



适用于高功率降压转换的散热概念评估

适用于高功率降压转换的散热概念评估

撰稿人: **Sushrut Pattar**
现场应用系统工程师
Matthias Ulmann
现场应用系统工程师

引言

自动驾驶是所有汽车 OEM 在这个时代面临的新一波重要趋势，车辆内的电子控制单元 (ECU) 数量急剧增加。其中涵盖了诸多应用，例如驾驶辅助摄像头、数据融合 ECU 以及它们各自的功耗管理。根据应用和操作范围，预调节器的输出功率范围不等，小至停车辅助 ECU 的几瓦特，大至数据融合 ECU 的上百瓦特。本白皮书旨在传达使用散热片降低电子器件热应力的潜在意义，以及系统热性能与各种因素 (例如散热片的位置和尺寸) 的相关性。

我们将首先描述用于执行测量的设置、测试板的简要概述以及用于实验的各种散热片。我们将介绍测量结果，重点介绍在设计高输出功率预调节器时使用散热片的效果。

设置

图 1 描述了用于测试板热评估的设置，包括以下仪器：

- 电源 Toellner TOE8872
- 电子负载 Prodigit 3311C
- 功率分析仪 Fluke Norma 5000
- Keysight 多通道数据记录器 34970A
- 被测器件 (DUT)

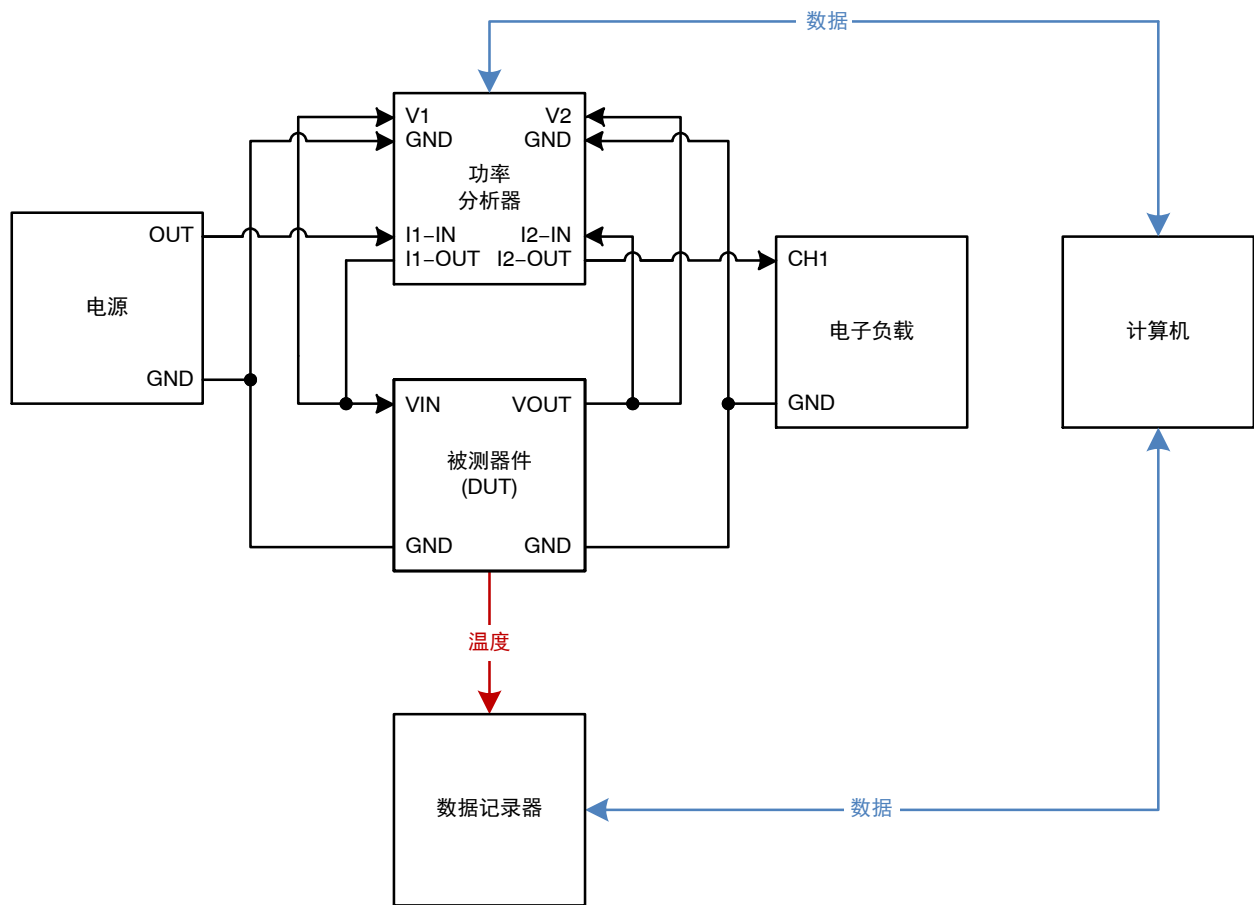


图 1. 测试设置

电流从电源 OUT 端口流向功率分析仪输入电流端口 I1-IN，功率分析仪在此进行测量。然后它通过 I1-OUT 从功率分析仪流出到被测器件 (DUT) 的 VIN 端口。电源分析仪 V1 连接到 DUT VIN 端口以测量输入电压。电源的 GND 连接到 DUT 和功率分析仪的 GND。

在输出侧，电流从 DUT VOUT 端口流向功率分析仪输入电流端口 I2-IN，功率分析仪在此处进行测量。然后它通过 I2-OUT 从功率分析仪流出到直流电子负载的 CH1 端口，这里设置了 DUT 负载电流。功率分析仪 V2 连接到 DUT VOUT 端口以测量输出电压。功率分析仪的 GND 连接到 DUT 和直流电子负载的 GND。

该电源具有传感功能，可保持提供给 DUT 的电压恒定 (补偿电缆损耗)，并在传感器线路出现断路时保护敏感负载。数据记录器会测量 DUT 上不同 IC 组件的温度。

整个系统是完全自动化的，以便确保精确和可重复的结果。基于 Python 的软件会控制整个设置，从设置输入电压和输出负载，到测量组件的温度和计算整体系统效率。图 2 显示了软件的 GUI。

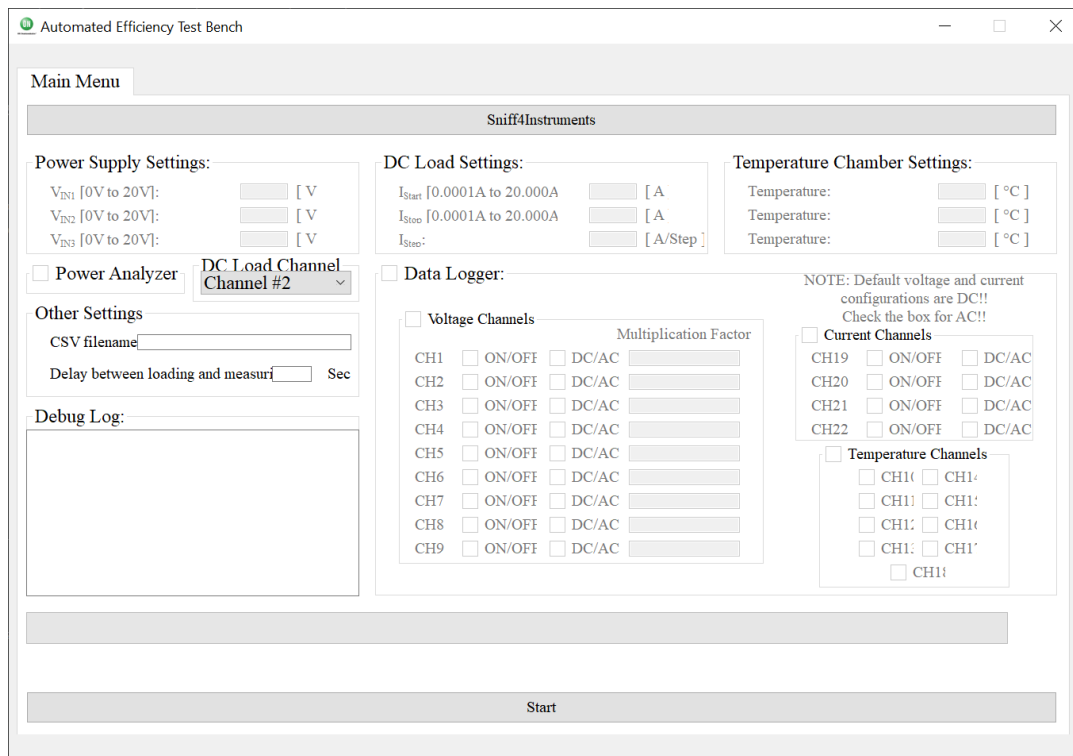


图 2. 软件 GUI

测试板和散热片

为了评估不同散热片的性能和影响，我们设计了一个基于 [100 W 汽车预调节器设计](#) 的专用板，且针对热评估进行了优化。图 3 显示了具有 5 V 输出电压和高达 20 A 输出电流能力的同降压转换器原理图。汽车降压控制器 [NCV881930](#) 具有 410 kHz 的固定开关频率。它驱动两个符合汽车标准的 40 V MOSFET [NVMF55C460NL](#) (带底面裸露焊盘的 SO-8FL)，它们并联在降压转换器的高边 (HS) 和低边 (LS)，以实现高达 20 A 的高输出电流。

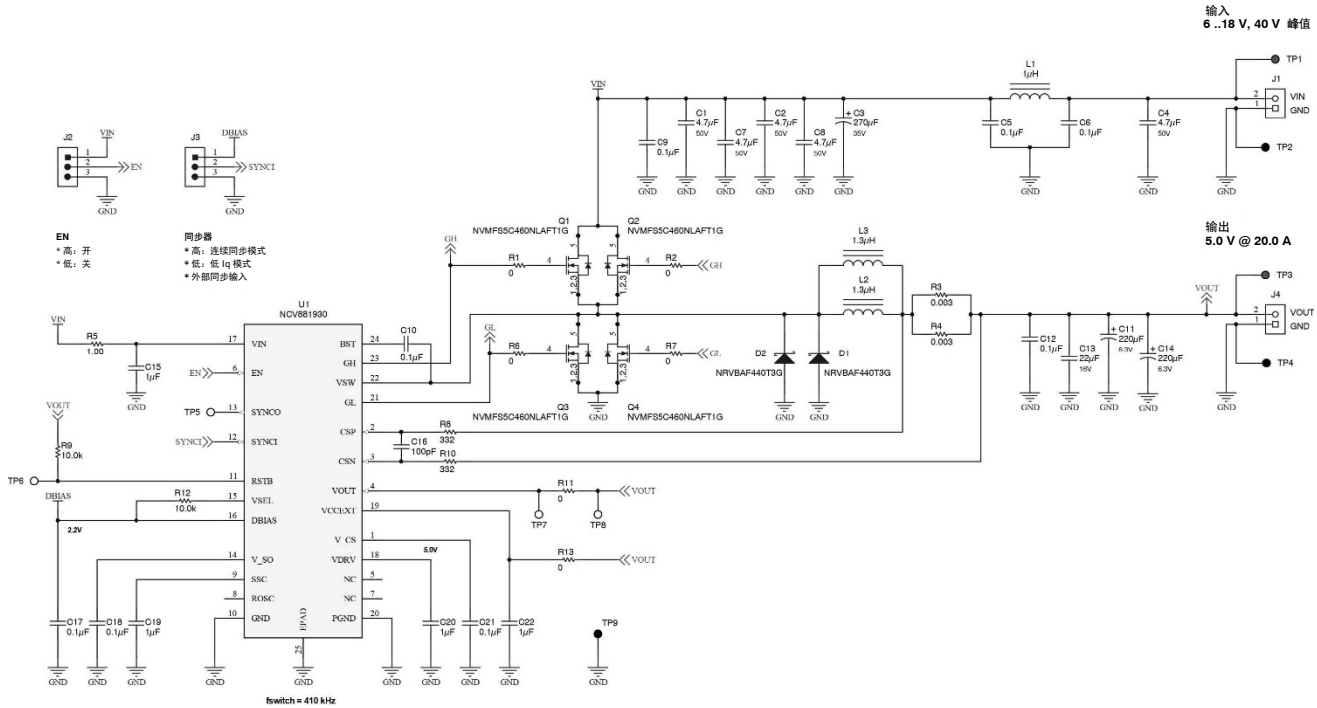


图 3. 测试板原理图

对布局进行以下修改，可以对电路板进行热评估：

- 增加了 PCB 总尺寸，以允许在 PCB 的顶面和底面安装一个 50 mm x 50 mm 的散热片。
- 为散热片提供安装孔。
- 为 PCB 底面的电感器提供额外的占位面积。

图 4 和图 5 显示了顶面和底面，以及在 PCB 的顶面和底面安装散热片的可能性。

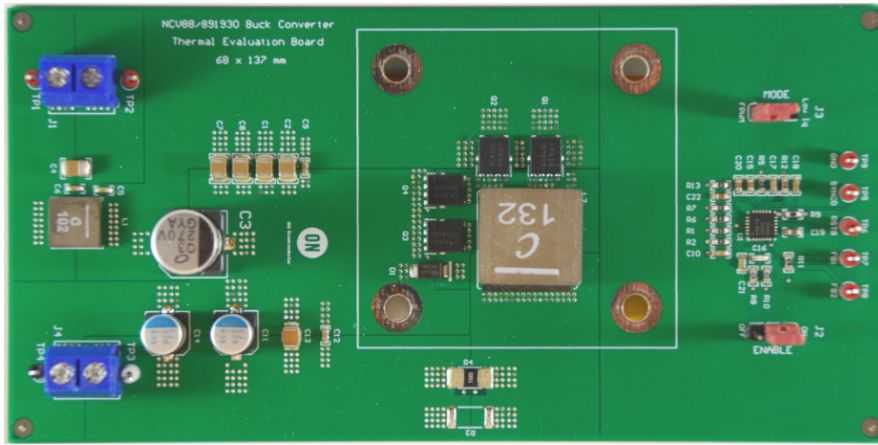


图 4. DUT 顶面

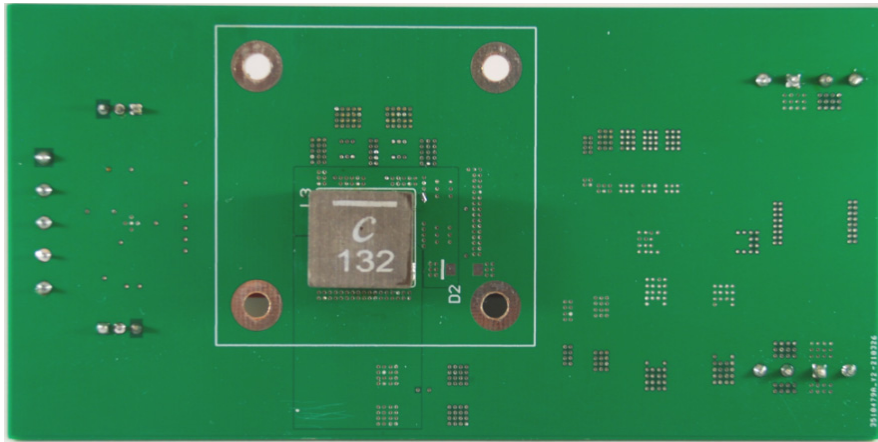


图 5. DUT 底面

通过上述配置，有三种可能的且已经过分析的测试设置如下：

表 1. 测试设置

设置	贴装 MOSFET	贴装电感	贴装散热片
#1	顶面	顶面	无散热片
#2	顶面	底面	顶面 (在 MOSFET 上)
#3	顶面	顶面	底面 (在 PCB 上)

从机械角度来看，将散热片正确且可更换地安装到 PCB 上是最具挑战性的部分。对于任何配置，在散热片和散热表面之间必须有一个薄膜间隙垫，以实现良好的导热性。发射表面 (如 PCB 或 MOSFET 的封装) 从来都不是完全平坦和平行于散热片的，因此间隙垫确保了两者之间良好的层状界面。材料选择起着重要作用，显著影响热性能。例如，一个需要承受高电压的材料的热阻总是比基于石墨的导电材料高得多。

对于本测试设置，选择了厚度为 0.5 mm 的 KERA FOL “SOFTTHERM” 材料，请参见表 2。所有测量均使用 3.0 W/(m · K) 材料进行，其热阻为 0.41 K/W。6.0 W/(m · K) 材料 (热阻为 0.20 K/W) 仅在本白皮书末尾用于两种材料的比较。

表 2. 薄膜间隙垫

材料	热导率	热阻	热阻抗	厚度	击穿电压
86/300 SOFTTHERM	3.0 W/(m·K)	0.41 K/W	164 (K·mm ²)/W	0.5 mm	7.0 kV
86/600 SOFTTHERM	6.0 W/(m·K)	0.20 K/W	80 (K·mm ²)/W	0.5 mm	1.5 kV

- 热导率是一种材料属性，不受几何形状 (即形状或尺寸) 的影响。它描述了内部导热能力，在比较不同材料时是一个有用的参数。
- 热阻描述了具有一定厚度的材料如何抵抗热流。由于厚度与热阻直接相关，较薄的材料比较厚的材料具有更好的热传递。
- 热阻抗取决于形状或尺寸、厚度和压力。这是一个比较符合实际情况的值，因为所有变量，如表面的平整度、压力等，都针对特定应用进行了考虑。

用于连接散热片的扭矩也会影响热阻抗。通常，压缩越高，热阻越低。这是因为压缩降低了整体厚度并增加了材料的密度。这两个因素都提高了导热性。厚度为 5 mm 的 86/300 SOFTTHERM 材料在零压下的热阻为 4.1 K/W。30 N/cm² 的压力会使厚度变为 3.7 mm，热阻降低到 3.0 K/W。这种材料的最薄版本厚度为 0.5 mm。在这种情况下，当施加 30 N/cm² 的最大压力时，材料可以压缩到 0.3 mm。同时，热阻从 0.4 K/W 下降到 0.25 K/W。压力过高会损坏薄膜间隙垫，例如导致泄漏。例如，对于 86/300 SOFTTHERM，压缩量不应超过原始厚度的 30%。

对于本测试设置，压力的绝对值不是必需的，只要过高的扭矩或压力不会损坏薄膜间隙垫和机械设置即可。最关键的一点是，用于每个散热片和每种设置的压力必须是相同的；否则，结果将无法比较。如前所述，压力和热阻之间的关系清楚地表明压力会显著影响整个系统的热性能。考虑厚度为 0.5 mm 的薄膜间隙垫，从 30 N/cm² 的最大压力降到零压力后，热阻增加 60%。

一种相对简单但可靠的设置是基于弹簧的，它通常用于在计算机 CPU 上安装散热片。在这种机械设置中，螺钉将弹簧固定到位，将散热片压到 CPU 的顶面。压力取决于弹簧的弹力，而不是螺钉的扭矩，因为它们不会对散热片或 CPU 施加压力。

图 6 显示了将散热片安装到 PCB 上的设置。电感器和 MOSFET 位于底面，热量通过 PCB 散发到散热片。在 PCB 的热点周围放置了无数的过孔，以降低 PCB 的热阻，改善 PCB 中的垂直热流。散热片和 PCB 之间的薄膜间隙垫可以使任何粗糙和不均匀的表面变平整，以最大限度地减少热阻。散热片具有用于将散热片和弹簧固定到位的螺钉的螺纹。弹簧由螺钉轻轻预压，使散热片压在 PCB 上。弹簧被压缩的长度与其弹力成正比，所有四个弹簧都需要具有相同的长度才能为每个固定点施加相同的压力。对每个设置使用相同的弹簧长度和机械力可确保可复现和可比较的结果。

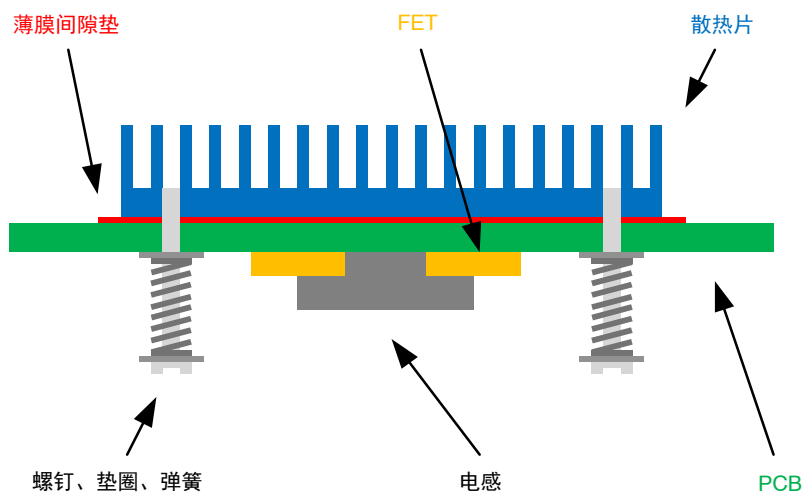


图 6. PCB 上的散热片

图 7 显示了在 MOSFET 顶面带有散热片的配置。设置是一样的，只需将电感器放置在底面，以便将散热片安装在 MOSFET 的顶面。

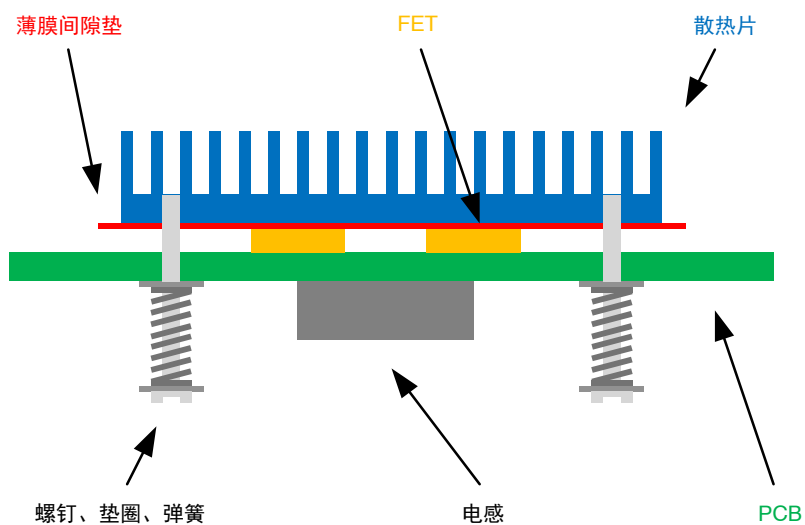

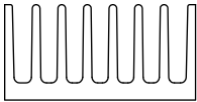


图 7. MOSFET 上的散热片

测量中使用了 Fischer Elektronik 的三种 底面积为 50 x 50 mm 不同散热片，请参见表 3。

表 3. 散热片概述

零件编号	热阻	高度	样式
SK 548 50 SA	7.4 K/W	10 mm	
SK 567 50 SA	4.0 K/W	25 mm	
SK 527 50 SA	2.5 K/W	60 mm	




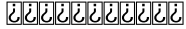
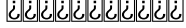



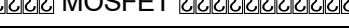
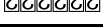
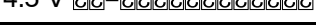
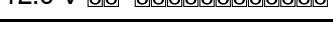
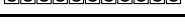
选择它们的原因是，在给定各自高度的情况下，它们各自的热阻之间存在显著差异。随着每一次高度的增加，热阻大约减小二分之一。这应有助于清楚地区分不同散热片的热性能。

MOSFET 之间的功率分配

理解以下测量结果对于正确理解高边和低边 MOSFET 之间的损耗和损耗分配至关重要。因此，为了解主要来源，所有与 MOSFET 相关的损耗都需计算。将肖特基二极管与低边 MOSFET 并联放置可防止反向恢复损耗，并且死区时间损耗从低边 MOSFET 转移到肖特基二极管。

表 4 用于计算损耗的参数。

表 4. 用于计算损耗的参数

参数	值	注释
U_{in}	12.0 V	
U_{out}	5.0 V	
I_{out}	20.0 A	
$I_{L,min}$	19.83 A	20.0 A 
$I_{L,max}$	20.17 A	20.0 A 
η	92.2%	
f_{sw}	410 kHz	
t_{dead}	20 ns	NCV881930  MOSFET 
R_{shunt}	1.5 m Ω	
$R_{ds(on)}$	5.8 m Ω	4.5 V 
C_{oss}	800 pF	12.0 V 
$V_{f,SK}$	0.485 V	

输出功率

$$P_{\text{out}} = U_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}} = 5.0 \text{ V} \cdot 20.0 \text{ A} = 100.000 \text{ W} \quad (\text{eq. 1})$$

输入功率

$$P_{\text{in}} = \frac{P_{\text{out}}}{\eta} = \frac{100.0 \text{ W}}{0.922} = 108.500 \text{ W} \quad (\text{eq. 2})$$

总损耗

$$P_{\text{loss,total}} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = 108.5 \text{ W} - 100.0 \text{ W} = 8.500 \text{ W} \quad (\text{eq. 3})$$

分流损耗

$$P_{\text{shunt}} = I_{\text{out}}^2 \cdot R_{\text{shunt}} = (20.0 \text{ A})^2 \cdot 1.5 \text{ m}\Omega = 0.600 \text{ W} \quad (\text{eq. 4})$$

电感损耗

$$P_{\text{inductor}} = 0.600 \text{ W} \quad (\text{Coilcraft 网页端工具 for XAL1580-132ME})$$

高边 MOSFET 导通损耗

$$I_{\text{HS,RMS,single}} = 6.5 \text{ A} \quad (\text{对于单个 MOSFET; 对于两个并联的 MOSFET 为 } 13.0 \text{ A})$$

$$P_{\text{HS,conducted,single}} = I_{\text{HS,RMS,single}}^2 \cdot R_{\text{ds,on}} = (6.5 \text{ A})^2 \cdot 5.8 \text{ m}\Omega = 0.245 \text{ W} \quad (\text{eq. 5})$$

$$P_{\text{HS,conducted,total}} = 2 \cdot P_{\text{HS,conducted,single}} = 2 \cdot 0.245 \text{ W} = 0.490 \text{ W} \quad (\text{eq. 6})$$

低边 MOSFET 导通损耗

$$I_{\text{LS,RMS,single}} = 7.7 \text{ A} \quad (\text{对于单个 MOSFET, 对于两个并联的 MOSFET 为 } 15.4 \text{ A})$$

$$P_{\text{LS,conducted,single}} = I_{\text{LS,RMS,single}}^2 \cdot R_{\text{ds,on}} = (7.7 \text{ A})^2 \cdot 5.8 \text{ m}\Omega = 0.344 \text{ W} \quad (\text{eq. 7})$$

$$P_{\text{LS,conducted,total}} = 2 \cdot P_{\text{LS,conducted,single}} = 2 \cdot 0.344 \text{ W} = 0.688 \text{ W} \quad (\text{eq. 8})$$

肖特基二极管的死区时间损耗

在从高边到低边 MOSFET 的电流转换期间 (反之亦然), 所有 MOSFET 都关闭一段特定的时间, 称为“死区时间”。在此短时间内 (典型值为 20 ns), 电流流过低边 MOSFET 的体二极管。如果将额外的肖特基二极管与低边 MOSFET 并联放置, 则死区期间的电流会流过肖特基二极管, 因为它的正向电压 (典型值为 0.485 V) 低于体二极管 (典型值为 0.86 V)。使用肖特基二极管的另一个主要好处是避免体二极管的反向恢复损耗, 因为肖特基二极管没有反向恢复损耗。由于正向压降导致的死区时间损耗出现在肖特基二极管上, 必须考虑 $I_{\text{L,MIN}}$ (关闭低边 MOSFET) 和 $I_{\text{L,MAX}}$ (打开低边 MOSFET)。

$$P_{LS,deadtime} = V_{f,SK} \cdot t_{dead} \cdot f_{sw} \cdot (I_{L,min} + I_{L,max}) = 0.485 \text{ V} \cdot 20 \text{ ns} \cdot 410\text{kHz} \cdot (19.83 \text{ A} + 20.17 \text{ A}) = 0.160 \text{ W} \quad (\text{eq. 9})$$

电容损耗

高边 MOSFET 的输出电容在 toff 期间被充电至 $(V_{in} - V_f)$ 。通过打开 MOSFET，导通电阻缩短了输出电容；因此，储存的能量被转化为热量。

$$P_{COSS} = \frac{1}{2} \cdot C_{OSS} \cdot (V_{in} - V_{f,SK})^2 \cdot f_{sw} = \frac{1}{2} \cdot 800 \cdot \text{pF} \cdot (12.0 \text{ V} - 0.485 \text{ V})^2 \cdot 410 \text{ kHz} = 0.022 \text{ W} \quad (\text{eq. 10})$$

与其他损耗相比，电容损耗最小，因此在以下计算中忽略不计。

开关损耗

开关损耗很难被估算，因为它取决于复杂的参数，例如栅极驱动器迹线的寄生电感。因此，在这种情况下，将使用不同的方法来测定。如果从总损耗中减去所有已知和计算的损耗，则剩下的就是总开关损耗。当然，PCB 的铜电阻也会产生一些损耗，但由于大小未知和不占主导，它们也会被忽略。

$$P_{switching,total} = P_{loss,total} - P_{shunt} - P_{inductor} - P_{HS,conducted,total} - P_{LS,conducted,total} - P_{dead}$$

$$P_{switching,total} = 8.500 \text{ W} - 0.600 \text{ W} - 0.600 \text{ W} - 0.490 \text{ W} - 0.688 \text{ W} - 0.160 \text{ W} = 5.962 \text{ W} \quad (\text{eq. 11})$$

由于低边 MOSFET 的开关电压几乎为零 (漏极-源极电压等于 MOSFET 导通和关断时的二极管正向电压)，计算出的大部分开关损耗都是由高边 MOSFET 引起的。

高边 MOSFET 总损耗

$$P_{HS,total} = P_{HS,conducted,total} + P_{switching,total} = 0.490 \text{ W} + 5.962 \text{ W} = 6.452 \text{ W} \quad (\text{eq. 12})$$

低边 MOSFET 总损耗

$$P_{LS,total} = P_{LS,conducted,total} = 0.688 \text{ W} \quad (\text{eq. 13})$$

根据上述计算，高边 MOSFET 的总损耗比低边 MOSFET 高得多，因此可以假设高边 MOSFET 的升温远高于低边 MOSFET 的升温。图 8 显示了低边 MOSFET 在所有负载电流下的损耗小于 1.0 W，而高边 MOSFET 在 20.0 A 负载电流下的损耗大于 6.0 W。

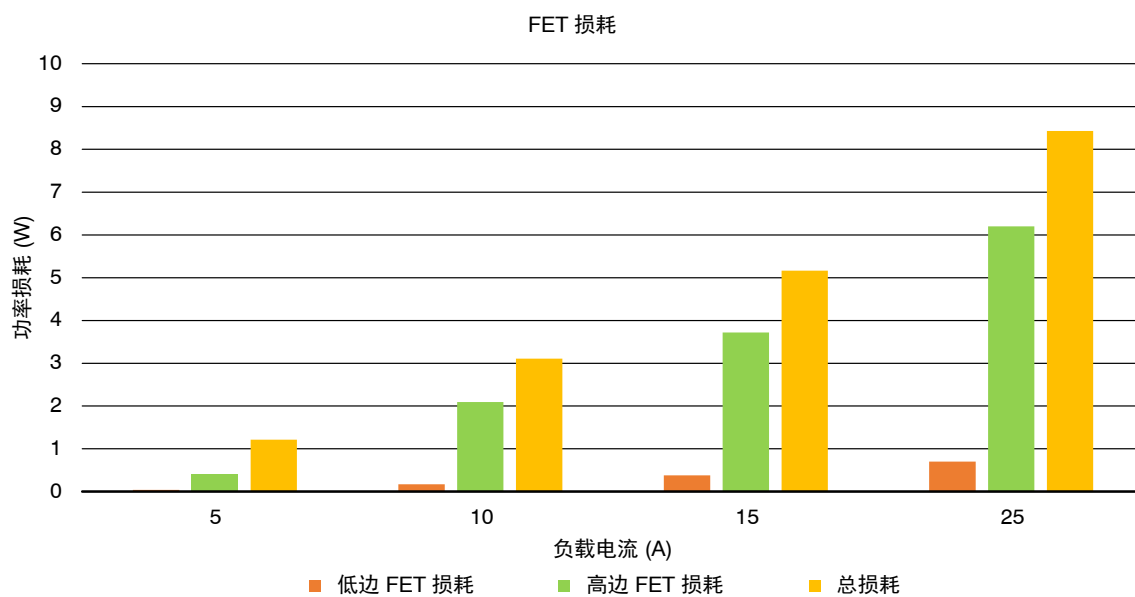


图 8. MOSFET 损耗

测量准备

使用了三种配置来评估电路板的热性能：

- 设置 #1：不带散热片
- 设置 #2：散热片在顶面
- 设置 #3：散热片在底面

对于所有三种配置，该电路板使用以下电气参数进行测试 (表 5)；此外，效率和总损耗是在给定的操作点测量的。

表 5. 操作点

输入电压	输出电压	输出电流	总损耗	效率
12.0 V	5.0 V	5.0 A	1.2 W	95.3%
12.0 V	5.0 V	10.0 A	3.1 W	94.1%
12.0 V	5.0 V	15.0 A	5.1 W	93.5%
12.0 V	5.0 V	20.0 A	8.4 W	92.2%

图 9 显示了高达 20.0 A 负载电流的效率图。

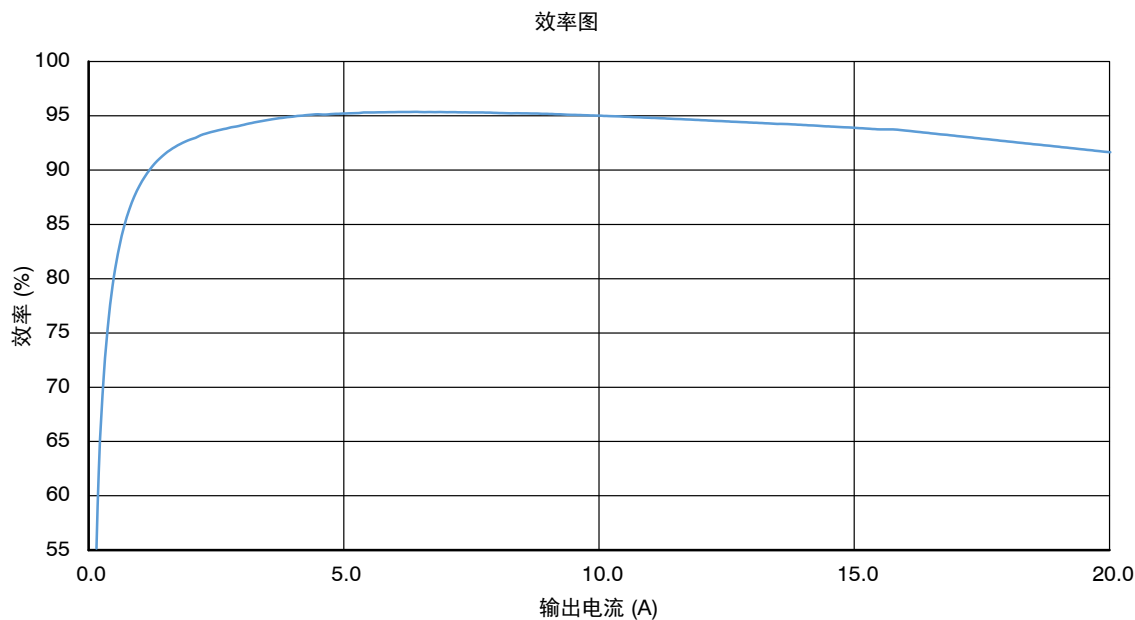


图 9. 效率图

为确保 MOSFET 两端的温度足够稳定以获得更准确的结果，在执行测量之前进行了一些试验性测量以了解 MOSFET 温度稳定后的时间跨度。对于所有测量，K 型热电偶和 HERNON 746 SET-04 导热胶用于将热电偶连接到 MOSFET 和 PCB。

此外，在给电路板加电之前，两个热电偶都连接到 MOSFET 并在室温下进行测量，以确保它们显示相同的温度。在 24.0°C 的环境温度下，两个传感器之间的偏差小于 0.3°C，这对于本次评估来说足够准确。

表 6 显示了 MOSFET 的温度在大约 20 到 25 分钟后稳定到一个稳定值。由于 20 分钟和 25 分钟之间的差异可以忽略不计，因此选择 20 分钟的时间跨度以折中记录每次测量之间的温度数据的持续时间和准确性。

表 6. 在没有散热片的情况下随时间变化的温度曲线

设置 #1 - 无散热片 - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$, $I_{out} = 20\text{ A}$		
延时	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5 分钟	71.3°C	79.5°C
10 分钟	77.8°C	85.0°C
15 分钟	80.7°C	85.1°C
20 分钟	81.6°C	86.6°C
25 分钟	81.8°C	87.0°C

表 7 显示了安装在 PCB 底面的 60 mm 散热片的温度。大约 25 分钟后温度稳定。由于在测量 25、30 和 35 分钟后温差很小，因此选择 30 分钟作为测量之间的最佳时间间隔。

表 7. 设置 #3 - 底面有 60 mm 散热片

设置 #3 - 底面有 60 mm 散热片 - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$, $I_{out} = 20\text{ A}$		
延时	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5 分钟	44.7°C	47.4°C
10 分钟	49.6°C	52.7°C
15 分钟	52.7°C	55.6°C
20 分钟	54.2°C	57.6°C
25 分钟	54.7°C	58.5°C
30 分钟	55.1°C	58.7°C
35 分钟	55.3°C	58.9°C

之前的部分指出了高边和低边 MOSFET 的损耗之间的显著差异。在 20.0 A 负载电流下，高边 MOSFET 的功耗约为 6.5 W，而低边 MOSFET 的功耗约为 0.7 W，基本上是前者的十分之一，因此可以假设高边和低边 MOSFET 之间的温差也很大。但正如测量结果所示，事实并非如此。所有 MOSFET 的温度都非常相似；偏差远低于 10%。

原因在于 PCB 的布局，它针对良好的导热性和散热性进行了优化。MOSFET 周围的众多过孔以及外层和内层 (四层 PCB, 35 μm 铜厚) 上的大面积铜平面有效地分散了来自 MOSFET 的热量，并将其散布在 PCB 内。这会导致功耗极低的低边 MOSFET 被高边 MOSFET 加热，而高边 MOSFET 是电路板的主要热源。高边和低边 MOSFET 之间的温差表示不同的功率损耗水平。尽管如此，由于差异并不像预期的那么大，根据损耗估计，这表明 PCB 具有出色的热性能。

测量值

设置 #1 – 没有散热片

PCB 上没有安装散热片，热电偶使用导热胶放置在一个高边和一个低边 MOSFET 上，如图 10 所示。该电路板具有 5 A、10 A、15 A 和 20 A 负载电流。在每个负载电流加载到电路板 20 分钟后，数据记录器会保存来自两个热电偶的温度信息。

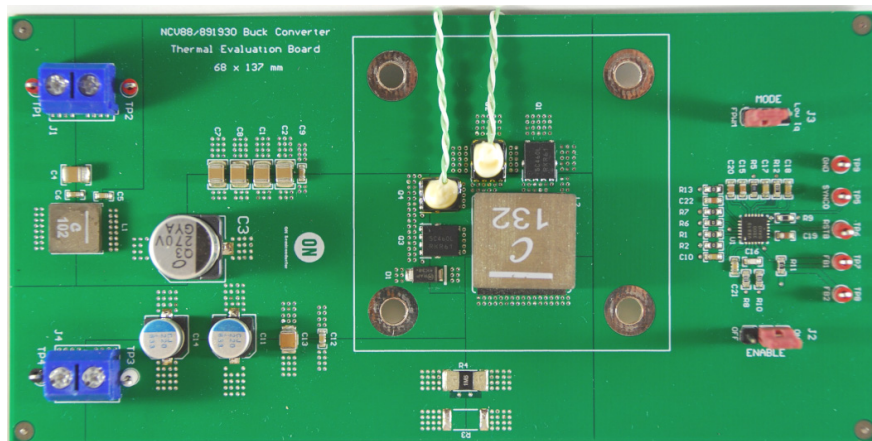


图 10. 设置 #1 – 无散热片

表 8 显示了四种不同输出电流的测量结果。

表 8. 设置 #1 – 无散热片

输出电流	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5.0 A	40.2°C	42.1°C
10.0 A	49.2°C	52.3°C
15.0 A	65.3°C	70.6°C
20.0 A	83.4°C	89.7°C

图 11 显示了温度的图形表示。通常，高边 MOSFET 比低边 MOSFET 稍热。随着负载电流的增加，两个 MOSFET 的温度也会升高。从 5.0 A 到 20.0 A，温度的升高不是线性的，因为虽然开关损耗线性增加，但导通损耗不是线性增加 ($P_{Conducted} = I_{RMS}^2 \cdot R_{DS,On}$)。

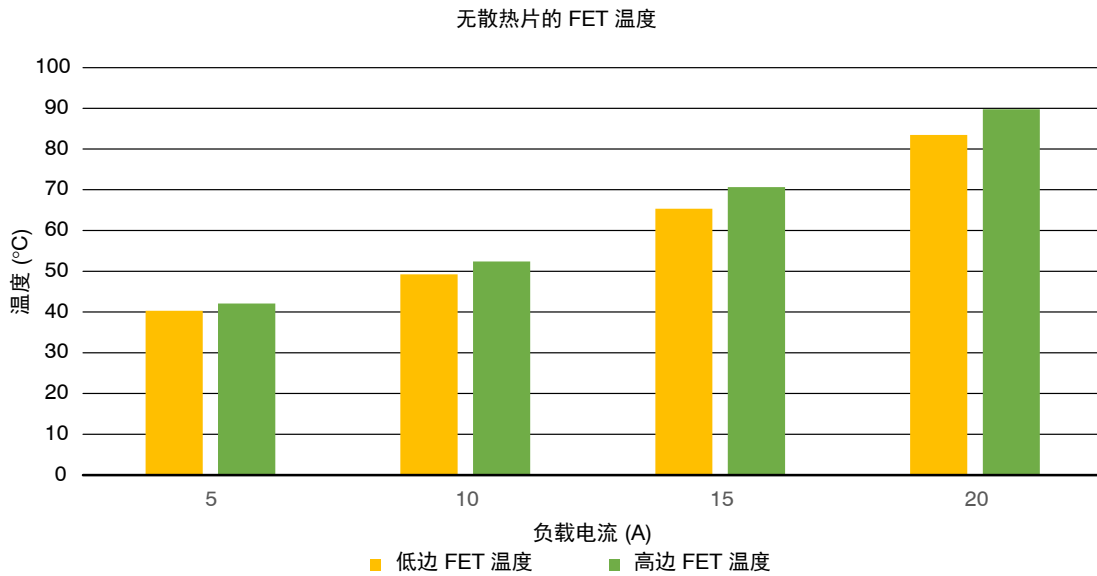


图 11. 设置 #1 - 无散热片

设置 #2 - 顶面有散热片

图 12 显示了在 PCB 顶面带有散热片的电路板。它被放置在高边和低边 MOSFET 的正上方，中间有一个间隙垫，以避免气隙并补偿任何粗糙度以最大限度地提高热导率。使用 10 mm、25 mm 和 60 mm 高度的鳍片散热片进行测量，每个负载电流之间有 30 分钟的时间间隔，以了解热导率和散热的影响。如之前部分所述，散热片使用螺钉和弹簧从 PCB 底面安装。

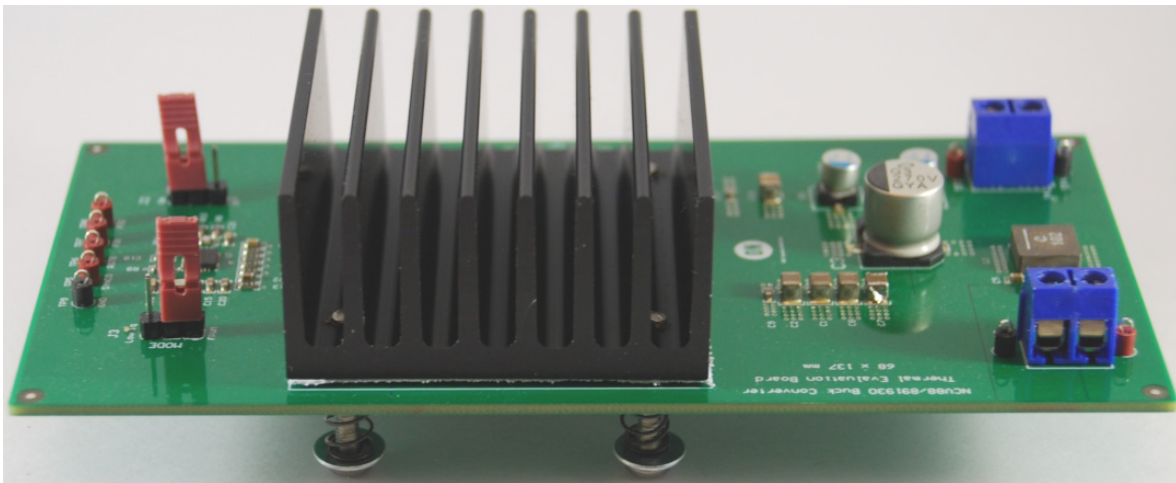


图 12. 设置 #2 - 顶面有散热片

将热电偶放在 MOSFET 顶面会在安装散热片时形成不平整的表面；因此它们被放置在高边和低边 MOSFET 之间，如图 13 所示。

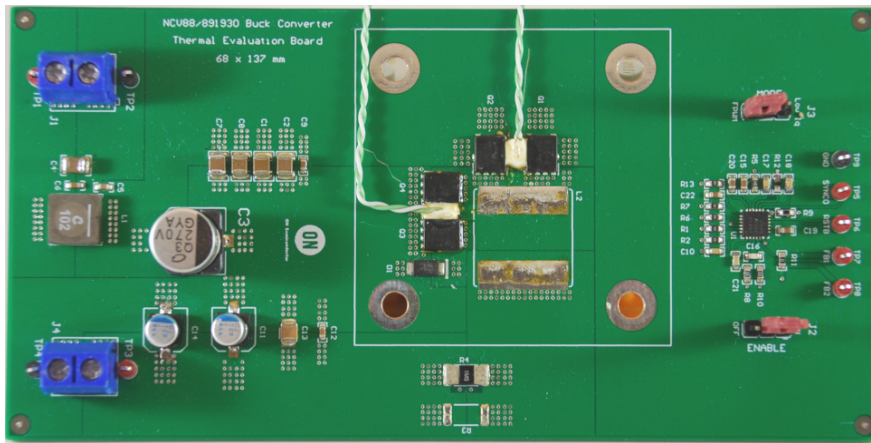


图 13. 热电偶的放置

表 9. 设置 #2 - 顶面有 10 mm 散热片

设置 #2 - 顶面有 10 mm 散热片 - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
输出电流	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5.0 A	37.0°C	37.5°C
10.0 A	45.9°C	46.0°C
15.0 A	58.0°C	58.1°C
20.0 A	75.1°C	75.2°C

表 10. 设置 #2 - 顶面有 25 mm 散热片

设置 #2 - 顶面有 25 mm 散热片 - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
输出电流	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5.0 A	34.3°C	35.2°C
10.0 A	40.0°C	40.8°C
15.0 A	49.5°C	50.9°C
20.0 A	61.0°C	63.6°C

表 11. 设置 #2 - 顶面有 60 mm 散热片

设置 #2 - 顶面有 60 mm 散热片 - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
输出电流	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5.0 A	34.1°C	34.7°C
10.0 A	39.1°C	40.2°C
15.0 A	45.7°C	47.4°C
20.0 A	53.8°C	57.1°C

使用 10 mm 散热片时，高边和低边 MOSFET 之间的温度差别不大。但是对于 25 mm 和 60 mm 的散热片，可以观察到高边和低边 MOSFET 之间微小但明显的温差。这种差异随着散热片的高度而增加。对该行为的解释是较小的散热片具有较低的质量和较高的热阻。这会导致散热片热饱和，并且，具有较高损耗的高边 MOSFET 由于其出色的导热性，会通过 PCB 加热低边 MOSFET。在没有散热片的情况下，在上一部分的测量中也可以看到这种效果 (表 8)。

通过增加散热片的高度和降低热阻，由于散热片更好的导热性，可以减低一个 MOSFET 对另一个 MOSFET 的影响。热量通过阻力最小的路径 (即散热片)，然后消散到环境中。如果没有小型散热片，热量主要通过 PCB 散发，导致所有 MOSFET 的温度相似，尽管功耗不同。

图 14 和图 15 显示了散热片的显著影响，尤其是在较高负载电流下。与没有散热片的测量相比，带有 60 mm 散热片的低边 MOSFET 在 20.0 A 负载电流下的温度降低了大约 30°C。与没有散热片的测量相比，带有 60 mm 散热片的高边 MOSFET 的温度降低了约 32°C。

对于 5.0 A 这样的低负载电流，四种设置之间的热差异相对较低，最大为 6°C，这使得因散热片而增加额外成本值得商榷。

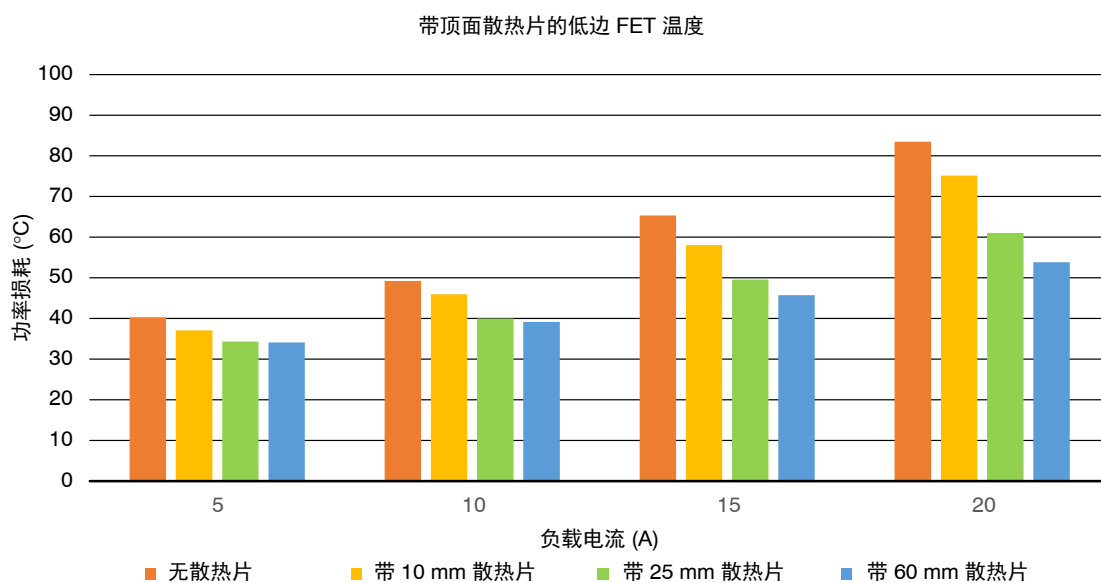


图 14. 设置 #2 - 带顶面散热片的低边 MOSFET 温度

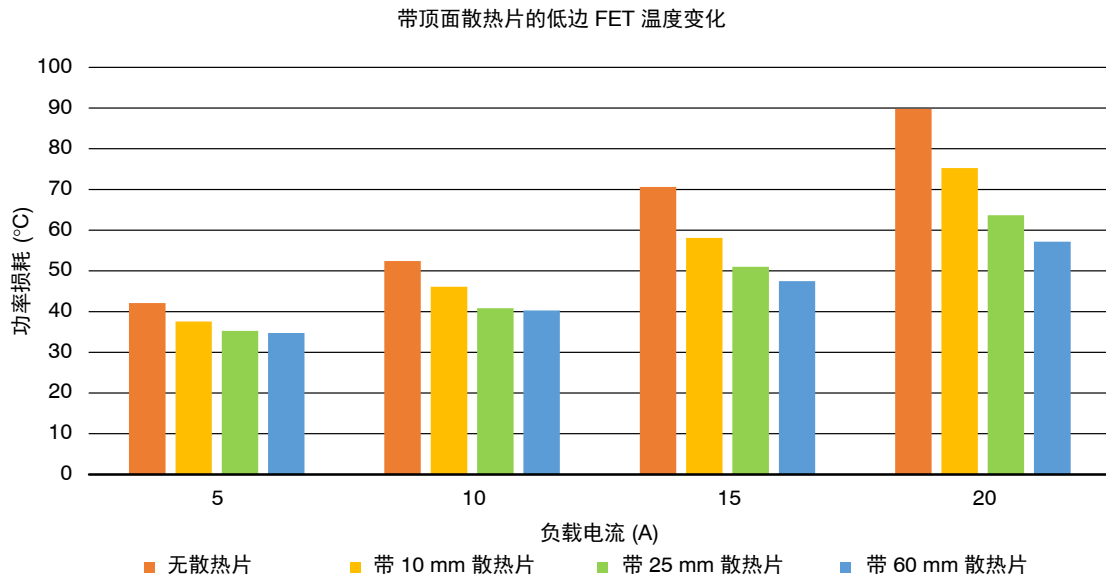


图 15. 设置 #2 - 带顶面散热片的高边 MOSFET 温度

图 16 和图 17 显示了在不同负载电流下，具有不同散热片的高边和低边 MOSFET 的温度变化。与可见的 10 mm 散热片相比，使用 60 mm 散热片的温度显著降低。在 20.0 A 负载电流下，可以注意到低边 MOSFET 的温度降低了大约 22°C，可以观察到，相比于 10 mm 散热片，带有 25 mm 散热片的低边 MOSFET 温度降低了大约 14°C。在较低的负载电流下也可以注意到类似的情况，但散热片的影响并不那么明显。

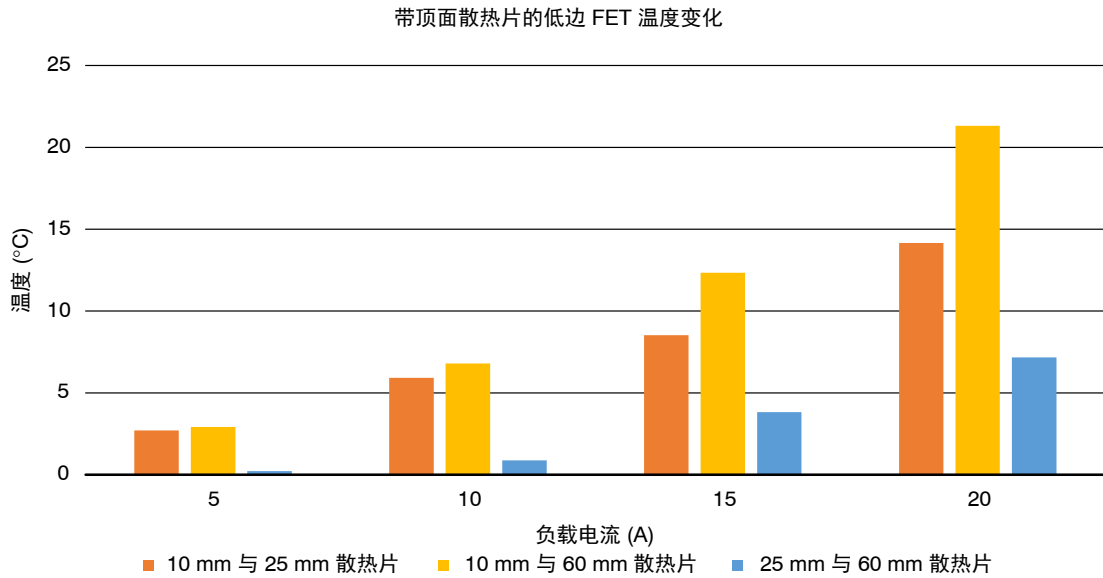


图 16. 设置 #2 - 带顶面散热片的低边 MOSFET 温度变化

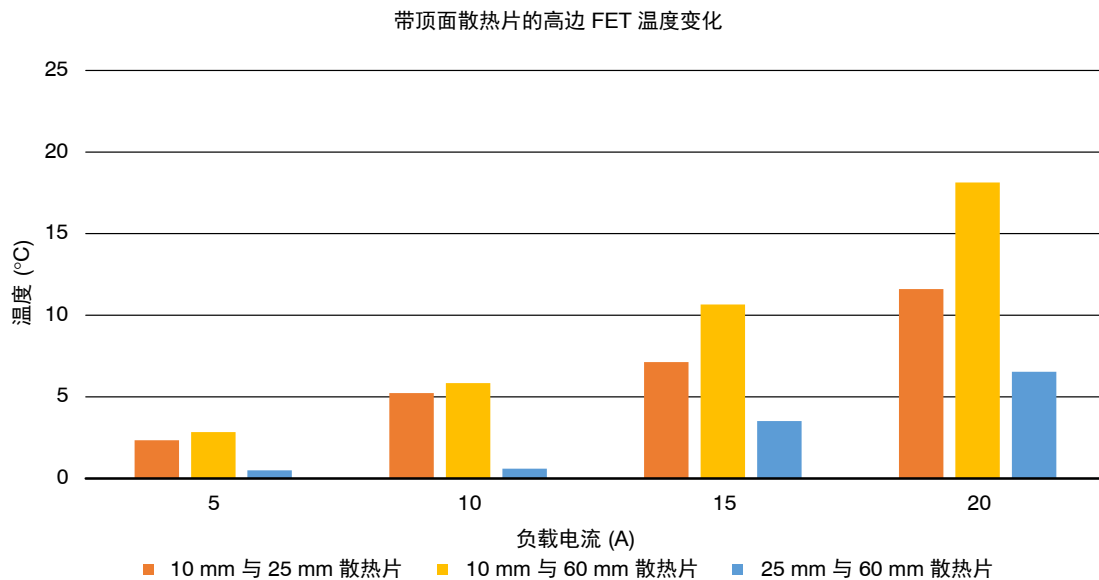


图 17. 设置 #2 - 带顶面散热片的高边 MOSFET 温度变化

相同的测量结果显示了在不同负载电流下，具有不同散热片的高边 MOSFET 的温度变化。类似的结果也可以在这里看到：相比于 10 mm 散热片，带 60 mm 散热片的高边 MOSFET 在 20.0 A 负载电流下温度低约 18°C。可以观察到，相比于 10 mm 散热片，带有 25 mm 散热片的高边 MOSFET 温度大约降低 12°C。

设置 #3 - 底面有散热片

电感器需要焊接在 PCB 的顶面，以便将散热片安装在底面。如图 19 所示，热电偶使用导热胶粘在高边和低边 MOSFET 的顶面。散热片使用与顶面安装设置相同的弹簧和螺钉安装在底面。此外，此配置在散热片和电路板之间放置了一个间隙垫，以优化热界面。与上一部分类似，使用了三种不同的散热片来分析热性能。

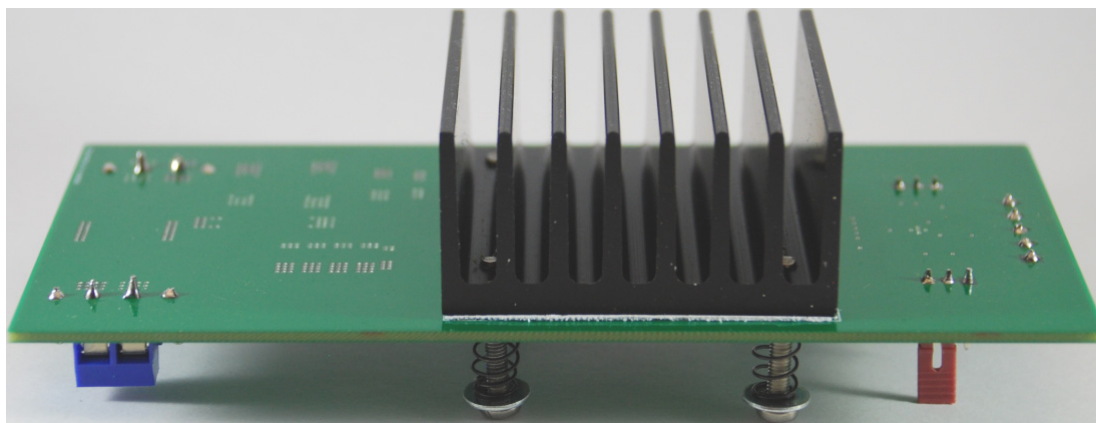


图 18. 设置 #3 - 底面有散热片

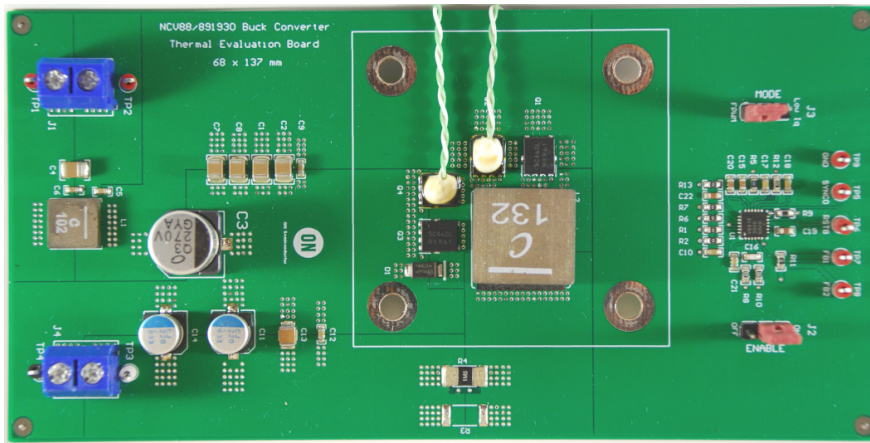


图 19. 热电偶的放置

表 12. 设置 #3 - 底面有 10 mm 散热片

设置 #3 - 底面有 10 mm 散热片 - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
输出电流	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5.0 A	37.3°C	38.7°C
10.0 A	43.9°C	47.2°C
15.0 A	53.9°C	59.2°C
20.0 A	70.6°C	77.7°C

表 13. 设置 #3 - 底面有 25 mm 散热片

设置 #3 - 底面有 25 mm 散热片 - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
输出电流	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5.0 A	35.4°C	36.1°C
10.0 A	39.9°C	41.6°C
15.0 A	47.2°C	50.0°C
20.0 A	60.2°C	64.3°C

表 14. 设置 #3 - 底面有 60 mm 散热片

设置 #3 - 底面有 60 mm 散热片 - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
输出电流	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5.0 A	34.5°C	34.9°C
10.0 A	39.2°C	40.6°C
15.0 A	45.5°C	48.0°C
20.0 A	54.8°C	58.6°C

对于所有三个散热片，在给定的负载电流下，高边 MOSFET 的升温明显比低边 MOSFET 的升温高。在之前的没有散热片和散热片安装在 PCB 顶面的测量中也有类似的情况。

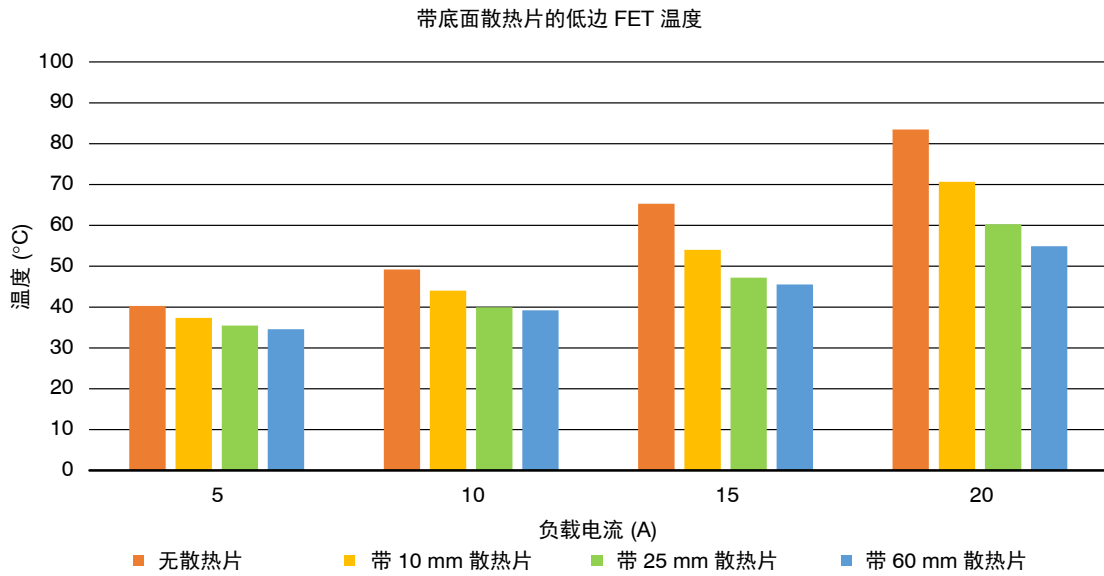


图 20. 设置 #3 - 带底面散热片的低边 MOSFET 温度

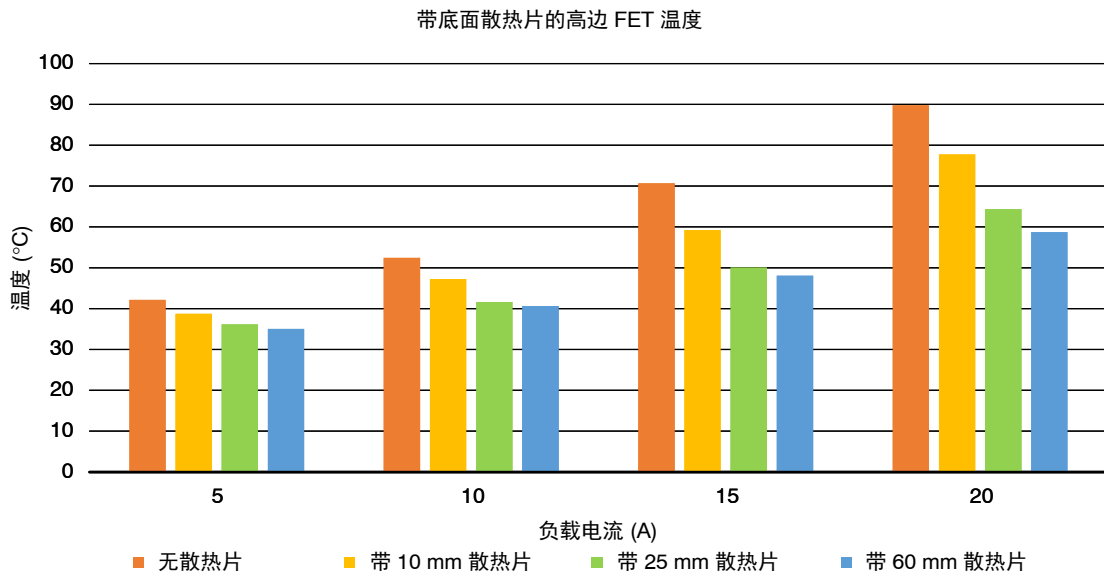


图 21. 设置 #3 - 带底面散热片的高边 MOSFET 温度

图 20 和 21 显示了使用不同散热片的低边和高边 MOSFET 的散热效果比没有使用散热片的配置有所改善。在 20.0 A 负载电流下，使用 60 mm 散热片的低边 MOSFET 比没有散热片时的温度低 29°C 左右。使用 60 mm 散热片的高边 MOSFET 比没有散热片的温度低约 31°C。

与之前的测试设置类似，低负载电流下的温差相对较小。

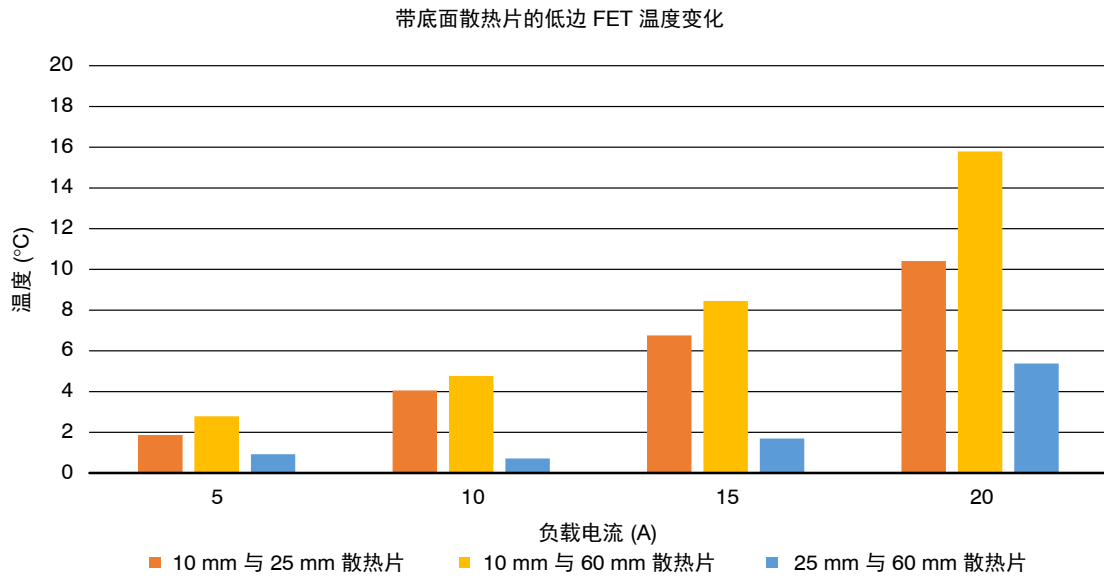


图 22. 设置 #3 - 带底面散热片的低边 MOSFET 温度变化

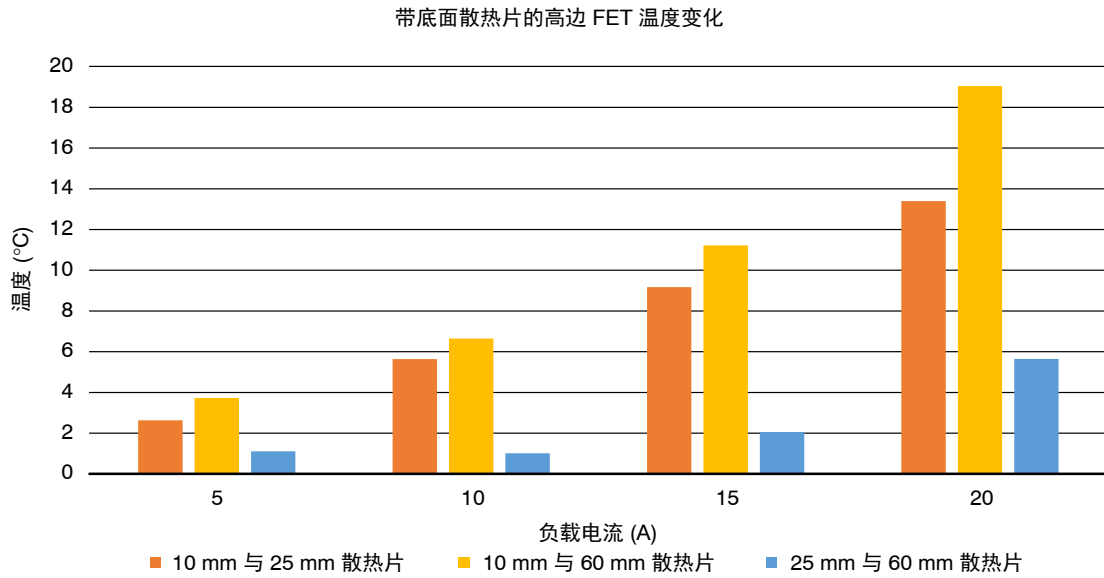


图 23. 设置 #3 - 带底面散热片的高边 MOSFET 温度变化

图 22 和 23 显示了在底面使用不同散热片的高边和低边 MOSFET 的温度变化。与之前在顶面具有散热片的配置一样，与 10 mm 散热片相比，具有 60 mm 散热片的高边 MOSFET 的温度显著降低了约 19°C。对于低边 MOSFET 也可以看到类似的情况。但 25 mm 和 60 mm 散热片之间的温差不如 10 mm 和 25 mm 之间的温差显著。此外，这种差异在较高负载电流时比在较低负载电流时更为重要。

有无散热片比较

图 24 和 25 显示了在没有和有顶面散热片的情况下 MOSFET 的温度变化。在较高电流下，没有散热片的低边 MOSFET 比带有顶面散热片的 MOSFET 更热。低边 MOSFET 在 20.0 A 时使用 60 mm 散热片比不使用散热片时大约低 30°C。同样，与没有散热片的 MOSFET 相比，带有 25 mm 散热片的 MOSFET 的温度降低了 22°C。

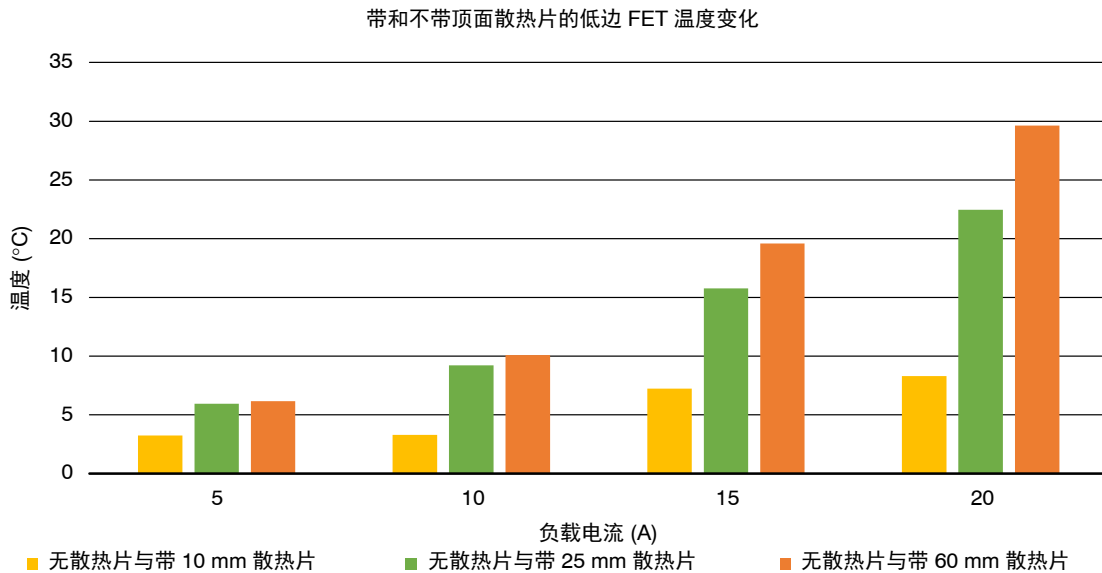


图 24. 带和不带顶面散热片的低边 MOSFET 温度变化

高边 MOSFET 在 20.0 A 时使用 60 mm 散热片比不使用散热片时大约低 33°C。同样，与没有散热片的 MOSFET 相比，使用 25 mm 散热片时，MOSFET 的温度降低了 26°C。

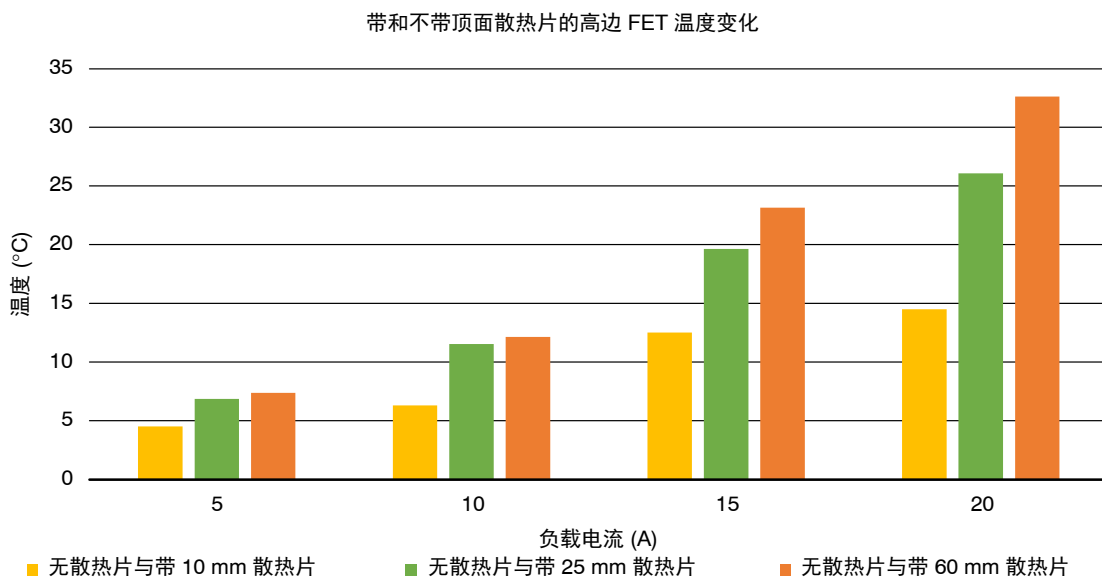


图 25. 带和不带顶面散热片的高边 MOSFET 温度变化

图 26 和 27 显示了在没有和有底面散热片的情况下 MOSFET 的温度变化。在较高电流下，没有散热片的低边 MOSFET 比有底面散热片的 MOSFET 更热。低边 MOSFET 在 20.0 A 时使用 60 mm 散热片比不使用散热片时大约低 29°C。同样，与没有散热片的 MOSFET 相比，带有 25 mm 散热片的 MOSFET 的温度降低了 23°C。

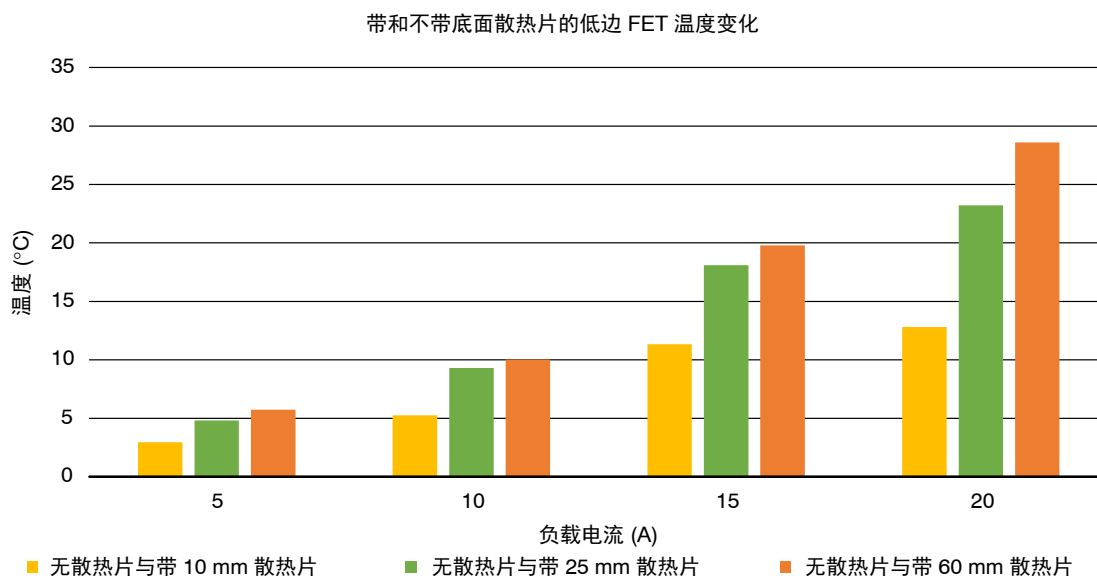


图 26. 带和不带底面散热片的低边 MOSFET 温度变化

高边 MOSFET 在 20.0 A 时使用 60 mm 散热片比不使用散热片时大约低 31°C。同样，与没有散热片相比，具有 25 mm 散热片的 MOSFET 的温度降低了 25°C。

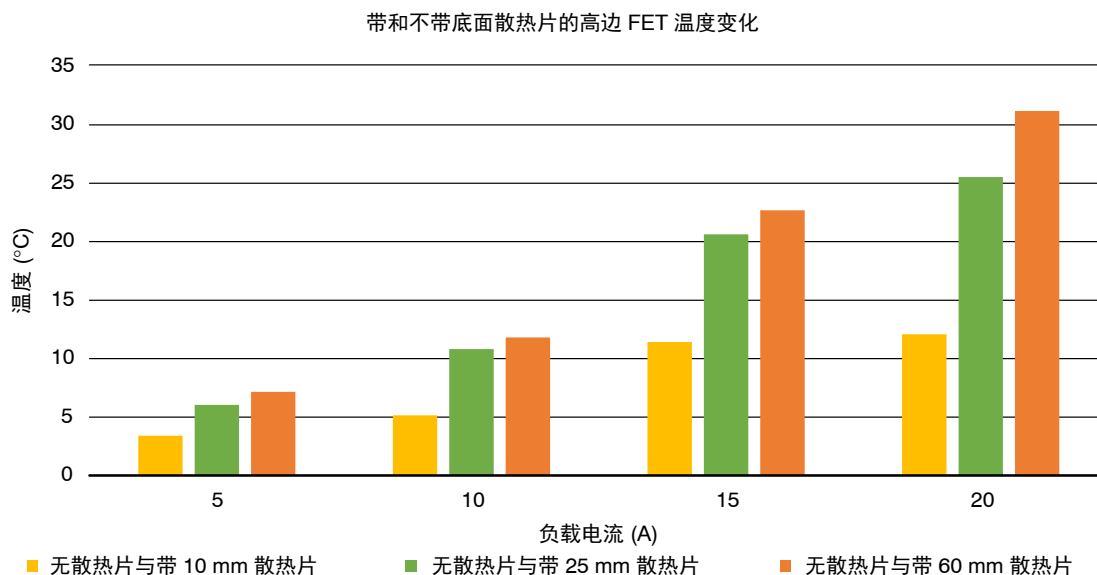


图 27. 带和不带底面散热片的高边 MOSFET 温度变化

间隙垫的影响

对于 60 mm 散热片，下面的测量结果是在 20.0 A 负载电流下使用 3 W/(m·K) 和 6 W/(m·K) 间隙垫记录的，以了解间隙垫厚度对热性能的影响。两种不同的间隙垫是 KERAFOL 86/300 SOFTTHERM 和 86/600 SOFTTHERM，如本白皮书开头的表 2 所示。

使用顶面散热片的情况下，当间隙垫从 3 W/(m·K) 改为 6 W/(m·K) 时 (热阻约为原来的一半)，观察到低边 MOSFET 的温度降低了 1.6%，高边 MOSFET 的温度降低了 3.5% (表 15)。

表 15. 带顶面散热片的间隙垫

顶面有 60 mm 散热片 - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$, $I_{out} = 20\text{ A}$			
	3 W/(m·K)	6 W/(m·K)	差异
低边 MOSFET 温度	53.8°C	52.9°C	-1.6%
高边 MOSFET 温度	57.1°C	55.1°C	-3.5%

使用底面散热片的情况下，测得低边 MOSFET 的温度降低约 7.6%，高边 MOSFET 的温度降低约 6.6% (表 16)。

表 16. 带底面散热片的间隙垫

底面有 60 mm 散热片 - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$, $I_{out} = 20\text{ A}$			
	3 W/(m·K)	6 W/(m·K)	差异
低边 MOSFET 温度	54.8°C	50.6°C	-7.6%
高边 MOSFET 温度	58.6°C	54.7°C	-6.6%

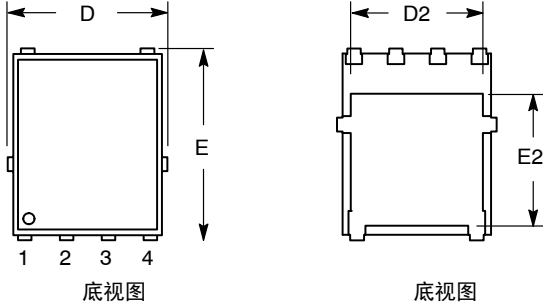
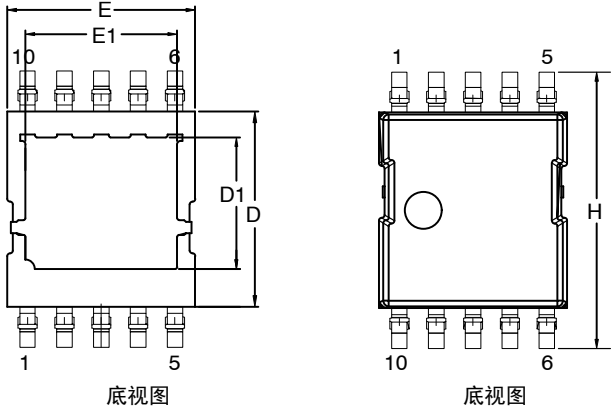
顶面裸露焊盘与底面裸露焊盘

正如突出显示的那样，PCB 针对良好的导热性和散热性进行了优化，可作为 MOSFET 的非常有效的散热片。在存在多个热源且 PCB 的散热能力有限的实际应用中，这种方法通常不可取。首选的散热方法是通过与 PCB 热连接的 ECU 外壳进行散热。采用“顶面散热”封装的 MOSFET 可实现热源 (MOSFET) 和散热片 (外壳) 之间的最低热阻，允许顶面 MOSFET 的裸露焊盘与散热片之间的直接热连接，同时最大限度地减少热量流入 PCB。

需要具有相同管芯但不同封装的 MOSFET 来直接比较它们的热性能。之前的所有测量均使用 NVMFS5C460NL，但此 MOSFET 在“顶面散热”封装变体中不可用。所以 [NVMFS5C450N](#) (SO-8FL 底面裸露焊盘) 和 [NVMJST3D3N04C](#) (“顶面散热”封装，顶面裸露焊盘) 被选择用于以下测量。

NVMJST3D3N04C 仅作为标准级器件提供，而 NVMFS5C460NL 是逻辑级器件。在这种应用中，标准级器件的效率预计会略低于逻辑级器件。尽管如此，由于损耗并不大，因此只能比较热性能、NVMFS5C450N 和 NVMJST3D3N04C 的差异。

表 17. 封装概览

NVMFS5C450N	NVMJST3D3N04C
40 V, 最大 1.2 mΩ @ 10.0 V	40 V, 最大 1.2 mΩ @ 10.0 V
<p style="text-align: center;">SO-8FL (外壳 488AA)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div> <p style="text-align: center;">底视图 底视图</p> <p>☐☐:</p> <ul style="list-style-type: none"> • D: 5.15 mm (标称) • E: 6.15 mm (标称) • D2: 4.00 mm (标称) • E2: 3.65 mm (标称) • 塑料外壳表面积: 约 31.7 mm² • 裸露焊盘表面积: 约 14.6 mm² 	<p style="text-align: center;">TCPAK57 (外壳 760AG)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div> <p style="text-align: center;">底视图 底视图</p> <p>☐☐:</p> <ul style="list-style-type: none"> • D: 5.30 mm (标称) • E: 5.10 mm (标称) • D1: 3.57 mm (标称) • E1: 4.12 mm (标称) • H: 7.50 mm (标称) • 塑料外壳表面积: 约 27.0 mm² • 裸露焊盘表面积: 约 14.7 mm²

SO-8FL 中 NVMFS5C450N 顶面的塑料表面积为 31.7 mm²，与 TCPAK57 中 NVMJST3D3N04C 底面的塑料表面 (27.0 mm²) 相比稍大.两种器件的裸露焊盘大小大致相同。

高度为 25 mm 的散热片用于以下测量，以避免散热片的任何限制并最大限度地提高热性能以优化加热时的任何差异。

底面裸露焊盘 MOSFET 测量 (NVMFS5C450N)

表 18 和 19 显示了带和不带散热片的高边和低边 MOSFET (NVMFS5C450N) 的温度。散热片安装在 MOSFET 的顶面 (塑料外壳)。

表 18. NVMFS5C450N – 无散热片

NVMFS5C450N – 无散热片 – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
输出电流	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5.0 A	46.3°C	50.2°C
10.0 A	65.9°C	69.6°C
15.0 A	86.3°C	88.4°C
20.0 A	109.4°C	109.6°C

表 19. NVMFS5C450N – 顶面有 25 mm 散热片

NVMFS5C450N – 顶面有 25 mm 散热片 – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
输出电流	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5.0 A	40.0°C	41.9°C
10.0 A	47.9°C	50.8°C
15.0 A	58.7°C	62.0°C
20.0 A	69.5°C	73.0°C

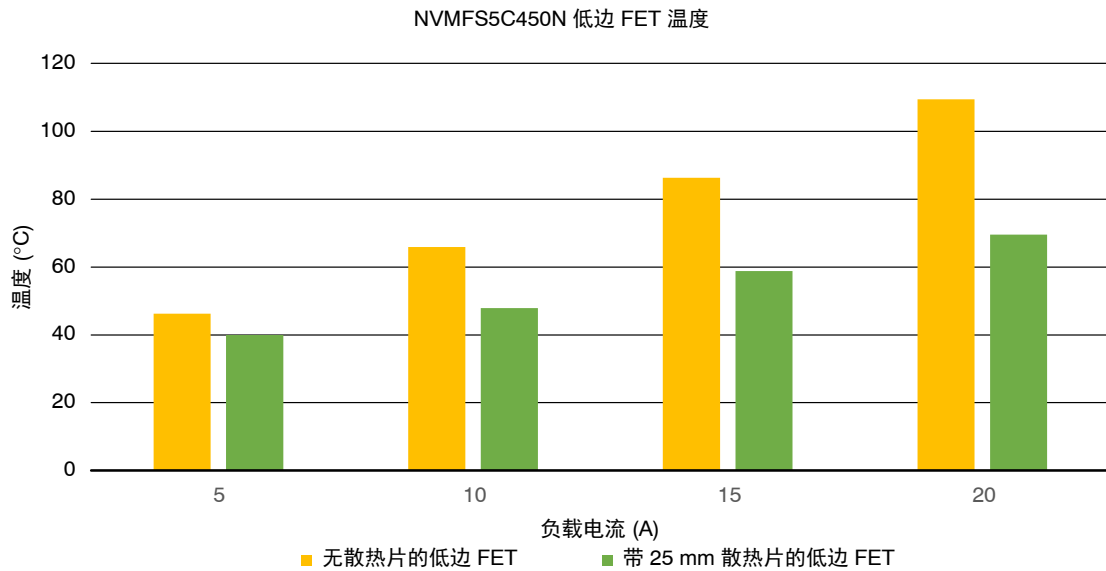


图 28. NVMFS5C450N – 带和不带散热片的低边 MOSFET 温度

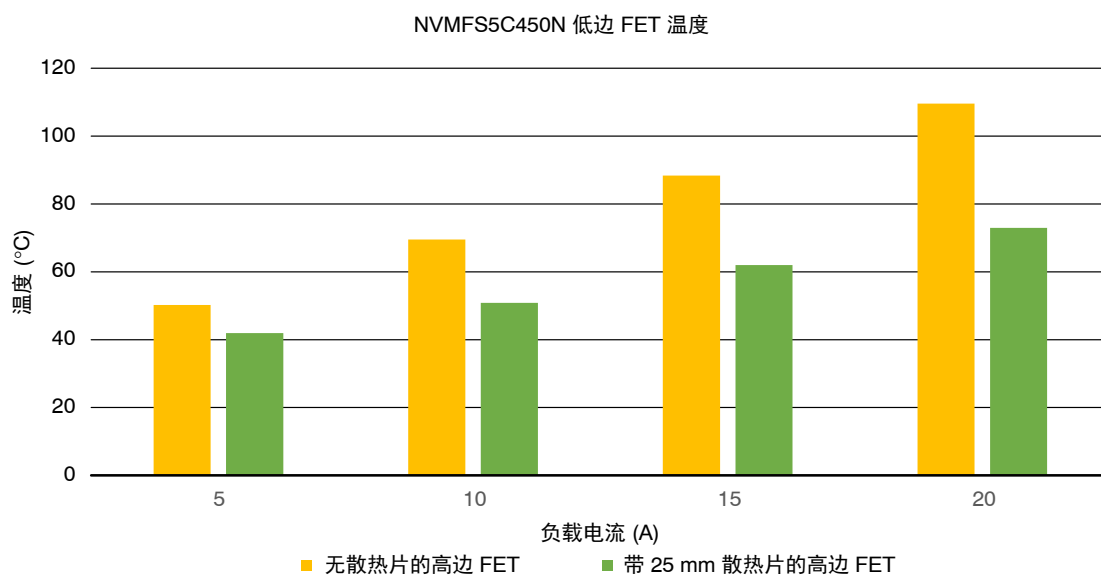


图 29. NVMFS5C450N – 带和不带散热片的高边 MOSFET 温度

图 28 和 29 显示了使用安装在 MOSFET 塑料顶面上的散热片改善低边和高边 MOSFET 的散热效果。

在 5.0 A 负载电流下，低边 MOSFET 的温度比没有散热片时低约 6°C，而高边 MOSFET 的温度低约 8°C。而在 20.0 A 负载电流下，低边 MOSFET 的温度比没有散热片时低约 40°C，而高边 MOSFET 的温度低约 37°C。

两项测量的热性能均在预期范围内，散热片可显著降低 MOSFET 温度。通常，由于栅极电荷较高，因此 NVMFS5C450N 的开关速度较慢，因此温度高于之前使用 NVMFS5C460NL 进行的测量结果。甚至导通电阻也略低。

顶面裸露焊盘 MOSFET 测量 (NVMJST3D3N04C)

表 20 和 21 显示了带和不带散热片的高边和低边 MOSFET (NVMJST3D3N04C) 的温度。散热片安装在 MOSFET 的顶面 (裸露焊盘)。

表 20. NVMJST3D3N04C – 无散热片

NVMJST3D3N04C – 无散热片 – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
输出电流	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5.0 A	45.2°C	47.1°C
10.0 A	60.5°C	61.0°C
15.0 A	82.7°C	78.4°C
20.0 A	113.1°C	103.7°C

表 21. NVMJST3D3N04C – 顶面有 25 mm 散热片

NVMJST3D3N04C – 顶面有 25 mm 散热片 - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
输出电流	低边 MOSFET 温度	高边 MOSFET 温度
5.0 A	37.6°C	37.1°C
10.0 A	49.7°C	48.3°C
15.0 A	61.3°C	57.0°C
20.0 A	73.5°C	66.9°C

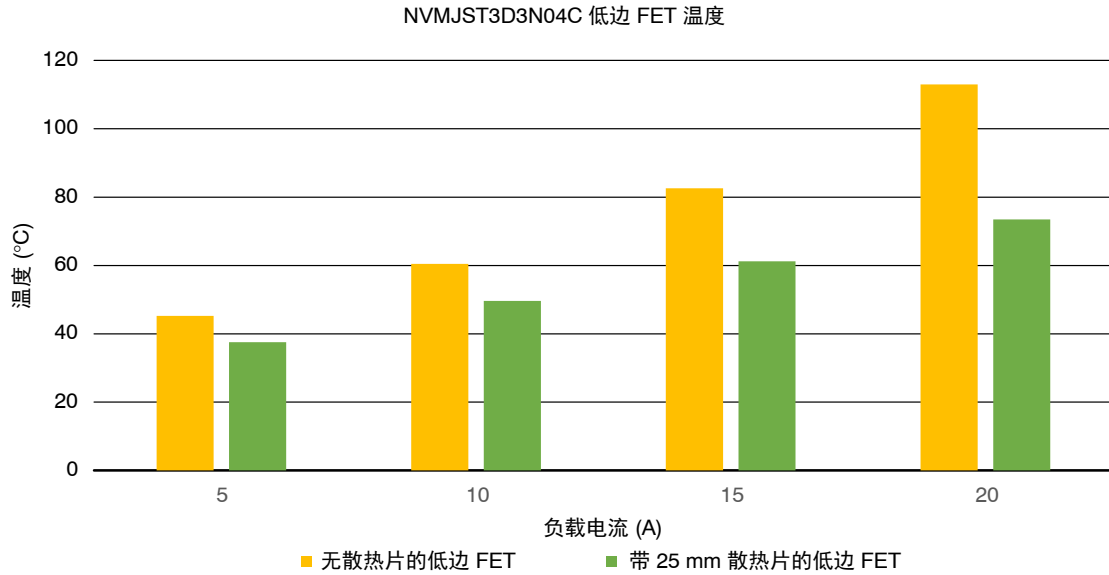


图 30. NVMJST3D3N04C – 带和不带散热片的低边 MOSFET 温度

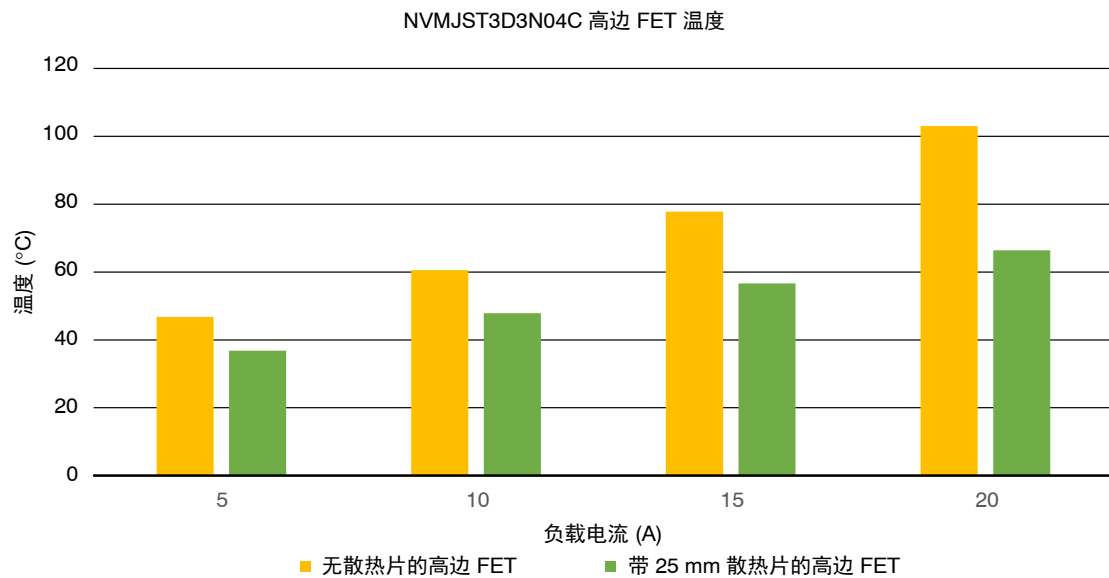


图 31. NVMJST3D3N04C – 带和不带散热片的高边 MOSFET 温度

图 30 和 31 显示了使用安装在 MOSFET 顶面裸露焊盘上的散热片改善低边和高边 MOSFET 的散热效果。

在 5.0 A 负载电流下，低边 MOSFET 的温度比没有散热片时低约 8°C，而高边 MOSFET 的温度低约 10°C。而在 20.0 A 负载电流下，低边 MOSFET 的温度比没有散热片时低约 40°C，而高边 MOSFET 的温度低约 37°C。

此外，在此测量中，热性能符合预期。由于 NVMJST3D3N04C 和 NVMFS5C450N 使用相同的管芯，损耗和发热高于之前使用 NVMFS5C460NL 的测量值，这是由于更高的栅极充电器导致开关损耗更高。

底面和顶面裸露焊盘之间的比较

图 32 比较了底面 (NVMFS5C450N) 和顶面 (NVMJST3D3N04C) 裸露焊盘的低边 MOSFET 温度，顶面有散热片。

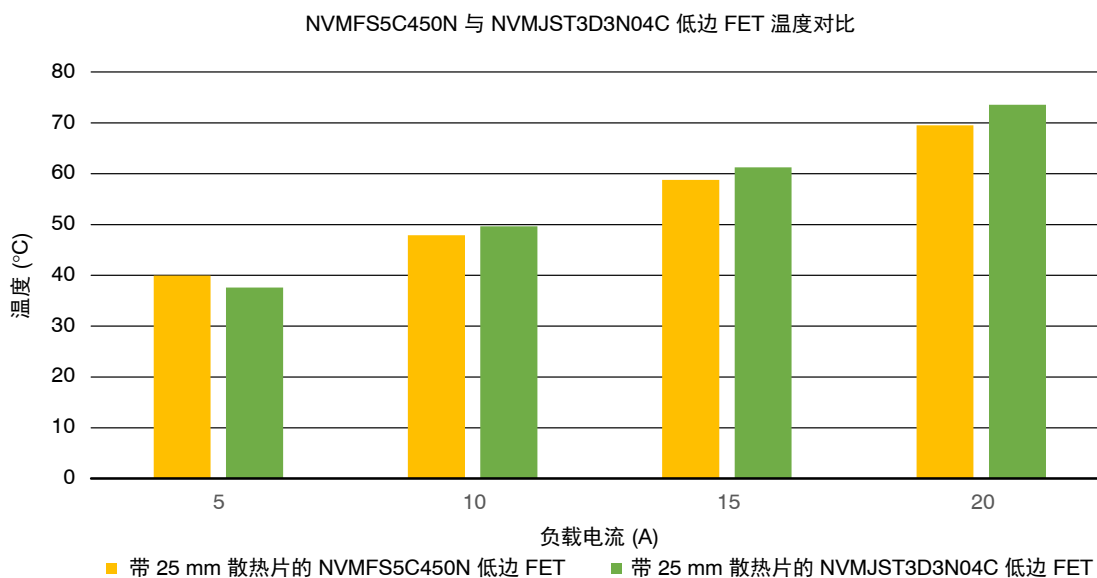


图 32. NVMFS5C450N 与 NVMJST3D3N04C - 低边 MOSFET 温度 (带散热片)

图 33 比较了底面 (NVMFS5C450N) 和顶面 (NVMJST3D3N04C) 裸露焊盘的高边 MOSFET 温度，顶面有散热片。

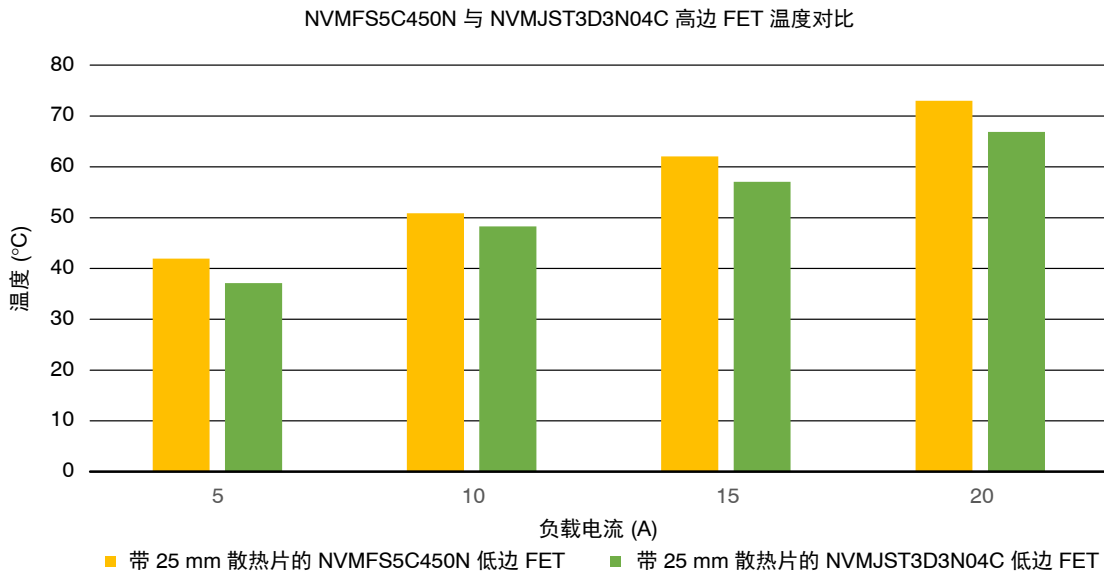


图 33. NVMFS5C450N 与 NVMJST3D3N04C – 高边 MOSFET 温度 (带散热片)

通常，此特定 PCB 和设置的热性能非常相似，与是否使用带有底面或顶面裸露焊盘的 MOSFET 以及 MOSFET 封装顶面的散热片无关。对于低边 MOSFET，底面裸露焊盘封装的性能略好于顶面裸露焊盘，对于高边 MOSFET，反之亦然。

对于带有底面裸露焊盘的 MOSFET，大量热量流入 PCB，优化为有效的散热片。MOSFET 顶面塑料表面上的散热片也有助于降低 MOSFET 温度。

顶面裸露焊盘的 MOSFET 在 PCB 和底面塑料表面之间的热耦合相对较差。但是，焊接到 PCB 上的引线也会让热量流入 PCB。MOSFET 顶面的裸露焊盘连接到散热片并有效地散发热量。

两种配置都通过 MOSFET 封装的底面和顶面进行散热。对于底面裸露封装，MOSFET 和 PCB 之间的热阻比 MOSFET 和散热片之间的热阻更低。对于顶面裸露封装，反之亦然；MOSFET 和散热片之间的热阻较低。这导致使用完全不同的配置可以实现相似的热性能，并且可以为两种类型的封装实施有效的散热。

结论

不同的测量结果和对比显示了连接到电源的散热片对 MOSFET 温度的影响。根据结果，可以得出以下结论对给定设置有效：

- 如果使用具有底面裸露焊盘的 MOSFET，同时使用经过热优化的 PCB 进行导热和散热，则散热片无论是安装在 PCB 的底面还是 MOSFET 的顶面，MOSFET 温度之间的差异仅为不到 3°C。
- MOSFET 温度取决于散热片尺寸。
 - ◆ 在 20.0 A 负载电流下，与没有任何散热片的设置相比，使用 60 mm 散热片的 MOSFET 温度大约低 30°C。
 - ◆ 与没有任何散热片的设置相比，使用 25 mm 散热片时，MOSFET 的温度大约降低 15 至 20°C。
 - ◆ 使用 10 mm 散热片时，MOSFET 的温度比没有任何散热片的设置低 10°C。
 - ◆ 该温度变化与三个散热片的热阻成正比。它还表明，如果使用热优化的 PCB 布局，散热片需要一定的质量和导热性才能显著降低温度。
- 25 mm 和 60 mm 散热片在 20.0 A 负载电流下的 MOSFET 温度差异为 6°C，低于最初预期。
- 在不超过 15.0 A 负载电流的情况下，25 mm 和 60 mm 散热片之间的 MOSFET 温差相对较低，只有 2°C 左右。负载电流高于 15.0 A 时，温差最大增加约 6°C。这表明需要择优选择散热片，以更好地兼顾成本和散热性能的改善。
- 具有顶面裸露焊盘和散热片的 MOSFET 可实现与底面裸露焊盘安装在经过热优化的 PCB 上且散热片位于封装顶面的 MOSFET 类似的热性能。如果要尽量减少流入 PCB 的热量，则带有顶面裸露焊盘的 MOSFET 是正确的选择，因为它们对安装在封装顶面的散热片具有最小的热阻。
- 所有测量都是一致的、可重复的，并且符合一般的理论预期。这证明电气和机械设置都运行正常且可靠。

当然，该测试装置与实际应用相去甚远，比如在带有散热片的定制铝外壳内部，电源属于复杂 ECU 的一部分。但是，它解释了不同参数的影响，例如散热片的热阻或间隙垫厚度对 MOSFET 温度的影响。它还清楚地表明，将散热片安装在热源顶面 (本例中为 MOSFET) 或 PCB 的另一面 (假设 PCB 布局经过热优化，所有层上都有散热孔和更大的铜面积，以允许散热流过 PCB) 可以达到类似的性能。

如果要尽量减少流入 PCB 的热量，则应使用顶面裸露焊盘连接到散热片的 MOSFET。

onsemi, **Onsemi**, and other names, marks, and brands are registered and/or common law trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba "**onsemi**" or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries. **onsemi** owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of **onsemi**'s product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. **onsemi** reserves the right to make changes at any time to any products or information herein, without notice. The information herein is provided "as-is" and **onsemi** makes no warranty, representation or guarantee regarding the accuracy of the information, product features, availability, functionality, or suitability of its products for any particular purpose, nor does **onsemi** assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using **onsemi** products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by **onsemi**. "Typical" parameters which may be provided in **onsemi** data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. **onsemi** does not convey any license under any of its intellectual property rights nor the rights of others. **onsemi** products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use **onsemi** products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold **onsemi** and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that **onsemi** was negligent regarding the design or manufacture of the part. **onsemi** is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

ADDITIONAL INFORMATION

TECHNICAL PUBLICATIONS:

Technical Library: www.onsemi.com/design/resources/technical-documentation
onsemi Website: www.onsemi.com

ONLINE SUPPORT: www.onsemi.com/support

For additional information, please contact your local Sales Representative at www.onsemi.com/support/sales