

摘要

红外 (IR) 温度计可完成无接触式温度测量，有助于减少接触性感染的传播。为了识别人员温度是否正常，所有地方都需要进行这种高度精确的非接触式温度测量。此设计展示了一种低成本、高精度红外温度计解决方案，准确感应温度的最远距离为 10cm，它使用 24 位 Σ - Δ ADC 和超低噪声信号链来降低失调电压和温漂，实现了具有低成本 MCU、LCD 接口和 GPIO 控制的完整解决方案。该设计由 3V AA 电池供电（最低 2.2V），总待机消耗电流 $< 1 \mu\text{A}$ ，因此非常适用于电池供电系统。

内容

1 引言.....	2
2 主要规格与特性.....	2
3 系统设计挑战和器件选型.....	3
3.1 第 1 项设计挑战：医疗测量的精度.....	3
3.2 第 2 项设计挑战：更大限度地提高系统的电池电量.....	4
3.3 第 3 项设计挑战：快速生成测量结果.....	4
4 红外温度计：硬件设计.....	5
4.1 低噪声信号链设计.....	6
4.2 系统发电和电源管理.....	7
4.3 微控制器部分和 LCD 显示屏.....	7
4.4 上电、自动 LCD 背光电路和 EEPROM.....	9
5 软件.....	10
6 测试结果.....	11
6.1 电路板图像.....	11
6.2 用于评估温度计的测试设置.....	12
6.3 测试步骤.....	12
7 测试结果.....	13
7.1 电流消耗.....	13
7.2 电气噪声.....	13
7.3 热性能测量.....	13
8 结论.....	14
9 参考文献.....	14

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

红外温度计可完成无接触式温度测量，有助于缓解接触感染的传播。需要使用高性能模数转换器 (ADC) 对模拟红外温度传感器（通常是一个单像素热电堆传感器）采集到的高精度信号进行采样。该温度计将传感器置于物体附近但不进行实际接触，通过这种方式提供温度读数。它提供便携式和即时的现场读数来筛查患者，并且在衡量一个人的健康状况时仍能降低测试人员的暴露风险。

此应用手册详细说明了—种基于 IR 且可实现患者监护的温度计的完整设计。使用热电堆红外传感器来完成该设计，该传感器可产生与物体和环境之间的温差成比例的模拟电压。图 1-1 所示为红外温度计的系统级方框图。此架构的主要优点是以非常低的成本实现非常高的性能。

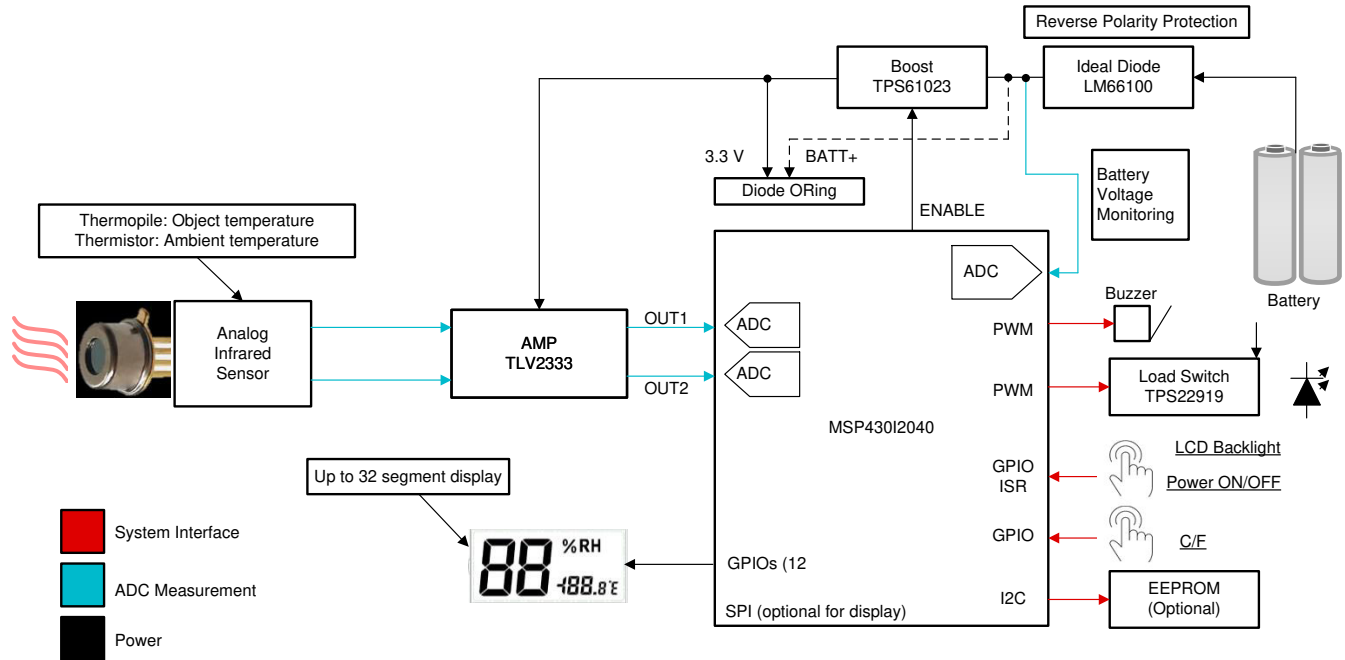


图 1-1. 红外温度计设计的系统级方框图

该系统的核心是 MSP430I2040，这款 16MHz 计量 AFE 具有四个 24 位 Σ - Δ ADC、两个 16 位计时器、16KB 闪存和 1KB RAM，提供了足够的资源来完成温度测量。它控制整个系统，包括电源管理、微弱信号测量、数字化和用户界面（例如，显示屏、输入按钮等）。

2 主要规格与特性

该温度计具有以下技术规格与特性：

- 采用精确校准的传感器（此设计不包括校准），在距离远至 10cm 时可获得高达 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 的高温度精度。
- 物体测量范围为 30°C 至 45°C ，环境温度范围为 16°C 至 40°C （支持 0°C 至 50°C ）
- 使用 GPIO 引脚支持多达 32 段 LCD，另外还支持基于 I2C 和 SPI 的智能 LCD
- $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$ 的温度显示方式，可使用按钮来更改
- 自动打开/关闭背光 LED；电池反极性保护

3 系统设计挑战和器件选型

技术文章 [如何快速设计红外温度计](#) 对此进行了简要概述。

3.1 第 1 项设计挑战：医疗测量的精度

要求每次测量都实现低至 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 的高精度。由于来自热电堆的信号非常弱（小于几 mV），随温度发生的变化更小，有些传感器的变化小于 $10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。图 3-1 所示为热电堆传感器中热电堆输出与物体温度的参考曲线。在嘈杂环境中精确测量此类信号是一项挑战。

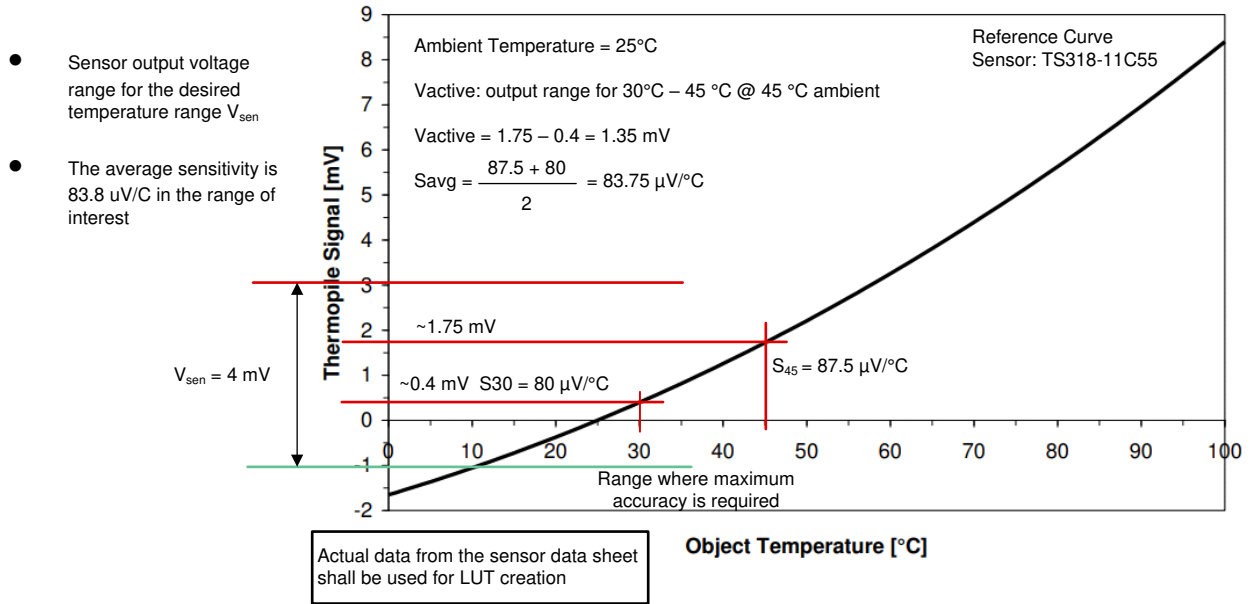


图 3-1. 展示示例计算和测量范围的热电堆传感器典型参考曲线

3.1.1 TI 解决方案：使用 LNA 实现前置放大，消除 ADC 失调电压和温漂

TI 精密运算放大器具有超低的失调电压和温漂，这样就可以放大弱电压信号。

TLV333：

- 超低输入失调电压 $15\ \mu\text{V}$ （最大值），经过优化，可以测量低电压信号
- 低失调电压漂移 $0.02\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ （最大值）

前置放大级是获得信号所必需的，且在系统中必须具有超低的失调电压和温漂。如果信号直接馈送到 MSP 的 ADC，ADC 的失调电压和温漂参数会引起非常高的误差。

3.2 第 2 项设计挑战：更大限度地提高系统的电池电量

温度计电池的电量需要能够持续进行 1000 次以上的测量，且必须在关闭时尽量减少电流消耗。

3.2.1 TI 解决方案：TI 可提供具有超低 I_Q 的高效直流/直流转换器，MSP430I2040 在 Ipm 模式下具有超低消耗电流。

TPS61023：

- < 100nA 的超低关断电流
- < 21 μ A 的静态电流
- 10 μ A 负载下的效率高于 83%
- 1mA 至 2A 负载下的效率高于 90%

使用 MSP430I2040 实现电源优化：稳压 3.3V 电源的启用由 MSP430 控制，仅当用户想要进行热测量时才打开系统电源。

3.3 第 3 项设计挑战：快速生成测量结果

3.3.1 TI 解决方案：MSP430 系列

MSP430 产品系列将 ADC、LCD 驱动器和处理组合到一个芯片中，确保快速计算结果。

MSP430I2040：

- 集成式 24 位 Σ - Δ 模数转换器
- 内部低噪声基准，最大限度地减小会影响测量的电源噪声

4 红外温度计：硬件设计

如果将末端置于不同温度下，则它与金属之间会产生电压。这种现象称为“塞贝克效应”。由于塞贝克效应，在一端连接的不同种金属（称为热电偶）之间也会产生电压差。现代技术使得在非常小的区域内生产由数百个热电偶组成的热电堆传感器成为可能。

图 4-1 所示为上述带有四根引线的温度传感器。两根引线用于热电堆输出，这里会因为塞贝克效应而产生电势；另两根引线用作热敏电阻引线，用于测量环境温度。

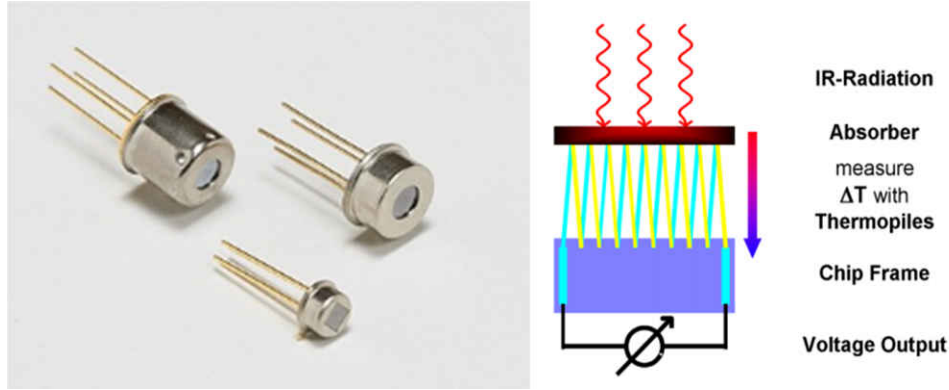
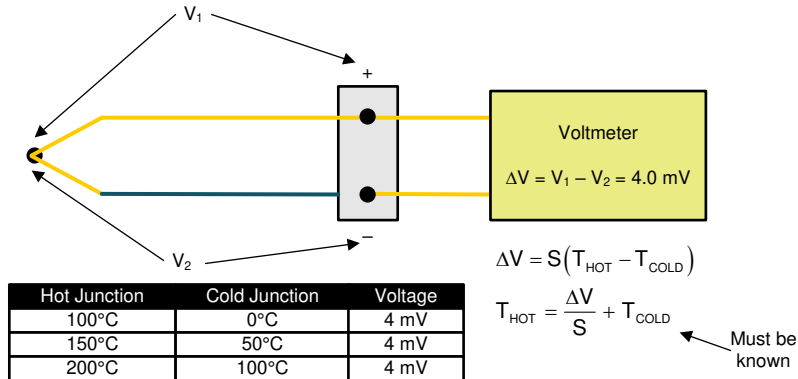


图 4-1. 由热电堆传感器和热敏电阻组成的温度传感器

物体温度的计算 解释了使用两组传感器的原因。若要知晓物体的温度，就必须了解当红外光照射在热电堆传感器的一端时产生的电压。电压 (ΔV) 与温差 (ΔT) 成正比。可根据 ΔT (使用对应于 ΔV 的 LUT) 和环境温度 T_{COLD} (如物体温度的计算 所示) 确定物体的温度。



如果已知环境温度和由于塞贝克效应产生的电压差，则可计算出物体温度。

图 4-2. 物体温度的计算

4.1 低噪声信号链设计

热电堆传感器的信号输出 TP+ 和 TP- 馈送到增益为 201、具有低失调电压温漂的运算放大器。信号偏移了 V_{REF}，差分信号馈送到 MSP430I2040 通道 0 上的 24 位 ADC 进行数字化。

如图 3-1 所示，设计前端时需要计算输入范围。为涵盖随环境变化而改变的物体温度范围，假定热电堆信号 (V_{tc}) 在 -1mV 至 3mV 之间变化，如图 3-1 中的红色标识 (V_{sen}) 所示，得出方程式 1：

$$V_{tc} = -1\text{ mV to }3\text{ mV (4 mV range)} \tag{1}$$

使用 TLV2333 器件 (最大失调电压为 15 μV) 的一个通道放大此信号，增益通过方程式 2 得出：

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_3}{R_8}\right) \times V_{tc} + V_{REF1} = 201 \times V_{tc} \times V_{REF1} \tag{2}$$

该 V_{OUT} 在差分模式下发送到 ADC，如图 4-3 所示。ADC 输入将在 201 × V_{tc} (其值将为 201mV) 至 603mV 之间变化 (为获得出色性能，信号范围应在 ±928mV 内)。

系统要求输入端存在直流电压漂移，以便有足够的失调电压来获得负信号 (当环境温度高于物体温度时，热电堆输出将为负值)。这通过使用 TLV2333 的另一个通道来实现，它有两个用途。首先，它为热敏电阻电压测量提供一个缓冲器，该输出也用作热电堆测量的基准或直流失调电压。

请注意，MSP430I2040 中的 ADC 输入阻抗是 200kΩ 的阶数。典型的热敏电阻输出在 50°C 时的 35kΩ 至 0°C 时的 331kΩ 之间变化 (来自 TS318-11C55 数据表)。为了测量信号，在热敏电阻和 ADC 通道之间添加一个缓冲器是非常有必要的。

使用缓冲器后面的电阻分压器测量热敏电阻电压，此缓冲器由 TLV2333 运算放大器的第二个通道提供。方程式 3 计算 V_{REF} 范围：

$$V_{REF1} = (R_{19} + R_{NTC}) \times \frac{3.3}{R_{NTC} + R_{17} + R_{19}} \tag{3}$$

方程式 3 显示，V_{REF1} 在 383mV (R_{NTC} 35kΩ) 至 993mV (R_{NTC} 331kΩ) 之间变动。在 25°C 时 R_{NTC} 的值大约为 100kΩ，转换为 550mV 的 V_{REF1}。

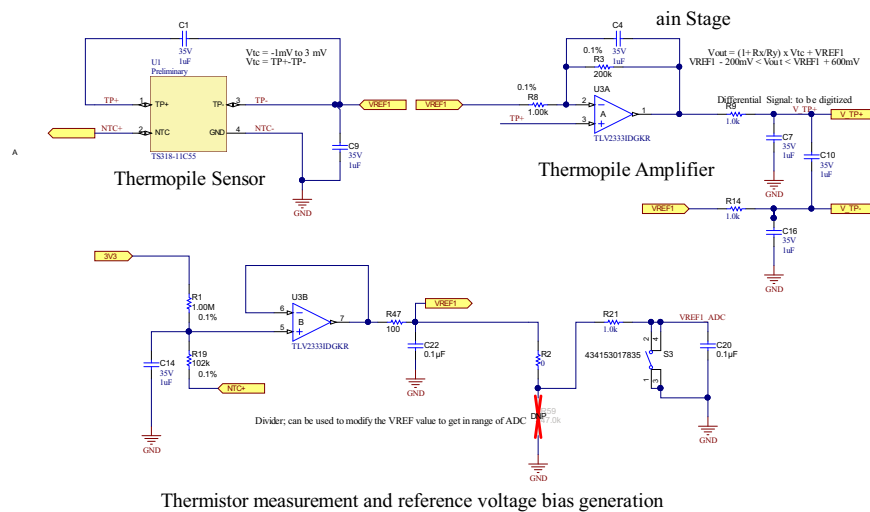


图 4-3. 低噪声弱信号链的实现

4.2 系统发电和电源管理

该系统需要一个电压可在 2V 至 3V 之间变动的电池输入源。LM66100 为该系统提供**电池反极性保护**。这个电池电压馈送到升压器件 (TPS61023)，以便生成稳定的 3.3V 系统电压。为了节省无源器件和其他器件的功耗，3.3V 由 BOOST_EN 信号来控制。如果未启用升压功能，则只有 MCU MSP430I2040 从电池获得电源，并在 LPM4.5 模式中运行。电池电压与 3.3V 进行 OR 运算，当激活该系统时，3.3V 会开始供电。

MCU 的同一个引脚类似 PWM，提供多种功能，例如启用升压功能、使用 PWM 运行蜂鸣器。请注意，峰值检测器电路在 PWM 期间使 Enable 引脚保持高电平。

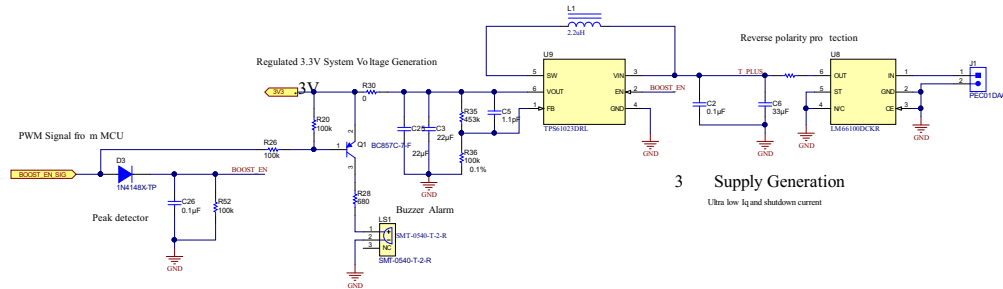


图 4-4. 系统电源管理和保护

4.3 微控制器部分和 LCD 显示屏

系统的核心是 MSP430I2040 器件，它控制多个外设，并负责电源、显示、测量、时序等综合管理事务。待机状态下的 MCU 在 LPM4.5 模式下休眠，系统消耗电流 $< 1\mu\text{A}$ 且 3.3V 电源轨关断，基本上消除了过多的功率损耗。

检测到在 P2.2 按下按钮 (S1) 之后，系统会被唤醒并为实现各种功能供电。在睡眠模式下，电池向 MCU 供电；当 3.3V 电源轨开启时，由于 ORing 二极管 D4 的作用，电源轨开始供电。图 4-5 所示为微处理器部分的原理图。

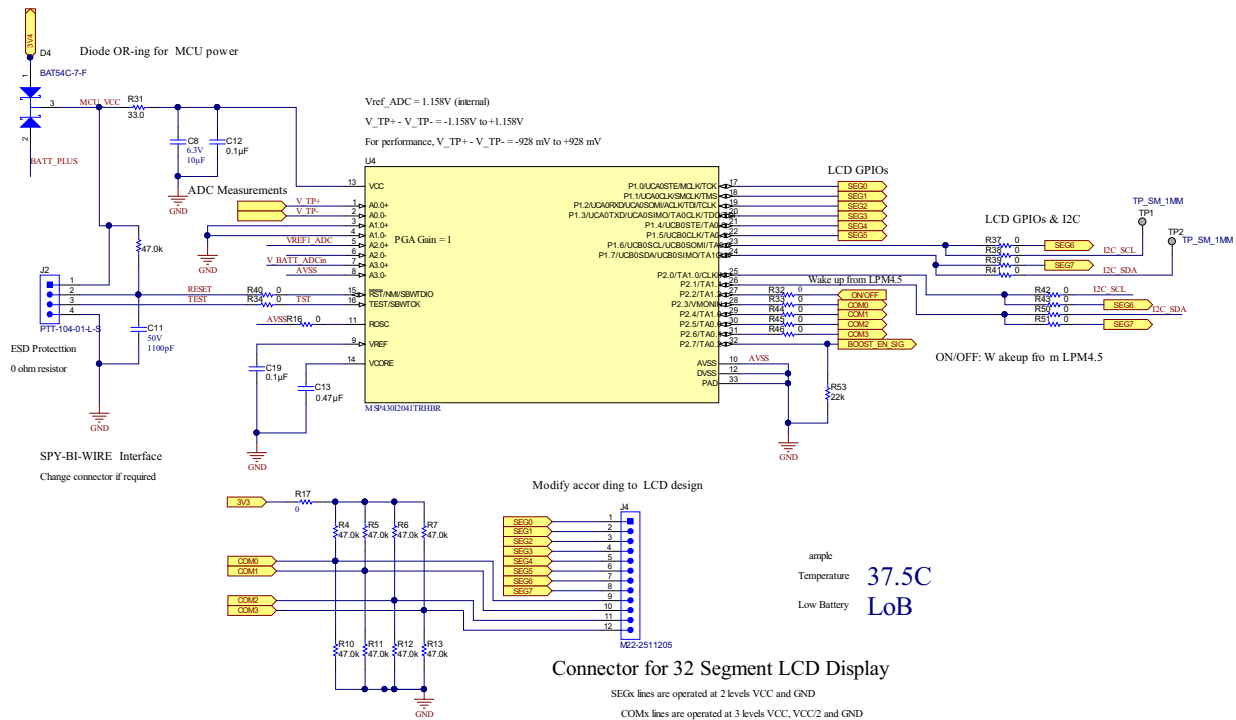


图 4-5. 微控制器部分的实现

LCD 软件：该设计使用板载 GPIO 来实现 LCD 显示功能。它有 12 个 GPIO (8 个 SEG 和 4 个 COM 引脚)，可支持多达 32 段 LCD。该实施在软件中完成，然后通过 TI 进行评估。有关类似实施的详细信息，请参阅[借助 MSP430 MCU 使用软件驱动玻璃 LCD](#)。

特别是对于使用 GPIO 驱动三分之一的偏置 LCD 的情况，TI 的 [TIDA-00848](#) 参考设计展示了一种正在申请专利的替代解决方案，可与任何没有片上显示模块的 TI MCU 配合使用。在 CC1310 无线 MCU 上使用若干电阻器和 GPIO 控制软件，实现 LCD 驱动功能。用户可使用 MSP430I2040 实现相同的架构。需要用到一个额外的 PWM 引脚。在这种情况下可使用“开/关”引脚（多用途），因为在开启后，“开/关”引脚在系统工作之时不会发挥作用。它可配置到 PWM 引脚来支持显示。如需对硬件进行小幅修改，请通过 [E2E](#) 联系 TI，了解更多详细信息。

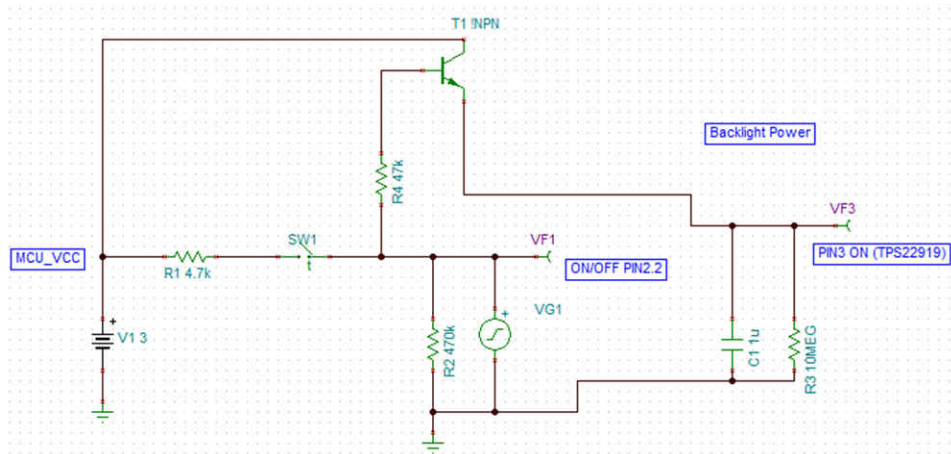


图 4-6. 使用同一个“开/关”引脚作为 PWM 输出的示例实现

4.4 上电、自动 LCD 背光电路和 EEPROM

按下 S1 按钮，进入 MSP430I2040 的引脚 2.2 时，会将系统唤醒，并且还会从 LPM 模式唤醒 MCU。负载开关 TPS22919 使背光电源和 LCD 背光同时按由 RC 网络 C17 和 R23 的时间常数设置的指定时间间隔打开。图 4-7 所示为相应的电路。

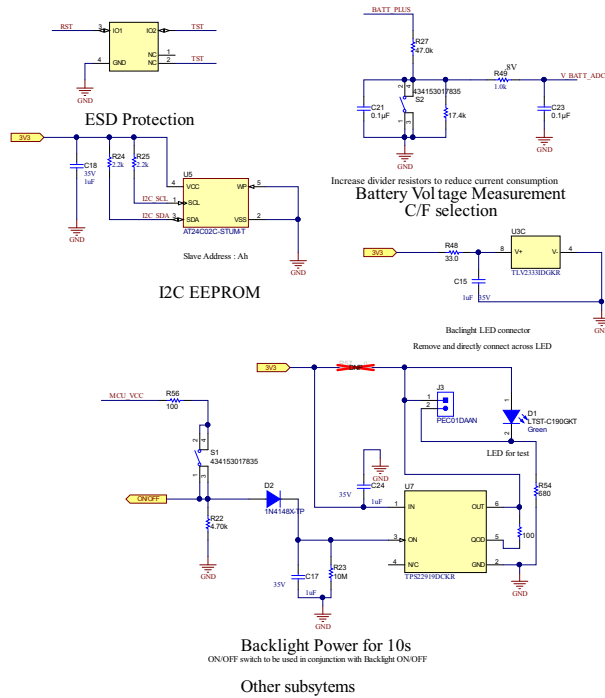


图 4-7. 接通电源/关断电源和自动 LCD 背光电路

在 ADC 的第二个通道上监测电池电压，还用作 C/F 温度显示之间的选择开关。定期对同一 ADC 通道进行采样，并使用电阻分压器网络测量按钮按下操作和电池电压。提供 I2C EEPROM (可选) 以用于存储传感器数据和其他系统参数，例如校准数据、传感器常数等。在 Spy-Bi-Wire 接口上还设置了 ESD 保护功能。

5 软件

图 5-1 展示了红外温度计设计方案中所采用代码的软件流程图。图中每个步骤都描述的直白易懂。从 <http://www.ti.com/cn/lit/zip/sboa501> 下载本应用报告中所讨论的配套资料和源代码。该软件不包括任何校准例程，该例程必须由客户自行实施。该软件为来自 TE Connectivity 的 TS-308-11C55 传感器提供了查找表，并采用非常基本的温度计算方法。

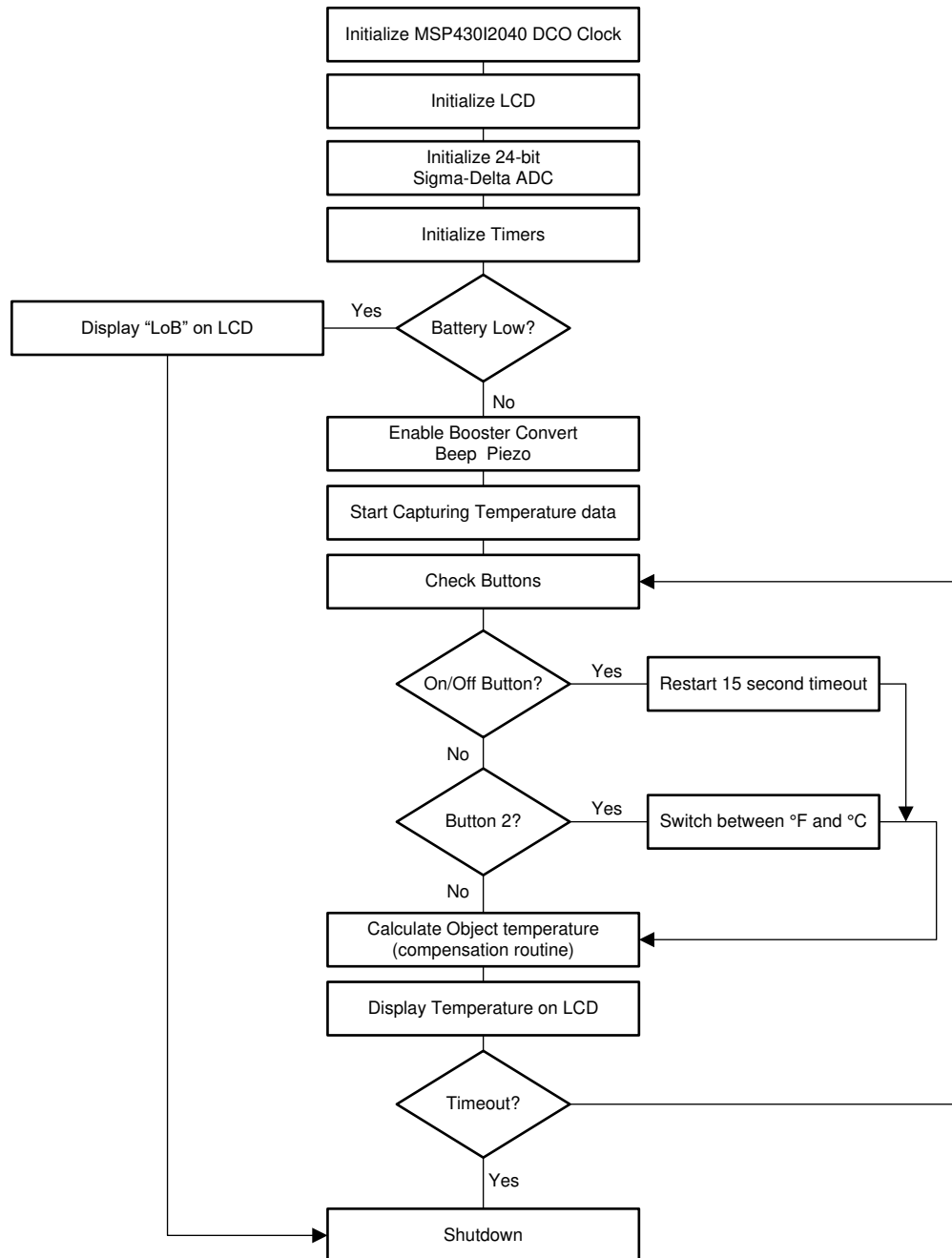


图 5-1. 软件流程图

6 测试结果

6.1 电路板图像

图 6-1 和图 6-2 展示了正面（右）和背面（左）的电路板图像，包括所安装的传感器。电路板的尺寸为 29mm × 30.84mm。

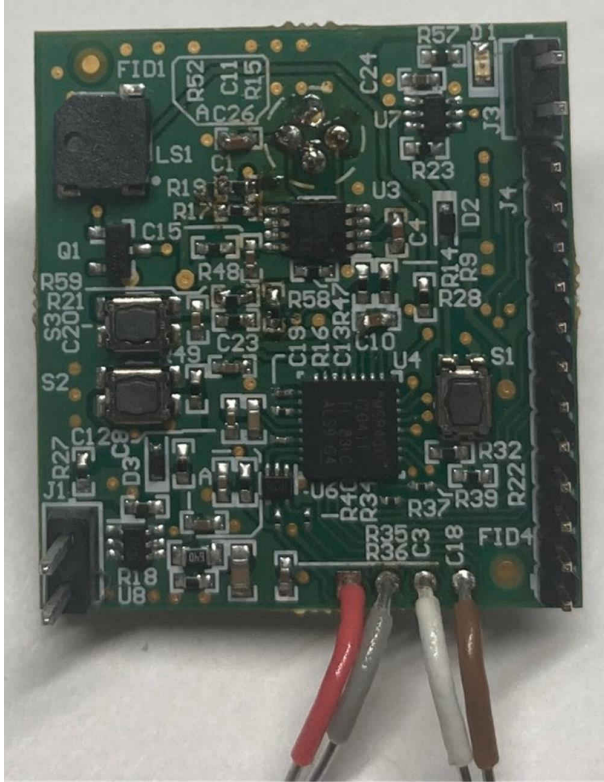


图 6-1. 正面电路板图像

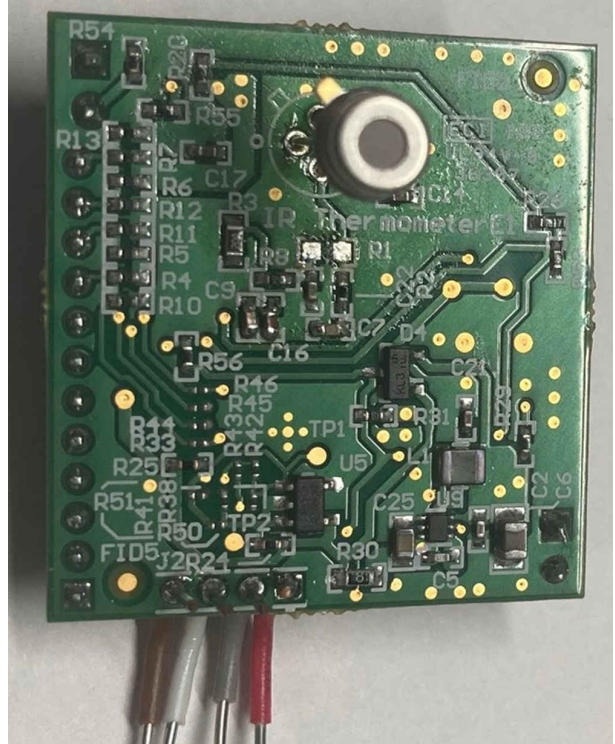


图 6-2. 背面电路板图像

6.2 用于评估温度计的测试设置

图 6-3 所示为用于评估红外温度计设计的测试设置。为了模拟放置在远处的物体，使用 Fluke 4180 IR 校准器改变物体的温度。分别使用高精度 6^{1/2} 位万用表和电压表来测量输入电流和 ADC 电压。在实验室环境温度 (19°C 至 23°C) 下进行试验

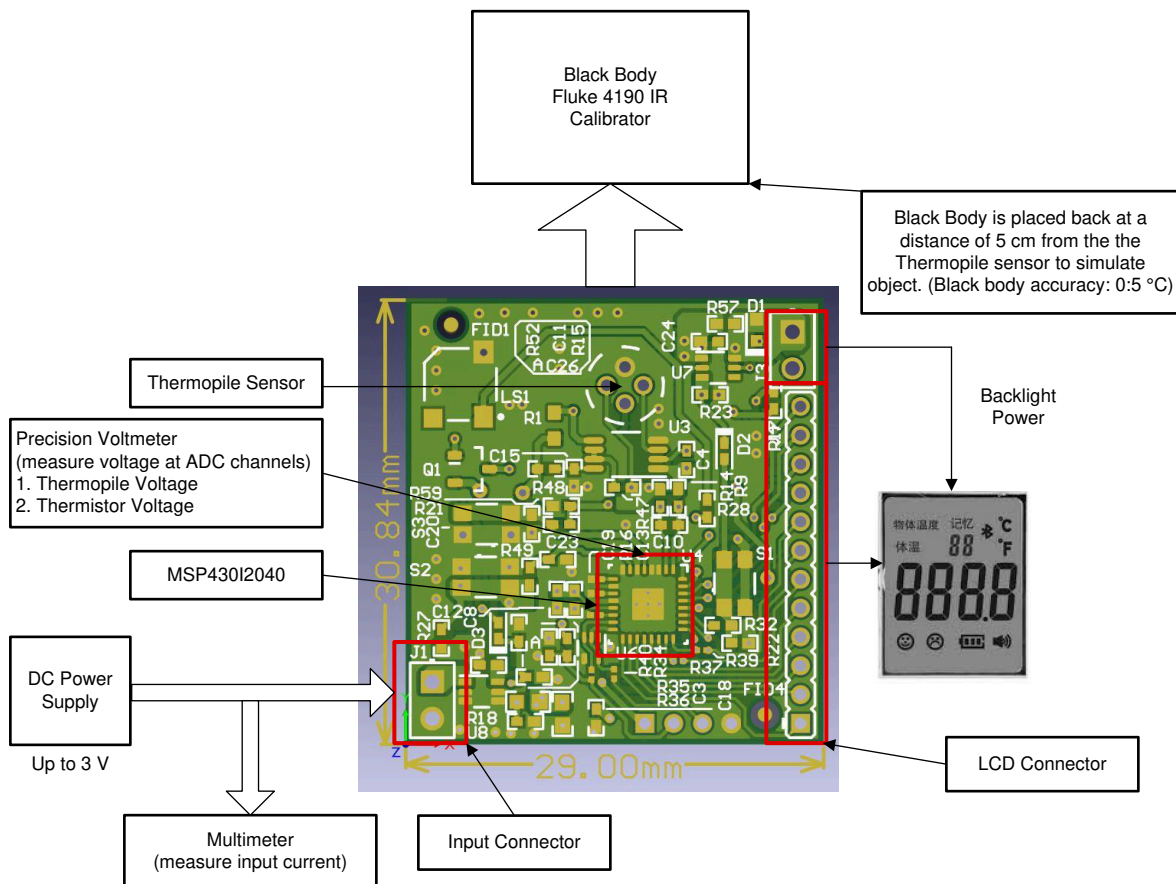


图 6-3. 用于评估温度计的测试设置

6.3 测试步骤

为了评估红外温度计电路板的性能，进行了两类测试：

1. 未安装热电堆传感器时系统中的**电噪声**
 - a. 放置一个已知的电阻器，代替热敏电阻
 - b. 放置一个高精度直流电源 (mV 的阶)，代替热电堆
2. 电路板上已安装热电堆传感器时的**热测量**，如 [测试设置](#) 部分所述

7 测试结果

7.1 电流消耗

有效电流 - 36mA (完整系统运行, 包括 LCD)

待机 - 0.1 μ A (拆下 R27), 47.6 μ A (装入 R27); 相应地调整分压器 R27 以实现所需的电流

7.2 电气噪声

表 7-1 所示为电路级测试结果, 其中不含感应信号链中低噪声的传感器。该噪声显示了最大 ADC 读数在已知热敏电阻阻值和已知热电堆输入电压 (0.1mV 至 1mV) 下的波动。

表 7-1. 系统噪声结果

噪声 (mV)	产生的温度误差 (°C)	$\pm 0.2^\circ\text{C}$ (mV) 容许的噪声
- 0.395	- 0.023	6.914

7.3 热性能测量

表 7-2 所示为在 36 °C 下收集的数据 (黑体温度)。根据 [使用热电堆传感器进行非接触式测温 - TE connectivity](#) 中描述的以下补偿值完成了以下计算。在表格中, VTP 是热电堆电压 (已获得), VNTC 是热敏电阻电压, TSEN 是环境温度, TOBJ 是计算出的物体温度。

表 7-3 所示为黑体在各种设定温度下的数据, 这些数据是在 30°C、36°C、37°C 和 40°C 下获得的。这些列显示了进行如表 7-2 所示类似实验后获得的平均值、最大值和最小值, 而最后两列显示了与平均值的偏差。

表 7-2. 36°C 下的黑体温度数据

读数	黑体设定温度	测量值			计算值		
		黑体温度	VTP (mV)	VNTC (mV)	TSEN (°C)	TOBJ (°C)	换算系数 (30/31.7)
1	36	35.7	186.58	576.17	23.79262688	38.44000253	36.13360238
2	36	35.8	185.53	576.64	23.75020865	38.32693104	36.02731518
3	36	35.7	189.4	577.53	23.6698454	38.52675126	36.21514619
4	36	35.8	187.58	577.75	23.64997237	38.37995567	36.07715833
5	36	35.5	186.6	576.96	23.72131993	38.37608767	36.07352241
6	36	35.8	187.03	576.77	23.73847341	38.42219174	36.11686024
7	36	35.8	190.28	578.34	23.59666097	38.52179452	36.21048685
8	36	35.6	189.64	578.45	23.58671905	38.46747604	36.15942748
9	36	35.7	191.22	579.76	23.46825916	38.47037531	36.16215279
10	36	35.7	189.59	578.04	23.62377713	38.49792268	36.18804732
11	36	35.7	187.31	577.02	23.71590256	38.42129665	36.11601885
12	36	35.7	188.25	577.45	23.67707117	38.45212682	36.14499921
13	36	35.7	190.51	578.23	23.60660211	38.54715792	36.23432844
14	36	35.5	187.57	578.82	23.55327225	38.29063466	35.99319658
15	36	35.8	187.66	577.81	23.64455191	38.38063967	36.07780129
16	36	35.7	190.18	577.99	23.62828912	38.54374163	36.23111713
17	36	35.8	186.46	576.69	23.74569523	38.38852466	36.08521318
18	36	35.8	188	577.74	23.65087576	38.41045416	36.10582691
19	36	35.7	187.35	577.1	23.70867902	38.41750379	36.11245356
20	36	35.8	185.93	576.07	23.80165018	38.40231967	36.09818049
21	36	35.8	183.33	574.23	23.96756299	38.37036272	36.06814096
22	36	35.8	182.54	573.53	24.52925434	38.8284961	36.49878633

表 7-2. 36°C 下的黑体温度数据 (continued)

读数	黑体设定温度	测量值			计算值		
		黑体温度	VTP (mV)	VNTC (mV)	TSEN (°C)	TOBJ (°C)	换算系数 (30/31.7)
23	36	35.7	188.45	574.98	23.89996203	38.67059541	36.35035969
24	36	35.7	186.56	576.03	23.80525932	38.45016222	36.14315249
25	36	35.7	187.51	576.27	23.78360293	38.49747329	36.18762489
26	36	35.6	191.88	577.56	23.66713562	38.69947706	36.37750843
27	36	35.8	185.19	575.51	23.85216866	38.39626997	36.09249378
28	36	35.8	188.04	576.21	23.78901738	38.53990008	36.22750608
29	36	35.8	188.98	576.62	23.75201398	38.5724176	36.25807255
30	36	35.6	190.41	578.01	23.62648201	38.55833052	36.24483069
平均	36	35.72	187.85	577.01	23.73343019	38.4755791	36.16704436

表 7-3. 黑体在各种设定温度下的数据

黑体温度	T _{OBJ} (平均值)	T _{OBJ} (最大值)	T _{OBJ} (最小值)	T _{OBJ} (最大值) - T _{OBJ} (平均值)	T _{OBJ} (最小值) - T _{OBJ} (平均值)
30	29.75545216	30.09368583	29.51515572	0.338233667	- 0.240296446
36	36.16704436	36.49878633	35.99319658	0.331741975	- 0.173847779
37	37.40582747	37.82919839	37.05760415	0.423370918	- 0.348223324
40	40.62476939	40.8565339	40.32927866	0.231764509	- 0.295490737

8 结论

根据规范，给定温度下的 Fluke BB 有 0.2°C (±0.1) 的最大偏差，我们的结果显示偏差超过了 0.5°C (最大值 - 最大值)。导致偏差大于黑体的原因可能有多种。

- 所提及的数据不包括任何传感器校准值。例如，多个点的热油浴校准可显著提高准确性。
- 传感器接收来自其他源的反射。(实验室测试无法在完全隔离的环境中进行。)

9 参考文献

- 德州仪器 (TI)，[借助 MSP430 MCU 使用软件驱动玻璃 LCD 应用报告](#)
- [使用热电堆传感器进行非接触式测温 - TE connectivity](#)

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