

Application Note

封装内磁性电流传感器的 PCB 热分析



Joseph Scherphorn, Carolus Andrews, Holly Roper

摘要

TMCS1123 等封装内磁性电流传感器是一种有创式电流测量方法，通过非磁性引线框使几安培的电流流经器件，从而导致封装内部产生热损耗。这些损耗通常受布局和印刷电路板的影响，因为额外的铜能够帮助从封装中散出热量，从而减轻系统的整体热响应。本文通过小样本实验，研究了各种封装内 TMCS 器件在不同铜厚度和 PCB 铜面积下的应用案例，以探讨这些铜增强设计如何帮助减轻应用中的热响应。

内容

1 简介.....	3
2 带有相应铜接线片的 TMCS EVM 的初始检查.....	4
2.1 单个 EVM.....	4
2.2 3oz 和 4oz 铜单面板的初始检查.....	5
3 试验设置与讨论.....	7
4 情况 1：覆铜重量.....	8
4.1 TMCS1123EVM 各种不同的铜重量.....	8
4.2 TMCS1143EVM 各种不同的铜重量.....	9
5 情况 2：多边形大小.....	12
5.1 TMCS1123EVM 多边形尺寸变化.....	12
5.2 TMCS1143EVM 多边形尺寸变化.....	13
6 总结.....	16
7 参考资料.....	16
8 修订历史记录.....	17

插图清单

图 2-1. TMCS1123EVM 单面板.....	4
图 2-2. TMCS1143EVM 单面板.....	5
图 2-3. 2 个样本器件的 TMCS1123EVM 热响应曲线、3oz 铜、>60A.....	6
图 2-4. 2 个器件的 TMCS1123EVM 热响应曲线、4oz 铜、>60A.....	6
图 2-5. 2 个样本器件的 TMCS1143EVM 热响应曲线、3oz 铜、>60A.....	6
图 2-6. 2 个器件的 TMCS1143EVM 热响应曲线、4oz 铜、>60A.....	6
图 3-1. TMCS1123EVM，总线配置.....	7
图 4-1. TMCS1123EVM 部分.....	8
图 4-2. 所有铜重量的 TMCS1123EVM 热响应曲线.....	9
图 4-3. TMCS1143EVM 部分.....	10
图 4-4. 所有铜重量的 TMCS1143EVM 热响应曲线.....	11
图 5-1. TMCS1123EVM，40% EVM 平面.....	12
图 5-2. 5 个器件的 TMCS1123EVM 热响应曲线、40% EVM 平面.....	12
图 5-3. TMCS1123EVM，60% EVM 平面.....	12
图 5-4. 5 个器件的 TMCS1123EVM 热响应曲线、60% EVM 平面.....	12
图 5-5. TMCS1123EVM，80% EVM 平面.....	13
图 5-6. 5 个器件的 TMCS1123EVM 热响应曲线、80% EVM 平面.....	13
图 5-7. 所有铜尺寸下的 TMCS1123EVM 热响应曲线.....	13
图 5-8. TMCS1143EVM，40% EVM 平面.....	14
图 5-9. 6 个器件的 TMCS1143EVM 热响应曲线、40% EVM 平面.....	14
图 5-10. TMCS1143EVM，60% EVM 平面.....	14

图 5-11. 6 个器件的 TMCS1143EVM 热响应曲线、60% EVM 平面.....	14
图 5-12. TMCS1143EVM , 80% EVM 平面.....	15
图 5-13. 6 个器件的 TMCS1143EVM 热响应曲线、80% EVM 平面.....	15
图 5-14. 所有铜尺寸下的 TMCS1143EVM 热响应曲线.....	15

表格清单

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

在设计有创电流感应方法时，必须注意确保热问题得到有效控制。无论热量是否持续存在于传统电流分流监测器的分流器中，还是仅仅是霍尔效应电流传感器等器件的引线框上出现的损耗，如果没有充分的规划和适当处理，热失控都可能迅速引发设计问题。

每个封装内 **TMCS** 器件都附带一个评估模块，旨在促进快速、方便的评估。这些器件是具备增强型隔离功能的霍尔效应电流检测监测器，配备多项可选附加功能，例如用于差分测量的内置基准输出、过流阈值功能和热诊断选项。该 **EVM** 采用 2 层结构，每层铜厚为 **4oz**。与许多必须在正常运行条件下优化内部功率损耗的器件一样，许多数据表参数都基于此特定布局和散热模型。这在类似的半导体器件中很常见，因为根据器件的布局，设备可能面临无数种使用场景，产品制造商通常希望在理想条件下展示器件，尽可能地消除布局对性能的影响。

因此，使用这类器件进行设计时常常面临一个挑战：其评估模块为器件提供了一个适用于广泛应用场景的专用评估用例，但通常不提供有关典型设计中存在限制（如空间限制或功率预算）的信息。本文简要探讨了两种影响器件性能的情况：调整与 **TMCS EVM** 相同拓扑的铜重量，以及在原评估模块的 **4oz** 层叠结构下减小铜平面尺寸，目的是了解这些决策如何能优化系统的成本和空间。

2 带有相应铜接线片的 TMCS EVM 的初始检查

每个 TMCS EVM 系列都附带一对基于其电流额定值的铜接线片，只要针对特定信号使用了正确规格的电缆，它们能够将电流安全地传输到 EVM。

- TMCS1123、TMCS1126、TMCS1127 和 TMCS1133 EVM 都附带 Panduit CB70-14-CY 90A 额定铜接线片。
- TMCS114x 系列 EVM 均附带 Penn Union SLU125 125A 额定铜接线片。

2.1 单个 EVM

图 2-1 显示了 [TMCS1123 用户指南](#) 中所述的、标准方向的 TMCS1123EVM 单面板在未连接电缆时的状态。

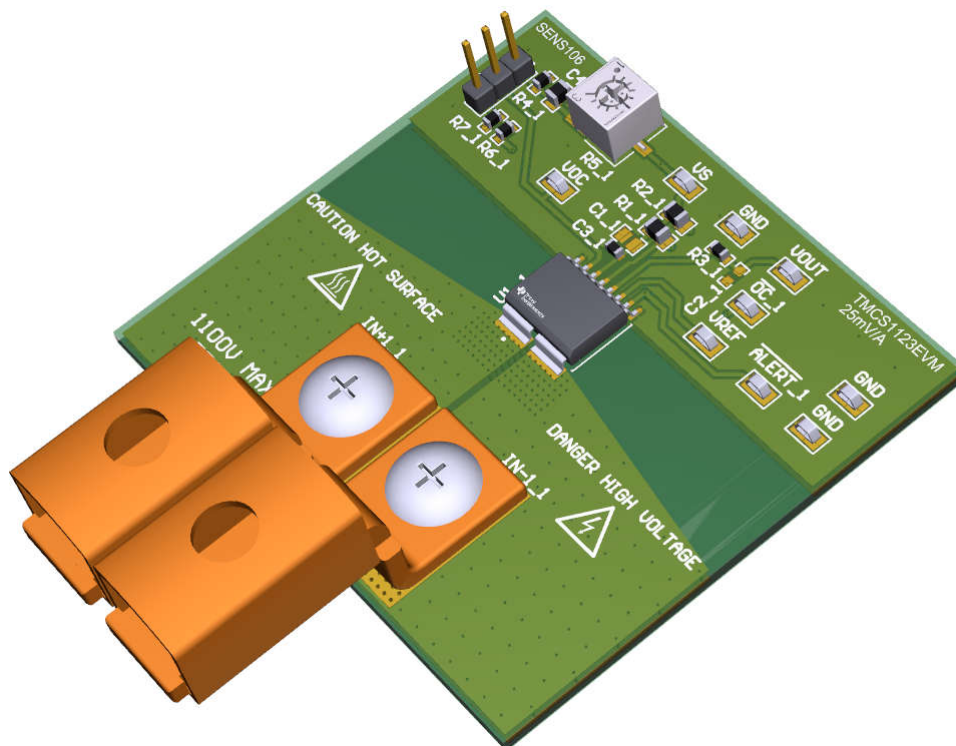


图 2-1. TMCS1123EVM 单面板

图 2-2 显示了 TMCS1143EVM 的单面板。

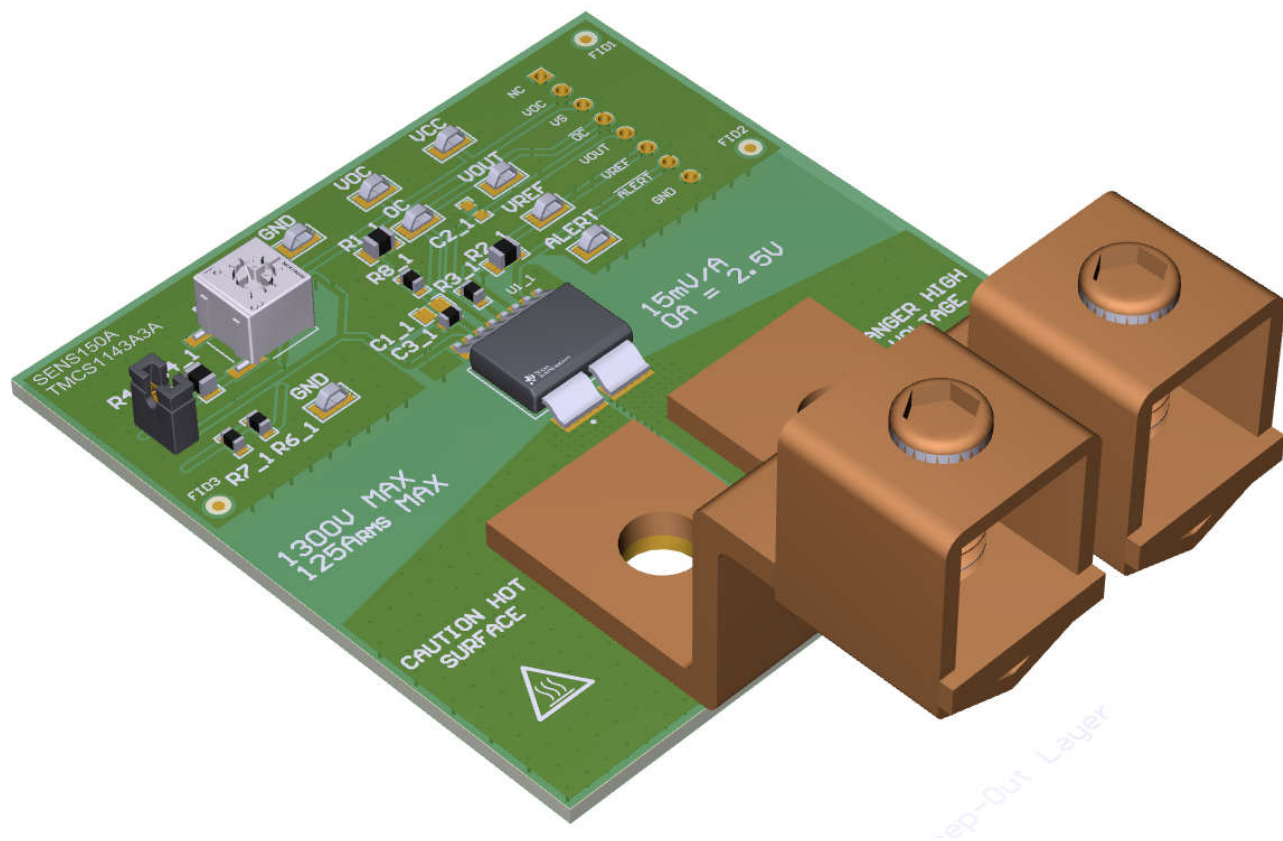


图 2-2. TMCS1143EVM 单面板

2.2 3oz 和 4oz 铜单面板的初始检查

该系统最初开发时，对镶板产品的单一版本进行了不同铜重量的研究，最终确定了目前可用的 4oz 最终版本。本节展示了在 3oz 和 4oz 铜板上对每个 TMCS 系列进行评估所得到的热性能结果。

必须注意的是，在构建规格范围内，电路板的铜厚度可能会因批次而异，这是由于以下几个因素造成的：基础铜厚度容差、供应商选择的起始铜厚度以及供应商使用的清洗工艺数量等等。因此，需留出足够的余量以确保器件在给定规范下运行（如覆铜重量部分所示），即使在潜在的最坏情况下，也预留了足够的余量。

2.2.1 TMCS1123EVM 3oz 和 4oz 单面板

此处显示的结果适用于 TMCS1123、TMCS1126、TMCS1127 和 TMCS1133。

图 2-3 和 图 2-4 分别展示了 3oz 和 4oz 覆铜的电路板性能测量结果。尽管两者性能相近，但最终选择了 4oz 覆铜，因为 EVM 在 60A 以上电流下的性能略有提升。

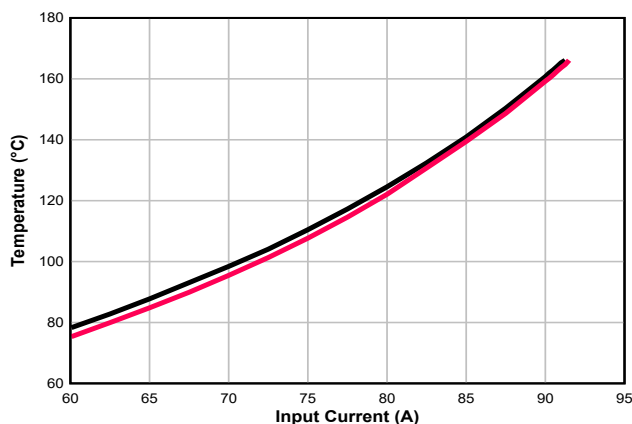


图 2-3. 2 个样本器件的 TMCS1123EVM 热响应曲线、3oz 铜、>60A

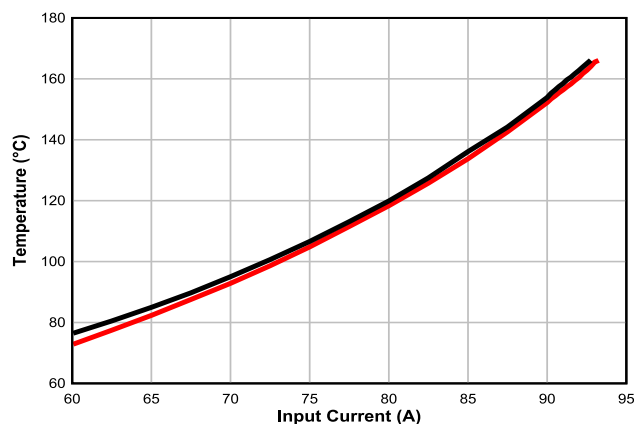


图 2-4. 2 个器件的 TMCS1123EVM 热响应曲线、4oz 铜、>60A

在器件的 80A 最大工作点，观察到 4oz 覆铜相较于 3oz 覆铜的测量平均点温度降低了约 5°C。如图所示，配备了 4oz 平面的 EVM 能够在结温达到 165°C 的绝对最大额定值之前提供高达约 93A 的电流容量。

2.2.2 TMCS1143EVM 3oz 和 4oz 单面板

此处显示的结果适用于 TMCS114x 系列。该图仅显示了 60A 以上的数据，从而突出了 4oz 电路板相对于 3oz 电路板的优势。

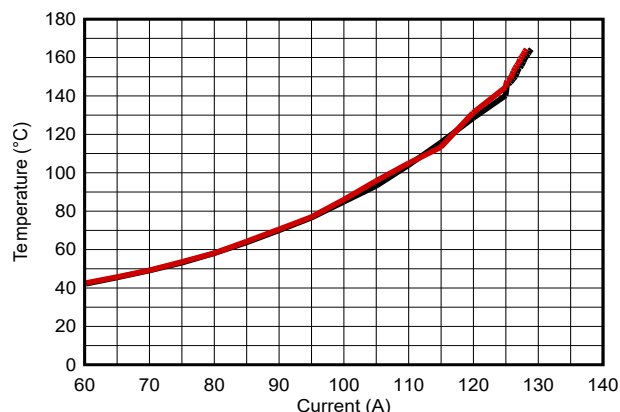


图 2-5. 2 个样本器件的 TMCS1143EVM 热响应曲线、3oz 铜、>60A

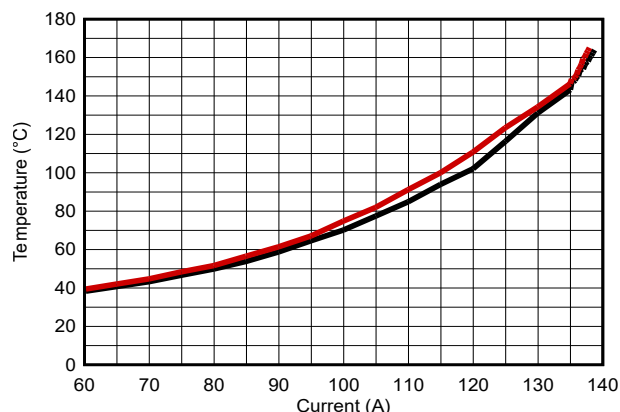


图 2-6. 2 个器件的 TMCS1143EVM 热响应曲线、4oz 铜、>60A

图表显示，在达到 165°C 的最大允许结温之前，4oz 电路板所能承受的电流比 3oz 电路板高出约 10A。

3 试验设置与讨论

本应用手册中进行实验的设置包括与被测器件串联的高电流负载，以及驱动负载所需的电源。所用的其中一块电路板的渲染图如 图 3-1 所示。从图表中可以看出，在每次测试中，对于给定的电路板重量或多边形尺寸，所有五个样品 (TMCS1143 需要六个样品) 均以串联方式同时运行，从而确保所有电路板承受相同的电流。

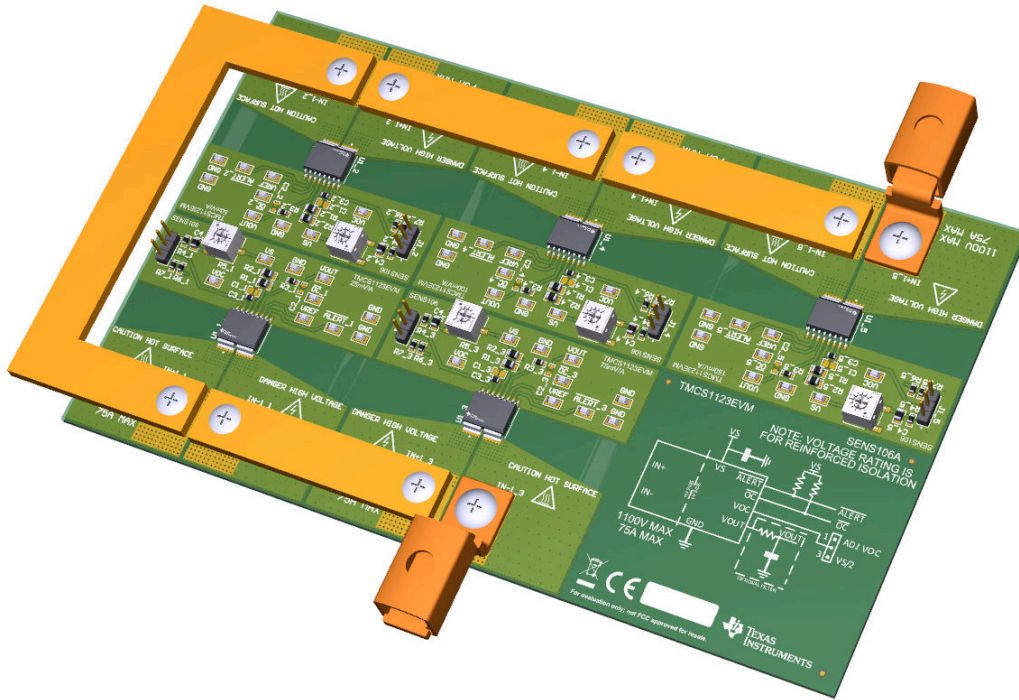


图 3-1. TMCS1123EVM，总线配置

使用 Python 对测试过程进行了自动化处理，因为热平衡需要较长时间以确保测量点之间达到真正热平衡。在每块电路板上执行了以下步骤来捕获曲线：

1. 为所有负载上电，并使用必要的电源为测试环路供电。
2. 在 DUT 中创建电流、从 0A 开始、以 5A 为增量步进。
3. 温度测量间隔为 1 秒。电流保持在当前水平、直到两次测量之间的残余温度小于 100m°C。
4. 移动下一个 5A 电流步进，重复步骤 2-3。
5. 重复步骤 2-4，直到一个器件达到 150°C。
6. 将步进间隔减少至每步 250mA，从上一个流程中实现的最大步进开始构建。
7. 温度测量间隔为 1 秒。电流保持在当前步进，直到两次测量之间的残余温度小于 100m°C。
8. 重复步骤 5-6，直到第一个器件达到 165°C。
9. 关闭所有电源，切断测试环路的电源。

需要注意的是，虽然使用了相同的 EVM 拓扑结构，但串联汇流条的加入有效改变了电路板的阻抗特性，并在整个 EVM 上产生了局部热特征。这减少了每个器件所能承受的总负载，但简化了整个电流范围内的测试过程。测试中还观察到，接线片和汇流条连接处的热效率至关重要，同时也需要保证铜平面的完整性。在组装过程中，需确保覆铜未受损，并保证连接紧密，以尽量降低热阻。

4 情况 1：覆铜重量

第一种研究案例是与铜重量有关的器件热性能。每次实验运行时，基础 EVM 的确切尺寸都保持不变，并将堆栈层更改为指示的铜重量。

4.1 TMCS1123EVM 各种不同的铜重量

本节的结果适用于 TMCS1123、TMCS1126、TMCS1127 和 TMCS1133。

图 4-1 展示了 TMCS1123EVM 的典型占用空间。

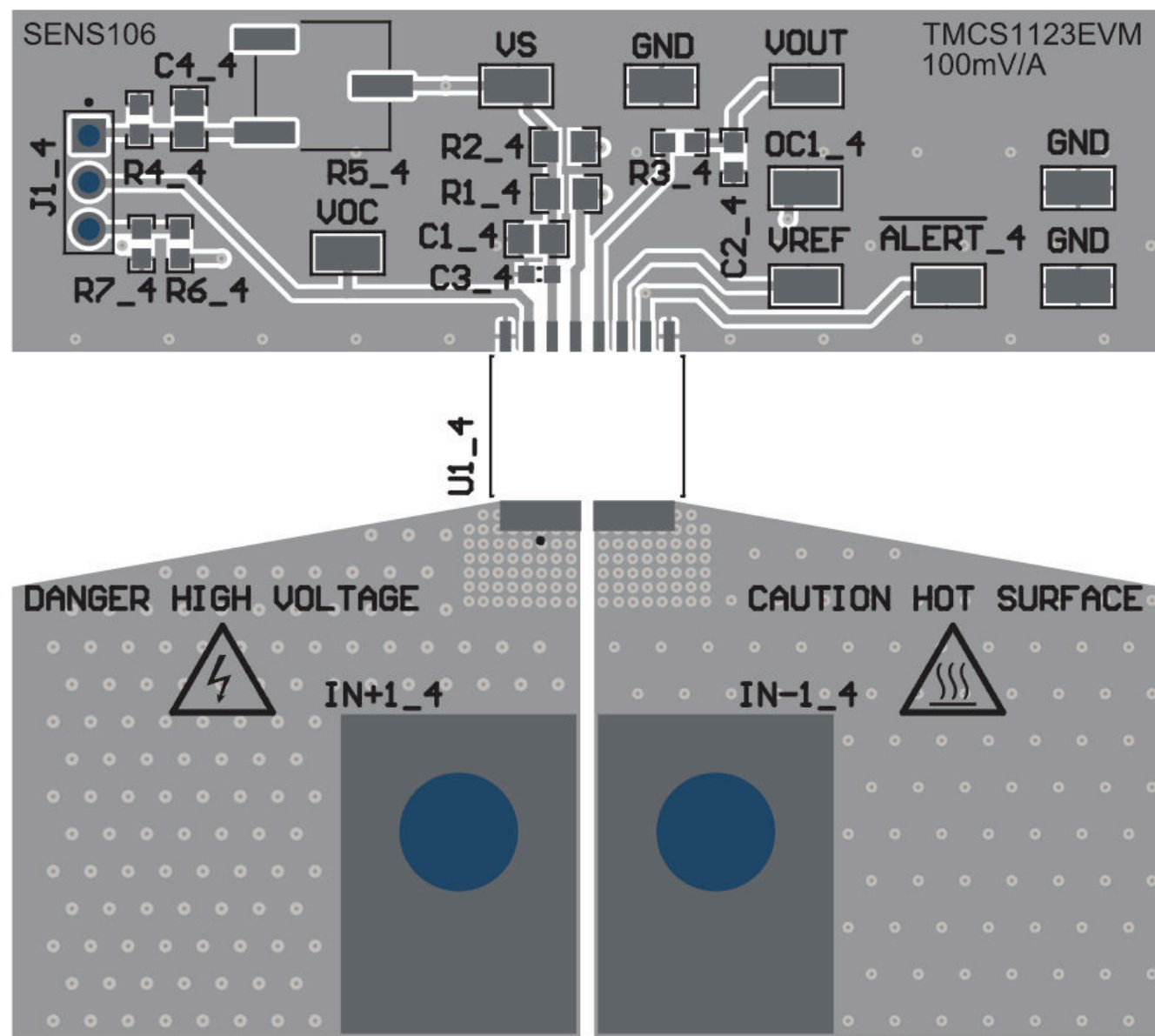


图 4-1. TMCS1123EVM 部分

图 4-2 检查了每种铜重量在电流增加时的热结果。正如预期的那样，铜重量越厚，电路板可以处理的电流就越大。

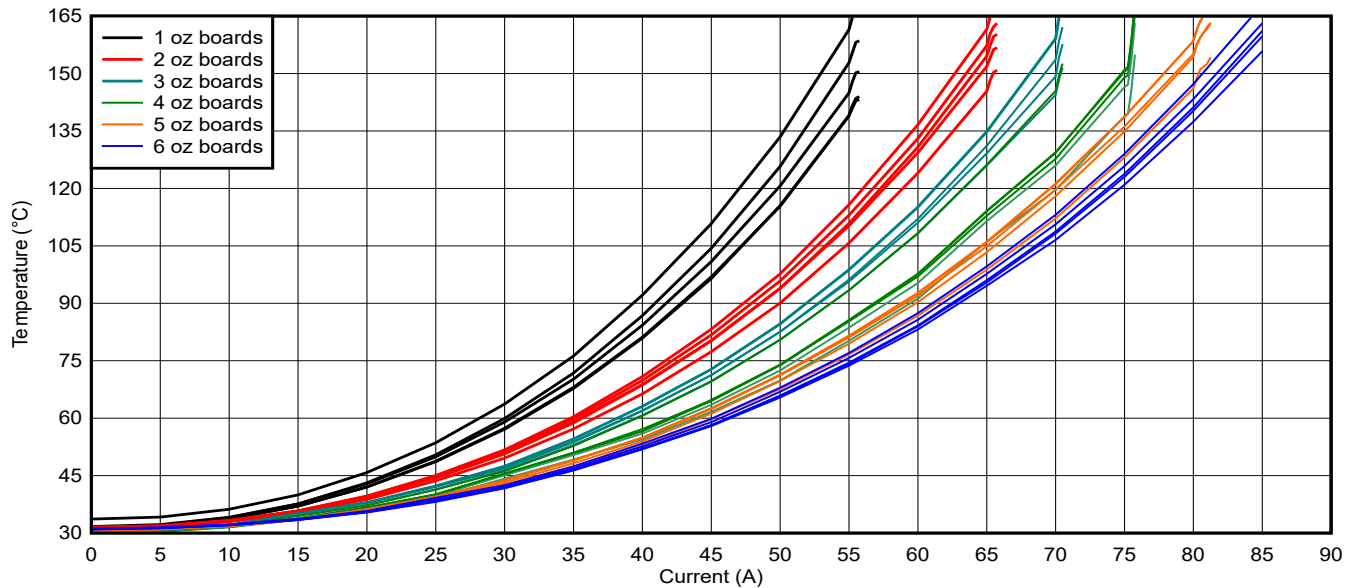


图 4-2. 所有铜重量的 TMCS1123EVM 热响应曲线

从该图中可以观察到以下情况：

- 铜厚度加倍会带来大致相同量级的性能提升，至少在厚度较低时是这样的。从 1oz 增加到 2oz，电流能力从 55A 提升到 65A，大约提高了 10A。当铜厚度达到 4oz 时，电流能力提升至 75A，再次提高了 10A，这是从 2oz 翻倍增加到 4oz 的结果。不过，6oz 铜能够提供 85A 的电流能力，根据相同的关系，预计 8oz 铜也能达到类似的性能。
- 在更高的铜厚度下，例如超过 4oz 时，我们开始看到性能提升的回报逐渐减少。虽然 6oz 相对于 5oz 有所提升，5oz 相对于 4oz 也有所提升，但这些曲线的分布更加紧凑，某些最差情况的器件性能甚至与下一个铜重量的最佳情况相当。
- 如前所述，电路板制造的公差和能力可能导致不同电路板之间的热特性存在差异。以 1oz 数据为例，当性能最差的器件温度达到 165°C 时，最佳性能器件仅为 145°C。因此，设计中必须留出足够的余量，以应对不同批次间的差异，确保设计成功。

4.2 TMCS1143EVM 各种不同的铜重量

该部分中的结果对 TMCS114x 系列有效。

图 4-3 展示了 TMCS1143EVM 的典型占用空间。

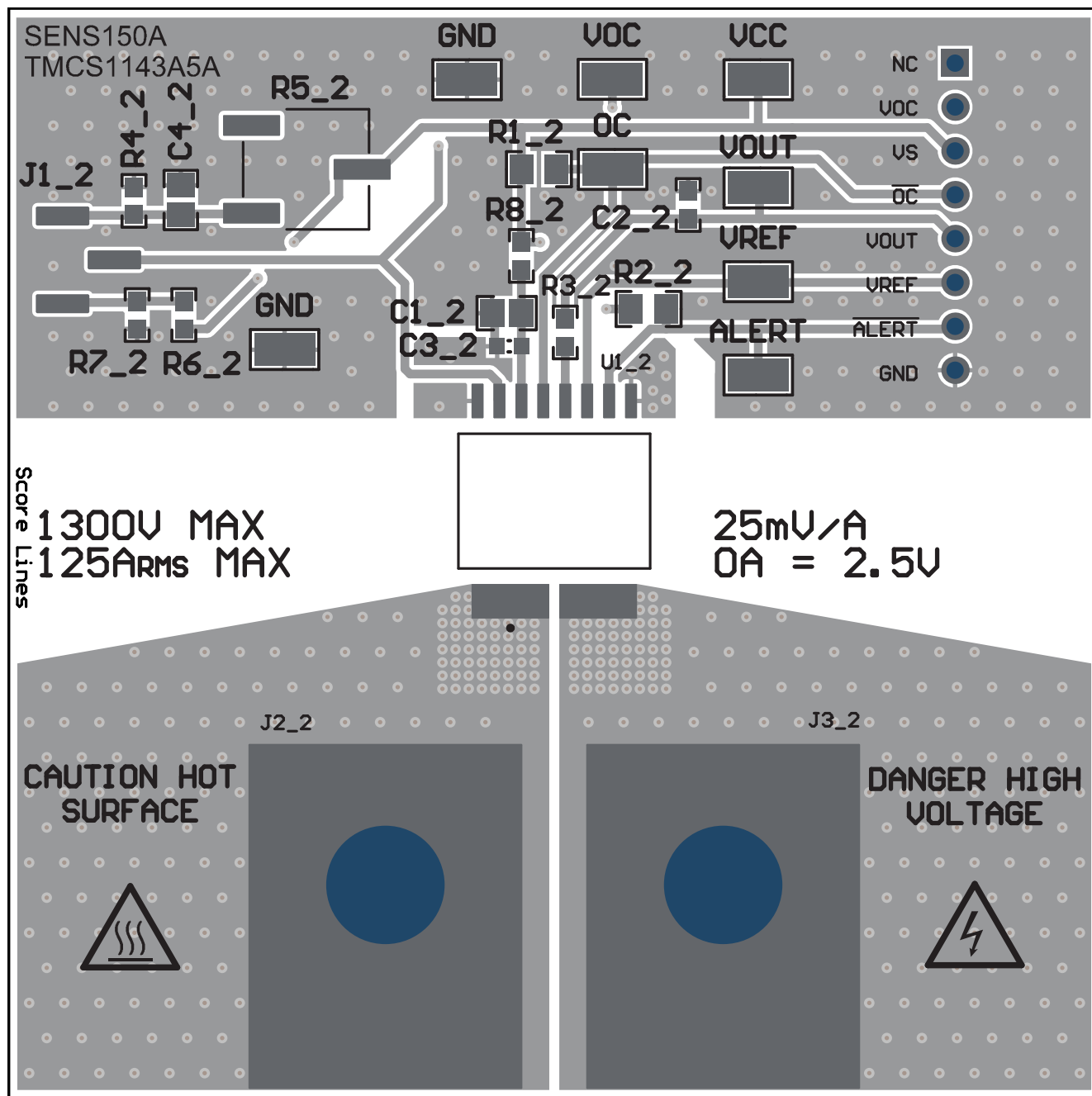


图 4-3. TMCS1143EVM 部分

图 4-4 展示了每种铜重量在电流增加时产生的热结果。正如预期的那样，铜重量越厚，电路板可以处理的电流就越大。

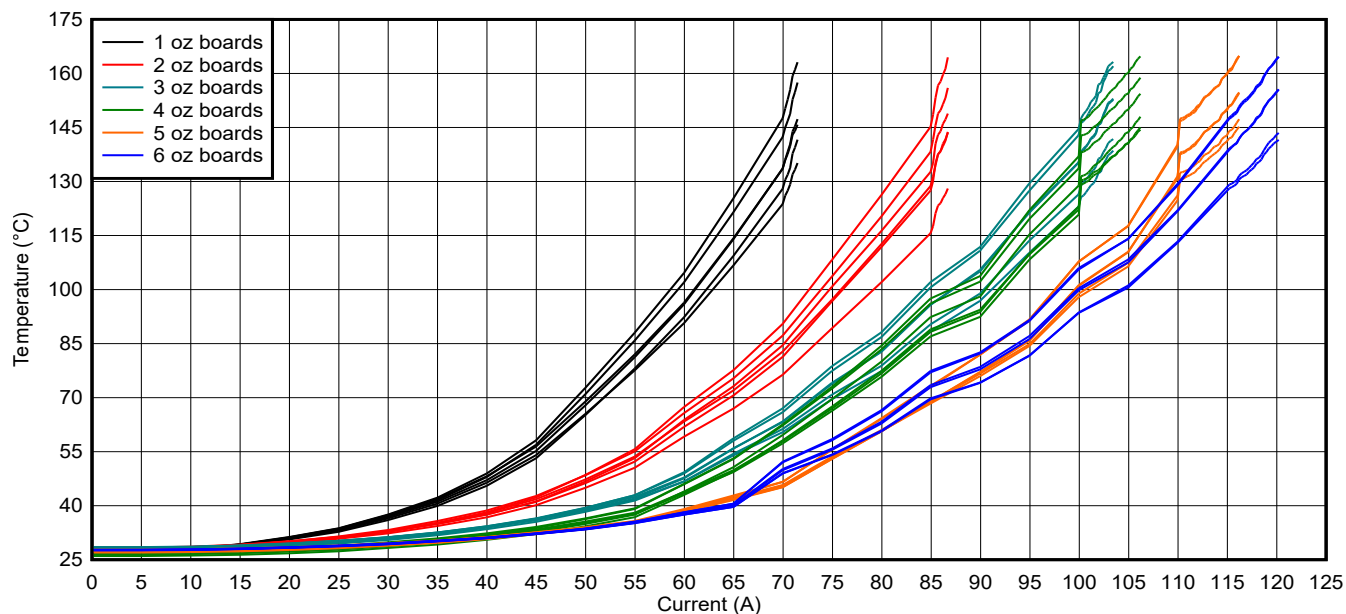


图 4-4. 所有铜重量的 TMCS1143EVM 热响应曲线

从该图中可以观察到以下情况：

- 铜的重量增加一倍，电流大约会提高 15A。
- 随着铜含量升高，曲线的分布范围会变窄。与 3oz 相比，4oz 的提升幅度更大；与 5oz 相比，6oz 的提升幅度也更大，但与 2oz 至 1oz 或 3oz 至 2oz 相比，这种提升幅度要小得多。
- 制造公差和工艺能力会导致不同电路板之间的热分布存在差异。在 2oz 电路板上，当一个电路板达到其最大结温 165°C 时，性能最佳的电路板仅在 130°C 的结温下运行。必须在设计中留出足够的余量来应对这些变化。

5 情况 2：多边形大小

析的第二种情况是，在相同电流扫描条件下减小多边形尺寸。从上面可以看出，4oz 铜重量剖面是本实验的起点，因为这是完整的 100% 平面拓扑。对于 TMCS1123EVM 而言，每个通向输入端的多边形 PCB 面积约为 900mm^2 ，相当于两个 2 层 4oz 过孔拼接平面的 1800mm^2 。根据这个基础计算，计算出该区域 40%、60% 和 80% 的比例，并将这些区域从 PCB 中移除，同时保持设计的 PCB 多边形覆铜形状。对于每个接受测试的 EVM 系列，都采用了相同的操作流程，因为它们的输入多边形面积起始值并不相同。

5.1 TMCS1123EVM 多边形尺寸变化

本节的结果适用于 TMCS1123、TMCS1126、TMCS1127 和 TMCS1133。

图 5-1、图 5-3 和 图 5-5 显示了移除铜后的拓扑，而 图 5-2、图 5-4 和 图 5-6 显示了相应比率下的器件性能。

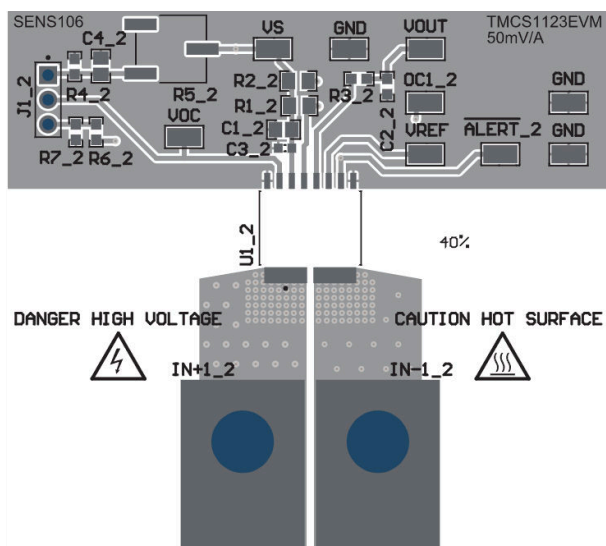


图 5-1. TMCS1123EVM，40% EVM 平面

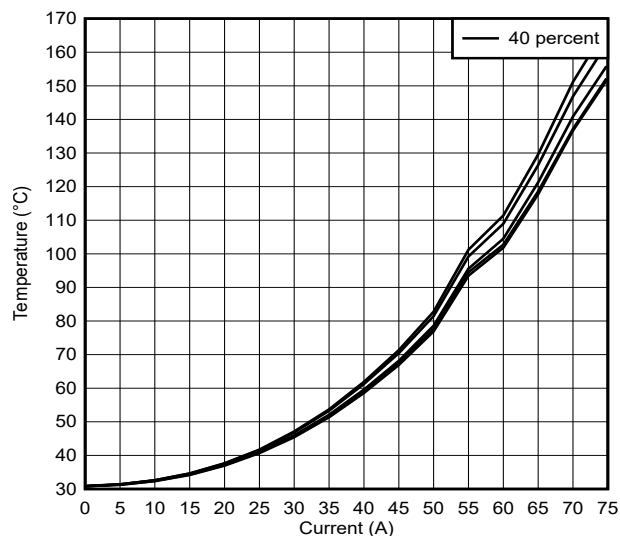


图 5-2. 5 个器件的 TMCS1123EVM 热响应曲线、40% EVM 平面

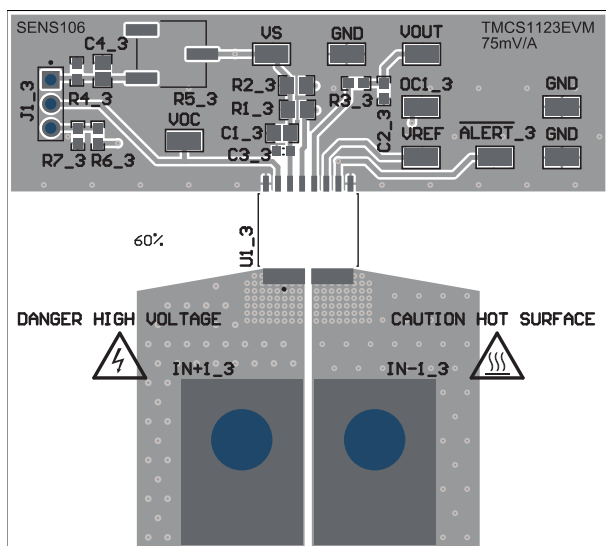


图 5-3. TMCS1123EVM，60% EVM 平面

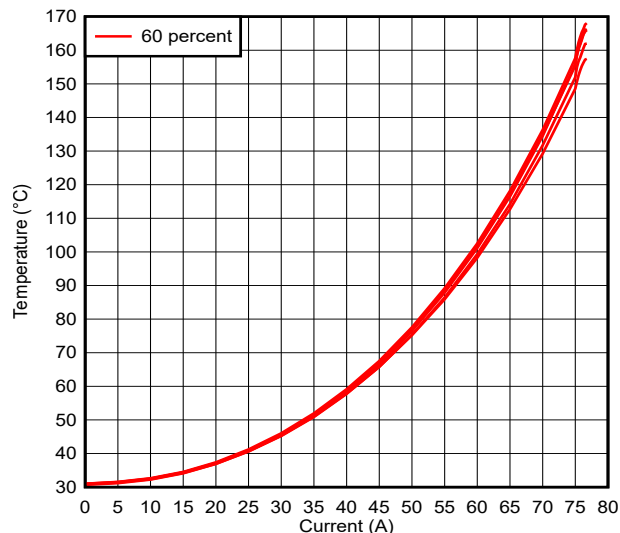


图 5-4. 5 个器件的 TMCS1123EVM 热响应曲线、60% EVM 平面

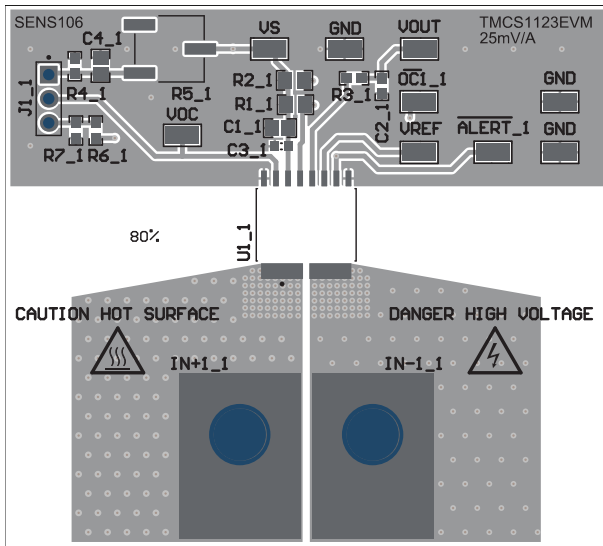


图 5-5. TMCS1123EVM，80% EVM 平面

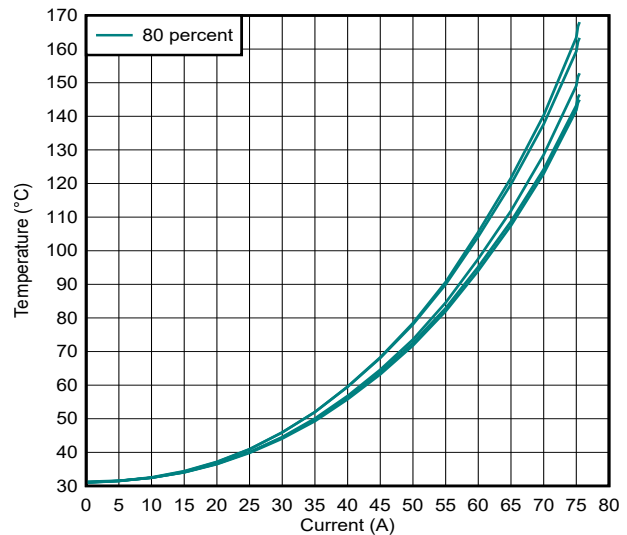


图 5-6. 5 个器件的 TMCS1123EVM 热响应曲线、80% EVM 平面

然后，这些响应会叠加，以检查图 5-7 中不同百分比下的行为表现。

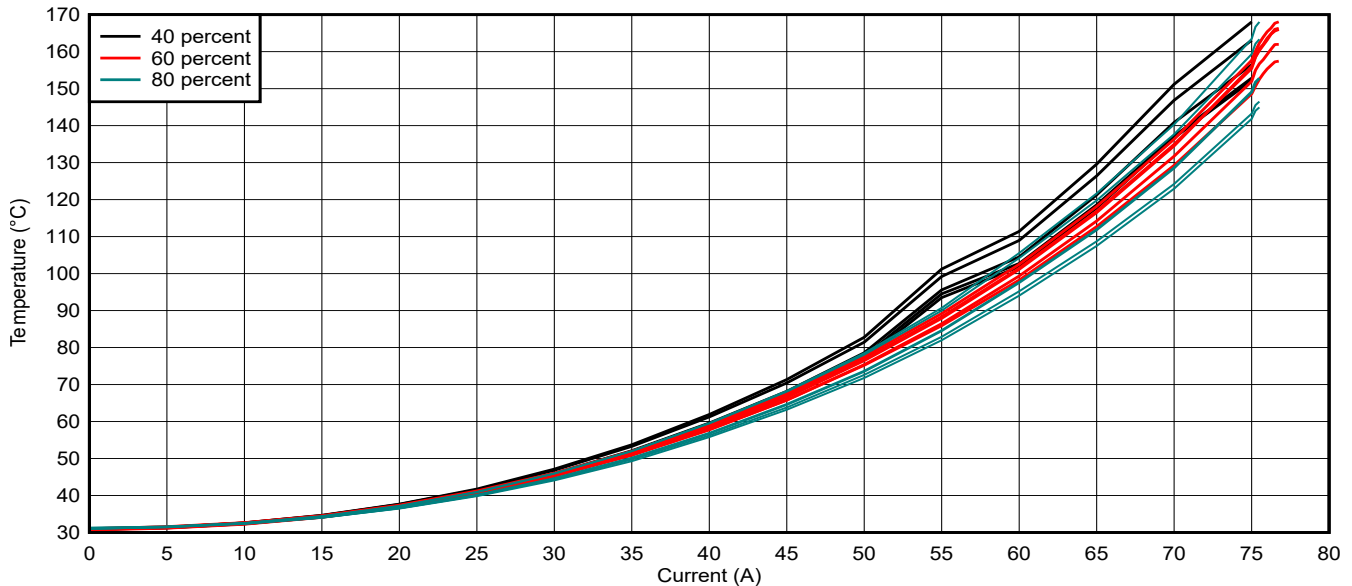


图 5-7. 所有铜尺寸下的 TMCS1123EVM 热响应曲线

从图表中得出以下观察结果：

- 尽管多边形尺寸的调整带来了微小的改进，但所有多边形的载流能力大致相同
- 60% 的多边形能够提供稍高的电流容量，但结论认为这是电路板间分布差异所致。预期在更多样本中，实际的平均性能并不会显示出这一优势。
- 同样，电路板制造公差和能力改变了器件在电路板上的分布。

最后的观察是，尽管这些分布中的电流容量大致相似，但较小的多边形由于铜的附加量较少，热响应可能比较大的多边形更快达到平衡，因为较大铜量的多边形需要更多的时间来使整体热质量达到平衡点。然而，在数据收集过程中并未研究这一效应。

5.2 TMCS1143EVM 多边形尺寸变化

该部分的结果适用于 TMCS114x 系列。

图 5-8、图 5-10 和 图 5-12 显示了移除铜后的拓扑，而 图 5-9、图 5-11 和 图 5-13 显示了相应比率下的器件性能。

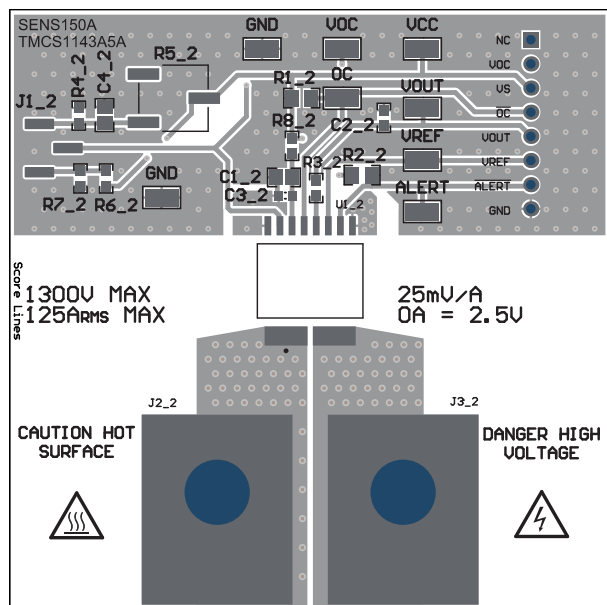


图 5-8. TMCS1143EVM , 40% EVM 平面

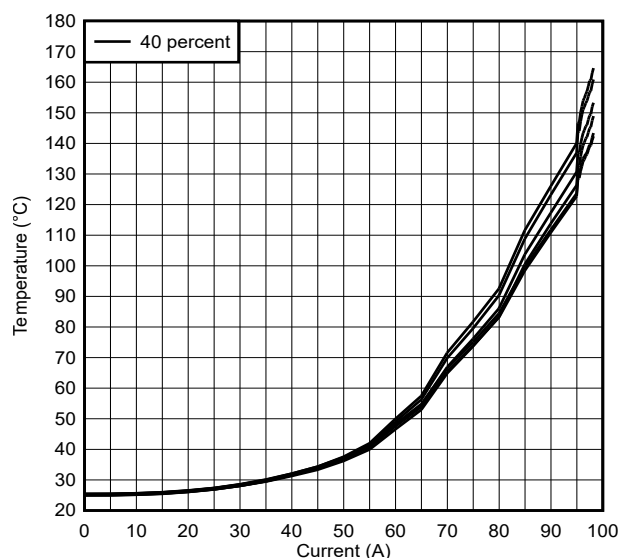


图 5-9. 6 个器件的 TMCS1143EVM 热响应曲线、40% EVM 平面

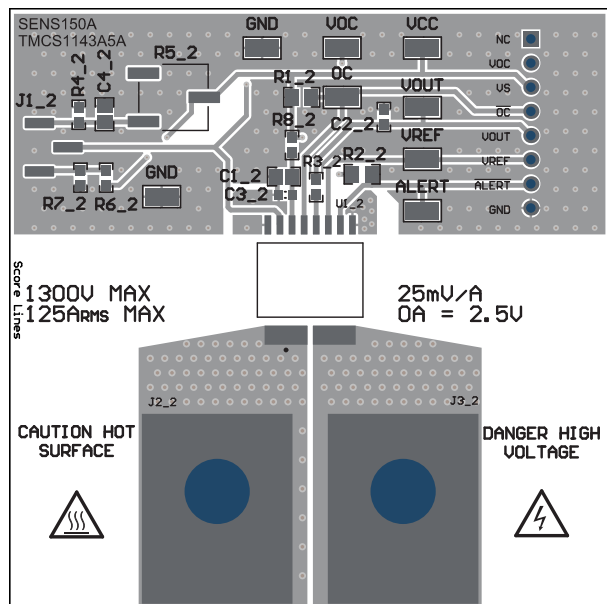


图 5-10. TMCS1143EVM , 60% EVM 平面

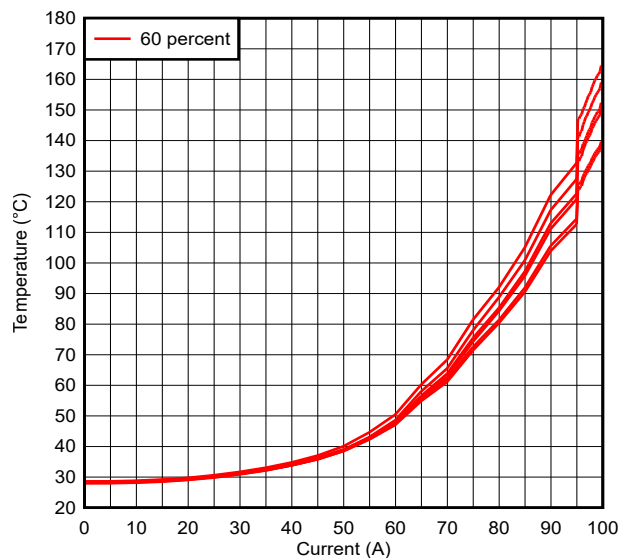


图 5-11. 6 个器件的 TMCS1143EVM 热响应曲线、60% EVM 平面

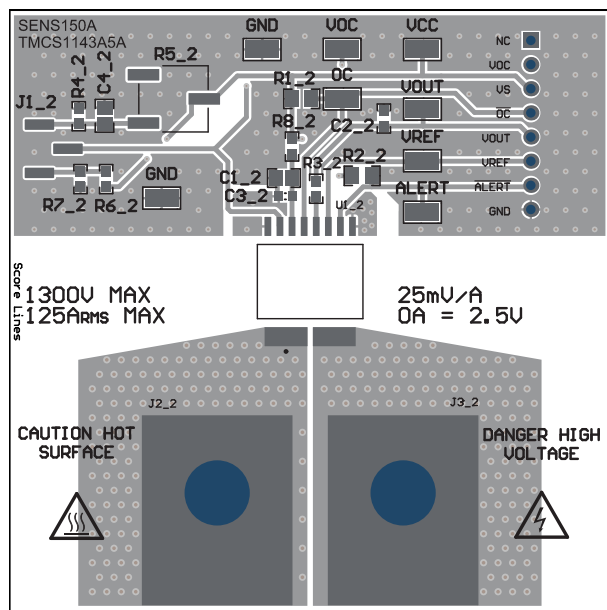


图 5-12. TMCS1143EVM，80% EVM 平面

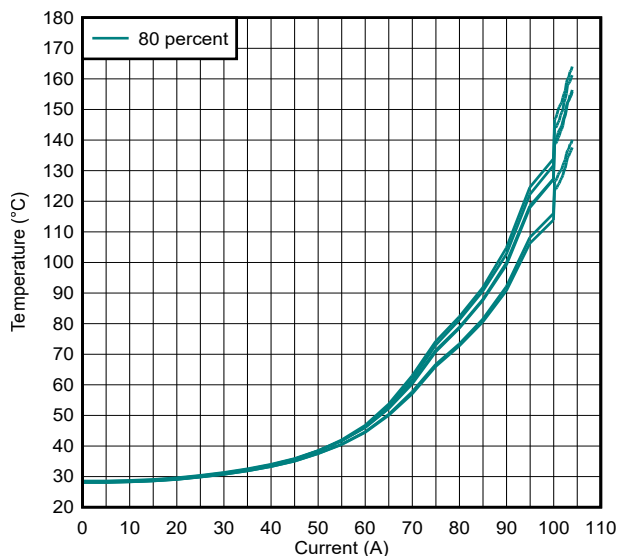


图 5-13. 6 个器件的 TMCS1143EVM 热响应曲线、80% EVM 平面

然后，这些响应会叠加，以检查 图 5-14 中不同百分比下的行为表现。

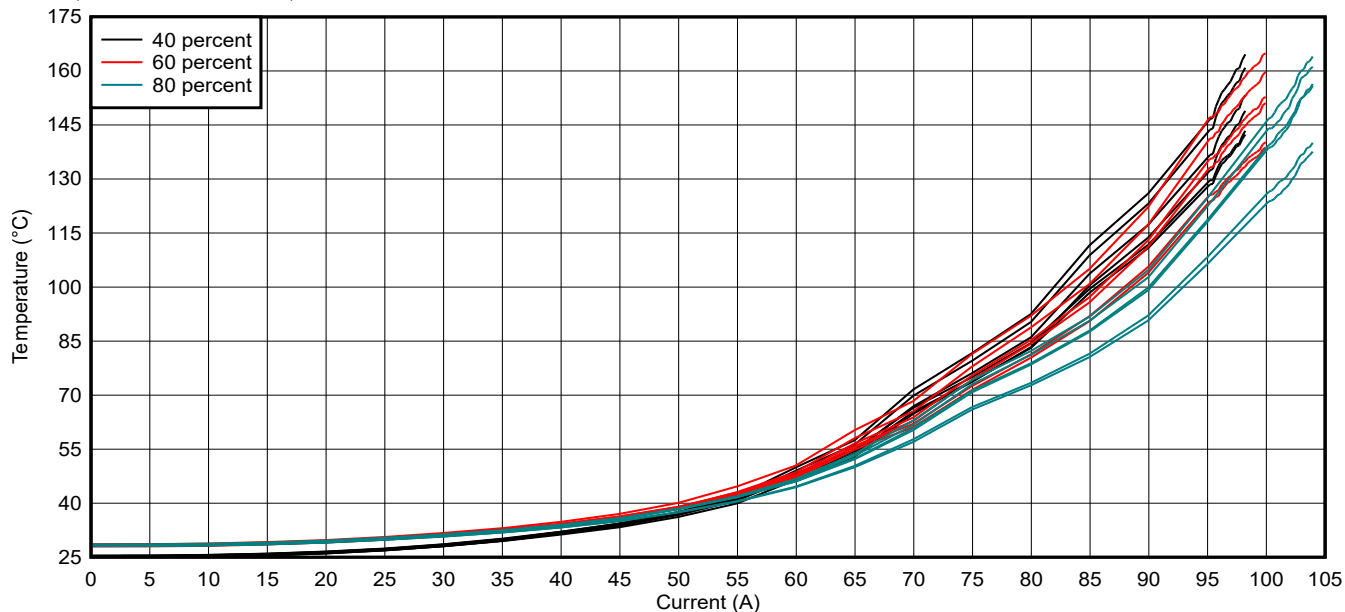


图 5-14. 所有铜尺寸下的 TMCS1143EVM 热响应曲线

从图表中得出以下观察结果：

- 尽管多边形尺寸的调整带来了微小的改进，但所有多边形的载流能力大致相同。
- 80% 的电路板最大电流能达到约 104A，而 40% 的电路板最大电流能达到约 98A，比前者大约少 6A。
- 同样，电路板制造公差和能力改变了器件在电路板上的分布。

6 总结

本应用手册介绍了一种评估封装内磁性电流传感器热性能的方法。正如预期的那样，印刷电路板上的铜重量显著增强了载流能力。然而，事实证明，多边形尺寸对散热的作用要小得多。总体而言，本文档中提供的曲线可帮助设计人员合理确定封装内电流传感器在稳态状态运行下所需的铜总量，从而做出更明智的设计决策。

7 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[TMCS1123 具有增强型隔离工作电压、过流检测和环境磁场抑制功能的精密 250kHz 霍尔效应电流传感器](#)，数据表。

8 修订历史记录

Changes from Revision * (January 2025) to Revision A (September 2026)	Page
• 将文档标题从“TMCS1123 霍尔效应电流传感器的热分析”更改为“封装内磁性电流传感器的 PCB 热分析”	0
• 更新了 摘要 部分	1
• 更新了 简介 部分	3
• 将标题从“使用 CB70-14-CY 铜接线片对 TMCS11xxEVM 进行初始检查”更改为“使用相应铜接线片对 TMCS EVM 进行初始检查”	4
• 更新了“使用相应铜接线片对 TMCS EVM 进行初始检查” 部分	4
• 添加了 单个 EVM 部分	4
• 添加了 单个 3oz 和 4oz 铜面板的初始检查 部分	5
• 添加了 TMCS1123EVM 3oz 和 4oz 单面板 部分	5
• 添加了 TMCS1143EVM 3oz 和 4oz 单面板 部分	6
• 更新了 实验设置和讨论 部分	7
• 更新了 案例 1：铜重量 部分	8
• 添加了 TMCS1123EVM 各种不同的铜重量 部分	8
• 添加了 TMCS1143EVM 各种不同的铜重量 部分	9
• 更新了 案例 2：多边形尺寸 部分	12
• 添加了 TMCS1123EVM 多边形尺寸变化 部分	12
• 添加了 TMCS1143EVM 多边形尺寸变化 部分	13

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月