

TI 参考设计 用于 2 线 4 至 20mA 电流回路系统的 RTD 温度变送器

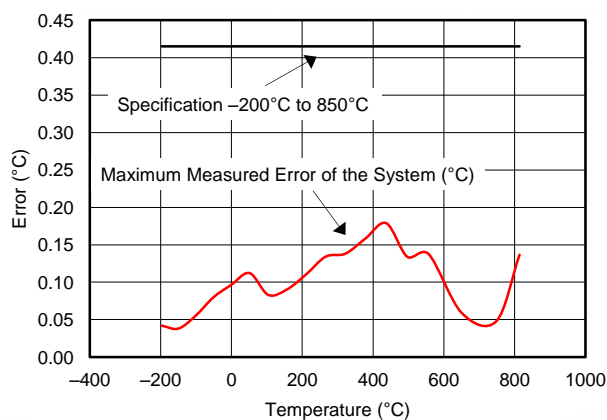


TI 参考设计

TI 参考设计为您提供所需的基础方法、测试和设计文件，以便您快速评估和定制系统。TI 参考设计可帮助您缩短产品上市时间。

设计资源

TIDA-0095	包含设计文件的工具文件夹
ADS1220	产品文件夹
DAC161S997	产品文件夹
MSP430G2513	产品文件夹
TPS7A4901	产品文件夹



设计特性

RTD 温度变送器是支持 RTD 探针的 4 至 20mA 电流回路参考设计。

- 输入与 2 线、3 线和 4 线 RTD 探针兼容
- 4 至 20mA 电流回路信号输出
- 1.4mA 的低功耗（包括 RTD 偏置电流）非常适合回路供电系统
- 输出分辨率：0.25 μ A
- 最大测量误差：0.11 $^{\circ}$ C（-200 $^{\circ}$ C 至 200 $^{\circ}$ C），0.17 $^{\circ}$ C（-200 $^{\circ}$ C 至 850 $^{\circ}$ C）

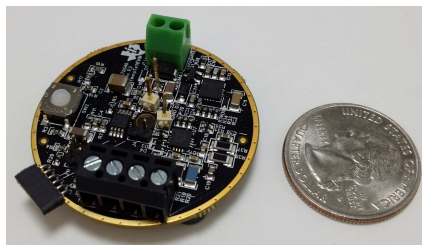
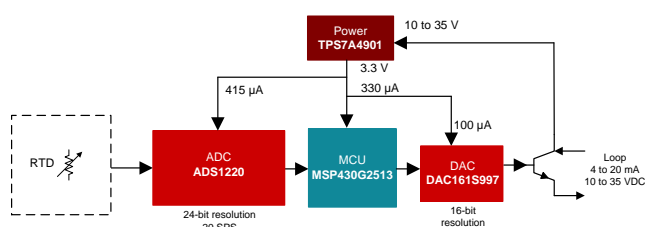
- 0.3 μ A 的电流波动从 10V 到 30V
- RTD 的温度范围为 -200 $^{\circ}$ C 至 850 $^{\circ}$ C
- IEC61000-4-2: ESD: 空气放电: \pm 8kV A 类
- IEC61000-4-4: EFT \pm 2kV A 类

特色应用

- 工厂自动化和过程控制
- 传感器和现场发送器
- 楼宇自动化
- 便携式仪表



请咨询我们的模拟产品专家
[WebBench™ 计算器工具](#)



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

WebBench is a trademark of Texas Instruments.
All other trademarks are the property of their respective owners.

1 主要系统技术规格

参数	技术规格与特性		详细信息
探针类型	2 线、3 线和 4 线 RTD MSP430 软件默认支持 PT-100 RTD		请参见 5.3 节
输出信号	4 至 20mA		请参见 表 8
RTD 的温度范围	-200°C 至 850°C		请参见 图 47
电源范围	10 至 35V DC		请参见 7 节
误差电流	低: 3.375mA (典型值) 高: 21.75mA (典型值)		请参见 图 23
回路功耗	1.4mA (典型值) 的 DAC、ADC、MSP 和 LDO 电流, 包括 500µA 的 RTD 偏置电流		请参见 6.9 节
对输入电源的反极性保护	支持		请参见 4.9 节 和 6.8 节
环境温度	-40°C 至 85°C		请参见 8 节
输入分辨率	0.029°C (模拟前端的无噪声分辨率) ADS1220: PGA 增益 = 16, $V_{REF} = 1.62V$ 采样率: 每秒 20 次采样 (SPS)		请参见 6.2 节
输出分辨率	0.25µA		请参见 6.4 节
系统精度或最大测量误差	0.11°C (-200°C 至 200°C) 0.17°C (-200°C 至 850°C)		请参见 6.6 节
电源影响	0.3µA 的偏差从 10V 至 30V		请参见 6.7 节
对回路电源的 IEC ESD 保护	IEC61000-4-2, ESD	水平耦合板	请参见 4.11 节 和 6.10 节
		垂直耦合板: ±4kV - A 类	
		空气放电: ±8kV — A 类	
对回路电源的 IEC EFT 保护	IEC 61000-4-4	EFT: ±2kV — A 类	
校准	ADC	偏移和增益校准	请参见 4.6 节 和 4.7 节
	DAC		
RTD 非线性	MSP430 软件中实现了分辨率为 1°C 的 -200°C 至 850°C 查找表, 用于解决电阻与温度之间的 RTD 或 Callendar-Van Dusen 关系的非线性问题。		请参见 4.2 节
连接接口	UART, 通过 USB 转 UART 软件狗		请参见 图 24
外形	1.588 英寸直径, 圆形电路板		请参见 图 61

2 系统描述

此全面设计提供完整的系统，可测量和处理来自 2 线、3 线和 4 线电阻式温度检测器 (RTD) 的温度信号输入，并输出与来自 RTD 输入的所处理的温度相对应的 4 至 20mA 电流回路信号（请参见图 1）。本参考设计用于工厂自动化、现场发送器和楼宇自动化中的过程测量应用。本设计在 -200°C 至 850°C 范围内的最大测量误差低于 0.17°C ，具有 1.4mA （典型值，包括 RTD 偏置电流）的极低回路功耗并经过 IEC61000 预认证测试，可显著缩短高精度温度变送器系统开发的设计时间。本设计还具有系统级偏移和增益校准，以提高 ADC 和 DAC 精度。本设计还包括线性插值以解决 RTD 元件的非线性。本参考设计提供了全面的设计指南，适用于采用小型工业封装的电流输出为 4 至 20mA 的温度变送器的硬件和软件设计（请参见图 57）。设计文件包括原理图、物料清单 (BOM)、板层图、Altium 文件、光绘文件和 MSP430 软件。

本设计的整体系统级要求为：系统必须执行精确的比例式 RTD 测量（电流回路精度为 4 至 20mA）以满足整体系统误差规范；系统在 -200°C 和 850°C 之间的最大测量误差必须低于大约 0.4°C ；系统的低静态电流必须满足低于 3.5mA 的系统报警要求；整体外形小巧；低成本和低功耗的处理器，能够执行 ADC 和 DAC 的增益和偏移校准，以及使用 RTD 查找表进行线性插值。为了将上述要求转换为子系统级要求，下面列出了 ADC、DAC、处理器和电源管理的要求。

ADC

- 带电流激励和缓冲参考输入的 ADC，用于实现比例式测量
- 低功耗，以满足回路功耗要求
- 低噪声、高输入阻抗 PGA
- 小型封装，以适合设计的尺寸
- 同时进行 50Hz 和 60Hz 抑制，以过滤市电电源中的噪声
- 目标分辨率的 10 倍低于在 -200°C 和 850°C 之间的整体系统精度 0.4°C
选择具有 24 位 $\Sigma\text{-}\Delta$ ADC 的 ADS1220 器件是因为该器件满足有关 ADC 子系统的指定要求。

DAC

- 数字输入转模拟输出，支持 4 至 20mA 电流回路
- 目标分辨率的 10 倍低于在 -200°C 和 850°C 之间的整体系统精度 0.4°C
- 小型封装，以适合设计的尺寸
- 与 ADC 相似的 MCU 控制接口
选择具有 16 位分辨率的 DAC161S997 器件是因为该器件满足有关 DAC 子系统的指定要求。

处理器

- 浮点数学运算，以实现所有涉及增益和偏移校准的计算
- 16k 闪存，以支持浮点数学运算以及 PT-100 查找表
- UART 接口，用于 COM 端口通信以进行调试
- SPI 接口或等效接口，用于与 ADC 和 DAC 通信
- 低成本且低功耗
选择超值系列 MSP430 器件是为了满足总体低成本设计。选择 16k 闪存选件是为了满足列出的处理器要求。

电源管理

- 从 10 至 35V 电源生成 3.3V 标称值
- 高电源抑制比 (PSRR)、低噪声，以将电源对系统精度的影响保持在较低限度
- 小尺寸

- 选择低压降 (LDO) 稳压器时 θ_{JA} 低, 以确保应用中不超过结温
选择 TPS7A4901 器件 (LDO) 是因为该器件满足有关电源管理的指定要求。

本设计中的高度集成的器件提供了 4 芯片系统解决方案。德州仪器 (TI) 的模数转换器 (ADC) 器件 ADS1220 (请参见图 2) 与 2 线、3 线或 4 线 RTD 探针和 MSP430™ 微控制器相连接 (请参见图 4)。微控制器 (MCU) 运行应用程序软件, 其中包括系统校准算法 (请参见 4.6 节、4.7 节和 4.2 节)。输出由 TI 的 DAC 器件 DAC161S997 控制 (请参见图 3), 该器件与 MSP430 相连接, 并提供与 RTD 温度读数成比例的 4 至 20mA 输出电流 (请参见图 45)。TI 的低压降 (LDO) 稳压器器件 TPS7A4901 为系统供电 (请参见图 5)。TPS7A4901 器件的输入电压范围为 3 至 36V, 具有非常低的噪声 ($15.4\mu V_{RMS}$, 72dB PSRR) 和高散热性能。本设计还集成了反极性保护功能以及对环路电源输入的 IEC61000-4-2 和 IEC61000-4-4 保护。

2.1 ADS1220

ADS1220 器件 (也称为 ADC) 是一款精密的 24 位模数转换器 (ADC), 所集成的多种特性能够降低系统成本并减少小型传感器信号测量应用中的组件数量。该器件具有通过灵活的输入复用器 (mux) 实现的两个差分输入或四个单端输入, 一个低噪声可编程增益放大器 (PGA), 两个可编程激励电流源, 一个电压基准, 一个振荡器, 一个低侧开关和一个精密温度传感器。

该器件以高达 2000 次/秒 (SPS) 的采样数据速率执行转换, 并且在单周期内稳定。针对噪声环境中的工业应用, 当采样频率为 20SPS 时, 数字滤波器可同时提供 50Hz 和 60Hz 抑制。内部 PGA 提供高达 128V/V 的增益。此 PGA 使得 ADS1220 非常适用于小型传感器信号测量应用, 例如电阻式温度检测器 (RTD)、热电偶、热敏电阻和桥式传感器。该器件在使用 PGA 时支持测量伪差分或全差分信号。此外, 该器件还可配置为绕过内部 PGA, 同时仍提供高输入阻抗和高达 4V/V 的增益, 从而实现单端测量。

在禁用 PGA 后的占空比模式下运行功耗可低至 $120\mu A$ 。通过模式 1 SPI 兼容接口建立与器件之间的通信。ADS1220 器件采用无引线 QFN-16 或 TSSOP-16 封装, 额定工作温度范围为 $-40^{\circ}C$ 至 $125^{\circ}C$ 。ADS1220 的方框图请参见图 2。

2.2 DAC161S997

DAC161S997 器件 (也称为 DAC) 是一款超低功耗的 16 位 Σ - Δ 数模转换器 (DAC), 可在符合工业标准的 4 至 20mA 电流回路中发送模拟输出电流。DAC161S997 器件具有一个简单的四线制串行外设接口 (SPI), 可用于数据传输和 DAC 功能配置。为减少紧凑型回路供电应用的功耗和元件数量, DAC161S997 器件采用了内部超低功耗基准电压和内部振荡器。DAC161S997 器件功耗低, 因此有额外的电流可用于系统的其余部分。DAC161S997 器件的回路驱动器可连接可寻址远程转换器高速通道 (HART) 调制器, 从而将采用频移键控 (FSK) 调制的数字数据注入 4 至 20mA 电流回路。这个技术规范和特性的组合使得 DAC161S997 器件成为 2 线制和 4 线制工业发送器的理想选择。DAC161S997 采用 16 引脚 4mm x 4mm 超薄型四方扁平无引线 (WQFN) 封装, 并且在 $-40^{\circ}C$ 至 $105^{\circ}C$ 的扩展工业温度范围内额定运行。DAC161S997 的方框图请参见图 3。

2.3 MSP430G2513

德州仪器 (TI) MSP430 系列超低功耗微控制器包含几个器件, 这些器件特有面向多种应用的不同外设集。此架构, 与 5 种低功耗模式配合使用, 是在便携式测量应用中实现延长电池寿命的最优选择。该器件具有一个强大的 16 位 RISC CPU, 16 位寄存器和有助于获得最大编码效率的常数发生器。数字控制振荡器 (DCO) 可在不到 $1\mu s$ 的时间里完成从低功耗模式至工作模式的唤醒。

MSP430G2513 器件是一款超低功耗混合信号微控制器, 具有内置 16 位定时器、内置通信功能 (使用通用串行通信接口支持) 以及多用途模拟比较器。

典型应用包括低成本传感器系统，此类系统负责捕捉模拟信号，将之转换为数字值，随后对数据进行处理以进行显示或传送至一个主机系统。MSP430G2513 的方框图请参见图 4。

2.4 TPS7A4901

TPS7A4901 器件（也称为 LDO）是一款正向高电压 (36V)、超低噪声 ($15.4\mu\text{V}_{\text{RMS}}$, 72dB PSRR) 线性稳压器，能够提供 150mA 的负载供电。

该线性稳压器包括一个 CMOS 逻辑电平兼容的使能引脚，以及允许自定义功耗管理方案的可编程电容软启动功能。其他特性包括内置电流限制和热关断保护，以在故障情况下保护器件和系统。

TPS7A49xx 系列使用双极技术设计，适合于高准确度、高精度测量仪器应用，此类应用中干净的电压轨对于系统性能的最大化至关重要。此设计使得该器件非常适合为运算放大器、模数转换器 (ADC)、数模转换器 (DAC) 和其他高性能模拟电路供电。

此外，TPS7A49xx 系列线性稳压器还适用于后置 dc/dc 转换器稳压。通过滤除 dc/dc 开关转换所固有的输出电压纹波，在灵敏仪器仪表、测试和测量、音频以及 RF 应用中提供了最大化的系统性能。TPS7A4901 的方框图请参见图 5。

3 方框图

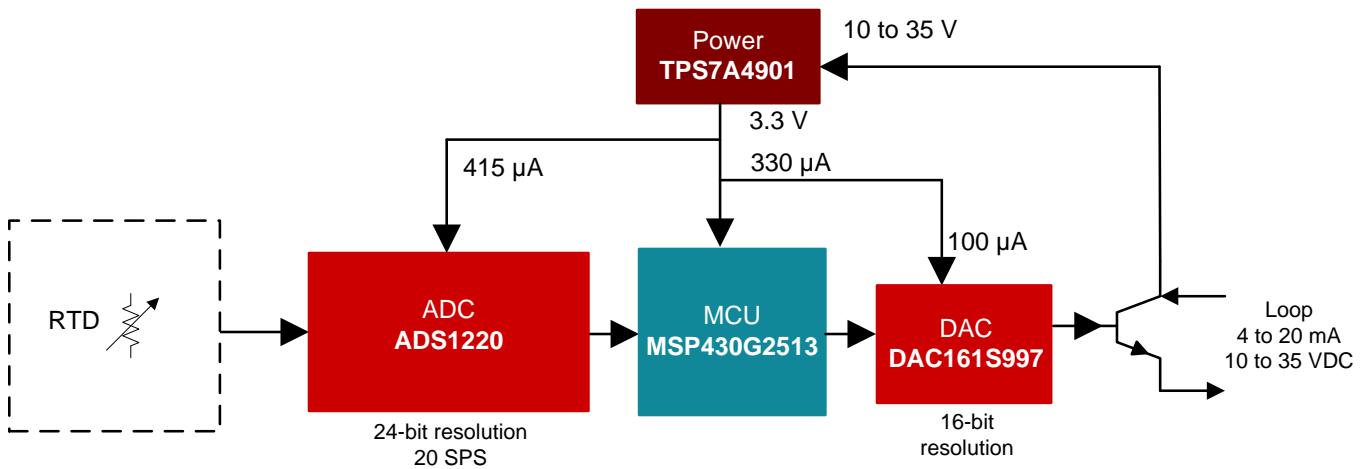


图 1. 温度变送器系统方框图

3.1 重点产品

RTD 温度变送器参考设计具有以下器件：

- ADS1220
 - 用于小信号传感器的低功耗、低噪声、24 位模数转换器
- DAC161S997
 - 适用于 4 至 20mA 回路的 SPI 16 位精密 DAC
- MSP430G2513
 - MSP430G2513 混合信号微控制器
- TPS7A4901
 - V_i 3V 至 36V、150mA、超低噪声、高 PSRR、低压降线性稳压器

有关每种器件的更多信息，请参见 [www.TI.com](http://www.ti.com) 上相应的产品文件夹。

3.1.1 ADS1220

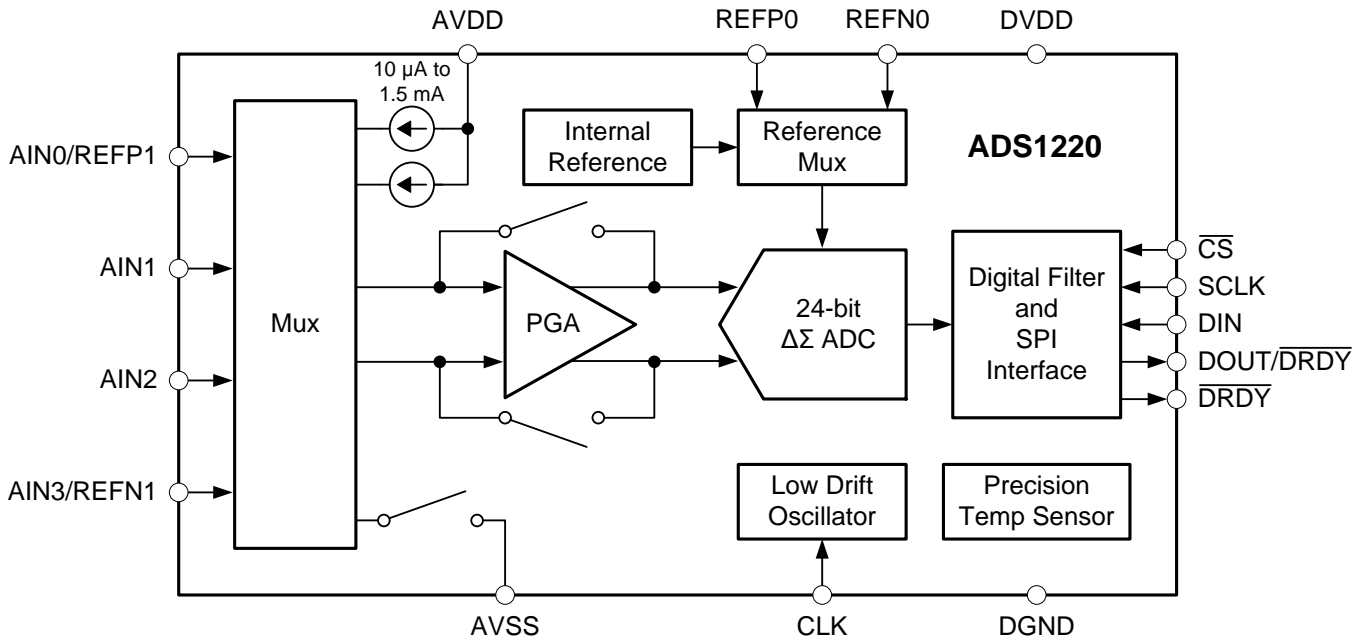


图 2. ADS1220 方框图

- 低功耗：
 - 占空比模式：120μA
 - 正常模式：415μA
- 宽电源范围：2.3V 至 5.5V
- 可编程增益：1V/V 至 128V/V
- 可编程数据速率：高达 2kSPS
- 在 20SPS 同时进行 50Hz 和 60Hz 抑制，采用单周期稳定数字滤波器
- 低噪声 PGA：20SPS 时为 90nV_{RMS}
- 双匹配可编程电流源：10μA 至 1500μA
- 内部 2.048V 基准电压：5ppm/°C（典型值）漂移
- 内部振荡器：2%（最大）的精度
- 内部温度传感器
- 两个差分输入或四个单端输入
- SPI™ 兼容接口
- 封装：3.5mm × 3.5mm × 0.9mm QFN

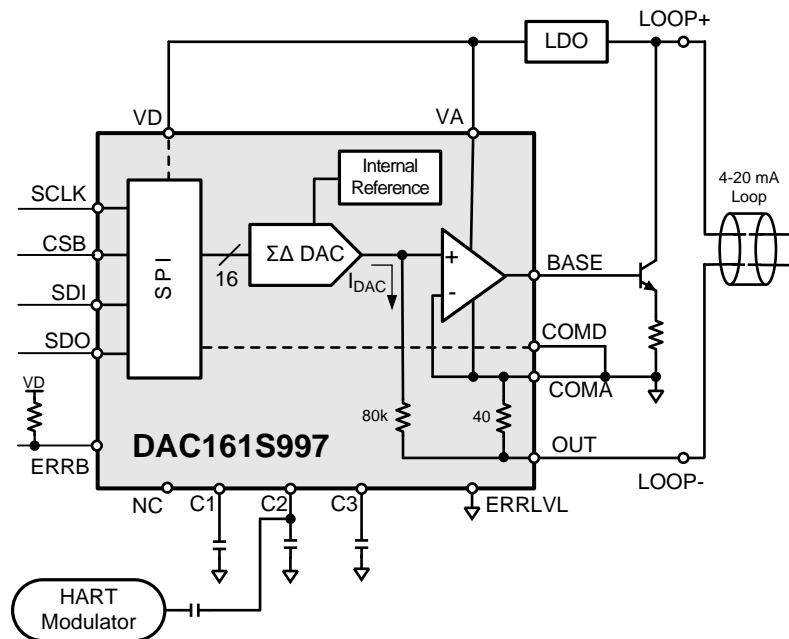
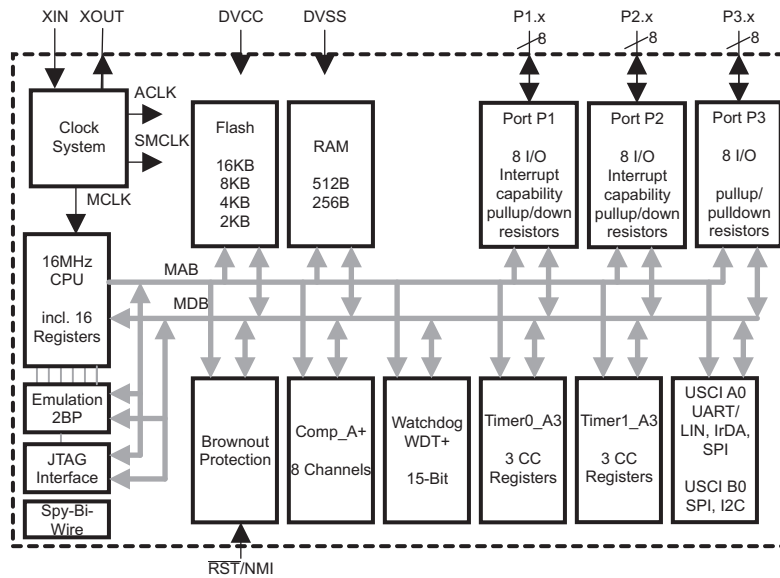
3.1.2 DAC161S997


图 3. DAC161S997 方框图

- 16 位分辨率
- 100 μ A 超低电源电流
- 5ppmFS/ $^{\circ}$ C 增益误差
- 引脚可编程上电条件
- 回路误差检测和报告
- 可编程输出电流误差等级
- 可轻松连接 HART 调制器
- 高度集成的功能集，采用小型 WQFN-16 封装（4mm x 4mm，0.5mm 间距）

3.1.3 MSP430G2513

图 4. MSP430G2513 方框图

- 低电源电压范围：1.8V 至 3.6V
- 超低功耗
 - 工作模式：230 μ A（在 1MHz 频率和 2.2V 电压条件下）
 - 待机模式：0.5 μ A
 - 关断模式（RAM 保持）：0.1 μ A
- 五种节能模式
- 可在不到 1 μ s 的时间里超快速地从待机模式唤醒
- 16 位精简指令集计算机 (RISC) 架构，62.5ns 指令周期
- 基本时钟模块配置
 - 带有四个校准频率且高达 16MHz 的内部频率
 - 内部超低功率低频 (LF) 振荡器
 - 32kHz 晶振
 - 外部数字时钟源
- 2 个 16 位 Timer_A，具有 3 个捕捉和比较寄存器
- 多达 24 个电容式触摸使能 I/O 引脚
- 通用串行通信接口 (USCI)
 - 支持自动波特率侦测 (LIN) 的增强型 UART
 - 红外数据通讯 (IrDA) 编码器和解码器
 - 同步 SPI
 - I²C
- 用于模拟信号比较功能或斜率模数 (A-D) 转换的片上比较器
- 带内部基准、采样与保持以及自动扫描功能的 10 位 200kps 模数 (A-D) 转换器

- 欠压检测器
- 串行板上编程、无需外部编程电压、由安全熔丝实现的可编程代码保护
- 具有 Spy-Bi-Wire 接口的片上仿真逻辑电路
- 封装选项：
 - 薄型小外形尺寸封装 (TSSOP): 20 引脚, 28 引脚
 - 塑料双列直插式封装 (PDIP): 20 引脚
 - 四方扁平无引线封装 (QFN): 32 引脚
- 如需了解完整的模块说明, 请参见《MSP430x2xx 系列用户指南》(SLAU144)

3.1.4 TPS7A4901

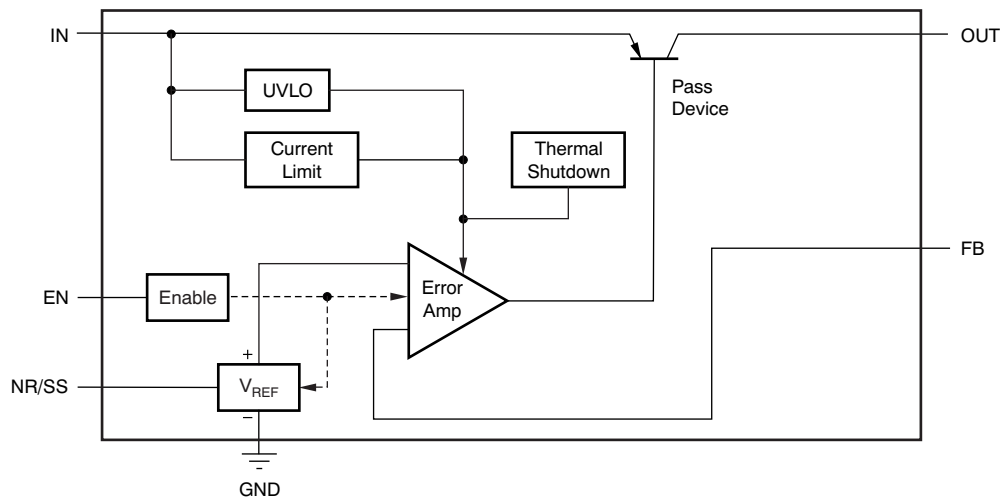


图 5. TPS7A4901 方框图

- 输入电压范围: 3V 至 36V
- 噪声:
 - $12.7\mu\text{V}_{\text{RMS}}$ (20Hz 至 20kHz)
 - $15.4\mu\text{V}_{\text{RMS}}$ (10Hz 至 100kHz)
- 电源纹波抑制:
 - 72dB (120Hz)
 - $\geq 52\text{dB}$ (10Hz 至 400kHz)
- 可调节输出: 1.194V 至 33V
- 输出电流: 150mA
- 压降: 260mV (100mA)
- 与电容值 $\geq 2.2\mu\text{F}$ 的陶瓷电容一起工作时保持稳定
- CMOS 逻辑电平兼容的使能引脚
- 内置固定电流限制和热关断保护
- 提供高导热性能 MSOP-8 PowerPAD™ 封装
- 工作温度范围: -40°C 至 125°C

4 系统设计原理

4.1 RTD 概述

电阻式温度检测器 (RTD) 是由电阻特性随温度变化的情况可预测的金属制成的传感元件。因此可通过测量电阻来计算 RTD 的温度。RTD 传感器具有宽温度范围、良好的线性度以及出色的长期稳定性和可重复性，这使得 RTD 传感器适合多种精密应用。

RTD 的电阻与温度之间的关系通过 Callendar-Van Dusen (CVD) 公式定义（请参见4.2 节）。

大多数 RTD 应用使用电流源作为 RTD 元件的激励源。通过驱动已知电流穿过 RTD，将产生与 RTD 的电阻和激励电流成比例的电势。此电势经过放大，然后馈入 ADC 的输入，ADC 将电压转换为可用于计算 RTD 电阻的数字输出代码。

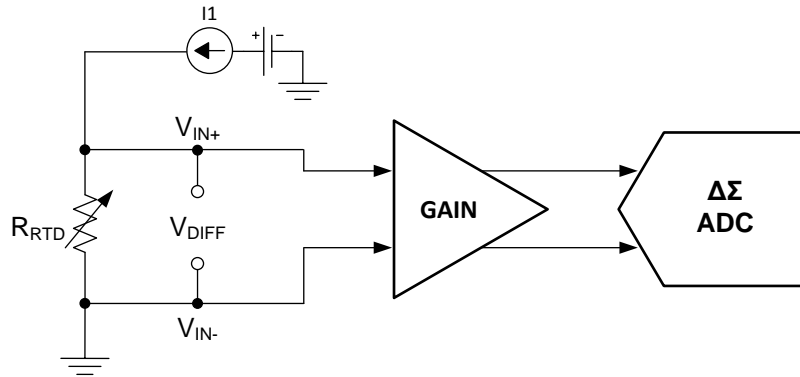


图 6. 简化的 RTD 应用

4.2 Callendar-Van Dusen 公式

4.2.1 PT-100 RTD 信息

PT-100 RTD 是基于铂的 RTD 传感器。铂是一种贵金属，在宽广的温度范围内具有出色的性能。铂在常用的 RTD 材料中具有最高的电阻率，只需很少材料即可产生所需的电阻值。PT-100 RTD 在 0°C 时的阻抗为 100Ω，温度每变化 1°C，阻抗变化大约 0.385Ω。在 -200°C 时阻抗为 18.52Ω，在 850°C 时为 390.481Ω。电阻值更高的传感器（如 PT-1000 或 PT-5000）可用于提高灵敏度和分辨率。

A 类 RTD 非常适合于此应用，可提供良好的预校准精度和长期稳定性。A 类 RTD 在 100°C 无校准情况下的误差小于 0.5°C，其长期稳定性使得无需频繁进行准确校准。表 1 显示了五个主要类别的 RTD 在 100°C 时的容差、初始精度和产生的误差。

表 1. RTD 类别容差信息

容差类别 (DIN-IEC 60751)	容差值 (°C)	0°C 时的电阻 (Ω)	100°C 时的误差 (°C)
AAA ⁽¹⁾	± (0.03 + 0.0005 × T)	100 ± 0.012	± 0.08
AA	± (0.01 + 0.0017 × T)	100 ± 0.04	± 0.27
A	± (0.15 + 0.002 × T)	100 ± 0.06	± 0.35
B	± (0.3 + 0.005 × T)	100 ± 0.12	± 0.8
C	± (0.6 + 0.01 × T)	100 ± 0.24	± 1.6

⁽¹⁾ AAA 未包括在 DIN-IEC 60751 规范中，但它是对性能有严格要求的应用的行业公认容差。

对于正温度，CVD 公式是一个二阶多项式，如公式 1 所示。

$$RTD(T) = R_0 \times [1 + A(T) + B(T)^2] \quad (1)$$

对于 -200°C 至 0°C 的负温度，CVD 公式扩展为四阶多项式，如公式 2 所示。

$$RTD(T) = R_0 \times [1 + A(T) + B(T)^2 + C(T)^3 \times (T - 100)] \quad (2)$$

Callendar-Van Dusen 公式中的系数由 IEC-60751 标准定义。 R_0 是 RTD 在 0°C 时的电阻。对于 alpha (α) 为 0.00385 的 PT-100 RTD，系数如公式 3 所示。

$$R_0 = 100 \Omega$$

$$A = 3.9083 \times 10^{-3} {}^{\circ}\text{C}$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7} {}^{\circ}\text{C}$$

$$C = -4.183 \times 10^{-12} {}^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

PT-100 RTD 从 -200°C 至 850°C 的电阻变化如图 7 所示。

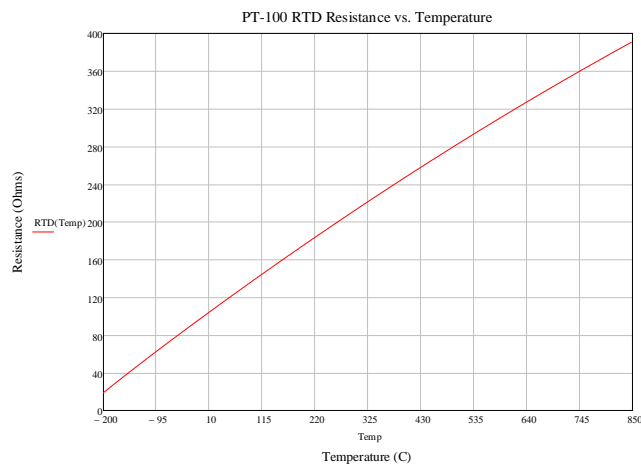


图 7. PT-100 RTD 从 -200°C 至 850°C 的电阻

虽然 RTD 电阻在较小温度范围内的变化相对线性，但图 8 给出了按照图 7 所示的曲线进行端点拟合时产生的非线性。结果表明有大约 0.375% 的非线性，说明了数字校准的必要性。

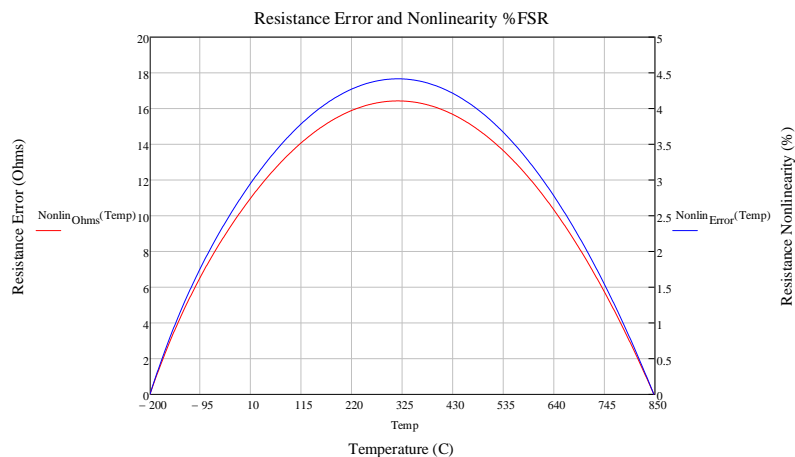


图 8. PT-100 RTD 从 -200°C 至 850°C 的非线性

在本参考设计中，使用分辨率为 1°C 的 PT-100 的查找表（请参见图 32 和图 33）进行线性插值。RTD 值在偏移和增益校准后进行计算。然后在涉及 PT-100 表中两个附近点的线段的线性插值中使用该 RTD 值。如果需要更高精度，可以将具有更多点的表（分辨率小于 1°C 或具有更精确的曲线拟合）存储为查找参考表。

4.3 ADC RTD 测量

ADS1220 器件集成了所有必需功能（如双匹配可编程电流源、缓冲参考输入和 PGA）来简化比例式 2 线、3 线和 4 线 RTD 测量的实现。

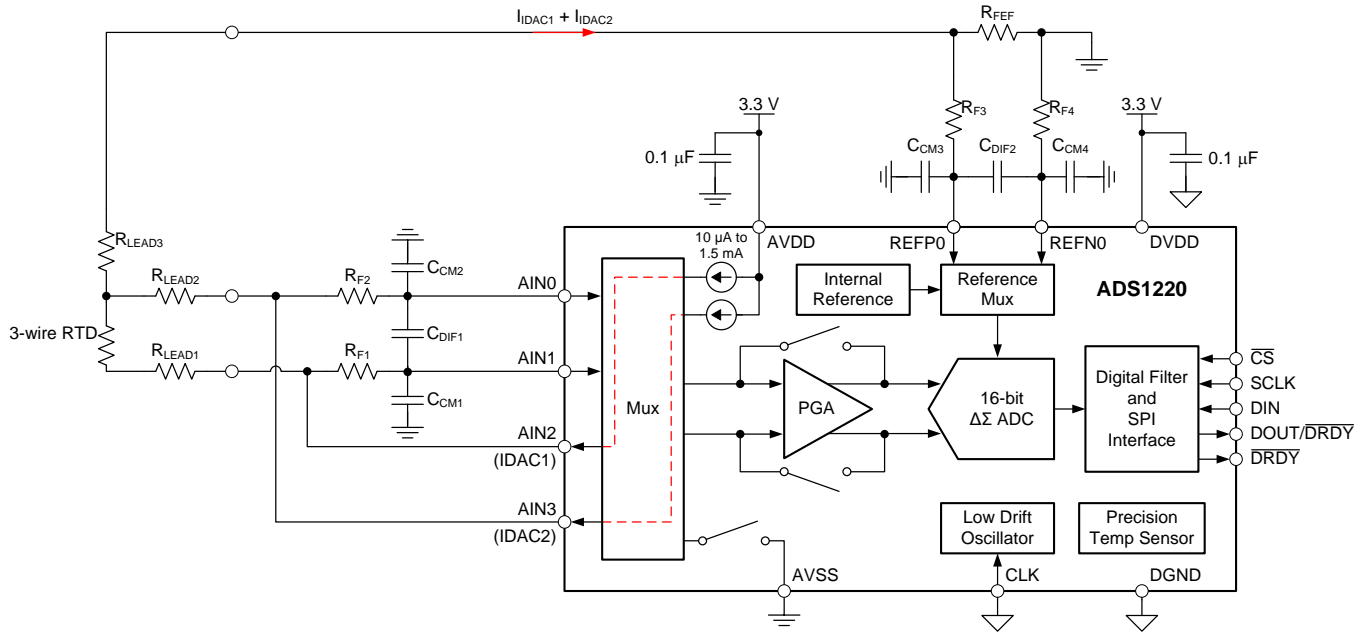


图 9.3 线 RTD 测量

图 9 中的电路采用了比例式测量方法。换句话说，传感器信号（RTD 两端的电压）和 ADC 的参考电压来自同一个激励源。因此，温度漂移或噪声产生的误差可以抵消，因为这些误差对于传感器信号和参考电压而言是共同的误差。

为了使用 ADS1220 器件实现比例式 3 线 RTD 测量，将 IDAC1 路由到 RTD 的其中一条激励引线，同时将 IDAC2 路由到第二条激励引线。这两个电流的值相同，该值可通过配置寄存器的 IDAC[2:0] 位编程。ADS1220 器件的设计确保两个 IDAC 值紧密匹配，即使在温度范围内也是如此。两个电流合并流经低漂移参考电阻 R_{REF} 。该参考电阻两端产生的电压 V_{REF} 如公式 4 所示。由于 $IDAC1 = IDAC2$ ，因此随后使用公式 5 作为 ADC 参考电压。

$$V_{REF} = (I_{DAC1} + I_{DAC2}) \times R_{REF} \quad (4)$$

$$V_{REF} = 2 \times I_{DAC1} \times R_{REF}$$

- I_{DAC1} 和 I_{DAC2} 基于默认软件：250µA, $R_{REF} = 3.24k\Omega$
- $V_{REF} = 1.62V$

$$(5)$$

公式 6 表示 RTD 的各个引线电阻值 (R_{LEADx}) 为零的时刻。只有 IDAC1 激励 RTD 生成电压 V_{RTD} ，该电压与依赖温度的 RTD 值和 IDAC1 值成比例。

$$V_{RTD} = R_{RTD}(\text{温度}) \times I_{IDAC1} \quad (6)$$

ADS1220 器件内部使用 PGA 放大 RTD 两端的电压，并将生成的电压与参考电压进行比较以生成与公式 7 和公式 9 成比例的数字输出代码。

$$\text{Code} \propto V_{RTD} \times \text{PGA} / V_{REF} \quad (7)$$

$$\text{Code} \propto (R_{\text{RTD}} [\text{温度}] \times I_{\text{IDAC1}} \times \text{PGA}) / (2 \times \text{IDAC1} \times R_{\text{REF}}) \quad (8)$$

$$\text{Code} \propto (R_{\text{RTD}} [\text{温度}] \times \text{PGA}) / (2 \times R_{\text{REF}}) \quad (9)$$

如公式 9 所示，输出代码仅取决于 RTD 的值、PGA 增益和参考电阻 (R_{REF})，而不取决于 IDAC1 值。因此，激励电流的绝对精度和温度漂移无关紧要。但是，由于参考电阻的值直接影响测量结果，因此要限制 R_{REF} 的温度漂移所引入的误差，选择温度系数非常低的参考电阻非常重要。

第二个 IDAC2 用于补偿 RTD 的引线电阻两端的电压降所引入的误差。3 线 RTD 的全部三条引线通常长度相同，因此引线电阻也相同。此外，IDAC1 和 IDAC2 的值也相同。因此，ADC 输入 AIN0 和 AIN1 之间的差分电压 (V_{IN}) 如公式 10 所示。

$$V_{\text{IN}} = V_{\text{AIN0}} - V_{\text{AIN1}} = I_{\text{IDAC1}} \times (R_{\text{RTD}} + R_{\text{LEAD1}}) - I_{\text{IDAC2}} \times R_{\text{LEAD2}} \quad (10)$$

当 $R_{\text{LEAD1}} = R_{\text{LEAD2}}$ 且 $I_{\text{IDAC1}} = I_{\text{IDAC2}}$ 时，公式 10 简化为公式 11。

$$V_{\text{IN}} = I_{\text{IDAC1}} \times R_{\text{RTD}} \quad (11)$$

换句话说，只要 RTD 引线电阻值和 IDAC 值良好匹配，引线电阻上的电压降所产生的测量误差就会被补偿。

实现 2 线或 4 线 RTD 测量与 4.3 节所示的 3 线 RTD 测量非常相似，除了只需要一个 IDAC。有关 MSP430 软件中实现的 ADC 代码到 RTD 的转换，请参见图 34。

4.4 ADC 输入和参考低通滤波器

在输入和参考路径使用差模和共模低通滤波器可改进激励和环境噪声的消除。

注：两个差分滤波器的角频率必须良好匹配。

例如：对于所选的 ADS1220，20SPS 的采样率会产生 14.8Hz 的 -3dB 带宽。因此，滤波器的 -3dB 角频率必须设置为比 ADS1220 的带宽大 10 倍。

$$C_{\text{I_DIFF}} = \frac{1}{2 \times \pi \times F_{-3\text{dB}} \times (R_{\text{I1}} + R_{\text{I2}} + R_{\text{RTD}})} \quad (12)$$

$$C_{\text{R_DIFF}} = \frac{1}{2 \times \pi \times F_{-3\text{dB}} \times (R_{\text{REF}} + R_{\text{R1}} + R_{\text{R2}})} \quad (13)$$

为确保共模滤波电容的不匹配不会转换为差分电压，所选择的共模电容 ($C_{\text{I_CM1}}$ 和 $C_{\text{I_CM2}}$) 要比差分电容小 10 倍。

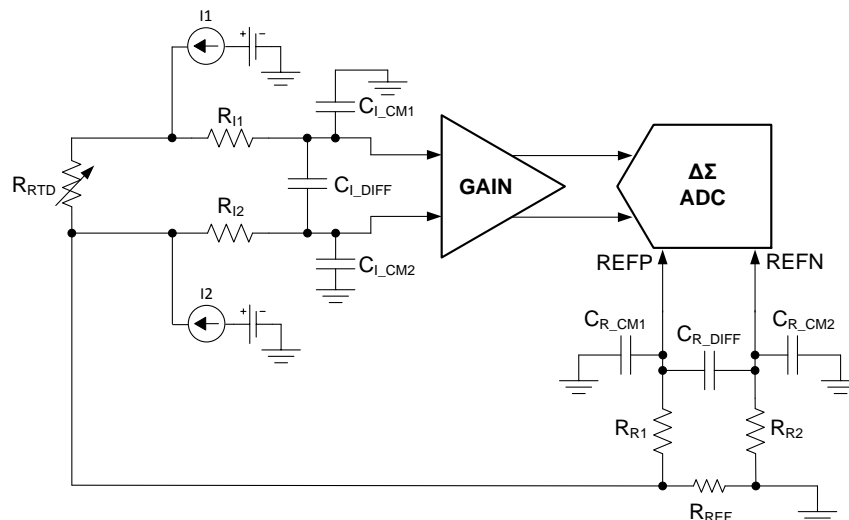


图 10. 输入和参考低通滤波

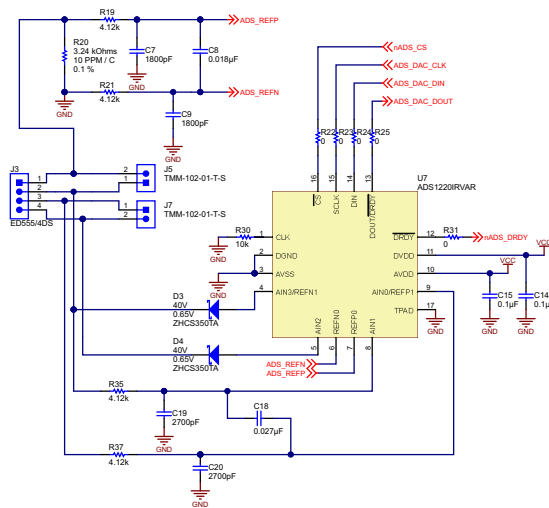


图 11. 本设计实现了对 ADS1220 输入的低通滤波

为本设计选择的截止频率较高，以适应较快的采样率。

4.5 DAC 工作原理

DAC 将 DACCODE 寄存器中的 16 位输入代码转换为等效的电流输出。Σ-Δ DAC 输出是一个电流脉冲，该脉冲随后被一个三阶 RC 低通滤波器滤波并升压，以在器件的 OUT 引脚产生回路电流 (I_{LOOP})。

图 12 显示了回路供电发送器中的 DAC161S997 的工作原理。

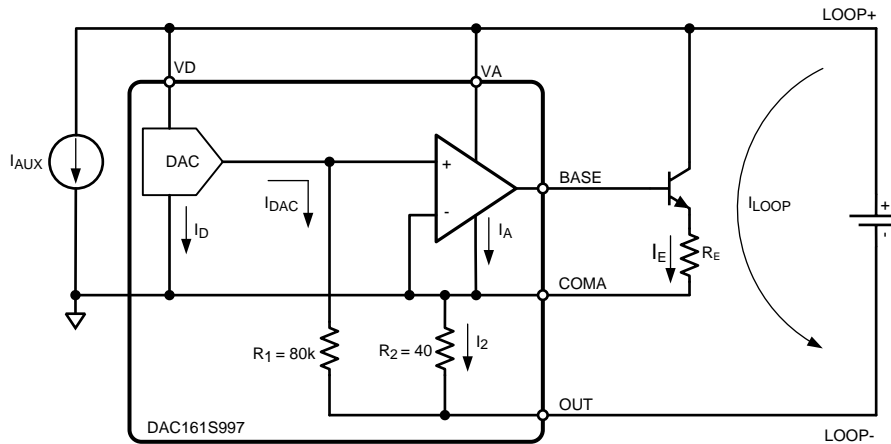


图 12. 回路供电发送器

在图 12 中，I_D 和 I_A 表示内部数字和模拟时钟的电源（静态）电流。I_{AUX} 表示系统中的配套器件（如稳压器和数字接口）的电源（静态）电流。由于放大器和双极性晶体管形成的控制回路强制 R₁ 和 R₂ 上的电压相等，因此在正常条件下，I_{LOOP} 仅取决于 I_{DAC}，它们的关系如下（请参见公式 14 和图 13）。

$$I_{\text{Loop}} = (1 + R_1 / R_2) I_{\text{DAC}}$$

其中

$$\bullet I_{\text{DAC}} = f(\text{DACCODE}) \tag{14}$$

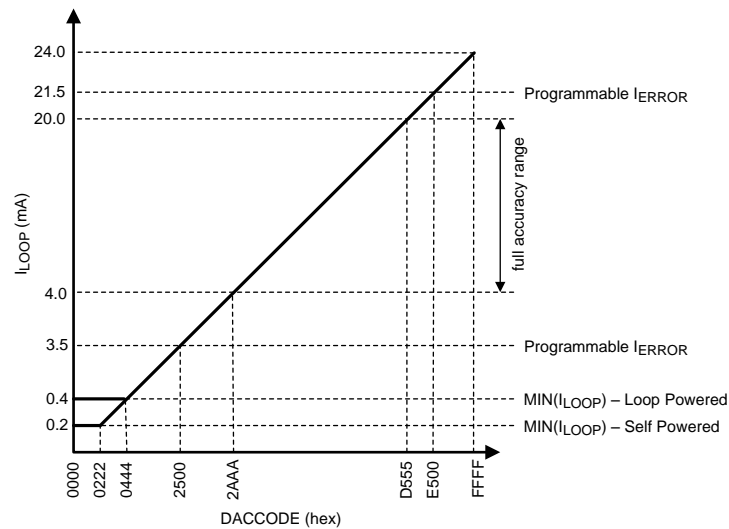


图 13. DAC-DC 传递函数

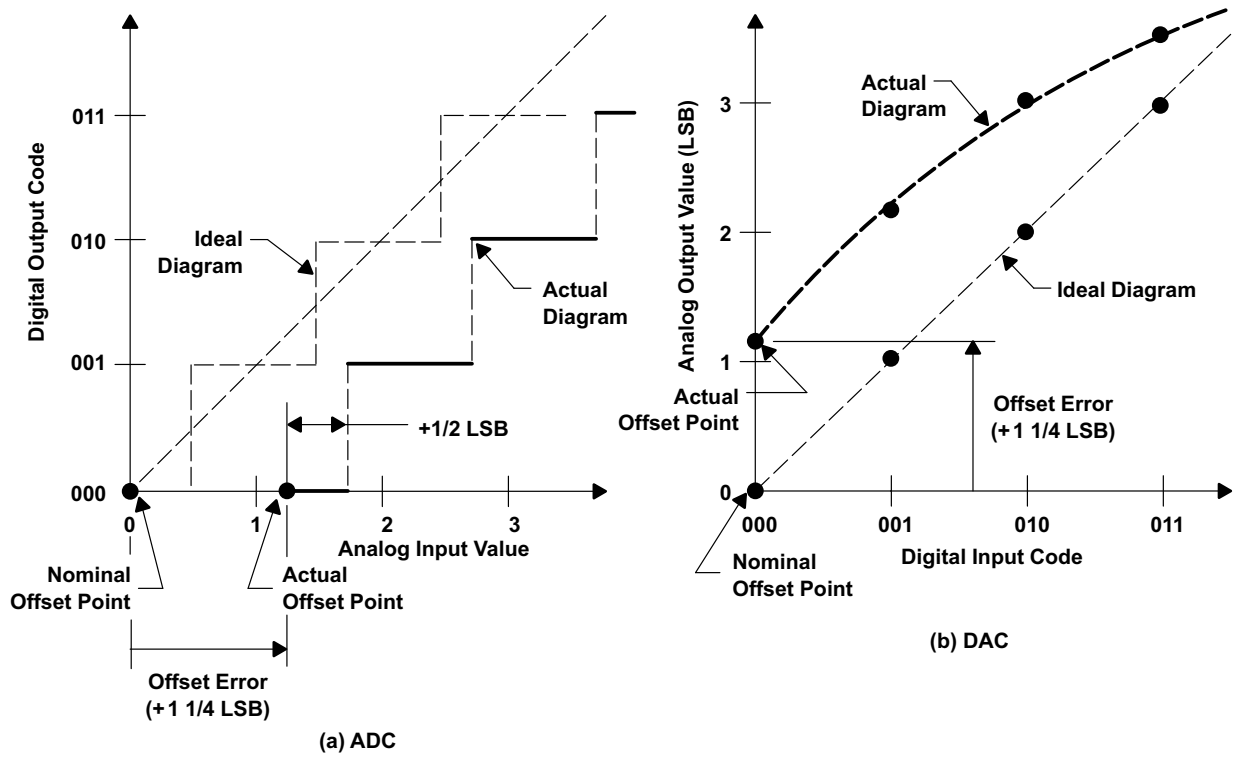
由于电源电压较高，DAC161S997 不能直接连接到典型的 4 至 20mA 回路。回路接口必须提供将回路电源降至约 3.3V 的方法。回路接口的第二个组件是外部 NPN 晶体管 (BJT)。此器件是用于调整发送器输出电流 (I_{LOOP}) 的控制电路的一部分。由于 BJT 可在较宽的电流范围 (至少 4 至 20mA) 内工作，因此不必通过退化发射器来使晶体管的跨导 (gm) 稳定。建议在典型应用中使用 20Ω 的退化电阻。

在本系统中，默认软件支持 -200°C 至 850°C 的温度范围。因此 1μA 的理论 DAC 误差会导致系统中 0.065°C 的误差。有关 MSP430 软件中实现的温度到电流的转换，请参见图 35。

4.6 偏移误差

图 14 所示的偏移误差定义为标称偏移点与实际偏移点之间的差异。对于 ADC，偏移点是数字输出为零时的中值；对于 DAC，偏移点是数字输入为零时的阶跃值。此误差会对所有代码产生相同数量的影响，通常可被修整过程补偿。如果不能进行修整，此误差称为零量程误差。

在本设计中，ADC 的偏移误差校正如图 31 所示。在此算法中，ADS1220 器件中的 ADC 输入引脚将短路，并对给定数量的测量值取平均值以确定适用于所有功能测量的偏移误差校正。有关 DAC 偏移误差校正，请参见 6.5 节。DAC 所需的偏移校正不像图 44 所示的增益校正那样重要。软件不实现 DAC 偏移校正。但是，如果需要偏移校正，可以实现一个简单的算法。



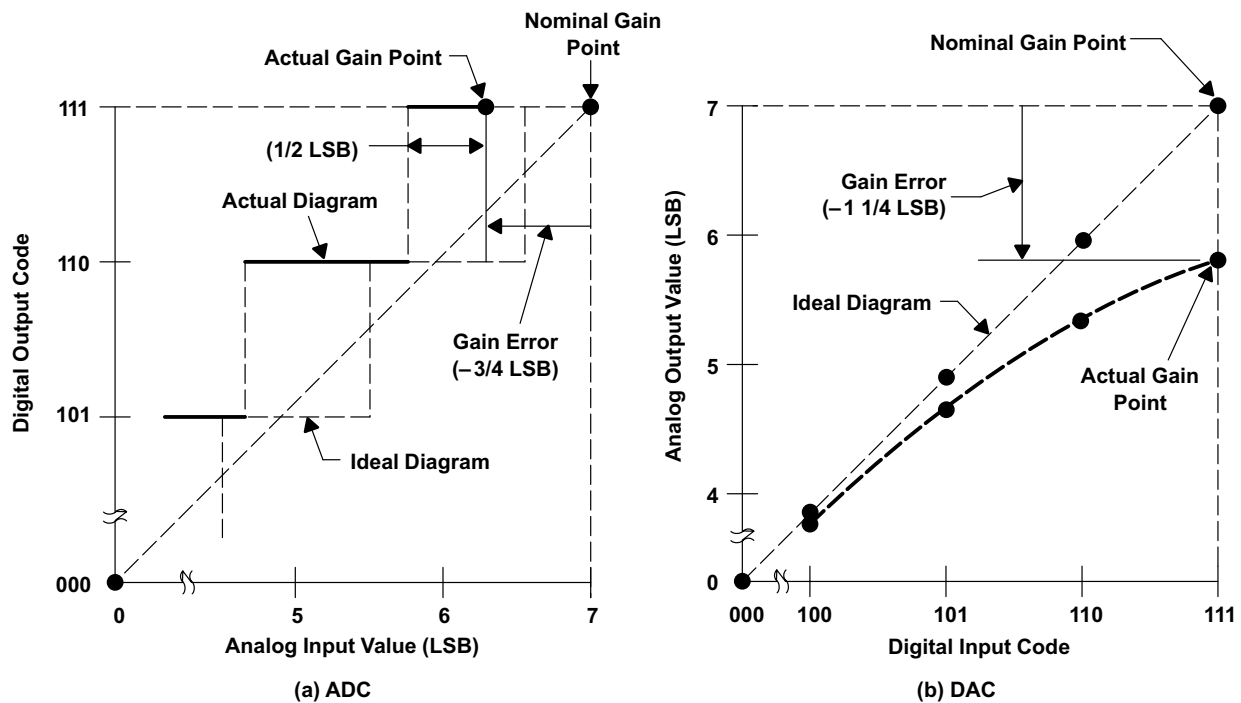
Offset error of a Linear 3-Bit Natural Binary Code Converter (Specified at Step 000)

图 14. 偏移误差

4.7 增益误差

图 15 所示的增益误差定义为偏移误差校正为零之后传递函数上的标称增益点与实际增益点之间的差异。对于 ADC，增益点是数字输出为满量程时的中值；对于 DAC，增益点是数字输入为满量程时的阶跃值。此误差表示实际传递函数与理想传递函数在斜率上的差异，同样对应于每个阶跃中的相同百分比误差。此误差通常也可以通过修整来调整为零。

在本设计中，ADC 的增益误差校正如 6.3 节所示。有关 DAC 增益校正，请参见 6.5 节。实现了一个简单的 2 点校准来克服增益误差，如 6.5 节所示。请注意，这是如何在 DAC 上实现增益校正的示例代码。增益校正系数存储在图 30 中。客户可以对给定系统执行 DAC 增益校准测量，方法为删除 #DAC_test 并重新编译软件，然后使用 SW 1（请参见图 55），每次按下按钮它都会输出 4 至 20mA（步长为 2mA）。使用这些值，可以确定新的 DACErrorCorrection 值，如图 30 所示。要获得更高精度，可以使用多点查找实现增益误差校正。



Gain Error of a Linear 3-Bit Natural Binary Code Converter (Specified at Step 111), After Correction of the Offset Error

图 15. 增益误差

注：在本参考设计中，默认情况下软件实现 ADC 的偏移和增益校准。对于 DAC，可以使用 6.5 节中所述的偏移和增益校准过程来实现此类校正。

4.8 电源设计

温度变送器系统的输入电压范围为大约 8 至 35V。对于此输入范围，板上系统电源的所需输出为大约 3.3V。高精度设计需要具有高度电源纹波抑制能力的 LDO。还需要低的芯片内核至环境热阻以确保输入电源的额外消耗用能量可以在 LDO 的封装内耗散。

TPS7A4901 器件来自于高电压、超低噪声 LDO 系列，该系列非常适合精密应用。LDO 输出端的电阻分压器设置输出电压 (V_{LDO_OUT})，并使之与 LDO 的内部参考电压 (V_{LDO_REF}) 成比例。对于此器件， $V_{LDO_REF} = 1.194\text{ V}$ 。为了将 V_{LDO_OUT} 设置为所需的 3.3V，需在公式 15 中计算电阻分压器的组件。

$$V_{LDO_OUT} = V_{LDO_REF} \times \left(1 + \frac{R1}{R2}\right)$$

其中

- $R1 = 21\text{k}\Omega$
 - $R2 = 12\text{k}\Omega$
- (15)

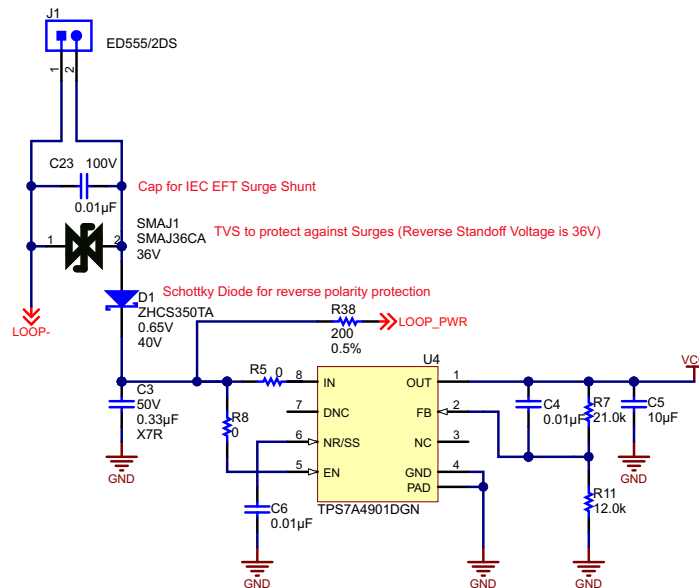


图 16. LDO 部分

TPS7A4901 器件支持最高 36V 的输入电压，并且具有超低噪声 ($15.4\mu\text{V}_{\text{RMS}}$ 和 72dB PSRR)。

公式 16 用于计算 TPS7A4901 器件的最大功率耗散要求。

$$(V_i - V_o) \times I_o$$

其中

- V_i 为 35V， V_o 为 3.3V， I_o 为大约 24mA (最大值)
- (16)

根据公式 16，LDO 封装中耗散的功率为大约 0.76W

TPS7A4901 器件的结至环境热阻 θ_{JA} 为 55.09°C/W (请参见公式 17)。

$$\theta_{JA} \times \text{功率耗散} + T_{A,max} < 150^\circ\text{C} (T_{j,max})$$

(17)

TPS7A4901 器件关断前的最大结温为 150°C 。根据公式 17，TPS7A4901 器件在环境温度为 85°C 时的最坏温度为大约 126°C 。因此，TPS7A4901 器件留有足够的热工作裕量，甚至可应对最坏情况的功率耗散。

4.9 反极性保护

为了防止系统意外地将电源接地以及将地接电源，在 Loop+ 和 Loop- 的路径中均放置了反极性保护二极管，如图 17 和图 18 所示。

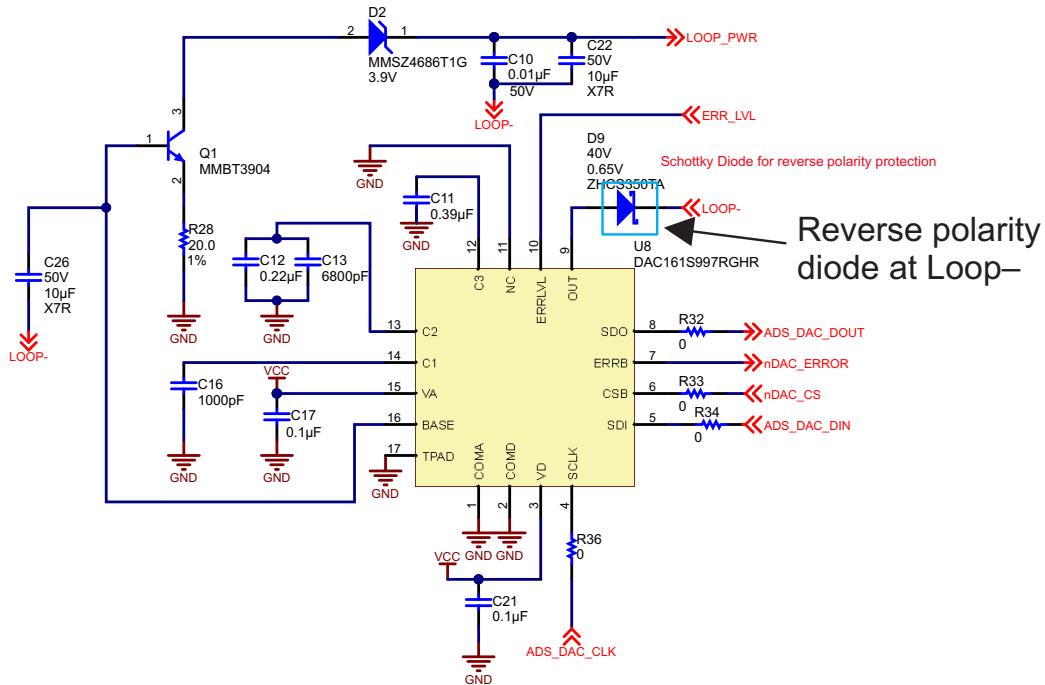


图 17. Loop- 处的反极性保护二极管

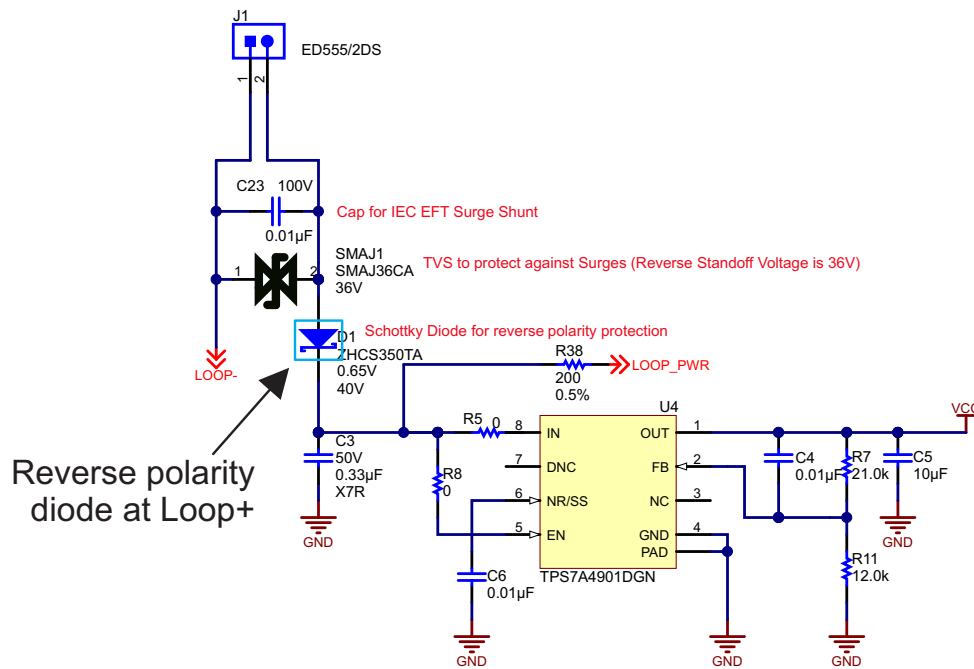


图 18. Loop+ 处的反极性保护二极管

4.10 电源排序

为确保在对 DAC 输出施加回路电源之前 LDO 可以为 DAC 提供 3.3V，对电容的大小进行选择：
 $C3 \ll C22, C26$

(18)

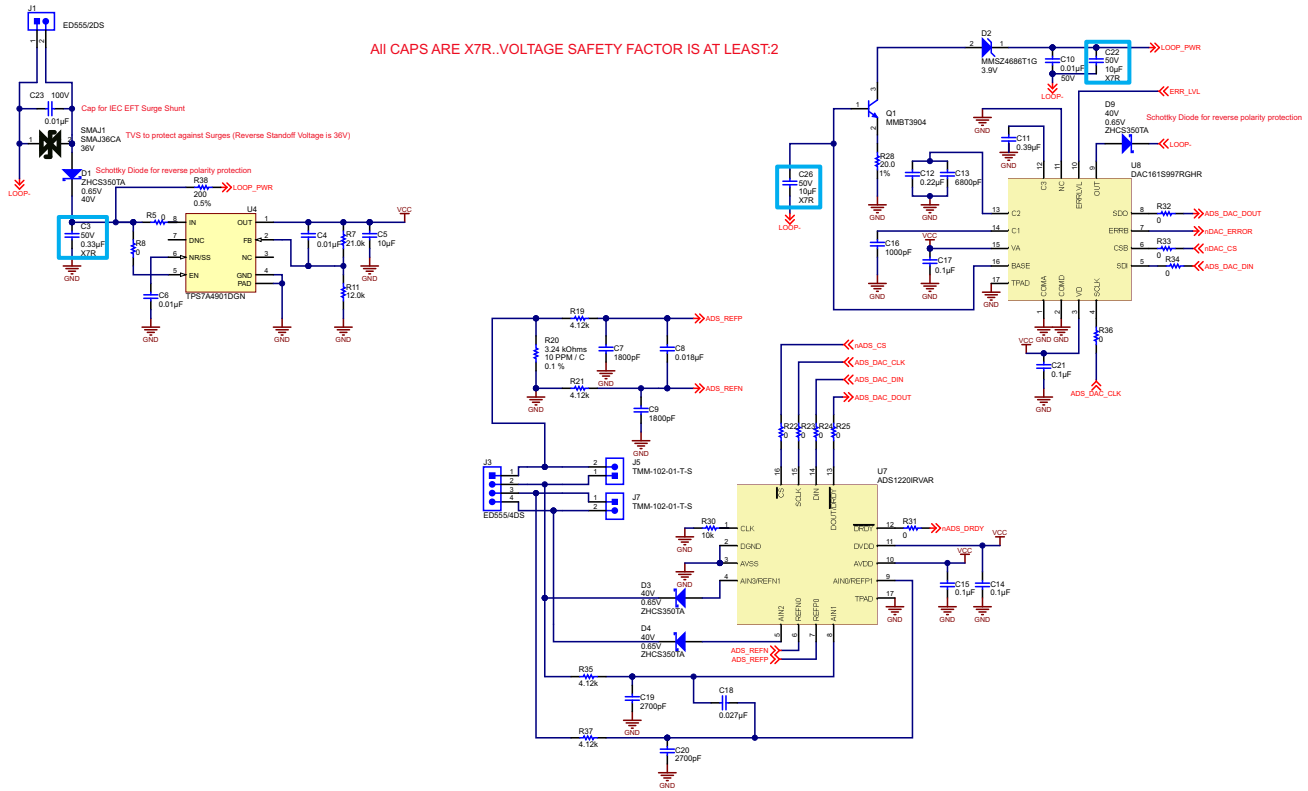


图 19. 电源排序

4.11 IEC61000-4-2 和 IEC61000-4-4 保护

为实现 IEC61000-4-2 和 IEC61000-4-4 保护，尽可能靠近输入电源连接器 J1 放置一个 TVS 二极管以及一个电容。有关原理图和相应的布局，请参见图 20。确保 TVS 和电容尽可能靠近输入电源连接器 (J1) 放置，如图 20 所示。TVS 二极管安装在顶层接近 J1 连接器的位置。分流电容放置在底层尽量靠近 J1 连接器的位置。

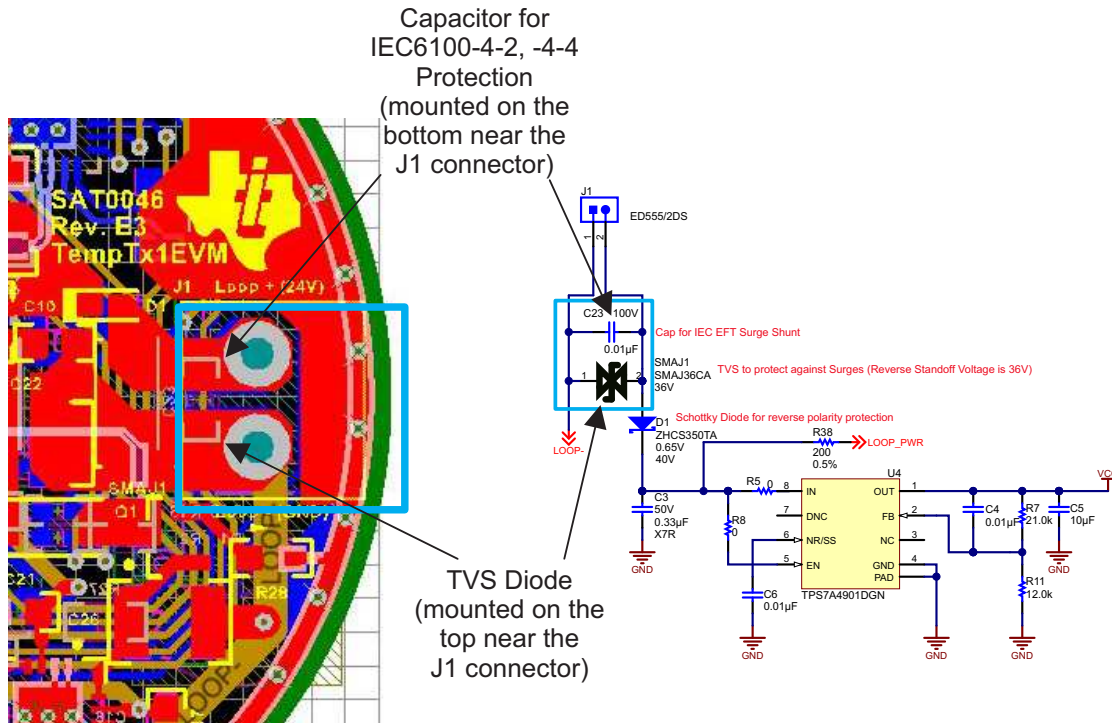


图 20. 用于 IEC61000-4-2 和 IEC61000-4-4 保护的 TVS 和分流电容

4.12 MSP430

MSP430 器件通过 SPI 接口与 ADC 和 DAC 连接。ADC 和 DAC 共用 SPI 接口。MSP430 器件通过 UART 端口连接到 PC COM 端口。[USB 转 UART 软件狗](#)是必需的。

MSP430 器件记录 ADS1220 器件中与温度读数相对应的原始 ADC 代码，应用偏移和增益校准，将 ADC 代码转换为电阻值，执行线性插值以克服 RTD 的非线性，通过查找表将给定温度转换为 DAC 电流，以及在 DAC 增益和偏移校正后将对应于回路电流的等效代码通过 SPI 应用到 DAC161S997 器件。详细信息请参见 5.4 节。

注：在本参考设计中，默认情况下软件实现 ADC 的偏移和增益校准。对于 DAC，可以使用 6.5 节中所述的偏移和增益校准过程来实现此类校正。

4.13 完整系统原理

- 10 至 35V 的输入电压范围通过 LDO (TPS7A4901 器件) 转换为 3.3V。
- 系统集成了对输入电源 (回路电源) 的 IEC61000-4-2 和 IEC61000-4-4 保护以及反极性保护。
- ADS1220 器件是与 RTD 探针连接的 24 位 Σ - Δ ADC, 将电阻测量值转换为原始 ADC 代码。
- MSP430 器件记录 ADS1220 器件中与温度读数相对应的原始 ADC 代码, 应用偏移和增益校准, 将 ADC 代码转换为电阻值, 执行线性插值以克服 RTD 的非线性。
- MSP430 器件通过查找表将给定温度转换为 DAC 等效电流代码。可以在此步骤应用 DAC 偏移和增益校准。
- MSP430 器件使用同一 SPI 接口连接 ADS1220 器件和 DAC161S997 器件。

注: MSP430 器件在 ADS1220 器件和 DAC161S997 器件之间共享同一 SPI。不需要外部缓存, 因为两个 TI 器件 ADS1220 器件和 DAC161S997 器件在未被寻址时会变为高阻抗状态。

注: 已满足 2 节中列出的系统设计的要求, 具体如 4 节所述。

5 使用入门

5.1 硬件概述

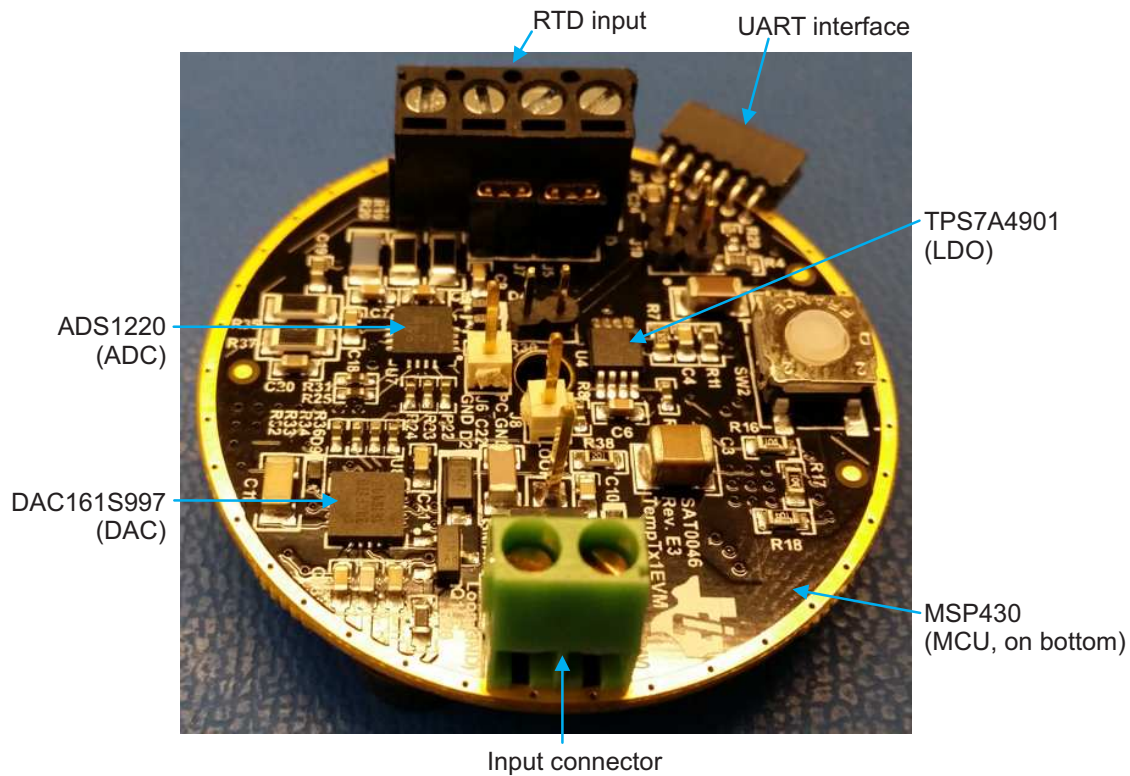


图 21. 系统硬件描述

5.2 入门步骤

1. 20 至 24V（典型值）范围的电源可以为系统供电，如图 22 所示。
2. 建议将电源的电流限制设置为 40mA。24mA 是系统应从电源汲取的电流的理论最大值。
3. 将一个高精度万用表与电源串联，如图 22 所示。建议使用 6.5 位高精度万用表，如图 22 所示。

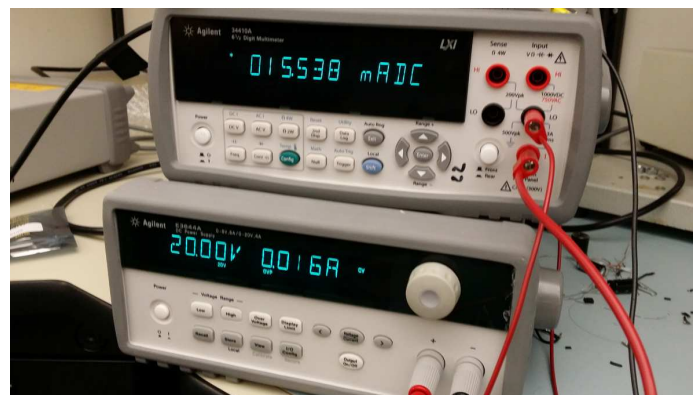


图 22. 电源与万用表串联

注： 要进行基本功能测试，6.5 位万用表已足够。 如要测试 DAC 特性，建议使用 8.5 位万用表

4. 如果 MSP430 闪存中未加载任何软件，系统消耗的默认电流为大约 3.37mA。此消耗电流未反映系统消耗的功率。消耗电流反映了 DAC161S997 指示的低误差条件，如图 23 所示。

参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
IERRL 低误差电流	ERR_LOW = 默认值	3.36	3.375	3.39	mA
IERRH 高误差电流	ERR_HIGH = 默认值	21.7	21.75	21.82	mA



图 23. 未编程软件时系统消耗的默认电流

5. 图 24 给出了用于编程系统的设置。请注意，对系统进行编程需要 USB 转 UART 软件狗。输入电源引脚连接了一个电容，主要用于简化电源引线连接。如果电容已经过极化，则反极性可能会损坏这些电容。与 RTD 输入连接的精密电阻 (0.01%) 用于模拟 2 线 RTD 连接 (安装跳线 J5 和 J7)。对于编程设置，安装跳线 J4、J10 和 J11。这些跳线确保与 MSP430 编程引脚的连接可用，并且 PC GND 短接到系统地 (请参见图 55)。

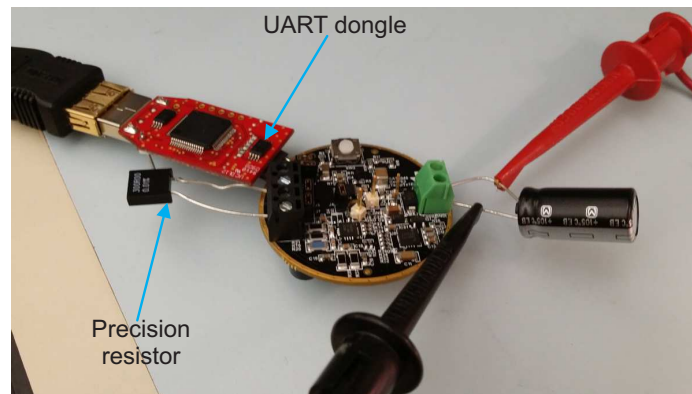


图 24. MSP430 软件编程的系统硬件设置

6. 图 27 给出了功能模式下的基本设置。请注意，不需要跳线 J4、J10 和 J11。PC 与 MSP430 器件之间的 UART 引脚通过 ISO7421 隔离（请参见图 25），这可确保 PC GND 不会与系统或回路地连接。在此设置中，连接是一个 3 线 RTD，因此安装了 J7 而未安装 J5，如图 27 所示

注： 本设计中的负载开关可以根据最终应用的需要关闭隔离部分（请参见图 26）。

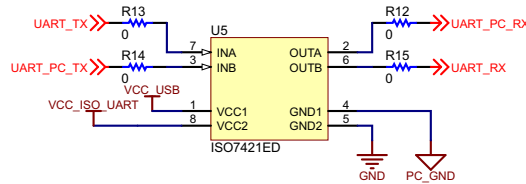


图 25. UART 的数字隔离

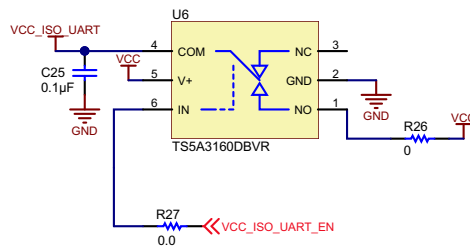


图 26. 用于开启和关闭隔离的负载开关

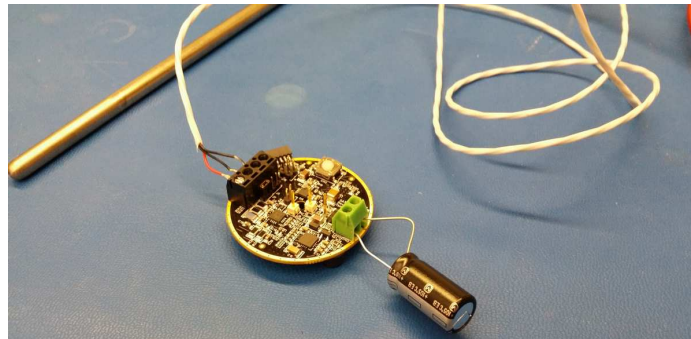


图 27. 基本设置

5.3 对 2 线、3 线和 4 线 RTD 的支持

系统支持 2 线、3 线和 4 线 RTD。表 2 列出了图 28 所示的跳线配置。

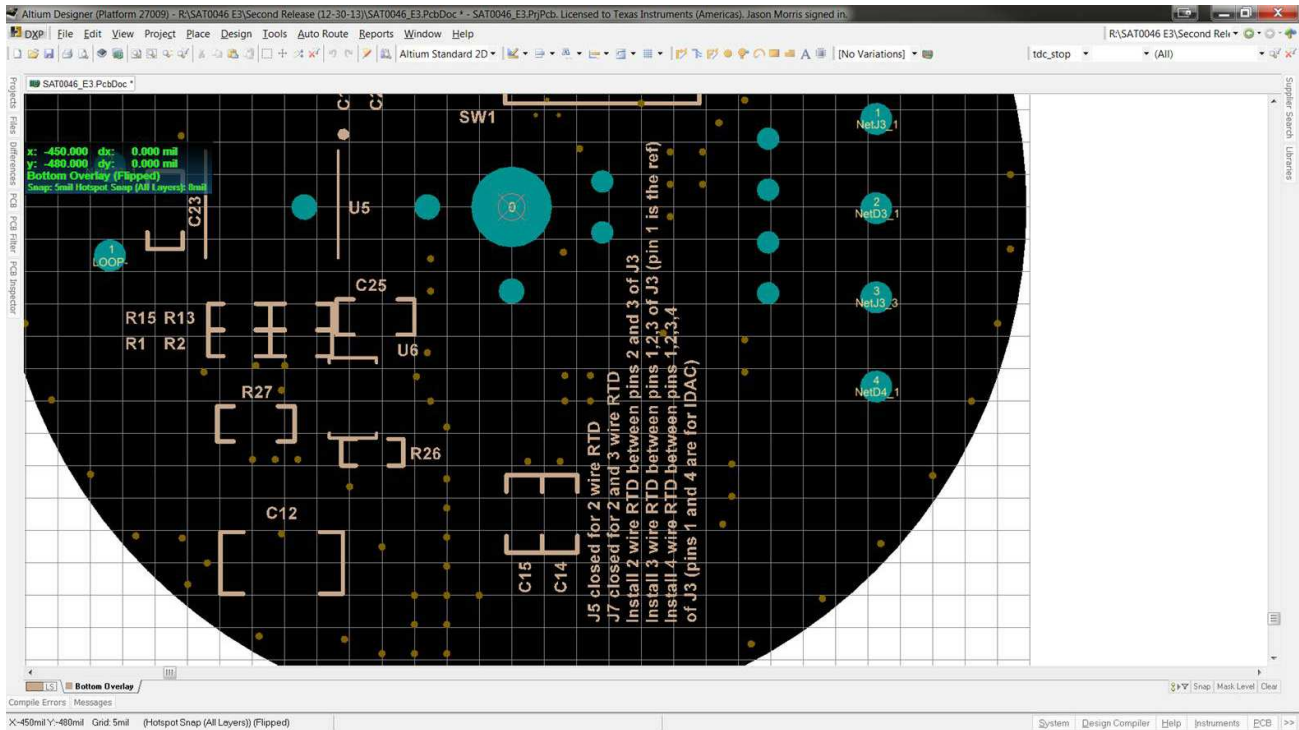


图 28. 底部丝印上显示支持 2 线、3 线和 4 线 RTD

表 2. 2 线、3 线和 4 线 RTD 支持

设置	连接器		RTD 位置
	已安装	未安装	
2 线	J5 和 J7		2 线 RTD 安装在 J3 的引脚 2 和 3 之间
3 线	J7	J5	3 线 RTD 安装在 J3 的引脚 1、2 和 3 之间
4 线		J5 和 J7	4 线 RTD 安装在 J3 的引脚 1、2、3 和 4 之间

5.4 软件

要更新 MSP430 软件，建议使用 [code composer](#)。还需要图 24 所示的 USB 转 UART 软件狗。对于编程设置，安装跳线 J4、J10 和 J11。这些跳线确保与 MSP430 编程引脚的连接可用，并且 PC GND 短接到系统地（请参见图 55）。

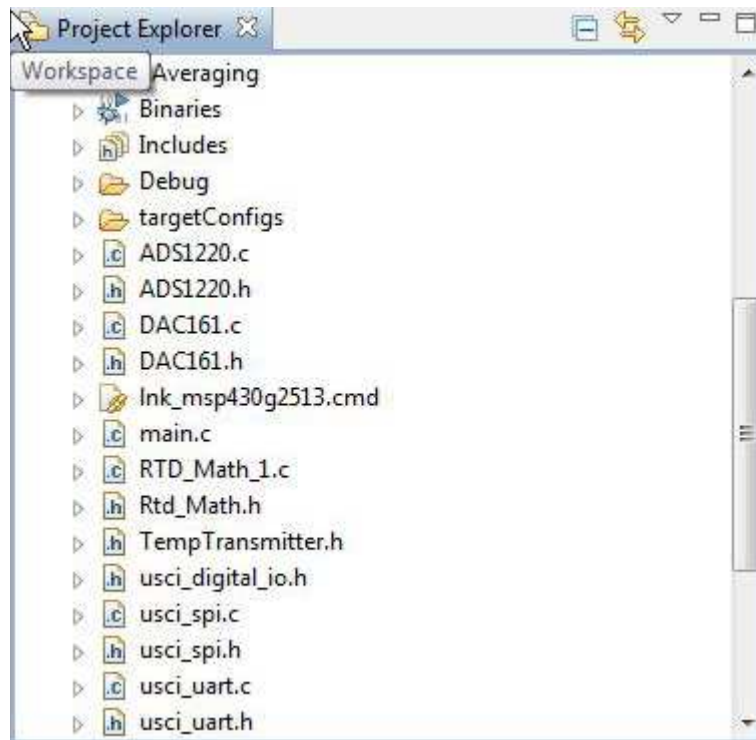


图 29. 软件项目文件

```

47 float Rref = 3240.0;
48
49 // Setting the DacErrorCorrection to 1.0 and turning on the DAC_TEST will allow the user to measure the
50 // output of the DAC161 at 2mA intervals to determine the DacErrorCorrection for there specific device.
51 // #define DAC_TEST 1
52 float DacErrorCorrection = 0.99945;
53
54 // If the following #define is enabled, the system will perform Gain Calibration when the user pushes
55 // the button on the top of the device. The user MUST have modified the code to place the expected
56 // results into the MeasuredGainCodeValue. The user is expected to place a known resistor value in
57 // place of the RTD and push the top button to determine the system level gain correction.
58 // This correction value will be stored into flash memory for future use.
59 //
60 // To prevent the user from accidentally modifying the Gain Correction setting, this #define is left
61 // commented out for normal operations
62 // #define GAIN_CAL
63
64 // To calculate expected result, take the expected answer from the precision multimeter reading and
65 // Code = RTDmeas * PgaGainLevel * (2^23 - 1) / (Rref * 2)
66 float MeasuredGainCodeValue = 7868944.1883;
67
68
    
```

图 30. 关键变量

关键变量（例如 ADC 的参考电阻 R_{REF} 、DAC 增益校准系数或 ADC 增益系数）作为变量显示（请参见 4.7 节、6.3 节和 6.5 节）。

```

157
158
159 * ADS1220_Offset_Calibrate_Data
160
161 /*!
162 * @brief Performs a calibration step from data collected by the ADS1220.
163 *
164 * In order to perform a calibration, the ADS1220 AIN lines are shorted together (using the Setup_ADS1220() function). A number of conversion are
165 * then performed and the conversion data is sent to this function.
166 *
167 * This function will take the conversion data and average the results which will be used in the ADS1220_Get_Conversion_Data_Calibrated() function
168 * to return a calibrated conversion result.
169 *
170 * @param[in] *tempData Pointer to raw conversion data that will be included in calibration calculations.
171 *
172 * @return None
173 *
174 * @sa Setup_ADS1220()
175 * @sa ADS1220_Get_Conversion_Data_Calibrated()
176
177 void ADS1220_Offset_Calibrate_Data (unsigned char *tempData)
178 {
179     long temp;
180
181     temp = tempData[0];
182     temp <<= 8;
183     temp |= tempData[1];
184     temp <<= 8;
185     temp |= tempData[2];
186
187     // Was temp negative?
188     if (tempData[0] & 0x80)
189         temp |= ((long)0xff << 24); // Sign extend
190
191     OffsetCalibrateData += temp;
192     OffsetCalibrateCount++;
193     OffsetCalibrateValue = OffsetCalibrateData / OffsetCalibrateCount;
194
195 }
196

```

图 31. ADC 偏移校准例程

4.6 节给出了此软件中实现的 ADC 偏移校准。

```

39
40 // This particular table has measurements at every degree C from -200 to 851 inclusive (1052 points).
41 // It is used to perform a linear interpolation between two points that surround the measurement. In this case, those points are 1 degree apart.
42 //
43 // Other tables can be used with more or less points, at the impact of changing the accuracy of the measurement. There is no requirement for the measurements to be evenly
44 // spaced. The table can have fewer points at areas that are nearly linear, and more points at areas that are less linear with no change required to the algorithm.
45 //
46 //
47 const float Points[] =
48 {
49     18.520, 18.952, 19.384, 19.815, 20.247, 20.677, 21.108, 21.538, 21.967, 22.397,
50     22.825, 23.254, 23.682, 24.110, 24.538, 24.965, 25.392, 25.819, 26.245, 26.671,
51     27.096, 27.522, 27.947, 28.371, 28.796, 29.220, 29.643, 30.067, 30.490, 30.913,
52     31.335, 31.757, 32.179, 32.601, 33.022, 33.443, 33.864, 34.284, 34.704, 35.124,
53     35.543, 35.963, 36.382, 36.800, 37.219, 37.637, 38.055, 38.472, 38.889, 39.306,
54     39.723, 40.140, 40.556, 40.972, 41.388, 41.803, 42.218, 42.633, 43.048, 43.462,
55     43.876, 44.290, 44.704, 45.117, 45.531, 45.944, 46.356, 46.769, 47.181, 47.593,
56     48.005, 48.416, 48.828, 49.239, 49.649, 50.060, 50.470, 50.881, 51.291, 51.700,
57     52.110, 52.519, 52.928, 53.337, 53.746, 54.154, 54.562, 54.970, 55.378, 55.786,
58     56.193, 56.600, 57.007, 57.414, 57.821, 58.227, 58.633, 59.039, 59.445, 59.850,
59     60.256, 60.661, 61.066, 61.471, 61.876, 62.280, 62.684, 63.088, 63.492, 63.896,
60     64.300, 64.703, 65.106, 65.509, 65.912, 66.315, 66.717, 67.120, 67.522, 67.924,
61     68.325, 68.727, 69.129, 69.530, 69.931, 70.332, 70.733, 71.134, 71.534, 71.934,
62     72.335, 72.735, 73.134, 73.534, 73.934, 74.333, 74.732, 75.131, 75.530, 75.929,
63     76.328, 76.726, 77.125, 77.523, 77.921, 78.319, 78.717, 79.114, 79.512, 79.909,
64     80.306, 80.703, 81.100, 81.497, 81.894, 82.290, 82.687, 83.083, 83.479, 83.875,
65     84.271, 84.666, 85.062, 85.457, 85.853, 86.248, 86.643, 87.038, 87.432, 87.827,
66     88.222, 88.616, 89.010, 89.404, 89.798, 90.192, 90.586, 90.980, 91.373, 91.767,
67     92.160, 92.553, 92.946, 93.339, 93.732, 94.124, 94.517, 94.909, 95.302, 95.694,
68     96.086, 96.478, 96.870, 97.261, 97.653, 98.044, 98.436, 98.827, 99.218, 99.609,
69     100.000, 100.391, 100.781, 101.172, 101.562, 101.953, 102.343, 102.733, 103.123, 103.513,
70     103.903, 104.292, 104.682, 105.071, 105.460, 105.849, 106.238, 106.627, 107.016, 107.405,
71     107.794, 108.182, 108.570, 108.959, 109.347, 109.735, 110.123, 110.510, 110.898, 111.286,
72     111.673, 112.060, 112.447, 112.835, 113.221, 113.608, 113.995, 114.382, 114.768, 115.155,
73     115.541, 115.927, 116.313, 116.699, 117.085, 117.470, 117.856, 118.241, 118.627, 119.012,
74     119.397, 119.782, 120.167, 120.552, 120.936, 121.321, 121.705, 122.090, 122.474, 122.858,
75     123.242, 123.626, 124.009, 124.393, 124.777, 125.160, 125.543, 125.926, 126.309, 126.692,
76     127.075, 127.458, 127.840, 128.223, 128.605, 128.987, 129.370, 129.752, 130.133, 130.515,
77     130.897, 131.278, 131.660, 132.041, 132.422, 132.803, 133.184, 133.565, 133.946, 134.326,
78     134.707, 135.087, 135.468, 135.848, 136.228, 136.608, 136.987, 137.367, 137.747, 138.126,
79     138.506, 138.885, 139.264, 139.643, 140.022, 140.400, 140.779, 141.158, 141.536, 141.914,
80     142.293, 142.671, 143.049, 143.426, 143.804, 144.182, 144.559, 144.937, 145.314, 145.691,
81     146.068, 146.445, 146.822, 147.198, 147.575, 147.951, 148.328, 148.704, 149.080, 149.456,
82     149.832, 150.208, 150.583, 150.959, 151.334, 151.710, 152.085, 152.460, 152.835, 153.210,
83     153.584, 153.959, 154.333, 154.708, 155.082, 155.456, 155.830, 156.204, 156.578, 156.952,
84     157.325, 157.699, 158.072, 158.445, 158.818, 159.191, 159.564, 159.937, 160.309, 160.682,
85     161.054, 161.427, 161.799, 162.171, 162.543, 162.915, 163.286, 163.658, 164.030, 164.401,
86     164.772, 165.143, 165.514, 165.885, 166.256, 166.627, 166.997, 167.368, 167.738, 168.108,
87     168.478, 168.848, 169.218, 169.588, 169.958, 170.328, 170.697, 171.067, 171.437, 171.807,

```

图 32. 用于线性插值的查找表

此查找表存储在 MSP430 软件中，用于线性插值以解决 RTD 的非线性，如 4.2 节所示。

```

RTD_Math_1.c
156
157 /*=====
158 * interpolateTemperatureValue
159 *=====*/
160 /*!
161 * @brief Returns the temperature in millidegrees that corresponds to the RTD code value returned from the ADS1220.
162 *
163 * The function converts the code value returned from the RTD reading using the ADS1220 and returns the temperature value in millidegrees C.
164 *
165 * @param[in] code          24 bit value provided from the ADS1220 from the RTD conversion
166 *
167 * @return temperature      Temperature in millidegrees C.
168 *
169 *=====*/
170 float interpolateTemperatureValue (long code)
171 {
172     static float interimValue;
173     static float targetValue;
174     static float r_value;
175     unsigned short index;
176
177     r_value = calculateRValue (code);
178     index = findInterpolationIndex(r_value);
179
180     // Interim value will be a fraction less than 1
181     interimValue = (r_value - Points[index]) / (Points[index+1] - Points[index]);
182
183     // The algorithm requires the table to be one value for every degree. Since the table is regular, the
184     // interimValue will be the decimal portion of the temperature measurement. The index show how deep
185     // we are into the table with each step being one degree apart. If we add value in degree C of the
186     // first measurement in the table we can convert into temperature
187     targetValue = interimValue + ((long)index + MIN_TEMP_MEAS); // Convert index out of unsigned variable to allow for negative number
188
189     return (targetValue); // Note this is in Degrees C
190 }
191
    
```

图 33. 线性插值的算法

线性插值的算法用于解决 RTD 的非线性，如 4.2 节所示。

```

RTD_Math_1.c
222
223 /*=====
224 * calculateRValue
225 *=====*/
226 /*!
227 * @brief This function converts the code returned from the conversion of the RTD in the ADS1220 into an R Value.
228 *
229 * The algorithm to perform the conversion goes as follows :
230 * rtd = (code * Rref * 2.0) / (PgaGainLevel * (2^23 - 1));
231 *
232 *
233 * @param[in] code          24 bit value provided from the ADS1220 from the RTD conversion
234 *
235 * @return r_value          The r_value from the RTD return
236 *
237 *=====*/
238 float calculateRValue (long code)
239 {
240     float rtd; // Must be volatile to force the order of operations below
241
242
243     rtd = (code * Rref * 2.0) / (PgaGainLevel * 8388607.0);
244
245     return (rtd);
246 }
247
    
```

图 34. 将 ADC 代码转换为电阻

图 34 中的代码用于在偏移和增益校准后将 ADC 代码转换为电阻。

```

main.c
137
138 /*****
139 * ConvertTemp2uAmps
140 *****/
141 /*!
142 * @brief Converts a temperature in the range of -200 to +850 degrees C into a 4-20mA value.
143 *
144 * This function is called to convert the temperature (scaled into degrees C * 1000) into an Amp setting to send on the 4-20mA line.
145 * -200 degrees will correspond to 4.000 mA. +850 degrees C will correspond to 20mA.
146 *
147 * @param[in]    temperature in degrees C * 1000; from -200000 to +850000
148 *
149 * @return uAmp value    Input temperature converted in MicroAmps (mA * 1000).
150 *****/
151 unsigned long ConvertTemp2uAmps (long temperature)
152 {
153     float uAmps;
154
155     // Here is where we need to convert the 3 bytes received from the ADS1220 into a uAmp value that will be placed into the DAC
156     // -200 to +850 C measured in 1000 * C is -200000 to 850000 or a range of 1050000 1000*C.
157     // Add 200000 to the temperature to convert it into a range between 0 and 1050000. Divide by 1050000 to get the percentage of the temperature scale.
158     //
159     // 4 to 20mA output is measured in uAmps and therefore is 4000 to 20000 uAms or a range of 16000 uAmps.
160     // Multiply the results above by 16000 to get the percentage on the uAmp scale that ranges from 0 - 16000.
161     // Adjust the results so that -200 degrees C (which comes out to 0 uAmps) is represented by 4000 uAmps by adding 4000
162     //
163     // uAmps = ((temperature + 200000) * 16000 / 1050000) + 4000 -- Divide top and bottom by 1000 and we get
164     //          ((temperature + 200000) * 16 / 1050) + 4000
165     //
166     uAmps = (((temperature + 200000) * 16.0) / 1050.0) + 4000.0;
167     uAmps = uAmps * DacErrorCorrection;
168     return ((unsigned long)uAmps);
169 }
170
    
```

图 35. 将温度转换为 DAC 电流

图 35 中的代码用于将温度转换为 DAC 电流。

6 测试数据

注：除非另外说明，否则以下几节中的测试数据是在系统处于室温条件下测量的。

注：本节中的所有测量值均使用经过校准的实验室设备测量。

6.1 概述

整体系统性能受 ADC 精度、DAC 精度和分辨率控制。6.2 节先描述了 ADC 的分辨率和误差（针对偏移和增益校准进行调整）的特性。然后描述了 DAC 的分辨率和误差（针对偏移和增益校准进行调整）的特性。最后，针对整个系统的最大测量误差对完整系统进行特性化。

6.2 ADC 输入相关噪声

MSP430 器件捕获大约 1000 个原始 ADC 值。为捕获这些值，MSP430 器件通过图 36 所示的 USB 转 UART 软件狗与 COM 端口通信（更多信息，请参见“入门步骤”部分中的步骤 5）。一个 300Ω 的精密电阻连接到 RTD，如图 36 所示。

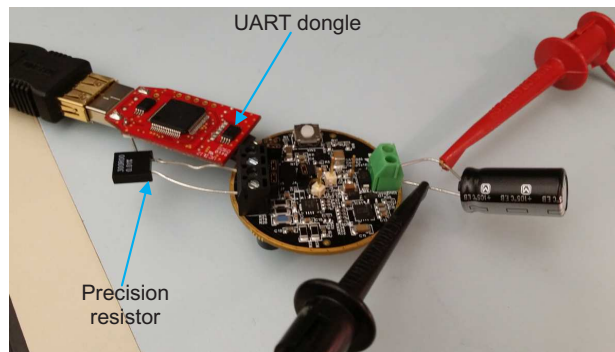


图 36. 输入相关噪声测量设置

图 37 显示了在未进行任何偏移校准或增益校准的情况下绘制的原始 ADC 值。

标准偏差为大约 43 个代码，代码范围（MAX(code) 至 MIN(code)）为大约 239。

$$\text{LSB weight} = \left[\frac{V_{\text{REF}} \times 2}{\text{PGA Gain} \times (2^{24} - 1)} \right]$$

此处

- $V_{\text{REF}} = 1.62\text{V}$
- PGA 增益 = 16，注意采样率为 20SPS

$$\text{Input Referred Noise (pp)} = [\text{spread of RAW ADC codes} \times \text{LSB}] = 239 \times 12.06 \text{ nV} = 2.8 \mu\text{V}, 0.029^\circ\text{C} \quad (20)$$

$$\frac{\text{ppNoise}}{(\text{PT-100_Sensitivity} \times \text{IDAC})} = \frac{2.8 \mu\text{Vpp}}{(0.385 \Omega/^\circ\text{C} \times 250 \mu\text{A})} = 0.029^\circ\text{C} \quad (21)$$

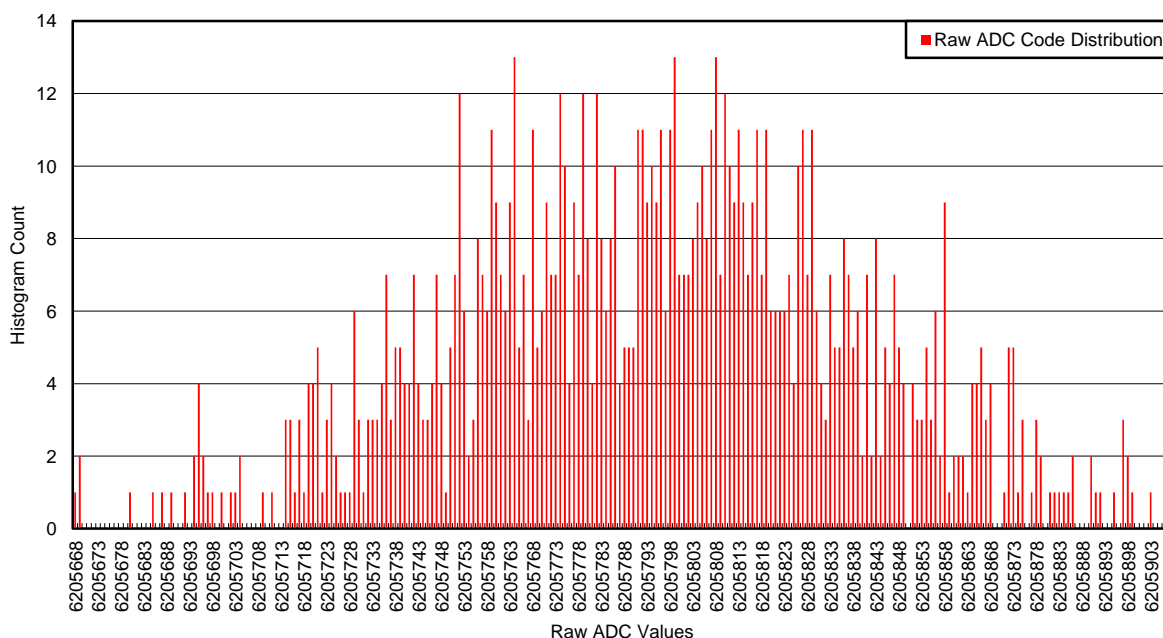


图 37. 原始 ADC 代码分布

6.3 包括偏移和增益校准的 ADS1220 误差特性化

如图 38 所示，此测试设置中使用了以下设备。

- 一个 24V 电源（电流限制设置为 40mA）。
- 一个高精度 6.5 位万用表与电源串联，用于测量回路电流。
- 另一个 8.5 位高精度万用表精确测量此测试中使用的精密电阻。
- 对于此测试，使用了容差为 0.01% 的精密电阻来模拟 RTD 探针（请参见图 39）。

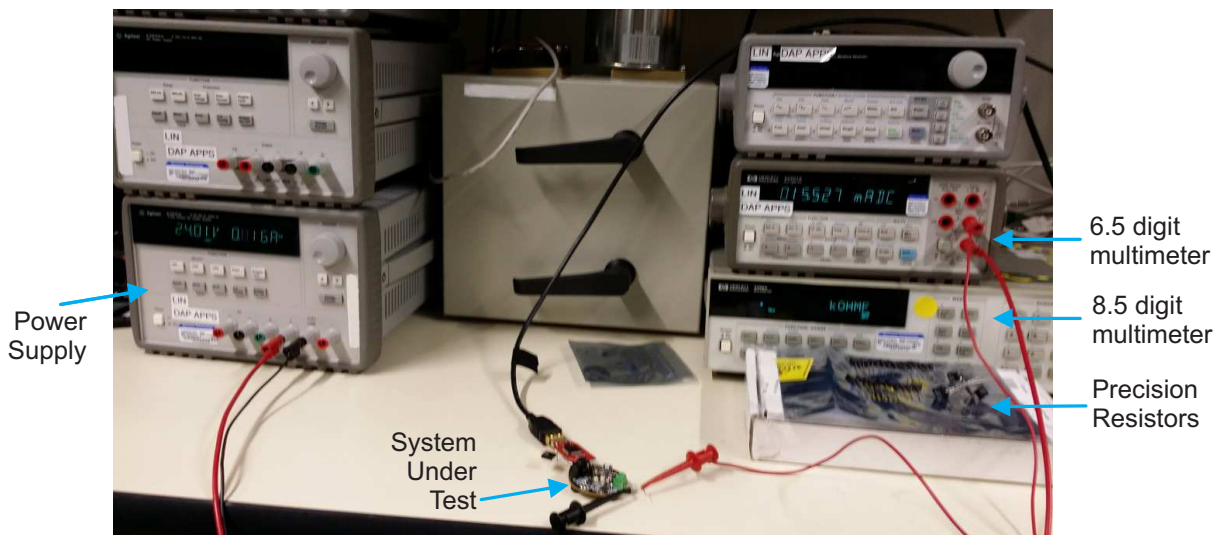


图 38. ADC 特性化的设置

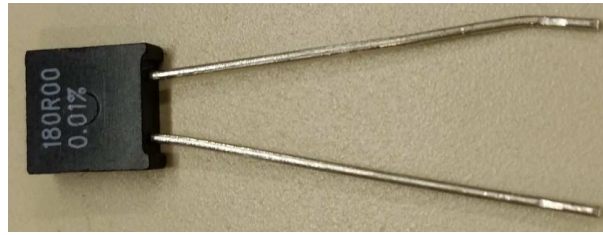


图 39. 用于 ADC 特性化的容差为 0.01% 的精密电阻

- 在此测试的典型数据集中，精密电阻（例如 20Ω）连接到 J3 连接器的 RTD 输入 1 和 3，且跳线 J5 和 J7 短接（请参见图 38）。
- MSP430 器件收集原始 ADC 值，应用偏移校准（一次）（请参见 4.6 节），并收集包括偏移校准的 ADC 值。这些值通过 USB 转 UART 软件狗发送到 PC 上的通信 (COM) 端口。
- 测量数据后，立即使用 8.5 位高精度万用表测量精密电阻（请参见图 40）。

注： 为确保电阻测量不受人体接触的影响，使用钳子将精密电阻与 J3 连接器断开，并立即连接到 8.5 位万用表的 Kelvin 探针。

- 通过将 380Ω 电阻（对应于大约 814°C）连接到 RTD 输入引脚 1 和引脚 3 来进行增益校准（请参见 4.7 节）。根据 8.5 位万用表对 380Ω 电阻的测量值，将偏移校正后测量的 ADC 值与理想的预期 ADC 值进行比较。最后，将此增益校准因数应用到温度范围内的所有电阻测量值（请参见表 4）。

注： **ADC 的增益校准** 在对连接了 380Ω 电阻的情况下的预期结果应用偏移校正后，MSP430 软件算法对给定数量的测量值取平均值以确定增益校准系数。

要执行该算法，必须在 380Ω 电阻就位的情况下按下 SW2（请参见图 55）。

如果没有以前存储的增益校准系数，将确定一个新的增益校准系数并将其存储在闪存中。

要覆盖现有增益校准系数值，必须将 MSP430 中的 *InfoC* 存储器的前 4 个字节设置为 0xFF。

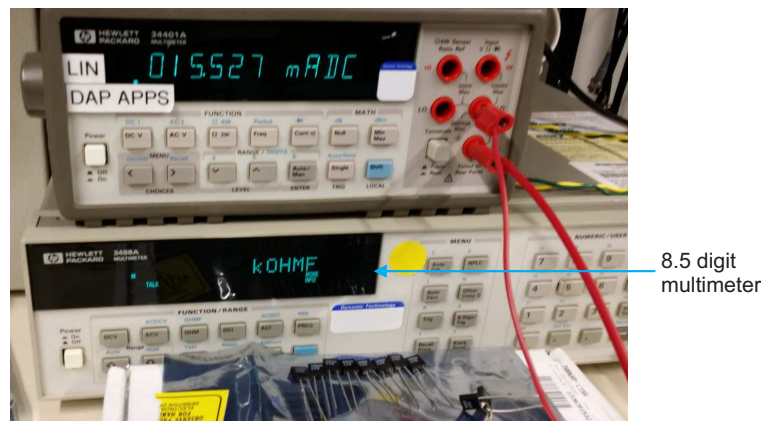


图 40. 精密电阻和 8.5 位万用表

表 3. 精密电阻与温度值的对应关系

8.5 位万用表测量出的精密电阻值 (Ω)	基于测量的精密电阻的参考温度, 使用 Callendar-Van Dusen 公式计算 (请参见 4.2 节)
20.0007	-196.570346
40.0014	-149.332074
59.9921	-100.650615
79.9980	-50.776173
100.0024	0.00614
119.9960	51.555661
139.9950	103.92953
159.9918	157.147496
180.0046	211.301704
200.0006	266.349859
219.9999	322.397013
239.9789	379.431081
259.9875	437.656
280.0035	497.077256
300.0007	557.690044
329.9275	650.910269
359.9782	747.831551
379.9108	814.135104

表 4. 原始 ADC 代码, 增益和偏移校准后的 ADC 代码

原始 ADC 代码 (DEC)	偏移校准后的 ADC 代码 (DEC)	偏移和增益校准后的 ADC 代码 (DEC)
413631	413758	414150
827425	827552	828336
1241010	1241137	1242314
1654817	1654944	1656513
2068676	2068803	2070765
2482330	2482457	2484811
2896130	2896257	2899003
3309865	3309992	3313131
3723824	3723951	3727482
4137619	4137746	4141670
4551351	4551478	4555794
4964771	4964898	4969606
5378777	5378904	5384005
5792921	5793048	5798542
6206693	6206820	6212706
6826873	6827000	6833474
7447941	7448068	7455131
7861347	7861474	7868929

表 5. 增益和偏移校准后的 ADC 误差

根据增益和偏移校准后的 ADC 代码计算的 RTD 值 (Ω) (请参见图 34)	偏移和增益校准后线性化运行的温度读数 ($^{\circ}\text{C}$) (请参见图 32 和图 33)	基于测量的精密电阻的参考温度, 使用 Callendar-Van Dusen 公式计算 (请参见 4.2 节)	测量的 ADC 误差
19.99506593	-196.5848571	-196.570346	0.01451
39.99186993	-149.3556911	-149.332074	0.02362
59.97863173	-100.684719	-100.650615	0.03410
79.97606337	-50.82998014	-50.776173	0.05381
99.97605383	-0.06062601	0.00614	0.06677
119.9660987	51.47993397	51.555661	0.07573
139.9631923	103.8452168	103.92953	0.08431
159.9571961	157.0532523	157.147496	0.09424
179.9619663	211.1874151	211.301704	0.11429
199.9588668	266.2337681	266.349859	0.11609
219.9526775	322.2618586	322.397013	0.13515
239.9314248	379.2930855	379.431081	0.13800
259.9385124	437.5102093	437.656	0.14579
279.9522626	496.9460531	497.077256	0.13120
299.9480045	557.5494406	557.690044	0.14060
329.9185395	650.9059074	650.910269	0.00436
359.9319953	747.7075864	747.831551	0.12396
379.9100667	814.1344287	814.135104	0.00068

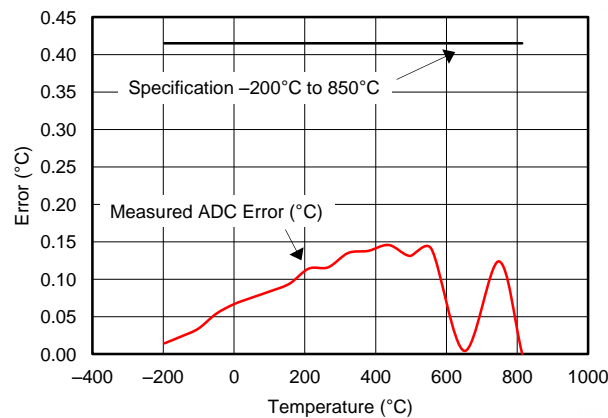


图 41. 测量的 ADC 误差

注: 在增益和偏移校准后测量 ADC 误差。测量的 ADC 误差包括与用于克服 RTD 非线性的查找表的线性插值相关联的误差 (请参见 4.2 节)。

6.4 输出分辨率

对于此测试，将 DAC 输出编程为 4mA，并使用 8.5 位万用表随时间记录了多个值，如图 42 所示。记录的最小和最大电流分别为 3.99754mA 和 3.99779mA，因此输出分辨率为 0.25μA。

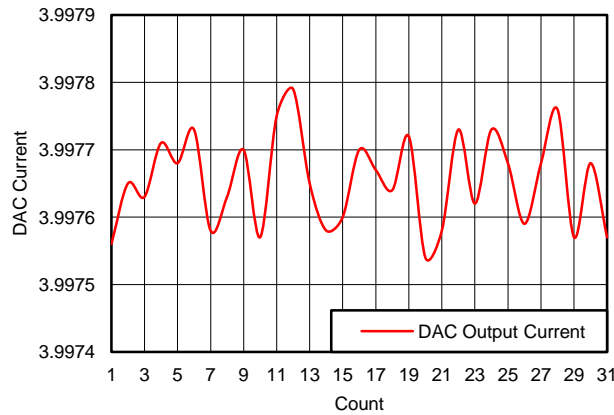


图 42. 输出分辨率

6.5 DAC 特性化

在此设置中，使用了 8.5 位万用表，如图 43 所示。MSP430 编程为固定的 4、6、8、10、12、14、16、18 和 20mA 的 DAC 电流，使用 8.5 位万用表测量相应的回路电流。

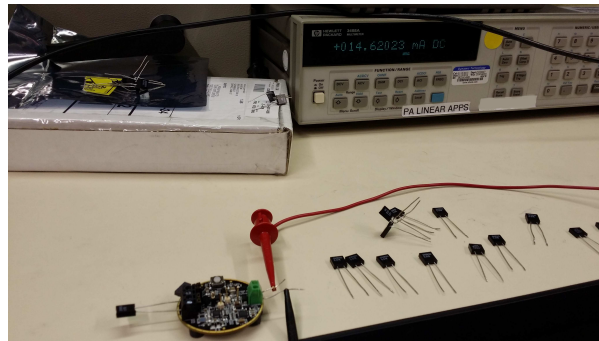


图 43. DAC 特性化设置

表 6. 使用和不使用增益校准的 DAC 电流

应用的 DAC 值 (mA)	测量的回路电流 (mA)	
	增益校准前	增益校准后
4	4.00126	3.99901
6	6.00200	5.99873
8	8.00285	7.99875
10	10.00372	9.99857
12	12.00464	11.99832
14	14.00577	13.99823
16	16.00685	15.99861
18	18.00798	17.99862
20	20.00948	19.99901

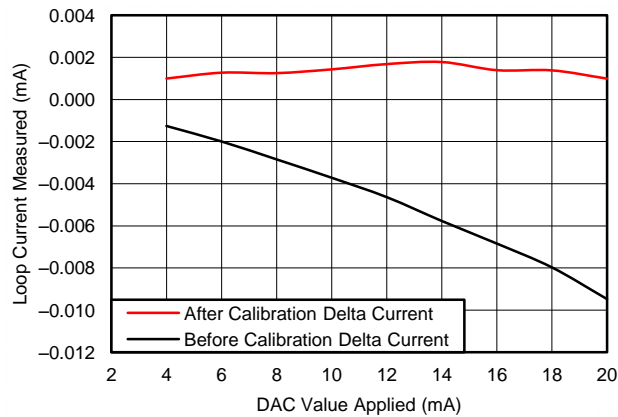


图 44. DAC 增益和偏移校准

如图 44 所示，如果没有增益校准，回路电流中会出现误差。此误差随回路电流线性增大。MSP430 中实现了一个简单的增益校准（请参见 4.7 节）来修正此误差，如图 44 所示。要提高 DAC 精度，MSP430 MCU 还可以进一步减小其余的本身偏移的误差。

表 7 列出了连接到 RTD 输入引脚的精密电阻与相应的由 DAC 强制的理想回路电流的分布情况，仅供参考。

表 7. 理想的 DAC 回路电流与温度范围

基于测量的精密电阻的参考温度	基于精密电阻的理想 DAC 值 (mA)
-196.570346	4.05226
-149.332074	4.77208
-100.650615	5.51390
-50.776173	6.27389
0.00614	7.04771
51.555661	7.83323
103.92953	8.63131
157.147496	9.44225
211.301704	10.26745
266.349859	11.10628
322.397013	11.96034
379.431081	12.82943
437.656	13.71666
497.077256	14.62213
557.690044	15.54575
650.910269	16.96625
747.831551	18.44315
814.135104	19.45349

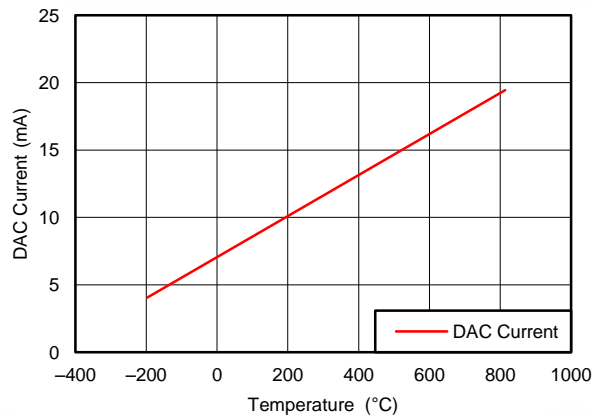


图 45. 理想的 DAC 回路电流与温度范围

6.6 完整系统的最大测量误差

对 ADC 和 DAC 进行增益和偏移校准后，针对最大测量误差执行完整系统特性化（请参见图 46）。在此设置中，使用了电源和 8.5 位万用表进行回路电流测量。如图 45 所示，多个精密电阻值覆盖了 -200°C 至 850°C 的范围，与图 39 中使用的精密电阻相似。

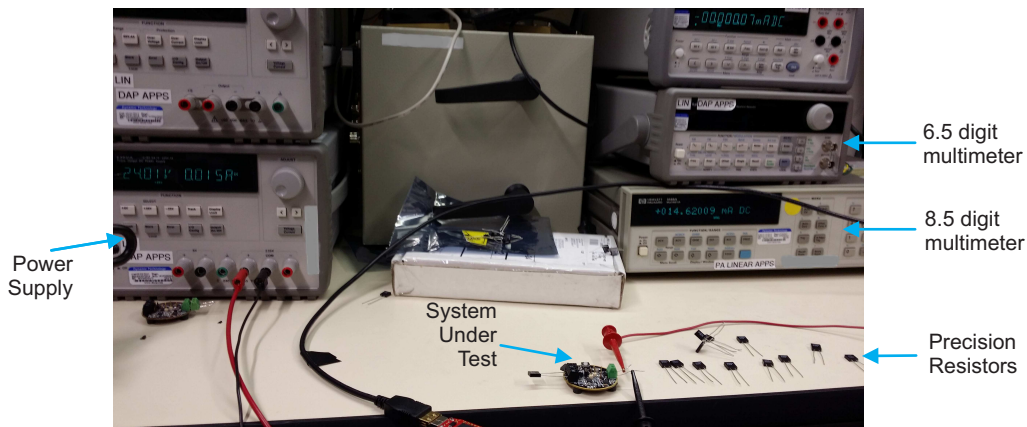
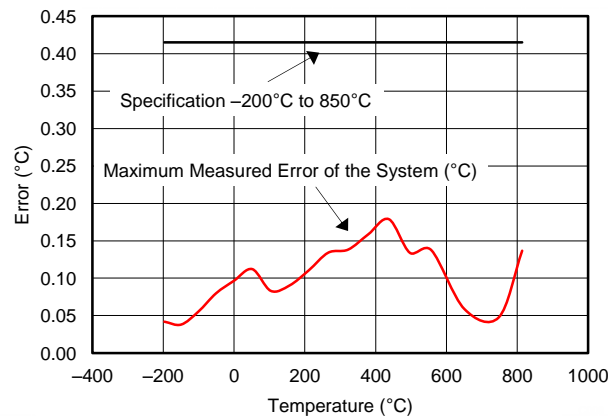
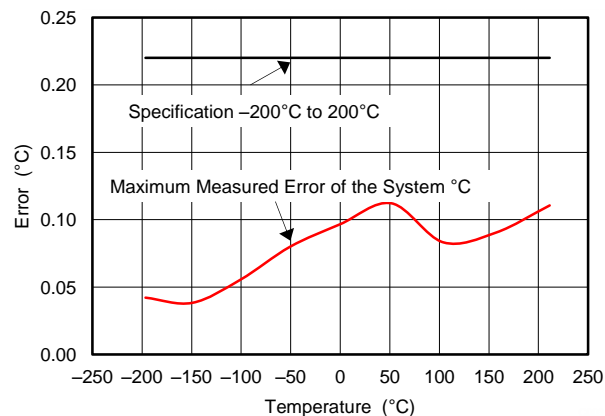


图 46. 完整系统特性化设置

表 8. 系统的最大测量误差

基于测量的精密电阻的参考温度	基于精密电阻的理想 DAC 值 (mA)	测量的系统回路电流值 (mA)
-196.570346	4.05226	4.05162
-149.332074	4.77208	4.7715
-100.650615	5.51390	5.51305
-50.776173	6.27389	6.27267
0.00614	7.04771	7.04624
51.555661	7.83323	7.83152
103.92953	8.63131	8.63004
157.147496	9.44225	9.44087
211.301704	10.26745	10.26577
266.349859	11.10628	11.10424
322.397013	11.96034	11.95823
379.431081	12.82943	12.82701
437.656	13.71666	13.71394
497.077256	14.62213	14.62009
557.690044	15.54575	15.54366
650.910269	16.96625	16.96715
747.831551	18.44315	18.44242
814.135104	19.45349	19.45557


 图 47. 完整系统在 -200°C 至 850°C 范围内的最大测量误差

 图 48. 完整系统在 -200°C 至 200°C 范围内的最大测量误差

6.7 电源影响

对于电源影响测试，将电源设置为 10V 至 30V，并记录相应的回路电流变化。一个 100Ω 精密电阻连接到 RTD 输入以进行此测量（请参见图 46）。电源范围内的回路电流合计偏差小于 0.30μA。

6.8 反极性测试

对于反极性测试，将电源引线连接到 J1，不使用任何极化电容，如图 49 所示。

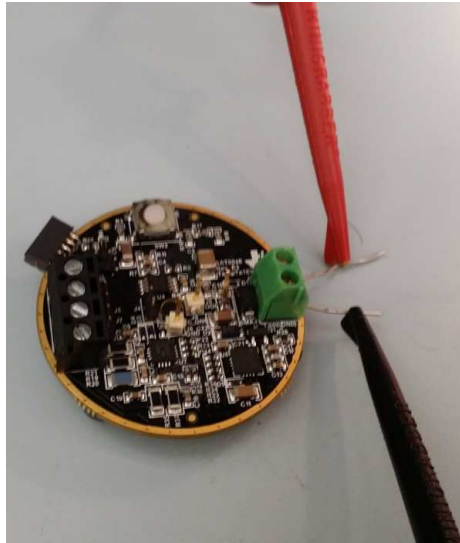


图 49. 反极性测试设置



图 50. 极性正确的反极性设置

默认情况下，未编程系统的电流消耗为 3.37mA。

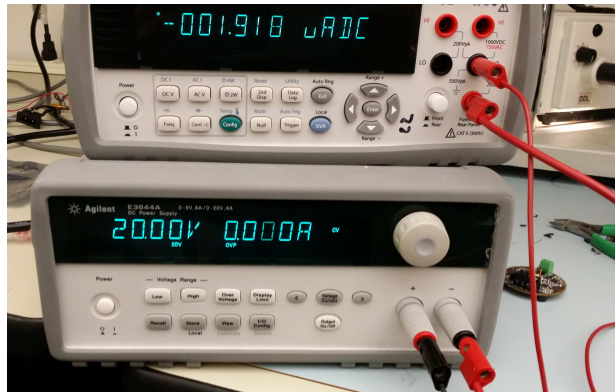


图 51. 极性相反的反极性测量

应用反极性时，系统的泄漏电流仅为约 2μA。

6.9 回路功耗

本设计的总回路功耗为 1.435mA。表 9 列出了每个器件消耗的总电流。

表 9. 回路功耗

器件	电流
ADS1220	340μA + 75μA + 500μA (偏置电流) = 915μA (PGA 16, 正常模式, 20SPS 采样率)
DAC161S997	100μA
MSP430G2513	360μA (1MHz、3.3V 时的工作模式电流)
TPS7A4901	60μA

对于回路供电系统，大约 1.4mA 的低功耗可确保将预算的其余部分 (约 $[3.3\text{mA} - 1.4\text{mA}] = 1.9\text{mA}$) 用于系统级功能，如 HART 调制解调器实现。

6.10 IEC 61000-4-4 和 IEC61000-4-2 保护

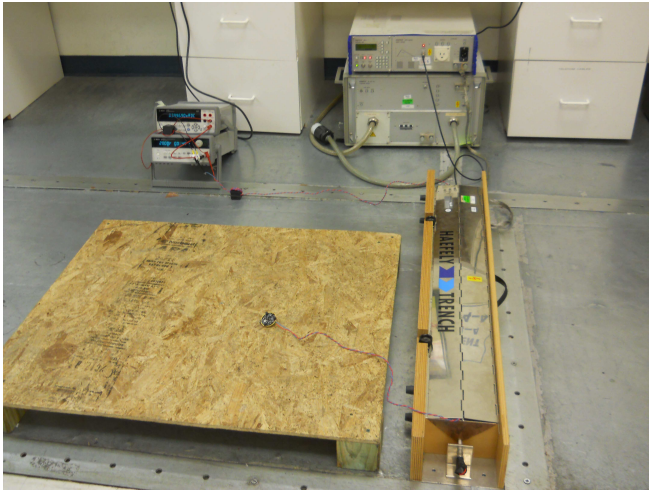


图 52. IEC61000-4-4 EFT 设置

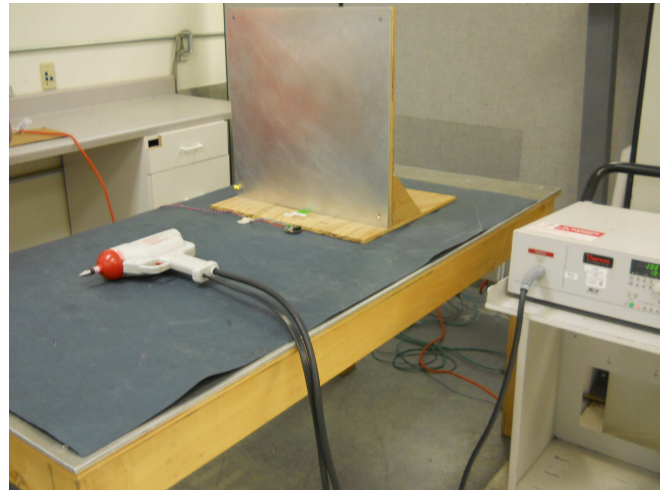


图 53. IEC61000-4-2 ESD 设置

对于 IEC61000-4-4 和 IEC61000-4-2 测试，对系统供电并在电源冲击之前、期间和之后测量回路电流。在两种测试中，测量出的回路电流最大偏置小于 $3.5\mu\text{A}$ （对应于 0.21°C ）（请参见图 47）。

注： IEC61000 测试仅在回路电源输入或 J1 连接器上执行。

表 10. IEC61000 测试数据

IEC61000 测试	结果
对回路电源的 IEC ESD 保护	IEC61000-4-2, ESD: 水平耦合板。垂直耦合板: $\pm 4\text{kV}$ - A 类
	IEC61000-4-2, ESD: 空气放电: $\pm 8\text{kV}$ - A 类
对回路电源的 IEC EFT 保护	IEC61000-4-4: EFT $\pm 2\text{kV}$ - A 类

7 电路原理图

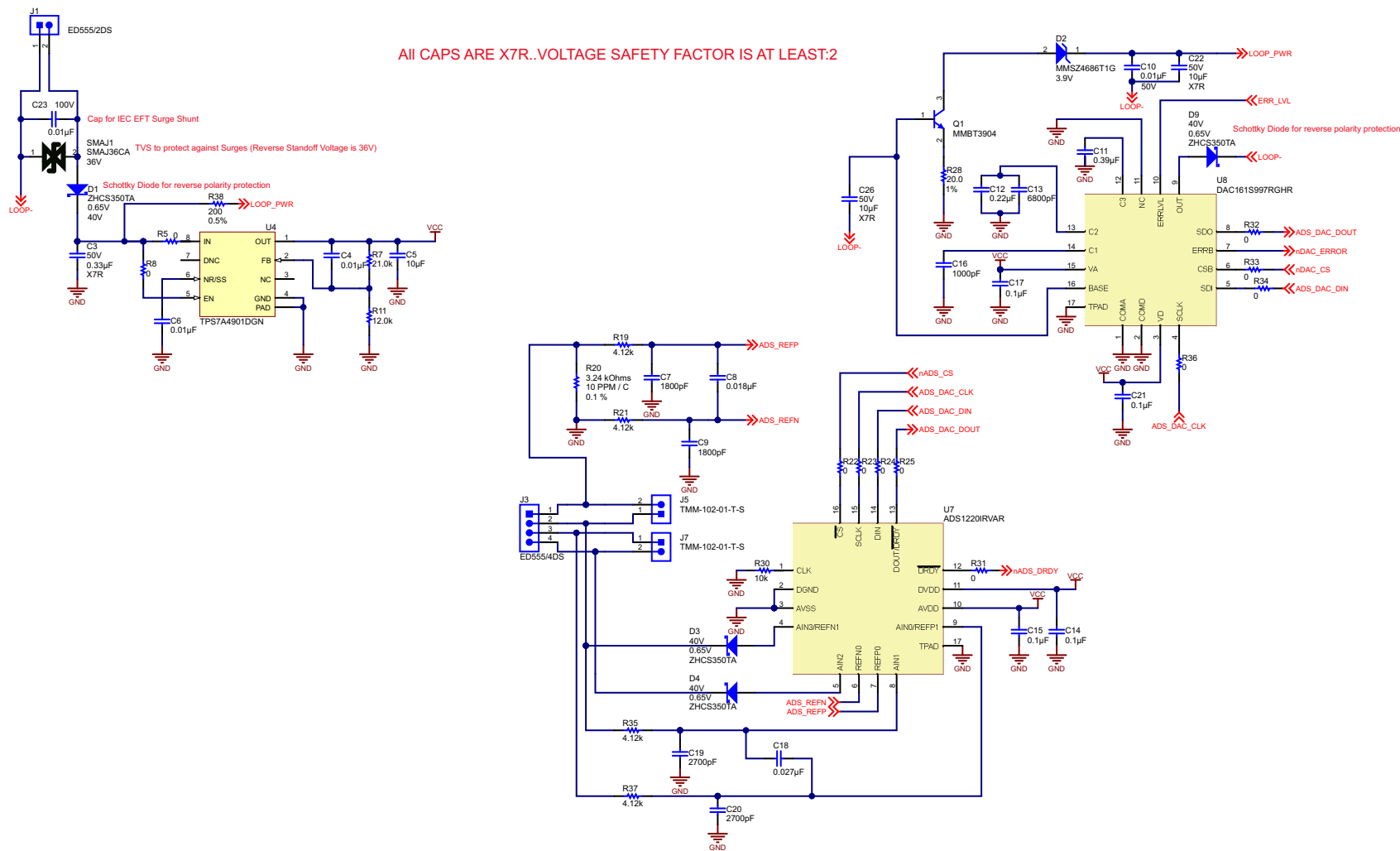


图 54. ADS1220、DAC161S997、电源部分

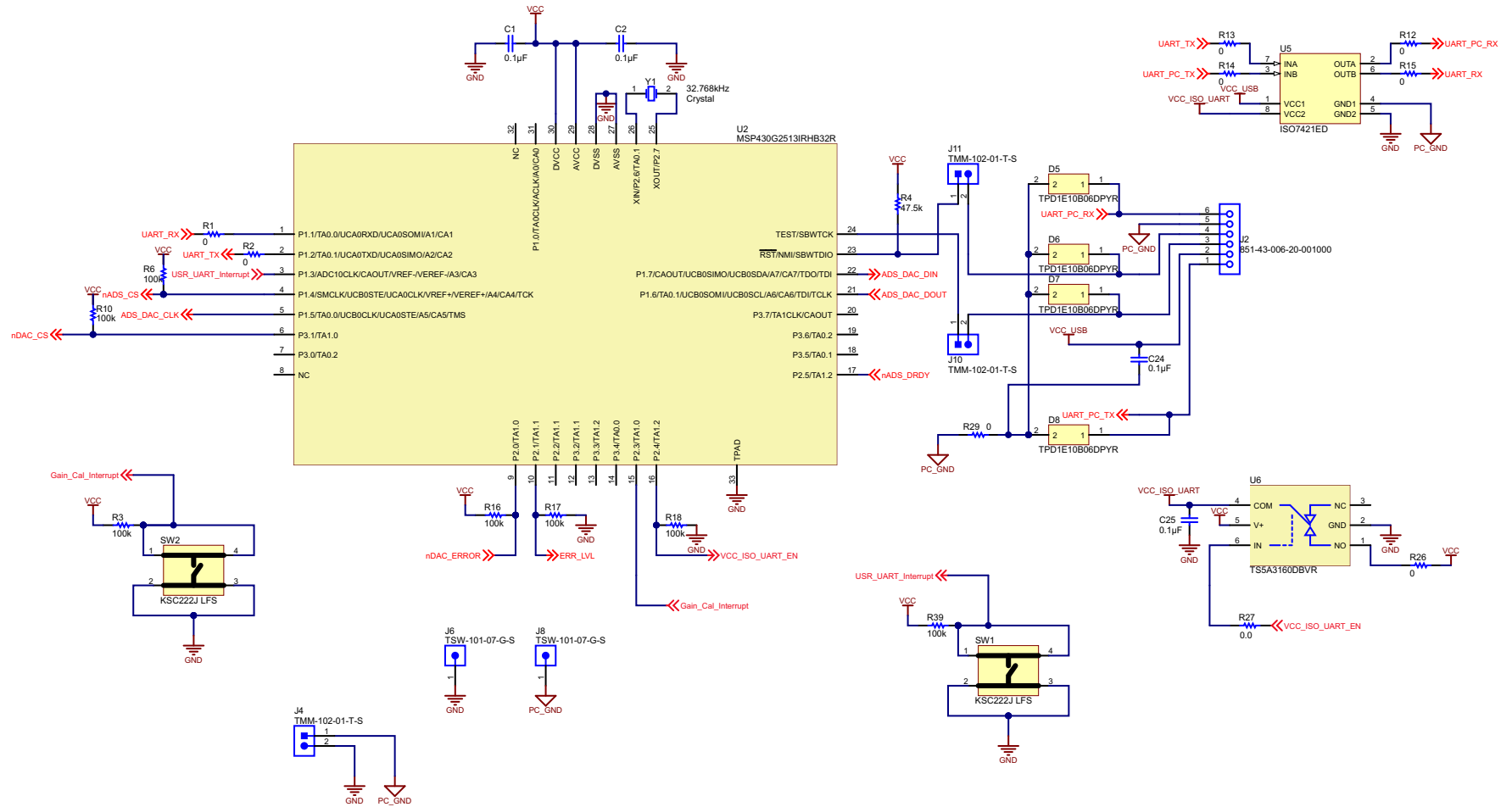


图 55. MSP430 部分

8 物料清单

要下载每种电路板的物料清单 (BOM), 请参见 www.ti.com/tool/TIDA-0095 上的设计文件。表 11 列出了 BOM。

表 11. BOM

标识符	数量	值	说明	封装编号	部件号	制造商
!PCB1	1		印刷电路板		SAT0046	任意
C1, C2, C14, C15, C17, C21, C24, C25	8	0.1 μ F	电容, 陶瓷, 0.1 μ F, 16V, \pm 10%, X7R, 0603	0603	C0603X104K4RACTU	基美 (Kemet)
C3	1	0.33 μ F	电容, 陶瓷, 0.33 μ F, 50V, \pm 10%, X7R, 1206	1206	12065C334KAT2A	AVX
C4, C6, C10	3	0.01 μ F	电容, 陶瓷, 0.01 μ F, 50V, \pm 5%, X7R, 0603	0603	C0603C103J5RACTU	基美 (Kemet)
C5	1	10 μ F	电容, 陶瓷, 10 μ F, 16V, \pm 10%, X7R, 1206	1206	GRM31CR71C106KAC7L	村田 (Murata)
C7, C9	2	1800pF	电容, 陶瓷, 1800PF, 100V, 10%, X7R, 0603	例如: 0603, 用于 PnP 报告	用于 BOM 报告	用于 BOM 报告
C8	1	0.018 μ F	电容, 陶瓷, 0.018 μ F, 100V, \pm 10%, X7R, 0603	0603	C0603C183K1RACTU	基美 (Kemet)
C11	1	0.39 μ F	电容, 陶瓷, 0.39 μ F, 50V, \pm 10%, X7R, 1206	1206	GRM31MR71H394KA01L	村田 (Murata)
C12	1	0.22 μ F	电容, 陶瓷, 0.22 μ F, 50V, \pm 5%, X7R, 1206	1206	C1206C224J5RACTU	基美 (Kemet)
C13	1	6800pF	电容, 陶瓷, 6800pF, 50V, \pm 5%, X7R, 0603	0603	C0603C682J5RACTU	基美 (Kemet)
C16	1	1000pF	电容, 陶瓷, 1000pF, 50V, \pm 5%, X7R, 0603	0603	C0603C102J5RACTU	基美 (Kemet)
C18	1	0.027 μ F	电容, 陶瓷, 0.027 μ F, 100V, \pm 10%, X7R, 0603	0603	C0603C273K1RACTU	基美 (Kemet)
C19, C20	2	2700pF	电容, 陶瓷, 2700PF, 100V, 10%, X7R, 0603	例如: 0603, 用于 PnP 报告	用于 BOM 报告	用于 BOM 报告
C22, C26	2	10 μ F	电容, 陶瓷, 10 μ F, 50V, \pm 10%, X7R, 1210	1210	GRM32ER71H106KA12L	村田 (Murata)
C23	1	0.01 μ F	电容, 陶瓷, 0.01 μ F, 100V, \pm 10%, X7R, 0603	0603	C1608X7R2A103K	TDK
D1, D3, D4, D9	4	0.65V	二极管, 肖特基, 40V, 0.35A, SOD-523	SOD-523	ZHCS350TA	Diodes Inc.
D2	1	3.9V	二极管, 齐纳二极管, 3.9V, 500mW, SOD-123	SOD-123	MMSZ4686T1G	安森美半导体 (ON Semiconductor)
D5, D6, D7, D8	4		ESD, 0402 封装, 10pF 电容和 6V 击穿电压, 单通道, -40°C 至 125°C , 2 引脚 X2SON (DPY), 绿色环保 (符合 RoHS 且无镉/无溴)	DPY0002A	TPD1E10B06DPYR	德州仪器 (TI)
FID1, FID2, FID3, FID4, FID5, FID6	6		基准标记。没有需要购买或安装的元件。	基准	不可用	不可用
H1, H2, H3	3		缓冲垫, 圆柱形, 0.312 X 0.200, 黑色	黑色缓冲垫	SJ61A1	3M
J1	1		引脚块, 6A, 3.5mm 间距, 2-Pos, TH	7.0x8.2x6.5mm	ED555/2DS	On-Shore Technology
J2	1		插座, 50mil, 6x1, R/A, TH	插座, 6x1, 50mil 间距, R/A	851-43-006-20-001000	Mill-Max
J3	1		引脚块, 6A, 3.5mm 间距, 4-Pos, TH	14x8.2x6.5mm	ED555/4DS	On-Shore Technology
J4, J5, J7, J10, J11	5		插头, 2mm, 2x1, 锡, TH	插头, 2mm, 2x1	TMM-102-01-T-S	申泰 (Samtec)
J6, J8	2		插头, TH, 100mil, 1pos, 镀金, 在隔离器以上 230mil	测试点	TSW-101-07-G-S	申泰 (Samtec)

表 11. BOM (continued)

标识符	数量	值	说明	封装编号	部件号	制造商
Q1	1	0.2V	晶体管, NPN, 40V, 0.2A, SOT-23	SOT-23	MMBT3904	仙童半导体 (Fairchild Semiconductor)
R1, R2, R5, R8, R12, R13, R14, R15, R22, R23, R24, R25, R26, R29, R31, R32, R33, R34, R36	19	0	电阻, 0Ω, 5%, 0.063W, 0402	0402	CRCW04020000Z0ED	威世达勒 (Vishay-Dale)
R3, R6, R10, R16, R17, R18, R39	7	100k	电阻, 100kΩ, 0.1%, 0.1W, 0603	0603	RT0603BRD07100KL	Yageo America
R4	1	47.5k	电阻, 47.5kΩ, 0.1%, 0.1W, 0603	0603	RG1608P-4752-B-T5	Susumu Co Ltd
R7	1	21.0k	电阻, 21.0kΩ, 1%, 0.1W, 0603	0603	RC0603FR-0721KL	Yageo America
R11	1	12.0k	电阻, 12.0kΩ, 1%, 0.1W, 0603	0603	RC0603FR-0712KL	Yageo America
R19, R21, R35, R37	4	4.12k	电阻, 4.12kΩ, 1/4W, 0.1%, 1206, SMD	1206 (公制 3216)	ERA-8AEB4121V	Panasonic Electronic Components
R20	1	3.24kΩ	薄膜电阻 - SMD, 3.24K, 0.1%, 10ppm	1206 (公制 3216)	PFC-W1206R-12-3241-B	IRC / TT electronics
R27	1	0.0	电阻, 0.0Ω, 1/10W, 跳线, 0603, SMD	0603 (公制 1608)	ERJ-3GEY0R00V	Panasonic Electronic Components
R28	1	20.0	电阻, 20.0Ω, 1%, 0.1W, 0603	0603	CRCW060320R0FKEA	威世达勒 (Vishay-Dale)
R30	1	10k	电阻, xxxΩ, x%, xW, [封装编号]	0402 (公制 1005)	CRCW040210K0FKEDHP	威世达勒 (Vishay Dale)
R38	1	200	电阻, 200Ω, 0.5%, 0.1W, 0603	0603	RT0603DRE07200RL	Yageo America
SMAJ1	1		二极管, TVS, 36V, 400W, BI, 5%, SMD	DO-214AC, SMA	SMAJ36CA	Bourns Inc.
SW1, SW2	2		触控式开关, 单刀单掷-常开, 0.05A, 32V		KSC222J LFS	C&K Components
U2	1		IC MCU 16 位, 16KB 闪存, 32QFN	32-VFQFN 外露垫	MSP430G2513IRHB32R	德州仪器 (TI)
U4	1		+36V, +150mA, 超低噪声, 正线性稳压器, DGN0008D	DGN0008D	TPS7A4901DGN	德州仪器 (TI)
U5	1		50Mbps 低功耗双通道数字隔离器, 3.3V/5V, -40 至 +125°C, 8 引脚 SOIC (D), 绿色环保 (符合 RoHS 且无镉/无溴)	D0008A	ISO7421ED	德州仪器 (TI)
U6	1		IC 开关 SPDT SOT23-6		TS5A3160DBVR	德州仪器 (TI)
U7	1		用于小信号传感器的低功耗、低噪声、24 位模数转换器		ADS1220IRVAR	德州仪器 (TI)
U8	1		IC DAC 16 位, SPI/SRL, 16WQFN	16-WFQFN 外露垫	DAC161S997RGHR	德州仪器 (TI)
Y1	1		晶振, 32.768kHz, 12.5pF, SMD	2-SMD	NX3215SA-32.768K-STD-MUS-2	电波工业 (NDK)

9 板层图

要下载每种电路板的板层图，请参见 www.ti.com/tool/TIDA-0095 上的设计文件。图 56 给出了板层图。



图 56. 板层图

10 Altium 项目

要下载每种电路板的 Altium 项目文件，请参见 www.ti.com/tool/TIDA-0095 上的设计文件。图 57、图 58、图 59、图 60 和图 61 显示了布局。

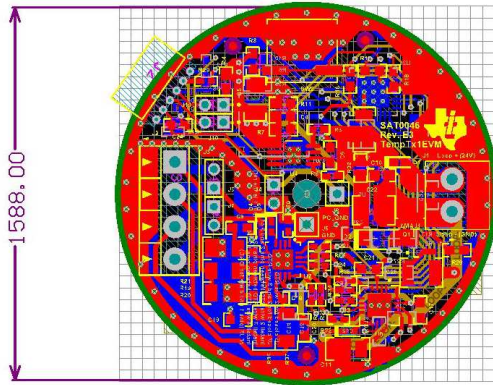


图 57. 全部 板层

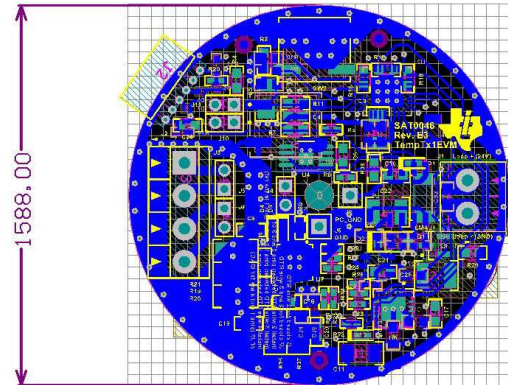


图 58. 底层

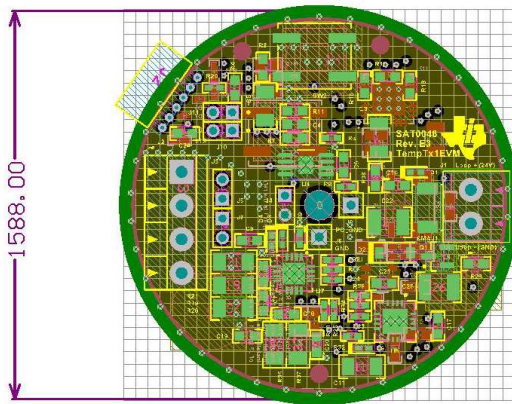


图 59. 接地层

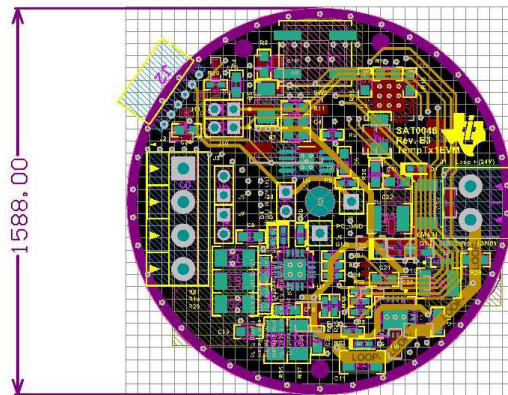


图 60. 内层

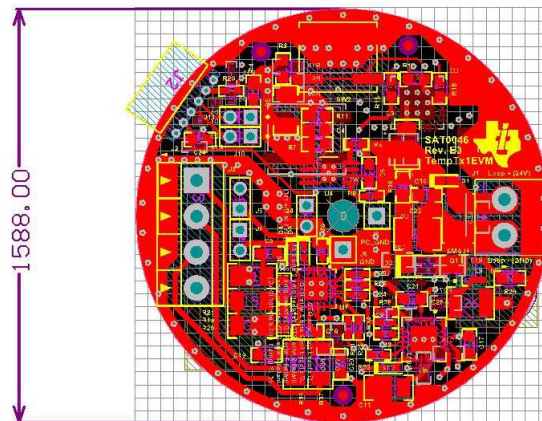


图 61. 顶层

11 布局指南

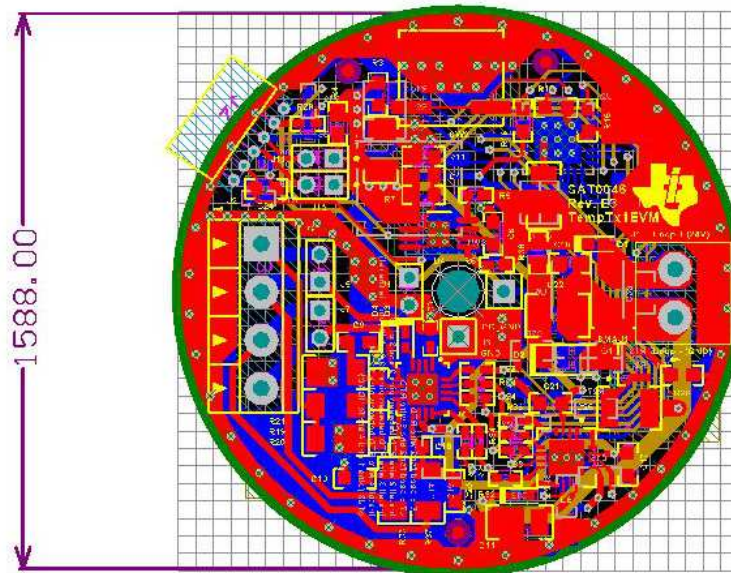


图 62. 过孔缝合

为确保高性能模拟设计，ADS1220 器件和 RTD 输入通过大量接地过孔缝合与设计的其余部分隔离。任何未使用的层也都与接地过孔缝合。

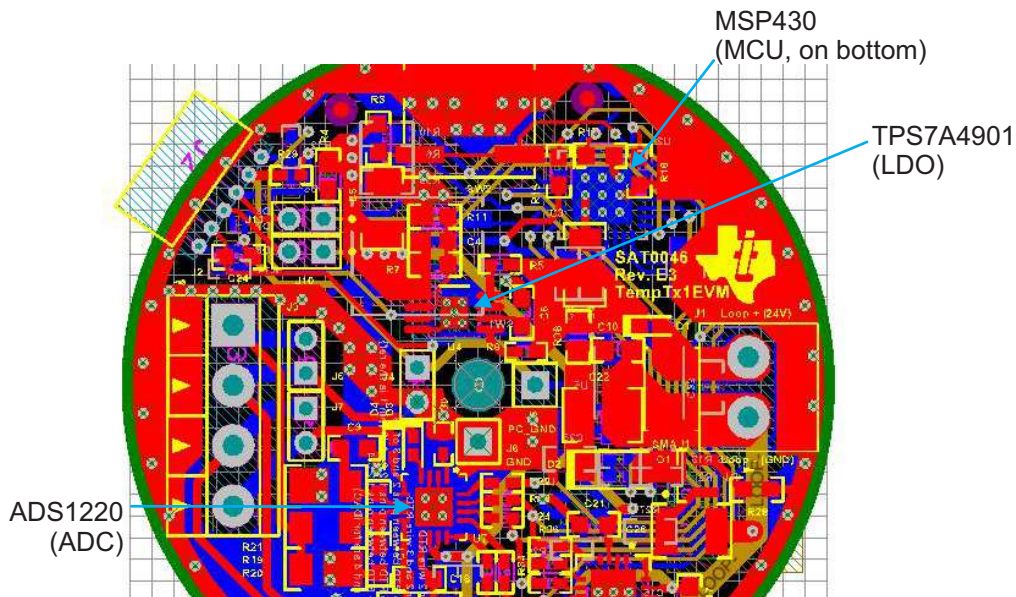


图 63. 相对于模拟部分的 MSP430 和 LDO

MSP430 MCU 和 LDO 尽可能远离 ADS1220 部分中没有数字路由的 ADS1220 器件放置。

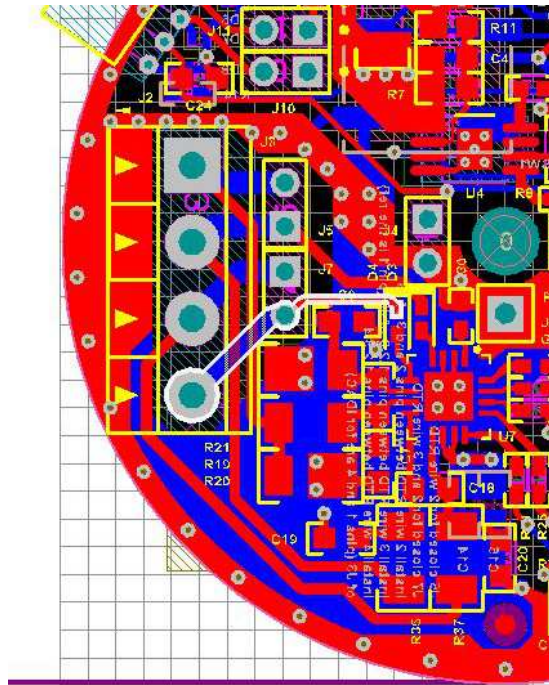


图 64. RTD 输入

在不使用除通孔跳线以外的任何过孔的情况下对 RTD 输入进行路由。

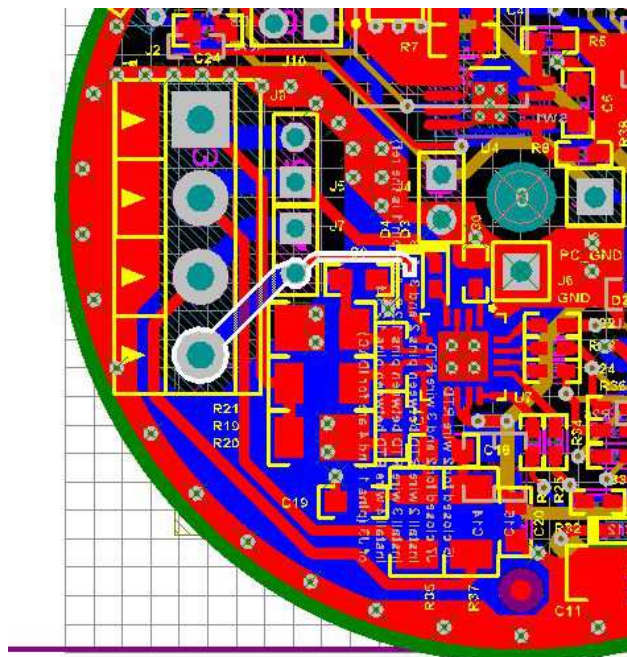


图 65. ADS1220 部分

ADS1220 部分中没有数字路由。

12 光绘文件

要下载每种电路板的光绘文件，请参见 www.ti.com/tool/TIDA-0095 上的设计文件。

Layer	Color	Copper Thickness	Microvia Depth	Microvia Wall	Microvia Spacing	Microvia Core	Microvia Prepreg
Top Solder Mask	(.875)	0.4mil					
Top Layer	(.875)	1.4mil	12.6mil	3/09R		4.80	Core
Prepreg	(.875)	1.4mil	12.6mil	3/09R		4.80	Prepreg
Inner 1	(.875)	1.4mil	12.6mil	3/09R		4.80	Core
Bottom Layer	(.875)	1.4mil	12.6mil	3/09R		4.80	Core
Bottom Solder Mask	(.875)	0.4mil					

Symbol	Hit Count	Tool Size	Plated	Hole Type
○	5	7.874mil (0.2mm)	PTH	Round
□	16	11.811mil (0.3mm)	PTH	Round
▽	120	12mil (0.305mm)	PTH	Round
○	6	18mil (0.457mm)	PTH	Round
⊗	10	35mil (0.889mm)	PTH	Round
⊘	2	40mil (1.016mm)	PTH	Round
⊙	6	50mil (1.27mm)	PTH	Round
◇	1	125mil (3.175mm)	PTH	Round
166 Total				

Drill Table

DESIGN INFORMATION

BOARD SIZE (REFER ALSO ARRAY/PANEL PROFILING INFORMATION)
1588 MILS DIA.

Number of Layers : 4
 MN. TRACK WIDTH: 6 MIL
 MN. CLEARANCE: 10 MIL
 MN. VIA PAD SIZE: 28 MIL

MINIMUM ANNULAR RING 0.05mm (2ML) EXTERNAL
 PER IPC-D-275 CLASS 2 LEVEL C
 REGISTRATION TOLERANCES: METAL +/- .5 MIL, HOLES +/- .3 MIL

MATERIAL:
 FR-4 FR-4 High Tg OTHER

THICKNESS: 44 MIL (1.1mm) +/-10% OTHER

TOLERANCE: ANSI IPC-6012 TYPE 3 CLASS 2
 OTHER +/-

BOW & TWIST: ANSI IPC-6012 TYPE 3 CLASS 2
 OTHER +/-

COPPER THICKNESS (FINISHED):
 OUTER: 1.4MIL (1oz) 2MIL (1.4oz) 2.8MIL (2oz)
 INNER SIGNAL: 1.4MIL (1oz) 2.8MIL (2oz) N/A

DRILLING:
 REFERENCE: AS SHOWN NC DRILL FILES
 PTH MIN COPPER THICKNESS: 1MIL OTHER

BOARD FINISH:
 SILKSCREEN: TOP BOTTOM
 SILKSCREEN COLOR: WHITE OTHER

SOLDER RESIST COLOR:
 GREEN BLUE OTHER BLACK

SURFACE FINISH: IMMERSION GOLD (ENIG)
 MM. TIN/SILVER OR EQUIV OTHER

ARRAY/PANEL: CUT AND TRIM PER MECH LAYER 1
 N.C. ROUTE V. SCORE

CERTIFICATION: MATERIALS AND WORKMANSHIP FOR ALL PCBs TO MEET OR EXCEED THE REQUIREMENTS OF:
 ANSI IPC-A-600F CLASS -> 1 2 3
 UL 94V-0 RoHS OTHER PER ORDER

ADDITIONAL REQUIREMENTS:
 MICROSECTION: YES
 BARE BOARD ELEC. TEST: NONE REQUIRED PER ORDER
 MANUFACTURER'S ID/LOGO: RAL METAL SILK

TEXAS INSTRUMENTS

PROJECT TITLE: SAT0046
 DESIGNED FOR: Public Release
 FILE NAME: SAT0046_E4.PcbDoc

ENGINEER: Ajinder Singh LAYOUT BY: Krypton Solutions LLC
 ALTUM DESIGNER VERSION: 10.0.0.27009
 SCALE: 1.00

图 66. 制作图

13 装配图

要下载参考设计的装配图，请参见 www.ti.com/tool/TIDA-0095 上的设计文件。

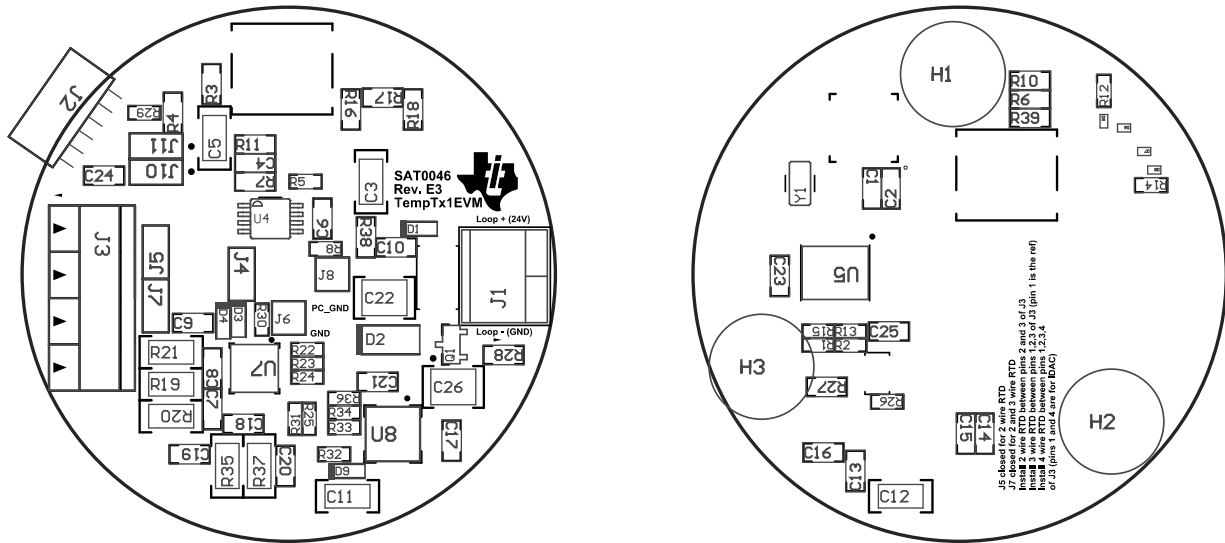


图 67. 装配图

14 软件文件

要下载参考设计的软件文件，请参见 www.ti.com/tool/TIDA-0095 上的设计文件。

15 参考

更多参考，请参见以下文档：

1. 应用报告，《使用 ADS1148 和 ADS1248 系列器件进行 RTD 比例测量和滤波》，[SBAA201](#)
2. TI 高精度设计指南，《0-1A、单电源、低侧、电流感应解决方案》，[TIDU040](#)
3. TI 高精度设计指南，《硬件补偿比例式 3 线 RTD 系统，0°C – 100°C，0.005°C 误差》，[TIDU045](#)
4. ADS1220 数据表，[SBAS501](#)
5. DAC161S997 数据表，[SNAS621](#)
6. MSP430G2513 数据表，[SLAS735](#)
7. TPS7A4901 数据表，[SBVS121](#)

16 关于作者

AJINDER PAL SINGH 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。Ajinder 在高速数字、低噪声模拟和 RF 系统级设计专业知识方面拥有丰富经验。Ajinder 拥有德州卢博克市德州理工大学的电气工程硕士学位 (MSEE)。Ajinder 是电气电子工程师协会 (IEEE) 的成员。

版本历史记录

Changes from Original (January 2014) to A Revision	Page
• 已更改 图 16 中的原理图（针对 E4 之前的电路板版本）	19
• 已更改 图 17 中的原理图（针对 E4 之前的电路板版本）	20
• 已更改 图 18 中的原理图（针对 E4 之前的电路板版本）	20
• 已添加 电源排序部分以及展示电容 C3、C22 和 C26 的原理图	21
• 已更改 图 20 中的原理图和电路板布局（针对 E4 之前的电路板版本）	22
• 已更改 原理图图 54 和图 55（针对 E4 之前的电路板版本）	44
• 已更改 表 11 中的 BOM（针对 E4 之前的电路板版本）	46
• 已更改 图 56 中的板层图（针对 E4 之前的电路板版本）。已添加两个新的板层图。	49
• 已更改 图 57、图 58、图 59、图 60 和图 61 中的 Altium 布局图（针对 E4 之前的电路板版本）	50
• 已更改 图 66 中的制作图（针对 E4 之前的电路板版本）	53
• 已添加 图 67 中的装配图（针对 E4 之前的电路板版本）	54

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

评估模块的标准条款和条件

1. 交付: TI 根据此处所列之条款与条件向用户交付 TI 评估板、套件或模块, 包括任何随附的演示软件、组件或文档(统称为“EVM”)。EVM 的验收明确受到以下条款和条件的限制。
 - 1.1 EVM 仅供产品或软件开发人员用于开展旨在促进 TI 半导体产品的可行性评估、实验或科学分析的调研工作。EVM 并不具有直接功能, 而且也并非成品。不得直接或间接地将 EVM 组装为成品的组成零件或组件。为明确起见, 任何随 EVM 提供的软件或软件工具(“软件”)均不应受到此处提及的条款与条件的约束, 但应遵循上述软件随附的适用条款与条件。
 - 1.2 EVM 不供消费者或家庭使用。用户不得出于商业目的出售、转售、出租、租借、借出、转让或以其他方式分配整体或部分的 EVM, 或将其用于任何成品或生产系统中。
- 2 有限保修和相关补救措施/免责声明:
 - 2.1 这些条款和条件不适用于软件。如果有任何的软件保修, 则都涵盖在适用的软件许可协议中。
 - 2.2 TI 保证, 在 TI 将 TI EVM 交付给用户后的九十 (90) 天内, TI EVM 都将符合 TI 已发布的规范。尽管有上述规定, 但 TI 不对任何由除 TI 之外的实体的疏忽、错误使用或错误处理(包括错误安装或测试)所引起的缺陷负责, 也不对经过除 TI 之外的实体改动或修改的任何 EVM 负责。此外, TI 不对任何由用户对 EVM 进行的设计、制定的规范或实施的指令所引起的缺陷负责。仅在 TI 认为必要或受到政府要求时才使用测试和其他质量控制技术。TI 不会测试每个 EVM 的所有参数。
 - 2.3 如果有任何 EVM 不符合上述保证, TI 唯一的责任是选择修复或更换此类 EVM, 或者将针对此类 EVM 的补偿金汇入用户的账户。在此保证的规定下, TI 要负责的 EVM 应仅限于在保修期限内返回到 TI 指定地址且由 TI 确定不符合此保证的 EVM。如果 TI 选择修复或更换此类 EVM, TI 应在合理的时间内修复此类 EVM 或提供替换件。修复的 EVM 的保修期应为初始保修期的剩余部分。更换的 EVM 的保修期应为重新开始计算的完整九十 (90) 天。
- 3 监管声明:
 - 3.1 美国

3.1.1 适用于未获 FCC 批准的 EVM 的声明:

设计该套件的目的在于帮助产品开发人员评估电子组件、电路或与套件相关联的软件, 以确定是否要将上述产品增加到成品中, 并帮助软件开发人员编写与最终产品配套使用的软件应用。该套件并非成品, 组装后不得转售或在市场上出售, 除非先获得所需的所有 FCC 设备授权。必须满足以下条件才能执行操作: 本产品不会对经许可的无线电台造成有害干扰; 本产品接受有害干扰。除非非组装套件设计用于在本章第 15、18 或 95 节规定下进行操作, 否则该套件的操作人员必须根据 FCC 许可证持有者的授权执行操作, 或须根据本章第 5 节获得实验授权。

3.1.2 对于注释为与 FCC - 联邦通信委员会第 15 部分兼容的 EVM:

注意事项

这个器件符合 FCC 标准的第 15 部分。运行应满足以下两个条件: (1) 这个器件不会带来有害干扰, 以及 (2) 这个器件必须接受任何收到的干扰, 其中包括有可能引起非所需运行的干扰。

未经合规负责方明示同意的任何更改或改动都可能导致用户操作本设备的授权失效。

针对 A 类 EVM 器件的 FCC 干扰声明

注意: 根据 FCC 规则第 15 部分的规定, 本设备已经过测试并证明符合 A 类数字器件的限制要求。当此设备运行在商用环境时, 这些限值设计用于提供对有害干扰的合理保护。本设备会产生、使用并可辐射射频能量, 如不按照指导手册安装和使用, 可能给无线电通讯带来有害干扰。在住宅区使用本设备有可能导致有害干扰, 在这种情况下, 用户将需独自承担消除此干扰所需的费用。

针对 B 类 EVM 器件的 FCC 干扰声明

注意: 根据 FCC 规则第 15 部分的规定, 本设备已经过测试, 证明符合 B 类数字器件的限制要求。这些限制旨在在住宅安装中提供合理保护, 防止有害干扰。本设备会产生、使用并可辐射射频能量, 如不按照指导手册安装和使用, 可能给无线电通讯带来有害干扰。不过, 我们不保证在特定的安装中不会产生干扰。如果通过打开和关闭本设备来确定是否本设备确实给收音机或电视接收带来了有害干扰, 建议用户尝试以下一种或多种措施消除干扰:

- 重定向或重定位接收天线。
- 增大设备和接收器间的距离。
- 将设备连接到不同于接收器所连接电路上的插座上。
- 咨询经销商或有经验的无线电/TV 技术人员以获得帮助。

3.2 加拿大

3.2.1 对于附有符合 RSS-210 的加拿大工业部证书的 EVM

与包含无线电发射器的 EVM 相关的事宜:

此器件符合加拿大工业许可证 RSS 标准。运行应满足以下两个条件: (1) 这个器件不会带来干扰, 以及 (2) 这个器件必须接受任何干扰, 其中包括有可能导致器件意外运行的干扰。

与包含无线电接收器的 EVM 相关的事宜:

本器件符合加拿大工业许可证 RSS 标准。运行应满足以下两个条件: (1) 这个器件不会带来有害干扰, 以及 (2) 这个器件必须接受任何干扰, 其中包括有可能导致器件非所需运行的干扰。

与包含可分离天线的 EVM 相关的事宜:

按照加拿大工业部规定, 这个无线电发射器只有在使用加拿大工业部规定针对此发射器所批准的一种类型的天线以及最大 (或较小) 增益时才可运行。为了减少对其它用户潜在的无线电干扰, 在选择天线类型和其增益时应考虑到等效全向辐射功率 (e.i.r.p.) 不大于正常通信所需的功率。本无线电发射器已经加拿大工业部批准, 可与用户指南中所列的天线类型一起运行, 运行时针对每个所标明的天线类型, 可达到最大可允许增益和所需的天线阻抗。严格禁止将这个列表中未列出的类型的天线 (具有大于针对那种类型天线所标明的最大增益) 与器件一起使用。

与包含可分离天线的 EVM 相关的事宜

按照加拿大工业标准, 这个无线电接收器只有在使用加拿大工业标准针对此接收器所批准的一种类型的天线以及最大 (或较小) 增益时才可运行。为了减少对其他用户潜在的无线电干扰, 在选择天线类型和其增益时应考虑到等效全向辐射功率 (p.i.r.e.) 不大于正常通信所需的功率。本无线电接收器已经加拿大工业规则批准, 可与用户指南中所列的天线类型一起运行, 运行时针对每个所标明的天线类型, 可达到最大可允许增益和所需的天线阻抗。严格禁止将这个列表中未列出的类型的天线 (具有大于针对那种类型天线所标明的最大增益) 与器件一起使用。

3.3 日本

3.3.1 针对在日本交付的 EVM 的声明: 请参见 http://www.tij.co.jp/lstds/ti_ja/general/eStore/notice_01.page 日本国内に輸入される評価用キット、ボードについては、次のところをご覧ください。

http://www.tij.co.jp/lstds/ti_ja/general/eStore/notice_01.page

3.3.2 针对在日本被认为是“射频产品”的 EVM 的用户的声明: 进入日本的 EVM 可能未经 TI 认证为符合日本无线电法的技术法规。

如果用户在日本使用 EVM, 并且未通过日本无线电法的技术规范的认证, 则日本无线电法要求用户遵守下面与 EVM 有关的指示:

1. 在屏蔽室或其他任何由 173 号通知定义的测试设施内使用 EVM。173 号通知由内务与通信部在 2006 年 3 月 28 日发布, 所根据的是该部用于实施日本无线电法的规定的第 6 款的 1.1 条。
2. 仅在用户获得有关 EVM 的日本无线电法中提供的测试无线电台许可后使用 EVM。
3. 仅在用户获得有关 EVM 的日本无线电法中提供的技术法规符合性认证后使用 EVM。此外, 除非用户将以上注意事项告知受让人, 否则不得转让 EVM。请注意, 如果用户不遵守以上指令, 则将受到日本无线电法的处罚。

【無線電波を送信する製品の開発キットをお使いになる際の注意事項】開発キットの中には技術基準適合証明を受けていないものがあります。技術適合証明を受けていないものご使用に際しては、電波法遵守のため、以下のいずれかの措置を取っていただく必要がありますのでご注意ください。

1. 電波法施行規則第6条第1項第1号に基づく平成18年3月28日総務省告示第173号で定められた電波暗室等の試験設備でご使用いただく。
2. 実験局の免許を取得後ご使用いただく。
3. 技術基準適合証明を取得後ご使用いただく。

なお、本製品は、上記の「ご使用にあたっての注意」を譲渡先、移転先に通知しない限り、譲渡、移転できないものとします。

上記を遵守頂けない場合は、電波法の罰則が適用される可能性があることをご留意ください。日本テキサス・インスツルメンツ株式会社

東京都新宿区西新宿 6 丁目 2 4 番 1 号
西新宿三井ビル

3.3.3 针对用于电力线通信的 EVM 的声明: 请参见 http://www.tij.co.jp/lstds/ti_ja/general/eStore/notice_02.page

電力線搬送波通信についての開発キットをお使いになる際の注意事項については、次のところをご覧ください。 http://www.tij.co.jp/lstds/ti_ja/general/eStore/notice_02.page

4 EVM 使用限制和警告:

- 4.1 EVM 不用于功能安全和/或安全关键型评估, 包括但不限于对生命支持应用的评估。
- 4.2 用户在处理或使用 EVM 前必须先阅读并应用用户指南以及 TI 提供的有关 EVM 的其他可用文档, 包括但不限于任何警告或限制注意事项。这些注意事项包含了重要的安全信息, 例如有关温度和电压的安全信息。

4.3 有关安全的警告和限制:

4.3.1 用户操作 EVM 时必须遵照在用户指南、TI 提供的其他可用文档以及其他任何适用要求中叙述的 TI 推荐规范和环境方面的考虑, 并要采取合理的惯用保护措施。超出 EVM 的指定性能等级和规范(包括但不限于输入和输出电压、电流、功率和环境范围)将有可能造成人员伤亡或财产损失。如果遇到性能等级和规范方面的问题, 用户应该在连接接口电子元件(包括输入电源和目标负载)之前联系 TI 现场代表。如果施加的负载超出了指定输入范围, 就可能导致 EVM 和/或接口电子元件出现不良和/或错误运作。在将任何负载连接到 EVM 输出之前, 请先参阅 EVM 用户指南。如果您对负载规格有什么疑问, 请与 TI 的现场代表联系。在正常运行期间, 即使输入和输出都保持在指定的允许范围内, 一些电路元件的外壳温度仍有可能升高。这些组件包括但不限于线性稳压器、开关晶体管、传输管、电流检测电阻器以及散热器, 可以使用相关文档中的信息来确认这些组件。利用 EVM 进行工作时, 请注意 EVM 可能会变得非常热。

4.3.2 EVM 的目标用户仅限于熟悉处理电气和机械组件、系统和子系统时所涉及的危险和应用风险的具有合格技术资历的专业电子专家。用户有全部的责任和义务来让自己或自己的雇员、子公司、承包商或指派人员正确且安全地处理和使用 EVM。用户有全部的责任和义务来确保为 EVM 和人员身体之间的界面设计合适的隔离和将可接触泄漏电流限制在安全范围内的措施, 从而在最大程度上降低触电风险。如果用户或用户的雇员、子公司、承包商或指派人员对 EVM 进行了错误或不安全的处理或使用, 用户要承担全部责任和义务。

4.4 用户有全部的责任和义务来确定 EVM 是否属于任何与用户对 EVM 的处理和使用相关且适用的国际、联邦、州或地方法律法规的管辖范围, 并且在适用时, 用户有全部的责任和义务来在各个方面遵守这些法律法规。用户有全部的责任和义务按照所有适用的国际、联邦、州和地方要求对 EVM 进行正确的处理和回收利用。

5. 信息准确性: TI 会在提供有关 EVM 可用性和功能的信息时尽量保证准确。但是, TI 不保证 EVM 说明和 EVM 可用性的准确性, 也不保证其网站上的其他信息是准确、完整、可靠、最新且没有错误的。

6. 免责声明:

6.1 除了以上规定外, EVM 及其附带的任何书面设计材料(和 EVM 本身的设计)都按“原样”提供且“商品售出概不退换”。TI 否认所有其他明确声明或隐含的针对这些物品的保证, 包括但不限于任何对这些物品的适销性或在某特定用途方面的适用性的隐含保证, 以及对不侵犯任何第三方的专利、版权、商业秘密或其他知识产权的保证。

6.2 除了本文中叙述的使用 EVM 的有限权利以外, 不得将这些条款和条件中的任何内容理解为通过 TI、TI 的供应商/许可证颁发者或任何其他第三方的许可证、专利或其他任何工业或知识产权来批准或授予任何权利以在任何完成端用户或可随时使用的最终产品中使用 EVM 或者将 EVM 用于在交付 EVM 之前或之后进行、构想或获得的任何发明、发现或提升。

7. 用户的赔偿义务和代表。对于因违反这些条款和条件对 EVM 进行不当处理或使用而引起的或与之相关的任何索赔、伤害、损失、费用、成本和债务(总称为“索赔”), 用户都将为 TI 及其许可人和代表提供辩护及赔偿, 并保护我们免受损失。无论索赔符合法令、法规、侵权法、合同法还是其他任何法律理论, 即使 EVM 本身未能如描述或预期的那样正常运转, 此义务都适用。

8. 对损坏和责任的限制:

8.1 一般性限制。对于由与这些条款和条件相关的原因或由这些条款和条件引起的原因或因使用下文中提到的 EVM 而造成的任何特殊、附带、间接、惩罚性、偶发、从属或惩戒性损害赔偿, 不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿, TI 概不负责。排除在外的损害赔偿包括但不限于拆卸或重新安装费、采购替代产品或服务的附带费用、重新测试、外部计算机时间、劳动力成本、商誉损失、利润损失、成本损失、丧失使用价值、丢失数据或营运中断所带来的损失。对 TI 的任何索赔、诉讼或起诉的有效期为自原告提出相应起诉理由之日起的一年内。

8.2 具体限制。在任何情况下, 因任何保证或其他由这些条款和条件引起的原因或与这些条款和条件相关的原因而带来的义务、或对下文中提到的任何 TI EVM 的任何使用而需要让 TI 承担的债务总额都不得超过根据这些条款和条件(这些条款和条件是损失或损害索赔的依据)购买特定装置而向 TI 支付的总金额。根据这些条款和条件, 虽然存在一个以上针对出售给用户的特定销量的索赔, 但不得对本限制进行扩大或延伸。

9. 退货策略。除非另有规定, 否则 TI 不进行任何退款、退货或调换。此外, 如果包装已打开, 或者 EVM 损坏或处于其他无法重新销售的状态, TI 将不接受任何 EVM 退换。如果用户感觉自己为购买 EVM 所支付的金额不正确, 或者交付违反了相关订单, 则用户应联系 TI。TI 将在自退回组件之日起的三十(30)个工作日内进行全额退款, 其中不含任何邮费或包装费。

10. 适用法律: 这些条款和条件受德克萨斯州法律的管辖, 并按照相关法律进行解释, 但不参照其中的法律冲突原则。用户同意由这些条款和条件引起的或与这些条款和条件有关的任何纠纷的非专属管辖权归德克萨斯州法院所有, 并同意在德克萨斯州达拉斯县法院进行审判。尽管有上述规定, 可在美国或外国法院强制执行任何判决, 并且 TI 可在任何美国或外国法院寻求禁令救济。

针对 TI 参考设计的重要声明

德州仪器公司 ("TI") 参考设计只用于帮助设计人员 ("客户") 开发包含 TI 半导体产品的系统 (在这里也指"组件")。客户理解并同意他们对设计客户系统和产品中的独立分析、评估和判断负责。

TI 参考设计已经使用标准实验室条件和工程实践创建。TI 未采取任何测试, 除非那些在已发布文档中针对一个特定参考设计所专门描述的测试。TI 也许会对它的参考设计进行修正、提高、改进和其它改变。

客户被授权使用具有每个特定参考设计中确认的 TI 组件的 TI 参考设计, 并且在他们的终端产品开发中修改参考设计。然而, 在这里不授予任何其它 TI 知识产权的直接或隐含, 默许或其它方式的许可, 和任何第三方技术或知识产权的许可, 其中包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权、或者与采用了 TI 产品或服务的任何集成、机器或工艺相关的知识产权。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息不能构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

TI 参考设计按"原样"提供。对于参考设计或者包括精度和完整性在内的直接、隐含或者法律规定的参考设计的使用, TI 不作出任何保证或声明。TI 不对任何隐含的适销性、针对特定用途的适用性、平静受益权、无干扰享有权, 以及与 TI 参考设计或其使用相关的任何第三方知识产权的非侵权作出任何保证。TI 不对任何与 TI 参考设计中提供的产品组合相关的或基于这些产品组合的第三方侵权声明负责, 并且不应为客户提供辩护或赔偿。不论是何原因造成任何实际的、特殊的、意外的、相应发生的或间接的损坏, 并且不论 TI 是否已经告知了 TI 参考设计的任何使用或 TI 参考设计的客户使用所造成的此类损坏的可能性, TI 都不应对此负责。

TI 保留根据 JESD46 最新标准, 对所提供的半导体产品和服务进行更正、增强、改进或其它更改的权限, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的 TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

对于 TI 数据手册、数据表或参考设计中的 TI 信息, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。第三方信息可能受到其它限制条件的制约。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独力负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在客户的安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。借助于这样的组件, TI 的目标是帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或"增强型塑料"的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的组件。客户认可并同意, 对还未指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的组件, 这些组件主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 将不承担任何责任。

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼, 邮政编码: 200122
Copyright © 2015 德州仪器半导体技术 (上海) 有限公司

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接权利作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独自负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated