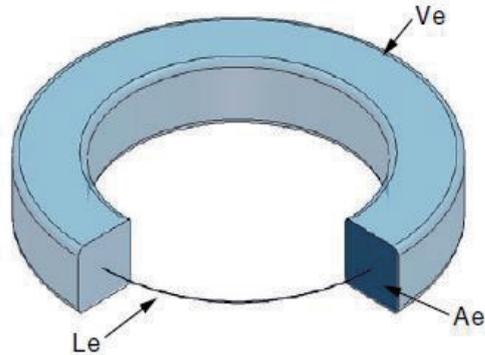
通过施加低于介电测试幅值的直流电压进行测试，绝缘测试的结果为 kΩ、MΩ、GΩ 或 TΩ。这个电阻表示两个导体之间绝缘的质量。

## 3 磁参数定义

PLA51 采用锰锌 (MnZn) 铁氧体磁芯设计，可在 50kHz 至 400kHz 的频率范围内实现最高效率。

磁芯的功能是引导磁通量。

对于给定的磁芯，有效尺寸是指具有等效磁性的理论环形磁芯的尺寸。



对于 PLA51，铁氧体的有效磁芯参数如下表所示。

SYMBOL	DESCRIPTION	VALUE	UNIT
le	Effective path length	73.5	mm
Ae	Effective area	351	mm <sup>2</sup>
Ve	Effective volume	25 798.5	mm <sup>3</sup>

为实现变压器的最佳性能而遵循的铁氧体材料的主要特性定义如下：

- 磁通密度 B 必须保持低于饱和和通量密度阈值 Bs=410mT (100°C)
- 对于双极性方波电压，最大磁通密度可以用以下公式进行评估：

$$B_{\text{peak}} = \frac{\hat{U}}{4 \times f \times N_{\text{prim}} \times A_e}$$

这里：

- B<sub>peak</sub> = 施加于原边绕组的最大电压
- N<sub>prim</sub> = 原边绕组的匝数
- f (Hz) = 开关频率

• 磁芯能量损耗可以用以下公式进行评估：

$$P_{\text{loss}} = 2.425 \times 10^{-6} \times (B_{\text{peak}})^{2.5891} \times (f)^{1.6677}$$

这里：

- P<sub>loss</sub> (W) = 铁氧体磁芯功率损耗
- B<sub>peak</sub> (T) = 峰值通量密度
- f (Hz) = 开关频率

注意：

- 磁芯温度为 100°C 时给出数据

案例：

- 主输入电压 = 50V
- 开关频率 = 100kHz
- $N_{\text{prim}} = 3$
- $B_{\text{peak}} = 118.7\text{mT}$
- $P_{\text{loss}} = 2.1\text{W}$
- 原边电感值：电感值与原边线圈匝数的平方成正比。

它可以用以下公式进行评估：

$$L = AL \times 10^{-9} \times N_p^2$$

这里：

- AL (nH) = 电感系数
- 对于 PLA51, 无隙磁芯  $AL = 14230\text{nH}/t^2 \pm 25\%$
- 根据要求, 可以提供其他较低的有隙磁芯的 AL 值
- $N_{\text{prim}}$  = 初级绕组的匝数

案例：

- $N_{\text{prim}} = 3 \rightarrow L = 128 \mu\text{H}$
  - 居里温度: 超过居里温度 215°C 时, 材料失去其磁性。
- 这种现象是可逆的。

#### 4 耐热性和铜损

绕组电阻是评估由于流过绕组的电流引起的铜损耗的重要参数。绕组电阻可以用以下公式计算：

$$R_{\text{DC}} = \rho_{20^\circ\text{C}} \times \frac{l}{A}$$

这里：

- $R_{\text{DC}}$  ( $\Omega$ ) = 20°C 时的绕组电阻
- $\rho_{20^\circ\text{C}}$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) = 室温下铜的电阻率
- $l$  (m) = 绕组长度
- $A$  ( $\text{m}^2$ ) = 用于绕组的导体横截面积

电阻取决于绕组的工作温度。对于由铜制成的绕组，

T 温度下的电阻可以近似为下式：

$$R_{\text{DC}}^T = R_{\text{DC}} \times [1 + 3.90 \times 10^{-3} (T - 20)]$$

这里：

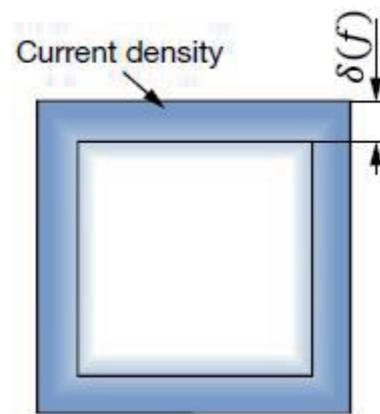
- $R_{\text{DC}}$  ( $\Omega$ ) = 20°C 时的绕组电阻
- $R$  ( $\Omega$ ) = 工作温度下的绕组电阻
- $T$  ( $^\circ\text{C}$ ) = 工作温度

案例：

对于 PLA51LA32：

- $R_{\text{DC}} (1-2) = 1.35\text{m}\Omega_{\text{max}}$ 。(不能准确测量)
- $R_{\text{DC}} (3-4) = 0.90\text{m}\Omega_{\text{max}}$ 。(不能准确测量)
- $R (1-2) = 1.88\text{m}\Omega$
- $R (3-4) = 1.25\text{m}\Omega$

随着 50kHz 以上的开关频率增加到 100kHz, 趋肤和邻近效应等其他现象变得显著。与 DC 电流不同, 高频率下, 由于导体内部出现涡电流, 导体边缘的电流密度变高, 导致有效 AC 电阻上升。



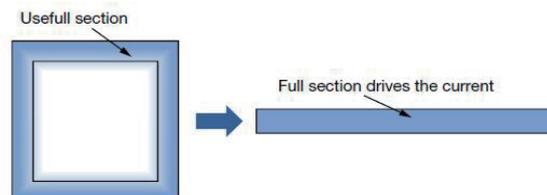
电流的 63% 集中在导体的外部部分 (即所谓的趋肤) 内。定义其深度的公式是：

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \times \mu \times f}}$$

附：

- $\rho$  = 导体的电阻率
- $\mu$  = 导体的导磁率
- $f$  (Hz) = 频率

f (Hz)	50	100	200	500
$\delta$ (mm)	0.34	0.24	0.17	0.11



注意

- 对于 100°C 的铜

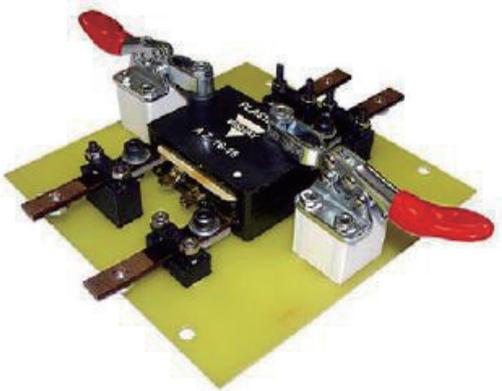
PLA51 平面变压器的绕组适合在该频率范围内工作。使用薄导体和管理原边绕组和副边绕组之间的堆叠，可以减少趋肤和邻近效应的影响，同时优化导体横截面、尺寸和重量。

## 5 热管理

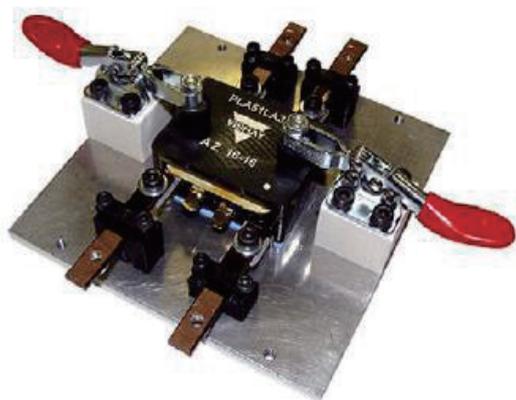
PLA51 的原材料绝缘等级为 H 180°C。热管理是变压器性能的重要参数。用户必须根据其应用的实际工作条件正确调整其散热设备的尺寸。

PLA51 尺寸的特点是具有多种散热方法：

- 自然对流：水平定向，变压器压在 PCB 上



- 使用散热器进行传导：将变压器机械固定在散热器上，水流量从 0.8L/min 到 1L/min
- 两种布局已经过测试（带或不带法兰），具有相似的行为
- 变压器压在散热器上。在变压器底部和散热器之间插入了导热垫片间隙填充物 [厚度:0.04 英寸 (1.02mm)]



- 变压器按照以下“预防和装配建议”部分中的定义进行机械固定。变压器两侧的一个焊盘间隙填充物与散热

器以及法兰之间形成热连接，该法兰具有第二个散热器的功能



Natural convection	With heatsink
$R_{TH}(\text{air / transformer}) = 4.5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$	$R_{TH}(\text{heatsink / transformer}) = 3 \text{ } ^\circ\text{C/W}$

温度的升高可以用下式计算：

$$\Delta T \text{ } ^\circ\text{C} = R_{TH} \times P_T$$

这里：

- $\Delta T \text{ } ^\circ\text{C}$  = 上升温度
- $R_{TH} \text{ (} ^\circ\text{C / W)}$  = 热阻
- $P_T \text{ (W)}$  = 消耗的总功率损耗（铜和磁芯损耗）

案例：

- $P_T = 17 \text{ 瓦}$
- 散热器水温 = 80°C
- 热管理配置：与散热器接触
- $\Delta T \text{ } ^\circ\text{C} = 51 \text{ } ^\circ\text{C}$
- 变压器工作温度 = 131°C

## 6 预防和组装建议

铁氧体磁芯是烧结材料。像陶瓷一样，它们脆弱且对冲击和机械应力敏感。在整个产品生命周期（搬运以及装配过程以及变压器嵌入最终设备之后）内保护它们非常重要。为了保护铁氧体磁芯并改善流经散热器的热通量消耗，变压器堆叠在两个导热和软垫间隙填充物 [厚度：0.04 英寸 (1.02 mm)] 之间。

变压器顶部与法兰之间的连接允许通过朝向散热器传导来增加耗散区域，从而降低变压器的热阻和运行时的温度上升。拧紧动作必须在每个螺钉上交替并逐渐进行，直

下转151页