



life.augmented

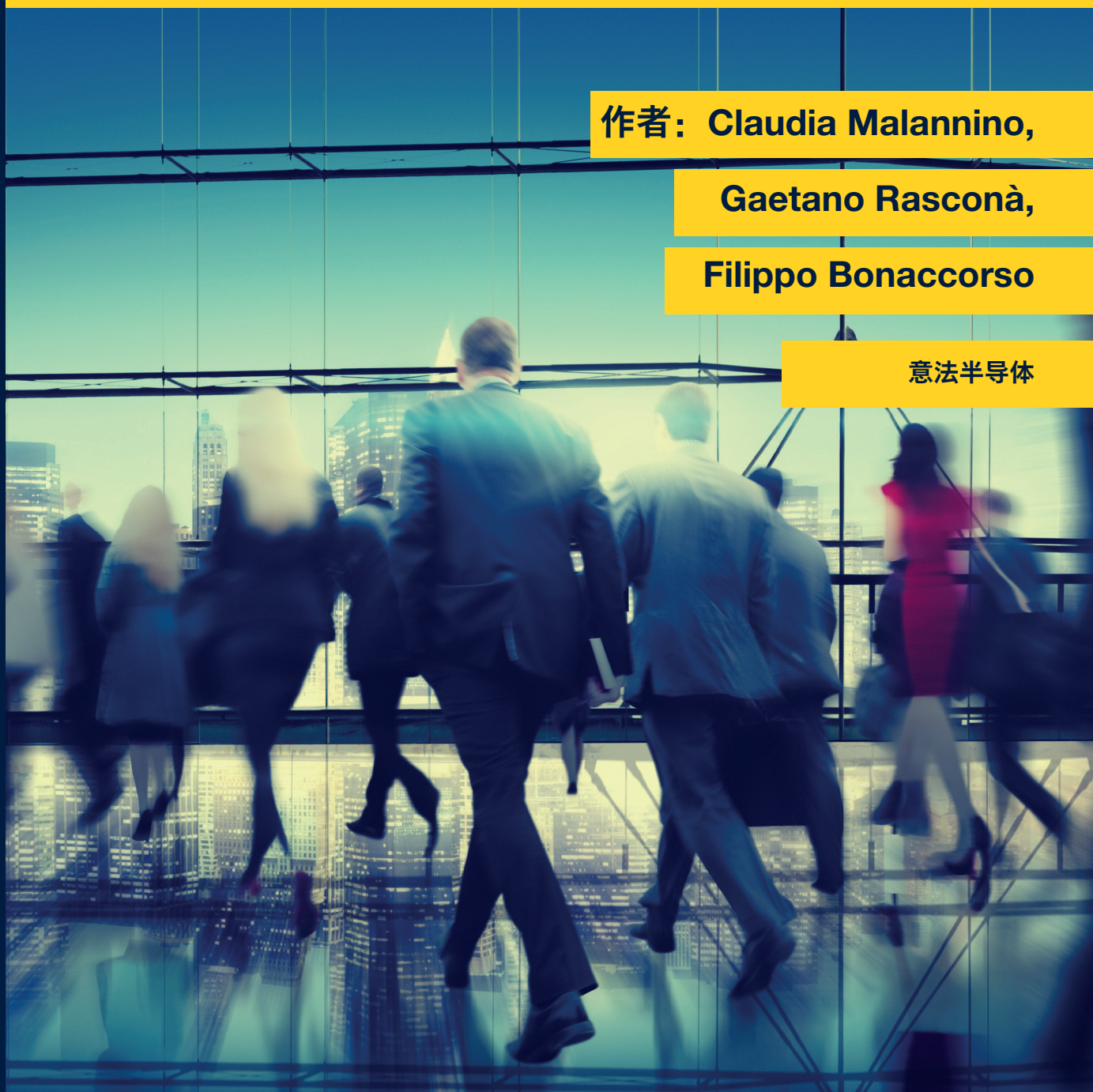
平面磁件如何提高 电力电子器件性能

作者: **Claudia Malannino,**

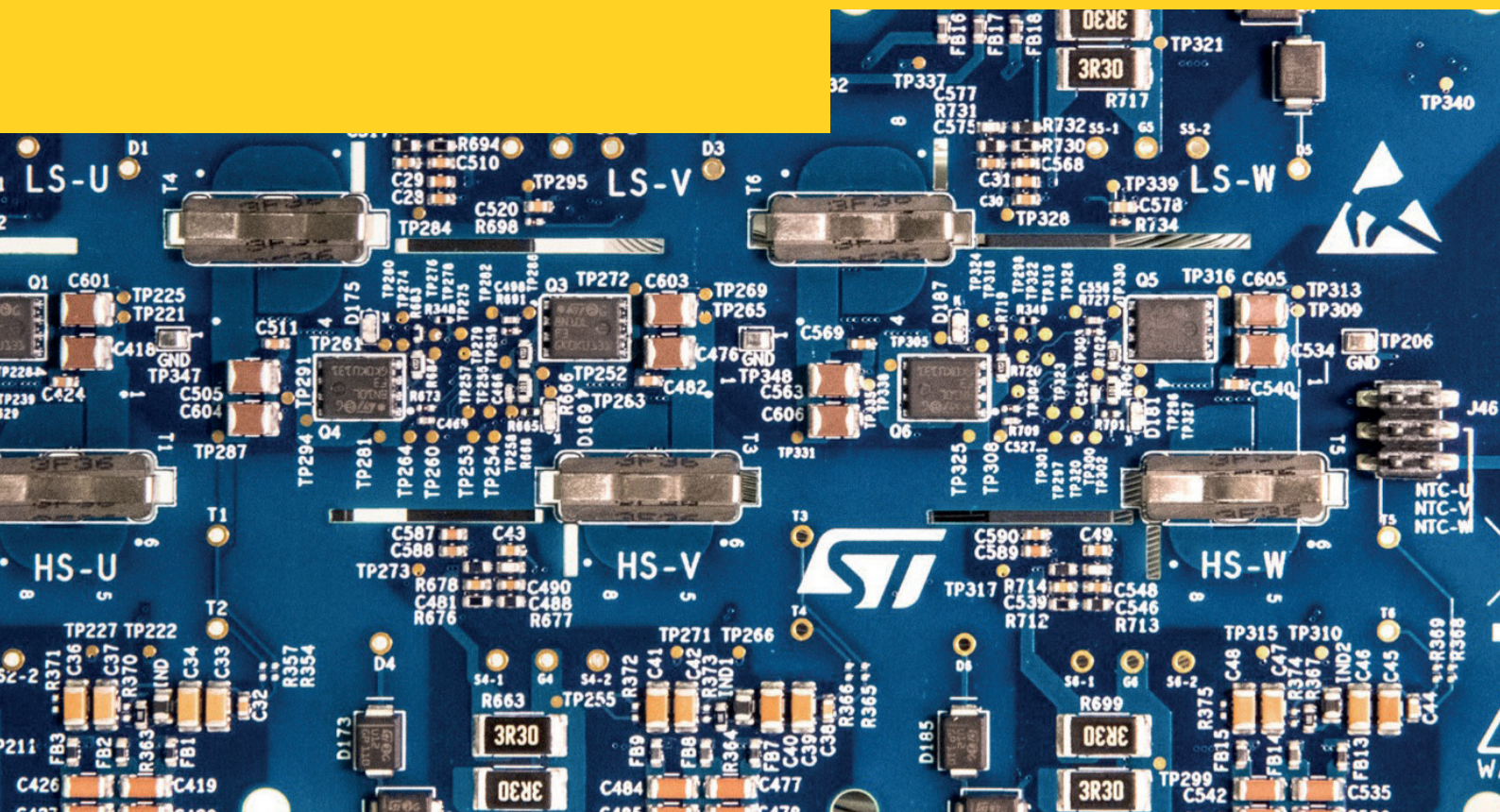
Gaetano Rasconà,

Filippo Bonaccorso

意法半导体



平面磁件的历史



在竞争激烈的当今市场中，可再生能源、储能、电源适配器、电源充电器和数据处理应用需要具有更高功率密度的低成本、高效率解决方案来提高性能，以满足不断增长的电信、汽车、医疗保健和航空航天行业的需求。

氮化镓（GaN）和碳化硅（SiC）晶体管等化合物半导体器件限制了高频条件下的开关损耗，加速了电路越来越小的趋势。事实上，高频操作导致电子电路的收缩，这要归功于减小的磁性器件尺寸和增加的功率密度。这一点对于电子功率转换器非常重要，电子功率转换器包括磁性器件，例如：用于功率传输的变压器和用于能量存储的电感器。

本文解释了平面磁件如何在效率、成本、空间要求以及散热方面显著改善电力电子器件的性能。

关于平面磁件的最早研究可以追溯到20世纪60年代。然而，此类研究主要出现在20世纪90年代对设计、建模和优化技术的研究中。

最近，由于印刷电路板技术的普及，平面磁技术在世界范围内引起了广泛的兴趣。

平面元件是由平面铜绕组构成的变压器或电感器。平面元件通常是缠绕在刚性或柔性PCB上的扁平铜片，但也可以是混合元件。它们被插入由“软”铁氧体制成的小型磁芯中。其铜走线具有矩形横截面，不同于具有圆形横截面的传统线绕元件。

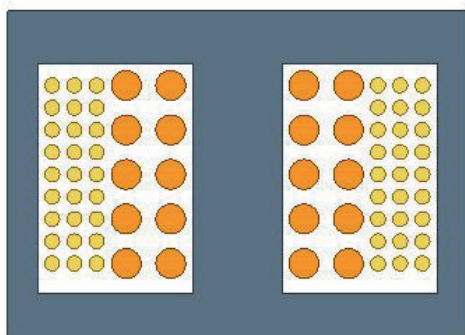


图1. 标准变压器横截面结构

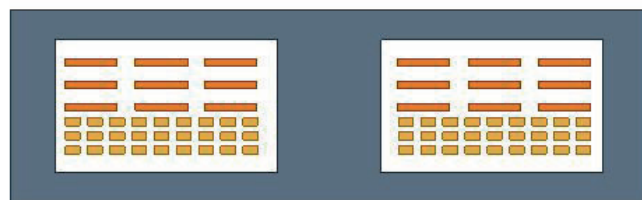


图2. 平面变压器横截面结构



平面磁件在效率、成本、空间要求以及散热方面显著改善了电力电子器件的性能。

这项技术不仅让解决方案更为紧凑，而且提高了整体系统性能和效率，因此半导体公司和功率转换研究小组对平面磁件产生了越来越大的兴趣。例如，对漏电感进行控制和微调可以提高系统效率。漏电感可以根据大多数系统的要求降低，或者使用适当的技术增加，如谐振电路的情况。这项技术适用于多个领域，从高功率应用磁学到低功率电源电路，均可使用。

然而，将平面磁件应用于任何项目之前，必须考虑到该技术的优点和缺点。以下内容将带您深入了解高效的设计工作流程如何帮助您充分利用平面磁件，同时提供有用的设计建议和应用示例。

优点和缺点

平面磁件技术[1]的主要优势是：

- 尺寸小：平面磁件的高度仅有传统磁件的一半甚至更小；
- 优化的热特性：平面磁芯具有更好的热特性，可导热并将器件保持在低于绕线磁芯的温度。平面磁芯具有更好热特性的原因在于它们具有比传统磁芯更高的表面积与体积比，从而与周围环境产生有效的热交换。

为了进行可靠的比较，我们选择了两种变压器设计，一种是常规变压器，另一种是平面变压器。两种变压器设计用于反激式转换器，其技术规格见下表。

V_{IN}	12V
V_{OUT}	24V
电源	50W
开关频率	100 kHz

表1. 反激规格

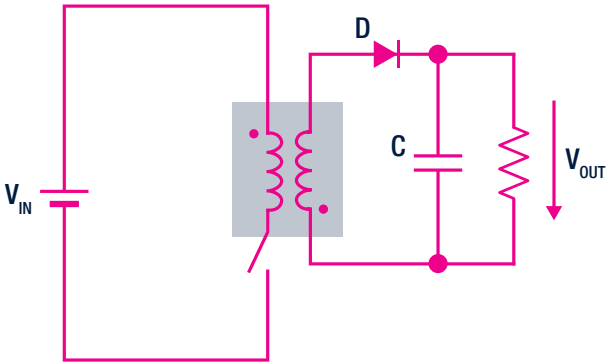


图3. 反激式转换器拓扑

我们比较了初级 $L_{prim} = 20\mu H$ 和 $n = 2$ 、体积近似、材料相同条件下具有相同电感值的两个变压器。这些设计具有以下特点。

磁芯类型	E38/8/25
磁芯材料	3C92
体积	8477 mm ³
窗口填充系数	34.37

表2. 平面变压器设计规范

磁芯类型	R12/I
磁芯材料	3C92
体积	8264 mm ³
窗口填充系数	41.69

表3. 同心变压器设计规范

在平面变压器中耗散348mW的功耗，在同心变压器中耗散434mW的功耗。两者具有相同的限制条件：环境温度20°C，自然热对流及辐射。两者达到的热值不同。

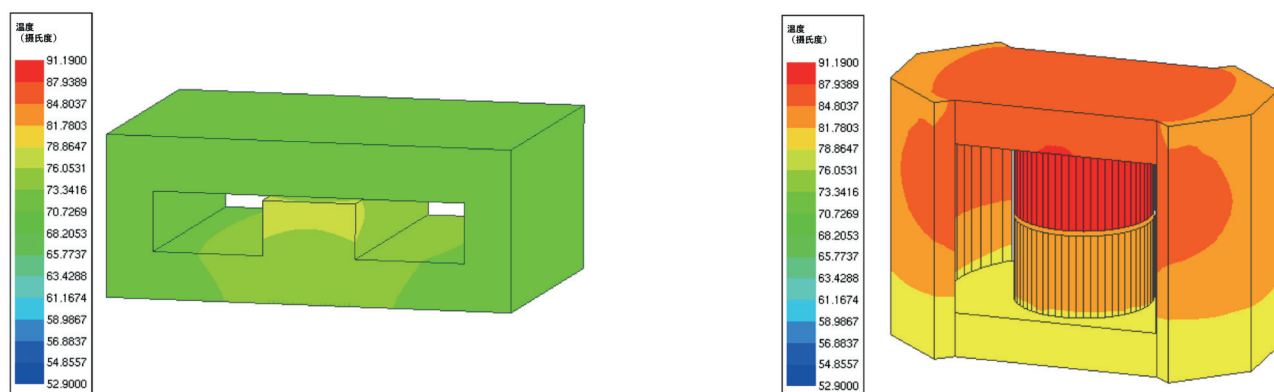


图4. 平面与同心温度曲线对比

通过添加铝耗散平面，我们获得以下结果。

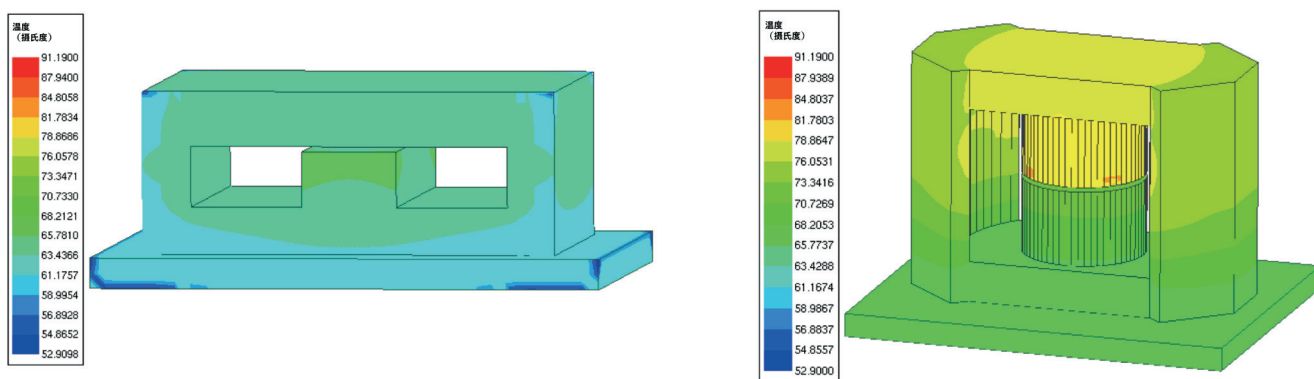


图5. 平面与同心温度曲线对比（带铝板）

与传统的散热平面相比，当应用于平面几何形状时，散热平面进一步改善了散热性能。

其他优点包括：

- **自动化、易制造和成本低：**传统的装配工艺使制造平面磁件具有无可比拟的重复性和准确性。事实上，传统电感器和变压器的缠绕很难实现自动化。相反，平面磁件制造中使用的生产和装配过程与创新的技术工具相结合，简化了自动化。尤其是PCB技术适合全球制造；
- **PCB模块化：**无需额外连接件即可组装。不同的内核形状和PCB结构会产生不同的外形尺寸；
- **可预测的寄生效应：**平面绕组布局易于控制并实现交错解决方案，这意味着更低的泄漏效应和更低的绕组电容。在线绕元件中，实现这一目标要复杂得多，而且并非始终可行。

平面技术的主要缺点是：

- **占用空间大：** 其占用空间比传统器件的占用空间大，但高度较低；
- **铜填充系数低：** 如果PCB用于平面绕组，铜填充系数通常较低。这是由于PCB技术存在一些结构限制；即，最小内匝间距是铜厚度的两倍加上50 μm 和层间最小介电厚度（相当于标准板约100 μm ）；
- **匝数有限：** 设计必须使用有限的匝数，因为匝数的增加会导致更多的PCB层，从而提高PCB制造成本。可减小绕组宽度以获得更多空间，但会导致直流电阻升高，电流能力降低；
- **绕组间电容高：** PCB工艺制绕组在结构上堆积，比传统绕组占用更多空间，增加了寄生效应电容；
- **缺乏典型结构的精确分析模型；**
- **平均匝长（MLT）更长，** 因此由于磁芯形状，直流电阻更高；
- **对于线圈部分位于磁芯外部的一些结构，应评估EMI，** 因为这可能会对周围的设备产生噪声。

平面元件的设计需要深入了解电磁定律、电力电子用磁性材料、磁件损耗、趋肤效应和邻近效应等磁性现象、气隙边缘效应、漏电感、杂散电容等。

有必要从分析方法开始，掌握设计背后的理论并使用设计验证工具。验证工具可提供不同的复杂程度，通过定义磁模型的材料、创建区域、指定限制条件、激励、参数和网格，帮助设计者确定要使用的正确解算器，并促进磁模型的创建。此类工具还可以帮助设计者决定如何最好地设置解决方案，定义所需的后处理，并以用户友好的方式解释结果。

所需知识

- 电磁学定律
- 电力电子器件磁性材料
- 磁件损耗
- 趋肤效应
- 邻近效应
- 气隙
- 气隙周围的边缘效应
- 泄漏电感
- 杂散电容

分析方法

- 公式和规则



必要时进行设计检查和修正

- 处理问题，选择最合适的工具
- 选择正确的求解器
- 创建模型与分配材料
- 激励与参数分配
- 网格划分与解决方案设置
- 结果后处理与解释

图6. 掌握平面磁件的设计

平面磁件设计

本节描述了反激式转换器耦合电感器的简单设计工作流程，该电感器在初级和次级电感之间进行隔离操作。为了更深入地理解磁方程和参数的技术概念，请阅读专业书籍，例如[2]。

磁性器件的特征在于其磁化或初级电感、磁芯形状和材料、匝数，对于基于多层PCB的平面器件，还在于PCB叠层上的铜走线尺寸和位置。

一旦功率转换器（在本例中为反激式）的特性已固定（功率、电压和电流额定值、工作频率和占空比、磁性设备允许的最高温度等），根据材料和尺寸选择一个候选磁芯。在此阶段，设计师的经验发挥着重要作用，通常要参考磁芯制造商提供的设计指南。

根据以下公式，磁芯选择会影响磁化电感（或反激式转换器的初级电感）：

$$L_m = \mu_0 \mu_r N_p^2 \frac{A_e}{l_e} = N_p^2 A_l \quad (1)$$

其中 μ_r 芯材的相对磁导率， N_p 是初级侧的匝数， A_e 磁芯横截面积， l_e 磁芯磁路长度。

当确定了磁芯形状、尺寸和材料时，制造商数据表可以提供附加的磁性参数，即电感系数 A_l ，通常指无间隙磁芯（有时，为相同磁芯在不同间隙处的可用变体提供 A_l ）。一旦建立了电感，该值允许通过还原(1)的最后一项来设置初级绕组所需的最小匝数：

$$N_{p,MIN} \geq \sqrt{\frac{L_m}{A_l}} \quad (2)$$

然后，选定的磁芯几何形状必须满足能处理所需能量的磁芯产品面积与磁芯材料特性之间的关系。以下公式可用于此目的：

$$A_e \times A_w \geq \frac{L_{PRI} \times I_{PRI,PK} \times I_{PRI,RMS}}{K_w \times B_{MAX} \times J} \quad (3)$$

其中 A_w 为磁芯窗口面积， K_w 为窗口因子， $I_{PRI,PK}$ 为原边峰值电流， $I_{PRI,RMS}$ 为原边RMS电流， B_{MAX} 为峰值磁通密度， J 为铜线电流密度。

然后根据电感系数 A_l 和转换器开关频率来选择磁芯材料。

由于磁芯是磁件最重要的部件之一，其温度在整个工作温度中起着重要作用。[3]报告了平面E形磁芯的一些公式，该公式允许将估计的变压器温升作为磁芯中磁通密度的函数。后者需要最大化，以平衡有限的可用绕组空间（基于多层PCB的平面磁件固有特性）。

假设磁芯占平面变压器总损耗的一半，则可将最大磁芯损耗密度 P_{core} 表示为最大允许 ΔT 的函数：

$$P_{core} = \frac{12 \Delta T}{\sqrt{V_e} (cm^3)} \quad (mW/cm^3) \quad (4)$$

其中 V_e 为有效磁芯体积。

磁芯损耗密度可通过Steinmetz方程[4]执行近似计算：

$$P_{core} = C_m \cdot f^x \cdot B_{MAX}^y \cdot (ct_0 - ct_1 T + ct_2 T^2) = C_m \cdot C_T \cdot f^x \cdot B_{MAX}^y \quad (mW/cm^3) \quad (5)$$

其中所有参数 x 、 y 、 C_m 、 C_T 取决于磁芯制造商提供的铁氧体材料。

从等式（5）中， B_{MAX} 可以表示为 P_{core} 的函数：

$$B_{MAX} = \left(\frac{P_{core}}{C_m \cdot C_T \cdot f^x} \right)^{1/y} (T) \quad (6)$$

通过在关系式（6）中替换（4）中计算的 P_{core} ，可估计给定温度 T 下 B 的最大值。

初级绕组的实际匝数 N_p 取决于给定磁芯截面积[3]的初级电感、峰值电流和峰值磁通密度：

$$N_p = \frac{L_{PRI} \times I_{PRI,PK}}{B_{MAX} \times A_e} \quad (7)$$

如果匝数比 n 由应用约束给出，则可以轻松确定次级绕组匝数：

$$N_s = n \times N_p \quad (8)$$

对于 N_p 和 N_s 的实际值，通常假设最接近的整数为最佳选择。

要确定构成初级线圈和次级线圈的PCB铜走线的横截面积，假设初级电流、次级电流的RMS值以及电流密度值的规格已知，适用以下公式：

$$A_1 = \frac{I_{PRI,RMS}}{J_{PRI}} \quad \text{and} \quad A_2 = \frac{I_{SEC,RMS}}{J_{SEC}} \quad (9)$$

确定如何在预先分配数量的PCB层之间分配初级线圈和次级线圈非常重要。影响这一选择的两个主要因素：PCB走线上电流引起的温升和可用的绕组窗口宽度。后者取决于所选择的磁芯几何形状。

另一个基本设计约束条件是，通过策略性地堆叠初级和次级层（交错技术），降低绕组电流的邻近效应（这将极大地影响交流电阻）。根据目标PCB堆叠，铜走线厚度和宽度的选择通常受到主机应用和磁芯尺寸的限制。

另一个重要方面是遵守特定的标准。例如，安全标准IEC 950要求通过PCB材料(FR4)的主、次级绕组之间的电源绝缘为400 μm 。

一旦规定了PCB铜厚度，绕组的走线宽度取决于（9）。当主机应用预先建立PCB堆叠且平面器件必须集成在电路板中时，就会发生这种情况。匝间距 s 受PCB生产力和成本的影响。根据经验，厚度为35 μm 的铜层，走线宽度和间距>150 μm ，厚度为70 μm 的铜层，走线宽度和间距>200 μm [2]。

对于特定的绕组宽度 W_w ，一旦给出了每层匝数 N_{pl} 和间距 s ，便可以通过简单的公式得到走线宽度 T_w ：

$$T_w = \frac{W_w - (N_{pl} + 1) \times s}{N_{pl}} \quad (10)$$

该计算是为了适应给定绕组宽度下每层的最大匝数。

一旦计算出铜走线厚度和宽度，RMS电流给出的允许温升（作为第一近似值）可遵循IPC-2221标准来确定。然而，应考虑此类指示是指直流电流，在功率转换器应用中，高频交流电流会产生涡流效应，可细分为众所周知的趋肤效应和邻近效应。这些效应会对实际绕组电阻、损耗和实际温升产生显著影响。

那么趋肤深度 δ 取决于材料特性，如：导电性和渗透性。其与频率的平方根成反比。当走线宽度 T_w 小于 2δ 时，趋肤效应可忽略不计。如果需要更宽的走线，解决方案可以是将其分割成平行走线。

附近其他导体产生的磁场会产生邻近效应。当初级层和次级层交错时，这种效应明显减弱。

一旦完成了平面磁件的设计，便可通过有限元分析(FEA)对其进行建模和验证。设计过程中可使用二维和三维FEA模拟，以确保设计要求和规范相匹配。此外，还能准确地评估漏电感和自电容。分析法可近似计算这些参数。假设将电流和电压的电波形提供给元件端子（瞬态分析），那么这些工具也可以执行热剖析。

以下部分介绍Ansys磁件设计专用工具。该工具可有效支持整个开发周期，包括设计和验证。

用于设计和验证的 Ansys平面工作流程

电子变压器类器件的虚拟样机对于优化、高效的设计工作流程越来越重要。而这需要设计和建模技能，以及使用多种解算器和工具来处理不同物理领域的所有相关现象。

Ansys产品组合为多绕组电子变压器的磁性、多物理场和系统分析提供了完整的工作流程，如下图所示。

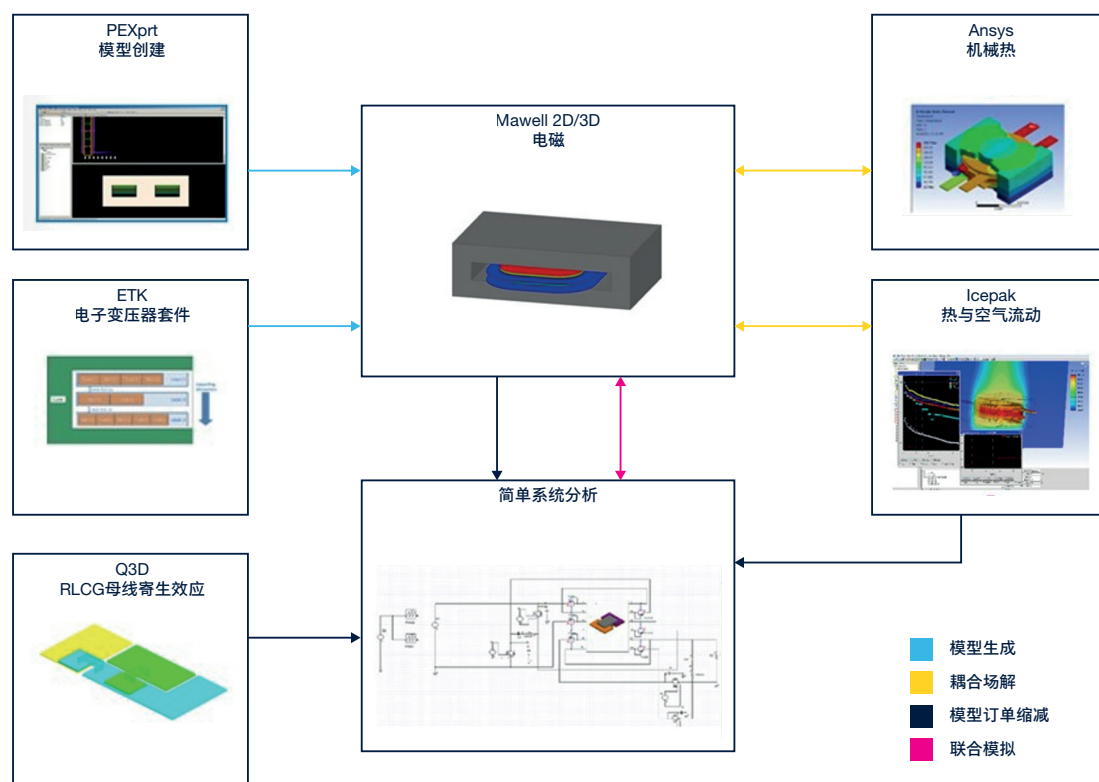


图7. 电力电子磁件的Ansys工作流程

在每个阶段为用户提供不同的选项。为了简化工作流程，我们将其分为以下几个阶段：

- 设计/预处理
- 设备参数识别/等效电路
- 低频电磁分析
- 耦合场分析:热管理
- 系统仿真/数字孪生

我们建议依靠Ansys Maxwell场仿真功能，在频域中进行精确的参数识别并生成等效电路。然后，研究系统级的瞬态行为。这样，也考虑了周围电路元件和寄生效应的影响。此外，系统方法更好地捕捉具有陡峭导数波形的挑战性行为，这是这类组件的典型特征。

设计/预处理

首先需要一份设计草图或器件布局模型来启动工作流程。可根据项目阶段（设计规范、详细设计或验证）以不同的方式生成。

已定义的几何布局

如果已经根据几何结构和材料定义了设计，可以通过下图所示的Ansys工具生成2D或3D模型，其中推荐的输入源标有绿色复选标记。

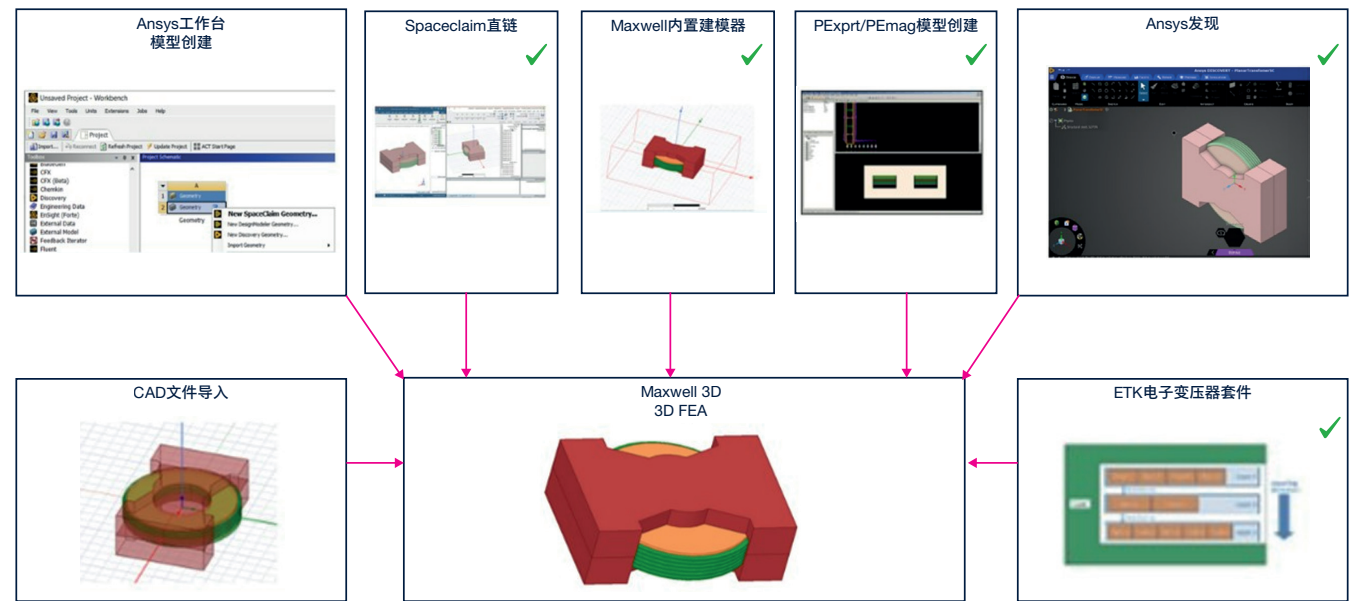


图8. Ansys Maxwell输入几何

未定义的几何布局

如果设计尚不存在，您可以通过Ansys PExprt工具构建基于分析的首个设计。

PExprt是一款分析工具，用于设计电力电子应用中小型转换器的不同拓扑。该工具包含磁芯、电线、线轴、绝缘体和材料标准库。其为不同类型的器件（如：电感、多绕组变压器和反激式转换器）创建了可以自动分析和建模的潜在设计。

可用模板的完整列表如图9所示。设计选用的转换器可基于波形，也可基于转换器。每种情况下，都可以插入相应的设计规范。

PExprt还包括PEmag模块，该模块允许对所选设计产生的器件布局进行编辑，并生成完整的Ansys Maxwell模型。

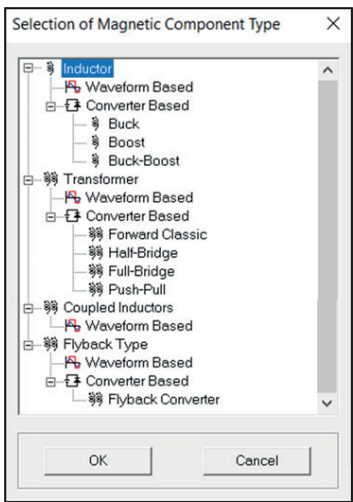


图9. PExprt可用模板

设备参数识别/等效电路

参数识别阶段在Maxwell内进行，生成：

- 通过在涡流求解器中运行的频率扫描FEM模拟得到所有必要的频率点阻抗矩阵（这种情况下，直接链接到Ansys simplorer/Ansys Twin Builder，具有良好的参数拟合质量）
- 如需要，通过静电模拟获得的电容矩阵，作为单独的模块导入系统模拟器，如下图所示。

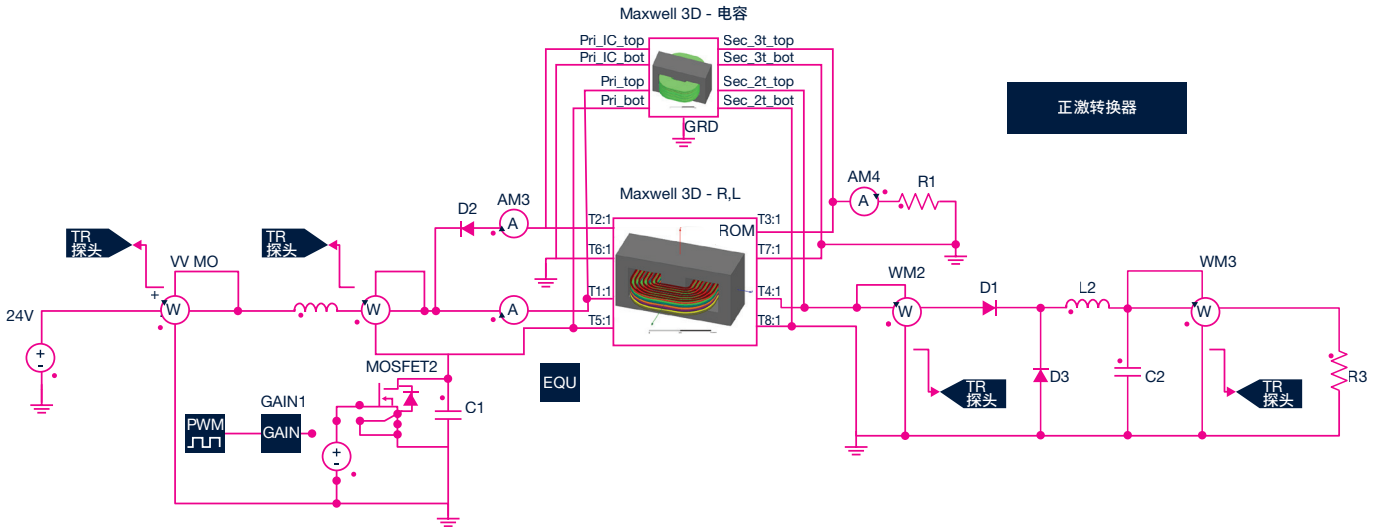


图10. 电子变压器Simplorer系统模拟，用Maxwell创建的降阶模型（ROM）

低频电磁分析：最佳实践

对于电子变压器应用（mW-W功率），需要在较宽的频率范围内进行分析（DC-MHz），主要使用涡流求解器。

通过涡流求解器，可提取上述器件阻抗矩阵与频率的关系。通过模拟，在适当的激励设置下，还可评估正弦激励产生的损耗。此类器件挑战还包括非线性材料、涡流、邻近效应和磁场的时间扩散。因此，为了对电子变压器进行完整而精确的研究，我们建议进行以下模拟：

- 空载分析：初级绕组在额定条件下（通常在额定电压下）馈电，次级绕组开路；
- 满载分析：初级绕组在额定条件下（通常在额定电压下）馈电，次级绕组在额定负载下闭合；
- 短路分析：初级绕组在额定条件下馈电，次级绕组短路（在极小电阻下闭合）；次级绕组短路（在非极小电阻下闭合），而初级绕组在降低的条件下馈电，以便额定电流流动（实验室测试）；
- 快速分析（仅瞬态）：由于开启期间电源突然变化而启动。

此外：

- 静磁运行可用于评估空载时芯材料B-H曲线上的工作点。通常，良好的设计应能防止工作点在B-H曲线的非线性区域，且能使用标量值；
- 在非正弦激励的情况下，使用瞬态运行来研究损耗；根据几何布局，该模拟可以在2D或3D中执行。在瞬态情况下，也有可能捕捉发生在磁芯的非线性现象。

耦合场分析：热管理

Ansys电子桌面平台（AEDT）也可以进行多物理场分析。对电子变压器最有用的分析是耦合电磁-热模拟，其利用了AEDT Maxwell、AEDT Icepak和AEDT机械热之间的内置耦合能力，如下图所示。

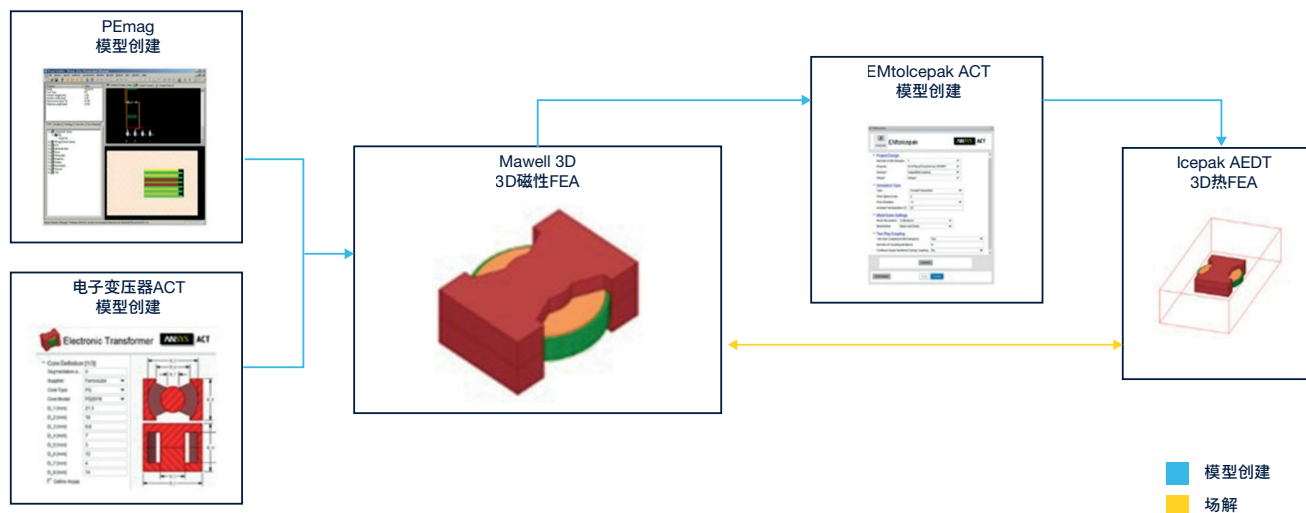


图11. 通过Ansys应用定制工具包（ACT）实现电磁热耦合

在示例中，Maxwell涡流可用于模拟正弦频率下的损耗。然后，EM-to-Icepak应用定制工具包（ACT）可用于创建和自动求解Icepak AEDT模型，包括双向耦合。

应用示例

平面变压器和电感器是高效SMPS应用的理想解决方案。下文显示了一些应用示例：反激式、iso-buck和LLC转换器拓扑。

反激拓扑

对于几瓦到150瓦的功率范围，最常用的拓扑之一是反激式转换器。
在功率晶体管导通期间，一些能量存储在变压器中，而输出电容为负载供电。当晶体管关断时，存储在变压器中的能量给负载和输出电容器供电。
下图为应用示例。

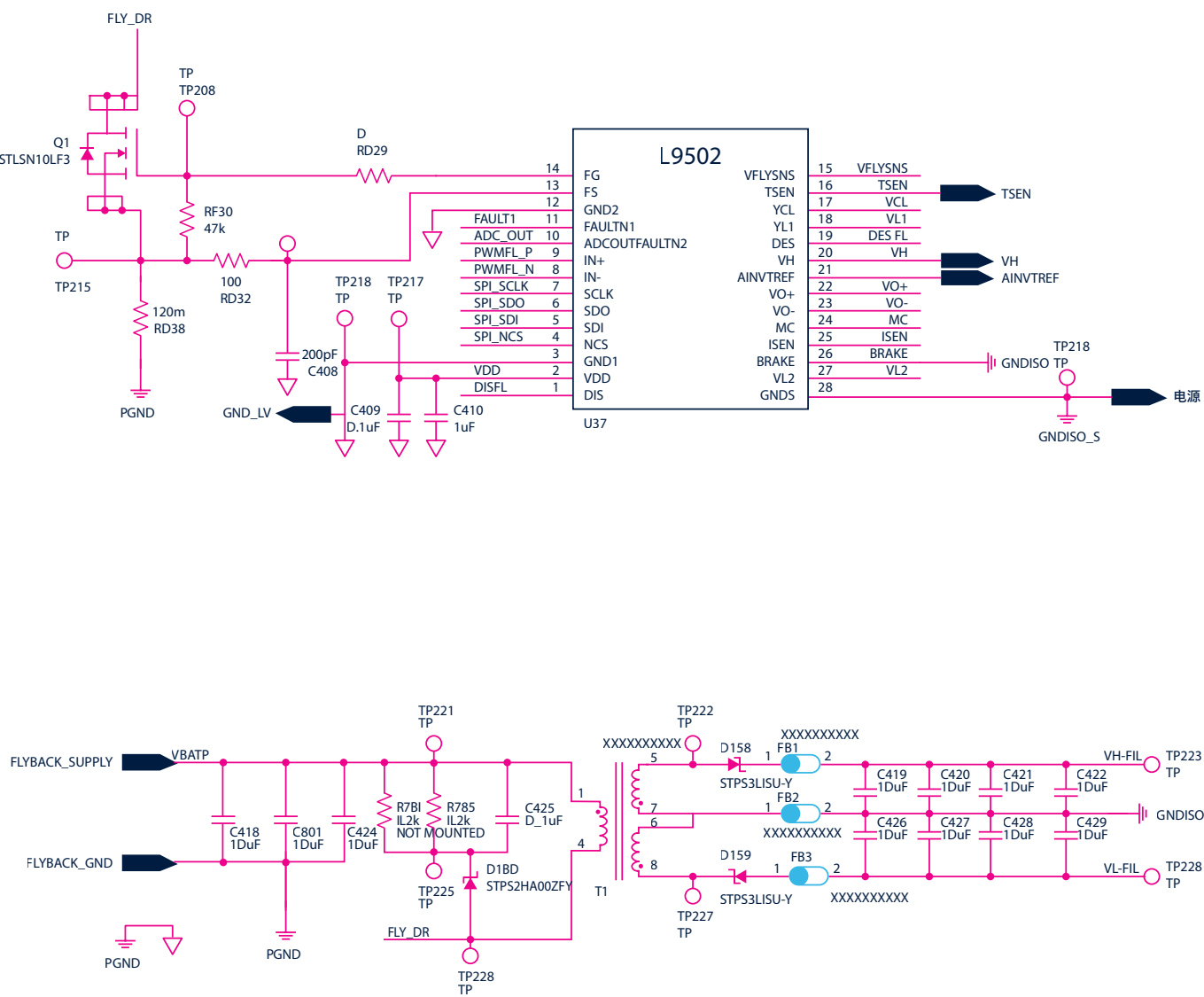


图12. 基于L9502驱动器的反激式转换器电气原理图

转换器由 $12V_{DC}$ 供电，输出为+18/-5伏，总功率为3瓦，工作频率为400 kHz。

所用磁芯为Ferroxcube的E14/3.5/5 + I 14/1.5/5。如下图所示，基于意法半导体L9502用于牵引逆变器的单通道隔离栅极驱动器，使用了一个箝位电路。

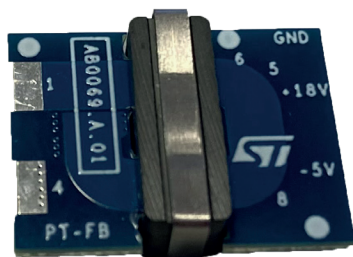


图13. 基于L9502驱动器的反激式平面变压器

变压器功率为3W，初级电感为四匝，分布在四层上，次级电感为四匝，分布在两层上。

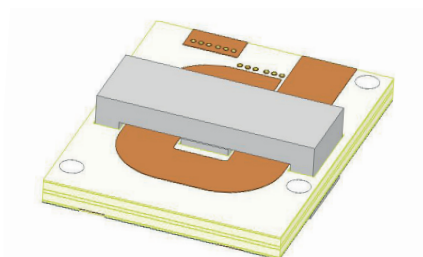


图14. 基于L9502驱动程序的三维平面变压器模型仿真工具

因此，总层数为六层。所用铜的厚度为 $35\mu m$ 。

与有线变压器相比，平面变压器的尺寸非常小，如下图所示。

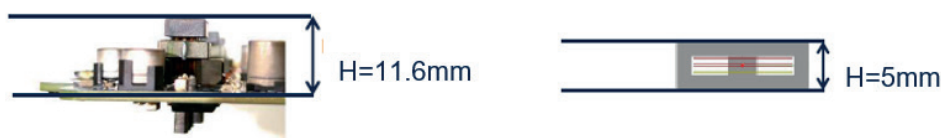


图15. 高度比较：常规变压器与平面变压器

Iso-buck拓扑

隔离降压拓扑（iso-buck）成为低功耗隔离DC-DC应用中非常受欢迎的解决方案。它结合了反激和同步降压转换器拓扑的优点，实现了简单的隔离式设计，尺寸更小、BoM成本更低。

图16所示的iso-buck转换器基于意法半导体的**L6986I同步iso-buck转换器**，包括：

- 初级侧：峰值电流模式架构的调节环路调节初级电压（浅蓝色方框）
- 双绕组变压器（灰色区域）
- 次级侧，根据所选变压器比产生隔离输出电压（黄色方框）

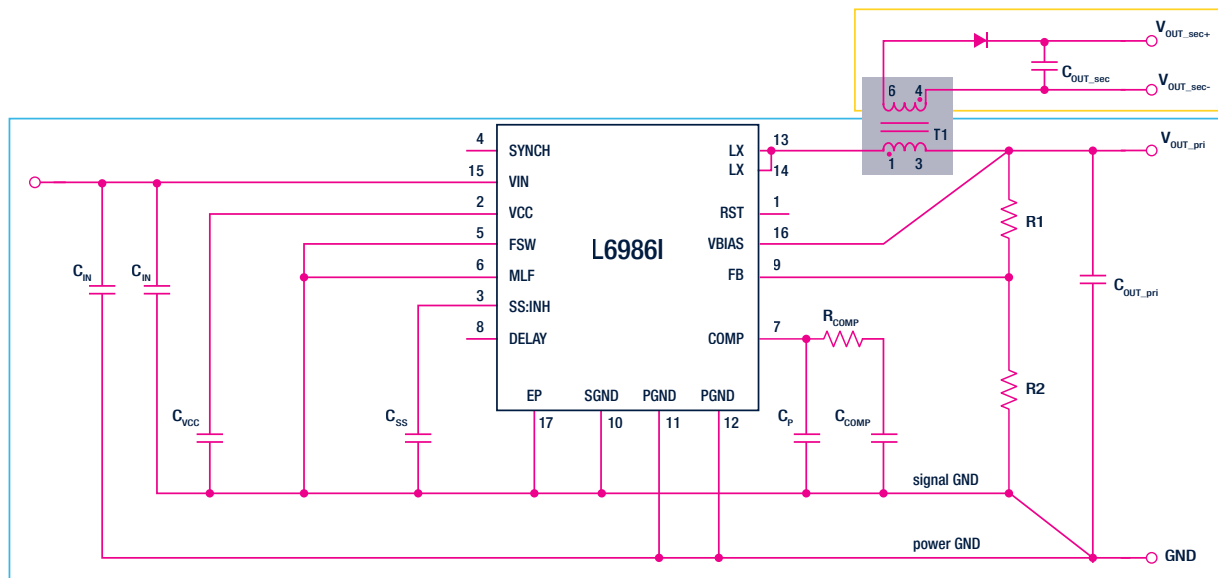


图16. 装配L6986I控制器的IsoBuck通用示意图

变压器是iso-buck的关键元件。它确保了所需的隔离，并允许能量传输到次级侧，从而产生次级隔离输出电压。由于是作为平面磁件定制的，应用板在减少空间、缩小尺寸、减少EMI和降低整体解决方案成本方面均突破了新的极限。

变压器的功率为3W，初级侧有5匝分布在两层上，次级侧有11匝分布在四层上。因此，总层数为六层。所用铜的厚度为35 μ m。

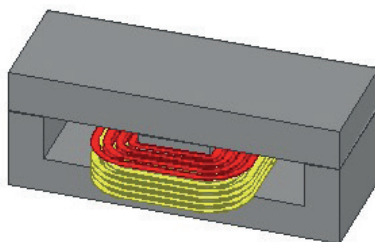


图17. 模拟工具三维平面变压器模型-L6986I

所用磁芯为Ferroxube的E14/3.5/5+I 14/1.5/5。夹具用于装配。

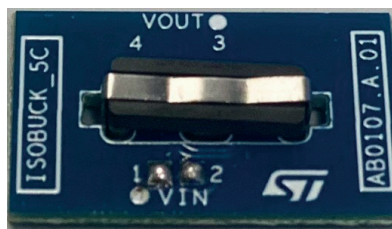


图18. 基于L6986i的等压线平面变压器

LLC拓扑

LLC是最常用的谐振转换器类型。这种拓扑可以在几瓦的功率下工作，理论上可以达到任何期望的输出功率。下图为LLC电路示例。

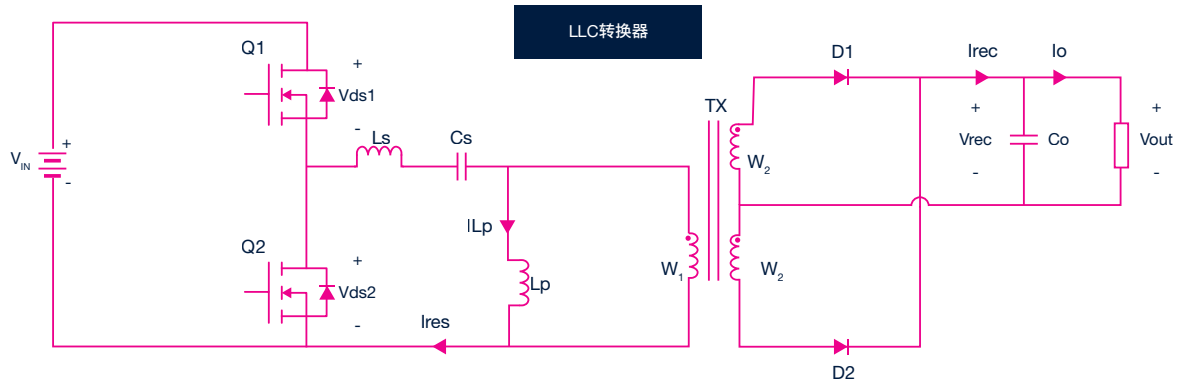


图19. LLC转换器示意图

谐振转换器的一个关键特性是其可以实现较高的效率以及具有较宽软开关操作范围的高频操作。

传统的谐振变换器由三部分组成：开关网络、谐振回路和整流器网络。开关网络从馈入谐振回路的DC总线产生脉冲。通过变压器，储能箱将电力传输到次级侧，在次级侧，整流网络从接收到的脉冲中产生直流电源。

由LLC的两个电感器和电容器组成的谐振回路被调谐为在给定频率（谐振频率）下谐振。

在以下示例中，400 V_{DC}的PFC总线为LLC转换器供电，LLC转换器提供22.5伏至420 W的输出。

变压器有九匝，分布在初级侧的三层上，次级侧有两匝分布在两层上。所用铜的厚度为105μm。

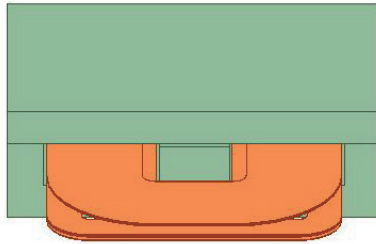


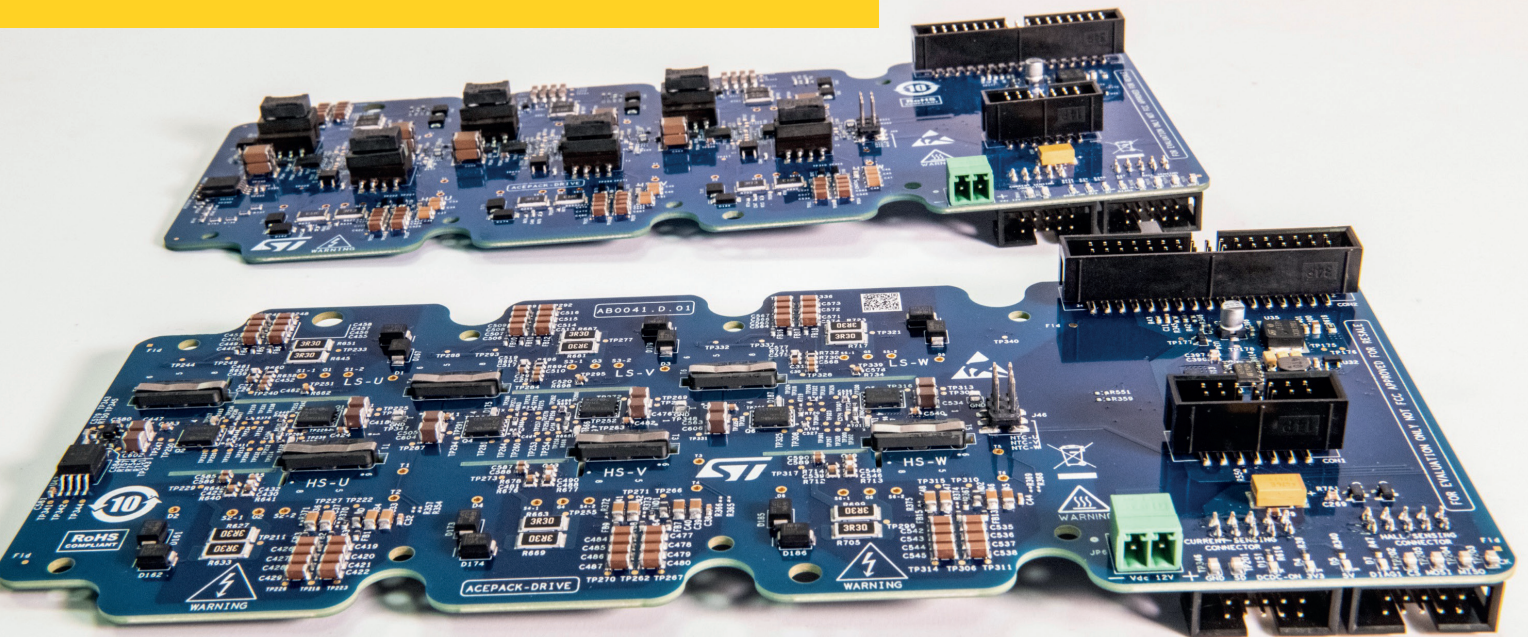
图20. 模拟工具三维平面变压器模型-LLC

所有磁芯为TDK的ELP 43/10/28+I43/1.5/28。



图21. LLC平面变压器

结论



阅读本白皮书后，您应该对平面磁性技术的优势以及自动化工作流程如何轻松帮助工程师优化电力电子器件设计有了很好的理解。我们专门研究了Ansys Maxwell 3D软件，一种用户友好型解决方案，可在频域和时域中精确地进行电磁分析。

总之，平面磁技术与精细工程的结合以独特的方式为满足您的参数规格定制了更高的功率密度和更具成本效益的解决方案。

平面变压器和电感器是高效SMPS应用的理想解决方案

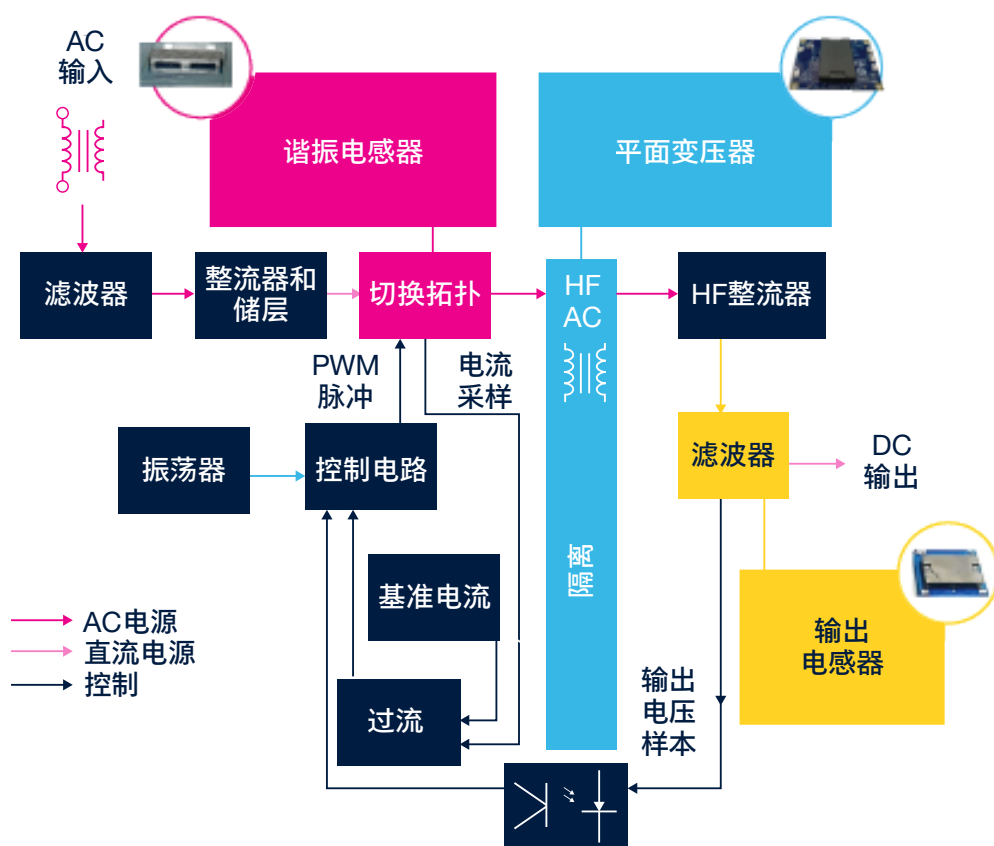


图22. 开关模式电源平面磁性应用

文献目录

[1] Advances in Planar and Integrated Magnetics, Ziwei Ouyang

[2] “Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications”, W.G.Hurley and W.H.Wolfe, Wiley

[3] Ferroxcube, “Design of Planar Power Transformer”, Application Note released on May ‘97 12nc:9398 083 39011。

[4] Vijaya Kumar N, Subhransu Satpathy, Lakshminarasamma N, “Analysis and Design Methodology for Planar Transformer with Low Self-Capacitance used in High Voltage Flyback Charging Circuit”, IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2016.

其他资源

电源设计工具（eDesignSuite易于使用的设计辅助工具集部分） [\[设计工具页面\]](#)

碳化硅STPOWER MOSFET和二极管 [\[SiC器件产品组页面\]](#)

L6986I 38 V, 5W同步等降压转换器 [\[产品页面\]](#)

电源和转换器 [\[应用页面\]](#)

工业电机控制 [\[应用页面\]](#)

HEV/EV驱动系统的牵引逆变器 [\[应用页面\]](#)

关于意法半导体产品和解决方案的更多信息，请访问www.st.com

© STMicroelectronics - 2022年11月 - 中国印刷 - 保留所有权利
ST和ST徽标是STMicroelectronics International NV或其附属公司在欧盟和/或其他地区的注册和/或未注册商标。
具体而言，ST及ST徽标已在美国专利商标局注册。
若需意法半导体商标的更多信息，请参考www.st.com/trademarks。
其他所有产品或服务名称是其各自所有者的财产。



life.augmented