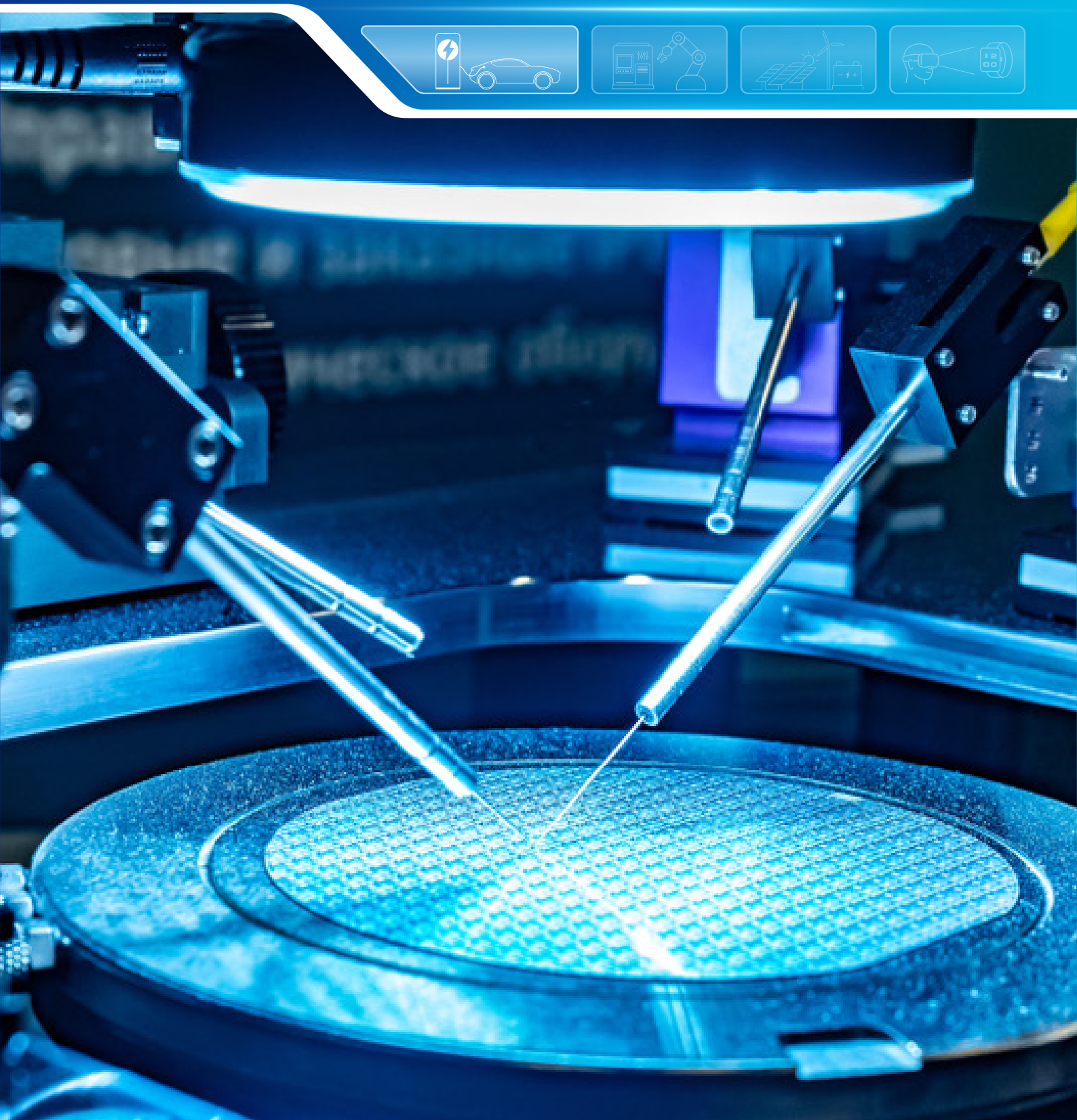


功率运算放大器NSOPA240X 应用于旋转变压器驱动电路

AN-11-0002

作者: Xiaoqing Yi



功率运算放大器NSOPA240X 应用于旋转变压器驱动电路

摘 要

旋转变压器由于其高可靠性，高精度的特性，广泛用于电机控制速度和位置的检测。包括混合动力电动汽车 (HEV) 牵引逆变器，电动汽车 (EV)，电动动力转向，电机驱动和伺服机构在汽车和工业应用。

本应用笔记介绍了纳芯微为旋转变压器驱动所设计的功率放大器 NSOPA2401/2 的特性和典型设计要点。NSOPA2401/2 将单 / 双通道的功率放大器、过温关断，限流保护功能集成在单芯片上，降低了设计复杂性和系统成本，提高了可靠性和性能。

目 录

1. 旋转变压器和驱动运放简介	2
1.1. 输出电流	3
1.2. 摆率	3
1.3. 热关断	3
1.4. 限流保护	4
2. 功率计算	5
2.1. 前半周期功耗计算 ($T=0$ 到 π)	7
2.2. 后半周期功耗计算 ($T=\pi$ 到 2π)	7
2.3. 计算实例	8
3. 散热处理	9
3.1. 选择合适的供电电源	9
3.2. 减小热阻	9
4. 修订历史	11

功率运算放大器NSOPA240X

应用于旋转变压器驱动电路

1. 旋转变压器和驱动运放简介

旋转变压器可用来精确测量角度位置和转速,可部署在工业电机控制、伺服器、机器人、电动和混动汽车中的动力系统单元中。旋转变压器在这些应用中可以长期耐受严苛条件,是恶劣环境下的完美选择。

旋转变压器有三个绕组,包括有一个初级绕组、两个正交的两个次级绕组三组线圈,对外共有 6 条引线。激励线圈接受输入的正弦型激励电流。正交的两个感应线圈,依据旋变的转子、定子的相互位置关系,调制出具有 $\sin$ 正弦和 $\cos$ 余弦包络的检测信号。如果激励信号是 $\sin\omega t$, 转子与定子间的角度为 θ , 则正弦信号为 $\sin\omega t \times \sin\theta$, 而余弦信号则为 $\sin\omega t \times \cos\theta$ 。根据 $\sin$ 、 $\cos$ 信号和原始的激励信号,通过必要的检测和比较电路即可高分辨率地检测出转子位置。

电气参数	常见范围	单位	说明
输入电压	3~7	vRMS	施加在旋变器初级绕组的激励信号幅度
激励频率	1000~20000	Hz	施加在旋变器初级绕组的激励信号频率
转换比例	0.2-1.0	V/V	初级绕组和次级绕组之间的比率
输入阻抗	100~500	Ω	在典型激励频率下的复数阻抗
相移	± 25	°	施加在初级绕组上的激励信号和次级绕组上的正弦/余弦信号之间的相移
极点对	1~3	NA	每次机械旋转的电气旋转数

表 1.1 旋转变压器关键参数

根据旋转变压器的特性,驱动运放需要有以下特性:

- 旋转变压器的励磁原边线圈通常是有很低的 DCR (直流电阻), 通常小于 100Ω , 因此需要有较强的电流输出能力才可以驱动线圈, 最高至 200mA。
- 为了保证的精度以及线性度, 在旋转变压器的应用中需要具备较高的 SR (压摆率 Slew Rate)。
- 旋转变压器的常见激励方式为差分推挽输出, 对放大器要求较宽的带宽以及较高的开环增益, 以确保信号不失真。
- 汽车应用 EMI 环境复杂, 为了保证励磁功率放大电路不被干扰, 放大电路需要具备一定的 EMI 抑制能力。
- 作为高功率驱动级, 需要具备限流和过温关断功能, 保证系统的可靠性和鲁棒性。
- 传统的解决方案是利用通用运放和分立三极管搭建高输出电流, 电路复杂可靠性低, 且并且难以集成热关断和限流保护等功能。NSOPA240X 运算放大器具有高电流输出能力, 最大可支持 400mA 的持续电流输出。并集成了过温关断, 限流保护等安全功能, 满足各类旋转变压器驱动的需求。

供电电压范围	4.5V~36V
通道数	1通道 (NSOPA2401) 或 2通道 (NSOPA2402)
封装形式 (PACKAGE)	TO252 (NSOPA2401) 或 HTSSOP14 (NSOPA2402)
摆率 (SLEW RATE)	7V/ μ s
增益带宽积 (GBW)	6.5 MHz
过温关断/恢复	175°C/155°C
限流保护	± 400 mA

表 1.2 纳芯微用于旋变驱动的运放 NSOPA240X 关键参数 & 特性

功率运算放大器NSOPA240X

应用于旋转变压器驱动电路

1.1. 输出电流

输出电流能力和输出摆幅是功率放大器最重要的指标之一，负载电流与输出摆幅之间的关系直接决定在驱动运放上的耗散功率，NSOPA240x 设计为最高 400mA 持续输出电流能力，完全满足各类旋转变压器驱动要求。

1.2. 摆率

保证旋转变压器无失真的被驱动的另一关键点是需要有足够的压摆率，对于正弦信号不失真的最低要求如以下公式所示：

$$SR = 2\pi \times V_p \times f_{EXC}$$

以 7Vrms, 10KHz 的激励信号为例，保证不失真所需的最低压摆率为：

$$SR = 2\pi \times V_p \times f_{EXC} = 2\pi \times 7V \times \frac{\sqrt{2}}{2} \times 10KHz = 0.31 V/\mu s$$

下图显示的是不同频率与不同幅值的激励信号与所需的最小压摆率的关系。NSOPA240x 上升压摆率为 6.5 V/μs, 下降压摆率为 7V/μs, 完全满足旋转变压器驱动的应用。

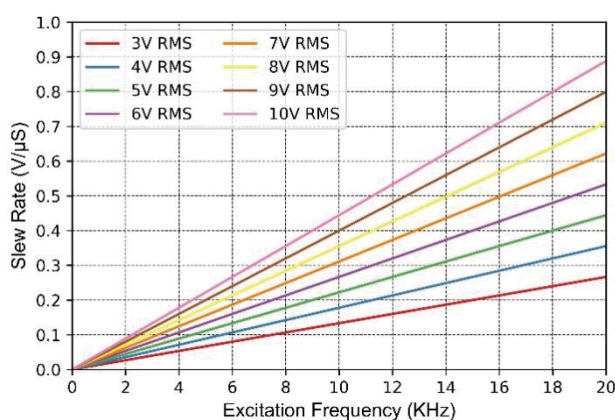


图 1.1 旋转变压器驱动运放所需最小摆率与驱动信号频率幅值关系

1.3. 热关断

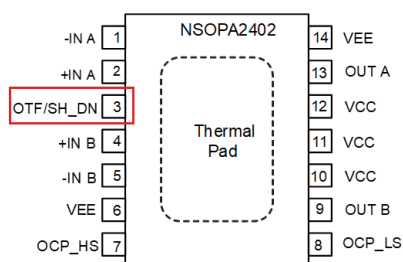


图 2 NSOPA2402 热关断指示引脚

功率运算放大器NSOPA240X 应用于旋转变压器驱动电路



图 1.2 NSOPA2402 热关断与迟滞阈值范围

如果芯片结温超过 175°C 的关断阈值，输出将被禁用，此时输出端为高阻态。同时，OTF/SH_DN 引脚被拉低，指示热关断事件发生。一旦结温回落到 155°C，输出将自动重新使能，TFLAG 引脚同时也被释放。OTF/SH_DN 是开漏的，因此需要一个电阻上拉至 VEE+5V 的电源域上，同时，也可以通过外部拉低该引脚禁能运放输出，需要特别注意的是，OTF/SH_DN 引脚与 VEE 之间的正常应用情况下不得超过 0~5V，绝对电气参数为 -0.3V~7V，超过该限制将可能导致永久性损坏。

当在高温环境下使用时，应该尤其注意芯片本身的功率耗散，如果在长时间初在高结温和高输出功率下工作无论芯片是否进入热关断，可能加速老化降低使用寿命。为了避免损坏芯片，不应长期超过最大结温 150°C

1.4. 限流保护

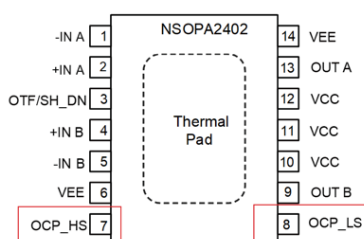


图 1.3 NSOPA2402 过流指示引脚

芯片中的每个运放都有单独的内部限流 PMOS(高侧)和 NMOS(低侧)输出晶体管。如果输出短接到地，则 PMOS(高侧)限流保护功能使能，限流名义值为 400mA。如果输出短到电源，则 NMOS(低侧)限流保护功能使能，限流名义值为 -400mA。NSOPA240X 会显示输出电流并且提供过流指示。因为过流可能发现上管或者下管，所以提供了两个引脚来分别指示这两种情况。当上管过流时，OCP_HS 将下拉成低电平。当下管过流时，OCP_LS 将下拉成低电平。类似 OTF/SH_DN，两个 OCP 指示引脚都是开漏的，使用时需要通过电阻上拉到 VEE+5V 的电源域上。

功率运算放大器NSOPA240X

应用于旋转变压器驱动电路

2. 功率计算

在系统应用中需要做热评估以估计结点温度的近似值，确保不超过绝对最大值。

用户需要先对运放的功率进行计算。正常工作的时候，运算放大器的功率主要有两部分，自身静态功耗以及对外的输出功率。前者的计算比较简单，这里仅对后者做进一步的说明。

SIZE	08	10	15		21		
型号 Model No.	TS2605N1E64	TS2610N171E64	TS2620N21E11	TS2620N271E14	TS2640N321E64	TS2640N691E125	
类型 Type	BRX	←	←	←	←	←	
初级 Primary	R1-R2	←	←	←	←	←	
输入电压/频率 Input Voltage/Frequency	AC7Vrms 10kHz	AC7Vrms 10kHz	AC7Vrms 10kHz	AC10Vrms 4.5kHz	AC7Vrms 10kHz	AC5Vrms 4kHz	
转换率 Transformation Ratio	0.5±5%	0.5±5%	0.5±5%	0.5±10%	0.5±5%	0.5±10%	
电气误差 Electrical Error	±10° Max.	±10° Max.	±10° Max.	±10° Max.	±10° Max.	±8° Max.	
无效电压 Residual Voltage	20mVrms Max.	←	←	←	←	—	
相位差 Phase Shift	+10° Nom.	+5° Nom.	0° REF	+8° Nom.	+1° Nom.	+0 ~ +10°	
电阻 Impedance	ZRo	140Ω ±20%	160Ω Nom.	70+j100Ω Nom.	90+j180Ω Nom.	100+j140Ω ±15%	290Ω Nom.
	ZSo	—	160Ω Nom.	180+j300Ω Nom.	220+j350Ω Nom.	140+j270Ω ±15%	—
	ZSS	120Ω ±20%	130Ω Nom.	175+j275Ω Nom.	210+j300Ω Nom.	120+j240Ω ±15%	420Ω Nom.

图 2.1 旋转变压器参数实例

图摘自某旋转变压器成品供应商提供的公开资料。如不另加说明，本章节计算说明都采用 10kHz，7Vrms 的正弦波作为激励信号。

旋转变压器本质上也是一种变压器，在电路上可以简化成电阻与电感的模型。

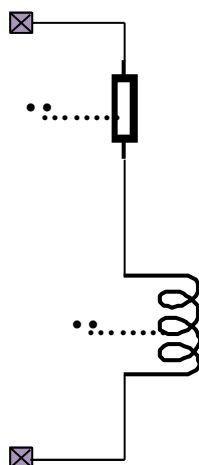


图 2.2 旋转变压器等效电路

功率运算放大器NSOPA240X 应用于旋转变压器驱动电路

以 TS2640N321E64 为例，对应旋转变压器的输入阻抗为 $100+j140\Omega$ ，在 10kHz 的频率下，等效 100Ω 的电阻与 2.23mH 的电感串联。

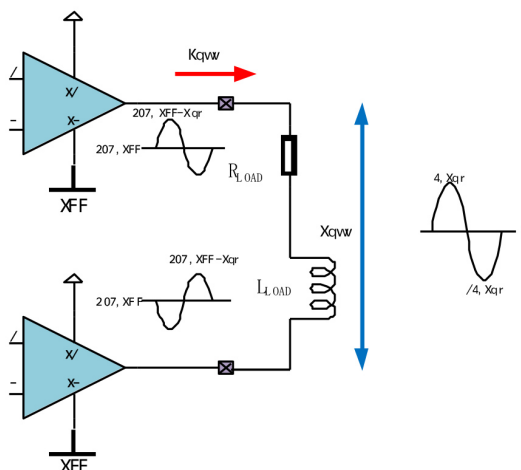


图 2.3 双运放差分驱动旋转变压器

上图显示如何利用双运放差分驱动旋转变压器，并以此为示例介绍如何计算每个运算放大器的耗散功率。假设每个运算放大器的直流输出都被偏置到电源的中点，且使用的变量定义如下。

Vop: 输出的信号峰值减去偏置直流电压值；

Rload: 旋转变压器的等效电阻值

Lload: 旋转变压器的等效电感值

ϕ : 旋转变压器等效复阻抗的相角，从下图可以看出，电流波形是滞后于电压波形的，所以可以从等效阻抗来计算出此时的相角值。

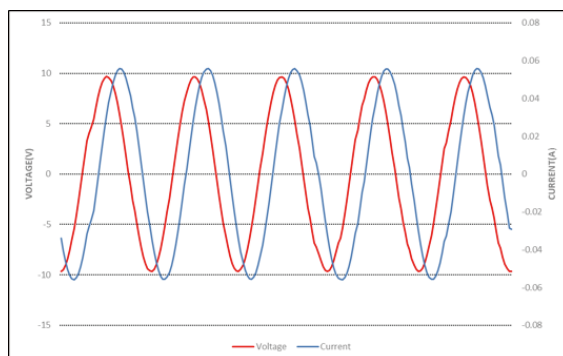


图 2.4 旋转变压器实际电流电压波形

差分驱动的两个运算放大器在一个工作周期内的耗散功率是相同的，所以下面的计算只以其中一个为例。

功率运算放大器NSOPA240X 应用于旋转变压器驱动电路

2.1. 前半周期功耗计算 (t=0 到 π)

下图展示了前半周期的输出情况。芯片的耗散功率主要有静态电流和输出电流决定。

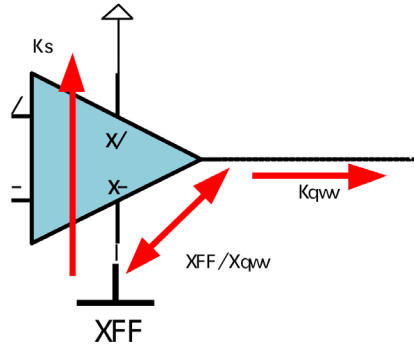


图 2.5 前半周期的输出电压电流示意

$$\begin{aligned}
 P_{LOSS1} &= (V_{DD} - 0.5V_{DD} - V_{OP} \cos \theta) I_{OP} \cos(\theta - \varphi) + V_{DD} \times I_q \\
 &= (0.5V_{DD} - V_{OP} \cos \theta) I_{OP} \cos(\theta + \varphi) + V_{DD} \times I_q
 \end{aligned}$$

输出电流在前半个周期 (0 到 π) 的耗散功率计算如下

$$\begin{aligned}
 P_{LOSS1} &= \int_0^\pi (0.5V_{DD} - V_{OP} \cos \theta) I_{OP} \cos(\theta + \varphi) + d\theta + V_{DD} \times I_q \\
 &= V_{DD} \times I_q + \frac{V_{DD} I_{OP} \sin \varphi}{\pi} - \frac{V_{OP} I_{OP} \cos \varphi}{2}
 \end{aligned}$$

2.2. 后半周期功耗计算 (t= π 到 2π)

下图展示了运算放大器在工作周期的后半周的输出情况。

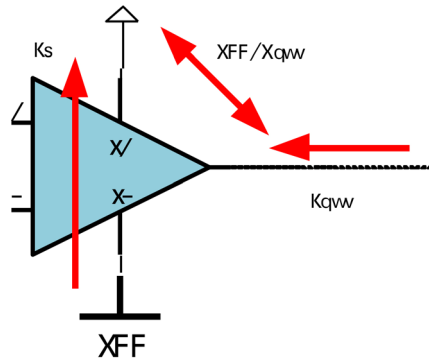


图 2.6 后半周期的输出电压电流示意

$$\begin{aligned}
 P_{LOSS2} &= (0.5V_{DD} + V_{OP} \cos \theta - 0) I_{OP} \cos(\theta - \varphi) + V_{DD} \times I_q \\
 &= (0.5V_{DD} + \cos \theta) I_{OP} \cos(\theta - \varphi) + V_{DD} \times I_q
 \end{aligned}$$

功率运算放大器NSOPA240X 应用于旋转变压器驱动电路

输出电流在后半个周期(0 到 π)的耗散功率计算如下

$$\begin{aligned}
 P_{LOSS2} &= \int_{\pi}^{2\pi} (0.5V_{DD} + V_{OP} \cos \theta - 0) I_{OP} \cos(\theta - \varphi) d\theta + V_{DD} \times I_q \\
 &= V_{DD} \times I_q + \frac{V_{DD} I_{OP} \sin \varphi}{\pi} - \frac{V_{OP} I_{OP} \cos \varphi}{2}
 \end{aligned}$$

2.3. 计算实例

给定条件：

$V_{op}=5V$

$R_{load} = 100\Omega$

$L_{load} = 2.23mH$

$\phi = 55^\circ$

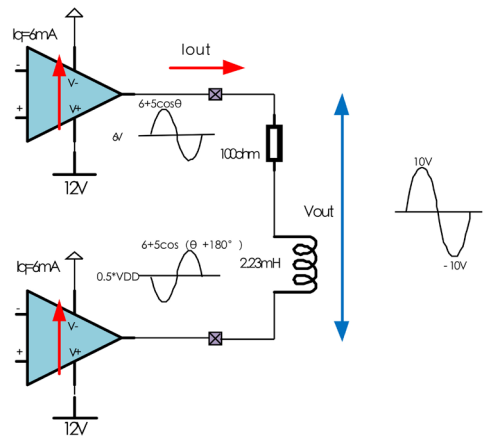


图 2.7 双运放差分驱动旋转变压器计算实例

整个周期的功耗为：

$$\begin{aligned}
 P_{LOSS1} &= 12 \times 0.006 + \frac{12 \times 0.057 \times \sin 55^\circ}{3.14} - \frac{5 \times 0.057 \times \cos 55^\circ}{2} \\
 &= 0.169W \\
 P_{LOSS2} &= 12 \times 0.006 + \frac{12 \times 0.057 \times \sin 55^\circ}{3.14} - \frac{5 \times 0.057 \times \cos 55^\circ}{2} \\
 &= 0.169W \\
 P_{LOSS} &= \frac{P_{LOSS1} + P_{LOSS2}}{2} = 0.169W
 \end{aligned}$$

TO252 封装的热阻约为 $40^\circ C/W$, 按照上面计算结果代入。

$$T_{rise} = P_{LOSS} R_{\theta JA} = 0.169 \times 40 = 7.84^\circ C$$

温升为 $7.84^\circ C$ 。

功率运算放大器NSOPA240X 应用于旋转变压器驱动电路

3. 散热处理

旋转变压器原边阻抗低，驱动电压高，因此需要谨慎考虑驱动运放的耗散功率，保证系统处在安全工作温度之下，驱动运放的结温可由以下公式给出：

$$T_J = T_A + \theta_{JA} \times P_D$$

其中， T_J 为结温 (°C)， T_A 为环境温度 (°C)， P_D 为耗散功率 (W)， θ_{JA} 为结点到周围环境之间的热阻 (W/°C)。可以从上式得出增强散热的方法有两种，减小功率耗散，以及减小热阻。

3.1. 选择合适的供电电源

NSOPA240x 供电电压最高高至 36V，在确保所需的输出电压摆幅前提下，通过使用尽可能低的电源电压，可以最大限度地减少耗散。NSOPA240x 输出摆幅与输出电流的关系如下图所示，在全温度范围下输出 200mA 的时候，压降不超过 0.5V，对于典型的驱动电压 10Vpp 的情况，可以考虑 12V 甚至更低的供电电压，将功率耗散降至最低。

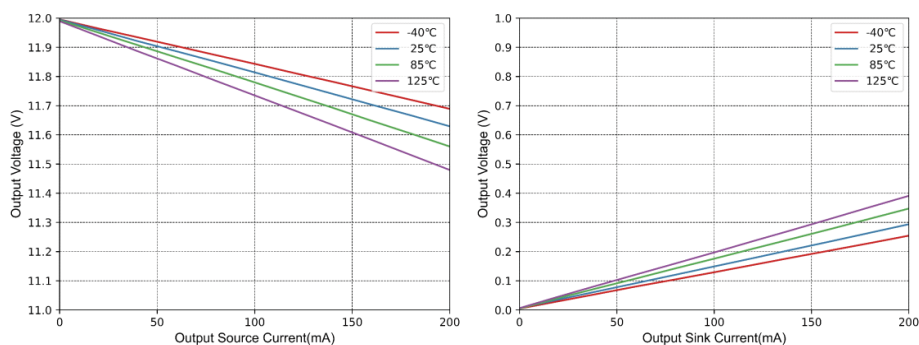


图 3.1 NSOPA240x 输出电压摆幅 vs 输出电流

3.2. 减小热阻

NSOPA240x 供电电压最高高至 36V，在确保所需的输出电压摆幅前提下，通过使用尽可能低的电源电压，可以最大限度地减少耗散。NSOPA240x 输出摆幅与输出电流的关系如下图所示，在全温度范围下输出 200mA 的时候，压降不超过 0.5V，对于典型的驱动电压 10Vpp 的情况，可以考虑 12V 甚至更低的供电电压，将功率耗散降至最低。

功率运算放大器NSOPA240X 应用于旋转变压器驱动电路

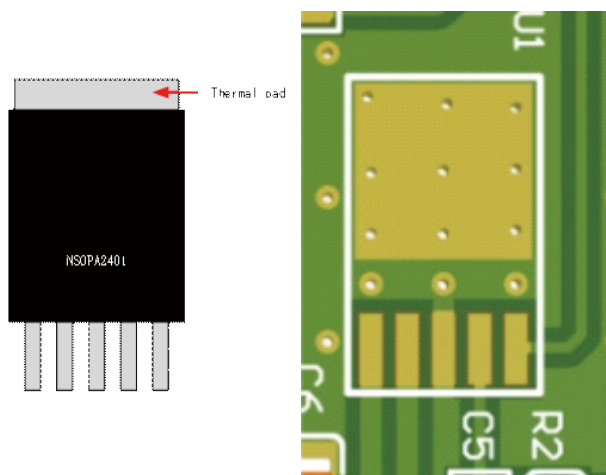


图 3.2 NSOPA2401 TO252 封装散热焊盘及 Layout 示意图

解决 PCB 散热的关键，是增加散热面积，这也是为什么需要保持 thermal pad 与 V- 之间“良好”连接的原因。原理上，芯片的散热面积越大，散热效果越好。但是有时候 PCB 的面积被结构、成本等因素限制无法增加。因此建议 NSOPA240X 的驱动板使用 4 层板的叠层结构，按照 signal-GND-POWER-signal 的分配。第二层作为一个完整的散热平面，通过热过孔，与芯片的 thermal pad 相连，以增加散热面积，加强散热效果。顶层是与芯片直接相连的一层，对降低系统的热阻有重要作用，建议采用 2oz 铜厚，加强散热。



图 3.3 NSOPA2401 TO252 封装 建议 PCB 层叠结构

除此之外，尽可能增加热过孔，可以有效降低系统的热阻。如上图所示，采用过孔阵列连接，保证 thermal pad 与第二层的充分连接，也可以起到减低热阻的效果。

功率运算放大器NSOPA240X 应用于旋转变压器驱动电路

4. 修订历史

版本	描述	作者	日期
1.0	创建应用笔记	Xiaoqing Yi	2023/4/10

销售联系方式: sales@novosns.com; 获取更多信息: 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,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)。

苏州纳芯微电子股份有限公司版权所有