

Design Guide: TIDA-060034

体温监测用耳戴式设备柔性 PCB 插接条参考设计



说明

该参考设计演示了通过耳戴式设计使用 TMP117 在耳部准确测量体温。此设计在适用于耳戴式设备的小型柔性电路板上使用了两个 TMP117 器件。该设计集成了两个温度传感器，用于补偿系统或环境温度变化，以免其影响体温测量的准确性。

资源

TIDA-060034

设计文件夹

TMP117

产品文件夹



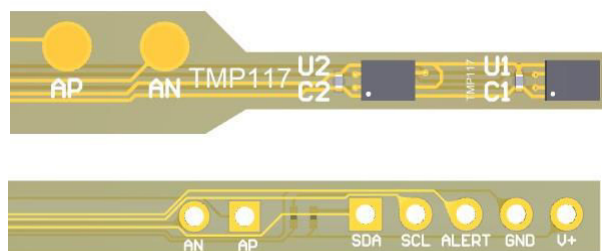
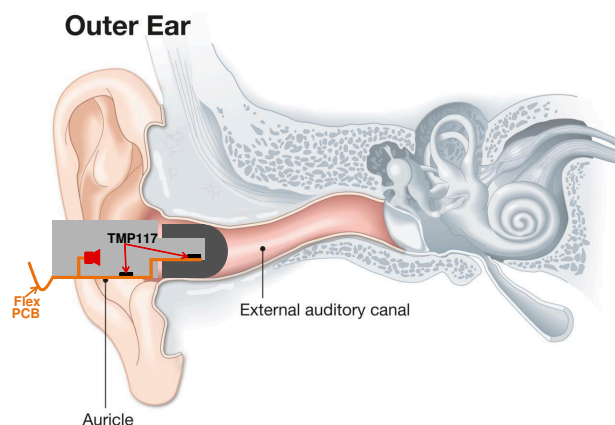
咨询我们的 TI E2E™ 支持专家

特性

- TMP117：最大精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、3.5 μA 超低功耗温度传感器
 - 1 号 TMP117 耳内膜温度
 - 2 号 TMP117 系统/环境温度
- 集成扬声器焊盘和音频输入连接
- 薄膜柔性材料
- 用于连接外部 MCU 的分线

应用

- 耳麦、耳机和耳塞
- 助听器



1 系统说明

随着对健康数据采集的需求不断增长，精确体温监测需求变得非常迫切。一直以来，体温趋势跟踪用来指征潜在疾病、睡眠周期中断、运动员恢复状况以及其他健康趋势。

虽然口腔和直肠温度测量是常用的精确测量体温方法，但它们非常具有侵入性。一种侵入性较低的精确体温测量方法是在耳内通过鼓膜测量。几十年来，在耳内测量体温一直是一种常见的做法，而将高精度温度传感器集成到耳塞或助听器等耳戴式设备中也具有相同功能。

耳戴式设备靠近鼓膜，可以在耳道中形成密封，从而提供一个可行的环境，以获得相对于人体温度的稳定温度测量。耳机、耳塞和助听器设计得非常舒适，因此可以连续佩戴数小时，有时甚至数天。因此，可以持续跟踪个人的温度并能够确定正常温度的趋势和任何正常值偏离，这可能表明潜在的感染、荷尔蒙波动或疾病。

TMP117 的高精度、低功耗、数字温度传感器可以通过 I²C 将 16 位数字温度数据发送到微控制器。周围的电子系统和环境温度会在温度读数中产生不同的偏移，因此可以使用另一个 TMP117 针对体温和这些环境温度之间的热梯度进行调整。

这种耳戴式设计集成了两个 TMP117 温度传感器；一个用于测量耳内温度（主传感器），另一个用于检测系统和环境温度（辅助传感器）。此参考设计采用超薄型薄膜柔性电缆，可轻松集成到耳戴式设备中，并具有分线接头和扬声器焊盘，以支持不同的 MCU、电源和扬声器。

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	1.8-5.5V	TMP117 电源电压范围
TMP117：工作温度	-55°C 至 150°C	
TMP117：温度精度	在 -20.0 至 50°C 范围内 0.1 °C	超过体温测量要求
外形	2 层柔性 PCB	

2 系统概述

2.1 方框图

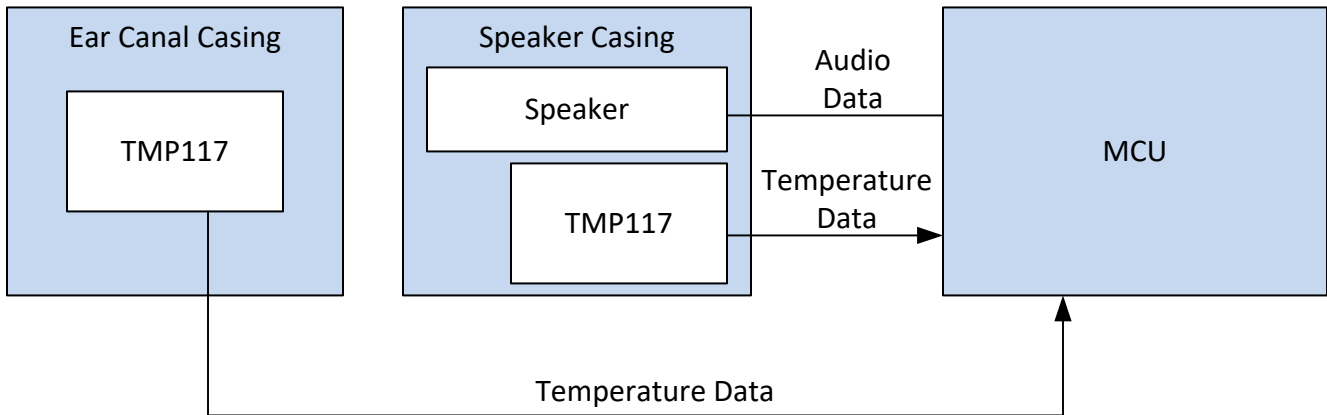


图 2-1. TIDA-060034 方框图

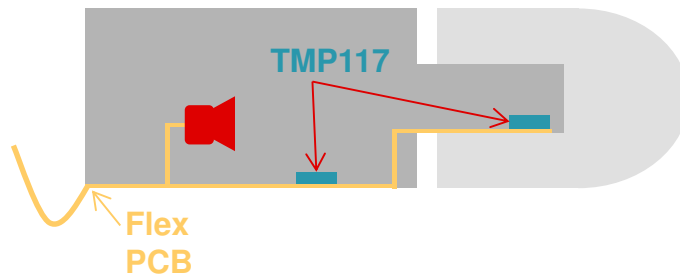


图 2-2. TIDA-060034 系统图

2.2 设计注意事项

为了实现精确的体温测量，需要实施一些重要的设计注意事项。最重要的设计注意事项是，主传感器应尽可能靠近耳朵的鼓膜布置，并与其他热源（例如环境温度或系统发热量）隔离。其次，其他发生热电气元件（如电池或微处理器）应远离主传感器布置。这是为了最大限度减少可能导致主传感器出现温度误差的热传递。耳戴式设备的外壳还应在耳道中形成严实密封，以限制环境空气引起的温度误差。辅助传感器应布置在任何可能主传感器上造成温度误差的热源处。这是为了校准并关联这些热源产生的温度影响。

2.3 重点产品

体温监测用耳戴式设备柔性 PCB 插接条参考设计采用以下器件：

2.3.1 TMP117 - 高精度、低功耗数字温度传感器

TMP117 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 $7.8125\text{m}^\circ\text{C}$ ，无需校准即可实现高达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的精度。TMP117 的工作电压范围为 1.8V 至 5.5V，功耗通常为 $3.5\mu\text{A}$ ，并采用 $1.53\text{mm} \times 1.00\text{mm}$ DSBGA 封装。这种小型封装可轻松集成到小型耳戴式设备中，并具有快速的热响应时间。该器件还具有集成式 EEPROM 和可用于单点校准的温度偏移寄存器。

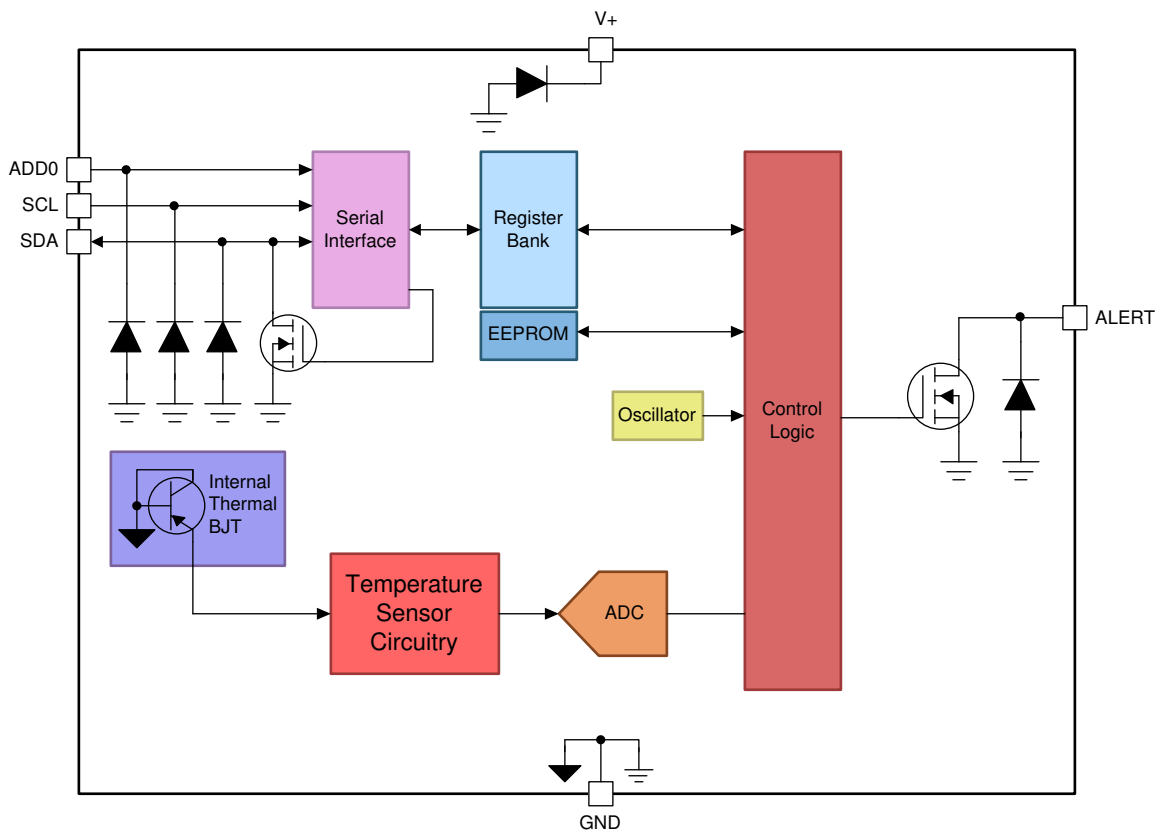


图 2-3. TMP117 内部方框图

2.3.2 系统设计原理

本设计具有用于连接 MCU 以与 TMP117 器件进行通信的接头，以及为扬声器提供输入的接头，如图 2-4 所示。一端还有集成扬声器焊盘，可焊接在小型扬声器上，如图 2-5 如所示。两个 TMP117 用于收集温度数据，以确定用户体温。



图 2-4. MCU 和扬声器输入接头

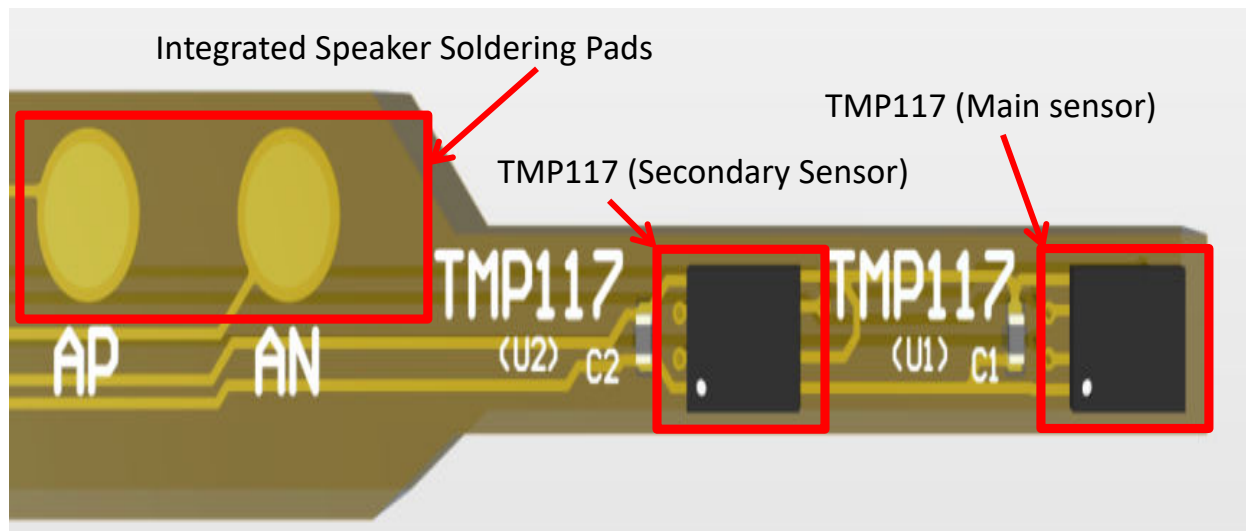


图 2-5. 集成扬声器焊盘和 TMP117 器件

2.3.2.1 系统精度

表 2-1 汇总了 TMP117 的指定精度。然而，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，以确保总系统精度。可以执行单点校准来消除系统中始终存在的温度偏移误差。此偏移值可以存储在 TMP117 的温度偏移寄存器中。

表 2-1. TMP117 最大精度

温度范围	最大精度 °C
-20°C 至 50°C	±0.1°C
-40°C 至 70°C	±0.15°C
-40°C 至 100°C	±0.2°C

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件

测试此设计时需要使用耳戴式柔性电路板和单独的 MCU。MCU 的接头需要与 TMP117EVM 上的接头保持一致。TMP117EVM 可分为两部分：一部分包括 TMP117，另一部分包含 USB2ANY，如图 3-1 所示。

USB2ANY 部分可用于通过 [TMP117DualSensor_GUI](#) 与两个 TMP117 器件进行通信，该 GUI 可在 [Texas Instruments Gallery](#) 中找到。主传感器的 7 位 I²C 的地址为 0x49，辅助传感器的 7 位 I²C 的地址为 0x48。

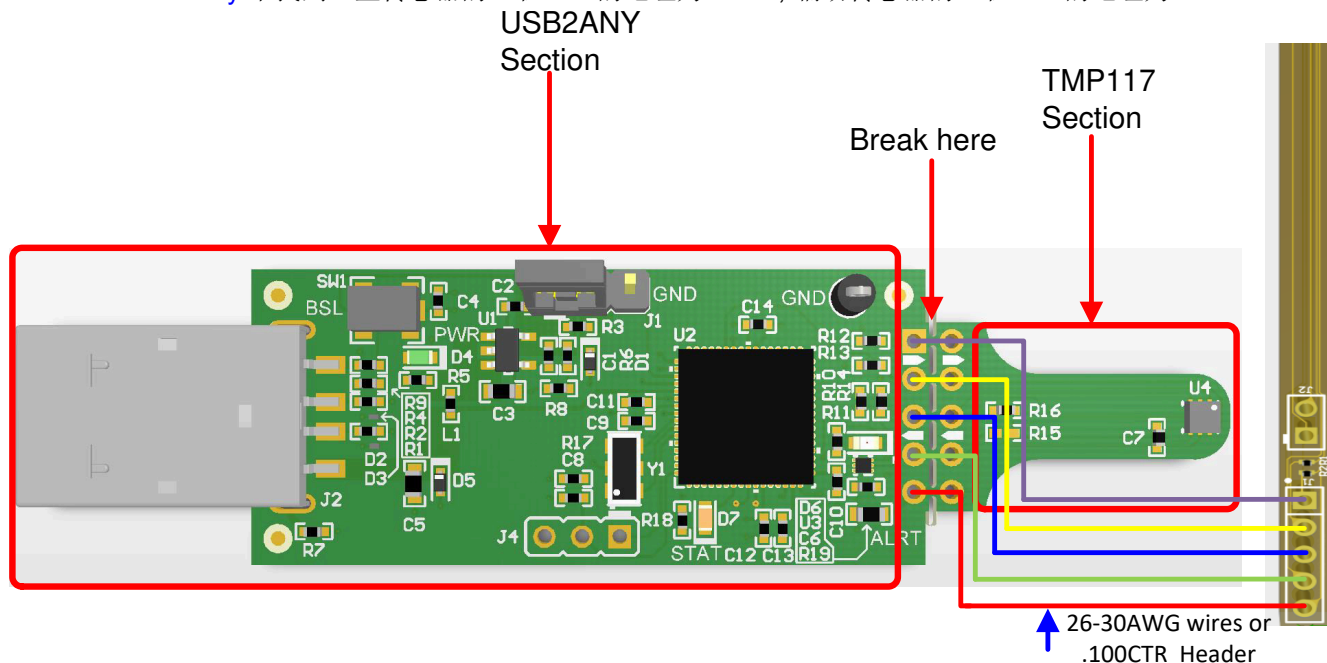


图 3-1. 连接到 TMP117EVM

3.2 软件

TMP117DualSensor_GUI 可用于通过 USB2ANY 与两个 TMP117 器件进行通信。[SysConfig](#) 工具可用于编写基本的 C 代码，以配置、读取和写入 TMP117 器件。此代码可以导入 [Code Composer Studio](#) 并在其上运行。

3.2.1 SysConfig

要使用 SysConfig 工具，请转到 [TI SysConfig](#) 页面。您将导航至 SysConfig 工具的主屏幕，如图 3-2 所示。接下来，在“Software Product (软件产品)”下拉菜单上，选择 **Sensor & Signal Chain Code Studio** (传感器和信号链 Code Studio)。然后在“Device (器件)”下拉菜单中选择 **Other (其他)** 再单击 **Start (开始)**。图 3-3 中展示的配置屏幕随即显示。

在此屏幕中，单击第一个区域中 TMP117 旁边的 + 图标。要与参考设计上的两个器件都进行通信，请添加两个 TMP117 器件。需要在器件地址下拉菜单中将其中一个器件的地址更新为地址 0x49。

接下来，可以使用配置下拉菜单来调整 TMP117 器件的设置。生成的代码将反映这些下拉菜单中的设置。

最后，使用“Save (保存)”图标保存文件。

Welcome To SysConfig

Start a new Design

Software Product: **Sensor & Signal Chain Code Studio (1.0.3)**

Board: Unselected (Choose a Board)

Device: Other

Part: Other

Package: Other

START

图 3-2. SysConfig 主页

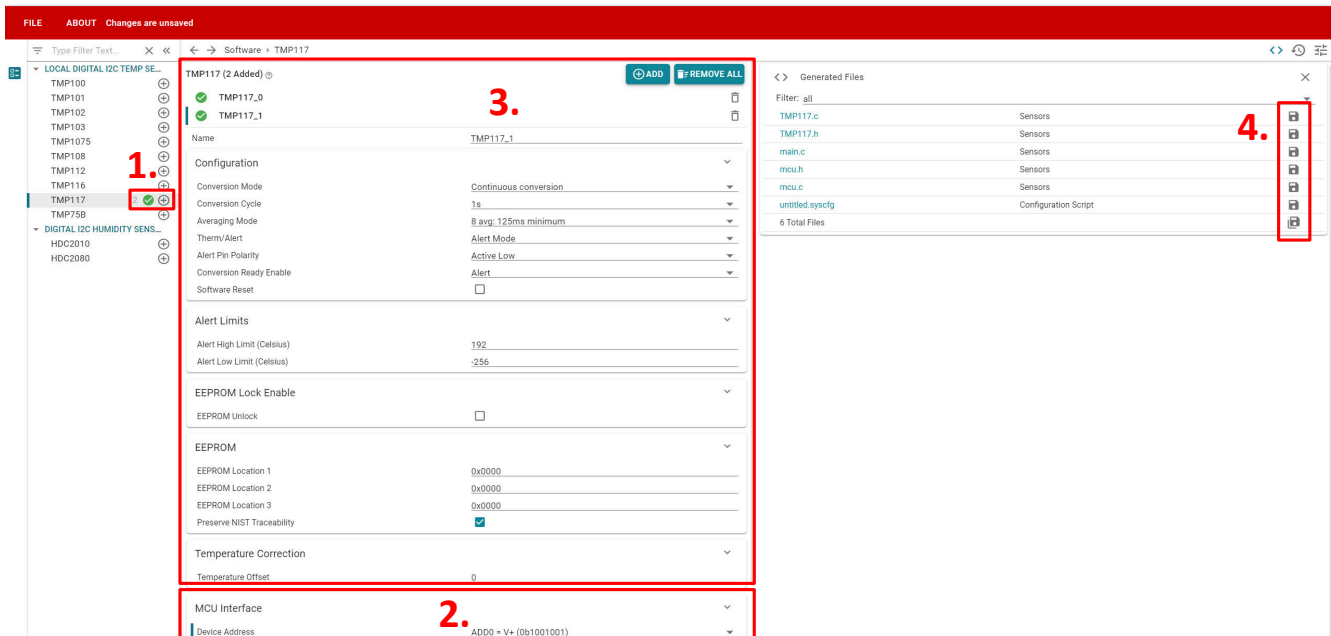


图 3-3. SysConfig 配置页面

3.2.2 图形用户界面 (GUI)

EVM 软件在 Windows 7 和 10 操作系统 (OS) 上进行了测试。该软件也能够其他 Windows 操作系统上正常运行。此[超链接](#)将转到 TI Cloud，其中是使用 GUI Composer 框架的所有已发布应用程序的公共存储库。只需极少的安装，即可直接从 Gallery (库) 中运行应用程序。

3.2.2.1 启动和运行软件

首先，将 TMP117EVM 连接到 PC 上的 USB 端口。TMP117EVM 被主机识别为通用人机接口器件 (HID)，因此不需要在 PC 上安装专有驱动程序。图 3-4 显示了首次将 USB 转 ²C 转换器板连接到 PC USB 端口时的典型响应。通常，计算机上会显示 “Found New Hardware, USB Device (找到新硬件，USB 器件)” 弹出对话框。然后，该弹出窗口通常会变为 *Found New Hardware, USB Human Interface Device (找到新硬件，USB 人机接口器件)*。此弹出窗口指示器件已就绪并可供使用。USB 转 I²C 转换器使用作为 Microsoft Windows® 操作系统一部分的人机接口器件驱动程序。

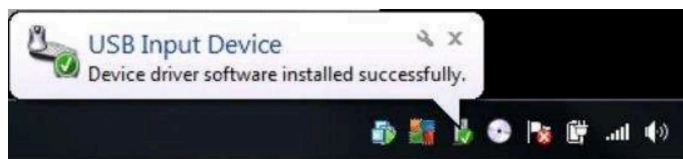


图 3-4. USB 就绪

接下来，通过单击[此链接](#)直接连接到库。它需要登录用户帐户权限才能使用在线版本并安装应用程序。在库主页上部中间，导航至“Search (搜索)”字段，输入 *TMP117DualSensor_GUI*，如图 3-5 所示。

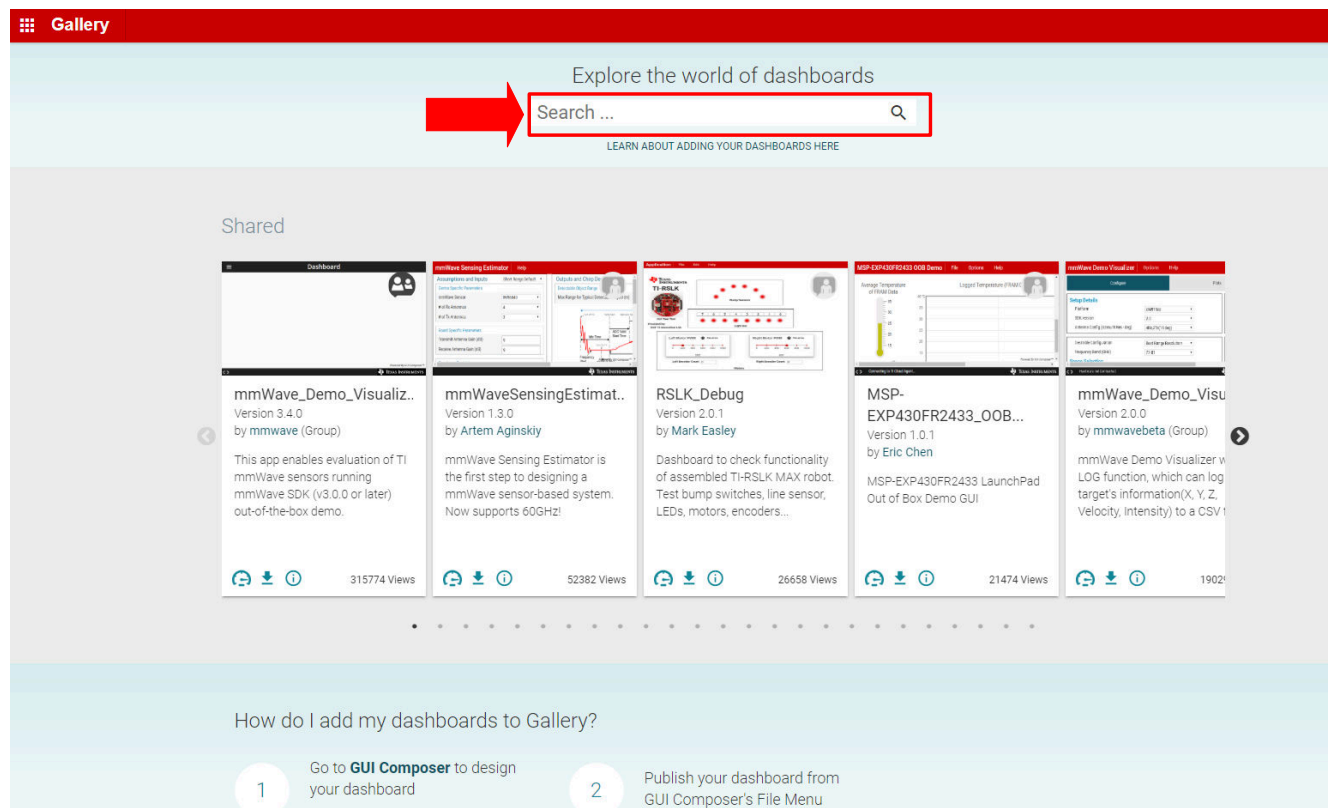


图 3-5. 库主页

单击 *TMP117DualSensor_GUI* 图标。首次登录时，系统可能会提示用户下载并安装适用于 Firefox 或 Chrome 的浏览器扩展以及 TI Cloud Agent 应用程序。单击“Agree and Proceed (同意并继续)”。

按照步骤安装浏览器扩展和 TI Cloud Agent 应用程序，如图 3-6 所示。

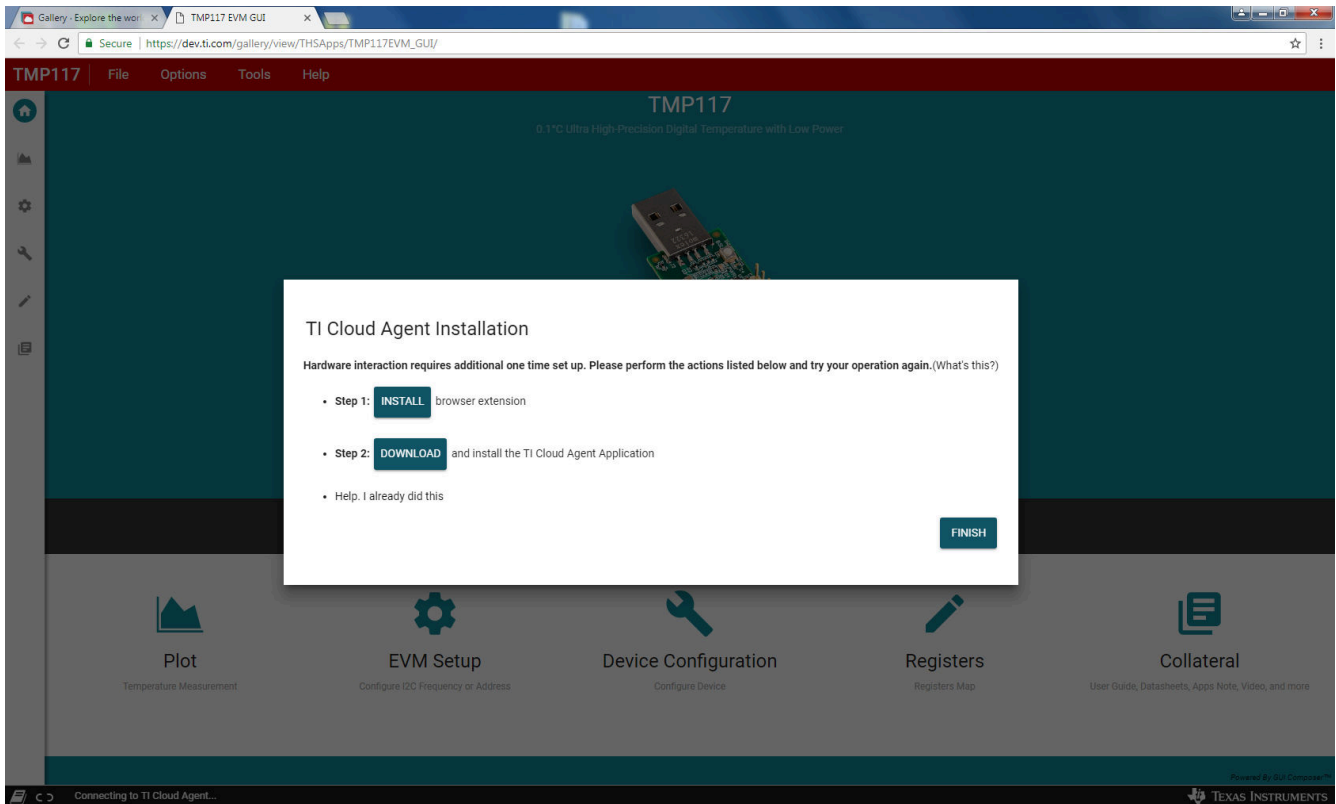


图 3-6. TI Cloud Agent 弹出窗口

安装 TI Cloud Agent 应用程序后，TMP117DualSensor_GUI 应自动初始化并连接到 HID 端口。

成功连接后，GUI 状态指示器底部会显示 *Hardware Connected* (硬件已连接)，如图 3-7 所示。如果存在连接问题，请验证 TMP117EVM 是否与 PC 建立了连接。连接失败将显示为 *Hardware not Connected* (硬件未连接)，如图 3-8 所示。



图 3-7. 硬件已连接

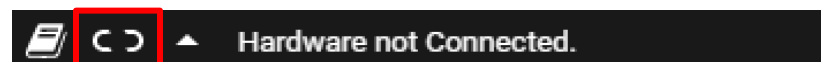


图 3-8. 硬件未连接

3.2.2.2 使用 GUI

该 GUI 包含六个选项卡：Home (主页)、Data Capture (数据采集)、EVM Setup (EVM 设置)、Device Configuration (器件配置)、Registers (寄存器) 和 Collateral (配套资料)。启动 GUI 会转到“Home (主页)”选项卡。在该选项卡上，可以使用底部的按钮或左侧的选项卡栏在不同的选项卡之间导航，它们在所有选项卡上都有提供。

3.2.2.2.1 主页选项卡

启动 TMP117DualSensor_GUI 时，将显示主页，如图 3-9 所示。有两种方法可以在选项卡之间导航。主页下半部分包含一些图标，这些图标链接到其他五个 GUI 页面。这些图标的功能与锁定在 TMP117DualSensor_GUI 最左边框中的图标相同。如果 TMP117EVM 通电并连接到加载了正确固件的 PC，则状态栏的左下角会显示 *Hardware Connected* (硬件已连接) 并且 *Connected* (已连接) 图标会亮起。

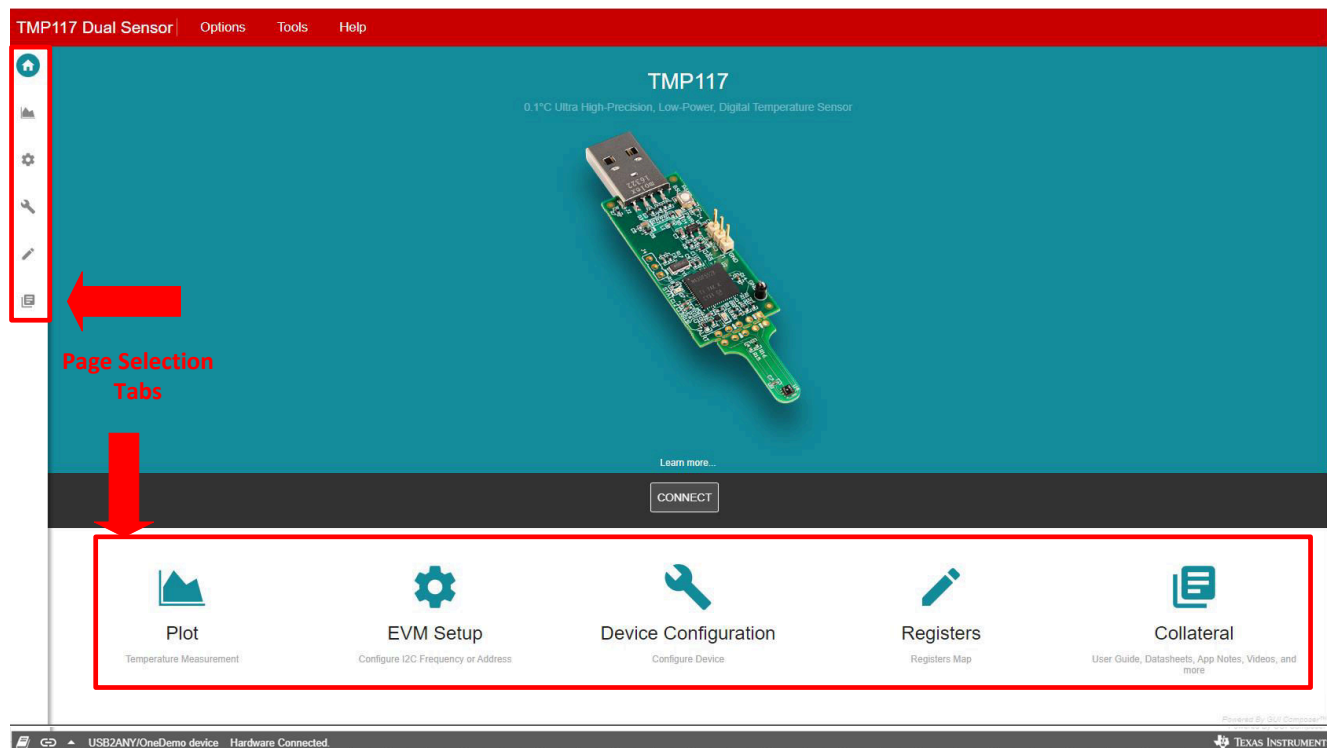


图 3-9. 主页选项卡

3.2.2.2.2 数据采集选项卡

Data Capture (数据采集) 选项卡提供了一个包含温度结果的图表和其他功能, 如图 3-10 中所示。将根据配置寄存器中的转换周期设置位自动获取温度结果。寄存器数据转换为 GUI 上的人类可读格式并进行显示。

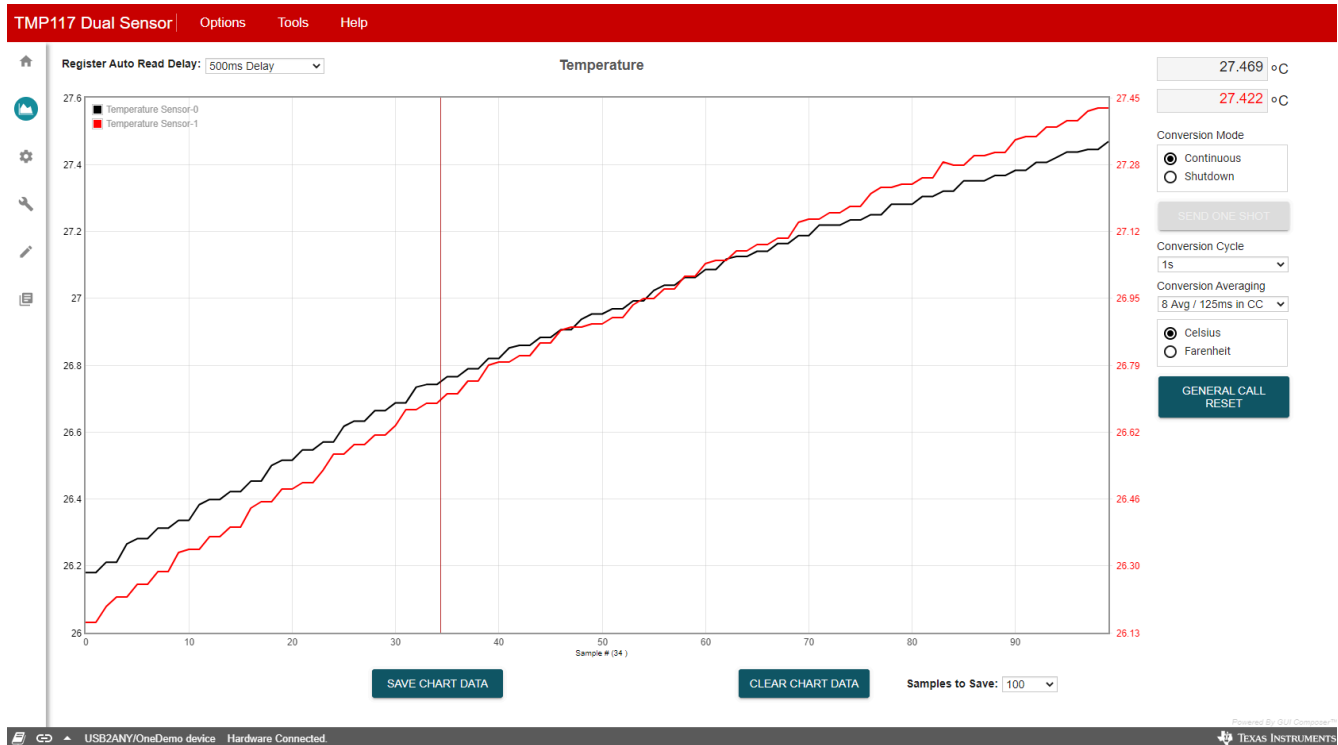


图 3-10. 数据采集选项卡

- **Clear Chart (清除图表)** 会擦除 “Temperature Chart (温度图表)” 框中的内容
- **Save Chart (保存图表)** 提示输入文件名, 然后将当前温度图表框的内容保存到一个.csv 文件中。
- **Current Value (当前值)** 在右上角显示 TMP117 器件的当前温度。
- **Celsius (摄氏度) 或 Fahrenheit (华氏度)** 选择用来显示温度的单位。
- **One Shot (单次触发)** 在 “Data Capture (数据采集)” 选项卡上提供。“One Shot (单次触发)” 按钮会在转换模式中一次性写入 TMP117 配置寄存器。选择该单选按钮后, 此设置会启动 TMP117 器件内的温度转换, 以更新温度结果寄存器。在单次转换完成后, 器件进入关断状态。
- 当配置寄存器中的 MOD[1:0] 位配置为 00 时, **Continuous (连续)** 会持续执行温度转换。每个温度转换都由有效转换阶段和后续的待机阶段组成, 这取决于转换周期的时间和转换均值计算配置。

3.2.2.2.3 EVM 设置选项卡

在图 3-11 所示的 EVM 设置选项卡上，可对 I²C 设置进行设定，并可读取固件版本和器件 ID。有必要将 TMP117 从器件的地址配置为 0x48 和 0x49，以便与参考设计进行通信。

- **Alert High and Low Limit (警报上限和下限) 寄存器**可通过 Data Capture (数据采集) 选项卡上的 °C/°F 控件输入值 (以 °C 或 °F 为单位) 来设置，该选项卡存储用于与温度结果进行比较的上限和下限。
- **Offset Temperature (偏移温度)** 对偏移温度进行编程，以补偿和减小系统误差。断电时将清除该寄存器，除非设置了锁定。
- **Firmware Read (固件读取)** 会检查 MSP430F5528 微控制器上的固件版本。

I²C Configuration (I²C 配置) 更改总线频率和从器件地址。

- **Device ID (器件 ID)** 自动读取器件标识。
- **Software Reset (软件复位)** 通过发出通用调用对 TMP117 器件执行软件复位。软件复位后，EVM 软件中显示的值可能与器件寄存器内容不同步。要在 TMP117 复位后同步寄存器内容，请单击 “Registers (寄存器)” 选项卡页面中的 “Read All (读取全部)”。

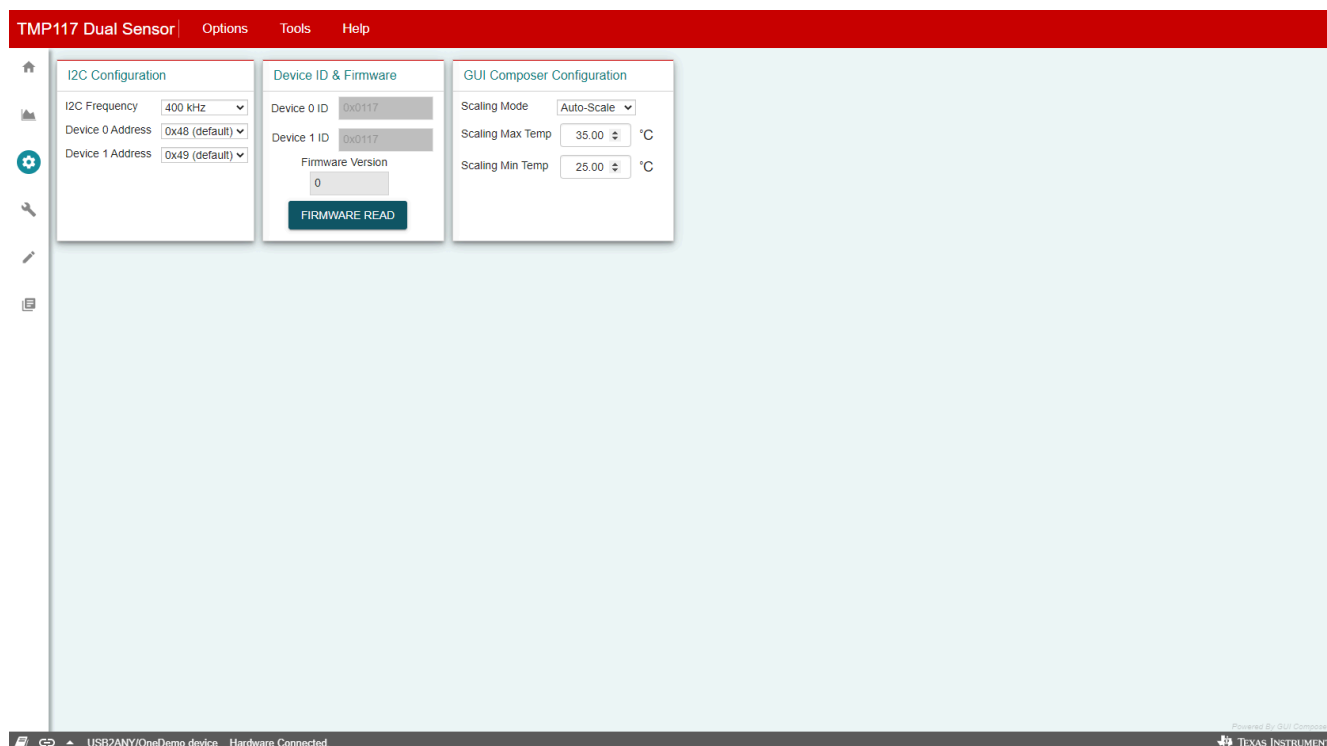


图 3-11. EVM 设置页面

3.2.2.2.4 配置选项卡

“Device Configuration (器件配置)” 允许用户配置器件的设置，如图 3-12 所示。

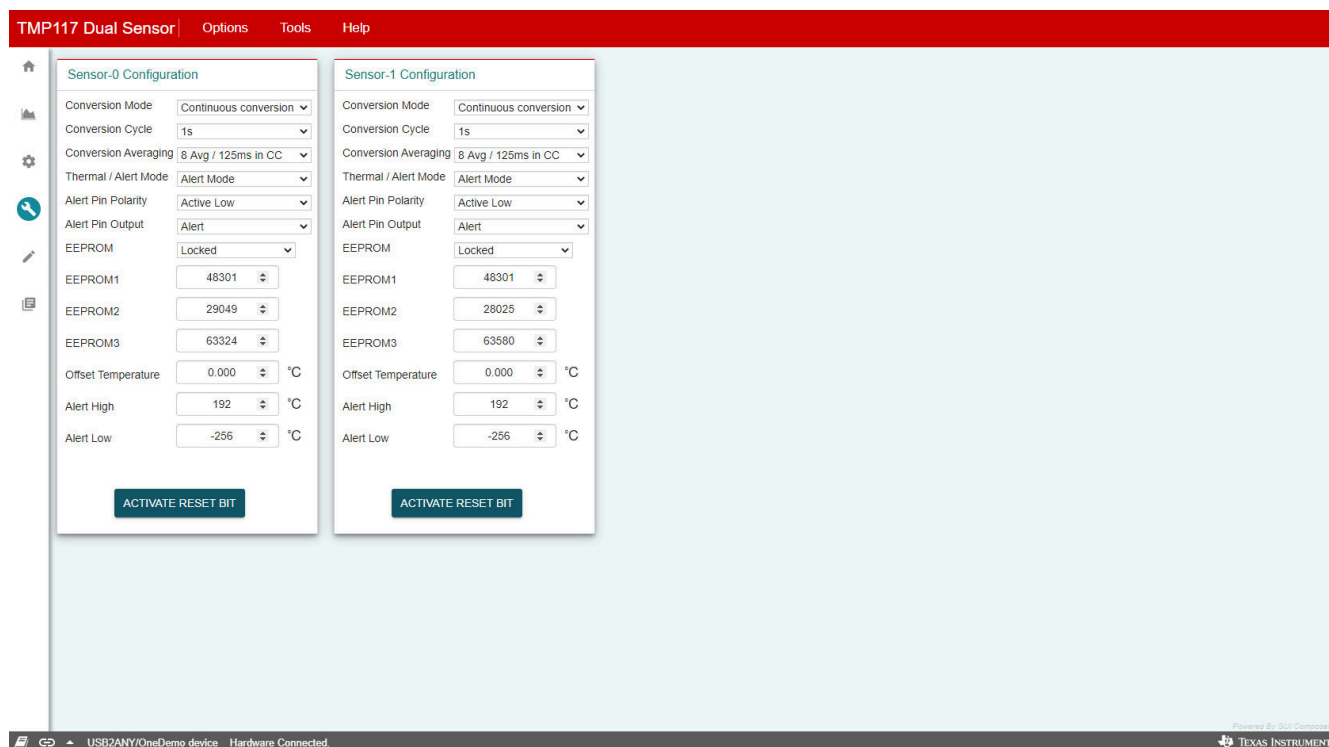


图 3-12. 配置选项卡

- 可以通过选择下拉菜单将 **Configuration register (配置寄存器)** 设置为所需的值。
- 通过在 **EEPROMx** 框中输入值，可以对**非易失性存储器**进行编程。然后使用 **EEPROM** 下拉菜单锁定值。该锁定值也将锁定偏移温度寄存器的值。
- 可以通过输入单位为 °C/°F 的值设置 **Alert High and Low Limit (警报上限和下限) 寄存器**。在华氏度模式下，它会在发送到 TMP117 之前将华氏度转换为摄氏度。
- **状态指示器**根据状态位显示输出。
- **Temperature (温度)** 显示 TMP117 的当前温度。
- **Offset Temperature (偏移温度)** 对偏移温度进行编程，以补偿和减小系统误差。断电时将清除该寄存器，除非设置了锁定。

3.2.2.2.5 寄存器选项卡

在图 3-13 所示的“Register Map (寄存器映射)”页面上，可对 TMP117 器件的所有 I²C 寄存器进行低级访问，并可访问 TMP117 的寄存器原始数据，执行读取和写入命令。单击“Register Name (寄存器名称)”右侧的问号，会显示从数据表中提取的该寄存器的一个简短说明。单击特定的“Register Name (寄存器名称)”会填充屏幕右侧的“Field View (字段视图)”。“Field View (字段视图)”介绍该寄存器中的每个位字段。此处将镜像在配置页面上进行的更改，反之亦然。

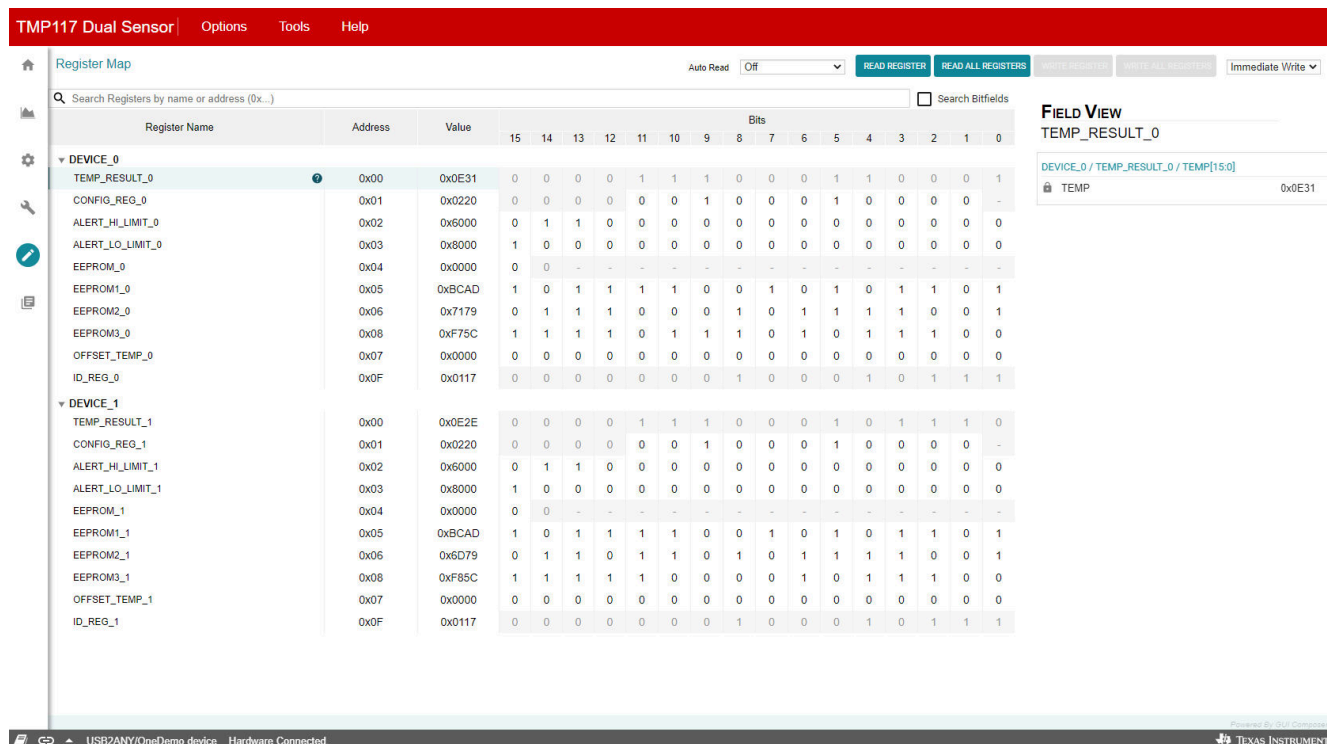


图 3-13. 寄存器选项卡

- **Read Registers (读取寄存器)** 对所选寄存器执行一次读取。
- **Read All Registers (读取全部寄存器)** 对所有寄存器内容执行读取。
- **Auto Read (自动读取)** 设置获取每个数据所需的时间范围。

3.2.2.2.6 配套资料选项卡

GUI 的最后一页是“Collateral (配套资料)”页面 (如图 3-14 所示)，其中包含与 TMP117 及其 EVM 相关的 Web 文档链接。该页面分为四个区域：(1) User Guide (用户指南)、(2) Data sheet (数据表)、(3) Application Notes (应用手册)、(4) Video (视频)。

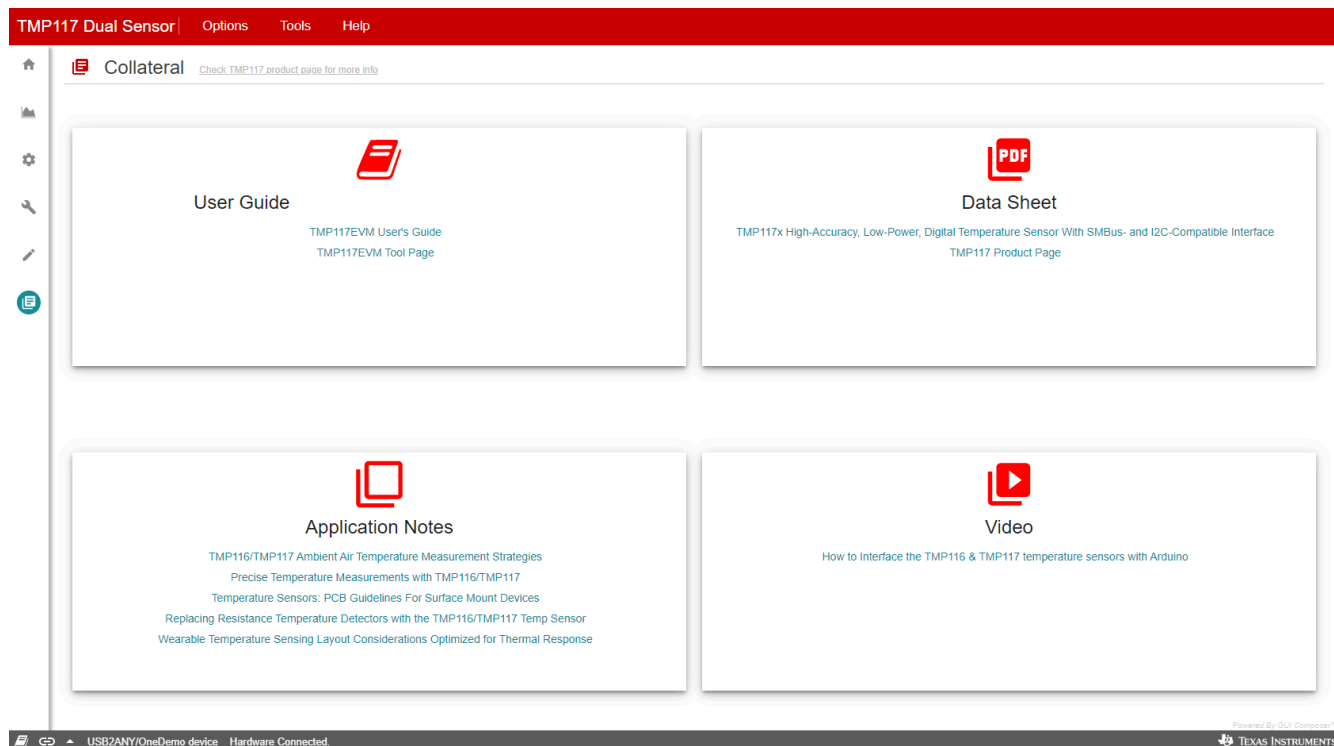


图 3-14. 配套资料页面

3.3 测试和结果

这些数据是针对一个主题收集的，以展示概念验证。由于每个设计在形状、尺寸、自发热和其他因素方面都各不相同，因此必须针对特定设计采用统计上的大样本量，以开发可扩展算法。有关市售算法以及与系统级设计相关的潜在知识产权的信息，请在其[网站](#)上联系 WBD101。

3.3.1 测试设置

3.3.1.1 系统精度

使用搅拌油浴和校准后的探头对体温监测用耳戴式设备柔性 PCB 插接条的精度进行了测试。在精度测试期间，其中一个柔性插接条浸没在液体油浴中，并通过外部 3.3V 电源供电。然后，移动浴槽令其达到至人体温度范围内的多个温度值，并获取多个读数以与校准后的探头相关联。TMP117 的精度规定为典型人体温度范围内的 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

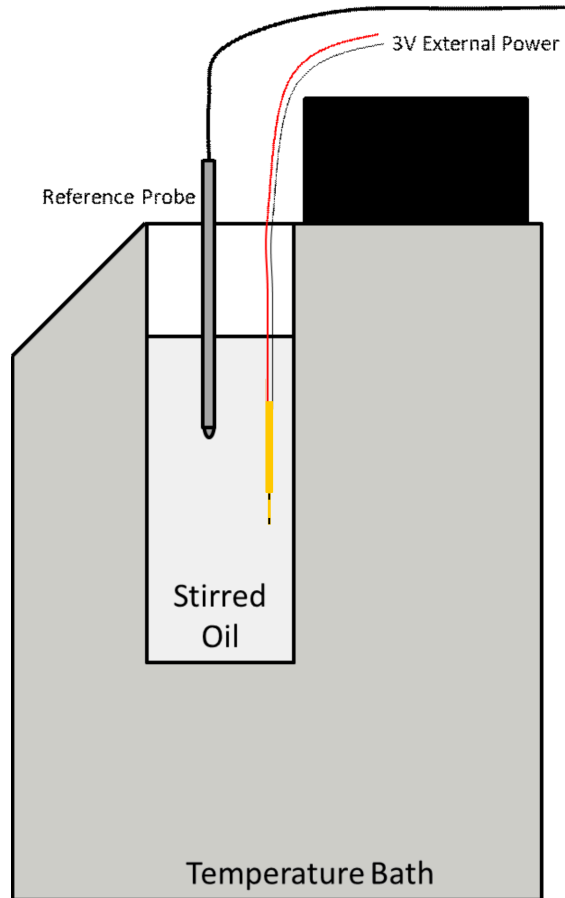


图 3-15. 精度测试设置

3.3.2 测试结果

在液体油浴内总共对 5 个插接条进行了精度测试。图 3-16 所示为相关结果。测试结果表明，不用进行额外校准的情况下，插接条完全符合精度规格。对于成品，必须在精度测试中包含封装，以确保总系统精度。

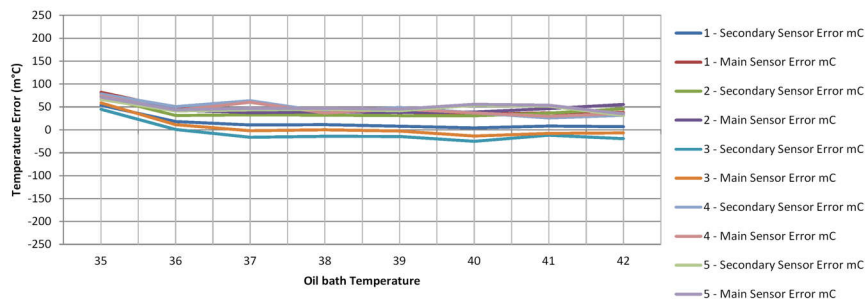


图 3-16. 精度测试结果

鼓膜温度计与耳戴式设计

采用耳戴式参考设计采集核心体温数据，并将其与商用鼓膜温度计采集的温度数据进行比较。首先，将耳戴式参考设计放置在密闭的耳塞外壳中。然后，将外壳置于受试者耳朵中并保持在正常人体温度范围内。温度读数稳定后，使用鼓膜温度计获取参考温度。

然后使用线性拟合模型和三阶多项式模型对数据进行关联。线性拟合模型产生的误差在整个温度范围在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 之间，并通过 0.9738 的 R^2 值将两个温度读数相关联。图 3-17 显示了用于关联两个温度集的拟合模型。图 3-18 显示了使用线性模型时两个温度集之间的温度误差。

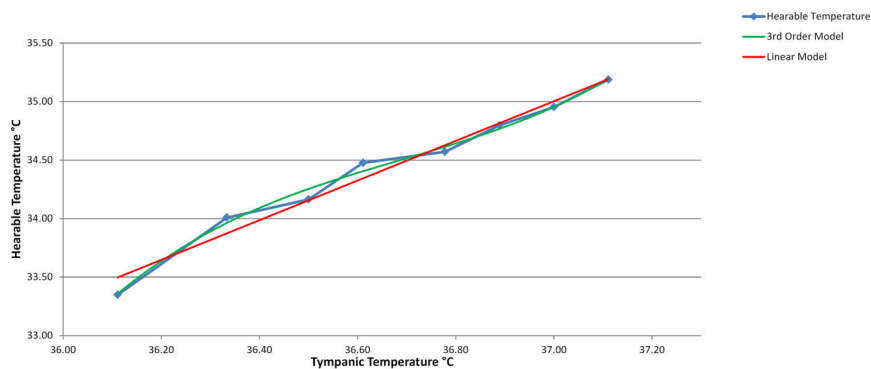


图 3-17. 耳戴式设计温度与鼓膜温度计间的关系

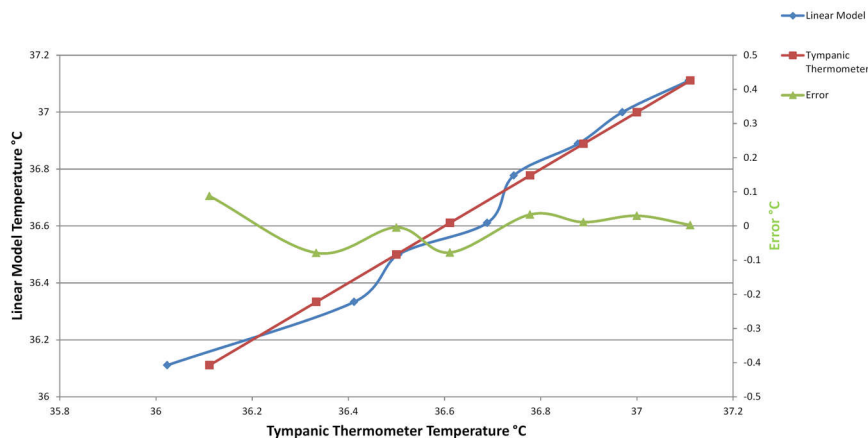


图 3-18. 线性模型与鼓膜温度计间的关系

同样，三阶多项式模型产生的误差在整个温度范围在 $\pm 0.075^{\circ}\text{C}$ 之间，并通过 0.9925 的 R^2 值将两个温度读数相关联。图 3-19 显示了使用三阶多项式模型时两个温度集之间的温度误差。

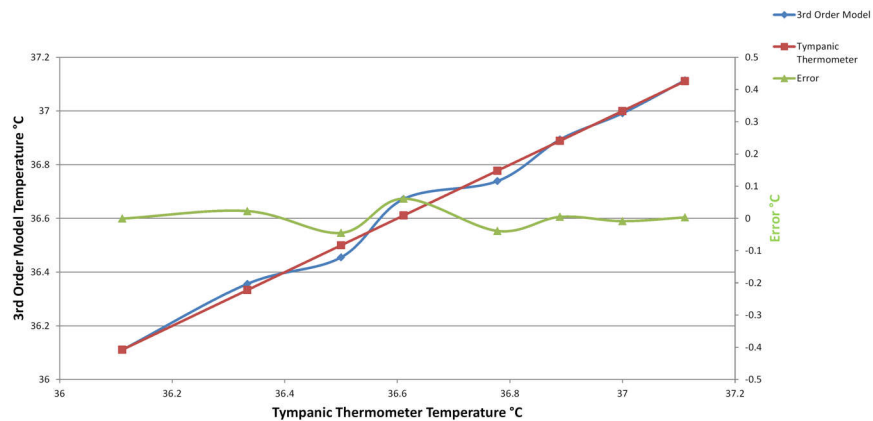


图 3-19. 三阶模型与鼓膜温度计间的关系

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-060034](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-060034](#) 中的设计文件。

4.2 工具与软件

4.2.1 PCB 布局建议

体温监测用耳戴式设备柔性 PCB 插接条采用薄型 2 层柔性 PCB 设计，外形简约。这是为了可以轻松集成到小型耳戴式设备中，并具有快速的热响应时间。如需柔性 PCB 设计的一般建议，设计人员应咨询柔性电路板制造商。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。虽然此设计未集成任何加固基板以最大限度提高灵活性，但应在非弯曲部分使用加固基板。TMP117 器件的布线旨在保持柔性电路板的最小宽度，同时仍能够访问器件的所有功能。还使用了 01005 尺寸的小型去耦电容器，以保持超小外形。图 4-1 显示了 TMP117 器件在柔性电路板上的布线。

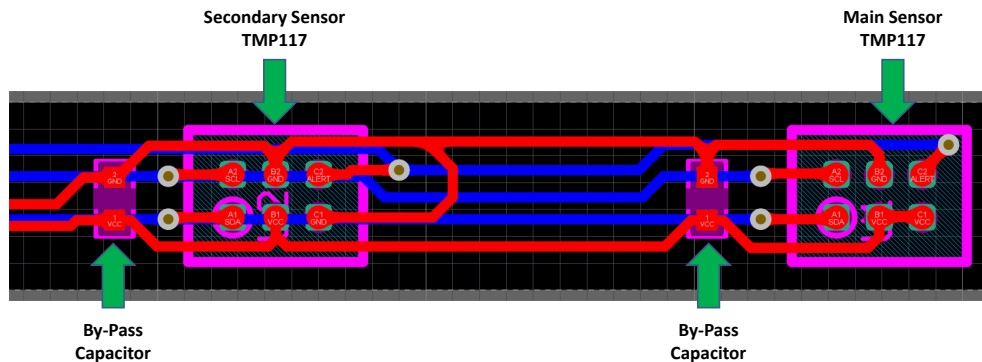


图 4-1. TMP117 布局

4.2.2 软件文件

要下载软件文件，请参阅 [TIDA-060034](#) 中的设计文件。

4.3 文档支持

- 德州仪器 (TI)，[TMP117 高精度、低功耗数字温度传感器数据表](#)。

4.4 支持资源

[TI E2E™ 支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题可获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的《使用条款》。

4.5 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

Microsoft Windows® is a registered trademark of Microsoft.

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 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 * (November 2020) to Revision A (March 2021)	Page
• 将有关市售算法的信息，请在其网站上联系 WBD101。更新为有关市售算法以及与系统级设计相关的潜在知识产权的信息，请在其网站上联系 WBD101。	16

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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月