

# 平面变压器变宽度绕组策略与 绕组损耗优化设计

贺锦毅, 邢梓豪, 罗辞勇\*  
(重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

## Variable-Width Winding Strategy and Winding Loss Optimization Design for Planar Transformers

HE Jinyi, XING Zihao, LUO Ciyong\*

(School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** [Objective] To address the issue of significantly increased AC winding losses in planar transformers caused by the flat winding structure exacerbating proximity and skin effects, this study proposes a topology optimization method for windings based on variable-width design, aiming to improve current distribution uniformity and reduce losses. [Methods] A multi-physics coupling model of winding AC effects was established, and electromagnetic field theory was employed to analyze current density distribution patterns. A gradient variable-width parametric model was developed for circular windings to validate the regulatory mechanism of width variation on loss reduction. Building on circular winding optimization, nonlinear variable-width design criteria for rectangular windings were formulated, and two differentiated width adjustment schemes were developed. The electromagnetic performance of these schemes was evaluated using 3D finite element simulations. [Results] Experimental data demonstrated that the optimized rectangular variable-width windings achieved a 7.789% reduction in AC Ohmic losses while maintaining equivalent conductive area. Additionally, the maximum magnetic flux density in the winding region decreased by 3.766%, and current density distribution uniformity improved by 21.6%. The leakage inductance of the optimized variable-width winding was, on average, 49.1% higher than that of the equal-width winding. This indicated that the variable-width design indirectly increases the leakage inductance by altering the winding width

and the number of turns per unit length. [Conclusion] The optimization design of variable-width circular windings is applied to rectangular windings. By actively controlling the electromagnetic field boundary conditions of the conductor cross-section, the phenomenon of eddy current accumulation under high-frequency conditions is effectively suppressed. This work provides a quantifiable design paradigm for multi-objective collaborative optimization of planar transformer windings.

**Key words:** planar transformer winding loss; AC resistance; variable-width design; optimization design

**摘要:** [目的] 针对平面变压器因扁平绕组结构加剧邻近效应与趋肤效应导致交流绕组损耗显著升高的问题, 提出一种基于变宽度设计的绕组拓扑优化方法, 以改善电流分布均匀性并降低损耗。[方法] 建立绕组交流效应多物理场耦合模型, 通过电磁场理论解析电流密度分布规律; 针对圆形绕组提出梯度变宽度参数化模型, 验证宽度变化对损耗的调控机制; 结合圆形绕组优化经验, 构建矩形绕组非线性变宽度设计准则, 提出两种差异化宽度调整方案, 并采用三维有限元仿真验证方案的电磁性能。[结果] 试验数据显示优化后的矩形变宽度绕组在保持相同导电面积条件下, 交流欧姆损耗下降 7.789%, 绕组区域最大磁感应强度降低 3.766%, 电流密度分布均匀性提升 21.6%。优化变宽度绕组的漏感值比等宽度绕组平均高出 49.1%, 说明变宽度设计通过改变绕组宽度和匝长, 间接地提高了漏感。[结论] 将圆形绕组变宽度优化设计应用于矩形绕组, 通过主动调控导体截面的电磁场边界条件, 有效抑制了高频工况下的涡流集聚现象, 该成果为平面变压器绕组的多目标协同优化提供了可量化的设计范式。

**关键词:** 平面变压器绕组损耗; 交流电阻; 变宽度设计; 优

基金项目: 国家级(市级)大学生创新训练项目 (S202410611114)

National (Municipal) College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program (S202410611114)

化设计

## 0 引言

平面变压器通过三维集成磁路设计实现革命性的结构创新<sup>[1-2]</sup>,其采用多层印刷电路板或柔性基板实现绕组平面化<sup>[3]</sup>,通过绕组-磁芯热耦合设计提升散热效率,并通过精确控制线宽/间距 $<50\ \mu\text{m}$ 来优化性能<sup>[4-6]</sup>。

平面变压器在 1 MHz 工况下的功率密度可提升至 5~6 倍,同时可以降低绕组间寄生电容<sup>[7]</sup>,这对降低开关损耗至关重要。采用光刻工艺制造的平面绕组可将匝间精度控制在 $\pm 2\ \mu\text{m}$ ,使漏感参数离散性改善至 $\pm 3\%$ 以内<sup>[8-11]</sup>。

然而,平面变压器在高频下的绕组损耗问题仍对其设计构成关键挑战。当导体厚度接近趋肤深度 $\delta$ 时(铜在 1 MHz 时 $\delta \approx 66\ \mu\text{m}$ ),高频电流在绕组截面的分布呈现显著梯度特征,导致交流电阻 $R_{ac}$ 急剧增加。研究表明,在 1 MHz 工况下,多层印制线路板(Printed Circuit Board, PCB)绕组因层间涡流耦合效应,其交流损耗可达直流损耗的 4.2 倍,且损耗非线性度随频率提升呈指数级增长<sup>[12-13]</sup>。更严重的是,传统均一化绕组设计会加剧邻近效应,相邻导体的边缘磁场交叠导致电流向导体单侧聚集,在多层堆叠结构中可能引发级联式损耗恶化<sup>[14]</sup>。

当前平面变压器绕组优化研究主要集中在损耗评估精度与几何参数优化两个层面。在损耗评估方面,文献[15]通过引入非均匀边界条件改进了传统平面绕组损耗模型,提升了高频损耗计算的准确性。文献[16]提出基于阻抗矩阵的快速计算方法,结合数学优化模型实现绕组拓扑的自动优化,为设计者提供了高效的损耗控制工具。文献[17]则针对矩形绕组开发了专用电感计算公式和电压分布算法,验证了标准化磁芯的利用率提升效果。然而,这些方法的优化过程依赖于预设的绕组结构,无法突破导体截面积恒定这一根本约束。

在几何结构创新层面,文献[18]通过理论推导获得环形绕组内外径比约束方程,为电流均匀分布提供了几何设计准则,但其模型未涉及高频涡流耦合效应的影响。文献[19]提出的半匝变压器创新性地利用绕组-磁芯对称配置,将最小匝

数压缩至 0.5,但该设计高度依赖特定 EI 磁芯构型,在非对称磁路中效率显著下降。文献[20]研发的四分之一匝平面变压器虽通过 PCB 走线对称性优化实现了 98.2% 的 LLC 变换效率,但其严格的绕组布局要求导致磁芯尺寸选择范围缩减 40%。这些结构改进方案暴露出受限于特殊工艺要求或牺牲设计自由度换取局部性能提升的共性缺陷。

现有解决方案从不同角度尝试抑制损耗,但仍存在本质局限:利兹线集成平面绕组通过细丝化导体降低趋肤效应,但引入股间绝缘层使绕组填充率下降;三维磁芯优化虽改善磁场分布,却导致磁路不对称性增加;基于有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)的拓扑优化方法虽能局部改善损耗,但难以建立绕组几何参数与损耗特性的映射关系<sup>[21-26]</sup>。这些矛盾凸显了通过调控绕组几何分布实现损耗抑制的必要性。

为了解决绕组损耗抑制的问题,本文针对传统圆形绕组变宽度设计中仅考虑直流电阻 $R_{dc}$ 优化导致的交流电阻 $R_{ac}$ 优化不明显的问题,提出并验证了一种适用于矩形绕组的变宽度设计方法,并通过有限元分析软件 PEmag 进行仿真,分析了不同设计方案在高频工况下的性能表现。然后,通过优化变宽度绕组的几何形状,结合高频趋肤效应和涡流效应的影响,进一步降低了 $R_{ac}$ 。最后,试验结果验证了该优化设计的有效性,并与传统设计方案进行了对比分析,表明优化设计在减少损耗和提高性能方面具有显著优势。

## 1 平面变压器绕组损耗分析

### 1.1 趋肤效应和邻近效应对电流分布的影响

高频信号下,平面变压器的绕组会受到趋肤效应和邻近效应的作用,导致电流在绕组导体中的分布不均匀,从而增加 $R_{ac}$ ,加剧绕组的损耗。

趋肤效应指高频交流电流在导体中流动时,导体内部产生与电流方向相反的电动势,如图 1 所示。由于导体中心区域的磁场强度较导体表面更大,因此在导体中心产生的反向电动势大于在导体表面附近产生的反向电动势<sup>[27]</sup>。这种反向电动势的作用使得电流主要集中在导体表面,导体内部的电流则大幅度减弱。随着工作频率增高,趋肤效应的影响愈加显著,导致导体的有效通

流面积减小,进而使得  $R_{ac}$  显著增大。

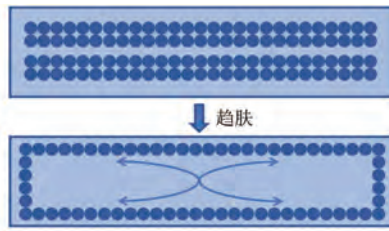


图 1 趋肤效应  
Fig. 1 Skin effect

为了更好地描述趋肤效应,提出了趋肤深度的概念。趋肤深度指空心导线和实心导线具有相同电阻时,空心导线壁的厚度。工程上通常将电流密度衰减至其表面值的  $1/e$  所对应的深度定义为趋肤深度,或称涡流标准渗透深度。在恒定温度下,导线的趋肤深度  $\delta$  可表示为

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = \sqrt{\frac{1}{\sigma\mu\pi f}} \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为电导率; $\mu$  为相对磁导率; $\rho$  为电阻率; $\omega$  为角频率; $f$  为电流频率。

为了有效缓解趋肤效应对导体电流分布的影响,许多高频应用中采用了空心导线来代替传统的实心导线。趋肤效应的严重程度可以通过趋肤深度  $\delta$  来量化, $\delta$  受频率、导体的电导率以及磁导率的影响。频率越高, $\delta$  越小,导致导体内的有效电流流动区域进一步缩小,从而增大了  $R_{ac}$ 。在平面变压器的应用中,如果绕组的厚度远小于  $\delta$ ,那么趋肤效应对电流分布的影响则可以忽略不计。此时,电流基本集中在导体表面,导体内部的电流分布变化较小,对电流分布的影响较为有限。

变压器绕组还会受到邻近效应的影响。邻近效应是指高频电流通过导体时,由于相邻导体之间的相互作用,电流在每个导体内部的分布发生变化,从而导致电流密度在导体的表面分布不均匀,如图 2 所示。邻近效应也会引起电流的重新分布,

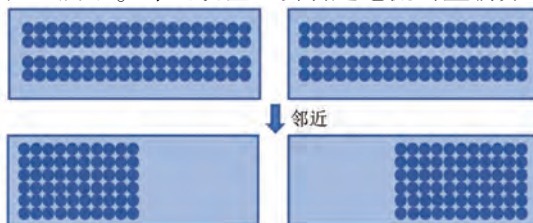


图 2 邻近效应  
Fig. 2 Proximity effect

其作用机制主要来源于导体之间的相互电磁影响。

当多个导体处于彼此接近的位置时,电流流过某一导体时会在其周围产生变化的磁场,在相邻磁场的作用下,会根据导体内电流方向相反或相同对相邻导体电荷产生吸引或排斥的作用,影响导体内的电流分布,即为相邻导体之间的邻近效应。无论电流方向如何,邻近效应都会加剧电流在导体表面流动的集中特性,实际上减少了有效的电流流动面积,进而增加平面变压器绕组的  $R_{ac}$ ,从而增大绕组损耗。

## 1.2 $R_{dc}$ 与 $R_{ac}$ 的模型关系

优化变压器绕组的损耗时,由于  $R_{dc}$  计算相对简单且易测量,通常计算  $R_{dc}$  来反映  $R_{ac}$ <sup>[28]</sup>。然而,实际上,由于交流电流在高频下受到趋肤效应和邻近效应的影响, $R_{ac}$  要比  $R_{dc}$  大,这些效应会导致电流集中在导体表面,从而减少有效的电流流动面积,增大电阻。

为了简化复杂的分析过程,可以通过数学模型对  $R_{ac}$  的表达式进行推导。 $R_{ac}$  通常以  $R_{dc}$  为基准,并通过一个比例系数  $q$  来反映  $R_{ac}$  相对于  $R_{dc}$  的增大倍数。其中  $R_{ac}$  可由 Dowell 一维定理计算:

$$R_{ac} = R_{dc} \frac{\varepsilon}{2} \left[ \frac{\sinh \varepsilon + \sin \varepsilon}{\cosh \varepsilon - \cos \varepsilon} + (2m - 1)^2 \frac{\sinh \varepsilon - \sin \varepsilon}{\cosh \varepsilon + \cos \varepsilon} \right] \quad (2)$$

式中: $\varepsilon$  为集肤深度的比值,用来衡量高频电流在导体表面的集中程度; $m$  为单层线绕磁动势变化量,与绕组布置方式、原副边绕组的排布紧密相关。

在模型中,通过综合考虑趋肤效应和邻近效应,可以得到  $R_{ac}$  和  $R_{dc}$  的关系表达式为

$$R_{ac} = qR_{dc} \quad (3)$$

式中: $q$  为与趋肤效应和邻近效应共同作用相关的比例因子。

分析表明, $R_{ac}$  相对于  $R_{dc}$  的增幅与绕组结构的设计密切相关。 $R_{ac}$  与  $R_{dc}$  的数值成正比,基于对  $R_{dc}$  的分析与优化可以实现对  $R_{ac}$  值的控制与削弱。

## 2 圆形绕组设计方法

讨论多匝绕组时,需要考虑到绕组之间的间



距以及绕组连接部分的处理问题。为了简化计算,通常作出以下假设。

(1) 忽略绕组间的间距和层内连接部分,使得多匝绕组可以简化为同心圆设计。

(2) 忽略层间的连接部分,单层绕组的计算视为独立的。

当多匝绕组布置在同一层时,以靠近中柱的方向为内侧,靠近磁芯边柱的方向为外侧进行分析。在这种设计中,假设绕组之间没有间距,因此上一匝绕组的外径与下一匝绕组的内径是相等的。多匝圆形绕组结构如图3所示。

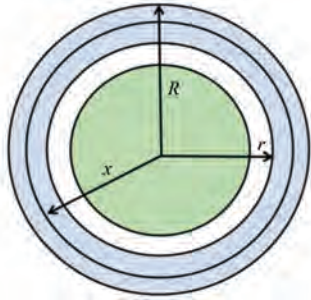


图3 多匝圆形绕组

Fig.3 Multi-turn circular winding

根据图3分析两匝绕组时,可以通过分别求解每一匝绕组的电阻并合并计算。当两绕组间的连接半径满足 $x = \sqrt{Rr}$ 时,绕组的总 $R_{dc}$ 将达到最小值。此时,内外匝绕组的半径比为

$$k_2 = \sqrt{\frac{R}{r}} \quad (4)$$

计算出两匝绕组的最小 $R_{dc}$ 值为

$$R_{dc} = \rho \frac{2\pi}{h} \left( \frac{2^2}{\ln R - \ln r} \right) = \frac{8\pi\rho}{h(\ln R - \ln r)} \quad (5)$$

进一步地,假设每一层绕组有 $N$ 匝,当第 $N$ 匝绕组和第 $N+1$ 匝绕组连接时,则:

$$x_N = \left( \frac{R_N}{r_1} \right)^{\frac{1}{N+1}} \cdot r_1 \quad (6)$$

式中: $R_N$ 为第 $N$ 匝绕组的外半径; $r_1$ 为第一匝绕组的内半径。

此时,第 $N+1$ 匝绕组 $R_{dc}$ 的最小值可表示为

$$R_{dcN+1_{min}} = \rho \frac{2\pi(N+1)^2}{h(\ln R_N - \ln r_1)} \quad (7)$$

理想情况下,绕组的内外半径比为

$$k_N = \left( \frac{R_{N+1}}{r_1} \right)^{\frac{1}{N+1}} \quad (8)$$

在实际设计中,除了考虑理论结果外,还必须考虑绕组间距 $\Delta w$ 。通过引入 $\Delta w$ ,设满足最小 $R_{dc}$ 的半径比 $k$ 为

$$k^N + \frac{\Delta w}{r_1} (k^{N-1} + \dots + k^1) = \frac{R_N}{r_1} \quad (9)$$

通过优化设计,可有效降低绕组电阻,从而减小变压器的损耗。这种变宽度设计方法为平面变压器的高效设计提供了理论依据。

### 3 改进矩形绕组的变宽度设计

现有研究中,大量磁芯中柱为矩形,圆形绕组的变宽度设计方法无法直接适用于这类结构。通过对圆形绕组变宽度设计的分析可以发现,这种设计虽然以降低 $R_{dc}$ 为目标,但由于交流系数的影响,实际 $R_{ac}$ 的降低效果并不显著,因此对整体绕组损耗的减少有限。

针对这一问题,本文基于圆形绕组变宽度设计的结论,对矩形线圈进行调整和改进。假设矩形线圈的长度为 $y$ ,宽度为 $x$ ,磁芯中柱截面的长宽比为 $k$ 。为简化分析,作出以下假设。

(1) 忽略矩形线圈内部的层内连接部分,将其视为闭合的矩形线圈组。

(2) 假设矩形线圈的长宽比例与磁芯中柱截面的长宽比相等,即 $y = kx$ ,从而将矩形绕组的求解简化为类似圆形绕组的单变量问题。

(3) 忽略矩形线圈层间的连接部分,求解过程基于单层绕组的独立分析。

基于此,本文提出两种矩形线圈的变宽度优化方法,并对比分析其优化效果。

#### 3.1 第一种优化方法

从圆形绕组变宽度设计的理论出发,以单匝绕组结构为起点进行分析。多匝矩形绕组的结构如图4所示。

基于 $R_{dc}$ 计算和微元法,求得单匝矩形绕组的单位 $R_{dc}$ 计算式为

$$dR_{dc}(x) = \rho \frac{4(1+k)x}{hdx} \quad (10)$$

进一步推广至整个绕组的积分求解:

$$R_{dc} = \frac{\rho \frac{4(1+k)}{h}}{\ln(x+w) - \ln x} \quad (11)$$

由式(11)可知,矩形绕组的计算式与圆形绕

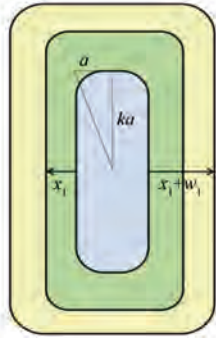


图 4 多匝矩形绕组

Fig. 4 Multi-turn rectangular winding

组基本一致。参考圆形绕组的计算式,假定磁芯中柱中心到绕组的距离为  $x$ ,根据式(11)可直接计算等效内外绕组的半径比。

对于矩形绕组,第  $N$  匝绕组的等效内半径为  $x_N$ ,等效外半径为  $x_N + w_N$ ,其中  $w_N$  为第  $N$  匝绕组的宽度,其表达式为

$$w_N = \beta x_N \quad (12)$$

式中: $\beta$  为根据圆形绕组变宽度理论计算的半径比。

当  $N=4$  时,计算得  $\beta=1.297$ 。通过确定第一匝绕组的初始位置,并结合绕组间距和匝数关系,可以依次推导出后续各匝绕组的位置和宽度。

### 3.2 第二种优化方法

第二种方案:假设所有绕组的绕组半径比与最外层绕组相同,设该半径比为  $\beta$ ;以芯柱中心为原点修改为以芯柱边缘作为原点。通过确定第一匝绕组的位置,结合磁芯窗口宽度的限制,得到最外层绕组满足的关系式为

$$x_N + w_N + \Delta w \leq L \quad (13)$$

式中: $\Delta w=0.2$  mm 为最外层绕组到板层边缘的安全距离; $L$  为磁芯窗口的宽度。

首先,设定初始绕组的一个位置点为  $x_1$ ,然后根据最外层绕组的宽度要求,得到第一匝绕组的宽度为

$$w_1 = \beta x_1 \quad (14)$$

考虑到绕组之间的正常间距,假设绕组之间等间距排布,并设定间距值  $\Delta x=0.4$  mm,那么第二匝绕组的位置和宽度可表示为

$$x_2 = x_1 + \Delta x + w_1 = \beta x_1 + \Delta x \quad (15)$$

$$w_2 = (\beta - 1)x_2 = \beta(\beta - 1)x_1 + (\beta - 1)\Delta x \quad (16)$$

依此类推,得到最外层绕组与第一匝绕组之间的关系式为

$$x_N = \beta x_{N-1} + \Delta x = \beta^{N-1} x_1 + \sum_{i=0}^{N-2} \beta^i \Delta x \quad (17)$$

$$w_N = \beta^{N-1}(\beta - 1)x_1 + (\beta - 1) \sum_{i=1}^{N-2} \beta^i \Delta x \quad (18)$$

当式(13)取等号时,表示最优宽度设计,其可简化为

$$\beta x_N = L - \Delta w \quad (19)$$

通过联立式(17)与式(19),可求解半径比的关系式为

$$\beta^N x_1 + \sum_{i=1}^{N-1} \beta^i \Delta x = L - \Delta w \quad (20)$$

最后,在 Matlab 中将  $N=4$  代入计算求解,得到半径比  $\beta=1.842$ 。

## 4 仿真试验与损耗对比

在 Maxwell 电磁仿真环境中,针对平面变压器的电磁特性分析,本研究采用基于 FEA 的涡流场求解器对 PEmag 生成的二维轴对称模型进行多物理场耦合计算。首先,依据实际几何参数在 Maxwell 平台中重构平面变压器的多层绕组结构与磁芯拓扑,并定义各区域的材料属性。然后,基于如式(21)所示的涡流场控制方程,设置求解域边界条件为 Balloon 类型,以有效模拟开放场域中的磁场衰减特性,避免边界反射对场分布的干扰。

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J - j\omega \sigma A \quad (21)$$

根据平面变压器的匝比关系  $N_p:N_s=k:1$ ,通过端口电流约束法对各绕组截面施加时谐电流激励,设定原边绕组电流幅值为  $\sqrt{2}I_{\text{eff}}$ ,副边绕组则按匝数反比关系同步加载  $\sqrt{2}I_{\text{eff}}/k$ ,从而精确表征实际工况下的安匝平衡条件。为量化高频趋肤效应与邻近效应的影响,在 10 kHz~1 MHz 频段内设置对数均匀分布的频率采样点,并启用自适应网格加密策略,进行局部网格细化。此外,通过残差阈值  $<0.5\%$  的能量收敛准则及网格独立性验证确保计算结果的鲁棒性。最终,通过场路协同求解获得绕组的频变阻抗矩阵,并提取损耗密度分布以评估不同频率下的涡流损耗特性,如式(22)所示:

$$P_{\text{loss}} = \frac{1}{2} \int_V J \cdot E^* dV \quad (22)$$

## 4.1 变宽度绕组的仿真试验

### 4.1.1 第一种方案

通过确定第一匝绕组的初始位置,并结合各匝绕组之间的相对位置和设定的绕组间距,可以依次计算出后续匝数绕组的位置和宽度,得到一组完整的变宽度绕组设计方案。该方案假设绕组为单层,且共包括4匝绕组,设计中包含了普通变宽度设计和优化变宽度设计两种类型方案,具体如表1、表2所示。

表1 普通变宽度绕组设计方案

普通变宽度	第1匝	第2匝	第3匝	第4匝
位置/mm	0.4	1.9	3.9	6.4
宽度/mm	1.1	1.6	2.1	2.6

表2 优化变宽度绕组设计方案一

Tab.2 Optimized variable width winding design scheme 1

优化变宽度	第1匝	第2匝	第3匝	第4匝
位置/mm	0.4	1.85	3.73	6.3
宽度/mm	1.05	1.48	2.17	2.7

在仿真软件中,将等宽度绕组方案和一种无优化规则的变宽度方案进行对比试验,以验证不同设计方案的效果,如图5所示。

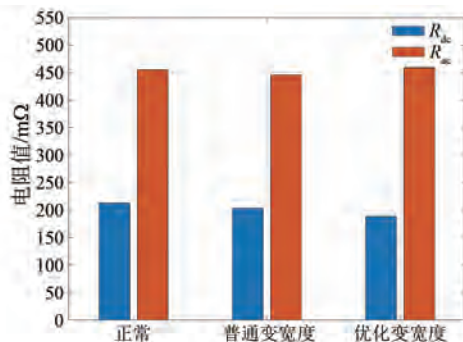


图5 不同优化方案下  $R_{dc}$ 、 $R_{ac}$  对比试验

Fig.5 Comparison experiment of  $R_{dc}$  and  $R_{ac}$  under different optimization schemes

由图5可知,参照圆形绕组的变宽度设计方案,虽然能够实现较低的  $R_{dc}$ ,但其  $R_{ac}$  的降低效果并不显著,未能达到明显的改善。

### 4.1.2 第二种方案

根据  $\beta=1.842$  的半径比,可以得到矩形线圈变宽度设计的第二种方案,仍以单层4匝绕组进行探讨,具体设计参数如表3所示。

表3 优化变宽度绕组设计方案二

Tab.3 Optimized variable width winding design scheme 2

优化变宽度	第1匝	第2匝	第3匝	第4匝
位置/mm	0.4	1.136 8	2.494	4.994
宽度/mm	0.336 8	0.957 2	2.1	4.20

在PEmag中建立二维绕组截面模型后,通过参数化接口将其导入Ansys Maxwell平台,基于几何拓扑映射方法构建具有变宽度特征的矩形绕组三维精细化模型,如图6所示。

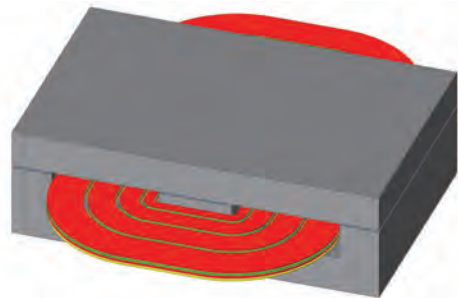


图6 优化后变宽度绕组3D模型

Fig.6 3D model of the variable-width winding after optimization

通过软件仿真,可以观察到优化变宽度4匝绕组的电流密度分布如图7所示。



图7 优化后400 kHz下电流密度分布

Fig.7 Optimized current density distribution at 400 kHz

由图7可知,优化变宽度后电流密度主要集中在靠近铁心内侧的绕组上。最外侧绕组上电流密度几乎为零,电流密度的峰值虽然有所提高,但4匝绕组电流密度的均值比优化前降低。

通过优化绕组结构的空分布,实现了电流密度的定向调控,有效抑制了边缘磁场的交叉耦合作用。优化前后欧姆损耗及磁场强度对比如图8、图9所示。

仿真进一步验证,该分布模式使系统在1 MHz下平均欧姆损耗降低7.789%,同时为目标绕组预留了定制化散热设计空间。这种电流密度梯



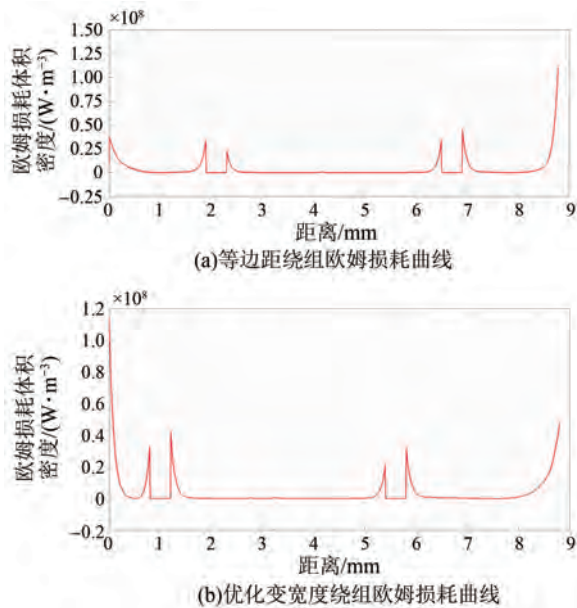


图 8 优化前后欧姆损耗曲线

Fig. 8 Comparison of Ohmic loss curves before and after optimization

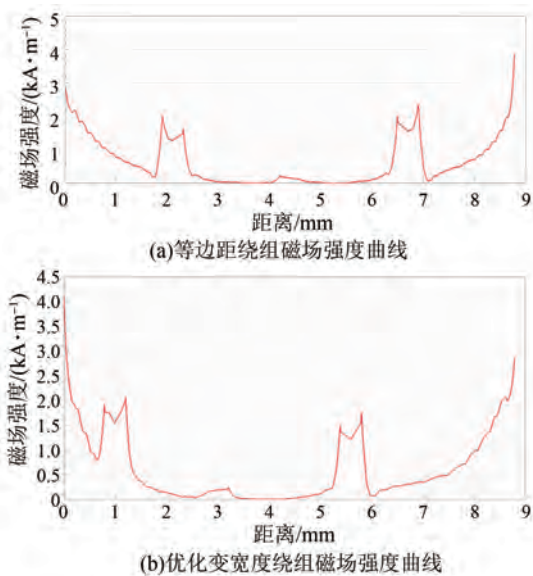


图 9 优化前后磁场强度曲线对比

Fig. 9 Comparison of magnetic field strength curves before and after optimization

度化分布策略为高功率密度电磁器件的局部强化设计提供了新思路。梯度化间距布局使绕组间磁场分布呈现局部解耦特性, 磁场分布由均匀耦合转为局部聚焦, 系统整体磁场强度降低 3.766%。

将第二种变宽度方案与等宽度绕组方案以及一种无优化规则的变宽度方案进行对比, 结果如图 10 所示。

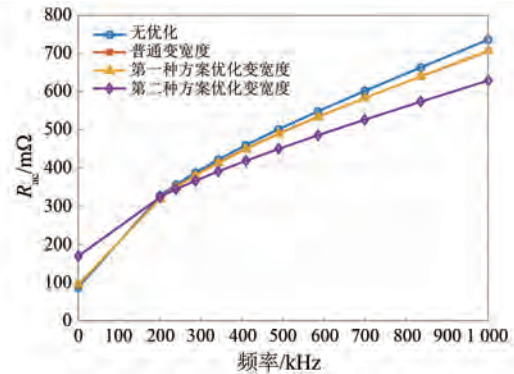


图 10 不同工作频率下各方案的  $R_{ac}$  值

Fig. 10  $R_{ac}$  values of each scheme at different operating frequencies

由图 10 可知, 第二种方案虽然对于整体的  $R_{dc}$  没有较好的优化, 但大幅降低了  $R_{ac}$  的值。  $R_{ac}$  为决定绕组损耗的关键因素。

#### 4.2 漏感检测

观测  $R_{ac}$  的同时, 通过试验观测了变压器在不同工作频率下漏感的变化。使用 PEmag 平台中的有限元分析模型生成器创建变压器绕组的二维模型。在 PEmag 平台中, 选择二维轴对称模型, 频率范围为 100~1 000 kHz, 涵盖了变压器工作时的可能高频工况。采用 Balloon 类型边界条件模拟开放场域中的磁场衰减, 并避免边界效应对结果的影响。根据输入的绕组几何形状和材料属性, 利用 FEA 计算各频率下的漏感, 结果如图 11 所示。

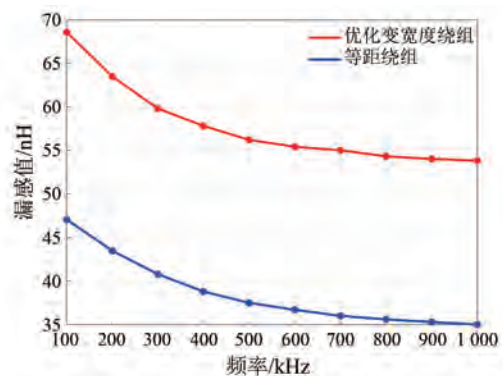


图 11 不同工作频率下各方案的漏感值

Fig. 11 Leakage inductance values of each scheme at different operating frequencies

由图 11 可知, 在各频率下, 优化变宽度绕组的漏感值比等宽度绕组平均高出 49.1%。随着频率升高, 趋肤效应导致磁场分布向导体表面收缩,

减少了未耦合到主磁路的漏磁通,同时导体中涡流产生的反向磁场进一步抵消部分漏磁通,使得等效漏感降低。变宽度设计通过一定程度地增大漏感,实现了更低的 $R_{ac}$ 。

### 4.3 变宽度设计的优劣总结

通过对两种变宽度方案的计算、设计与试验对比分析,从 $R_{ac}$ 优化的角度来看,第二种设计方案表现出更明显的优势,可显著降低绕组的整体 $R_{ac}$ 。第一种方案主要针对 $R_{dc}$ 的优化,不适用于矩形线圈的设计需求。

从其他寄生参数的角度分析,变宽度绕组设计可能导致漏感和寄生电容升高。当漏感的增幅比 $R_{ac}$ 优化的效果小时,这种变化可忽略不计。然而,如果漏感的增幅显著,则需特别关注并采取措​​施削弱其对漏感和寄生电容的不利影响。只有在优化 $R_{ac}$ 、漏感和寄生电容之间实现均衡,才能进一步改善变宽度设计方案的性能。

## 5 结语

本文围绕平面变压器的绕组损耗问题,分析了高频条件下趋肤效应与邻近效应对电流分布及 $R_{ac}$ 的影响,并探讨了 $R_{dc}$ 与 $R_{ac}$ 之间的关系。针对常规固定宽度绕组设计的不足,提出了两种变宽度绕组设计方法,分别适用于圆形绕组和矩形绕组的优化。通过理论分析与仿真试验验证,这两种变宽度设计方法显著改善了绕组的电流分布,有效降低了 $R_{ac}$ ,进而减少了绕组的总损耗。这不仅为变压器设计提供了新的思路,也为高频变压器的高效化提供了参考。

未来可进一步考虑权衡多种寄生参数之间的优化设计方法,实现平面变压器的综合优化设计。同时结合材料技术和生产工艺,为平面变压器的发展提供更多的技术支持和实际应用的可能性。

### 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 作者贡献

贺锦毅、邢梓豪进行了方案设计、试验研究、内容总结以及论文撰写;罗辞勇参与了论文的审

核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, experimental research, content summarization, and paper writing were conducted by He Jinyi and Xing Zihao. The review and revision of the paper were participated in by Luo Ciyong. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

### 参考文献

- [ 1 ] 于翔. 高频磁元件优化设计方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- YU X. Research on optimal design method of high-frequency magnetic components [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [ 2 ] 姜国豪, 陈伟, 郑涛, 等. 多相自励磁同步电机零低速域高频电流相位优化策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(10): 64-75.
- JIANG G H, CHEN W, ZHENG T, et al. Phase optimization strategy for high-frequency current in zero-low speed domain of multiphase self-excited synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(10): 64-75.
- [ 3 ] 何恰刚, 张钟韬, 刘嘉诚, 等. 一种考虑热扩散和热耦合的 IGBT 模块热阻抗模型[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(5): 17-24.
- HE Y G, ZHANG Z T, LIU J C, et al. Thermal impedance model for IGBT modules considering heat spreading and thermal coupling [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(5): 17-24.
- [ 4 ] 杨帆, 欧阳斌, 翟小飞, 等. 铁心饱和对正交绕组平面感应电机电磁耦合特性的影响研究[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(4): 118-127.
- YANG F, OUYANG B, ZHAI X F, et al. Influence of core saturation on the electromagnetic coupling characteristics of orthogonal winding planar induction motors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(4): 118-127.
- [ 5 ] 赵烁, 曾理湛. 精粗双层绕组磁浮平面电机线圈厚度影响分析[J]. 微特电机, 2024, 52(6): 1-7.
- ZHAO S, ZENG L Z. Influence analysis of coil thickness in dual-layer winding magnetic levitation planar motors [J]. Small & Special Electrical Machines, 2024, 52(6): 1-7.



- [ 6 ] 雷鸣, 张方华, 李寿清, 等. 矩阵变压器在 LLC 直流变压器中的应用[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(6): 54-59.  
LEI M, ZHANG F H, LI S Q, et al. Matrix transformer for LLC DC-DC transformer [ J ]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(6): 54-59.
- [ 7 ] KAHLOUCHE F, YOUSOUF K, BÉCHIR M H, et al. Fabrication and characterization of a planar interleaved micro-transformer with magnetic core [J]. Microelectronics Journal, 2014, 45(7): 893-897.
- [ 8 ] 李耀华, 王孝宇, 吴庭旭, 等. 带 LC 滤波器的永磁同步电机多步模型预测电流控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 21-31.  
LI Y H, WANG X Y, WU T X, et al. Multi-step model predictive current control of permanent magnet synchronous motor with LC filter [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(11): 21-31.
- [ 9 ] 朱一昕, 张威, 刘淳铭, 等. 基于平面磁集成变压器的高位取能电源设计[J/OL]. 电源学报, 2025-4-4. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250326.1604.010>.  
ZHU Y X, ZHANG W, LIU C M, et al. Design of high-voltage energy harvesting power supply based on planar magnetic integrated transformer [ J/OL ]. Journal of Power Supply, 2025-4-4. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250326.1604.010>.
- [ 10 ] 吕佳徽, 董婷. 柔性 PCB 绕组径向磁通微型永磁电机设计[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 13-20.  
LYU J H, DONG T. Design of radial flux permanent magnet micromotor with flexible PCB winding [ J ]. Electric Machines & Control Applications, 2023, 50(7): 13-20.
- [ 11 ] 丁秀华, 祝锦, 龚春英, 等. 反激式平面变压器绕组交流损耗的分析[C]//2008 中国电工技术学会电力电子学会第十一届学术年会, 杭州, 2008.  
DING X H, ZHU J, GONG C Y, et al. Analysis of AC loss in fly back planar transformer windings [ C ] // 2008 The 11th Annual Conference of Power Electronics Society of China Electrotechnical Society, Hangzhou, 2008.
- [ 12 ] 冷红魁, 王耀强, 雷涌, 等. 立体三角卷铁芯变压器磁场分布规律研究[J]. 电工技术, 2025, (2): 175-177.  
LENG H K, WANG Y Q, LEI Y, et al. Study on magnetic field distribution law of three-dimensional triangular roll iron core transformer [ J ]. Electric Engineering, 2025, (2): 175-177.
- [ 13 ] LIU Y G, LIU W L, CHENG N N. Magnetic field and eddy current analysis of permanent magnet eddy current coupling [ C ] // 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, Lijiang, 2015.
- [ 14 ] MA L F, REN F Q, LI Q Q, et al. Study of AC resistance calculation in equivalent networks of transformer windings and frequency response considering proximity effect [ C ] // 2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment, Shanghai, 2023.
- [ 15 ] LIU H Y, SUN K, CAO G, et al. Design and optimization of high insulation voltage planar transformer for DC-DC converters [ C ] // 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium, Shanghai, 2021.
- [ 16 ] HE M, XIE J Y, YANG L, et al. Analysis of connection optimization in planar transformer winding loss [ C ] // 2023 IEEE 2nd International Power Electronics and Application Symposium, Guangzhou, 2023.
- [ 17 ] PAPADOPOULOS T, ANTONOPOULOS A. Formula evaluation and voltage distribution of planar transformers using rectangular windings [ C ] // 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications, Ghent, 2021.
- [ 18 ] 安少亮, 吴庆, 王博彦, 等. 一种电流密度均匀分布的平面变压器绕线宽度优化方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(6): 1816-1827.  
AN S L, WU Q, WANG B Y, et al. A winding width optimization method for planar transformer with uniform distribution of current density [ J ]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(6): 1816-1827.
- [ 19 ] LI S Q, RONG E G, MIN Q Y, et al. A half-turn transformer with symmetry magnetic flux for high-frequency-isolated DC/DC converters [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 6467-6470.
- [ 20 ] LIU Y C, CHEN K D, CHEN C, et al. Quarter-turn transformer design and optimization for high power

- density 1-MHz LLC resonant converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(2): 1580-1591.
- [21] REHLAENDER P, GROTE T, TIKHONOV S, et al. A PCB integrated winding using a Litz structure for a wireless charging coil [C]// 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications, Genova, 2019.
- [22] 殷洪海, 殷莉莉. 无刷同步发电机中的三次谐波励磁线圈及基波励磁线圈的设计[J]. 电机与控制应用, 2009, 36(8): 13-18.
- YIN H H, YIN L L. Design of third-harmonic excitation winding and fundamental-wave excitation winding in brushless synchronous generators [J]. Electrical Machines & Control Application, 2009, 36(8): 13-18.
- [23] 孙嘉悦. 基于三维电磁仿真软件的无线充电耦合机构建模与仿真研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(11): 65-71+113.
- SUN J Y. Research on modeling and simulation of wireless charging coupling mechanism based on 3D electromagnetic simulation software [J]. Electrical Machines & Control Application, 2021, 48(11): 65-71+113.
- [24] 郑金宝. 基于平面磁元件的 GaN 三相 LLC 谐振变换器[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
- ZHENG J B. GaN-based three-phase LLC resonant converter using planar magnetic components [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
- [25] SHIMOKAWA S, OSHIMA H, SHIMIZU K, et al. Fast 3-D optimization of magnetic cores for loss and volume reduction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 1-4.
- [26] LI Y, YANG S, REN Z. A multi-objective topology optimization methodology using deep learning and its application to electromagnetic devices [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2023, 60(3): 1-5.
- [27] 闫荣格, 安康, 杨庆新, 等. 趋肤深度对增强型电磁推进器电感梯度的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 21-27.
- YAN R G, AN K, YANG Q X, et al. Influence of skin depth on inductance gradient of enhanced electromagnetic launchers [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 53(1): 21-27.
- [28] 陈彬, 李琳, 刘海军, 等. 基于有限元法的高频变压器漏电感和绕组损耗计算与分析[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(1): 8-14.
- CHEN B, LI L, LIU H J, et al. Calculation and analysis of leakage inductance and winding loss of high-frequency transformer based on finite element method [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(1): 8-14.

---

收稿日期:2025-04-04

收到修改稿日期:2025-05-02

作者简介:

贺锦毅(2004-),男,本科在读,研究方向为变压器损耗研究,20221882@stu.cqu.edu.cn;

\*通信作者:罗辞勇(1973-),男,博士,副教授,研究方向为电机控制与优化设计、智能系统建模与多目标优化,luociyong@cqu.edu.cn。