

集成路径式霍尔电流传感器 温升分析与应用指南

AN-12-0048

作者：Yiming Fan, Xiaoyuan Zang, Haijun Cao



摘要

随着电力电子系统朝着高效率、高功率密度方向发展，对电流传感器的可靠性提出了更高要求。集成路径式霍尔电流传感器因其高隔离度、低功耗和小型化等优点而被广泛应用。然而，其内部用于通流的铜导体会因焦耳效应而产生热量，成为芯片最主要的发热源。本应用笔记的核心在于分析温升对传感器可靠性与安全性的影响。通过理论计算、实验测试与有限元热仿真相结合的方法，我们系统性地研究了其在稳态及瞬态大电流条件下的温升表现，重点关注芯片结温是否超出额定限值，以及铜导体是否存在熔断风险。本文旨在为客户提供一个准确的热性能预测模型和清晰的设计指南，确保传感器在整个生命周期内稳定可靠地工作。

目录

1. 引言	2
2. 热特性理论与关键参数	2
2.1. 热阻与稳态温升模型	2
2.2. 瞬态峰值电流评估	3
3. 实验测试	3
3.1. 实验设备	3
3.2. 稳态温升测试验证	4
3.3. 瞬态温升测试验证	5
3.4. 原边铜导体熔断测试验证	5
4. 热仿真建模与分析	7
4.1. 仿真模型建立	7
4.2. 稳态仿真分析	8
4.3. 瞬态仿真分析	9
4.4. 仿真与测试结果对比与讨论	11
5. 应用指南与建议	11
5.1. 稳态持续通流应用指南	11
5.2. 瞬态峰值电流应用指南	12
6. 修订历史	14

集成路径式霍尔电流传感器 温升分析与应用指南

1. 引言

集成路径式霍尔电流传感器（以NSM201x和NSM211x为例）将原边铜导体电流路径（Busbar）与副边Die通过绝缘介质（如薄膜聚合物、环氧树脂等）集成在同一封装内。当电流 I_P 流经原边铜导体时，其固有的电阻 R_P 以及芯片本身的功耗会导致总功率损耗 $P_{LOSS} = I_P^2 \times R_P + P_{Chip}$ 。这部分损耗将转化为热能，引起芯片从“结”（指Die上最热的点，通常是Die上与铜导体紧邻的位置）到环境的热流。

值得强调的是，本产品内部集成了高精度温度补偿电路，能够在工作温度范围内有效补偿温漂，确保输出精度的稳定性。因此，本文的讨论将不涉及芯片输出精度，而完全聚焦于温升带来的以下两大挑战：

- 1、可靠性影响：半导体器件和内部材料的寿命与工作结温成指数关系（阿伦尼斯模型）。结温超过最大额定值 T_{Jmax} 会显著加速产品老化甚至造成芯片功能失效。
- 2、安全性影响：在过载或短路等故障条件下，瞬时大电流可能使铜导体的温度在毫秒至秒级时间内急剧上升，超过其熔点（约1083°C）而导致熔断，造成芯片永久失效，进而引发系统连锁故障。

因此，全面理解并控制传感器的结温，是保证系统长期可靠运行的关键。

2. 热特性理论与关键参数

2.1. 热阻与稳态温升模型

热阻 R_θ 是描述热量传递难易程度的物理量，类比于电路中的电阻。对于电流传感器芯片，最关键的参数是结到环境的热阻 $R_{\theta JA}$ 。它代表了从芯片内部发热点到周围环境的总热阻。

电流传感器在正常工作情况下，产生的总功率损耗 P_{LOSS} 将导致一个稳定的温升。稳态结温 T_J 可通过以下公式估算：

$$T_J = T_A + (I_P^2 \times R_P + P_{Chip}) \times R_{\theta JA}$$

集成路径式霍尔电流传感器 温升分析与应用指南

其中：

- T_J ：芯片结温 ($^{\circ}\text{C}$)
- T_A ：环境温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- I_P ：流经铜导体的电流有效值 (A)
- R_P ：原边铜导体在工作温度下的电阻 (Ω)
- P_{Chip} ：芯片的功耗 (W)
- $R_{\theta JA}$ ：结到环境的热阻 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

重要说明：

- R_P 具有正温度系数，约 $3700 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 。计算精确温升时，需考虑其随温度的变化，可采用迭代计算法。
- $R_{\theta JA}$ 强烈依赖于 PCB 设计和环境条件。数据手册中提供的值通常是在纳芯微提供的特定Demo板上测得。在实际应用中，优良的PCB散热设计以及主动散热方案可以显著降低有效的 $R_{\theta JA}$ 。

2.2.瞬态峰值电流评估

当电流为较大的瞬态脉冲形式时，短时间内原边铜导体上的大电流产生的巨大热量会传递至Die，可能导致超过芯片的最大结温。此外，极端情况下，铜导体本身的峰值温度也有可能会达到或超过其熔点，从而导致熔断失效。因此评估芯片峰值电流耐受能力的核心，在于计算脉冲电流期间原边铜导体内产生的总热能在Die上以及铜导体上造成的温升。

3.实验测试

3.1.实验设备

- DUT：电流传感器NSM2019
- 测试板：采用纳芯微提供的Demo板，并在电流传感器散热焊盘下方设计有 thermal via array 以模拟典型应用
- 测温设备：芯片内部集成的温度传感器
- 电流源：高精度可编程直流电源（用于稳态测试）和大功率脉冲电流发生器（用于瞬态以及熔断测试）
- 数据采集：编程器与上位机软件，示波器

集成路径式霍尔电流传感器

温升分析与应用指南

3.2. 稳态温升测试验证

- 实验步骤：在25°C环境温度下，无风条件，用高精度可编程直流电源给芯片的原边铜导体施加30A，40A，50A，60A，70A，80A，90A，100A，110A稳态电流持续10min。通过编程器与被测芯片实时通信，上位机软件持续读取芯片的结温并保存数据，温升测试平台如下图：

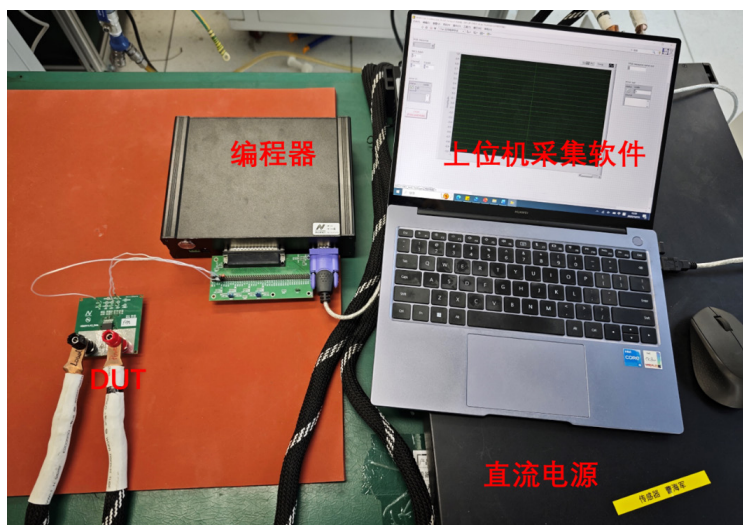


图1、稳态温升测试平台

- 实验结果：将施加稳态电流的持续时间内的芯片结温数据记录并绘制成如下图表：

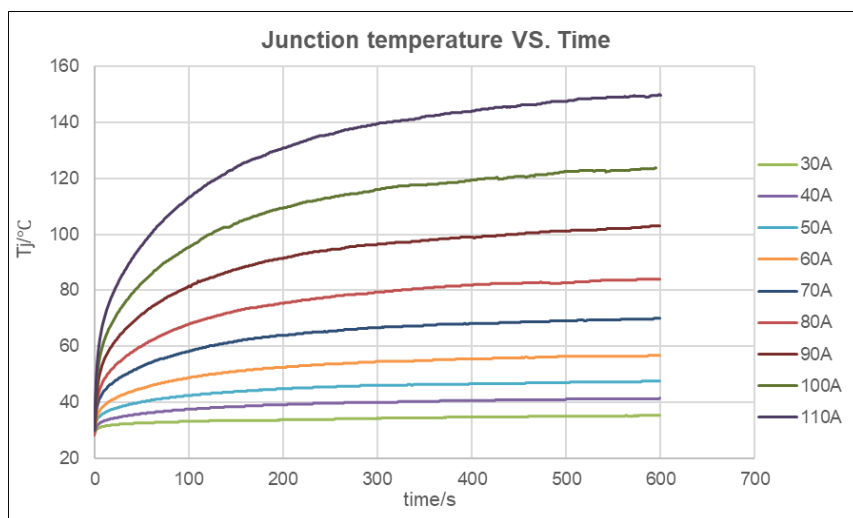


图2、不同稳态电流下芯片温升曲线

集成路径式霍尔电流传感器 温升分析与应用指南

3.3.瞬态温升测试验证

- 实验步骤：给电流传感器NSM2019的原边铜导体施加一个电流脉冲，电流脉冲信号覆盖不同的电流大小，通过编程器与被测芯片实时通信，上位机软件持续读取芯片的结温并保存数据。
- 实验结果：记录施加不同大小的脉冲电流条件下芯片到达最大结温的时间并绘制成如下图表：

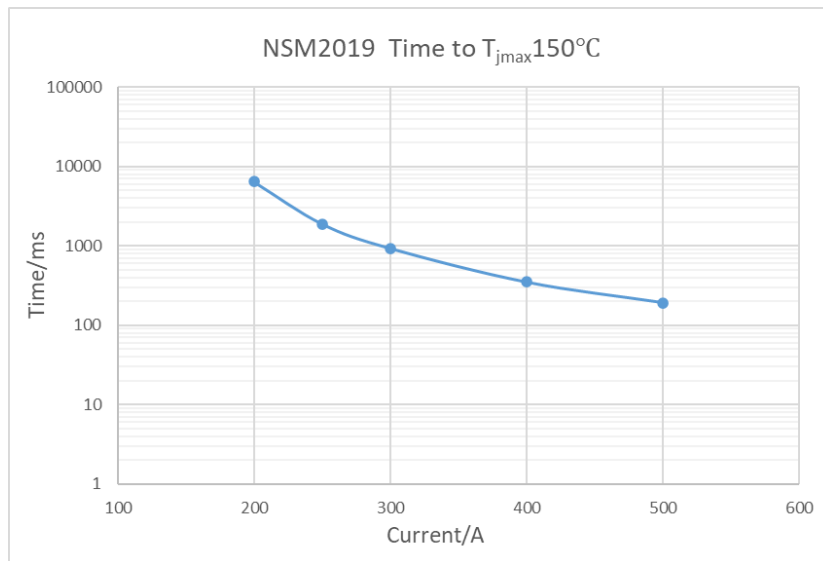


图3、不同瞬态电流下芯片到达最大结温的时间

3.4.原边铜导体熔断测试验证

- 实验步骤：给电流传感器的原边铜导体施加一个电流脉冲，用示波器采集芯片副边的输出，由于该测试施加的脉冲电流较大，此时芯片的输出会因为超过量程而顶到电源轨。芯片原边的铜导体会因为温度的急剧上升而逐渐到达熔点发生熔断，在这个过程中，原边铜导体的物理结构将逐渐发生损坏，同时导体周围的磁场也会随之改变，从示波器上可以观察到芯片的输出异常。用示波器截取信号发生突变的时间间隔（起始点为施加电流的时刻，终止点为铜导体熔断的时刻）即为在该脉冲电流条件芯片的原边铜导体物理结构受到损坏甚至熔断的时间。施加电流脉冲时的芯片输出表现与芯片的原边铜导体熔断失效后样品如下图：

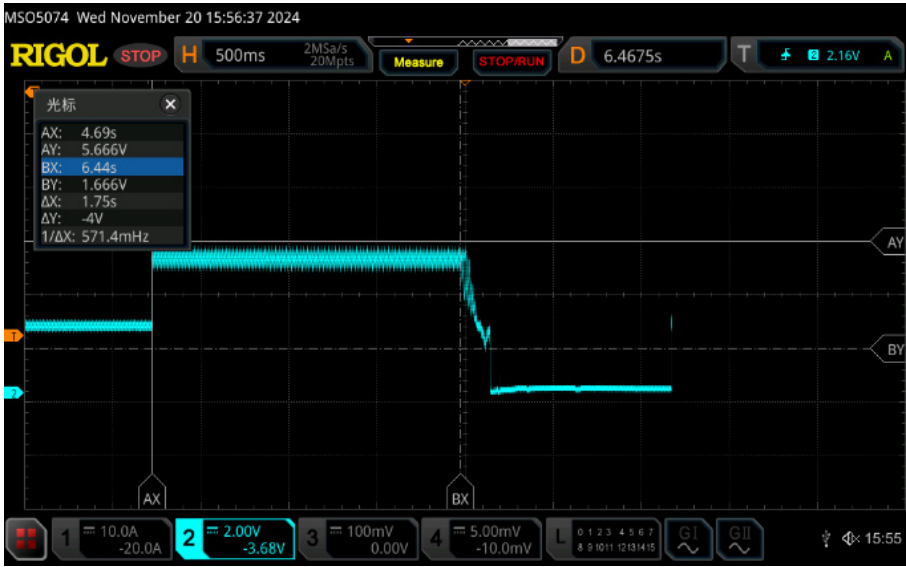


图4、瞬态脉冲电流下芯片的输出表现（原边铜导体熔断）

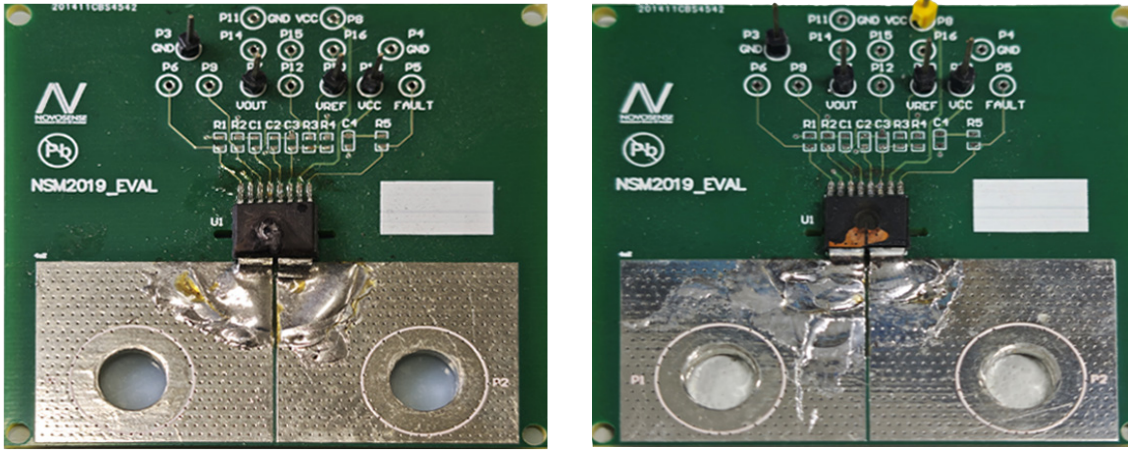


图5、芯片的原边铜导体熔断失效样品

集成路径式霍尔电流传感器

温升分析与应用指南

- 实验结果：记录施加不同大小的脉冲电流条件下芯片原边铜导体发生熔断的时间并绘制成如下图表：

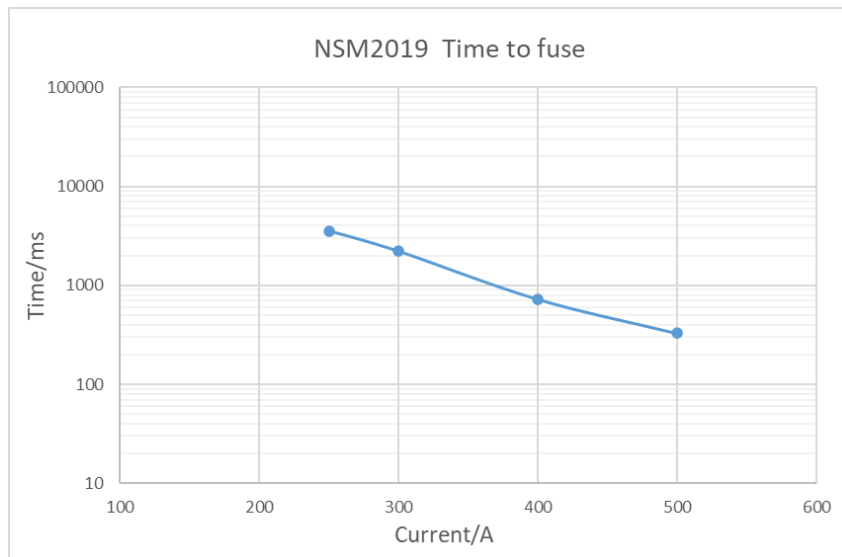


图6、不同瞬态电流下芯片原边铜导体熔断的时间

4.热仿真建模与分析

4.1.仿真模型建立

基于NSM2019的实际几何结构和材料以及应用PCB环境，建立了详细的3D有限元分析模型，具体包含封装及PCB几何模型建立、材料属性设置、网格划分、边界条件设置、求解计算等有限元分析步骤。

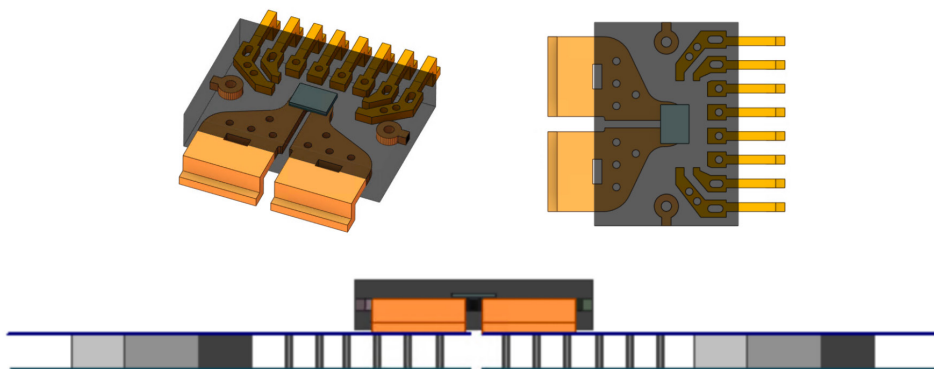


图7、NSM2019 SOW10封装、PCB几何模型

集成路径式霍尔电流传感器
温升分析与应用指南

4.2.稳态仿真分析

- 仿真条件：给电流传感器NSM2019的Die施加一个功耗，参考手册中的典型值；对芯片的原边铜导体施加多个稳态电流，得到如下温度仿真的分布云图。

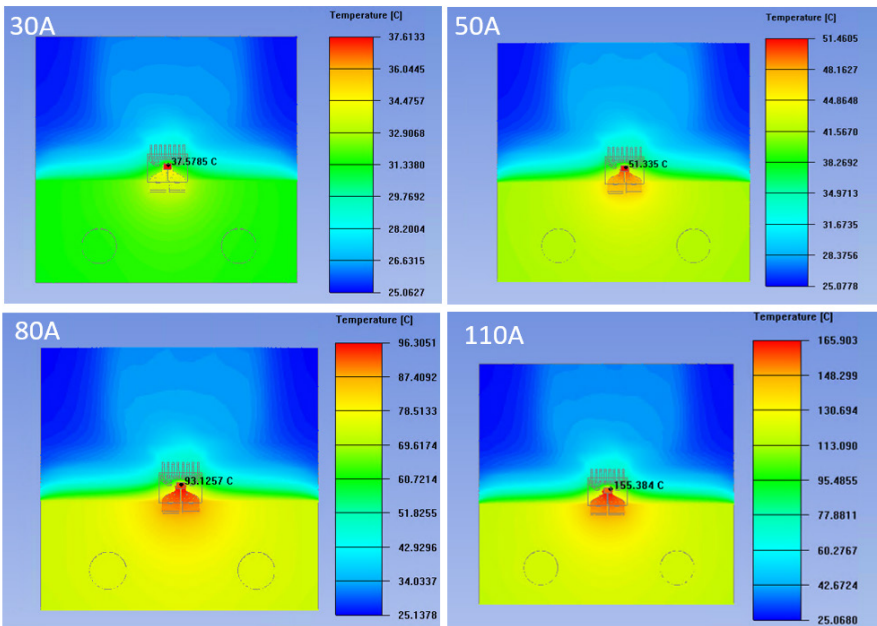


图8、不同稳态电流下芯片热平衡时温度分布云图

- 结果与发现：
 - ①温度分布：仿真云图清晰显示，最高温度点位于原边铜导体的中心区域（阻抗最大处），热量通过封装向四周扩散，四周温度逐渐降低。
 - ②仿真数据：下表展示了热稳态仿真得到的芯片结温数据，并与最大结温 T_{Jmax} 进行对比。

电流 (Arms)	仿真结温 T_J (°C) @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	是否超出 T_{Jmax} (150°C)
30	37.5	否
50	51.3	否
80	93.1	否
110	155.3	是

集成路径式霍尔电流传感器 温升分析与应用指南

③仿真与实测数据对比：下图展示了稳态热仿真与实测的结果，横坐标为施加的持续电流大小，纵坐标为芯片到达热平衡时的结温，测试结果与仿真的匹配度较高。结果显示，在环境温度25°C的条件下，施加110A的连续电流，热平衡时Die上结温已超过最大结温150°C，长期工作在此条件下将严重影响芯片可靠性。

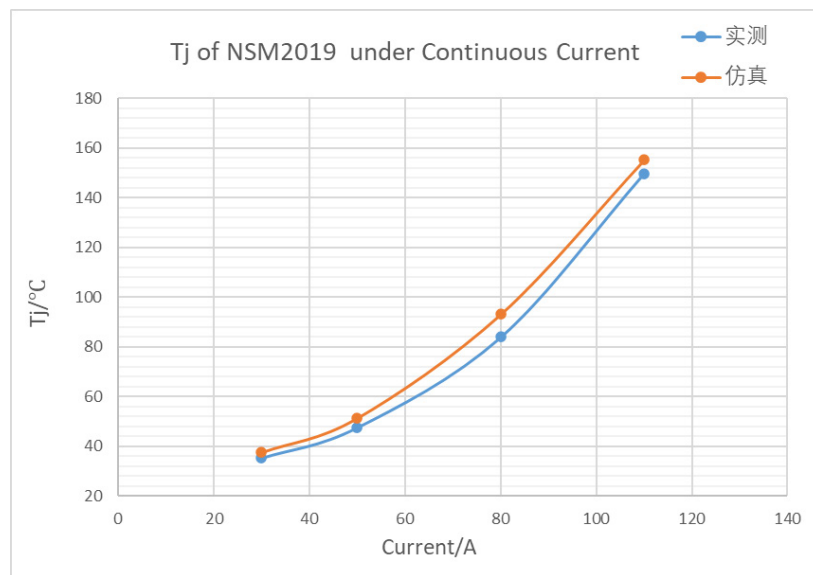


图9、持续通流条件下稳态热仿真结果与实测对比

4.3.瞬态仿真分析

- 仿真条件：对电流传感器NSM2019的原边铜导体施加瞬态电流脉冲，以研究瞬时热冲击对结温的影响。此时芯片功耗占比总功率损耗 P_{Loss} 很小（<0.5%），为简化仿真模型，不考虑芯片本身的功耗带来的温升。

集成路径式霍尔电流传感器 温升分析与应用指南

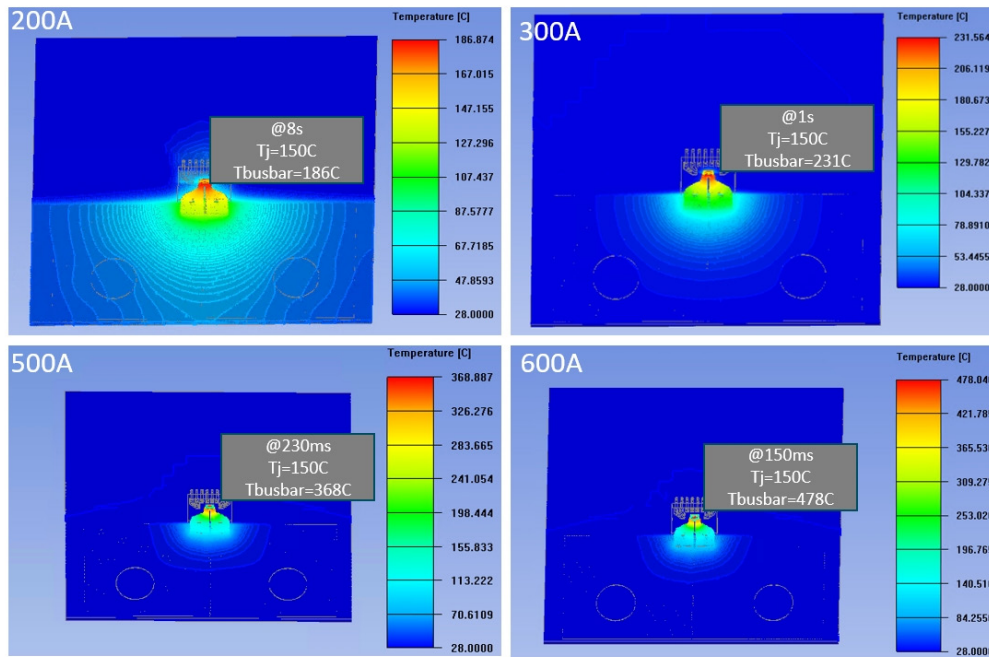


图10、不同瞬态电流下芯片到达最大结温150°C 时温度分布云图

● 结果与发现：

- ①温度分布：仿真温度分布云图清晰显示，热量仍由原边铜导体通过封装向四周扩散。随着电流增大，芯片到达150°C（最大结温）的时间逐步提前，同时由于时间较短，热量来不及通过PCB传导向四周扩散（PCB参与散热程度逐步下降）。
- ②仿真与实测数据对比：下图展示了瞬态热仿真与实测的结果，横坐标为施加的脉冲电流大小，纵坐标为芯片到达最大结温150°C的时间，测试结果与仿真的匹配度较高。结果显示，在环境温度25°C的条件下，电流传感器NSM2019可以安全承受 300A持续1s的电流脉冲（最大结温 < 150°C），但 400A持续1s 的电流脉冲则可能导致芯片超最大结温，存在可靠性风险。

集成路径式霍尔电流传感器

温升分析与应用指南

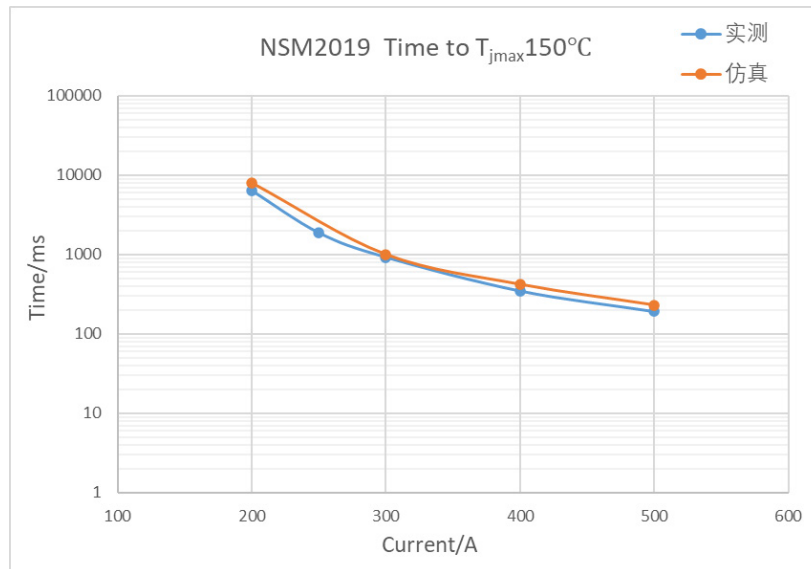


图11、脉冲电流条件下瞬态热仿真结果与实测对比

4.4. 仿真与测试结果对比与讨论

对比结果显示，热仿真模型在稳态和瞬态条件下均表现出极高的预测精度（与实测误差 $<\pm 10\%$ ）。微小的偏差可能来源于仿真模型对某些微结构（如Bonding线）的简化以及封装材料参数在生产制造过程中的波动。尽管如此，热仿真模型在预测结温相对变化和峰值温度方面的有效性已得到充分证实，可以作为可靠的芯片热评估工具，用于预测各种复杂工况下的超过最大结温的可靠性风险。

同时在进行新的芯片结构设计时，建议基于此模型进行前期热仿真，以快速评估新结构的持续通电流能力和耐受脉冲电流的安全边界，从而大幅缩短设计周期，降低试错成本。

5. 应用指南与建议

5.1. 稳态持续通流应用指南

确保电流传感器满足持续通流工作的核心，在于将芯片的结温严格控制在晶圆所能承受的最大结温 T_{jmax} 以下。结温超标是引发芯片性能衰退乃至早期失效的主要原因，建议按照以下几点设定工作电流限值：

集成路径式霍尔电流传感器

温升分析与应用指南

- 明确电流传感器工作所处的“热环境”。包括电流传感器所处的最高环境温度以及目标设计结温，为了保障产品的寿命与可靠性，建议给芯片的最大结温留出足够的设计余量，通常建议将目标设计结温设定在125°C或者更低；
- 热量从芯片内部原边铜导体产生并最终散逸到环境中，会遇到一系列阻力，其总和为“结到环境热阻 $R_{\theta JA}$ ”。此参数是连接芯片总功耗与温升的桥梁。需要强调的是，数据手册中给出的 $R_{\theta JA}$ 典型值，是在特定测试板上测得的结果。在实际应用中，该值完全取决于您的PCB散热设计。优良的PCB布局（如大面积铜层、散热过孔阵列）可以显著降低结环热阻 $R_{\theta JA}$ ，从而允许更高的电流通过。反之，不良的散热设计将导致实际热阻远高于手册值，使芯片在更小的电流下即“过热”。
- 确认电流传感器通流能力的核心在于芯片可接受的温升与系统散热能力之间的平衡，因此为了提高芯片的持续通流能力，除了提升系统的散热能力，还可以选择封装热阻更小的电流传感器，在相同电流下显著降低结温。

5.2.瞬态峰值电流应用指南

实验测试了瞬态电流脉冲下芯片到达最大结温和芯片原边铜导体发生损坏甚至熔断的时间，结合仿真结果，我们可以绘制出瞬态脉冲电流下的“电流-时间”安全边界曲线（SOA曲线）。需要注意的是，芯片的瞬态峰值电流耐受能力根本上由封装结构主导，所以针对不同的封装结构，我们都通过实测绘制出了SOA曲线。

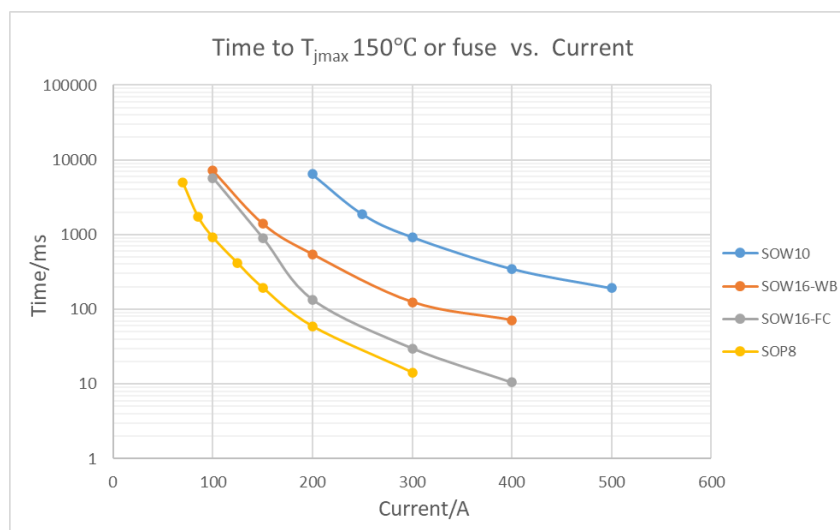


图12、不同封装的电流传感器的SOA曲线

集成路径式霍尔电流传感器 温升分析与应用指南

针对系统应用中出现的峰值电流事件（如负载短路等），建议按照以下几点进行风险评估：

- 识别应用中的瞬态电流特征，包括脉冲幅值、持续时间、重复频率等；
- 查询对应封装的SOA曲线，确保应用中的任何电流脉冲的幅值和持续时间都落在“安全区”内；
- 在实际应用中，建议在SOA边界与工作点之间保留充足的安全余量，避免由于封装参数公差造成的峰值电流耐受能力下降；
- 以上提供的SOA曲线设定环境温度为室温（25℃）。如果电流传感器已在较高温度下工作，其耐受峰值电流的能力会下降，需根据电流传感器的实际工作温度对峰值电流进行降额。

集成路径式霍尔电流传感器 温升分析与应用指南

6.修订历史

版本	描述	作者	日期
1.0	创建应用笔记	Yiming Fan, Xiaoyuan Zang, Haijun Cao	2025/12/22

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,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