

应用笔记

NOVOSENSE  
纳芯微电子

# 基于NSIP3266的 平面变压器设计

AN-13-0018

作者: Zhiyong.Chen



摘 要

本应用笔记基于NSIP3266全桥驱动芯片，提出了一套完整的平面变压器设计方法，通过15V转24V/4W/200kHz的隔离电源实例，系统展示了从磁芯选型、参数计算到PCB设计与仿真验证的全流程。创新性地改进了传统AP法，突出平面变压器磁芯窗口横向宽度的核心地位。实测结果表明，该方案在实现81.4%满载效率、±5%负载调整率的优异电气性能的同时，其全桥拓扑的对称驱动特性有效抑制了直流偏磁，并且对平面变压器批量生产中存在的工艺偏差展现出强容错性，最终温升仅30℃。该方案充分发挥了平面变压器的高频、低剖面优势，与NSIP3266的宽频调节（100kHz-1MHz）能力深度协同，为新能源汽车、工业驱动等高端领域的高功率密度、高可靠性电源应用提供了经过充分验证的技术路径。

目 录

1. NSIP3266的隔离电源应用实例	2
1.1. NSIP3266的优势	2
1.2. 隔离电源拓扑结构	2
1.3. 隔离电源设计参数	3
2. 平面变压器磁芯选型与参数计算	4
2.1. 平面变压器匝比近似计算	4
2.2. 平面变压器磁芯选型方法	5
2.3. 实例磁芯选型	6
2.4. 平面变压器参数计算	7
3. 平面变压器设计与仿真	8
3.1. PCB设计	8
3.2. 平面变压器仿真	9
4. DEMO测试结果	9
4.1. 负载调整率和效率测试	9
4.2. 电性能测试	10
4.3. 平面变压器的电压和电流波形测试	11
4.4. 平面变压器温升测试	12
5. 总结	12
6. 修订历史	13

1.NSIP3266的隔离电源应用实例

1.1.NSIP3266的优势

在电源系统设计中，选择合适的拓扑结构是决定系统性能、成本和可靠性的关键环节。当工程师面临高频、高功率密度应用需求时，往往需要在多种技术路径中做出权衡。不同拓扑结构的优劣势对比如表1.1所示，NSIP3266采用的全桥拓扑具有显著优势。

对比项	双路低边驱动	LLC拓扑	推挽拓扑	全桥拓扑
原边复杂度	高（需外部MCU信号，占用资源）	低（全功能集成，可外部设置开关频率）	中（外围可编程，设置保护阈值）	低（全功能集成，可外部设置开关频率）
外围元件数	多（二极管/防护元件）	中（谐振电容+二极管）	少（仅需基础滤波）	少（优化滤波+整流）
变压器复杂度	低（小漏感）	高（漏感精度要求高）	中（需要中心抽头）	低（小漏感）
EMC性能	一般	优（漏感谐振）	优（对称结构）	极优（磁场抵消）
典型成本	低	中	高	低

表 1.1 不同拓扑的优劣势

NSIP3266采用全桥拓扑架构，与平面变压器结合构成了一个在电气性能、热管理和量产鲁棒性上均表现优异的系统级解决方案。其核心优势在于，全桥的对称电压驱动能有效抑制直流偏磁，天然适配平面变压器易实现的低漏感与良好对称性，从而在根源上优化EMI性能与磁芯利用率。支持100kHz-1MHz的宽频调节能力，使得设计可与平面变压器特定的层叠结构与寄生参数（如低分布电容）深度协同，实现高频下的高效率与高功率密度。此外，该拓扑对变压器参数（如匝比、漏感）的敏感性较低，赋予了方案强大的工艺容差能力，能显著吸收平面变压器在批量生产中难以避免的PCB层压、对位及绕组一致性等微小偏差，从而在确保高性能的同时，大幅提升了量产良率与长期可靠性。因此，该方案特别适用于对效率、功率密度、EMC及可靠性有严苛要求的新能源汽车、工业驱动等高端领域。

1.2.隔离电源拓扑结构

NSIP3266广泛应用于IGBT、Si MOS、SiC MOS等开关管的驱动供电场景。本设计采用15V转24V的隔离电源方案，24V输出通过LDO转换为正负电压，确保开关管的稳定导通与关断。

该设计方案中，变压器原边由NSIP3266驱动，副边采用无源半桥整流结构。这种拓扑能在相同输入输出条件下，有效减少副边线圈匝数，优化平面变压器的设计空间。



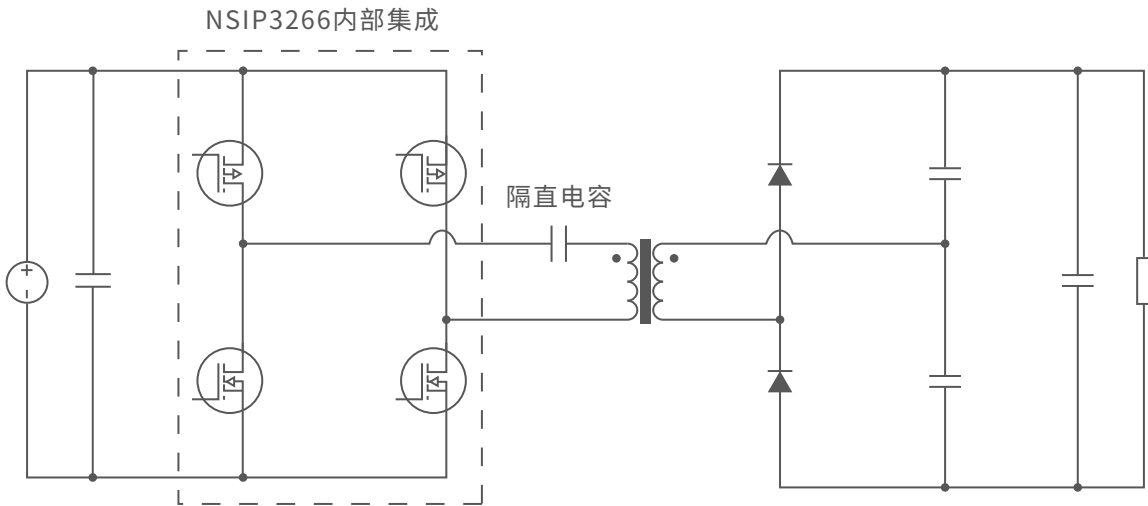


图1.2 实例拓扑结构

1.3.隔离电源设计参数

本设计的关键电气参数如下表所示，这些参数为后续的变压器设计提供了明确的目标和约束条件。

参数	符号	值	单位	备注
输入电压	$V_{in}$	15.0	V	标称值
输出电压	$V_{out}$	24.0.	V	标称值
输出功率	$P_{out}$	4.0	W	额定功率
开关频率	$f_k$	200	kHz	工作频率
开关周期	T	5	$\mu s$	开关周期
占空比	Duty	$\approx 49.8$	%	典型工作点
目标效率	$\eta$	$>80$	%	额定工况

表1.2 设计参数

# 基于NSIP3266的平面变压器设计

## 2.平面变压器磁芯选型与参数计算

### 2.1.平面变压器匝比近似计算

计算变压器匝比，首先需要确认满载时变压器原边电压 $V_p$ 与副边电压 $V_s$ ，以保证在满载条件下也能输出目标电压24V。变压器原边电压主要考虑NSIP3266内部MOS压降，上下管的总导通阻抗 $R_{ds(on)}$ 最大约1.8Ω。

计算额定工况下的平均输入电流 $I_{in}$ ，

$$I_{in} = \frac{\frac{P_{out}}{\eta}}{V_{out}} = 333\text{mA} \quad (1)$$

上下管总压 $V_{ds\_all}$ 降近似为

$$V_{ds\_all} = I_{in} \times R_{ds(on)} = 0.6\text{V} \quad (2)$$

输入电压15V，变压器原边电压近似为

$$V_p \approx V_{in} - V_{ds\_all} = 14.4\text{V} \quad (3)$$

变压器副边电压主要考虑副边整流管二极管压降，二极管选型要基于实际应用情况，如果更注重整体效率，需选择正向导通压降小的二极管，比如肖特基二极管MBRS140T3G；如果更注重负载调整率，要选择结电容较小二极管，以防止轻载下二极管结电容和漏感谐振导致输出电压较高，比如快恢复二极管S1A。此处以MBRS140T3G为例，二极管最大压降 $V_{PN}$ 为0.6V，变压器副边电压近似为

$$V_s \approx \frac{V_{out}}{2} + V_{PN} = 12.6\text{V} \quad (4)$$

因此，变压器原副边匝比 $n$ 近似为

$$n = \frac{V_p}{V_s} \approx 1.143 \quad (5)$$

# 基于NSIP3266的平面变压器设计

## 2.2.平面变压器磁芯选型方法

通常变压器磁芯选型使用AP法——面积乘积法，主要涉及到磁芯的两个参数，分别为磁芯有效截面积 $A_e$ 和窗口面积 $W_a$ 。如图2.1所示， $A_e = C \times E$  (mm<sup>2</sup>)， $W_a = D \times 2F$  (mm<sup>2</sup>)。

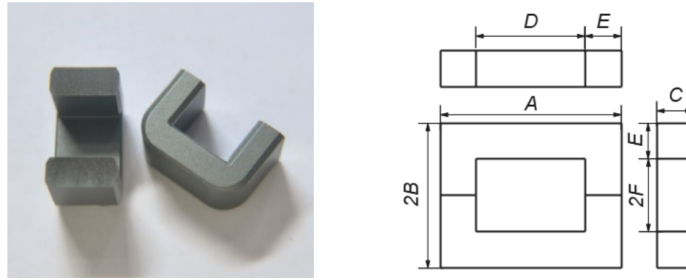


图2.1 U型磁芯示意图

变压器的功率处理能力和面积积 $Ap$ 的关系可以推导如下，以公制单位表示法拉第定律为

$$V = K_f f N A_e B_m \times 10^{-6} \quad (6)$$

式中， $K_f = 4.0$ ，对方波； $K_f = 4.44$ ，对正弦波； $N$ 为线圈匝数； $B_m$ 为磁芯最大磁密。

当变压器的绕组窗口面积被完全利用时

$$K_u W_a = N_p A_{wp} + N_s A_{ws} \quad (7)$$

式中， $K_u$ 为窗口利用率； $N_p$ 为变压器原边匝数； $A_{wp}$ 为原边绕线截面积； $N_s$ 为变压器副边匝数； $A_{ws}$ 为副边绕线截面积。导线截面积可表示为：

$$A_{wp} = \frac{I_p}{J} (\text{mm}^2), \quad A_{ws} = \frac{I_s}{J} (\text{mm}^2) \quad (8)$$

式中， $J$ 为导线电流密度； $I_p \approx I_{in}$ 为变压器原边电流有效值； $I_s$ 为变压器副边电流有效值，由于副边为半桥整流， $I_s \approx 2I_{out}$ 。将式(6)、(8)带入到式(7)中，

$$K_u W_a = \frac{V_p}{K_f f A_e B_m \times 10^{-6}} \times \frac{I_p}{J} + \frac{V_s}{K_f f A_e B_m \times 10^{-6}} \times \frac{I_s}{J} \approx \frac{P_{in} + P_{out}}{K_f f A_e B_m J} \times 10^6 \quad (9)$$

因此，可以得出：

$$A_p = A_e \times W_a = \frac{P_{in} + P_{out}}{K_u K_f f B_m J} \times 10^6 (\text{mm}^4) \quad (10)$$

# 基于NSIP3266的平面变压器设计

但在平面变压器中，线圈是绕在PCB中，磁芯窗口的垂直方向2F利用率很低，主要受PCB层数和板厚的限值，且磁芯垂直方向一般可灵活调整。因此，在平面变压器磁芯的选型中，窗口面积Wa主要关注横向长度D，其决定了能够画多少圈线圈。

针对平面变压器的特点，提出改进的AP法计算公式，重点关注磁芯横向宽度D这一关键参数，它直接决定了PCB布线的可行性。

$$K_d D = \max \left( \frac{N_p}{N_{lp}} W_p, \frac{N_s}{N_{ls}} W_s \right) \quad (11)$$

式中， $K_d$ 为横向长度利用率，通常为0.5左右； $W_p$ 和 $W_s$ 分别为原副边走线宽度，单位为mm； $N_{lp}$ 和 $N_{ls}$ 分别为原副边线圈布线层数。上式中取最大值，是因为在平面变压器中，原副边线圈一般为叠放，磁芯窗口的横向宽度要保证能够满足最大宽度的布线要求。

重新定义调整后的AP法，

$$A'_p = A_e \times D = \max \left( \frac{V_p W_p}{K_d K_f N_{lp} f B_m}, \frac{V_s W_s}{K_d K_f N_{ls} f B_m} \right) \times 10^6 (mm^3) \quad (12)$$

其中，原副边的线宽可通过如下公式计算，

$$I = K \Delta T^{0.44} (W_{cu} * H_{cu})^{0.75} \quad (13)$$

式中，K为修正系数，一般铜线在内层时取 0.024，在外层时取 0.048； $\Delta T$ 为允许的PCB温升； $W_{cu}$ 和 $H_{cu}$ 分别为走线宽度和厚度，单位为mil。

## 2.3.实例磁芯选型

该案例的平面变压器，PCB为六层板，中间四层走线，原副边各走两层，顶层和底层做绝缘，铺铜厚度为1oz，PCB允许温升为10°C，选择MnZn铁氧体，一般最大磁密 $B_m$ 设计为0.25T。

将原副边电流带入式(13)，为了有足够的裕量，电流取实际电流的2倍，可计算得

$$W'_p = 16mil, W'_s = 16mil \quad (14)$$

实际原副边线圈宽度取值分别为

$$W_p = 20mil = 0.508mm, W_s = 20mil = 0.508mm \quad (15)$$

将式(15)带入到式(12)中，可得

$$A'_p = \frac{14.33 \times 0.508}{0.5 \times 4 \times 2 \times 2 \times 10^5 \times 0.25} \times 10^6 (mm^3) = 36.576mm^3 \quad (16)$$

# 基于NSIP3266的平面变压器设计

基于上述计算，选择的U型磁芯参数如下，

	磁芯尺寸(单位: mm)					
	A	2B	C	D	E	2F
	9.3	8	4	4.3	2.5	3
磁芯参数						
磁路长度	有效截面积	磁芯体积	初始磁导率	饱和磁密	居里温度	
$l_e$	$A_e$	$V_e$	$\mu_r$	$B_s$	$T_c$	
22.454mm	10mm <sup>2</sup>	224.54mm <sup>3</sup>	3300	0.41T	>220°C	

表2.1 U型磁芯参数

## 2.4.平面变压器参数计算

根据式(6)可以确认变压器匝数，式中 $B_m = 0.25T$ ， $V = V_p \approx 14.4V$ ， $f = 200kHz$ ，计算得原边最小匝数，

$$N'_p = \frac{14.4}{4 \times 200 \times 10^3 \times 10 \times 0.25} \times 10^6 = 7.2 \quad (17)$$

原边匝数向上取整， $N_p = 8$ ，基于匝比计算副边匝数， $N_s = 7$ 。计算实际变压器磁芯磁通密度峰值，

$$B_{peak} = \frac{V_p}{K_f N_p f A_e} = 0.225T < 0.25T \quad (18)$$

基于选定的磁芯和磁芯粘合后的等效气隙 $l_g$ 可以近似计算出等效磁导率 $\mu_e$ 和每匝线圈的电感值 $AL$ ，一般磁芯粘合会选择掺有磁粉的胶水，并研磨，等效气隙 $l_g$ 较小，约为 $5\mu m$ ，

$$\mu_e \approx \frac{\mu_r}{1 + \mu_r \times \frac{2l_g}{l_e + 2l_g}} = 1336 \quad (19)$$

$$AL = \mu_e \mu_0 \frac{A_e}{l_e + 2l_g} = 0.748\mu H/N^2 \quad (20)$$

计算原副边电感值，

$$L_p = N_p^2 \times AL = 47.87\mu H \quad (21)$$

$$L_s = N_s^2 \times AL = 36.65\mu H \quad (22)$$



# 基于NSIP3266的平面变压器设计

励磁电流变化量  $\Delta I_m$  和峰值  $I_{mpeak}$  计算，

$$\Delta I_m = \frac{V_p \times T \times Duty}{L_p} = 0.75A \quad (23)$$

$$I_{mpeak} = \frac{\Delta I_m}{2} = 0.375A \quad (24)$$

原边阻抗近似计算，

$$R_p = \frac{K_{ac} \times l_w \times N_p}{W_p \times H_{cu}} \approx 0.344\Omega$$

$$R_s = \frac{K_{ac} \times l_w \times N_s}{W_s \times H_{cu}} \approx 0.301\Omega$$

式中， $K_{ac}$  为交流阻抗校正系数，取值1.5； $l_w$  为平均等效周长，近似为  $2(E+D+C+D)$ ，实际长度取决于布线方式。

## 3.平面变压器设计与仿真

### 3.1.PCB设计

基于上述磁芯选型与参数计算，平面变压器进行如下设计：PCB使用6层板，铜厚1oz，总厚度约1.6mm，中间四层走线，原边在4、5层，每层4匝线圈，线宽为20mil，铜厚1oz；副边在2、3层，2层4匝，3层3匝，线宽为20mil。层间线间距设计为8mil，原副边线圈距离磁芯大于0.6mm（需基于实际耐压需求设计，不同板材耐压值不同）。为了节约成本，不使用盲孔设计，原副边通孔到相对应线圈距离3mm以上（需基于实际耐压与爬电需求设计，不同板材耐压值不同）。实际绘制变压器的PCB如图3.1。

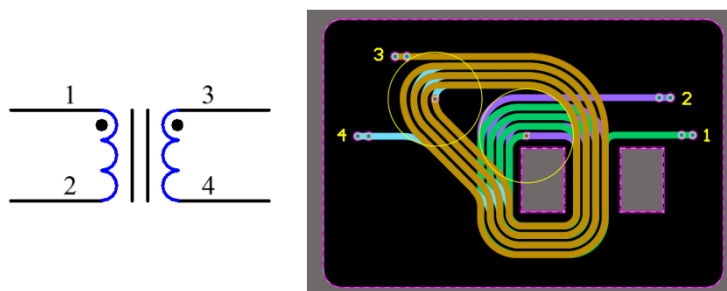


图3.1 平面变压器PCB设计图

# 基于NSIP3266的平面变压器设计

## 3.2.平面变压器仿真

根据平面变压器的PCB设计，在仿真软件中仿真变压器的电气参数，仿真模型如图3.2所示，其中棕色实体为磁芯，浅绿色透明体为FR4板材，材料参数基于实际选型确认，最终仿真参数见表3.1。

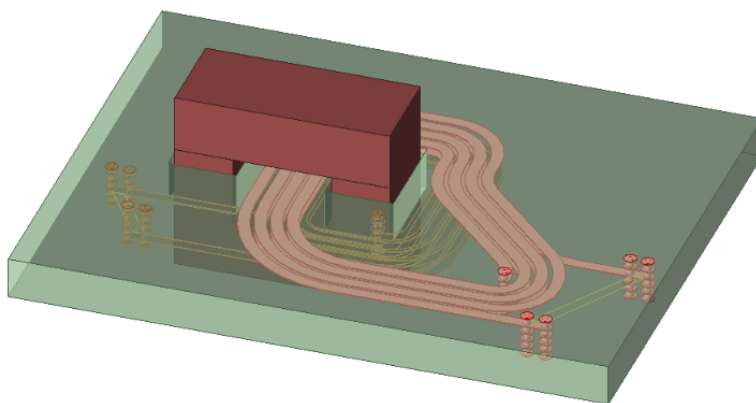


图3.2 平面变压器仿真模型

参数(200kHz)	原边电感	副边电感	原边漏感	原边阻抗	副边阻抗	匝比
符号	$L_p$	$L_s$	$L_{leak}$	$R_p$	$R_s$	$N_p:N_s$
仿真值	50.03 $\mu$ H	38.42 $\mu$ H	0.88 $\mu$ H	0.26 $\Omega$	0.29 $\Omega$	8:7
计算值	47.87 $\mu$ H	36.65 $\mu$ H	-	0.34 $\Omega$	0.30 $\Omega$	8:7
实际值	49.40 $\mu$ H	37.82 $\mu$ H	0.84 $\mu$ H	0.31 $\Omega$	0.36 $\Omega$	8:7

表3.1 平面变压器参数对比

## 4.Demo测试结果

### 4.1.负载调整率和效率测试

Demo的负载调整率和效率测试结果如图4.1，由于是开环设计，随着负载的增加，输出电压有所下降，输出功率从满载的10%增加到90%，输出电压下降约2V，负载调整率小于 $\pm 5\%$ ；满载效率81.4%，满足目标要求。

# 基于NSIP3266的平面变压器设计

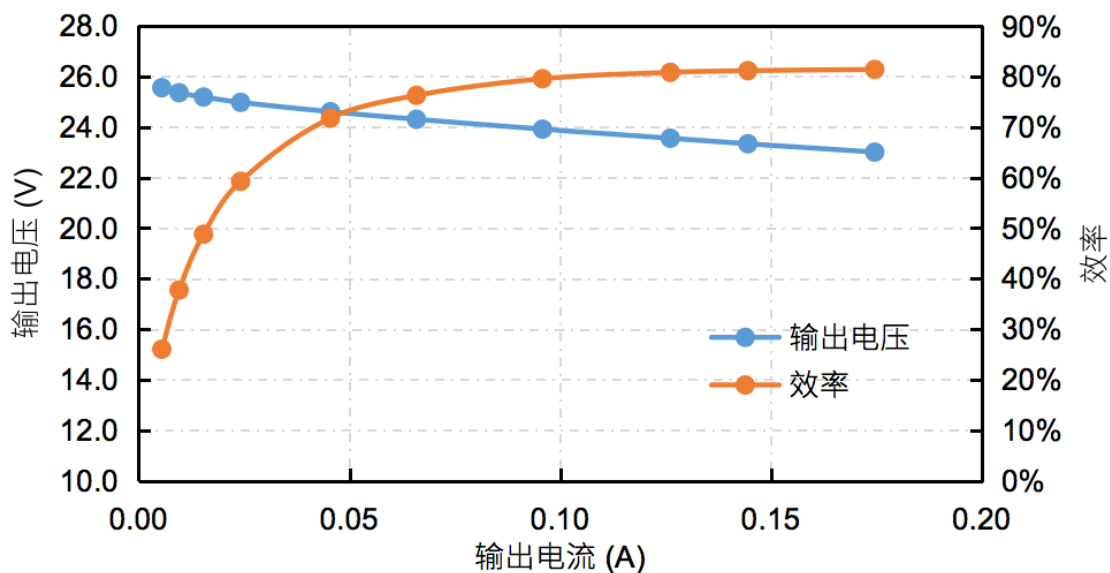


图4.1 负载调整率和效率测试结果

## 4.2.电性能测试

空载和满载的启机波形如图4.2所示，输入电容为两个 $10\mu\text{F}$ 和一个 $0.1\mu\text{F}$ 并联，输出电容为一个 $10\mu\text{F}$ 和一个 $0.1\mu\text{F}$ 并联。启机会有个软启动阶段，该阶段内电流最大值被限制在600mA左右，以防止启机有较大的电流冲击。



图4.2 启机波形测试结果

空载和满载的输入输出纹波如图4.3所示，输入端电压纹波都比较小，30mV左右；输出电压纹波在满载时相对较大，约87mV，在输出电压的0.5%以内。

# 基于NSIP3266的平面变压器设计

## 4.3.平面变压器的电压和电流波形测试

分别测试了空载和满载时的变压器电压和电流波形，如图4.4所示。空载时，变压器电流主要为励磁电流，励磁电流变化量约为575mA，未发生磁饱和现象；满载时，未观察到有磁偏现象，电压和电流波形都很对称。



图4.3 输入输出纹波测试波形



图4.4 空载和满载时的变压器电流波形



## 基于NSIP3266的平面变压器设计

### 4.4.平面变压器温升测试

常温25℃下，满载运行30min，测量变压器温度，如图4.5所示，其中平面变压器温度最高，温度升高约30℃，NSIP3266的温升低于平面变压器。



图4.5 平面变压器温度测试

## 5.总结

本文仅提供一种平面变压器的磁芯选型方式和参数近似计算方法，及供参考，实际应用中要基于实际情况进行调整与多次迭代，最终确认磁芯选型和变压器设计，主要考虑一下方向：

- 1.平面变压器的绝缘设计必须优先考虑安规要求，原副边线圈间距、过孔间距以及线圈与磁芯间距都需要基于实际采用的PCB板材耐压等级进行精确计算。
- 2.磁芯窗口横向长度D的实际利用率Kd存在较大波动范围，设计时需要预留充足的安全裕度。此外，还需综合考虑层间介质厚度、阻焊层厚度等三维绝缘因素，确保在任何工作条件下都能满足绝缘耐压要求；
- 3.励磁电流的设计需要根据应用功率等级采取差异化策略。在大功率应用中，励磁电流应严格控制在额定电流的20%以内，以保证系统工作效率。而对于小功率电源如本文的4W案例，重点在于防止磁芯饱和，对励磁电流的限制可以适当放宽；
- 4.高频工作时的集肤效应和邻近效应需要特别关注，通过合理选择线宽和厚度来降低高频涡流损耗。设计过程应该是一个参数迭代优化的过程，通过仿真-实测-调整的循环逐步完善变压器参数。

# 基于NSIP3266的平面变压器设计

## 6.修订历史

版本	描述	作者	日期
1.0	创建应用笔记	Zhiyong.Chen	2025/12/2

销售联系方式: [sales@novosns.com](mailto:sales@novosns.com); 获取更多信息: [www.novosns.com](http://www.novosns.com)

## 重要声明

本文件中提供的信息不作为任何明示或暗示的担保或授权,包括但不限于对信息准确性、完整性,产品适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的陈述或保证。

客户应对其使用纳芯微的产品和应用自行负责,并确保应用的安全性。客户认可并同意:尽管任何应用的相关信息或支持仍可能由纳芯微提供,但将在产品及其产品应用中遵守纳芯微产品相关的所有法律、法规和相关要求。

本文件中提供的资源仅供经过技术培训的开发人员使用。纳芯微保留对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其他更改的权利。纳芯微仅授权客户将此资源用于开发所设计的整合了纳芯微产品的相关应用,不视为纳芯微以明示或暗示的方式授予任何知识产权许可。严禁为任何其他用途使用此资源,或对此资源进行未经授权的复制或展示。如因使用此资源而产生任何索赔、损害、成本、损失和债务等,纳芯微对此不承担任何责任。

有关应用、产品、技术的进一步信息,请与纳芯微电子联系([www.novosns.com](http://www.novosns.com))。

苏州纳芯微电子股份有限公司版权所有