

Design Guide: TIDA-01624

支持 **Bluetooth®** 的高精度皮肤温度测量柔性 PCB 贴片参考设计

说明

此参考设计演示了如何结合使用 TMP119 高精度数字温度传感器与 CC2340R5 无线 MCU 来实现高精度皮肤温度检测。此设计指南为医疗和可穿戴应用中的皮肤温度测量提供了设计指导，并附带评估软件和智能设备应用。

资源

TIDA-01624	设计文件夹
TMP119	产品文件夹
CC2340R5	产品文件夹

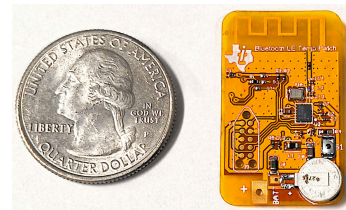
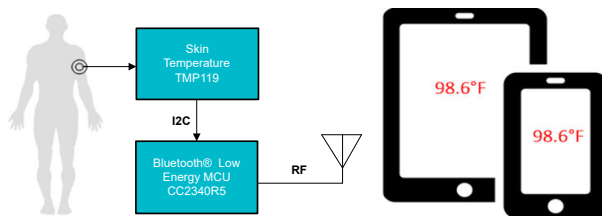


特性

- 高精度 ($\pm 0.08^{\circ}\text{C}$) 体温测量
- 2.4GHz 无线 MCU，支持低功耗 Bluetooth® 5.3
- 集成 PCB 天线
- PCB 设计灵活
- 使用一颗 5.5mAh 纽扣电池可实现长达两年的货架期和 5 天的工作时间
- 用于设备监测的 iOS® 和 Google Play® 应用程序

应用

- [医疗传感器贴片](#)
- [可穿戴健身和活动监测仪](#)



1 系统说明

随着将传感器集成到新型无线和云应用的需求出现，这款支持蓝牙技术的高精度皮肤温度测量柔性贴片，为在智能手机或平板电脑等支持蓝牙的设备上接收高精度皮肤温度测量，提供了一种无线解决方案。

通过与皮肤直接接触，高精度、低功耗、数字温度传感器 TMP119 可以通过 I²C 向 CC2340R5 SimpleLink™ 低功耗蓝牙无线微控制器 (MCU) 发送 16 位数字输出数据。收集这些数据后，CC2340R5 可以使用蓝牙协议将数据传输到通过蓝牙连接的设备。

该贴片设计采用 3V 纽扣电池供电，这要求设计组件功耗极低。出于测试和演示目的，在未连接电池时，设计人员可以使用器件的大接触焊盘从其他电源获取外部电力。

该贴片有两种主要的工作模式：活动模式和非活动模式。当贴片处于非活动状态时，CC340R5 进入完全关断状态，并且 TMP119 断电。该模式能让贴片拥有多年的货架期，而不会显著耗尽电池中储存的能量。当设计人员按下唤醒开关时，柔性贴片进入活动模式，TMP119 开始读取并自动广播温度数据，而 CC2340R5 低功耗蓝牙器件可以接收这些数据。

在医疗保健应用中，由于卫生问题，重复使用或长时间使用监测贴片可能会对患者健康造成风险。温度监测系统的一种替代方案是使用一次性可移除的覆盖物。这在用于口腔温度测量的探头式温度计设计中很常见。如果使用此方法，则必须将系统和这些覆盖物板作为最终设计进行表征。对于探头，设计人员可以修改软件，使其在活动和非活动模式之间切换，但在修改下，探头中必须有 MCU 来使用蓝牙通信协议。

1.1 主要系统规格

表 1-1. 主要系统规格

参数	规格	详细信息
工作电源电压范围	1.71V 至 3.8V	受 CC2340R5 和 TMP119 电源电压范围限制
工作温度	-40°C 至 +125°C	受 CC2340R5 工作范围限制
温度精度	0°C 至 +45°C 范围内为 ±0.08°C (最大值)	超过体温测量要求
通信范围	> 10m	低功耗蓝牙 5.3
外形	2 层柔性 PCB	

2 系统概述

2.1 方框图

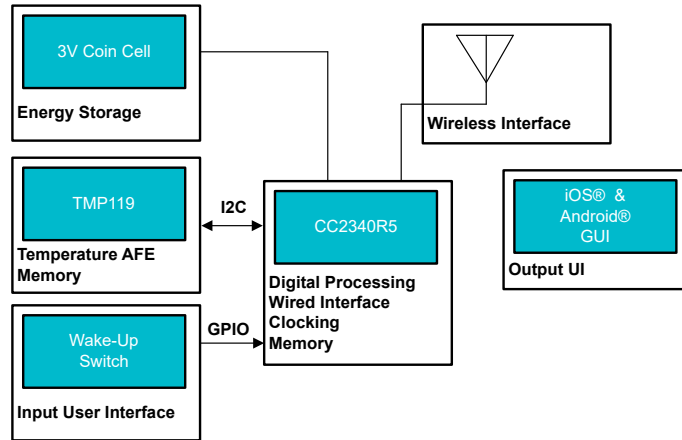


图 2-1. TIDA-01624 方框图

2.2 设计注意事项

仔细考虑贴片的放置位置，确保温度读数与预期结果一致。使用口腔体温计测量时，健康成人的平均体温为 37°C (98.6°F)，但从身体其他部位测得的体温会有所不同。例如，颞部温度计测得的体温可能比口腔温度计低多达一度 (1°F)。

这里的关键区别在于 *核心温度* 和 *皮肤温度*。此设计的主要目标是展示有效的皮肤温度测量技术。患者的皮肤温度通常与患者的核心温度不同。获得核心温度的最精确方法是内部测量，例如使用口腔或直肠温度计。在某些应用中，例如在新生儿重症监护室 (NICU) 的保温箱中进行长期患者监测，皮肤温度监测通常是唯一可行的方法。而在健身追踪器和心率监测器等应用中，皮肤温度还能与其他参数结合使用。

当使用皮肤温度尝试获得接近核心温度的测量值时，首选部位通常是腋下 (腋窝) 或前额 (颞部)。此贴片的外形设计为通用的圆形，可贴在皮肤的任何部位。针对腋下测量，最好将 TMP119 从主电路板部分延伸出来，使射频天线暴露在外，同时将传感器置于用户腋下方。

该设计的蓝牙有效通信范围取决于多个因素，例如贴片和智能设备之间的墙壁和物体。然而，在佩戴状态下，信号损耗的主要来源可能是佩戴者本身。为了提高通信范围，可以通过对 CC2340R5 进行编程，以增大蓝牙输出功率，但这会缩短贴片的电池寿命。在正常运行状态下，该贴片由 3V 纽扣电池供电；因此，建议使用低功耗蓝牙模式来延长设计的运行时间。如图所示，此设计使用 CC2340R5 的最大输出功率来实现更远的通信范围。或者，可以在设备佩戴状态下对天线和 PI 网络进行匹配，从而在不增加 CC2340R5 输出功率级别的情况下增大信号范围。

2.3 重点产品

支持蓝牙技术的高精度皮肤温度测量柔性 PCB 贴片具有以下器件：

- **TMP119** - 高精度、低功耗数字温度传感器
- **CC2340R5** - SimpleLink™ 32 位 Arm® Cortex®-M0+ 2.4GHz 无线 MCU

2.3.1 TMP119

TMP119 是一款低功耗、高精度数字温度传感器，可提供 16 位温度结果，分辨率为 7.8125m°C，无需校准即可实现高达 $\pm 0.08^{\circ}\text{C}$ 的精度。TMP119 的工作电压范围为 1.7V 至 5.5V，功耗通常为 3.5 μA ，并采用 0.95mm × 1.488mm DSBGA 封装。该器件还具有集成式 EEPROM 和温度偏移寄存器，其中可包含单点校准数据。

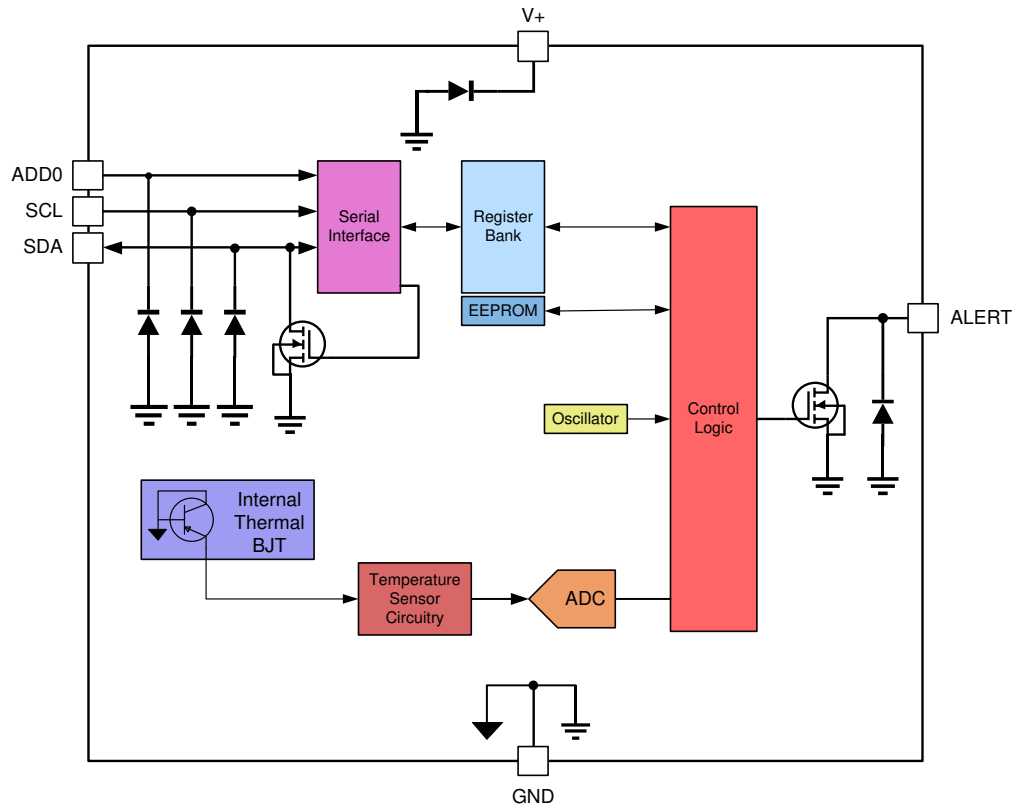


图 2-2. TMP119 内部方框图

2.3.2 CC2340R5

CC2340Rx SimpleLink™ 系列器件为 2.4GHz 无线微控制器 (MCU)，面向低功耗 Bluetooth® 5.3、Zigbee®、Thread 和专有 2.4GHz 应用。这些器件针对医疗应用的低功耗无线通信进行了优化。该器件的突出特性包括：

- 完全合格的 Bluetooth 5.3 软件协议栈 (SimpleLink™ 低功耗 F3 软件开发套件 (SDK) 随附)
- 超低待机电流不到 0.71 μA 并具有 RTC 操作和完全 RAM 保持，可显著延长电池寿命，尤其是对于睡眠间隔较长的应用
- 集成平衡-非平衡变压器，可减少物料清单 (BOM) 电路板布局布线
- 出色的无线电敏感度和稳健性 (选择性与阻断) 性能，适用于低功耗 Bluetooth (125kbps LE 编码 PHY 且集成平衡-非平衡变压器时为 -102dBm)

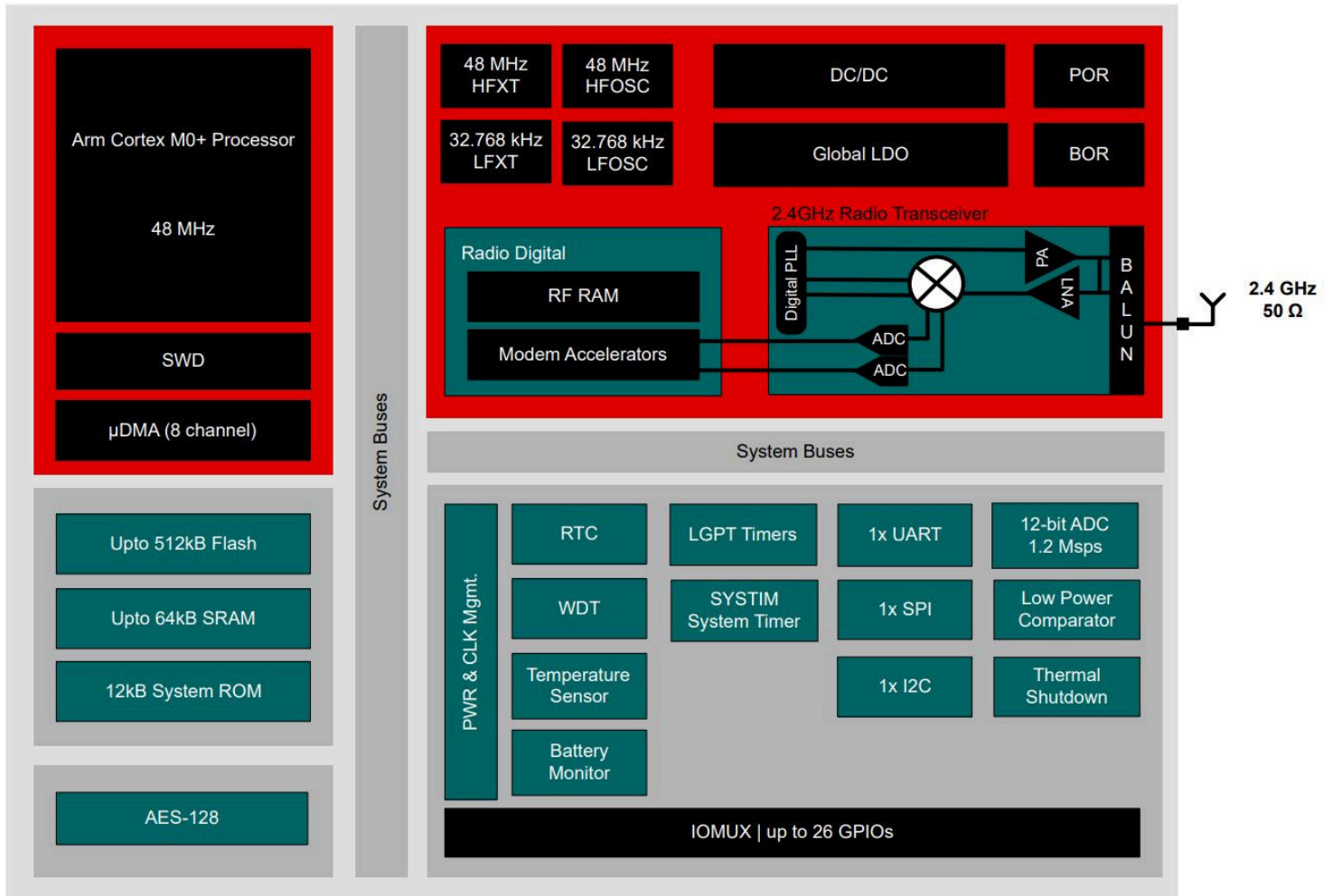


图 2-3. CC2340R5 方框图

2.4 系统设计原理

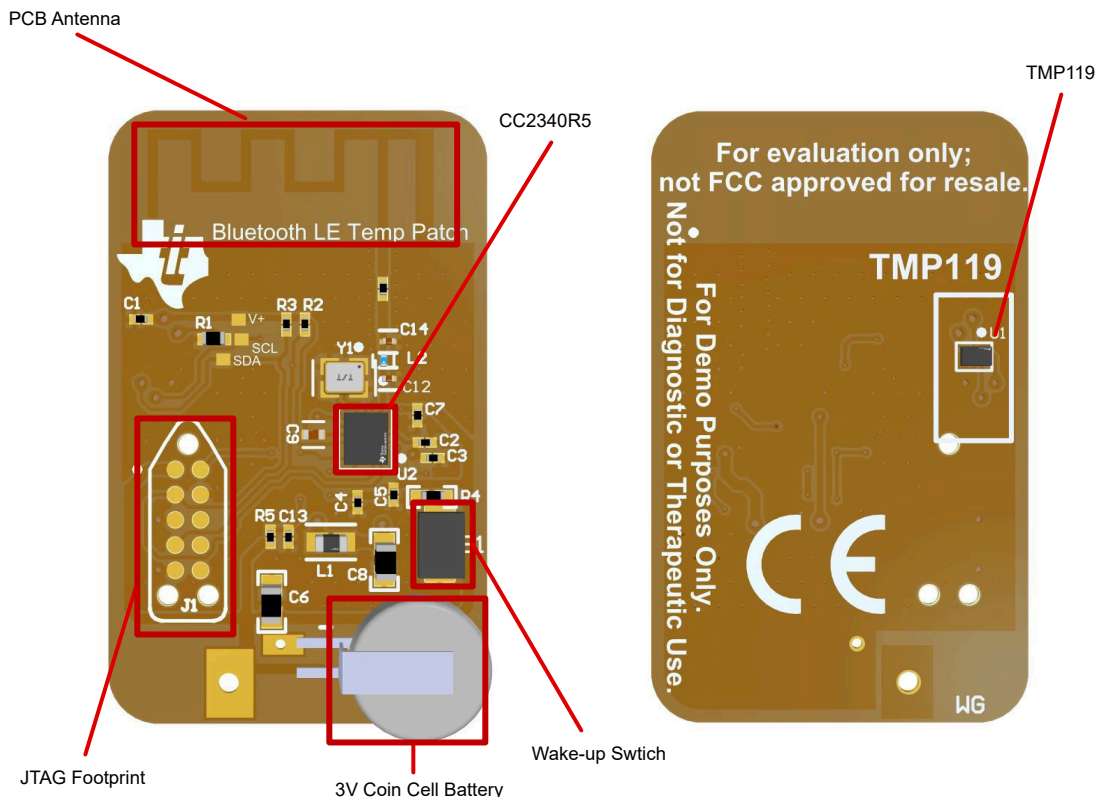


图 2-4. 设计布局中的主要特性

可穿戴贴片的系统设计要求在某些应用中可能会有所不同。此设计考虑的要求包括：

- 存放期
- 工作寿命
- 通信范围
- 佩戴舒适性
- 系统精度

2.4.1 货架期和工作寿命

此设计的功率预算基于设计的货架期（非活动状态）和工作寿命（活动状态）要求。在支持蓝牙技术的高精度皮肤温度柔性贴片中，CC2340R5 配置为保持关断模式，直到按下触控开关 (S1) 并触发贴片唤醒。由于 TMP119 的整体电流消耗较低，因此使用其中一个 CC2340R5 GPIO 为温度传感器供电。这样可以去除温度传感器的关断电流，从而降低总设计关断电流。因此，该设计在关断模式下的电流消耗现在限制为 165nA，这主要来自 CC2340R5 MCU。因此，此设计的总货架期预计至少为两年。该使用寿命受限于电池的典型货架期，而不是电荷储存量。如果使用备用电源，货架期可能会发生相应变化。

为了满足工作寿命要求，温度贴片需要在贴片连接到佩戴者后可以运行数天之久。通过限制测量频率和随自动广播脉冲发送温度数据，可以降低电流消耗。节 3.2.2.1 展示了支持蓝牙技术的高精度皮肤温度柔性贴片的电流消耗结果。如果贴片处于活动状态但未连接到佩戴者，则贴片每秒可以自动广播多达四次，以 1 秒的间隔测量温度，并且预期运行时间大于 10 天。连接后，工作寿命预计约为 1 天。因此，在正常情况下，贴片在大部分时间都处于广播模式，仅在需要进行连接。

2.4.2 佩戴舒适性

此设计采用 2 层柔性 PCB 来减少热质量并更大限度地提升电路板的柔韧性。柔韧性的主要优势是能让佩戴者感觉轻松舒适，进而增加贴片在患者身上保持固定的可能性。尽可能减小需要实心接地层的射频部分等区域，以尽量减少电路板上让佩戴者感到僵硬的部分。佩戴舒适性无法量化，因此在设计任何最终产品时考虑这一因素非常重要。可以选择用软纱布或各类绷带将最终系统包裹起来，在电路板与佩戴者之间起到缓冲作用。如果这样做，请注意确保 TMP119 与佩戴者皮肤之间的热传导路径在响应时间和准确性方面依然保持优化状态。最终产品还必须结合预期的包装进行表征。[可穿戴温度感测布局注意事项](#) 和 [无线患者体温监测器的设计难](#) 应用简报中列出的建议可以帮助设计人员改善系统响应时间和精度。

2.4.3 系统精度

为了符合针对间歇式患者体温监测仪的 ISO-80601 和 ASTM E1112 医疗标准，必须使用液浴和高精度基准来验证系统精度。[表 2-1](#) 汇总了 ASTM E1112 规定的这些精度要求。TMP119 旨在超越这些要求，但设计人员还必须考虑将器件集成到设计中所引起的温度偏移，以实现整体系统精度。在所需范围中心附近进行单点校准，可以在大多数系统内实现精度要求，并且这种偏移校正可以存储在 TMP119 的温度偏移寄存器中。

如果生产系统中需要偏移，设计人员必须对最终产品进行具有统计显著性的抽样测试，以确定 TMP119 的最佳偏移量，或计划在制造过程中执行校准。

表 2-1. ASTM E1112 标准下的温度精度要求

温度 (°C)	最大误差 (°C)
< 35.8	±0.3
35.8 - 37	±0.2
37.0 - 39.0	±0.1
39.0 - 41.0	±0.2
> 41.0	±0.3

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 所需的硬件和软件

除非另有说明，否则此设计的实现和测试均使用以下电池规格：

- 电压：3.0V
- 最小容量：5.5mAh
- 最大连续放电速率：0.25mA

3.1.1 硬件

对设备进行编程需要计算机和 JTAG 编程器。使用时需要智能手机或平板电脑 (Android 或 iOS) 才能与设备进行通信。

3.1.2 软件

此设计具有嵌入式固件，必须将其编程到贴片中。为了编译和加载嵌入式固件，需要以下软件：

- [Code Composer Studio™](#)
- [SIMPLELINK-LOWPOWER-F3-SDK](#) — 适用于 CC23xx 器件的 SimpleLink™ 低功耗 F3 软件开发套件 (SDK)

若要从贴片查看温度或连接到贴片，需要在运行 Android 或 iOS 的智能手机或平板电脑上使用以下应用程序。

- [SimpleLink™ Connect](#)

3.1.2.1 从贴片读取数据

本节列出了如何读取贴片数据以及如何浏览 TI SimpleLink™ Connect 应用程序的步骤。从贴片读取数据时，附近需要一部智能手机和该设备的电源。图 3-1 至图 3-5 展示了如何浏览 TI SimpleLink™ Connect 应用程序。

1. 启动时，TI SimpleLink™ Connect 应用程序默认搜索所有低功耗蓝牙连接（请参阅图 3-1）。要更快地找到名为 *TI BLE HT Profile* 的温度贴片，请轻触三个点，然后选择筛选和排序选项页面。

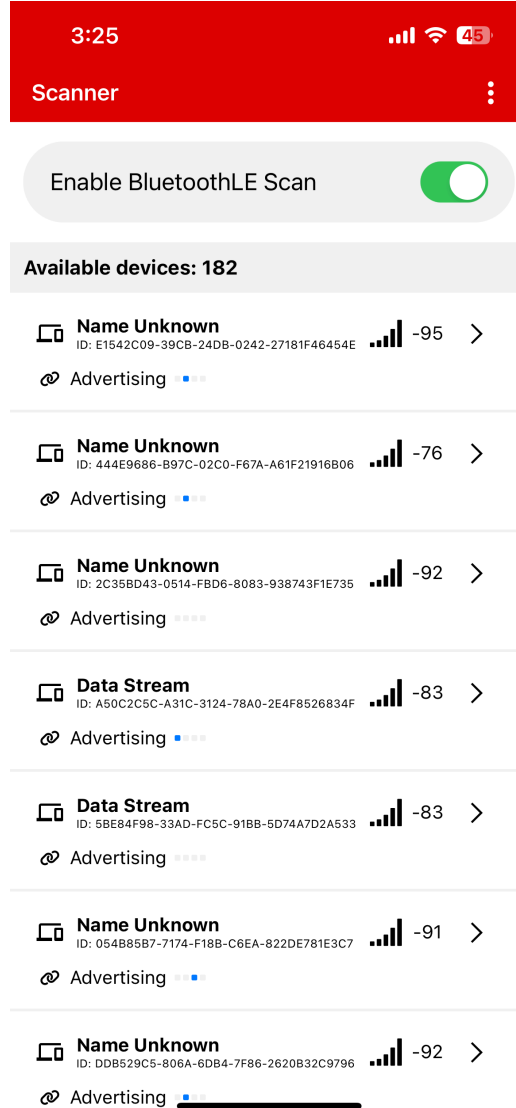


图 3-1. 搜索所有蓝牙连接

2. 将 **App name** 开关切换为“On”并输入“”

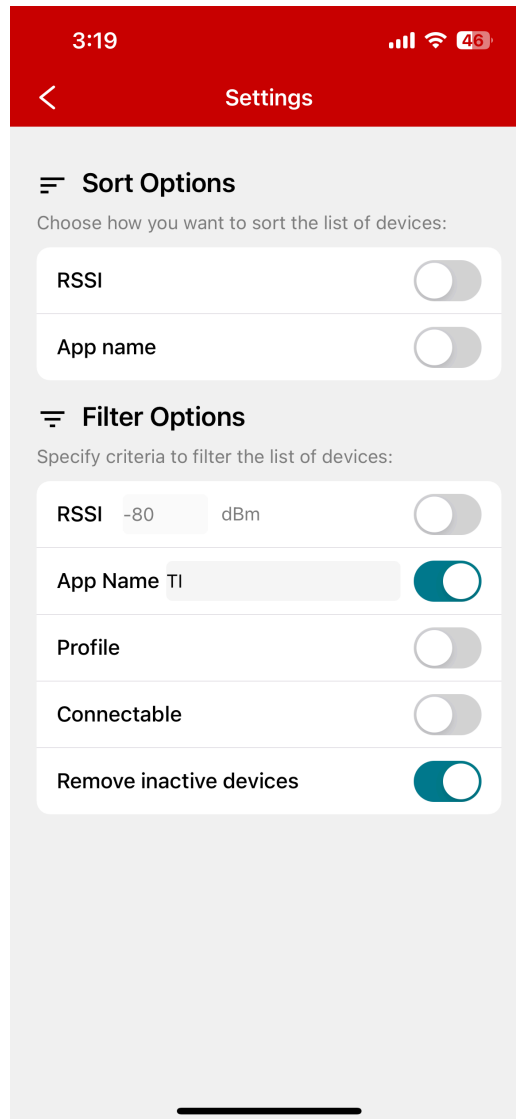


图 3-2. 筛选设置

3. 返回至 [搜索蓝牙连接页面](#)，并按 **大于号** > 按钮来选择 **TI BLE HT Profile**。

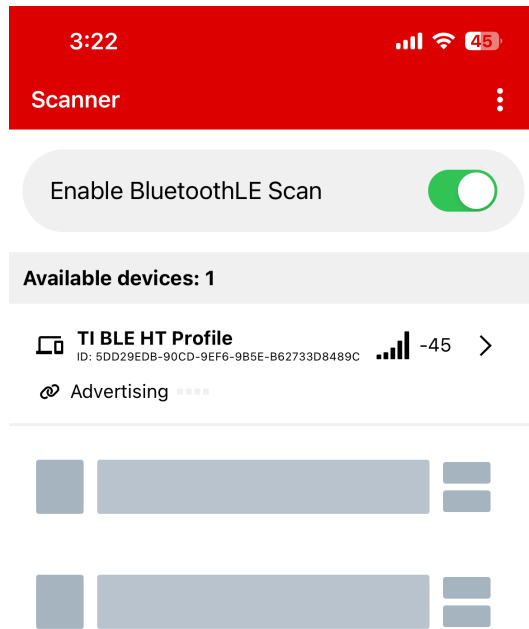


图 3-3. 搜索蓝牙连接页面

4. 点击 *Health Thermometer* 选项。

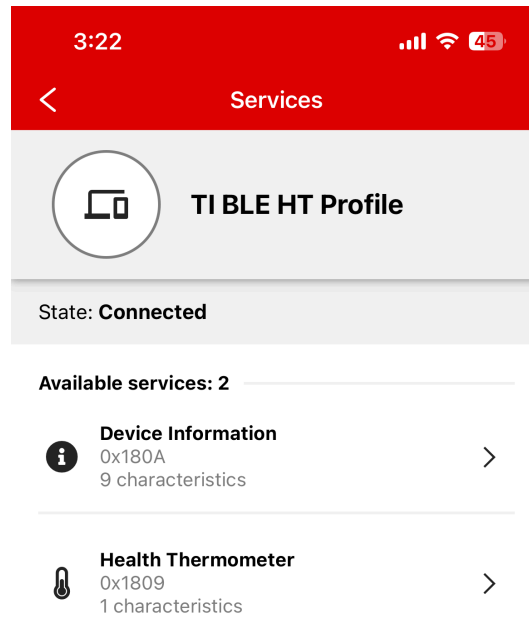


图 3-4. TI BLE HT Profile 主页

5. 将“Polling Interval”设置为 5 seconds 并打开“Enable Indications”。

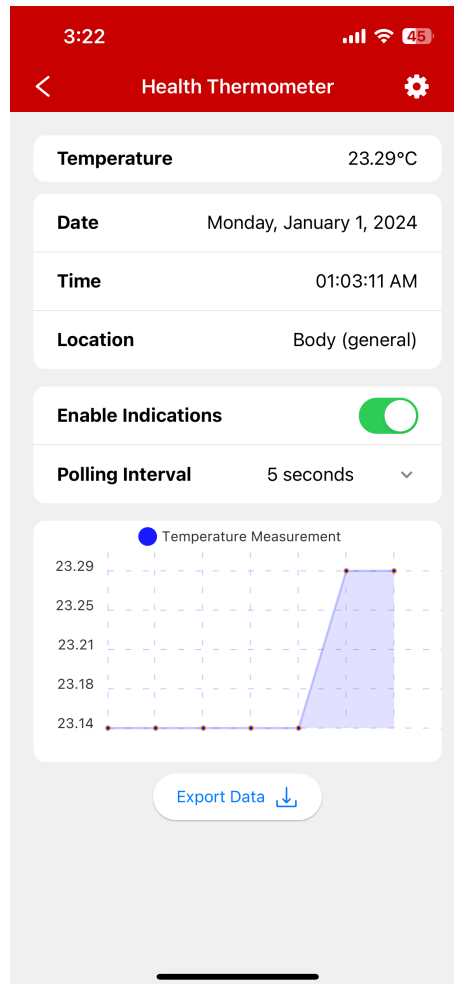


图 3-5. Health Thermometer 数据流页面

3.2 测试和结果

3.2.1 测试设置

3.2.1.1 电流消耗和使用寿命

在测试设备的电流消耗时，无线贴片上的电源贴片连接到能够以较短间隔测量 nA 级电流的直流功率分析仪。在初始化期间的电流消耗测试中，在无线贴片的贴片连接到功率分析仪后，就会立即测量电流消耗。测量覆盖了整个启动序列，并获取了平均电流。然后，功率分析仪保持连接并继续进行测量，同时设备在广播模式和连接的工作模式之间循环切换。这里获取了工作模式期间的平均电流消耗和峰值电流消耗，因为这两者都对电池选择具有重要意义。

3.2.2 测试结果

节 3.2.2.1 一节介绍了对贴片执行的测试的结果。

3.2.2.1 电流消耗和使用寿命

图 3-6、图 3-7 和图 3-8 显示了贴片在各种设置下的电流消耗。表 3-1 汇总了结果。在最终设计中，贴片配置为每 5 秒自动广播一次，每 5 秒读取一次温度。连接间隔由所连接的移动设备决定，但设备只允许在 1% 的活动时间内保持连接状态。在其余 99% 的活动时间中，设备处于广播模式。

方程式 1 展示了如何估算贴片在整个生命周期内的功耗。方程式 2 展示了测试示例计算，其中货架期为两年，活动时间为 5 天，99% 的时间处于广播模式且 1% 的时间处于连接模式。根据测试期间测量的平均电流和上述测试参数，计算出设备消耗的电池电量为 4.86mAh，这小于 5.5mAh 的电池容量。

$$Q_{\text{Battery}} = I_{\text{Shelf}} \times T_{\text{Shelf}} + (I_{\text{Advertise}} \times P_{\text{Advertise}} + I_{\text{Connected}} \times P_{\text{Connected}}) \times T_{\text{Active}} \quad (1)$$

其中

- Q_{Battery} 是消耗的电池电量 (以 mAh 为单位)
- I_{Shelf} 是器件关断期间的电流消耗 (以 mA 为单位)
- T_{Shelf} 是贴片处于器件关断状态的时间 (以小时为单位)
- $I_{\text{Advertised}}$ 是贴片处于活动状态并处于广播模式时的平均电流消耗 (以 mA 为单位)
- $P_{\text{Advertised}}$ 是贴片处于活动状态并处于广播模式的时间比例 (以 1 为单位)
- $I_{\text{Connected}}$ 是贴片处于活动状态并处于连接模式时的平均电流消耗 (以 mA 为单位)
- $P_{\text{Connected}}$ 是贴片处于活动状态并处于连接模式的时间比例 (以 1 为单位)
- T_{Active} 是贴片在器件关断后处于活动模式的时间 (以小时为单位)

$$4.86\text{mAh} = 0.000165 \times 17520 + (0.0143 \times 0.99 + 0.227 \times 0.01) \times 120 \quad (2)$$

表 3-1. 平均电流消耗

条件	测得的电流消耗	相关的图
初始化 (启动)	3.3mA (平均值) 持续 75ms	图 3-6
广播	9.6mA (峰值)	图 3-7
广播	14.3μA (平均值)	图 3-7
连接	7.6mA (峰值)	图 3-8
连接	227.7μA (平均值)	图 3-8

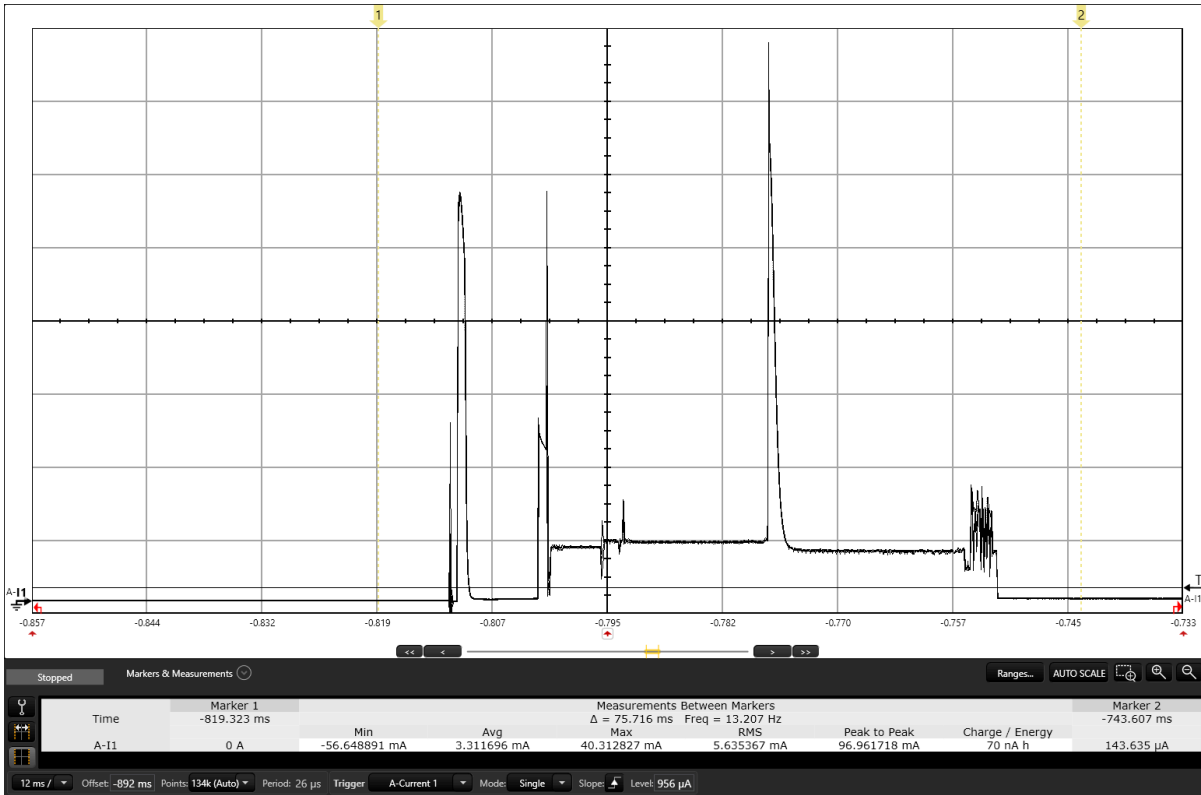


图 3-6. 启动电流消耗



图 3-7. 1s 自动广播的平均电流消耗

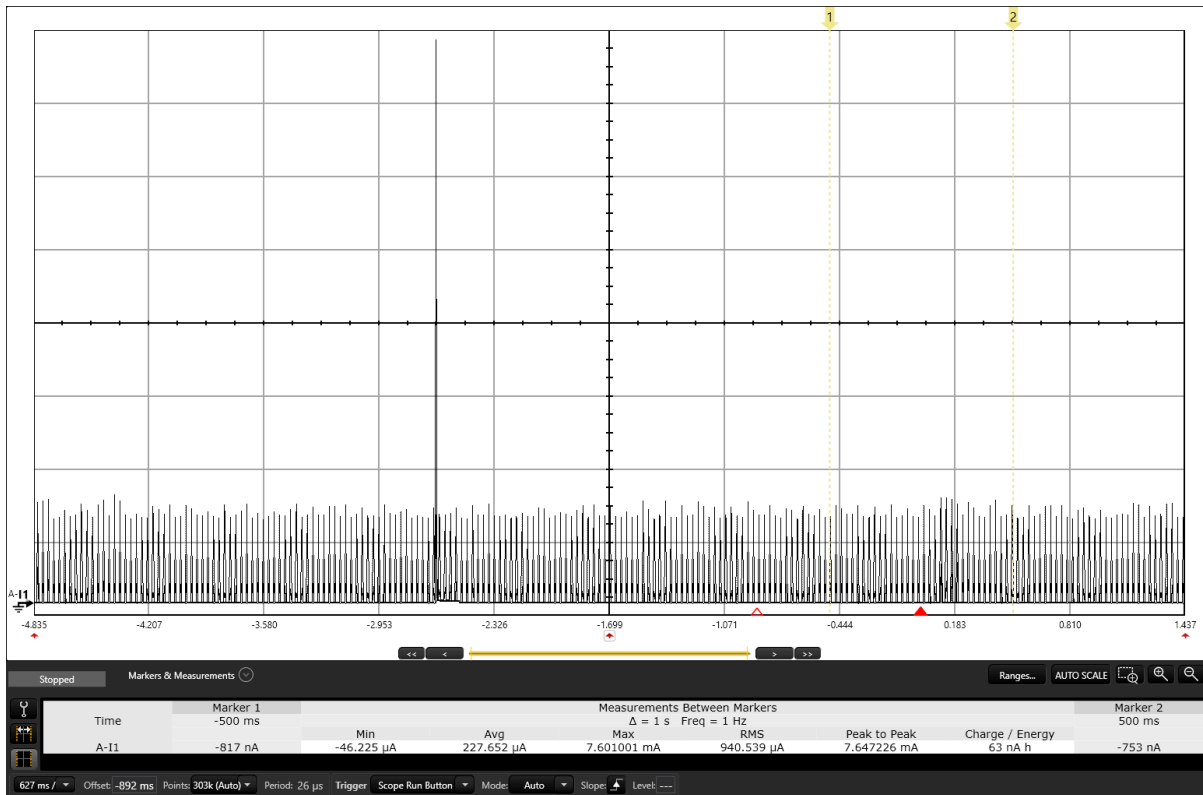


图 3-8. 连接到智能设备时的平均电流消耗

4 设计文件

4.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-01624](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-01624](#) 中的设计文件。

4.3 PCB 布局建议

柔性 PCB 贴片的布局在两层电路板上完成，旨在更大限度地提高整个电路板的柔韧性。层数越多，电路板的弯曲半径可能就越小，进而影响佩戴者的舒适度。如需有关柔性 PCB 的一般性建议，请咨询相应的柔性电路板制造商。这些电路板极薄，因此在焊接或回流过程中，电路板对施加的热量很敏感。务必要考虑这一点，以更大限度地减少对电路板布线的潜在损坏。如果可靠性是一个关键考量因素，可以考虑通过在电路板上不打算弯曲的部分使用加固基板来应用半刚性设计外形。

4.3.1 CC2340R5 的布局注意事项

CC2340R5 以及射频匹配网络和天线需要在电路板底层有大面积的覆铜，以提供低阻抗接地路径。在两层设计中，这意味着基本上只有顶层可用于路由进出 CC2340R5 的信号。应注意确保必要的旁路元件仍然尽可能靠近 IC 放置。CC2340R5 下方的多个过孔为器件提供了低阻抗接地路径。图 4-1 展示了柔性 PCB 上的 CC2340R5 WCSP 位置和接线。

在两层设计案例中，务必要考虑平衡-非平衡变压器和射频天线的信号布线宽度。在大多数刚性 PCB 中，通常可能找到宽度合理的布线，使其与设计阻抗匹配。但在 2 层设计中，电路板厚度、PCB 设计规则和电路板预期成本会限制这些布线的最大特征阻抗。如果无法实现匹配，TI 建议尽可能缩短这些布线。此外，还预留了一个采用 0201 封装的 PI 型匹配网络，以便与集总元件进行匹配。将贴片贴附于佩戴者皮肤上以模拟使用环境，从而执行射频阻抗匹配。

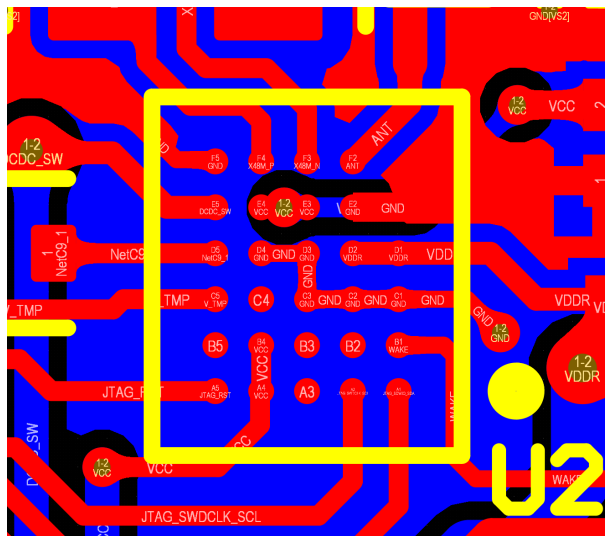


图 4-1. 2 层柔性贴片上的 CC2340R5 布线，其中接地平面以蓝色显示

4.3.2 TMP119 的布局注意事项

4.3.2.1 WCSP (YBG) 封装

支持蓝牙技术的高精度皮肤温度测量柔性 PCB 贴片使用 TMP119AIYBGR 来展示一种潜在的皮肤体温测量技术。在此设计中，TMP119 WCSP 版本带有涂层的背面直接与佩戴者的皮肤接触，热量从皮肤直接传导到 TMP119。在使用该技术的终端系统中，TMP119 可以覆盖一层柔软的二次成型材料来保护器件免受损坏。图 4-2 显示了 TMP119 位于贴片的皮肤接触一侧。



图 4-2. PCB 编辑器中的 TMP119AIYBGR 布局

对于那些带有外壳但仍需要测量皮肤温度的应用（例如智能手表或耳塞），这项技术可以进行调整。TMP119 可以放置在与金属触点接触的位置，以便从佩戴者的皮肤传导热量，如图 4-3 所示。或者，也可以使用该器件的底部来传递热量，如图 4-4 所示。如果使用封装的底部，可考虑使用由生物相容性和导热性材料（例如不锈钢）制成的电路板加固基板。

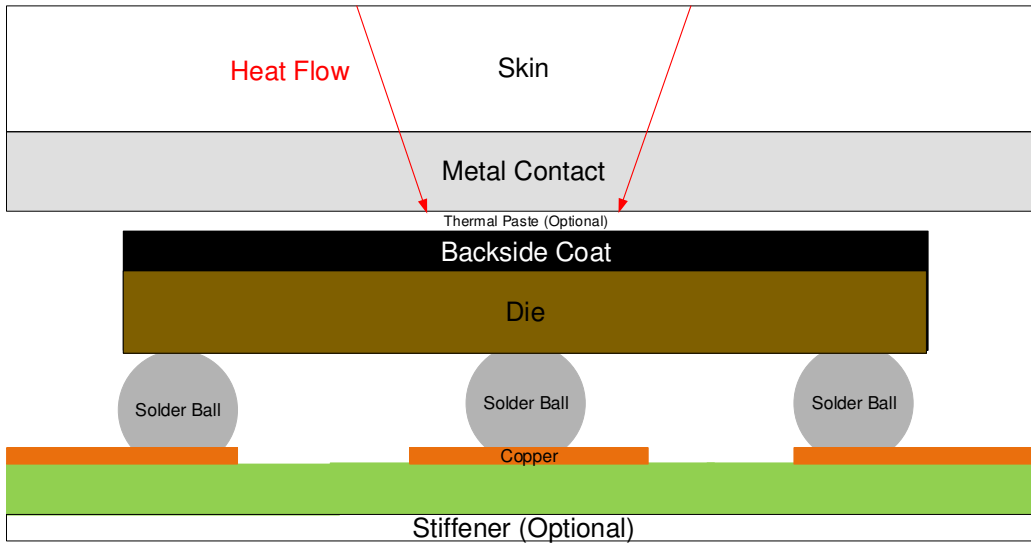


图 4-3. 使用 WCSP 封装 TMP119 顶部透过外壳进行检测的堆叠示例

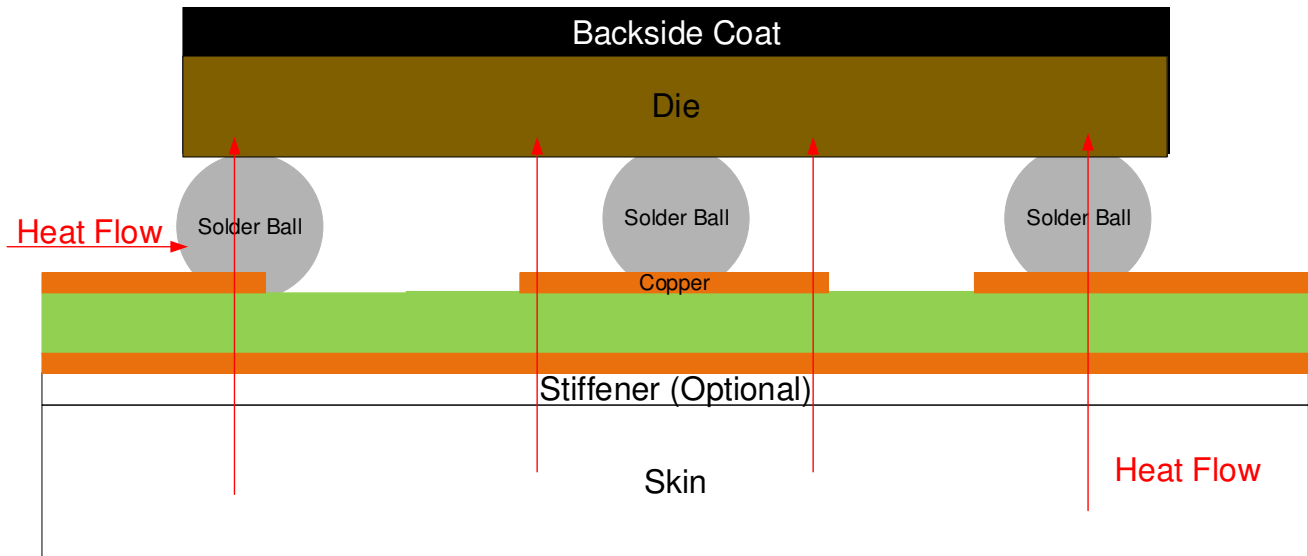


图 4-4. 使用 WCSP 封装 TMP119 从底部进行检测的堆叠示例

4.3.3 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-01624](#) 中的设计文件。

4.4 Altium 工程

要下载 Altium 工程文件，请参阅 [TIDA-01624](#) 中的设计文件。

4.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-01624](#) 的设计文件。

4.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-01624](#) 中的设计文件。

4.7 相关文档

1. 德州仪器 (TI), [TMP119 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
2. 德州仪器 (TI), [可穿戴温度感测布局注意事项](#) 应用简报
3. 德州仪器 (TI), [无线患者体温监测器的设计难点](#) 应用简报
4. 德州仪器 (TI), [使用 TMP116 和 TMP117 进行精确的温度测量](#) 应用报告

4.8 商标

E2E™, SimpleLink™, and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.

Bluetooth® is a registered trademark of Bluetooth Special Interest Group (SIG).

iOS® is a registered trademark of Apple Inc.

Google Play® is a registered trademark of Google LLC.

Zigbee® is a registered trademark of ZigBee Alliance.

所有商标均为其各自所有者的财产。

4.9 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision A (May 2020) to Revision B (December 2024)	Page
• 整个设计指南通篇将支持的器件从 TMP117 更改为 TMP119 并将 CC2640R2F 更改为 CC2340R5。通篇更新了表格、图和交叉参考的编号格式。.....	1

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司