



摘要

TMCS1100 等封装内磁性电流传感器可使几安培的电流流经引线框。允许流经的确切电流大小取决于布局和环境，因为这两者决定了器件在给定负载下可以承受的热量。因此，正确测量器件温度对于验证设计至关重要。本应用报告介绍了一种正确评估器件温度的方法，并提供了有关如何改进布局的一些见解。

内容

1 热处理	2
2 探头和测量设置	2
3 ESD 体二极管表征	7
4 测量结温	10
5 测量外壳温度	11
6 外壳温度和结温的相关性	12
7 总结	17

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 热处理

覆铜重量、铜输入平面尺寸、增加的散热器、附近的热源和风扇等系统属性都会显著影响热性能。尽管任何给定的热环境都具有独特性，但通过使用本应用报告列出的步骤，您可以验证 TMCS1100 等器件在系统中的热性能。基本分析步骤如下：

1. [探头和测量设置](#)
2. [ESD 体二极管表征](#)
3. [测量结温](#)
4. [测量外壳温度](#)
5. [外壳温度和结温的相关性](#)

下面概述了对多个布局进行测量和比较的步骤。[测量结果](#)一节提供了此过程的结果。

2 探头和测量设置

要验证特定系统设计中 TMCS1100 的热性能，必须进行可靠且可重复的测量。本节详述了在使用热电偶准备测试设置时需要注意的几个关键变量。在对每个关键变量进行详细讨论之后，生成了[最佳实践汇总](#)用于快速参考。

传感器

可以通过几种不同的方法来测量温度，包括红外摄像机、荧光探头、热电偶、温度传感器 IC、热敏电阻、RTD 和红外枪。每种方法都有其自身的优势和挑战。在本应用手册中，使用了 K 型热电偶，因为其具有相对线性的标准化通用特性，可以放置在 125°C 的烤箱内，轻松测量不超过 150°C 的温度。也可以使用 E、J、N、T、R/S 和 B 型等其他标准化热电偶，因为它们也具有良好特性，并且可以使用热电偶接口模块（如 National Instruments 提供的 USB-TC01）轻松进行分析。此类模块具有一个可使用计算机实现自动操作的简单接口。此外，此类模块提供冷端补偿电路，这是将热电偶的冷端浸泡在冰水中的良好替代方案。

选择热电偶传感器后，要注意的测试设置细节包括[传感器位置](#)、[固定放置传感器](#)、[传感器接触](#)、[热质量](#)、[热滞后](#)和[环境温度](#)。

传感器位置

探头位置很重要，因为通电后，器件不会表现出均匀的热分布，当电流流经引线框时更是如此。在 [TMCS1100 外壳热分布](#)、[结热分布](#)和[引线框热分布](#)的仿真中，可以观察到不均匀的热分布。在[引线框热分布](#)中，您可以看到，对于给定的电流，中心弯曲处的温度最高，电流在此处遇到的电阻最大。从这一点来看，热量可以通过多种路径通过引线框、外壳和 IC 晶片流向周围环境。根据弯曲和探头点之间的热阻以及外部热源/散热器，可以观察到明显不同的温度。这些热分布仿真对应的是 [TMCS1100EVM](#) 在 25°C 环境下对 TMCS1100 施加 20A 电流。虽然这些是理想模型，并且忽略了工作台设置中将出现的几个影响变量，但其仍呈现了通过器件的相对热流。这些热图表示在探头放置位置可能观察到的温度差异。

在均匀性方面，晶片（或结）具有最均匀的热分布，但面临着不外露而无法直接测量的挑战。根据相对于表面积的变化量，外壳顶部具有第二均匀的热梯度。引线框具有第三均匀的热梯度。由于引线框的表面积明显更小且差异巨大，因此我们不建议在引线框引脚上进行探测，因为可重复性测量具有精度要求。此外，如果在终端应用电路板上进行温度测试，则热电偶探头处于引线框引脚电压电位时会带来复杂性。因此，我们建议在与结温初始相关后使用外壳温度读数。

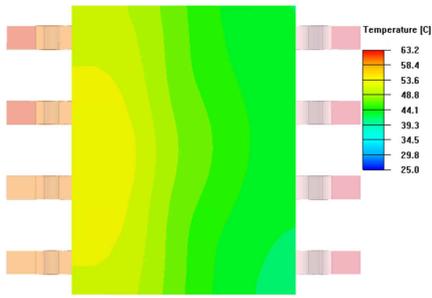


图 2-1. 外壳热分布

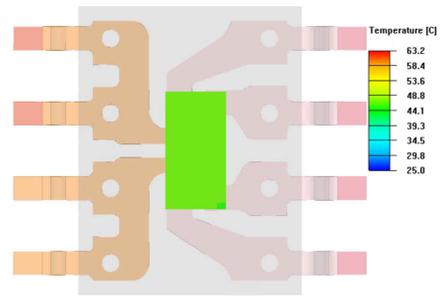


图 2-2. 结热分布

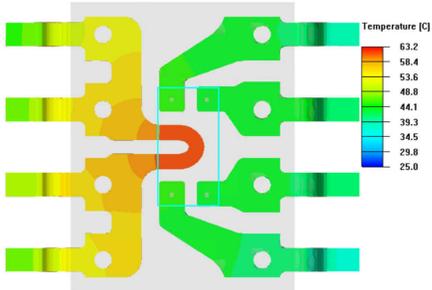


图 2-3. 引线框热分布

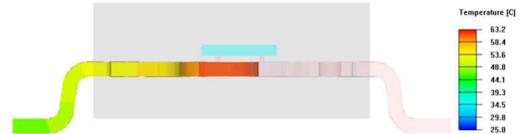


图 2-4. 引线框侧热分布

固定放置传感器

由于在通用探头区域内可能存在相当大的热梯度，因此可重复且固定的放置非常重要。因此，本应用报告所用设置利用了 3D 打印热电偶固定装置来限制运动自由度，并将热电偶引导至所需的探头位置。此外，该固定装置在热电偶线上施力，使热电偶与表面保持良好接触，并避免操作电路板时探头发生移动。当在烤箱中对系统进行温度扫描时，应仔细考虑用于探头固定装置的材料，因为装置熔点和测试设置材料的热膨胀可能会使探头移位。在本应用报告所述的一些测试中，器件处于 125°C 的环境温度中。一些标准 3D 打印机材料的玻璃化转变温度低于该温度，这会导致材料的形状发生变化并使测量探头移动。因此，使用尼龙装置在 125°C 环境中进行测量。

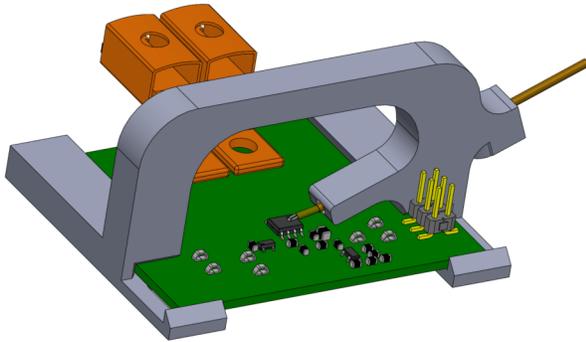


图 2-5. 热电偶装置

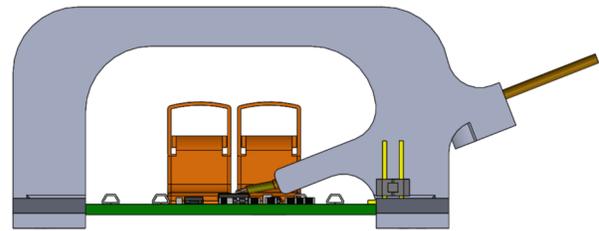


图 2-6. 热电偶装置 - 前端

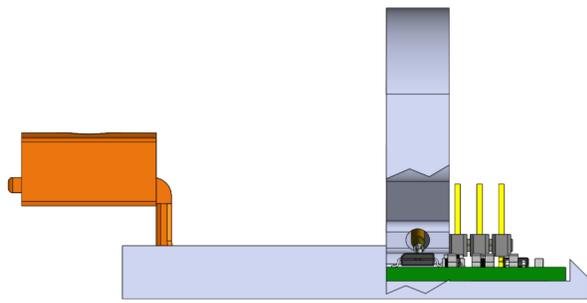


图 2-7. 热电偶装置 - 左侧

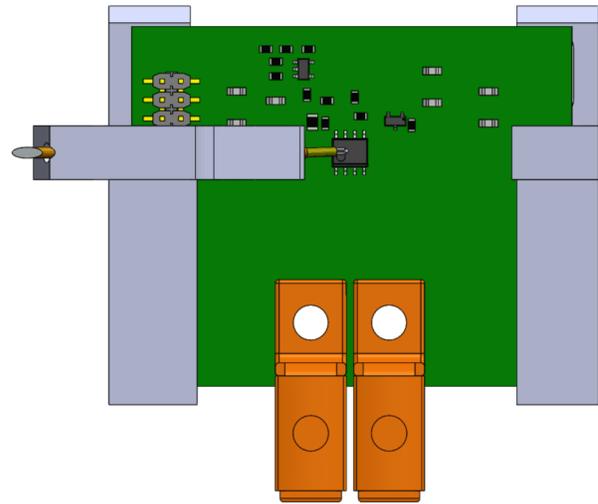


图 2-8. 热电偶装置 - 顶部

传感器接触

探头的表面接触与探头的位置和固定放置一样重要。如果处理不当，不良的表面接触会导致探头和测量目标位置之间出现不良的热阻。除了用力将探头压在外壳上，我们建议使用热膏在热电偶表面和检测位置表面之间形成良好的导热层。理想情况下，热膏量不应超出热电偶接头的圆周，如热膏图中所示，因为热膏会影响热性能。我们建议使用微型注射器在检测位置控制注入适量的热膏。

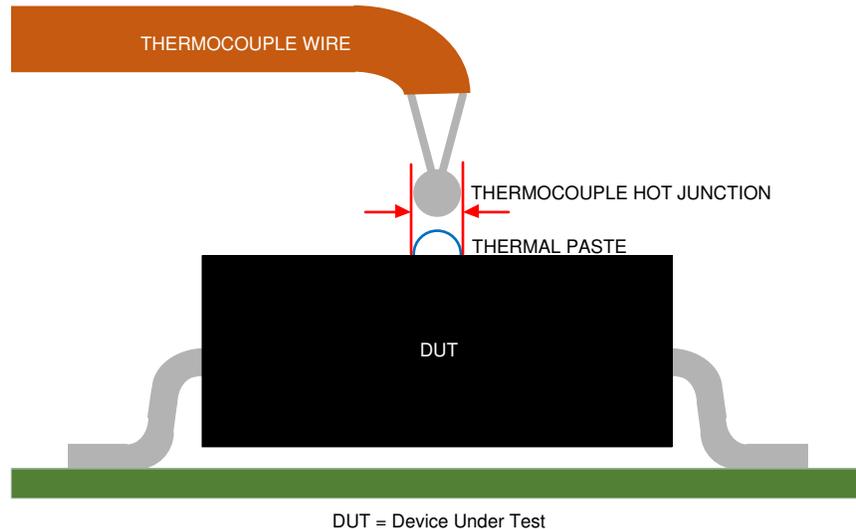


图 2-9. 热膏图

热质量

之所以尽量减少热膏的用量，部分原因是因为热膏会带来一些热质量。任何封装相关的热质量都会影响热行为。大块热膏带来有更多表面积暴露在气流中的导热质量，从而增加对流热损失。除了热膏外，像热电偶引线或负载输入这样的大质量从试验箱进入周围较冷的环境会吸收更多热量，特别是在其与器件具有良好的导热连接时。使用方程 1 和图 2-10，可以推断通过通道传导的热量。与较粗的导线相比，较细的导线具有较大的横截面面积。根据方程，较大的横截面面积会增加 Q ，即热流动量。同样根据方程，热电偶热结点和热电偶的其他一些点（例如烤箱外部）之间的大温度 Δ 值会增加热流动，尤其是当这两个点之间的距离缩短时。因此，应尽量减小热电偶引线和结点的尺寸，并尽量延长受控温度箱中的探头线长度。

$$\frac{Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

其中

- Q 是通过通道传导的热量
- Δt 是给定传导通道的相关时间间隔
- A 是通道的横截面积
- ΔT 是通道两端的温差
- Δx 是通道的长度。

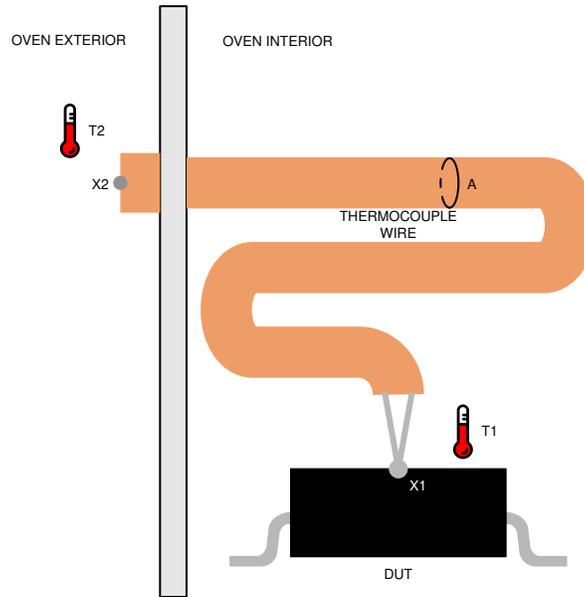


图 2-10. 热电偶热传导系数

热滞后

在设置用于测量的探头后，仍然需要考虑运行时间问题，这可能与热滞后和热平衡广泛相关。相对初始温度、外部热源、距离、运行时和热源与探头位置之间的热阻都会影响在特定探头位置观察到的温度。在测量中，我们通常在没有明显相邻热源的受控周围环境中从无负载步进到几安培的电流。在这种情况下，放置在器件上的探头最初会表现出急剧的温度上升，然后随着进入该位置的热流速与离开该位置的热流速的平衡而逐渐趋于平稳。当电流设定后温度不再升高时，该位置已达到热平衡。图 2-11 说明了温度如何滞后于电流并可能需要很长时间才能达到热平衡。凭借良好的环境调节，本应用报告中的测试表明，对于连续电流负载，可在大约三分钟内达到热平衡。

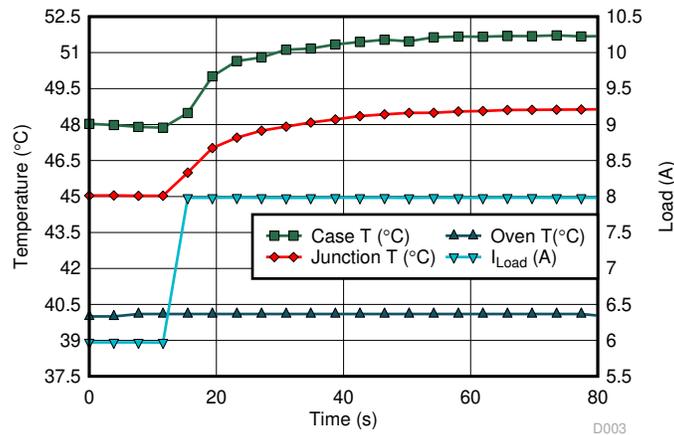


图 2-11. 温度和负载与时间之间的关系

环境温度

正如“热滞后”一节所提到的，如果不严格监测和调节，环境温度会影响结果。这在较低电流和较低环境温度下很容易观察到。如果将测试板留在像典型实验室那样温度控制宽松的箱内，则由于建筑 HVAC 系统，测量结果可能会出现 5°C 的周期性波动。或者，如果将器件安装在任何不受控制的外壳中，以屏蔽实验室设备排气扇或建筑 HVAC 系统的风寒，那么外壳内的环境温度漂移可能会使器件看起来始终无法达到热平衡。即使在受控箱内，预计也会存在一些温度梯度，其中器件周围的直接空气间隙可能处于与烤箱传感器不同的温度，尤其是在涉及其他散热部件的测试板上。我们建议在评估器件热性能时在附近至少安装一个环境温度传感器。

最佳实践汇总

图 2-12 到图 2-21 总结了之前关于如何最好地设置热电偶进行外壳测量的讨论。图像的左列显示了不良的设置示例，而右列显示了良好的设置示例。

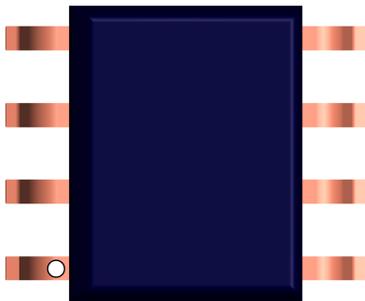


图 2-12. 引脚上的探头

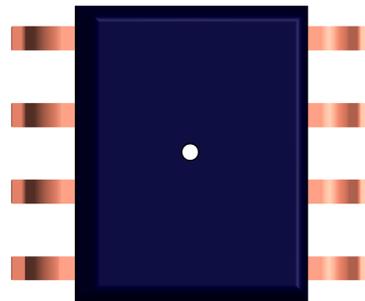


图 2-13. 外壳上的探头

- 在外壳上进行探测所需的精度低于在引脚上进行探测，因此具有更高的可重复性。

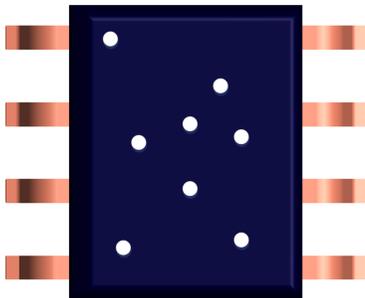


图 2-14. 低精度

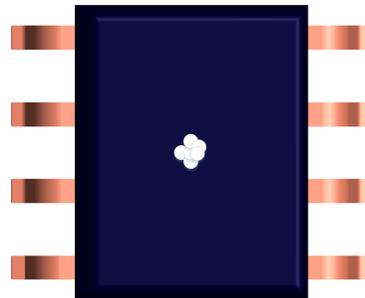


图 2-15. 高精度

- 封装确实表现出热梯度，因此更严格的精度将提供更一致的结果。

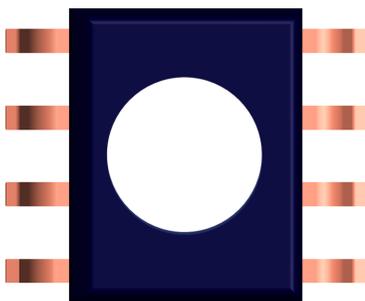


图 2-16. 热膏过量

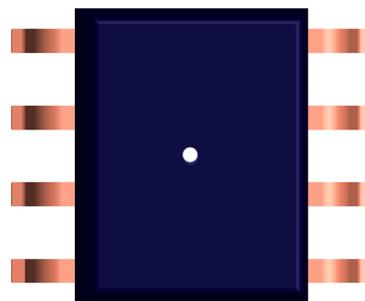


图 2-17. 热膏足够

- 虽然热膏对于外壳和热电偶之间的良好接触是必要的，但它确实会影响热行为，如果预计不会出现在最终制造的电路板上，则应尽量少用。

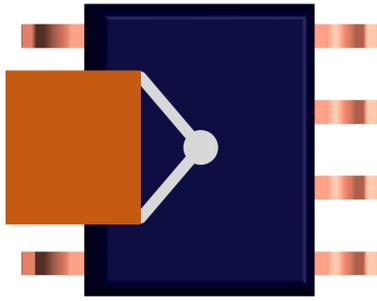


图 2-18. 大热电偶

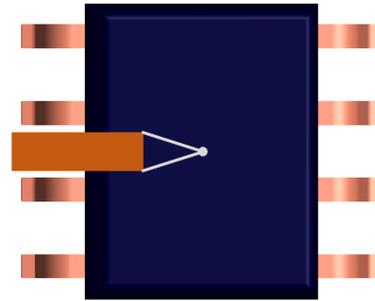


图 2-19. 小热电偶

- 较小的探头从外壳中排出的热量较少，因此如果不存在探头，则可以更好地指示热性能。

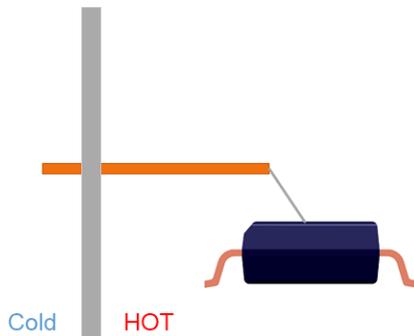


图 2-20. 箱中的短引线

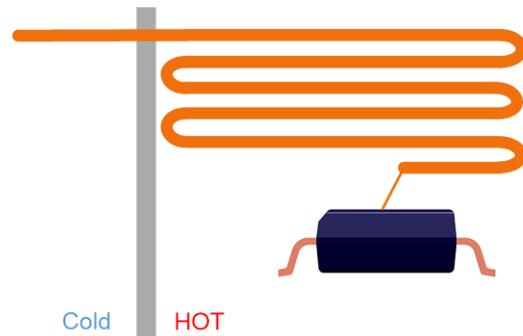


图 2-21. 箱中的长引线

- 箱中较长的热电偶引线可在所需的环境温度下提供更多的热电偶质量并增加热阻，从而限制热量流向较冷的外箱。

3 ESD 体二极管表征

在低压侧未通电时，通过正向偏置器件内部的一个 ESD 二极管来测量核心温度。二极管两端的电压根据器件内部和外部热源的累积温度而变化。通过强制器件达到已知温度而无需使负载通过器件，可以确定二极管电压与温度的关系。

图 3-1 中所示的每个二极管都可以通过以下方法单独进行正向偏置：强制电流从源测量单元 (SMU) (+) 端子进入阳极、通过相应的阴极并流出到 SMU (-) 端子。对于本应用报告，使用了从 GND 正向偏置至 VOUT 的二极管，而 VS 和 VREF 则悬空。为了强制电流，使用了 Keithley 2420 源表。要将二极管用于温度测量，强制电流应足以使 ESD 二极管两端的电压达到正向电压，但不得超过 6mA 的器件最大静态电流。因此，本报告中的测试使用了 1mA，因为电流电平同时满足这两个条件。要在整个温度范围内表征器件，可以使用烘箱或浴槽。对于本报告中表征的二极管，将多个 TMCS1100 器件放置在 Harte Scientific 油浴中，并使用 25°C、75°C、100°C 和 125°C 下的测量值进行温度扫描。

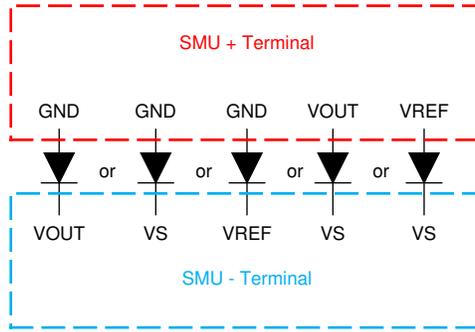


图 3-1. TMCS1100 ESD 二极管

从温度扫描中，收集到 12 条数据曲线。从这些曲线中，使用相应的最佳拟合方程 2 得出图 3-2 中所示的平均曲线。将平均值与实际测量数据进行比较表明，使用图 3-3 中所示的方程时，计算会存在一些误差。虽然该方程为本应用报告中表征的器件二极管提供了 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的容差，但不同的强制电流和不同的器件批次可能可以通过另一个方程更好地表征。因此，如果需要精度，我们建议为您的器件表征二极管。

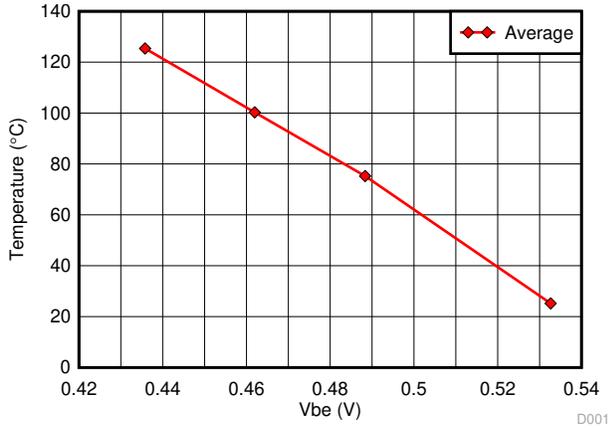


图 3-2. 二极管电压和温度间的关系

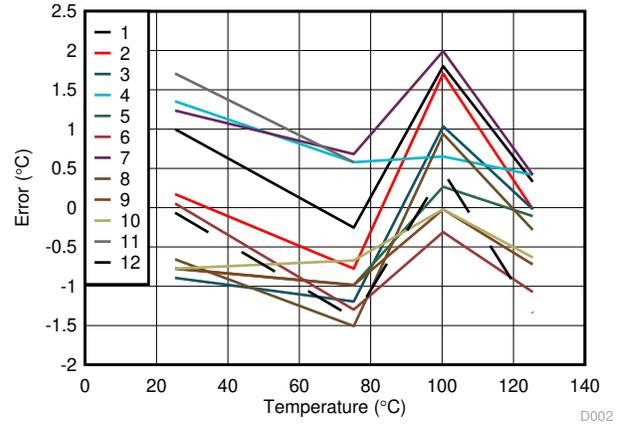


图 3-3. 温度误差

$$\text{温度} = -1581.2 \times \text{Vbe}^2 + 500.92 \times \text{Vbe} + 207.112 \quad (2)$$

步骤概要

- 将 SMU 正极端子连接到器件 Gnd 引脚，将 SMU 负极端子连接到器件 Vout 引脚。
- 将器件浸入温度可控的暗室中。
- 从源表向 GND 引脚提供 1mA 电流。
- 测量体二极管两端的电压，在本例中为 GND 至 VOUT。
- 让 DUT 扫过一系列温度。
- 取每个温阶的平均值并绘图。
- 确定绘制线的最佳拟合方程。

4 测量结温

绝对最大额定值表特别指出结温的上限为 150°C ，并进一步指出“应力超出‘绝对最大额定值’下所列的值可能会对器件造成永久损坏”。因此，了解结温对于验证器件是否能够承受一组给定的工作条件非常重要。由于结是指包裹在器件封装中的晶片，屏蔽了典型的光学或物理探头，这带来了挑战。所幸，通过表征上一节中介绍的一个器件 ESD 二极管，可以确定给定负载电流的结温。

测量给定负载的结温的方法与用于表征一个内部 ESD 二极管的方法非常相似。主要区别在于，现在可以利用方程 2 将二极管电压与温度相关联来确定在给定环境温度下给定负载的结温。图 4-1 说明了一种可能的测试设置，其中负载电流流经引线框产生的热量由从 GND 到 VOUT 引脚正向偏置的 ESD 二极管监控。

步骤概要

- 将 SMU 正极端子连接到器件 GND 引脚，将 SMU 负极端子连接到器件 VOUT 引脚。
- 从源表向 GND 引脚提供 1mA 电流。
- 测量体二极管两端的电压，在本例中为 GND 至 VOUT。
- 让 DUT 扫过一系列负载电流电平。至少测量两个电流电平。
- 使用从二极管表征导出的方程来确定负载与结温的关系。

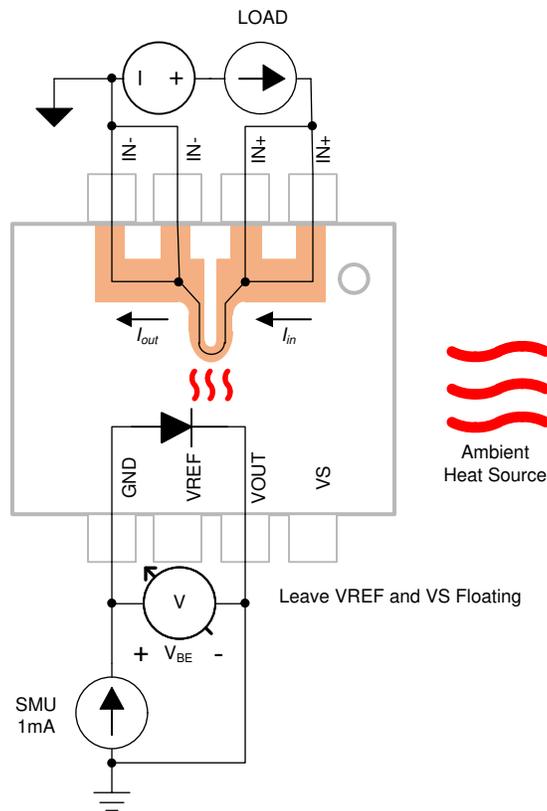


图 4-1. 结测量原理图

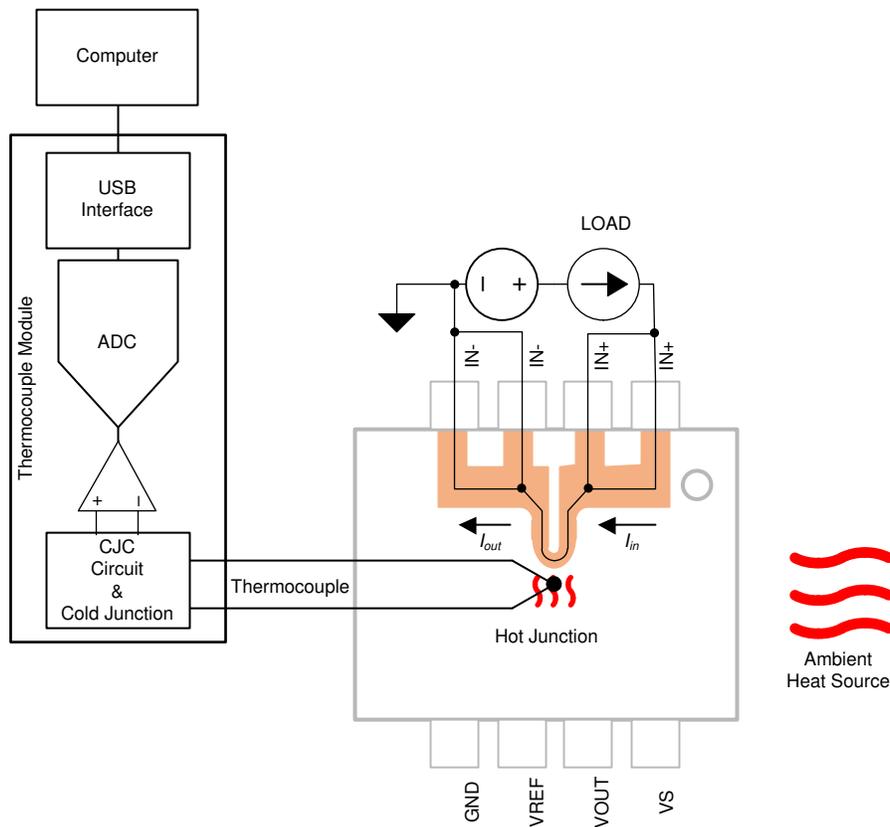
5 测量外壳温度

一种用于近似计算结温的常用方法是测量外壳温度。虽然外壳温度提供了可用于确定结温的信息，但其温度值并不等于结温。所有热对流和热传导方程变量都会对外壳温度与结温的接近程度产生一些影响。对于本应用报告，我们采用了多个点来推导出二者关系。虽然您的设置可能无法达到这样的精度，但我们认为，您需要在每个环境温度条件下至少有两个电流负载点，才能可靠地确定外壳温度与结温之间的关联。

图 5-1 说明了一种用于测量外壳温度的可能测试设置。在本应用报告中，外壳顶部被选为外壳热电偶的表面，因为它在 EVM 布局上很容易触及。特别是，探头位于顶部，这样热电偶热接头大致位于引线框中的弯曲之上，从而与器件中的主要热源之间的距离最短。这由图 2-5 中所示的装置固定到位，并使用热膏增强了热连接。

步骤概要

- 选择表征良好的温度传感器，例如带有细引线的热电偶。
- 使用热膏确保 TMCS1100 和温度传感器之间的良好热连接。
- 使用可重复放置的非导电、耐热固定装置固定温度传感器。
- 让 DUT 扫过一系列负载电流电平。至少测量两个电流电平。



*Hot Junction & Cold Junction correspond to thermocouple
*Junction by itself refers to device silicon die

图 5-1. 外壳测量原理图

6 外壳温度和结温的相关性

通过上述测量技术，发现了几种不同的 PCB 布局在 135°C 截止结温下的最大负载，如图 6-1 至图 6-8 所示。一种布局是 **TMCS1100EVM**，它针对高温环境中的大负载进行了优化。EVM 布局具有大输入平面、3oz. 铜层以及电路板顶层和底层上的铜层。其他布局是 EVM 布局的变体，删除了 1 个或多个热优化属性。表 6-1 中描述了电路板名称和布局变体。

表 6-1. 示例布局和热优化属性

布局	覆铜重量	顶部铜	底部铜	大输入负载平面
EVM (E1)	3oz.	x	x	x
L1	1oz.	x	x	x
L2	1oz.	x		x
L3	1oz.	x		

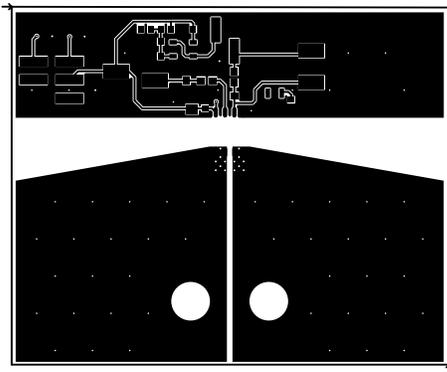


图 6-1. EVM (E1) 布局顶层

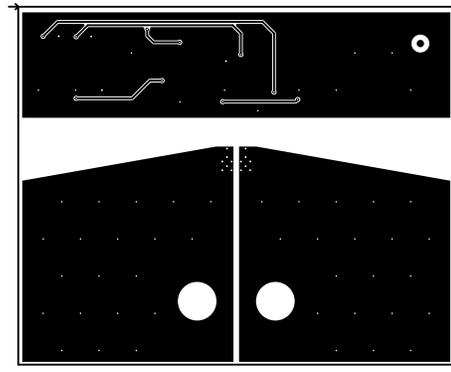


图 6-2. EVM (E1) 布局底层

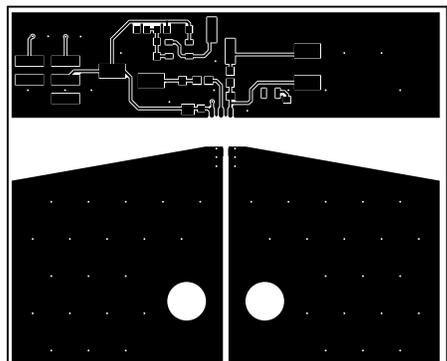


图 6-3. L1 布局顶层

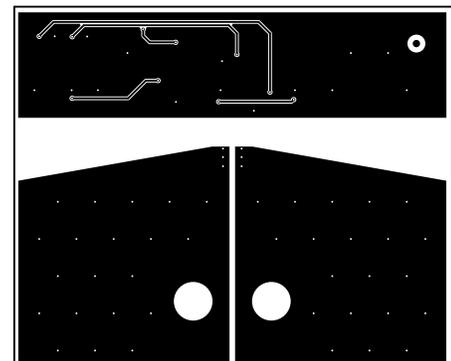


图 6-4. L1 布局底层

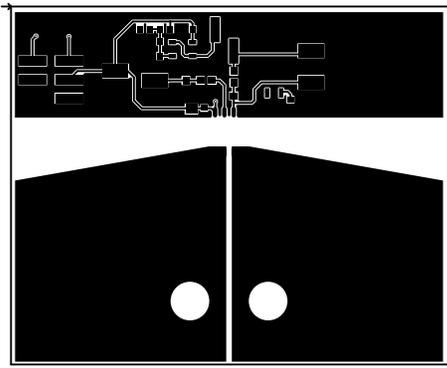


图 6-5. L2 布局顶层

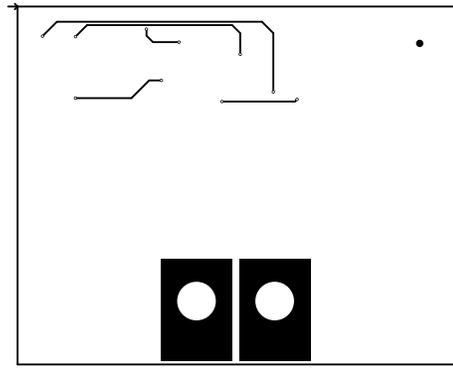


图 6-6. L2 布局底层

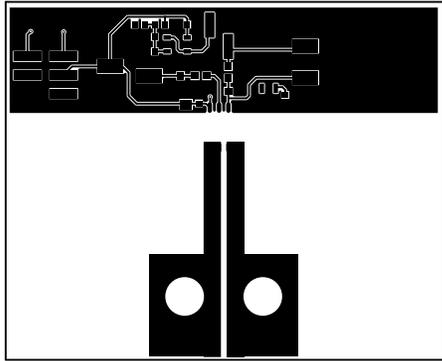


图 6-7. L3 布局顶层

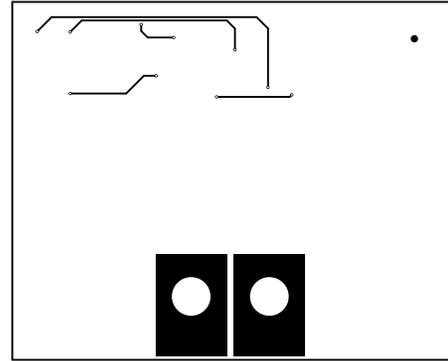


图 6-8. L3 布局底层

测量结果

外壳和结测量数据是在三种不同的环境温度下收集的：40°C、85°C 和 125°C。在图 6-9 至图 6-14 中可以观察到每一层优化对各种布局的影响。绘制的数据显示了相对于负载电流的测量温度。在每个图中，各布局之间的热处理从左到右都有所改善，其中每个图中最右边的绘制线表示该布局在各电流阶中的温度变化最小，并且可以在结达到 135°C 之前耐受最大电流。无论采用何种测量技术，布局按耐热性能稳健性从高到低排列依次是 EVM (E1)、L1、L2 和 L3。

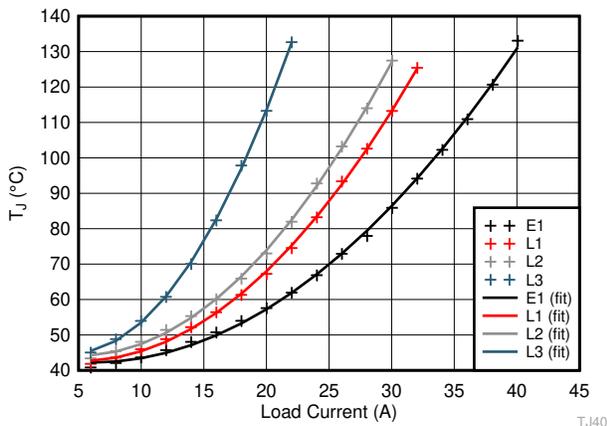


图 6-9. 40°C 环境下的结测量

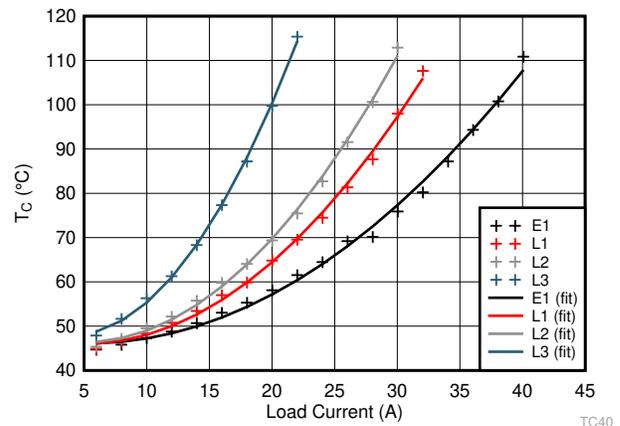


图 6-10. 40°C 环境下的外壳测量

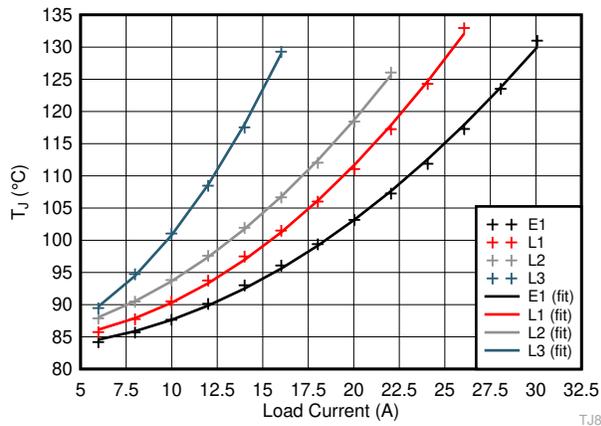


图 6-11. 85°C 环境下的结温测量

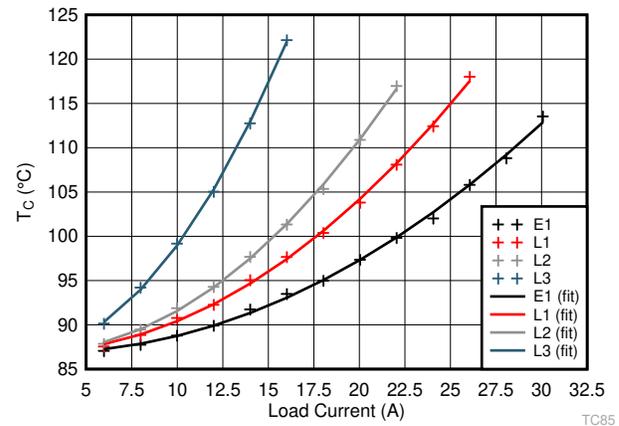


图 6-12. 85°C 环境下的外壳温度测量

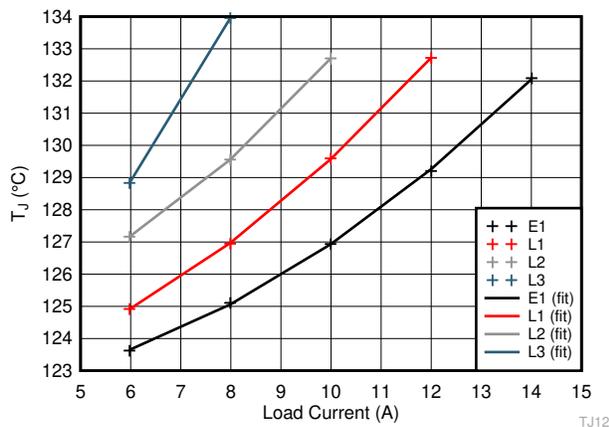


图 6-13. 125°C 环境下的结温测量

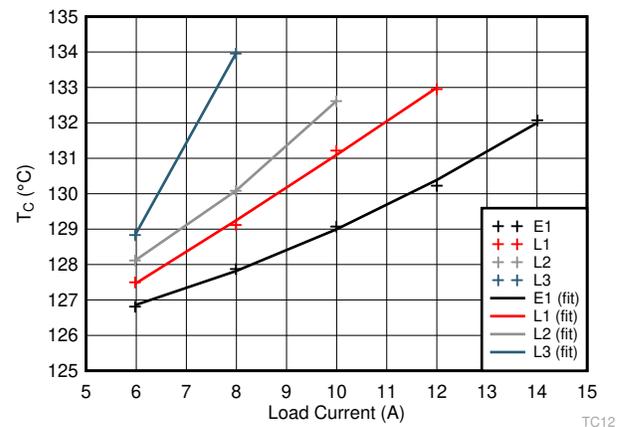


图 6-14. 125°C 环境下的外壳温度测量

重要观察结果

- 更大的覆铜重量（布线厚度）和更宽的布线可吸收更多热量，并允许更大的电流负载。
- 较高的环境温度会降低可接受的最大负载。
- 负载电流与温度的关系是非线性的（多阶多项式），如果测量正确，应该会显示出可以曲线拟合的趋势。
- 结温不等于外壳温度。

将外壳与结关联

在验证系统时，可能无法选择进行结测量，因为这需要关闭 TMCS1100 并将其接地与系统接地隔离，以便偏置二极管之一。因此，外壳测量可能是首选。这是可能的，前提是至少进行一些先前的结测量以确定外壳与结之间的关系。如果按照本应用报告使用热电偶进行外壳测量，请注意本应用报告开头列出的详细信息将确定外壳与结之间的关系。忽略这些详细信息可能会导致不一致的外壳测量值，这些测量值与结温偏离更远。

前面的数字表明，测得的温度与电流的关系是非线性的，并且针对每个布局 and 给定的环境温度都不同。它们还表明，在相同的负载和环境温度下，外壳和结温测量表现出与负载电流不同的关系。尽管有这些不便，结温和外壳温度之间仍然存在某种线性关系。通过绘制分别减去环境温度偏移的结温与外壳温度 ($T_J - T_A$ 与 $T_C - T_A$)，可以观察到相对线性的关系，如图 6-15 所示。通过减去环境温度偏移，所有温度下所有布局的数据都会以相同的总体趋势大致收敛到同一原点。为了确定描述趋势的线，可以对所有数据点或每个布局 and 温度数据集的趋势线进行最小平方和近似。每种近似方法的结果会有所不同，但所提供数据的方法之间的偏差在 3°C 以内。

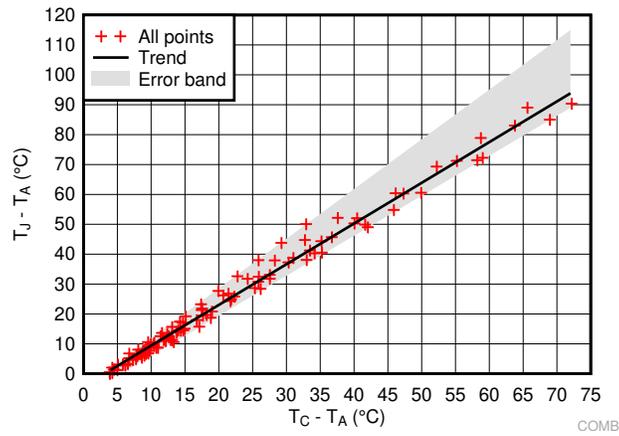


图 6-15. $T_J - T_A$ 与 $T_C - T_A$

方程 3 提供了所有数据点的最佳近似：

$$T_J - T_A = 1.31 \times (T_C - T_A) - 2.8 \quad (3)$$

使用此方程，现在可以根据外壳测量值和环境温度（最好在器件外壳附近进行测量）来确定结温。例如，如果环境温度为 76°C ，负载为 18.4A ，则可按如下方式计算近似结温：

1. 进行外壳测量， 90.47°C 。
2. 从外壳测量值 (90.47°C) 减去环境测量值 (76°C)，得到 $T_C - T_A = 14.47^\circ\text{C}$ 。
3. 将余数 (14.47°C) 代入方程 3 中，得到 $T_J - T_A = 16.16^\circ\text{C}$ 。
4. 将环境温度加到解中，得到的结温为 $T_J = 92.16^\circ\text{C}$ 。

根据基准测试检查，测得的结温为 93.16°C ，因此计算结果与测量值仅相差 1°C 。

需要强调的一个重要事项是，只要探头精确放置在外壳上，前面的方程就适用于多种布局 and 多种环境温度。但是，如果将散热器放置在外壳上，从而将外壳探头移到散热器的槽中，则预计这种关系会发生相当大的变化。可以在图 6-16 中观察到这一点。

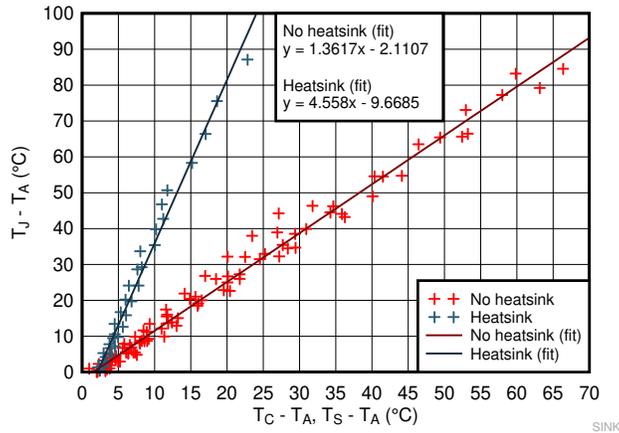


图 6-16. 散热器与无散热器

近似最大负载

通过将外壳与结相关联，还可以推断器件在给定环境温度下针对给定布局可以处理的最大负载。如果采用足够多的外壳测量点并将其转换为结温点，则可以拟合一条曲线来预测器件在何种负载下可能会发生故障。例如，图 6-10 中 40°C 时 EVM 的外壳测量数据可用于生成与负载相关的结计算。基于 40°C 下的外壳测量，二阶多项式最佳拟合方程一起生成了图 6-17 中的 T_J (计算值)。通过此方程，可以估计 T_J 等于 150°C 时的最大负载。对于此示例，基于外壳测量和相应结计算的最大负载为 45A，而基于所测得结数据的最大负载估计约为 43.5A。因此，基于计算的估计值比基于结测量的估计值高 3.5%。随着数据点的增多，我们预计百分比误差会减少。

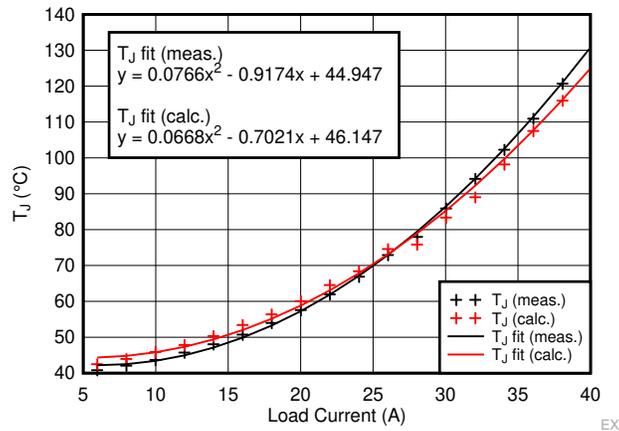


图 6-17. 计算出的 TJ 与测得的 TJ

7 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。该方法的第一步需要在无负载的情况下在整个温度范围内扫描 **TMCS1100**，并确定结电压与结温的关系。第二步需要针对不同负载获得至少两个结和外壳测量值，以确定当器件断电以及与系统电源和地隔离时结和外壳温度的关系。测量数据表明这种关系是线性的，随后可用于根据外壳温度计算结温。这种方法需要使用热电偶进行外壳测量。本应用报告讨论了几个可能影响热电偶测量精度的细微设置变量。这些变量对于获得本报告中观察到的结果很重要，对于涉及热电偶的 **TMCS1100** 任何类似热评估也很重要。

重要声明和免责声明

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、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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司