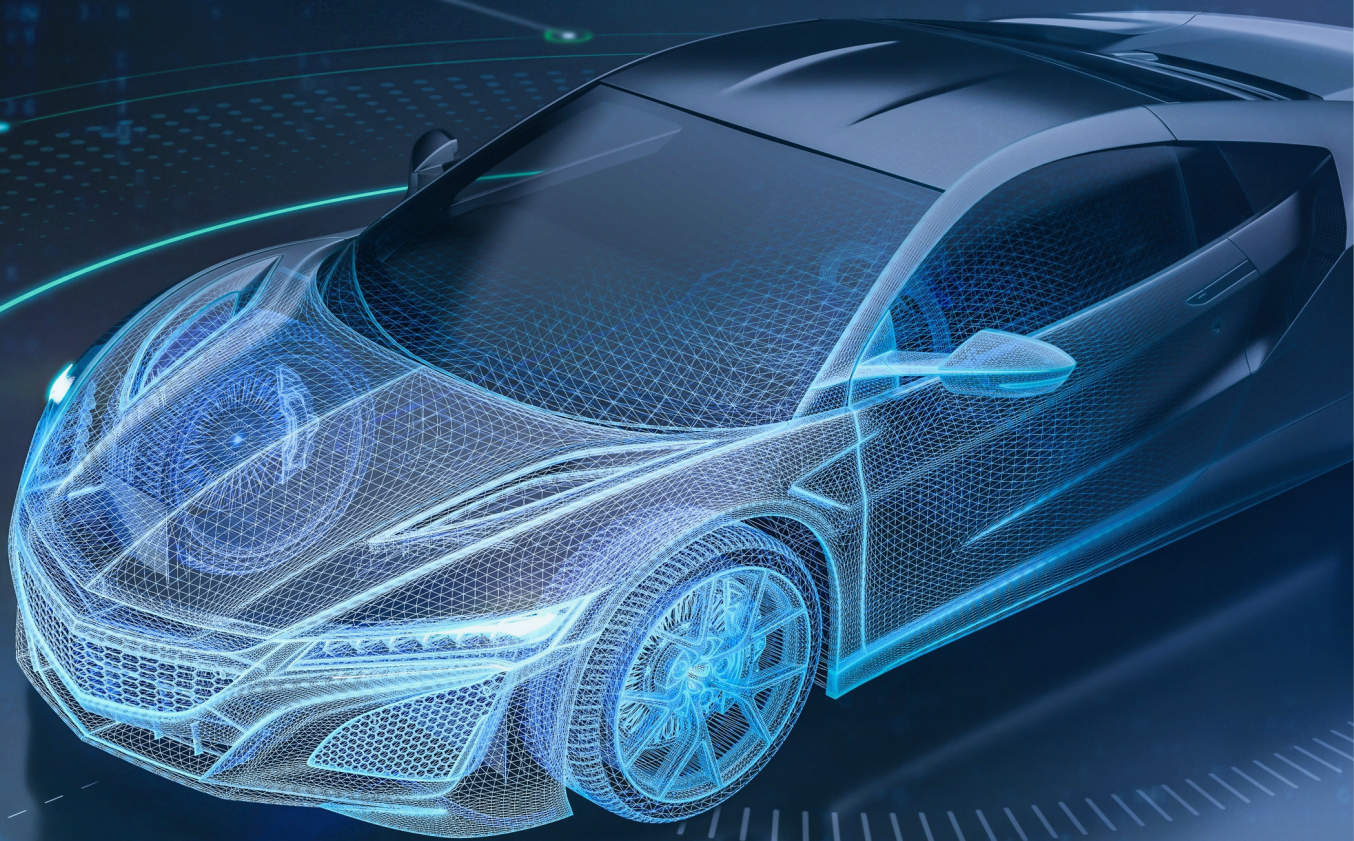


NSD1x4xx系列低边驱动应用说明

AN-15-0018

作者：Minjie Chen, Jie Liang



摘 要

本文档针对纳芯微电子NSD1x4xx系列单/双通道低边驱动芯片，系统阐述了其在汽车电子应用中的关键技术特性与设计方法。重点分析芯片在白炽灯（容性）负载时的过流和过热保护机制；详细介绍芯片带载能力的评估方法；同时，深入探讨感性负载（如继电器、电磁阀等）关断过程中的钳位能量（EAS）问题，提供其理论计算模型与实际测量方案，以验证芯片在感性负载关断工况下的可靠性。本文档旨在为客户构建高性能、高可靠性的低边驱动系统提供全面的技术指导。

目 录

1. NSD1x4xx系列产品一览表 ----- 2

2. NSD1x4xx系列产品的过流与过热保护机制 ----- 2

 2.1. 白炽灯冷启动原理 ----- 2

 2.2. 芯片的Current Limitation机制 ----- 3

 2.3. 芯片的热关断与Thermal swing机制 ----- 3

3. 芯片带载能力计算方法 ----- 4

 3.1. 先计算功耗 ----- 4

 3.2. 再计算温升 ----- 5

 3.3. 规格书中其他热阻参数的意义 ----- 5

4. Truth table详解 ----- 6

 4.1. SOP8 封装单通道芯片对应的Truth table ----- 6

 4.2. SOP8封装双通道/SOT223封装单通道芯片对应的Truth table ----- 7

5. 钳位能量EAs ----- 7

 5.1. 感性负载对低边开关驱动芯片的挑战 ----- 7

 5.2. 钳位能量的计算方法 ----- 8

 5.3. 钳位能量的测量方法 ----- 9

6. 修订历史 ----- 11

NSD1x4xx系列低边驱动应用说明

1.NSD1x4xx系列产品一览表

($V_{DD} = V_{IN} = 4.5\text{ V to } 5.5\text{ V}$, $T_J = -40^\circ\text{C to } 150^\circ\text{C}$. Unless otherwise noted)

Part number	Rdson (mOhm)	I _{lim} (A)	Channels	package	I _{lim} (A)	3.3V MCU 兼容	5V MCU兼容	DC 带载能力(A) ¹⁾	
								Ta=85°C	Ta=105°C
NSD12409-Q1SPR	90	8	2	SOP8	否	是	1.44	2	1.07
NSD11416-Q1SPR	160	2.5	1	SOP8	是	是	1.35	1	1.01
NSD11416-Q1STBR	160	2.5	1	SOT223	否	是	1.52	1	1.13
NSD12416-Q1SPR	160	2.5	2	SOP8	否	是	1.06	2	0.79
NSD12416A-Q1SPR	160	2.5	2	SOP8	否	是	1.08	2	0.8
NSD11430-Q1SPR	300	4.2	1	SOP8	是	是	0.95	1	0.71
NSD11430-Q1STBR	300	4.2	1	SOT223	是	是	1.05	1	0.79
NSD12430-Q1SPR	300	4.2	2	SOP8	是	是	0.76	2	0.57
NSD12430A-Q1SPR	300	4.2	2	SOP8	是	是	0.76	2	0.57

*后续会开发能够支持3.3V MCU的Rdson=160mOhm/50mOhm/30mOhm 的低边驱动。

1) DC带载能力的计算方法在本应用文档的第三章

2.NSD1x4xx系列产品的过流与过热保护机制

2.1.白炽灯冷启动原理

白炽灯 (Bulb) 是一种阻性负载, 在冷启动时, 由于钨丝未达热平衡态呈现低阻特性, 会产生巨大的浪涌电流, 初始的浪涌电流峰值可达稳态工作电流的20倍 (该参数受环境温度与供电电压影响呈现显著变化), 这对驱动芯片的过载能力是巨大的考验。随着灯丝温度达到热平衡后, 金属导体的正温度系数特性将促使负载阻抗非线性增大, 最终使工作电流衰减至额定稳态值。NSD1x4xx系列产品的current limitation功能, 能使Bulb负载正常工作。

NSD1x4xx系列低边驱动应用说明

2.2. 芯片的Current Limitation机制

在芯片驱动Bulb或容性负载的应用场景中，通道开启瞬间会产生浪涌电流（Current Inrush）现象（如图1所示）。当芯片为过流保护（OCP，Over Current Protection）机制时，该瞬态电流尖峰将达到电流保护阈值，导致芯片输出通道进入关断状态，负载无法正常启动。所以NSD1x4xx系列芯片采用了电流限制（Current Limitation）机制（如图2所示），bulb inrush 的时候，current 会被limit 到设定的电流值，不会立刻将通道关断，这样能保证负载正常启动。

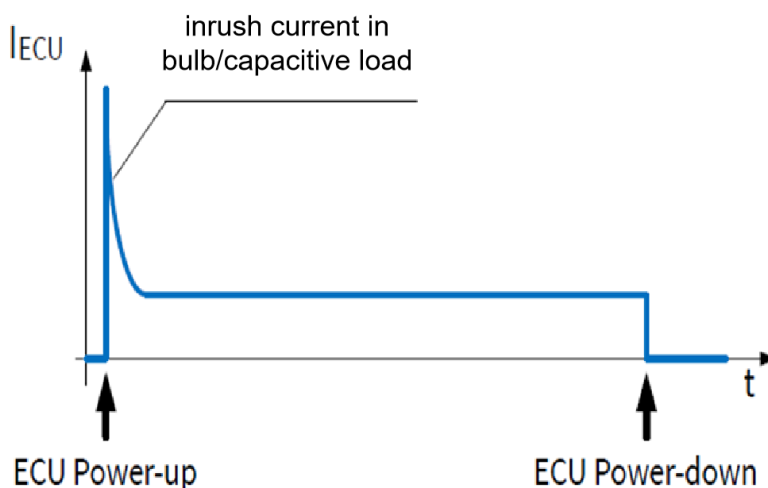


图1 Bulbs/capacitive inrush

2.3. 芯片的热关断与Thermal swing机制

如图2所示，当负载发生短路或者驱动Bulb的时候，过高的功耗会让芯片内部的die迅速而不均匀的膨胀。当器件冷却后，die不会完全恢复到原来的尺寸，导致die 受到非弹性热机械应力。

因此NSD1x4xx系列芯片定义了热梯度(Dynamic temperature, ΔT_J)参数， $\Delta T_J=40^{\circ}\text{C}$

在die的内部有两个热传感器，传感器1在放在die最热的地方（功率管部分），传感器2放在die最冷的地方（控制部分），当负载发生短路或者驱动Bulb的时候，这两个传感器之间会出现较大的热梯度，传感器1的温度上升速度将比传感器2快得多。当两个传感器之间的温度差超过 ΔT_J 时，功率管部分将关断（注意：发生thermal swing的时候status pin不会拉低），直到die上的温度均匀地分布，电源部分会再次打开。在die温度没有达到关断温度(Shutdown Temperature, TSD)之前会不断地重复这个过程，该过程就是芯片的thermal swing机制，可以保护die 免受非弹性热机械应力。

NSD1x4xx系列低边驱动应用说明

当传感器1的温度超过热关闭阈值TSD 的时候, 芯片将会热关断, 其对应的电源部分关断, 并且status pin 拉低。发生故障之后电源部分会一直保持关断状态。当芯片结温降至复位值(Reset Temperature, T_R)以下, 电源部分会重新打开。如果此时芯片不再短路, 回到正常工作模式下, die的温度同时也降低到 T_{RS} (Thermal Reset of Status, T_{RS})以下, status pin 会恢复为高电平。

T_R 和 T_{RS} 的区别就在于 T_{RS} 的温度更低, 当芯片温度低于 T_{RS} 后, status pin才会恢复为高电平。

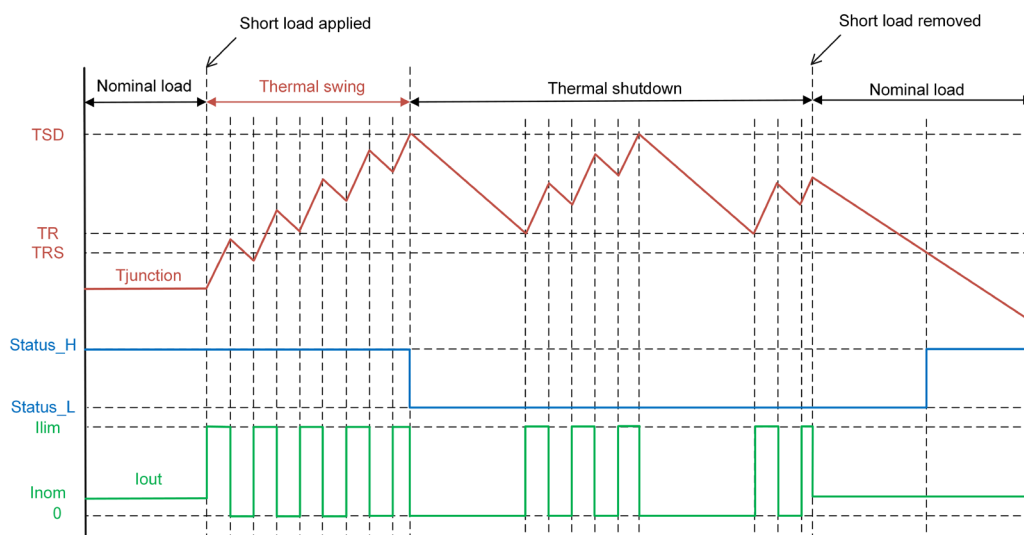


图2 Power limitation in short load(Bulbs inrush mode)

3.芯片带载能力计算方法

3.1.先计算功耗

芯片的功耗主要由下面三个方面组成:

$P_{conduction}$: 导通功耗, 也是最主要的功耗;

$P_{switching}$: 开关损耗, 在低频下(几百赫兹以内)通常可以忽略不计;

$P_{operational}$: 芯片电源的功耗, 通常也忽略不计;

$$P_{total} = P_{conduction} + P_{switching} + P_{operational}$$

NSD1x4xx系列低边驱动应用说明

计算公式分别如下：

$$P_{conduction} = I_D^2 * R_{dson} * PWM(duty)$$

$$P_{switching} = \frac{1}{2} * I_D * V_S * f_{PWM} * (trise + tfall)$$

$$P_{operational} = VDD * I_{VDD}$$

注意：感性负载还有另外一个热源，就是发生雪崩击穿(有源钳位)时候产生的热，这个比较难计算。所以如果遇到大的感性负载，并且输入是高频时，建议客户通过实际测试来确定芯片的带载能力。

3.2.再计算温升

$$T_J = P_{total} * \theta_{JA} + T_A + 20^\circ C$$

T_A 是控制器的环境温度，通常汽车控制器的环境温度是85°C或者105°C，上面的公式需要额外加20°C是因为控制器内部的器件会发热，而控制器内部相对比较封闭，因此芯片的环境温度需要在控制器的环境温度上增加20°C，“ $T_A + 20^\circ C$ ”也称为腔内温度。

θ_{JA} 是Junction-to-ambient的热阻参数，这个参数乘以芯片 P_{total} 就是芯片的温升，芯片的温升加上腔内温度就是芯片的结温 T_J （Junction temperature），通常结温小于150°C就满足客户需求。

3.3.规格书中其他热阻参数的意义

Ψ_{JT} 可以称之为等效热阻或者视在热阻，是通过仿真得到的，虽然没有物理意义，但是有数学意义，通常是客户在热测试之后需要用到的参数。

计算出芯片功耗，并测试芯片封装顶部的表面温度 T_c ，就可以通过下面的公式得到芯片的结温 T_J ：

$$T_J = P_{total} * \varphi_{JT} + T_c$$

θ_{JCtop} 参数是指功耗全部从封装顶部散出去的热阻，而我们实际应用中，并不知道有多少比例的功耗会从封装顶部散发出去（可能是10%，也可能是30%，或者其它比例），因为封装底部、芯片pin脚都可以散热。因此 θ_{JCtop} 这个热阻有物理意义，但没有数学意义。

NSD11416产品的热阻信息

Parameters	Symbol	SO-8	SOT223	Unit
Junction-to-ambient Thermal Resistance	θ_{JA}	96.3	76.3	°C/W
Junction-to-top characterization parameter	Ψ_{JA}	8.75	7.5	°C/W
Junction-to-case (top) thermal resistance	θ_{JCtop}	49.3	46.9	°C/W

The thermal data is based on the JEDEC standard high-K profile, JESD 51-7, four layer board.

NSD1x4xx系列低边驱动应用说明

4.Truth table详解

4.1.SOP8 封装单通道芯片对应的Truth table

Conditions	Input	Drain	Status
Normal operation	L	H	H
	H	L	H
Current limitation	L	H	H
	H	X	H
Over-temperature limitation	L	H	H
	H	H	L
VDD under-voltage	L	H	X
	H	H	X
Short circuit to ground	L	L	L
	H	L	H

1.Normal operation: 正常工作状态

当input=L, 功率管OFF, drain=H, status属于正常状态=H

当input=H, 功率管ON, drain=L, status属于正常状态=H

2.Current limitation: 当电流达到limit值时

当input=L, 功率管OFF, drain=H, status属于正常状态=H

当input=H, 功率管ON, 此时drain端状态不定, 因为芯片可能会发生thermal swing, 通道开关状态不定, status属于正常状态=H

3.Over temperature: 过温状态

当input=L, 功率管OFF, drain=H, status属于正常状态=H

当input=H, 过温, 功率管OFF, drain=H, status诊断=L

NSD1x4xx系列低边驱动应用说明

4.VDD under-voltage: VDD欠压

当input=L, 功率管OFF, drain=H, status电平状态未知, 因为status是由VDD供电, VDD欠压, status诊断功能关闭

当input=H, VDD欠压, 功率管OFF, drain=H, status电平状态未知, 因为status是由VDD供电, VDD欠压, status诊断功能关闭

5.Short circuit to ground: 短路到地

当input=L, drain=L时, status诊断开路=L

当input=H, 功率管ON, drain=L, status属于正常状态=H

4.2.SOP8封装双通道/SOT223封装单通道芯片对应的Truth table

Conditions	Input	Drain	Status
Normal operation	L	H	H
	H	L	H
Current limitation	L	H	H
	H	X	H
Over-temperature limitation	L	H	H
	H	H	L
VDD under-voltage	L	H	X
	H	H	X

SOP8封装双通道/SOT223封装单通道芯片和SOP8封装单通道芯片的区别是, 没有Short circuit to ground 诊断功能。因为当input=L时, 芯片此时不供电, 内部逻辑电路不工作, 所以无法进行诊断。

5. 钳位能量E_{AS}

5.1.感性负载对低边开关驱动芯片的挑战

多通道低边开关芯片在用于驱动一些感性负载（如电机、螺线管、喷油器）时, 在开关关断的瞬间, 电感会试图维持其原有电流, 从而产生一个很高的反向感应电压（反电动势）。当OUT端的电压达到芯片的

NSD1x4xx系列低边驱动应用说明

V_{clamp} 阈值时，功率管gate电压被抬高，功率管打开形成电流通路，从而泄放感性负载中的能量(在这个过程中，功率管的MOSFET处于饱和区)。

钳位能量 (E_{AS}) 就是指在上述一次关断过程中，由功率管导通，最终在芯片内部以热的形式耗散掉的能量。每次开关关断，都会有一次 E_{AS} 在芯片内部产生的瞬时热量，在产品的整个生命周期中可能涉及数百万甚至十亿次开关循环，这些能量的累积效应会对芯片造成反复的热应力，最终可能导致芯片因材料疲劳而失效。

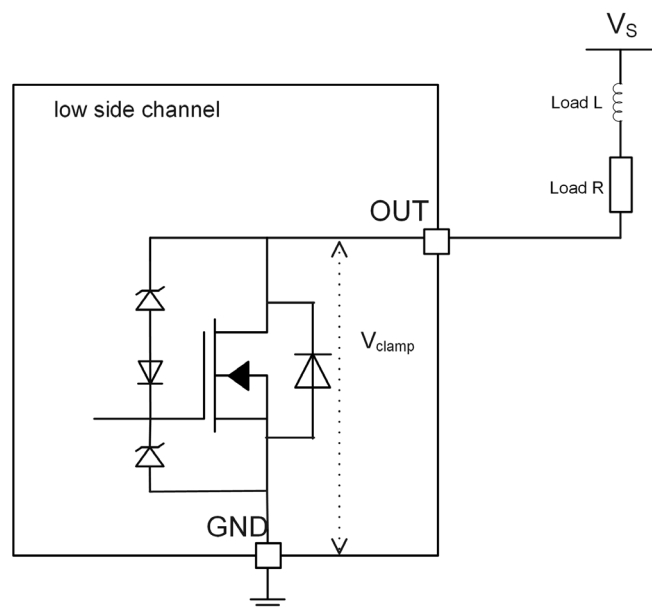


图3 芯片内部的有源钳位电路示意图

5.2. 钳位能量的计算方法

那么针对客户不同的感性负载类型，需要根据以下计算方法，初步评估负载单次关断时产生的能量是否在芯片的承受范围之内：

NSD1x4xx系列低边驱动应用说明

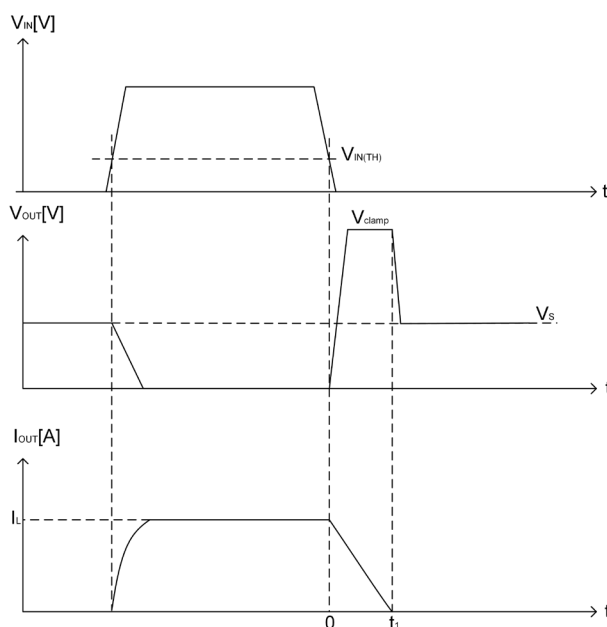


图4 低边驱动在感性负载关断瞬间的输出示意图

低边驱动钳位能量EAS（Single pulse avalanche energy）计算公式如下：

$$E_{AS} \approx \frac{1}{2} * L * I_L^2 * \frac{V_{clamp}}{V_{clamp} - V_S}$$

V_S 是负载端电压， V_{clamp} 是芯片的钳位电压。

5.3. 钳位能量的测量方法

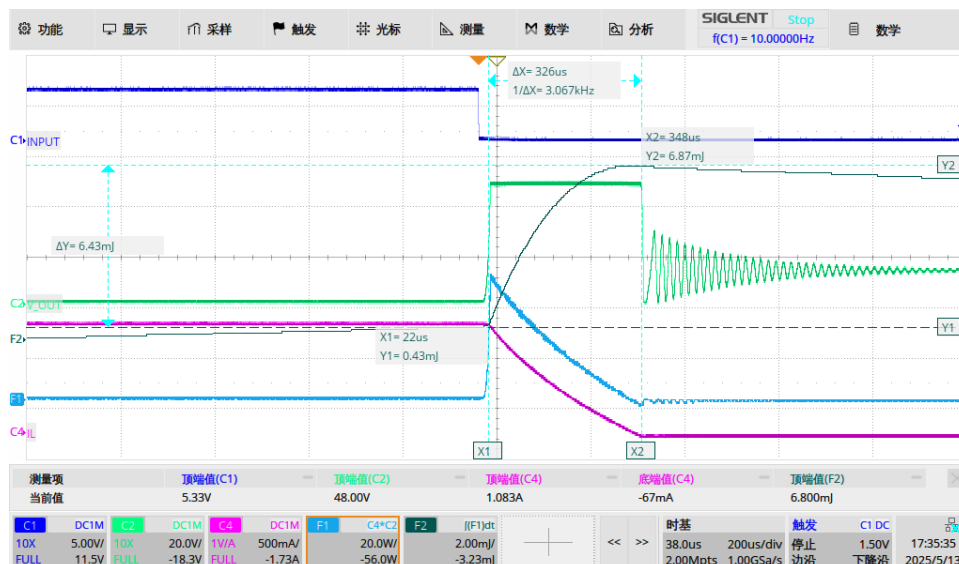
芯片在实际测试中测得的 E_{AS} 与通过理论公式计算得出的值存在较大差异，主要原因为以下几点：

- a) 以上的计算公式只适用于纯感性负载，而实际应用中的负载大多是包含阻性的，因此电流不会线性下降，使用理想线性模型（如电流线性下降）会高估芯片的 E_{AS} 能力。
- b) 电感线圈的铁芯材料（如铁氧体、磁粉芯）存在磁饱和效应，电感值会随电流的增大而变化，不同类型负载的电感行为差异也很大。
- c) 此外感性负载时，功率管在关闭的时候会出现damping。

因此钳位能量需要通过用示波器通过积分处理实际测试才能得到较为准确的值，测试方法如下：

$$E_{AS} = \int (V_{OUT} * I_L) dt = \int (C2 * C4) dt$$

NSD1x4xx系列低边驱动应用说明



where C1: INPUT C2: V_{OUT} C4: I_L

F1: P=C2*C4 F2: E_{AS}= ∫ Pdt

图6 低边驱动在感性负载关断瞬间E_{AS}的测试波形

Note: 公式计算值和实际测量值的误差

如图6所示, 测试条件为I_L=1A, V_{clamp}=48V, L=15mH, V_S=13V, 按照公式计算可得:

$$E_{AS} \approx \frac{1}{2} * L * I^2 * \frac{V_{clamp}}{V_{clamp} - V_S} = 10.29mJ$$

实际测试E_{AS}=6.43mJ, 误差=实际测试值/理论计算值=62%

NSD1x4xx系列低边驱动应用说明

6.修订历史

版本	描述	作者	日期
1.0	创建应用笔记	Minjie Chen, Jie Liang	2025/11/7

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适用法律、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)。

苏州纳芯微电子股份有限公司版权所有