

Design Guide: TIDA-010002

将铂 RTD 传感器替换为数字温度传感器的参考设计



说明

该参考设计针对热量计和冷量计的差温测量 (DTM) 子系统，提供了一种完全数字化的替代方案，可替代薄膜铂电阻式温度检测器 (RTD) 传感器。数字 RTD 方法通过使用集成的存储器 (EEPROM) 来存储用户定义的参数，从而简化制造工艺，并且无需创建和维护相关文档。数字 RTD 方法无需像传统 DTM 系统那样，对模数转换执行偏移和增益校准步骤，从而简化了模拟信号处理。

电路板上集成的静电放电 (ESD) 保护器件可防御高达 30kV 的接触或空气 ESD 冲击。小型 PCB 可装入外径为 5.2mm 的金属护套，这种护套通常与标准 PT100、PT500、PT1000 传感器配合使用。

此数字 RTD 子系统可与 MSP430™ 和 SimpleLink™ 微控制器器件系列配合使用。

资源

TIDA-010002	设计文件夹
TMP117	产品文件夹
ESD351	产品文件夹
ESD314	产品文件夹



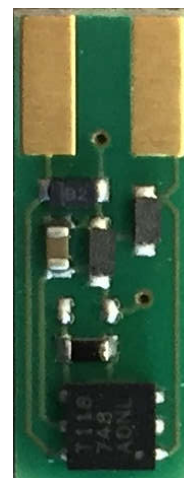
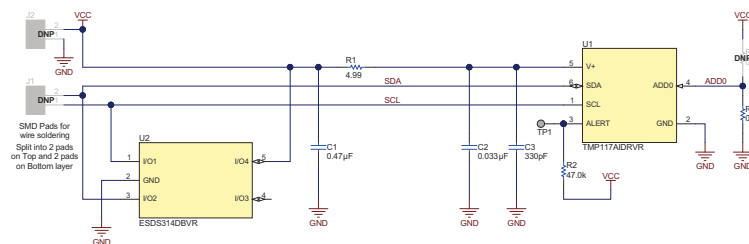
咨询我们的 E2E™ 专家

特性

- 全数字精密温度传感器，可作为铂 RTD 的替代方案；适用于热量计中使用的标准 5.2mm 护套
- 无需两线或四线 RTD 配置中使用的精密基准电阻器、RC 匹配滤波器、电流源、ADC 和阻抗控制信号布线
- 无需校准即可满足 IEC/EN 60751-2008 A 级精度要求 (-55°C 到 150°C)；采用单点校准即可达到 AA 级精度
- 连接主机微控制器的标准 I2C 接口 (四线数字接口，带 I2C 总线 + VDD + GND)
- 通过了 EN1434 标准规定的 EFT、CE、RE、CS、RS 和磁场抗扰度预合规测试
- 减少了系统设计和制造工作，从而优化了成本

应用

- 使用 PT100、PT500 或 PT1000 传感器、温度范围从 - 55°C 到 150°C 的热量计和冷量计或热量计算器
- 在各种工业应用中替代 A 级和 AA 级温度计 (RTD)



1 系统说明

在许多国家/地区，**热量计**通常用于多住户单元中住宅用户的热能计费，而**冷量计**通常用于商业、仓储或物流建筑和工业环境。如欧洲议会和理事会 2014 年 2 月 26 日的 2014/32/EU 号测量仪器指令 (MID)⁽⁴⁾ 附件 VI 中所定义，**热量计**和**冷量计**均属于热能计。MID 文件旨在协调意在欧盟所有国家之间建立统一测量仪器市场的成员国的法律。冷量计在 MID 中没有涉及，相关规定通常因国家而异。

热能计基本上是常规流量计（例如水表），它通过精密差温测量 (DTM) 子系统扩展，用于采集入口和出口处流体之间的温差。如果入口处流体介质的温度低于出口处，则表示正在散热，反之则表示正在吸热，这意味着这是一个冷却系统。

因此，热量计和冷量计非常相似。但是，为了能够将这两种类型都用于计费，需要为每种情况提供型式检验证书。如需获得型式检验证书，必须满足 EN 1434 标准的要求。德州仪器 (TI) 与 JUMO GmbH & Co. KG 保持着密切合作，以满足相关要求并申报型式检验证书。

1.1 主要系统规格

IEC/EN60751:2008 标准定义了四个温度计等级：分别命名为 C 级、B 级、A 级和 AA 级，其中 C 级的精度最低，AA 级的精度最高。精度等级越低，定义的温度范围就越大。此外还定义了两种温度计：薄膜或绕线。AA 级薄膜温度计的温度范围为 0°C 到 150°C，而 C 级薄膜温度计的温度范围要宽得多，达到了 -50°C 到 600°C。

TIDA-010002 参考设计展示了 TMP117 精密数字传感器的出色温度测量精度，在 -55°C 至 150°C 的温度范围内可与最高等级的 AA 级薄膜 RTD 传感器的精度媲美。

表 1-1. 主要系统规格

参数	规格	详细信息
输入电源	由主机 MCU 或主机主板提供，采用固定电压电平或通过 GPIO 切换	表 3-1
工作温度	-55°C 至 150°C	节 2.3.2
精度	±0.1°C	节 2.3.2
电源电压	1.8V 至 5.5V	节 3.2.7
数字 RTD 传感器配置	4 线数字接口 (SDA、SCL、VDD 和 GND)	节 2.4.3
平均有效状态流耗	取决于有效状态持续时间	节 2.3.2
有效状态持续时间	可通过 CONFIG 寄存器中的 CONV[2:0] 和 AVG[1:0] 位配置	节 2.3.2
平均待机状态流耗	3.5 μA、1Hz 转换周期	节 2.3.2
待机状态持续时间	约 876ms (如果在 1s 转换周期中执行 8 次平均计算)	节 2.3.2
平均关断状态流耗	150nA	节 2.3.2

表 1-1. 主要系统规格 (续)

参数	规格	详细信息
每分钟测量次数	60 次或更少, 可由用户配置	节 3.1.2
ESD 61000-4-2	空气放电电压 8kV/接触放电电压 4kV (> 8kV 接触放电电压或空气放电电压)	节 3.2.8

2 系统概述

热量计通常由一节锂原电池供电, 必须运行 6 年或更长时间, 具体取决于环境温度条件以及在特定时间段内传输的无线通信数据包的数量。因此, 产品的一个关键设计注意事项是功耗应尽可能的低。

热量计和冷量计均使用 DTM 子系统, 每隔几秒 (或更长时间) 测量反向流动的两股流体的温度, 这使得 DTM 电路在大部分测量周期内均可断电。除了高精度温度测量, 快速从断电模式唤醒、测量两个 RTD 的温度并尽快恢复断电模式的能力可更大限度地降低此类仪表的能耗。

TMP117 器件具有非常短的上电或复位周期 (典型值仅为 1.5ms)、15.5ms 的转换测量周期、高度精确的 0.0078125°C 温度分辨率以及快速模式 (400kHz) I2C 总线通信接口。所有这些特性都有助于实现 TIDA-010002 在测量周期之间的电源循环。

使用这种数字 RTD 解决方案时, 测量结果线性化和温度值转换均可在 TMP117 器件内部完成, 因此可节省主机 MCU 的处理时间。

2.1 方框图

随着欧洲、中东和非洲地区、俄罗斯以及中国等市场对热能 (热量和冷量) 计费的要求不断提高, 热量计和冷量计在这些市场日益普及。由于这些器件的测量周期是可配置的, 并且测量间隔不止几秒钟, 所以在两次测量之间会断开整个 DTM 子系统的电源。这种方法不仅对所有电池供电产品非常有益, 而且对任何可用功率有限的应用 (例如 M-Bus 有线传感器或 4mA 至 20mA 工业传感器) 也非常有益。

TIDA-010002 可以放置到热量计中所用 RTD 的标准 5.2mm 直径金属护套中, 并配以 4 线电缆组装成 DRTD 传感器。然后将 DRTD 浸入入口和出口流体中, 如图 2-1 的红色部分所示。

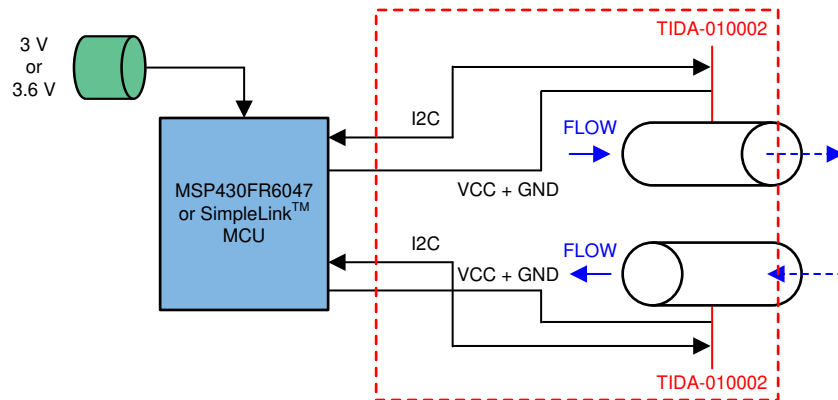


图 2-1. TIDA-010002 方框图

2.2 设计注意事项

典型的热能计采用一对 PT100、PT500 或 PT1000 传感器, 这些传感器连接到精密 Δ - Σ ADC (如 TI 的 ADS1220 系列), 或连接到 MCU 或模拟前端 (AFE) 器件, 并利用基于精密比较器和数字计时器的 ADC 斜率转换方法。在欧盟国家, EN1434⁽²⁾ 规范系列定义了对这些仪表的要求。

热量计和冷量计的高精度温度测量参考设计 (TIDA-01526) 采用 ADS122U04 或 ADS122C04 器件 (同样适用于带 SPI 接口的 ADS1220 器件) 等 24 位低功耗 Δ - Σ ADC, 实现了差温测量 (DTM) 子系统。TIDA-01526 是一款低成本、高精度 DTM 子系统, 可与 TI 基于 MSP430FR6047 或 MSP430FR6989 的超声波或旋转检测流量测量子系统或 TI 的 CC13xx 和 CC26xx 无线 MCU 配合使用。

TIDA-010002 参考设计展示了 TIDA-01526 的 DTM 系统替代解决方案，它将 Δ - Σ 器件的完整信号链以及外部 RTD 传感器一起集成到了单个有源精密温度半导体元件 TMP117 器件中。

TIDA-010002 中新引入的数字 RTD 方法是传统薄膜 RTD 传感器的替代方案，具有多种优势，如独特校准参数可在每个 DRTD 内部编程，并且可供主机 MCU 随时读取。

因为与铂 RTD 传感器相比线性度有所提高，所以预计校准和配对过程的工作量会减少。

2.3 重点产品

2.3.1 器件建议

可以使用两个相似的数字温度传感器 TMP117 和 TMP116 来实现此参考设计。这两个器件在测量精度 (TMP117 为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 、TMP116 为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$) 和温度范围 (TMP117 为 -55°C 到 150°C 、TMP116 为 -55°C 到 125°C) 两方面有所不同。由于 TMP117 的精度更高，所以我们建议使用 TMP117。此设计将重点关注 TMP117，但仍会采集这两个器件的数据。

2.3.2 数字温度传感器 - TMP117

TMP117 器件是一个集成了 EEPROM 存储器的低功耗、高精度温度传感器系列。TMP117 器件可提供 16 位温度结果，具有 0.0078125°C 的分辨率，且无需校准即可实现高达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的精度。TMP117 与 I2C 接口和 SMBus 接口兼容，具有可编程警报功能，可通过单根总线支持多达四个器件。

TMP117 器件的流耗极低，除了节省功耗外，还可在测量温度的同时更大限度地减少自发热效应并提高测量精度。TMP117 可在 1.8V 至 5.5V 电压范围内运行，转换周期内的流耗通常为 $3.5\ \mu\text{A}$ ，关断期间为 150nA 。该器件还具有一个集成的 48 位 EEPROM。在整个工作温度范围内，TMP117 器件无需校准即可实现 A 级 RTD 的精度，并且无需进行电压-温度测量转换以及后续的偏移和增益结果校正，因此所需的处理软件明显更少。此外，完全不需要由精密基准电阻器、模拟输入匹配 RC 滤波器和 PCB 上阻抗匹配布线组成的外部模拟信号链电路。

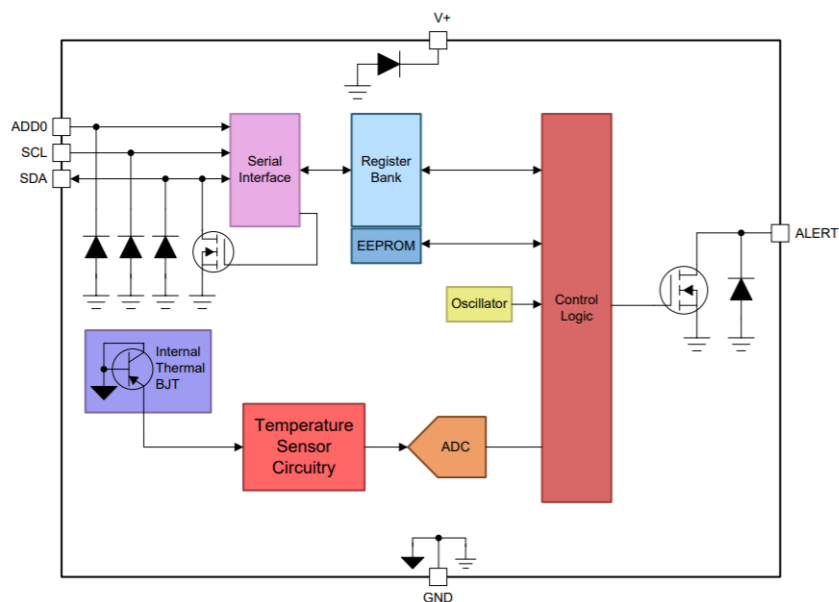


图 2-2. TMP117 内部方框图

2.3.3 数字温度传感器 - TMP116

TMP116 (TMP116、TMP116N) 器件是一个集成了 EEPROM 存储器的低功耗、高精度温度传感器系列。TMP116 器件可提供 16 位温度结果，具有 $0.0078125^{\circ}\text{C}$ 的分辨率，且无需校准即可实现高达 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 的精度。TMP116 与 I2C 接口和 SMBus 接口兼容，具有可编程警报功能，可通过单根总线支持多达四个器件。

TMP116 器件的流耗极低，除了节省功耗外，还可在测量温度的同时更大限度地减少自发热效应并提高测量精度。TMP116 可在 1.9V 至 5.5V 电压范围内运行，平均流耗通常为 $3.5\mu\text{A}$ 。在整个工作温度范围内，TMP116 器件无需校准即可实现 A 级 RTD 的精度，并且无需进行电压-温度测量转换以及后续偏移和增益结果校正，因此所需的处理软件明显更少。

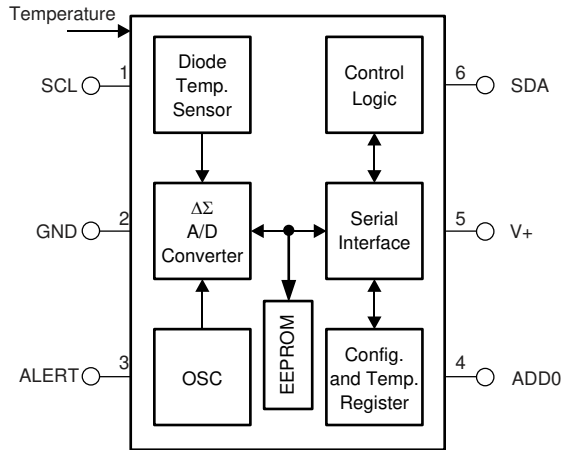


图 2-3. TMP116 内部方框图

TMP116 器件在生产调试阶段经过 100% 测试，可通过 NIST 进行追溯，且使用经 ISO/IEC 17025 认证标准校准的设备进行了验证。

2.3.4 ESD 保护器件

ESD351 是一款单向 TVS ESD 保护二极管，具有低动态电阻 R_{DYN} 和低钳位电压。根据 IEC 61000-4-2 标准，ESD351 额定用于消散高达 30kV (接触放电和空气放电) 的 ESD 冲击。超低的动态电阻 (0.1Ω) 和极低的钳位电压 (16A TLP 时为 6.5V) 可确保针对瞬态事件提供系统级保护。该器件的电容为 1.8pF (典型值)，因此该器件非常适用于保护接口。ESD351 采用业界标准的 0402 (DPY) 封装，可方便地放置在节省空间的应用中。在这种空间极其受限的应用中，小封装尺寸是选择 ESD351 的关键决定因素。



图 2-4. ESD351 功能框图

ESD351 是一款二极管型 TVS，可提供一条接地路径来消除人机界面连接器和系统之间高速信号线路上的 ESD 事件。当 ESD 电流流经 TVS 时，二极管上只会出现一个小压降，这就是施加在受保护 IC 上的电压。

ESD351 器件可用于工业温度范围： -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ ，建议的输入电压 V_{IN} 介于 0V 到 3.6V 之间。

TPD1E04U04 器件是一款单向 TVS ESD 保护二极管，额定用于消散超过 IEC 61000-4-2 国际标准（4 级）中规定的最高水平的 ESD 冲击。低动态电阻和超低钳位电压可为敏感的 SoC 提供针对瞬变事件的系统级保护。TPD1E04U04 采用业界标准的 0402 (DPY) 和 0201 (DPL) 封装，并且还可用于工业温度范围：-40°C 至 +125°C。

2.4 系统设计原理

热量计规范 EN1434-2 标准⁽²⁾ 第 4.1 章规定，所有温度测量必须由适当选择的 PT 传感器元件组成。在 PT 传感器预校准和配对后，将其内置到热量计中，或者将其牢固安装（如焊接）到热量计 PCB 上，然后进行校准，以尽可能减小这两个 PT 传感器之间的温度偏移。

接下来，EN1434-2 标准⁽²⁾ 还指出可以使用其他类型的温度传感器。使用时，它们不能与热量计或热量计算器器件分开。

另一个需要考虑的重要情况是 EN60751 标准⁽¹⁾ 第 5.4 章中的要求。所有工业铂电阻式温度计均应采用 3 线或 4 线配置，且精度应高于 B 级，甚至达到 A 级或 AA 级。

上述两条陈述不禁止将 TIDA-010002 用作具有 4 线接口的数字温度传感器（或 DRTD）并牢固安装到热量计或冷量计器件上。

借助 TIDA-010002，主机 MCU 可以通过 I2C 总线读取存储在 48 位 EEPROM 区域中的 DRTD 传感器校准参数，并使用这些数据实现 AA 级温度计的精度。TIDA-010002 设计是 RTD 精密温度测量子系统的替代解决方案（如 TIDA-01526 中所述），由于其有源半导体器件的性质，它可以提供相似的分辨率和温度精度，但仅限于 -55°C 至 +150°C 范围内。

2.4.1 基于 PT100、PT500、PT1000 的热量计测量

在图 2-5 中，ADS1220 Δ - Σ 器件用于测量两个串联的 4 线 PT 传感器的电阻，并将数据传输给 MSP430 主机 MCU，以便从电阻值转换为温度值，如 TIDA-01526 中所实现。在该方法中，4 线接口是开尔文连接的一部分，其中 RTD1 和 RTD2 上的两条外部引线承载测量电流 I_{DAC1} ，两条内部引线则连接到 ADS1220 的 AIN0-1 和 AIN2-3 模拟输入端，以测量 RTD1 和 RTD2 两端的电压，从而确定相应的电阻值。

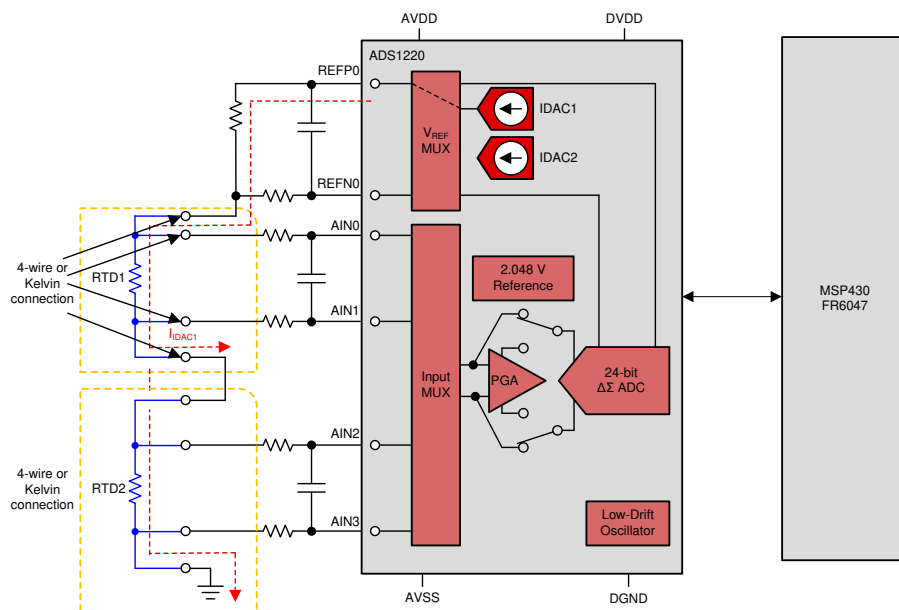


图 2-5. 具有 24 位 Δ - Σ 器件和一对 4 线 RTD 的 DTM 子系统

2.4.2 TMP117 用作温度传感器时的配置

本节提供了有关使用 TMP117 的数字传感器配置的详细信息。主要功能块包括：

- TMP117 数字温度传感器
- ESDS314 ESD 保护二极管

- 降低 EMI 的无源电源滤波器

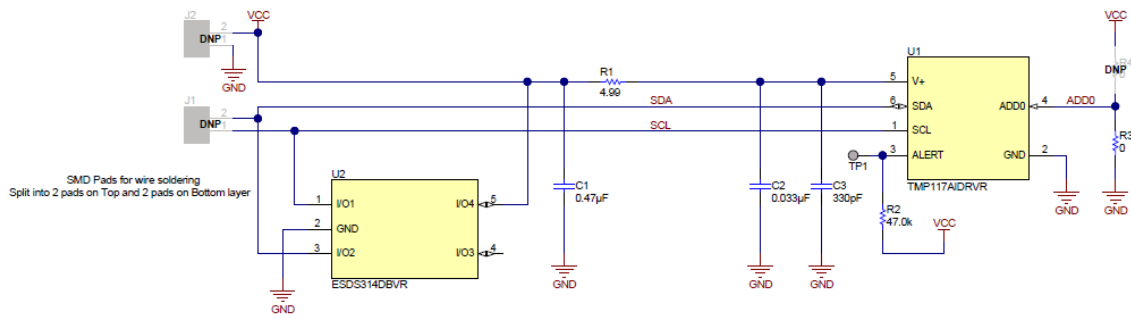


图 2-6. 基于 TMP117 的数字温度传感器电路配置

ESD 保护二极管 U2、C1 和 R1 放置在输入连接器附近。C2 和 C3 则放置在温度传感器附近，其中 C3 放置在尽可能靠近 TMP117 U1 的位置上，以提高 EMI 和 EMC 性能。

2.4.3 使用 TMP117 的数字 RTD 解决方案

TIDA-010002 通过将 Δ - Σ 内核和 RTD 组合成一个高精度数字温度传感器，将整个 DTM 子系统集成到了单个器件中 (参阅图 2-7)。请注意，TIDA-010002 的 4 线数字接口在电气上与标准模拟 4 线 RTD 传感器不兼容，后者借助开尔文连接进行测量，如图 2-5 所示。

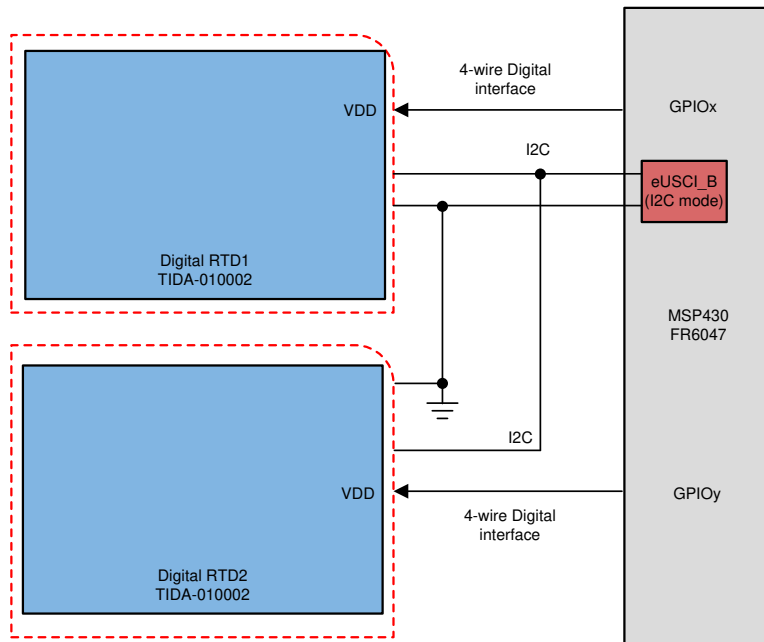


图 2-7. 模拟测量链在具有数字 I2C 接口的半导体温度传感器 TMP117 中的集成

4 线数字接口需要电源电压 VDD，该电压可由主机 MCU 的 GPIO 引脚 (如图 2-7 中的 GPIOx) 提供。可使用另一个 GPIO 引脚 GPIOy 来接通和断开第二个 DRTD 传感器的电源，并且可以添加第 3 个、第 4 个 GPIO 引脚，以防需要使用两个以上的 DRTD 传感器。使用专用 GPIO 引脚为每个连接的 DRTD 供电有其优点——所有器件共用同一根 I2C 总线，并且仍然具有相同的 I2C 地址。用户必须确保主机 MCU 只有一个 GPIO 引脚处于有效 (或高电平) 状态，而同一 I2C 总线上具有相同 I2C 地址的所有其他引脚均处于无效 (或低电平) 状态。

由于 TMP117 将使用热 BJT 和 16 位 Δ - Σ 内核的完整温度测量子系统集成到一个全数字解决方案中，所以主机 MCU 无需执行额外的温度转换工作。后者会读取值并根据 TMP117 器件 NV 存储器中的参数应用偏移 (如果需

要)。更节能的方法是在开始时读取一次 NV 存储器内容，之后在每次测量温度时对结果应用偏移或任何其他校正即可。校准偏移数据在 DRTD 制造过程中或终端系统校准期间存储到 NV 存储器中。

此处介绍的 DRTD 方法有一个重要优势，即无需像 2 线、3 线或 4 线配置中的传统模拟信号测量那样对模拟信号链进行偏移和增益校准。

无需高精度基准电阻器（通常具有优于 0.1% 和 $\pm 25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 的精度）和匹配的 RC 滤波器。这代表着可降低物料清单以及 PCB 空间等方面的成本，并且在主机 MCU 侧大幅简化布局。

最后需要强调的是，对于所有在 -55°C 至 150°C 范围内执行精密温度测量的热量计和冷量计，TIDA-010002 可以通过将 EN 1434 标准中规定的三点温度校准简化为单点温度偏移校准，从而显著降低制造成本。

基于 TIDA-010002 的 DRTD 方法的一个主要优势是能够将用户定义的校准参数存储在 TMP117 器件的 EEPROM 存储器区域内。与传统的模拟 RTD 传感器相比，这将大幅简化工作，甚至完全消除文书工作和校准数据处理工作。对于模拟 RTD 传感器，必须将带有 ID 编号的标签张贴到 RTD 电缆上。校准数据则之后由 RTD 传感器供应商通过一些离线方式（如采用电子数据格式）传输给仪表供应商。

为了达到 AA 级精度，可能需要在 0°C 或室温下进行单点偏移校准；该校准步骤会将 TMP117 器件的 3σ 精度分布范围收敛至 **TMP117 具有 SMBus 和 I2C 兼容接口的高精度、低功耗数字温度传感器**上显示的平均曲线。

2.4.4 环境温度注意事项

建议采用 TIDA-010002 来替代标准模拟 RTD 传感器，这类传感器使用薄膜无源器件，在**热量计**和**冷量计**中很常见。该设计可在高环境温度下使用，并在其使用寿命内经历多个“热”-“冷”交替循环。请注意，TMP117 数据表明确指出，长期稳定性和温漂是在 150°C 下测试 300 小时后确定的，通常在 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 范围内。

此外，TMP117 数据表还明确指出，8 次均值计算后的温度循环和迟滞精度为 $\pm 1\text{LSB}$ 。所述循环是指在发生室温 \rightarrow 热 \rightarrow 室温 \rightarrow 冷 \rightarrow 室温变化时重现温度读数的能力。根据数据表，此测试采用的温度为 -40°C 、 25°C 和 125°C 。

为充分利用 TMP117 器件的工业温度范围，电源电压电容器 C1、可选的 VDD 滤波电阻器（TIDA-010002 中没有）和任何用于 I2C 地址配置的电阻器（参阅节 4.1 中的 R3 和 R4）以及所使用的 PCB 材料也均应满足 -55°C 至 150°C 的宽温度范围要求。

对于需要固定 I2C 从器件地址进行批量生产的情况，可以修改 TIDA-010002 参考设计，并且 ADD0 引脚可以硬接线到 GND、VDD、SDA 或 SCL 线路。因此，R3 和 R4 将被移除，以进一步节省成本并提高系统可靠性。

根据 EN 60751:2008 的定义，AA 级和 A 级电阻式温度计的工作温度范围分别为 0°C 到 150°C 和 -30°C 到 300°C 。TIDA-010002 的建议工作环境温度低至 -55°C ，超出了 A 级和 AA 级的最低温度限制。

本参考设计中所用 TMP117 的最高工作温度是 150°C ，适用于包括计量在内的许多工业应用。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 所需的硬件和软件

评估 TIDA-010002 的性能时，需要综合现有且可用的 TI 硬件和软件工具。

3.1.1 硬件

TIDA-010002 电路板最初使用支持 I2C 总线协议的 [USB2ANY 接口适配器](#) 进行正常运行测试。在 TIDA-010002 设计和 USB2ANY 工具之间的 VDD、GND、SDA 和 SCL 线路正确接线后，对 TMP117 的从器件读写访问进行了验证。

测试中使用了内部集成 TIDA-010002 的完整组装探头（如图 3-1 所示）。这些数字温度探头（以 6m 长的 4 线白色电缆为例）由德国公司 JUMO GmbH & Co. KG 生产。JUMO 是工业温度探头开发领域的市场佼佼者，其工业温度探头可用于各种应用，包括住宅和商业热量计。如需查询基于 TIDA-010002 的数字温度探头，可访问 HeatMeter@jumo.net 联系 JUMO。

下一步，使用 BoosterPack™ 插件模块扩展连接器 J5 和 J6，将基于 TIDA-010002 的完整数字探头连接到了 [MSP430FR6047 超声波感应评估模块](#)。表 3-1 显示了所需的四个连接，其中数字温度传感器的 VDD 可持续提供，也可以通过 GPIO 引脚实现轻松上电和断电。

表 3-1. MSP430FR6047EVM 和 TIDA-010002 的接线方案

MSP430FR6047EVM	TIDA-010002	注释
SCL (J5.17)	SCL	eUSCI_B0 的 I2C
SDA (J5.19)	SDA	eUSCI_B0 的 I2C
GND (J6.2)	GND	
GPIO P8.0 (J6.18)	VDD 开/关	用于对第一个 DRTD 进行电源循环
GPIO P7.5 (J6.20)	VDD 开/关	用于对第二个 DRTD 进行电源循环
VDD (J5.1)	VDD	替代 GPIO8.0；用于持续为 DRTD 供电

3.1.2 TMP116 的接口测试软件

请注意，连接 TMP117 传感器进行测试时，可以采用相同的设置和程序。TMP116 和 TMP117 也兼容寄存器。

TIDA-010002 已与 [EVM430-FR6047](#) 一起完成测试，后者是一个参考开发平台，用于评估 MSP430FR6047 在智能水表或热量计等超声波感应应用中的性能。MSP430FR6047 MCU 的流量测量高精度与 AA 级传感器的温度精度相结合，为设计热量计和冷量计或热量计算器提供了成本优化的超低功耗硬件平台。

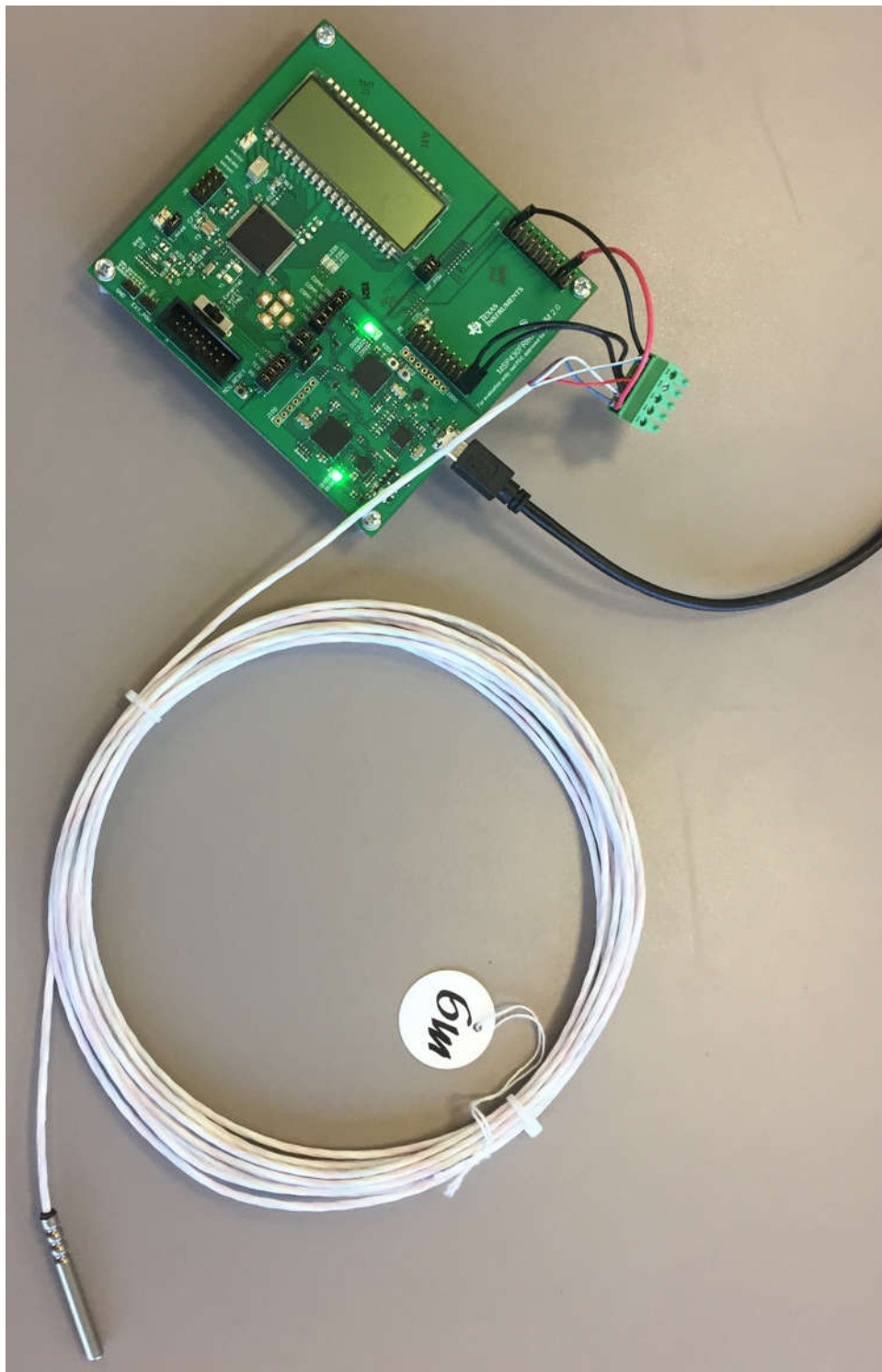


图 3-1. 具有 6m DRTD 的 EVM430-FR6047 (TIDA-010002 密封在金属主体内部)

MSP430FR6047 应用软件名为“[超声波感应 \(USS\) 设计中心](#)”。要下载软件，请访问 [MSP430 MCU 超声波感应设计中心](#)。MSP-USSSWLIB 免费软件是随 TIDA-010002 设计提供的示例代码的基础。MSP-USSSWLIB 包含三个部分，即 USSSWLib、USS 设计中心 GUI 和演示应用。截至 2018 年 8 月，TI.com 上的最新版本是“[UltrasonicWaterFR6047_02_10_00_05_windows_installer.exe](#)”，其中包含“MSP430FR6047EVM_USS_Water_Demo” Code Composer Studio 项目，此处使用的正是该项目。

“hal_system.c”文件经过修改，使 MSP430FR6047 的 eUSCI_B0 作为 I2C 主器件，TIDA-010002 作为从器件。“Water_Demo”软件项目中的“main.c”文件已修改；实现了对 TMP116 器件的读写访问，包括 TMP116 的 EEPROM 写入功能。

MSP430FR6047 的 USCI_A1 模块已设置为用作连接 PC 的通信接口（使用集成到 EVM 上的 MSP430 调试器的后通道 UART）。UART 设置为 57600,8N1，打开终端窗口即可在 Code Composer Studio CCSv8.1.0 内部监测正在输出的数据；用户也可以运行其偏好的 UART 终端程序。

已开发出用于与 TMP116 通信的 I2C 驱动程序，其中利用了适用于 MSP430FR6047 EVM 的现有硬件抽象层 (HAL) 驱动程序。TIDA-010002 的 I2C 地址是硬接线 0x48 十六进制，R3 安装在 TIDA-010002 PCB 上（参阅图 3-1）。

完整的修改后演示应用软件可根据 BSD 第 3 条许可证作为开源示例在节 5 中提供。在 CCSv8.3 或更高版本下使用此代码项目时，实际温度读数会打印到终端窗口中，显示在如图 3-2 所示的左下角。终端窗口中的数字格式为整数部分保留两位，小数部分保留四位。因此，COM12 终端窗口中的第一个数据——字符串“251328”表示 +25.1328°C。

请注意，文本代码中尚未实现低于 0°C 的温度转换，此类转换必须由用户添加。

该代码示例以 1 秒为周期对 8 个样本进行均值计算，这是 TMP116 演示整个系统运行时的默认设置。用户应根据其特定应用适当调整 TMP116 的设置。

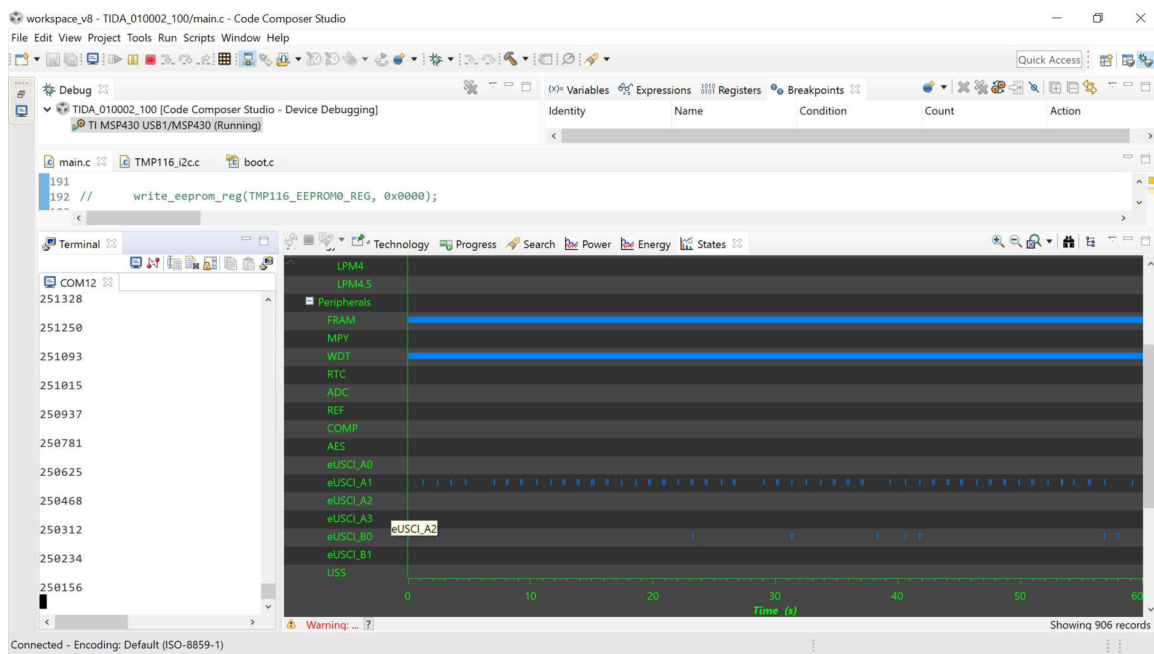


图 3-2. TIDA-010002 代码示例及 COM12 和 EnergyTrace++ 中的终端输出

图 3-2 右下角的 EnergyTrace++ 窗口中显示了 MSP430 外设的活动，请参阅 eUSCI_A1 和 eUSCI_B0 行中的垂直蓝色条纹。

3.2 测试和结果

为了测试温度测量精度，JUMO11 设计和组装了搭载 TMP117 的 1.5 米数字探头。

3.2.1 性能测试设置

TMP117 高精度数字温度传感器评估模块用于连接 DRTD 并采集所有测量数据；所有测试都在 3.3V 电压下完成。

DRTD 传感器作为 DUT (受测器件) 放置在温度受控的搅拌油浴中，从而测量温度偏移精度和响应时间。

传感器也已针对静止空气响应时间进行过测试，并与搭载 TMP 器件的其他 TI 电路板进行了比较。在本章所记录的测试过程中，使用了多个精密测量设备：

- 使用 Galden HT200 流体的 Fluke 7320 或 7340 油浴
- 精度高达 $\pm 0.006^{\circ}\text{C}$ 的 Fluke 1502A 仪表
- 0°C 下校准后精度达到 $\pm 0.006^{\circ}\text{C}$ 的 Fluke 5628 次级标准 PRT 探头

3.2.2 DRTD 的 EMI 和 EMC 测试要求

已根据 IEC 定义的电磁兼容性标准并采用 EN-1434 标准定义的测试条件，对 TMP117 进行了全面的 EMI/EMC 测试。以下是测试详情和标准的总结。

- EN 61000-4-2 (ESD)：空气放电电压 8kV/接触放电电压 4kV，单次放电，10 次/放电点
- EN 61000-4-3 (高频场，电缆 $> 1.2\text{m}$)：26-1000MHz；3V/m 或 10V/m (C 级)，调幅 (1kHz) 80%
- EN 61000-4-4 (信号线路和直流线路 $> 1.2\text{m}$ 时的快速脉冲群)：1.0kV $\pm 10\%$ ；5ns 上升时间；峰值时间 50ns，频率 5kHz；脉冲群长度 15ms，脉冲群周期 300ms；瞬态发生器的输出阻抗 50Ω ；正负脉冲群各持续 60s
- EN 61000-4-5 (对于所有电缆连接长度大于 10m 的情况)：0.5kV，1.2/50 μs ，8/20 μs
- EN 61000-4-6 (高频调幅)：0.15MHz 至 26MHz，3V (C 级为 10V) 调幅 (1kHz) 80%
- EN 61000-4-8 (电磁场) 必须在 60A/m (A 级和 B 级) 和 100A/m (C 级) 条件下进行测试
- 符合 EN55022 的射频发射 (传导和辐射)

3.2.3 TMP117 EMI/EMC 测试结果

TMP117 已按照上述标准的要求进行了测试。以下表 3-2 展示了测试结果。由表可见，TMP117 符合列出的所有标准。此设计展示了根据 IEC61000-4-3 标准执行测试时的设置和后续获得的结果。

表 3-2. TMP117 EMI/EMC 测试结果

测试编号	标准	环境等级	样本数量	结果
1	EN 61000 4-2 静电放电 (接触)	A、C	2	通过
	EN 61000 4-2 静电放电 (空气)	A、C	2	通过
2	EN 61000-4-3 电磁场	A	2	通过
	EN 61000-4-3 电磁场	C	2	通过
	EN 61000-4-3 由数字无线电设备引起的特定电磁场	A	2	通过
	EN 61000-4-3 由数字无线电设备引起的特定电磁场	C	2	通过
3	EN 61000-4-4 快速瞬变 (脉冲群)	A、C	2	通过
4	EN 61000-4-5	A、C	1	通过
5	EN 61000-4-6	A	2	通过
	EN 61000-4-6	C	2	通过
6	EN 61000-4-8	A	2	通过
	EN 61000-4-8	C	2	通过
7	EN 55022 信号和电力直流线路上的传导发射	A、C	2	通过

表 3-2. TMP117 EMI/EMC 测试结果 (续)

测试编号	标准	环境等级	样本数量	结果
8	EN 55022	A、C	2	通过

EN 61000-4-3 标准用于确定器件的电磁辐射抗扰度。完成了四种不同的测试；其中两种测试涉及数字无线电设备引起的特定电磁场。该标准的测试要求如以下表 3-3 和表 3-4 所示。

表 3-3. 电磁场测试要求

环境等级	A	B	C
频率范围	26MHz – 1000MHz		
测试级别	3V/m	3V/m	10V/m
调制	调幅 (1KHz) 80%		

表 3-4. 数字射频引起的电磁场测试要求

环境等级	A	B	C
频率范围	800MHz – 960MHz 1850MHz – 2700MHz		
测试级别	10V/m	10V/m	30V/m

表 3-4. 数字射频引起的电磁场测试要求 (续)

环境等级	A	B	C
调制	调幅 (1KHz) 80%		

图 3-4 显示了物理测试设置, 图 3-3 则显示了原理图。已通过使用数字隔离器和屏蔽铜缆的隔离式 I2C 对 TMP117 进行了 EN-1434 标准中列出的频率测试。停留时间为 30 秒, 频率步长为 1MHz。未观察到通信错误或温度测量值突然变化。消除磁场后, 未观察到温度测量值突然变化。

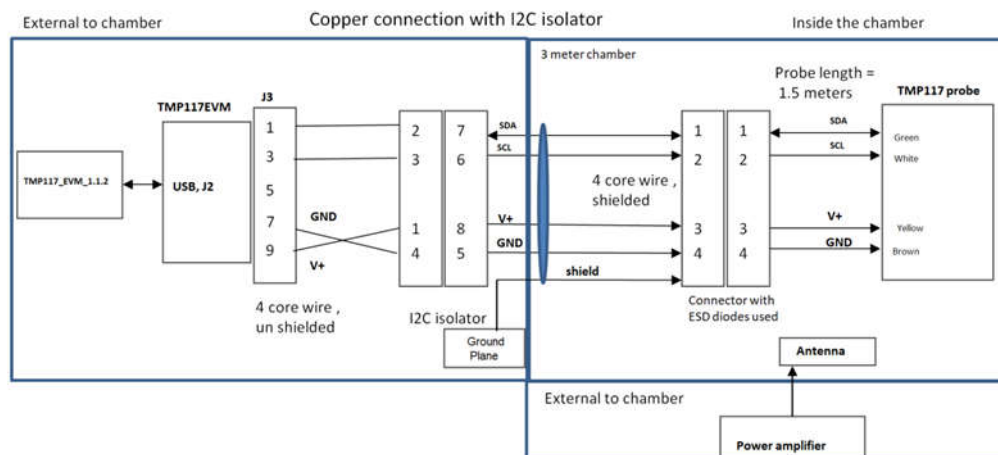


图 3-3. EN 61000-4-3 测试设置示意图

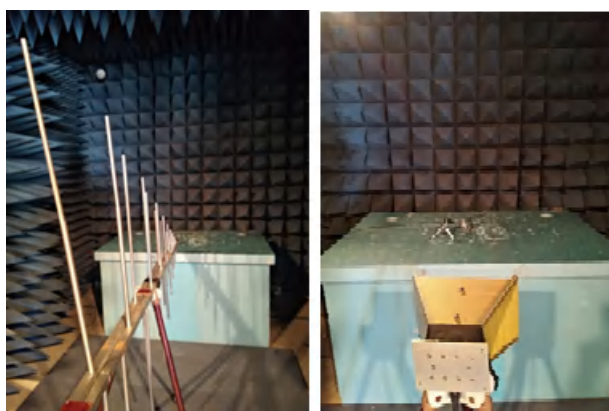


图 3-4. EN 61000-4-3 测试室内设置

3.2.4 基于 TMP117 的温度探头测量性能测试结果

在以下不同的测试条件下，分别通过使用 TMP117 和 TMP116 器件的 DRTD 采集了数据。TMP117 器件具有更高的精度，因此推荐使用。但是，由于两个温度传感器均适合此应用，所以两者的数据均会显示。在本节中，数据使用 3 个不同的 TMP117 探头采集，以确保结果的准确性。有关 TMP116 探头的结果，请参阅节 3.2.5。

DRTD 探头浸入使用 Galden HT200 油液的 Fluke 精密油浴中，并在每个温度点上读取十个值。测量范围从 -20°C 到 130°C，步长为 5°C；每个步长中，这十个值与各自温度测量点的最差（最大）偏差已绘制在图 3-5 中。

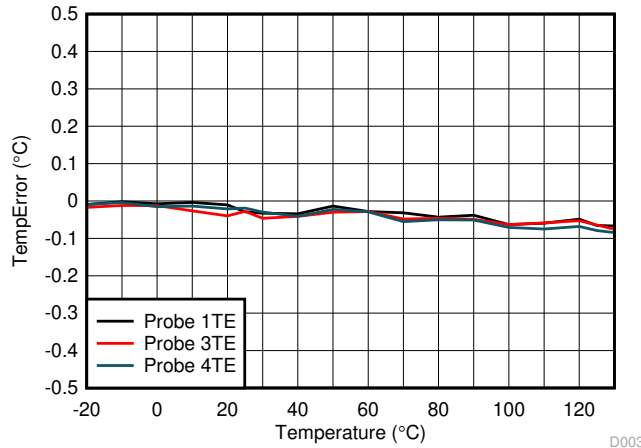


图 3-5. TMP117 DRTD - 20°C 至 130°C 温度误差漂移

TI 的 DRTD 可实现 AA 级精度。

TIDA-010002 DRTD 器件未经校准实现的 AA 级精度默认不能确保适用于所有 TMP117 器件。由于器件存在平均 $\pm 3\sigma$ 的分布范围（参阅“[TMP117x 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](#)”），所以需要进行单点校准，以更大限度地降低温度偏移，可使用冰浴在 0°C 下校准，也可在室温下校准。图 3-5 展示了内部集成 TIDA-010002 的 DRTD 探头无需校准即可满足 AA 级温度偏移限制。这种情况假定特定器件的性能接近数据表中显示的平均曲线。

EN60751:2008 标准要求要在 -5°C 和 30°C 之间的一个温度点（最好是在 0°C）上检查所有 RTD。采用 TIDA-010002 的 A 级和 AA 级温度计需要在比第一个温度高 90°C 的温度下进行第二次检查；例如，两个温度点可以是 0°C 和 90°C，也可以是 3°C 和 93°C。

鉴于温度传感器的响应时间是标准 RTD 的重要参数，所以 TIDA-010002 的性能在搅拌油液和静止空气中均经过测量，以便进行对比分析。搅拌油液中的测量结果适用于 DRTD 与流体直接接触的应用，例如热量计和冷量计。如图 3-6 所示，TMP117 DUT 的平均初始温度为 22°C，将其插入 70°C 高温油浴中后，记录了 DUT 报告的温度。

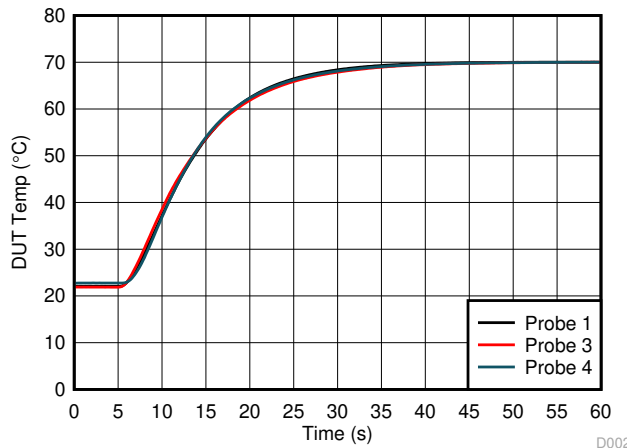


图 3-6. 搅拌油浴中 TMP117 DRTD 的响应时间

三个 TMP117 探头的结果几乎相同。探头达到 70°C 的油温大约需要 55 秒。三个 DRTD 探头的静止空气响应时间如图 3-7 所示。

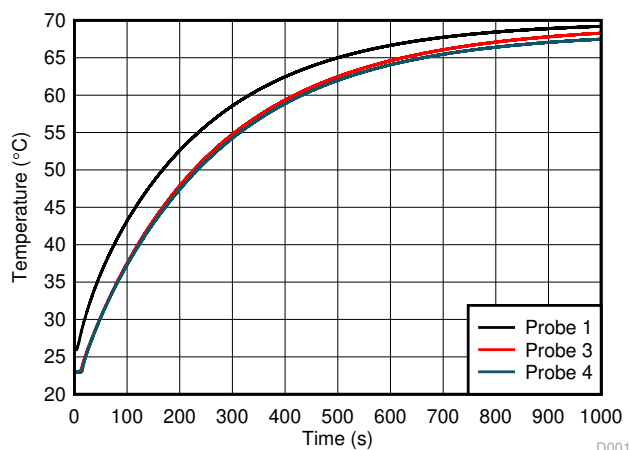


图 3-7. 静止空气中 TMP117 DRTD 的响应时间

3.2.5 基于 TMP116 的温度探头测量性能测试结果

与 TMP117 探头类似，TMP116 DRTD 探头被浸入使用 Galden HT200 油液的 Fluke 精密油浴中。温度偏移图如图 3-8 所示。

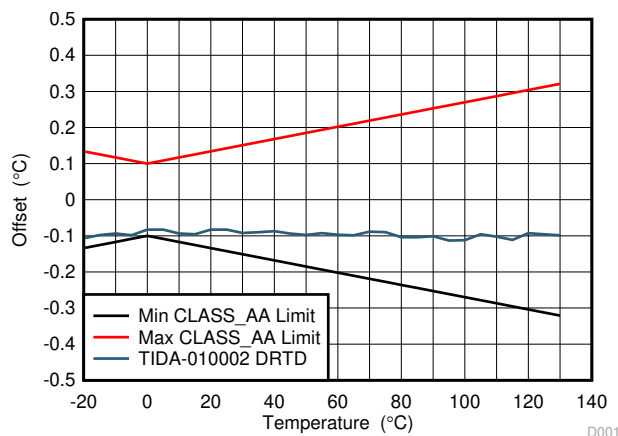


图 3-8. TMP116 DRTD - 20°C 至 130°C 温度误差漂移

请注意，此 TIDA-010002 DRTD 器件未经校准实现的 AA 级精度默认情况下不能保证适用于所有 TMP116 器件。使用 TMP117 和 TMP116 的 DTRD 探头均可实现 AA 级精度，两个探头之间的偏移值也非常接近。

与节 3.2.4 类似，在搅拌油液和静止空气中均测量了响应时间。如图 3-9 所示，DUT 的初始温度为 20.5°C，将其插入 70°C 的热油浴中后，记录了 DUT 报告的温度。TMP117 和 TMP116 探头的油浴响应时间非常接近；探头达到 70°C 的油温大约需要 55 秒。

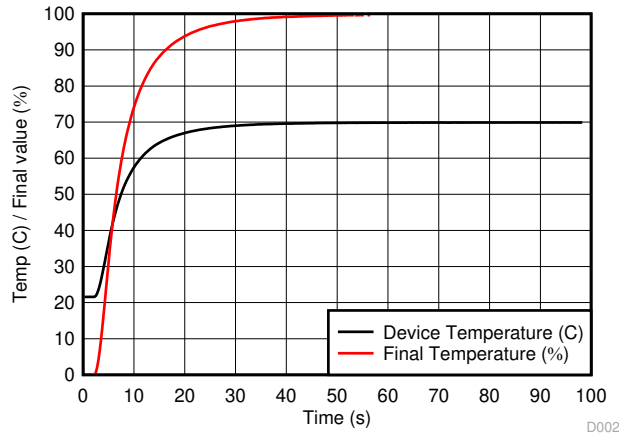


图 3-9. 搅拌油浴中 TMP116 DRTD 的响应时间

DUT1 和 DUT2 两个 DRTD 探头的静止空气响应时间如图 3-10 所示，还与焊接或未焊接 TMP116 散热焊盘的其他 TI 测试板进行了比较。显然，带有金属护套且热质量明显更大的 DRTD 探头具有更长的响应时间，但在大约 400 秒的延迟后，其测量结果与采用 TMP116 的裸露 PCB 趋于一致。TP 表示散热焊盘。已进行过测试，可比较焊接和未焊接散热焊盘时的性能（有关详细信息，请参阅“使用 TMP116 进行精确的温度测量”）。

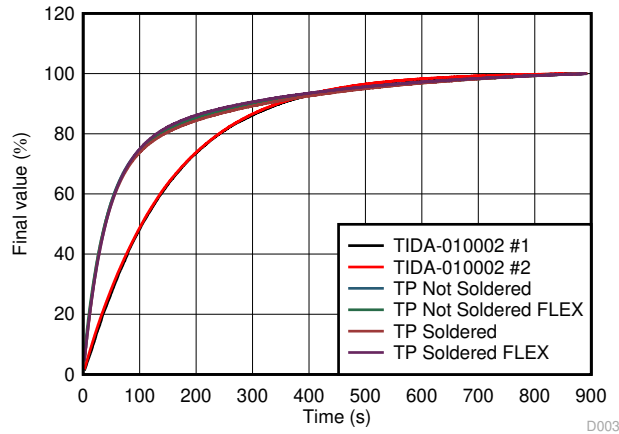


图 3-10. 静止空气中 TMP116 DRTD 的响应时间

3.2.6 I2C 总线电缆长度注意事项

已使用电缆长度分别为 2m、4m、6m、8m 和 10m 的多个 DRTD 探头，对 4 线数字接口与 I2C 总线的兼容运行进行了验证。期间使用了 SCL 线路上 4.7k Ω 的外部上拉电阻。

请注意，I2C 总线规范定义了最大总线容量，因此限制了可能的电缆长度。实现的距离（10m 是可行的最大 DRTD 探头电缆长度）取决于所用 4 线电缆的参数以及 I2C 主器件（此处为 MSP430FR6047 MCU）的驱动能力。针对 6m、8m 和 10m 长电缆采集的多组示波器数据传输图表明，随着电缆长度增加，信号的上升和下降时间会延长，并且每条导线的总电容会因电缆长度而超过 I2C 总线 400pF 的最大限制，进而导致位错误概率升高。

然而，I2C 规范也提到，在时钟频率为 400kHz 的快速模式下，使用驱动能力超过 3mA 的器件有助于克服这一限制。当 MSP430 电源电压 VCC = 2.2V 时，MSP430FR6047 数字 IO 引脚可在大约 0.6V 的输出电压下提供约 10mA 的低电平输出电流。

用户需自行验证在 VDD 电源电压电平（如放电至 2.5V 的 LiMnO₂ 原电池）和应用的环境工作温度（如热量计）均处于最恶劣工况下时可实现的最大电缆长度。

在使用 EN 60751 标准中的 Callender-Van-Dusen (CVD) 参考公式比较每个 RTD 传感器的行为与理想 RTD 图时，TIDA-010002 DRTD 探头在峰值工况下的 $\pm 11.13\text{mK}$ 精度误差明显优于 prEN1434-5:2014 标准中规定的

$\pm 700\text{mK}$ 限值。须在 3 个典型温度点 (如 10°C 、 30°C 和 50°C) 上均符合此限值要求, 这在图 3-8 中进行了验证。

3.2.7 电源

热量计和冷量计通常是电池供电设备, 因此一个关键设计标准是实现一个具有超低功耗的温度测量子系统。

TMP117 的最低工作电压为 1.8V , 这可降低总功耗, 并最大限度地利用可用的电池容量, 非常适合典型“截止”电压为 2.0V 的 LiMnO_2 3.0V 原电池。

TIDA-010002 也可以与 3.6V LiSoCl_2 电池搭配使用, 后者的截止电压通常约为 3.1V 或 3.2V , 具体取决于应用。

通过使用外部 E3631A Agilent 直流电源为整个设置供电, EVM430FR6047 与 DRTD 探头一起成功通过了低至 2.05V 条件下的测试。

3.2.8 TMP116 的 ESD 测试结果

已使用根据 IEC/EN 测试波形校准的业界标准 ESD 测试发生器, 对 TIDA-010002 PCB 进行了 ESD 合规性测试, 结果如表 3-5 所示。有关所用 ESD 测试设置的更多详细信息, 请参阅“面向 TI 保护器件的 IEC 61000-4-x 测试”。

根据 EN1434-4 标准的要求, 仅当 RTD 传感器的电缆长度超过 10m 时才需进行 EN61000-4-5 测试, 这对于 I2C 总线连接而言颇具挑战性。尽管如此, 还是使用 29V 的实际脉冲电压进行了一项浪涌测试, 测试回路中包括一个 2Ω 的负载, 加上具有 2.83Ω 动态电阻的 ESD 器件以及 TMP116 下游器件。

对于在 42Ω 负载 (2Ω 是 CWG 源阻抗, 40Ω 来自耦合网络) 加上 2.83Ω 的 ESD351 + TMP116 动态电阻上进行的浪涌测试, 结果为 44.83 倍于 6A 的电流, 即大约 269V 。

269V 接近 500V 的一半, 后者是信号电缆长于 10m 时的要求参数。

表 3-5. TIDA-010002 的 ESD 测试

EN 61000-4-2 ESD 测试等级	接触放电测试电压 ($\pm\text{kV}$)	空气放电测试电压 ($\pm\text{kV}$)	TIDA-010002 WITH ESD351
4	8	15	通过

表 3-5 中实现并列出的 ESD 合规水平几乎是所需限值 (根据 EN 1434-4:2014-04) ——接触放电电压为 4kV 、空气放电电压为 8kV ——的两倍。

此时可采用 TPD1E04U04 器件作为替代方案, 该器件符合 $\pm 16\text{kV}$ IEC 61000-4-2 4 级 ESD 保护标准, 同样高于要求的最低标准。

ESD351 或 TPD1E04U04 保护器件在 TIDA-010002 PCB 上共享同一个 0402 封装, 因此可择其一安装使用, 从而可根据价格或性能提供替代方案。

3.2.9 总结

对于安装在使用 4 线电缆的金属主体中的 TIDA-010002 参考设计, 其测试结果证明测量精度符合 DIN EN 60751:2008 (德国和欧盟标准) 规定的 AA 级温度计要求。

为在 TIDA-010002 从 -55°C 到 $+150^{\circ}\text{C}$ 的整个温度范围内实现 AA 级精度, 必须进行单点 (1 点) 偏移校正; 如果 A 级精度足以满足用户应用的要求, 则无需进行 TMP117 校准。

总体而言, DRTD 结合 EEPROM 片上存储器可存储用户定义校准数据的独特功能, 可提供 A 级或 AA 级 RTD 传感器的最高精度。

与标准铂 RTD 相比, 单独存储每个 DRTD 传感器的校准数据是一大优势, 这可以减少文书工作和校准数据处理工作, 从而显著节省传感器制造商和传感器最终客户的成本。

工作温度范围拓宽至 -55°C , 因此可在包括计量在内的多种应用中实现更高的精度。

ESD61000-4-2 4 级合规性已经过验证, 即接触放电测试电压达到 $\pm 8\text{kV}$, 空气放电测试电压达到 $\pm 15\text{kV}$ 。

如果不需要向后兼容 PT 传感器接口（如许多热量计和冷量计应用，其中 PT 传感器和流量计子系统组装成一个单元并且只能一起更换），那么引入的 TIDA-010002 DRTD 可以简化校准数据处理工作、移除多个无源器件，并通过消除匹配的信号 PCB 布线来简化 PCB 设计，从而节省系统成本。此外，与传统工业薄膜 RTD 传感器相比，复杂的电阻-温度转换计算完全冗余，因此大幅简化了用户应用程序代码开发，并且由于 MCU 工作周期更少，可节省一些额外的功耗。

可根据要求提供详细的测试结果，包括图片、测试条件、图表和结果。

4 设计文件

4.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010002](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010002](#) 中的设计文件。

4.3 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-010002](#) 中的设计文件。

4.4 Altium 工程

要下载 Altium Designer® 工程文件，请参阅 [TIDA-010002](#) 中的设计文件。

4.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-010002](#) 的设计文件。

4.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-010002](#) 中的设计文件。

5 软件文件

要下载软件文件，请参阅 [TIDA-010002](#) 中的设计文件。

6 相关文档

1. [DIN EN 60751:2008](#) (德国和欧盟标准)
2. Beuth, [EN1434-1](#) 至 [EN1434-6](#)
3. 德州仪器 (TI), [3 线 RTD 测量系统参考设计 \(-200°C 至 850°C\)](#)
4. [欧洲议会和理事会 2014 年 2 月 26 日的 2014/32/EU 号指令](#)
5. 德州仪器 (TI), [TMP117 高精度数字温度传感器评估模块](#)
6. 德州仪器 (TI), [针对热响应优化的可穿戴温度感测布局注意事项应用报告](#)
7. 德州仪器 (TI), [使用 TMP117 进行精确的温度测量应用报告](#)
8. 德州仪器 (TI), [USB2ANY 接口适配器](#)
9. 德州仪器 (TI), [适用于 TI 保护器件的 IEC 61000-4-x 测试](#)
10. NXP Semiconductors, [I2C-bus specification and user manual](#), UM10204, 修订版 6
11. [JUMO GmbH & Co. KG](#)

6.1 商标

MSP430™, SimpleLink™, E2E™, and BoosterPack™ are trademarks of Texas Instruments.

Altium Designer® is a registered trademark of Altium LLC or its affiliated companies.

Wi-Fi® is a registered trademark of Wi-Fi Alliance.

所有商标均为其各自所有者的财产。

7 作者简介

MILEN STEFANOV (M.Sc.E.E) 是 TI 的系统工程师，其工作领域为电网基础设施，此外他还是射频通信技术和计量应用方面的专家。毕业后，他在开姆尼茨工业大学 (TUC) 担任了 5 年的研究助理，随后担任了 3.5 年的半导体行业系统工程师，专攻高速光学和有线通信。他于 2003 年加入 TI，成为一名 Wi-Fi® 专家，并为用于主要 OEM 的 TI Wi-Fi 产品提供支持。自 2010 年以来，他一直致力于开发面向欧洲电网基础设施市场的计量和 Sub-1GHz 射频解决方案。Stefanov 先生在多家欧洲杂志上发表了多篇关于 wM-Bus 技术的文章，并在于慕尼黑举行的无线大会与智能家居和计量峰会上进行过技术论文报告。

CAL MUCKELBAUER 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责开发面向电网基础设施领域的参考设计解决方案。他于 2019 年从马里兰大学帕克分校获得电气工程专业理学学士学位后，随即加入了 TI。

KALLIKUPPA MUNIYAPPA SREENIVASA 是德州仪器 (TI) 的系统架构师，负责开发面向工业领域的参考设计解决方案。他在高速数字和模拟系统设计方面拥有丰富的经验。**Sreenivasa** 拥有印度迈索尔韦斯科技大学 (VTU) 电子与通信工程 (BE-E&C) 专业工程学士学位。

8 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 * (March 2019) to Revision A (September 2020)	Page
• 进行了更新，以反映从 TMP116 到 TMP117 的器件变更。.....	1
• 更新了表格，以反映从 TMP116 到 TMP117 的器件变更。.....	2
• 添加了“器件建议”部分，以反映从 TMP116 到 TMP117 的器件变更。.....	4
• 添加了“温度传感器 - TMP117”部分和“功能框图”，以反映从 TMP116 到 TMP117 的器件变更.....	4
• 更新了“TMP117 作为温度传感器时的配置”部分和“基于 TMP117 的数字温度传感器电路配置”图像.....	6
• 更新了“DRTD 测试要求”部分，以针对新的 TMP117 器件更新 EMI 要求.....	12
• 添加了“TMP117 EMI/EMC 测试结果”部分，新增了辅助表格，以针对新的 TMP117 器件更新 EMI 要求...	12
• 添加了“EN 61000-4-3 测试设置示意图”和“EN 61000-4-3 测试室内设置”图片，详细说明了 TMP117 器件的 EMI 测试.....	12
• 添加了“TMP117 探头测量性能测试结果”部分，新增了辅助图像.....	15
• 删除了“PCB 布局建议”部分.....	20
• “作者简介”部分新增了两位作者。.....	20

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