

## Application Note

## 分析高精度温度传感器中的 PCB 热阻



Mihail Gurevitch

## 摘要

在 AR/VR 头戴显示设备等新兴技术中，实现快速热响应时间和高精度有助于优化性能、安全性和用户体验。快速热响应时间能够更大限度地减少实际温度和测量温度之间的延迟，这在需要对温度变化做出即时反应以防止系统故障和增强可靠性的环境中至关重要。

本应用手册探讨了 **TMP116** (0.20°C 精度)、**TMP117** (0.10°C 精度) 和 **TMP119** (0.08°C 精度) 温度传感器的热响应特性。应用手册重点介绍了封装选择和 PCB 设计对热性能的影响。与采用 WSON/QFN 封装的传感器相比，采用 DSBGA 封装的 **TMP117** 热质量较低的传感器可以提供更快的热响应时间，因为 IC 热质量会降低。在各种应用中，为了实现精确的实时表面温度测量，必须尽可能减少被测物体表面和传感器封装之间的热阻。高热阻会导致传感器测得的温度偏离被测物体的真实温度，并导致热响应时间延迟。

本应用手册介绍了针对不同类型传感器进行的热阻测量，这些传感器安装在不同厚度的刚性 PCB 和柔性 PCB 上。具有较低热质量的柔性 PCB 在稳定时间方面具有显著优势，可更快、更准确地获得温度读数。

## 内容

1 引言.....	2
2 传感器 - 物体表面热阻及测量精度的重要性.....	3
3 测试.....	4
3.1 硬件设置.....	4
3.2 测试设置.....	5
3.3 测试方法.....	6
4 热参数计算.....	8
5 测试结果总结与解读.....	9
6 总结.....	11
7 参考资料.....	11
8 修订历史记录.....	12

## 商标

Kapton® is a registered trademark of DuPont.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

高精度温度检测在许多应用中都至关重要。为了达到这一目标，需要尽量减少被测物体表面与传感器封装之间的热阻。高热阻会导致传感器的温度读数偏离实际物体温度并延迟热响应时间。本应用手册详细介绍了不同传感器封装（例如 [TMP116](#)、[TMP117](#) 和 [TMP119](#)）安装在不同厚度的刚性 PCB 和柔性 PCB 上时执行的热阻测量。

这些测量的主要目标是了解封装选择和 PCB 设计对热性能的影响。通过比较具有不同热质量和配置的传感器，我们希望确定能够提供超快、超精确热响应的设置。热质量较低的传感器（例如采用 [WCSP DSBGA](#) 封装的 [TMP117](#) 和 [TMP119](#)）在响应速度上明显快于采用 [WSON/QFN](#) 封装的传感器，这凸显了降低 IC 热质量的重要性。

此外，我们还研究了柔性 PCB，因为它有助于降低整体热质量和提升热性能。实验结果表明，与刚性 PCB 相比，在柔性 PCB 上可以更快、更准确地获取温度读数。这一发现表明，在需要快速热响应的应用中，柔性 PCB 具有明显的优势。

本文档详细介绍了这些热阻测量的结果，并提供了在各种应用中优化温度传感器热响应的实用设计技巧。通过借鉴本研究的成果，设计人员和布局工程师可以就传感器封装和 PCB 设计做出明智的决策，从而实现出色的热性能设计。

## 2 传感器 - 物体表面热阻及测量精度的重要性

在所有温度测量中，测量物体表面温度占据重要部分。传统的做法是通过 PCB 板测量物体温度，如固体表面温度测量期间温度流动的简化原理图所示。

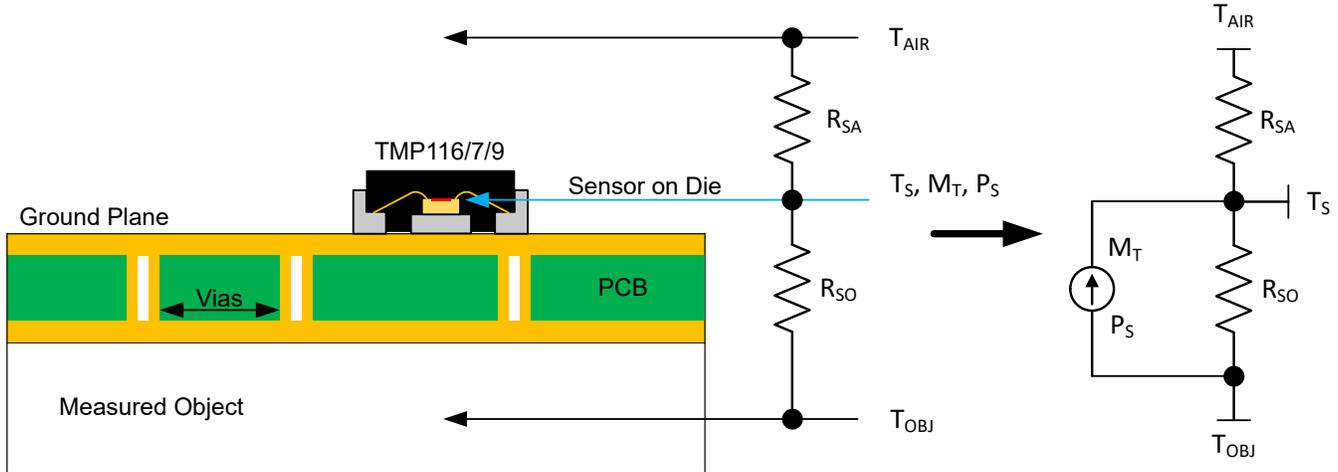


图 2-1. 固体表面温度测量期间温度流动的简化原理图

其中，

- $T_{OBJ}$  是测得的物体温度
- $T_{AIR}$  是环境温度（通常为空气温度）
- $T_S$  是内部传感器温度
- $R_{SO}$  是传感器与物体之间的热阻
- $R_{SA}$  是传感器与空气（环境）之间的热阻
- $P_S$  是传感器在测量期间耗散的平均功率
- $M_T$  是器件和 PCB 的组合热质量

从原理图中可以看出，这些参数之间存在以下关系：

$$T_{OFS} = R_{SO} \times \frac{T_{OBJ} - T_{AIR}}{R_{SO} + R_{SA}} \quad (1)$$

其中

- $T_{OFS}$  是受测物体和传感器之间的温度偏差

方程式 1 显示了只有在两种情况下传感器温度偏差为零： $R_{SO}$  为零时或  $R_{SA}$  为无穷大时。如果  $T_{OBJ}$  和  $T_{AIR}$  之间存在差异（并且  $R_{SA}$  并不明显高于  $R_{SO}$ ），则可以观察到传感器和物体温度之间存在一些偏差。随着  $T_{OBJ}$  和  $T_{AIR}$  之间的差值增加，或当  $R_{SA}$  变得更小并接近  $R_{SO}$  值时，该偏差会增加。

在进行精确的测量时，尽可能地减小  $R_{SO}$  的值并在设计阶段正确估算其值非常重要。 $R_{SO}$  的值直接影响传感器失调电压、传感器温度稳定时间，并可能决定着是否需要执行系统校准。有关更多详细信息，请参阅 [使用 TMP116 和 TMP117 进行精确的温度测量](#) 应用手册。

## 3 测试

### 3.1 硬件设置

以下测量的目的是确定采用 QFN 封装和采用 WCSP BGA 封装的 TMP116、TMP117 和 TMP119 在焊接到不同厚度和成分的 PCB 上时的热阻值。

这些测试期间使用了以下器件和 PCB：

- 器件
  - 采用 QFN-6 (DRV) 封装的 **TMP116** 和 **TMP117** 器件。
  - 采用 WCSP-6 (YBG) 封装的 **TMP119/TMP117** 器件。
- 电路板
  - 厚度为 64mil 的刚性 PCB (11mm × 22mm) 测试板。
  - 厚度为 32mil 的刚性 PCB (11mm × 22mm) 测试板。
  - 厚度为 6mil 的柔性 PCB (11mm × 22mm) 测试板。

每种情况下都测试了 3 到 4 个测试板 (CB)。在测试运行期间，我们组装了采用 QFN 封装的器件，以检查焊接和未焊接散热焊盘 (TP) 的情况。测试中使用的 [DRV](#) 和 [YBG](#) 器件测试板 展示了测试中使用的各种示例测试板。

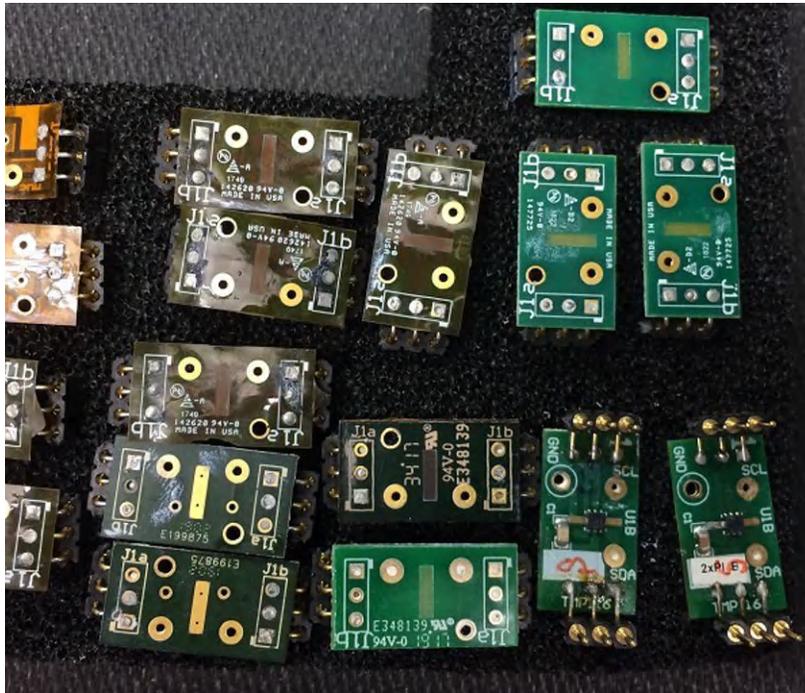


图 3-1. 测试中使用的 DRV 和 YBG 器件测试板

## 3.2 测试设置

在每次测试中，我们快速提升了器件的耗散功率，然后逐步降低功率。其实现方式是通过快速改变电源电压以增加器件的静态电流，从而改变耗散功率。这种功率波动会导致测试期间的温度变化，因此我们可以通过持续监测内部温度和功率来计算系统的热参数。在这些实验中，温度流动与通常的预期相反：温度变化来自物体，而传感器则随物体变化。由于传感器的热质量较小，因此有可能快速加热传感器，从而产生接近理想的热阶跃函数的情况，从而允许在特定条件下使用高斯阶跃公式。以下步骤概述了测试设置：

### 1. 热敏头设置

- 在稳定且受控的  $+21^{\circ}\text{C}$  温度（接近室温）下安装了巨大的铜热敏头，以尽量减少对流气流的影响。这确保了传感器在测试过程中的自热不会影响热敏头的温度。
- 为了避免 PCB 底部的 CB 发生短路，铜热敏头上覆盖了 1mil Kapton® 胶带，从而将热敏头与测试板电气隔离。

### 2. 热接触优化

- 在测试板和热敏头之间涂抹了一层薄薄的导热油脂来改善热接触。
- 为了进一步稳定热接触并防止温度从受测器件 (DUT) 泄漏到周围空气，测试板由一个多孔橡胶棒通过可控力度压在热敏头上。

### 3. 试验箱条件

- 为了避免室内空气流动的影响，测试之前将连接测试板的热敏头放入一个封闭的试验箱内并保持至少 15 分钟。

### 4. DUT 设置

- 一次仅测试一个 DUT，以确保准确性。
- 每个测试板都在 V+ 引脚上安装一个  $0.1\mu\text{F}$  表面贴装电压电源陶瓷电容器并以 GND 为基准。
- I2C 总线以 400kHz 的频率运行，上拉电压为 3V，这在测试过程中不会发生变化。
- DUT 电源会在测试期间按以下步骤变化： $3\text{V} \rightarrow 5.5\text{V} \rightarrow 3\text{V}$ 。这会导致器件电源功耗发生变化： $0.4\text{mW} \rightarrow 5.5\text{mW} \rightarrow 0.4\text{mW}$ 。每个电源电压阶跃的时间为 15 秒。
- DUT 处于连续转换模式，取 8 次内部平均值，转换之间无停顿。温度数据每 150ms 从 DUT 传输一次。

图 3-2 展示了测试设置，其中包含热敏头、一个连接的示例测试板和实验中使用的橡胶棒。

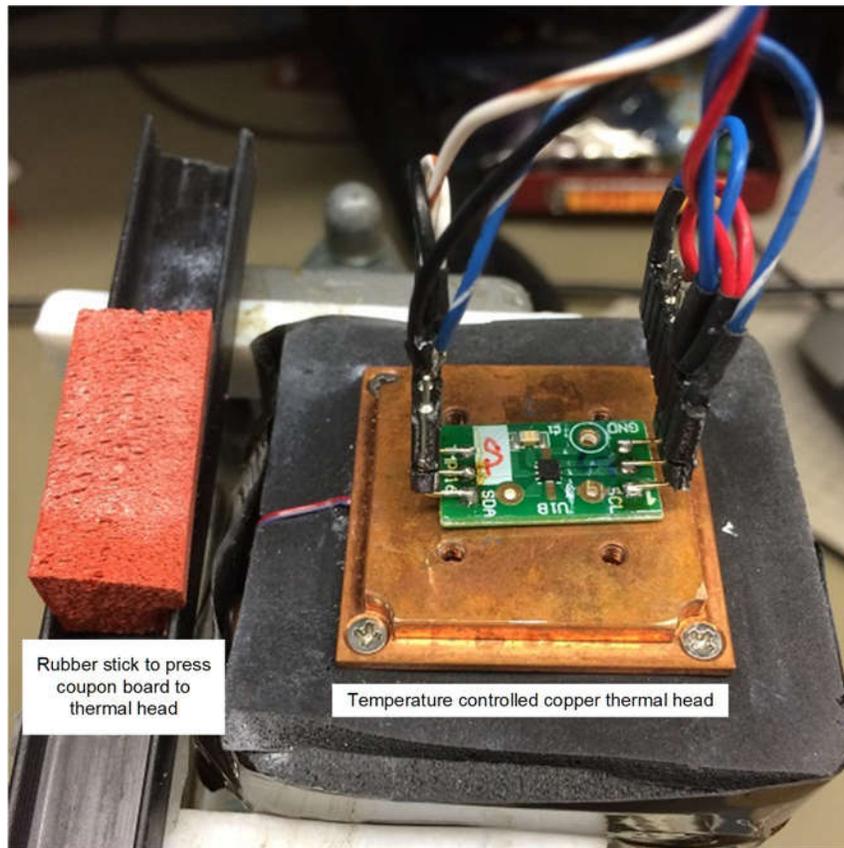


图 3-2. 实验设置

### 3.3 测试方法

连接到热敏头的测试板保持在封闭的试验箱中，直到 DUT 温度读数稳定。达到该稳态条件后，以下步骤概述了测试过程：

#### 1. 初始设置

- 器件通电，并且电源设置为 3V。DUT 处于连续转换模式。在整个过程中，持续收集温度数据，并持续测量 DUT 电源电流。

#### 2. 电压升压

- 15 秒后，电源电压升至 5.5V。I2C 总线电压保持在 3V。当输入电平为 3V 但电源为 5.5V 时，此步骤使用器件数字输入单元消耗额外的电流。这会导致传感器产生显著的自热，而在正常测量期间是可以避免的。

#### 3. 电压降压

- 15 秒后，电源电压降回至 3V。

#### 3.3.1 测量结果

**刚性 PCB 测试板 ( 11mm × 22mm ，厚度为 64mil )**

热响应，64mil 刚性 CB、DRV 封装且焊接有散热焊盘和热响应，64mil 刚性 CB、DRV 封装且未焊接散热焊盘展示了装有采用 QFN 封装的器件时 64mil 刚性 PCB ( 包含和不包含焊接散热焊盘 ) 的热响应。数据表明，焊接有散热焊盘时，其热阻约为未焊接散热焊盘时的二分之一。在这两种情况下，升温和降温的稳定时间都约为 5 秒。

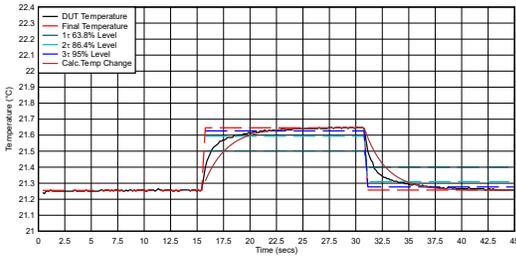


图 3-3. 热响应，64mil 刚性 CB、DRV 封装且焊接有散热焊盘

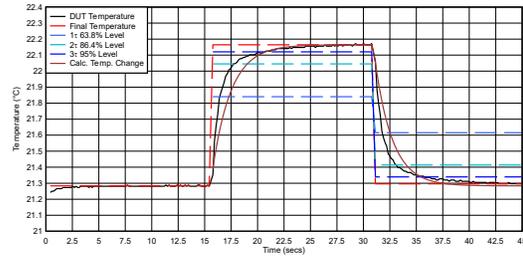


图 3-4. 热响应，64mil 刚性 CB、DRV 封装且未焊接散热焊盘

请注意，最终温度阶跃的 63.8%、86.4% 和 95% 水平与高斯阶跃函数温度变化图相吻合。在 64mil 刚性 PCB 中，与理想阶跃函数的偏差更为明显，而在 32mil 厚的 PCB 中则与理想曲线更为接近。

### 柔性 PCB 测试板 ( 11mm × 22mm ，厚度为 6mil )

热响应，6mil 柔性 CB、DRV 封装且焊接有测试点和热响应，6mil 柔性 CB、DRV 封装且未焊接测试点重点说明了在 6mil 柔性 PCB 上安装采用 QFN 封装的器件时器件的热响应。未焊接散热焊盘时，自热温度为焊接有散热焊盘时的 1.8 到 2 倍。升温和降温的稳定时间缩短至 3 至 4 秒。数据表明，由于柔性 PCB 连接的热质量降低，升温和降温曲线与计算得出的理想曲线相匹配。

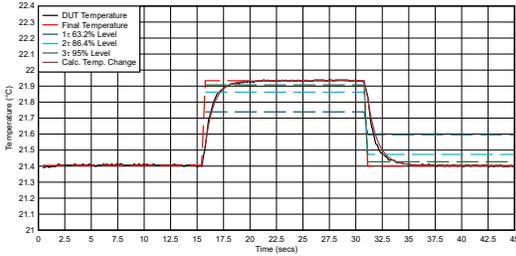


图 3-5. 热响应，6mil 柔性 CB、DRV 封装且焊接有测试点

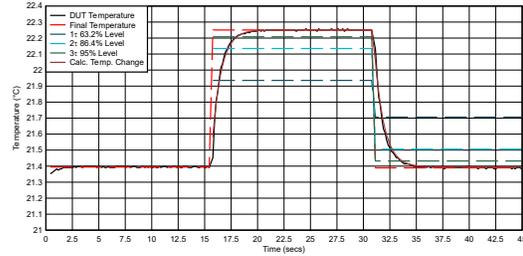


图 3-6. 热响应，6mil 柔性 CB、DRV 封装且未焊接测试点

### 刚性 PCB ( 11mm × 22mm ， 32mil 厚度 ) 与柔性 PCB ( 11mm × 22mm ， 6mil 厚度 )

热响应，32mil 刚性 CB、YBG 封装和热响应，6mil 柔性 CB、YBG 封装展示了装有采用 BGA WCSP 封装的器件时刚性和柔性 PCB 上的温度变化。这两种情况下的热阶跃相似性表明，主要热阻来自于 BGA 封装和 PCB 触点，而不是来自 PCB 本身。6mil 柔性 PCB 的稳定时间小于 2 秒，其升温曲线与理想的阶跃函数曲线非常接近。这一改进可以归因于柔性 PCB 的热质量较低。

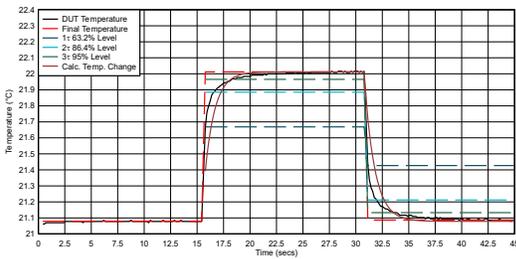


图 3-7. 热响应，32mil 刚性 CB、YBG 封装

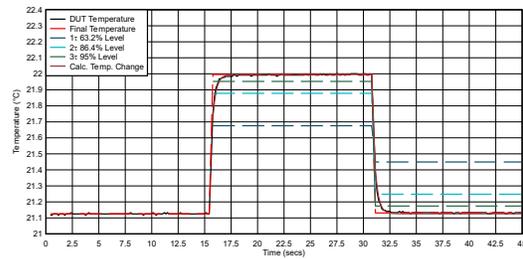


图 3-8. 热响应，6mil 柔性 CB、YBG 封装

## 4 热参数计算

如果知道 DUT 温度变化与相应的耗散功率变化之间的关系，则可以计算传感器与热敏头之间的热阻 (RT)。

此参数的计算公式如下：

$$R_T = \frac{T_1 - T_2}{P_1 - P_2} \quad (2)$$

其中

- $P_1$  和  $P_2$  是节 3.3 中步骤 1 和步骤 2 的耗散功率
- $T_1$  和  $T_2$  是节 3.3 中步骤 1 和 2 的传感器稳定温度

将阶跃最终温度的 95% 估算为  $3 \times \tau$  点，则可以估算系统时间常数。尽管这种自热和冷却过程并不完全符合理想的高斯曲线，但时间常数仍然是估算过程速度的便捷方法。已知时间常数和热阻 (RT) 后，可使用以下公式计算每种焊接情况下传感器的有效热质量：

$$M_T = \frac{\tau}{R_T} \quad (3)$$

需要了解的是，[方程式 3](#) 计算出的有效热质量大于封装的热质量，因为热质量还包括焊接器件周围连接的 PCB 面积。

## 5 测试结果总结与解读

以下各图汇总了不同传感器封装和 PCB 配置的测试结果，包括以下配置：

- 采用 WCSP BGA 封装 (WCSP) 的器件
- 采用 QFN/WSON 封装且焊接有散热焊盘 (TPS) 的器件
- 采用 QFN/WSON 封装且未焊接散热焊盘 (nTPS) 的器件

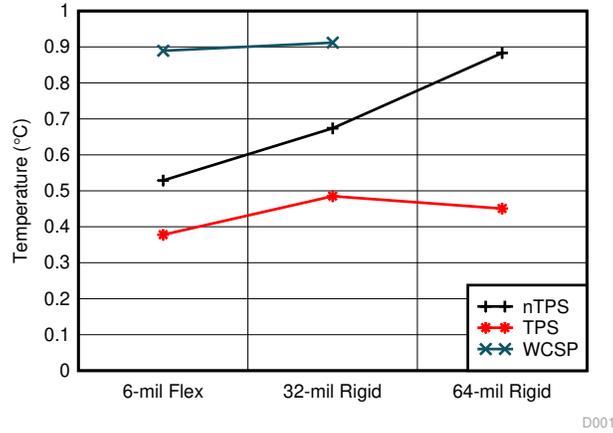


图 5-1. 平均 TMP117 自热温度偏移与 PCB 厚度之间的关系

以下观察是基于图 5-1 得出的：

- 采用 WCSP BGA 封装的器件 (YBG)：WCSP 器件的自热偏移最高，且几乎与电路板厚度无关。
- 采用 QFN/WSON 封装 (DRV) 且焊接有散热焊盘 (TP) 的器件：与未焊接散热焊盘 (nTPS) 相比，焊接有 TP (TPS) 的 QFN 器件具有最低的自热温度。
- 电路板厚度：自热温度与电路板厚度成正比，这是预期现象。

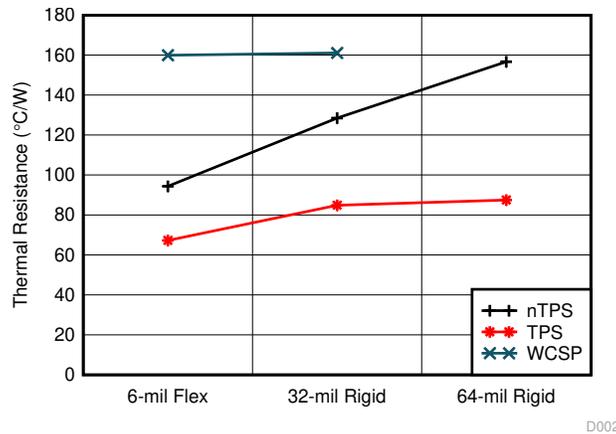
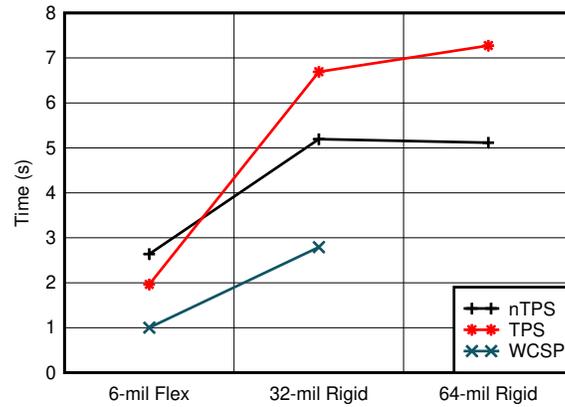


图 5-2. TMP117 与受测物体表面之间计算得出的平均热阻

以下观察是基于图 5-2 得出的：

- 采用 WCSP BGA 封装的器件：WCSP 电路板的热阻 (RT) 最高，约为 160°C/W。如 TMP117 数据表中所示，该数值源于封装的结至电路板热阻。在 WCSP 器件中，大多数热阻来自 WCSP 与 PCB 的接触，而 PCB 热阻的影响可以忽略不计。
- 采用 QFN 封装且焊接有散热焊盘 (TP) 的器件：采用 QFN 封装且焊接有 TP (TPS) 的器件热阻最小，约为 70°C/W 至 80°C/W。根据 TMP117 数据表，其 35°C/W 来源于封装的结至电路板热阻。
- PCB 厚度的影响：热阻会随着 PCB 厚度的增加而增加，这是预期现象。当未焊接 QFN 封装的 TP 时，这种影响变得更加明显。

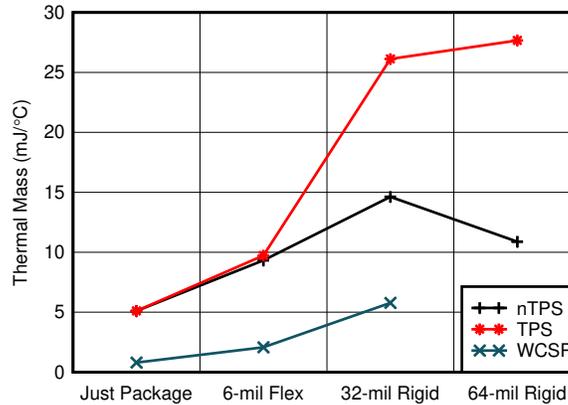


D003

图 5-3. 达到最终稳定温度水平 95% 的传感器稳定时间与电路板厚度间的关系

以下观察是基于图 5-3 得出的：

- 采用 **WCSP BGA** 封装的器件：尽管 WCSP 器件的热阻最高，但 WCSP 器件的稳定时间最短，通常为 1 至 3 秒。
- 采用 **QFN 封装且焊接有散热焊盘 (TP)** 的器件：采用 QFN 封装且焊接有 TP 的器件的稳定时间最长。这很可能是由于现在连接到 TP 的焊接材料导致了热质量增加。
- **焊接的影响**：对于采用 QFN 封装的器件，与未焊接 TP (nTPS) 相比，在刚性测试板上焊接有 TP 时，稳定时间通常会增加 30%。



D004

仅封装是指 TMP117 器件数据表中规定的封装热质量。

图 5-4. 计算得出的有效传感器热质量与电路板厚度间的关系

以下观察可从图 5-4 推断得出：

- **6mil 柔性 PCB 中的器件**：6mil 柔性测试板的有效热质量接近数据表中给出的封装热质量。
- 采用 **QFN 封装且焊接有散热焊盘 (TP)** 的器件：在 64mil 厚测试板组装采用 QFN 封装的器件并焊接有 TP 时，有效热质量最高，是在柔性测试板上组装采用 WCSP BGA 封装的器件时的 10 倍。

表 5-1 展示了不同测试的所有结果，并汇总了计算结果。请注意，WCSP-6 (YBG) 的封装热质量为 1mJ/C，QFN/WSON (DRV) 封装的热质量为 5mJ/C：

表 5-1. 测试结果

封装	是否焊接有 TP	PCB	有效热质量 (mJ/°C)	热阻 (°C/W)	95% 热响应时间 (秒)	15 秒自热温度偏移 (°C)
WCSP-6/BGA (YBG)		6mil 柔性	2	160	1	0.9
		32mil 刚性	6	160	2.8	0.9

表 5-1. 测试结果 (续)

封装	是否焊接有 TP	PCB	有效热质量 (mJ/°C)	热阻 (°C/W)	95% 热响应时间 (秒)	15 秒自热温度偏移 (°C)
WSON/QFN-6 (DRV)	是	6mil 柔性	9	62	2	0.38
		32mil 刚性	26	82	6.8	0.59
		64mil 刚性	27	83	7.2	0.57
	否	6mil 柔性	9	82	2.7	0.51
		32mil 刚性	14	125	5.1	0.68
		64mil 刚性	12	148	5.1	0.87

## 6 总结

- 采用 **WCSP BGA** 封装的器件组装在柔性 PCB 上：柔性 PCB 上的 WCSP 器件具有最短的稳定时间。但是，由于物体表面的热阻较高，任何温度泄漏到空气中都可能导致显著的温度偏移。为了解决这个问题，强烈建议使用隔热泡沫等保护技术。这种泡沫不应增加传感器的热质量。此外，设计人员还应解决柔性 PCB 和测量表面之间的接触难题。由于温度波动很容易影响传感器读数，因此不建议在温度变化较大的环境中采用此设计。要了解有关更大限度地减少自热的详细预防措施，请参阅 [使用 TMP116 和 TMP117 进行精确的温度测量](#) 应用手册。
- 采用 **QFN 封装且焊接有散热焊盘 (TP)** 的器件：采用 QFN 封装且焊接有散热焊盘的器件具有最低的热阻和最高的热质量。然而，这种设计不宜广泛推荐，因为焊接 QFN 封装散热焊盘会给硅片带来额外的应力，导致高达  $\pm 100\text{m}^\circ\text{C}$  的温度偏移。如果设计需要焊接 QFN 封装的散热焊盘，则强烈建议进行系统校准。有关更多详细信息，请参阅 [使用 TMP116 和 TMP117 进行精确的温度测量](#) 应用手册。
- 采用 **QFN 封装且未焊接散热焊盘 (nTPS)** 的器件：在刚性 PCB 上组装采用 QFN 封装的器件且未焊接散热焊盘是最为常见的应用案例。通过改变 PCB 厚度，用户可以调整有效的热质量，该热质量可充当温度波动滤波器并减少对传感器内部数据求平均值的需求。如果可能，还强烈建议使用隔热泡沫来减少温度泄露到周围空气中。

通过了解这些结论，设计人员可以做出明智的决策，以优化各种应用中的热响应和测量精度。

## 7 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[使用 TMP116 和 TMP117 进行精确的温度测量](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[TMP117 具有 SMBus™ 和 I²C 兼容接口的高精度、低功耗数字温度传感器](#) 数据表。

## 8 修订历史记录

<b>Changes from Revision * (September 2024) to Revision A (October 2024)</b>	<b>Page</b>
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 将文档标题从分析高精度温度传感器中的热响应更改为分析高精度温度传感器中的 PCB 热阻 .....	1

## 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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司