

## Analog Engineer's Circuit

## 具有内部温度传感器 CJC 的双通道 K 型热电偶测量电路



Joseph Wu

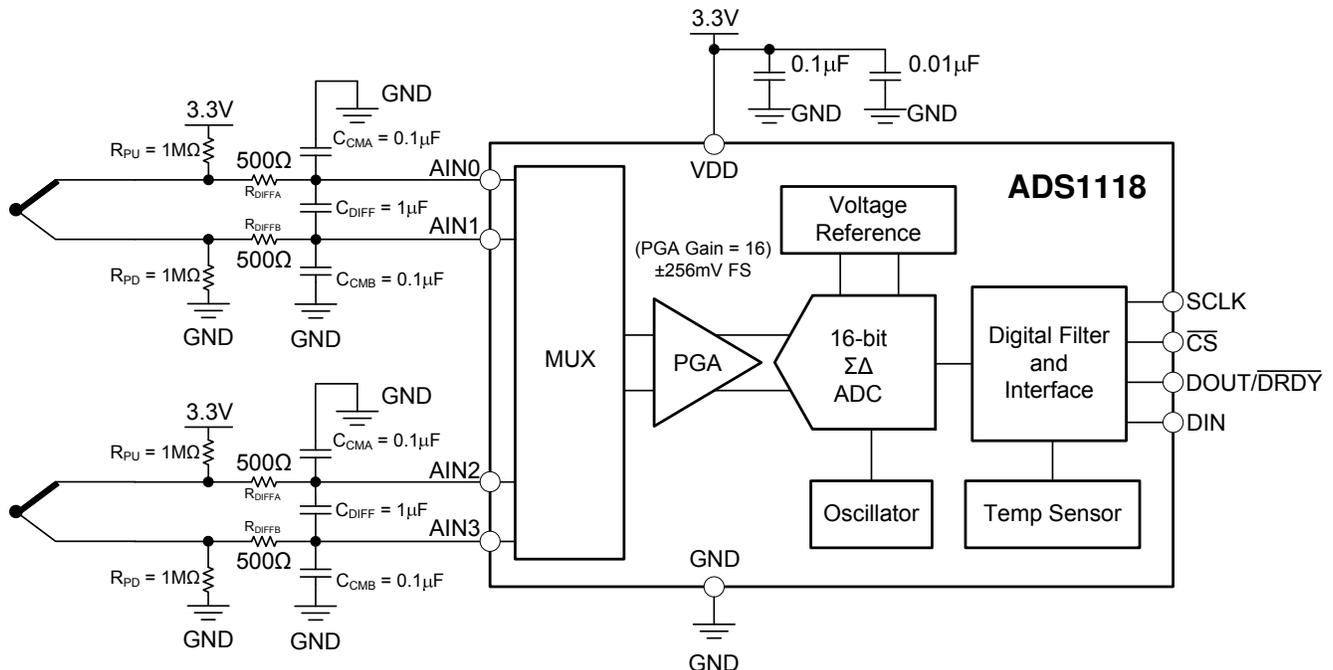
输入测量	ADC 输入电压	ADC 数字输出
T = -270°C	AINP - AINN = -6.5mV	FCC0 <sub>H</sub> 或 -832 <sub>10</sub>
T = 1370°C	AINP - AINN = 55mV	1B80 <sub>H</sub> 或 7040 <sub>10</sub>

## 电源

VDD	GND
3.3V	0V

## 设计说明

该设计指南介绍了使用 [ADS1118](#) 并采用两个热电偶的温度测量电路。该设计使用 [ADS1118](#) 内部电压基准进行热电偶电压测量，而使用板载温度传感器进行冷端补偿 (CJC) 测量。ADC 的两个通道用于两个 K 型热电偶，温度测量范围为 -270°C 至 1370°C。该设计包含用于配置器件的 ADC 寄存器设置以及用于配置和读取器件的伪代码。此电路可用于 PLC [模拟输入模块](#)、[实验室和现场仪表](#) 以及 [工厂自动化和控制](#) 等应用。有关使用精密 ADC 和热电偶的更多信息，请参阅 [热电偶测量基本指南](#)。



## 设计说明

1. 为电源使用电源去耦电容器。必须使用连接到 GND 的至少为 0.1 μF 的电容器对 VDD 进行去耦。有关电源建议的详细信息，请参阅 [具有内部基准和温度传感器的 ADS1118 超小型低功耗 SPI™ 兼容型 16 位模数转换器](#)。

2. 如果可能，使用 C0G (NPO) 陶瓷电容器进行输入滤波。这些电容器中使用的电介质在电压、频率和温度变化时提供最稳定的电气性能。由于尺寸的原因，这可能并不总是实用，X7R 电容器是下一个最佳选择。
3. 需要冷端补偿才能准确测量热电偶温度。
4. 选择 K 型热电偶是因为它具有较大的输入范围和热电偶电压。其他热电偶具有不同的灵敏度和误差容限。有关使用其他热电偶进行测量及其使用指南，请参阅 [热电偶测量基本指南](#)。
5. 用于根据热电电压确定热电偶温度的转换表和多项式方程可在 [NIST 网站](#) 上找到。此外，使用 [模拟工程师计算器](#) 确定一些热电偶转换。

## 元件选型

1. 确定热电偶的工作范围。

如果温度测量范围为  $-270^{\circ}\text{C}$  至  $1370^{\circ}\text{C}$ ，则 K 型热电偶的范围大约为  $-6.5\text{mV}$  至  $+55\text{mV}$ 。该范围用于在考虑 ADC 满标量程的情况下更大幅度地提高测量的分辨率。

2. 确定 ADC 的增益和输入范围。

在 ADS1118 中，可编程增益放大器 (PGA) 通过缩放电容采样实现，而不是作为真正的放大器。采用这种 PGA，输入范围可扩展到全电源电压范围，但放大率更低，输入阻抗也更低。在该器件中，最大放大率提供  $\pm 0.256\text{V}$  的满量程范围。这远远大于热电偶的  $-6.5\text{mV}$  至  $+55\text{mV}$  范围。虽然不可能超出 PGA 范围，但测量可以使用满量程范围的有限部分。将热电偶范围与全范围进行比较，可以计算出可用 ADC 范围的百分比：

$$\% \text{ of usable ADC range} = [55\text{mV} - (-6.5\text{mV})] / [0.256\text{V} - (-0.256\text{mV})] \cdot 100\% = 12.0\%$$

$$\text{Number of ADC codes in measurement range} = 0.12 \times 2^{16} = 7864$$

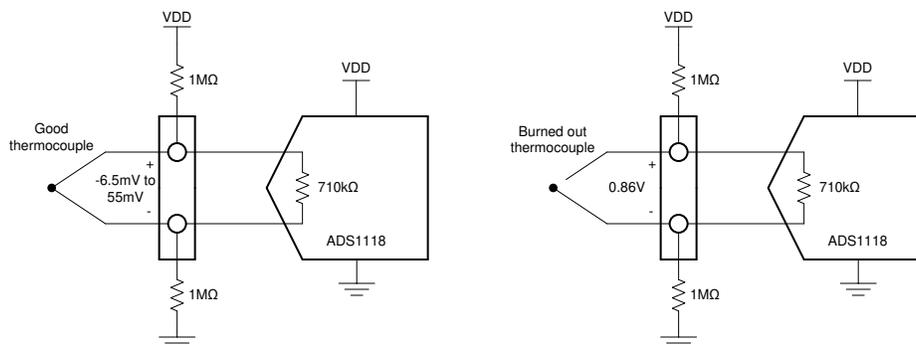
在  $-270^{\circ}\text{C}$  至  $1370^{\circ}\text{C}$  的热电偶范围内，7864 代码用于表示  $1640^{\circ}\text{C}$  温度范围。这相当于每个 ADC 代码大约  $0.21^{\circ}\text{C}$ ，对于大多数热电偶应用来说应该足够了。

在其他精密 ADC 中，PGA 的实现方式类似于仪表放大器。如果使用不同的 ADC，则应根据最大热电偶输出电压计算允许的最大增益（不超出 PGA 范围）。然后，确认热电偶偏置接近  $1/2 V_s$ ，以便输入信号处于 PGA 的共模输入范围内。

3. 设置电阻器偏置以建立输入直流电平和烧毁检测。

同等偏置电阻器从热电偶的任一端连接到 GND 和 VDD。在正常运行中，电阻器将热电偶的直流偏置点设置为接近  $1/2 V_s$ 。如果热电偶烧毁并变成开路，则电阻器会将热电偶引线拉开到任一电源。这些电阻器设置为高位（通常为  $500\text{k}\Omega$  至  $10\text{M}\Omega$ ），以便减少流经热电偶的偏置电流。与热电偶引线电阻发生反应的电阻器偏置电流会导致测量误差。但是，电阻器也必须足够低，以便提供足够的偏置电流，从而克服来自电阻器的任何输入电流。

在该设计中，偏置电阻器选择为  $1\text{M}\Omega$ 。该值会将电阻器偏置电流设置为低至  $1.65\mu\text{A}$ 。但是，对于烧坏的热电偶， $1\text{M}\Omega$  可提供足够的电流将 ADC 输入与 ADS1118 的  $710\text{k}\Omega$  等效输入阻抗分开。



对于良好的热电偶，热电偶电压的范围为  $-6.5\text{mV}$  至  $55\text{mV}$ 。VDD 电源的其余  $3.3\text{V}$  在偏置电阻器之间均匀下降。使用  $1\text{M}\Omega$  偏置电阻器时，热电偶电压的直流工作点接近  $1/2 V_s$ （即  $1.65\text{V}$ ）。

对于烧坏的热电偶，开路会形成一个分压器，由两个  $1\text{M}\Omega$  电阻围绕  $710\text{k}\Omega$  等效输入阻抗。采用烧毁热电偶时的 ADC 输入电压可以计算为：

$$\text{ADC input voltage} = 3.3\text{V} \times [710\text{k}\Omega \div (1\text{M}\Omega + 710\text{k}\Omega + 1\text{M}\Omega)] = 0.85\text{V}$$

如果热电偶烧毁，ADC 输入电压为  $0.86\text{V}$ ，远远大于 ADC 的正满量程读数。ADC 报告的读数为  $7\text{FFFh}$ ，表示存在烧毁情况。

#### 4. 为 ADC 输入和基准输入选择差分与共模滤波值。

如果存在输入滤波，则输入电流会对任何串联滤波器电阻做出反应，从而产生误差。对于 ADS1118，输入电流建模为等效差分输入阻抗。如前所述，等效差分输入阻抗通常为  $710\text{k}\Omega$ 。因此，输入串联电阻保持较低值，或增加的电压表现为增益误差。

此设计包含差分与共模输入 RC 滤波。差分输入滤波的带宽设置为至少比 ADC 的数据速率高 10 倍。共模电容器选择为差分电容器值的  $1/10$ 。由于电容器的选择，共模输入滤波的带宽比差分输入滤波带宽大约高 20 倍。

在进行输入滤波的情况下，差分信号以低于共模信号的频率衰减，共模信号会被器件的 PGA 显著抑制。共模电容器的失配会导致非对称噪声衰减，表现为差分输入噪声。差分信号的带宽较低，从而可以降低输入共模电容器失配的影响。ADC 输入和基准输入的输入滤波是针对相同的带宽进行设计的。

在该设计中，数据速率选择为  $8\text{SPS}$ 。对于 ADC 输入滤波，可以通过以下公式近似计算差分滤波和共模滤波的带宽频率：

$$f_{\text{IN\_DIFF}} = 1 \div [2 \times \pi \times C_{\text{DIFF}} \times (2 \times R_{\text{DIFF}})]$$

$$f_{\text{IN\_CM}} = 1 \div (2 \times \pi \times C_{\text{CM}} \times R_{\text{DIFF}})$$

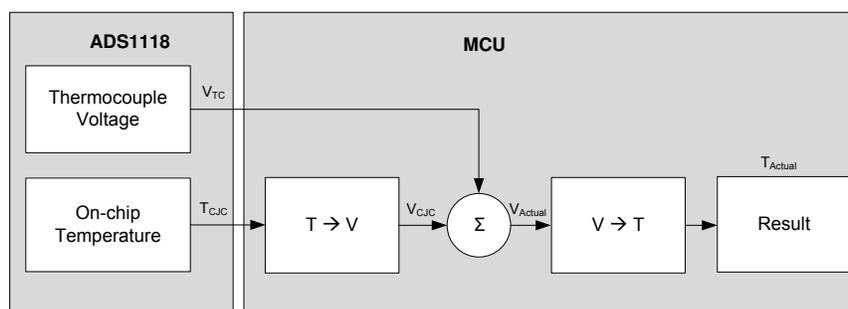
对于 ADC 输入滤波， $R_{\text{IN}} = 500\Omega$ ， $C_{\text{IN\_DIFF}} = 1\mu\text{F}$ ， $C_{\text{IN\_CM}} = 0.1\mu\text{F}$ 。这将差分滤波器带宽设置为  $160\text{Hz}$ ，将共模滤波器带宽设置为  $3.2\text{kHz}$ 。

#### 5. 使用冷端补偿根据冷端温度计算实际热电偶电压。

要从热电偶获得精确测量结果，必须执行冷端补偿以获得准确的温度测量值。必须精确测量热电偶引线所在的冷端。不能简单地将冷端的温度与从热电偶电压计算的温度相加。要准确确定热电偶温度，正确的方法是：

- 将冷端温度 ( $T_{\text{CJ}}$ ) 转换为电压 ( $V_{\text{CJ}}$ )
- 将冷端电压与测量到的热电偶电压相加 ( $V_{\text{CJ}} + V_{\text{TC}}$ )
- 将冷端电压与热电偶电压之和转换为热电偶温度 ( $T_{\text{TC}}$ )

以下流程图显示了根据 ADC 测量值确定热电偶实际温度的转换方法。



用于根据热电电压确定热电偶温度的转换表和多项式方程可在 [NIST 网站](#) 上找到。

由于 ADS1118 具有精确的内部温度传感器，因此可用于测量。内部温度传感器在  $0^{\circ}\text{C}$  至  $70^{\circ}\text{C}$  范围内具有典型的  $0.2^{\circ}\text{C}$  精度。此精度非常适合冷端测量。但是，该器件需要与热电偶冷端的连接点之间有良好的热接触。冷端测量中的任何误差都会导致温度测量结果误差。

有关热电偶和冷端补偿测量的更多信息，请参阅 [热电偶测量基本指南](#)。

## 测量转换

根据 ADC 的满量程范围设置，热电偶电压的转换相对简单。该设计使用最小的满量程范围 ( $\pm 0.256V$ )。

测量值 1 ( 热电偶 1 ) :

$$\text{Output Code 1} = [2^{15} \times (V_{\text{AIN0}} - V_{\text{AIN1}}) \div (0.256V)]$$

$$\text{Thermocouple 1 Voltage} = V_{\text{AIN0}} - V_{\text{AIN1}} = [(Output Code 1) \times 0.256V \div 2^{15}]$$

测量值 2 ( 热电偶 2 ) :

$$\text{Output Code 2} = [2^{15} \times (V_{\text{AIN2}} - V_{\text{AIN3}}) \div (0.256V)]$$

$$\text{Thermocouple 2 Voltage} = V_{\text{AIN2}} - V_{\text{AIN3}} = [(Output Code 2) \times 0.256V \div 2^{15}]$$

内部温度传感器的转换需要进行一些数据操作。来自 ADC 的温度数据表示为 14 位结果，在 16 位转换结果中进行左对齐。数据从最高有效字节 (MSB) 开始输出。当读取这两个数据字节，前 14 位用来指定温度测量结果。一个 14 位 LSB 等于  $0.03125^{\circ}\text{C}$ ，负数用二进制补码格式表示。

测量值 3 ( 内部温度传感器 ) :

$$\text{Output Code 3} = [(\text{Temperature}) \div (0.03125^{\circ}\text{C})]$$

$$\text{Temperature} = [(\text{Output Code 3}) \times (0.03125^{\circ}\text{C})]$$

输出代码 3 是 ADC 的两个字节输出数据的前 14 位。有关 ADS1118 和内部温度传感器的更多信息，请参阅[具有内部基准和温度传感器的 ADS1118 超小型低功耗 SPI™ 兼容型 16 位模数转换器](#)。

## 寄存器设置

### 测量值 1 ( 热电偶 1 电压 ) : 配置寄存器 (8D0Bh)

位	字段	设置	说明
15	SS	1	开始单次转换
14:12	MUX[2:0]	000	热电偶 1 的 AINP 为 AIN0，AINN 为 AIN1
11:9	PGA[2:0]	110	FSR 为 $\pm 0.256V$
8	模式	1	关断和单冲模式
7:5	DR[2:0]	000	8SPS
4	TS_MODE	0	ADC 模式
3	PULL_UP_EN	1	在 DOUT/DRDY 引脚上启用上拉电阻器
2:1	NOP[1:0]	01	有效数据，更新 Config 寄存器
0	保留	1	始终写入 1h

### 测量值 2 ( 热电偶 2 电压 ) : 配置寄存器 (BD0Bh)

位	字段	设置	说明
15	SS	1	开始单次转换
14:12	MUX[2:0]	011	热电偶 2 的 AINP 为 AIN2，AINN 为 AIN3
11:9	PGA[2:0]	110	FSR 为 $\pm 0.256V$
8	模式	1	关断和单冲模式
7:5	DR[2:0]	000	8SPS
4	TS_MODE	0	ADC 模式
3	PULL_UP_EN	1	在 DOUT/DRDY 引脚上启用上拉电阻器
2:1	NOP[1:0]	01	有效数据，更新 Config 寄存器
0	保留	1	始终写入 1h

### 测量值 3 ( 内部温度传感器 ) : 配置寄存器 (8D1Bh)

位	字段	设置	说明
15	SS	1	开始单次转换
14:12	MUX[2:0]	011	AINP 为 AIN2 且 AINN 为 AIN3 ( 被 TS_MODE 忽略 )
11:9	PGA[2:0]	110	FSR 为 $\pm 0.256V$ ( 被 TS_MODE 忽略 )
8	模式	1	关断和单冲模式
7:5	DR[2:0]	000	8SPS
4	TS_MODE	1	温度传感器模式 ( 旁路掉 MUX[2:0] )
3	PULL_UP_EN	1	在 DOUT/DRDY 引脚上启用上拉电阻器
2:1	NOP[1:0]	01	有效数据, 更新 Config 寄存器
0	保留	1	始终写入 1h

#### 伪代码示例

下面显示了伪代码序列以及设置器件和微控制器所需的步骤, 该微控制器与 ADC 相连, 以便在单冲转换模式下从 ADS1118 获取后续读数。

数据回读和器件配置随配置寄存器回读一起以 32 位传输周期完成。ADS1118 配置为测量热电偶电压, 满量程范围为  $\pm 256mV$ , 数据速率为 8SPS。器件循环读取热电偶 1 的电压、热电偶 2 的电压以及 ADS1118 内部温度传感器。在获取所有三个读数后, 需要使用冷端补偿将热电偶电压转换为热电偶温度。

```

Configure microcontroller for SPI mode 1 (CPOL =
0, CPHA = 1) Set CS low; // Start conversions send 8D0B8D0B; //Start conversion for
thermocouple 1 // Use 32-bit data transmission cycle with Config register readback
// The first iteration of the loop has no data readback Set CS high; Loop { wait
69ms // wait for typical data period +10% for internal oscillator variation Set CS
low; Send BD0BBD0B; // Read data for thermocouple 1, start conversion for
thermocouple 2, set CS high; wait 69ms; Set CS low; Send 8D1B8D1B; // Read data for
thermocouple 2, start conversion for temperature sensor, Set CS high; wait 69ms; Set
CS low; Send 8D0B8D0B // Read data temperature sensor, Start conversion for
thermocouple 1 Set CS high; // Cold-junction compensation to determine thermocouple
temperature Convert thermocouple 1 ADC data to voltage; Convert thermocouple 2 ADC
data to voltage; Convert temperature sensor data to temperature; Convert temperature
sensor data to thermoelectric voltage; // By lookup table or calculation Add
thermocouple 1 voltage to temperature thermoelectric voltage; Convert resulting
voltage for thermocouple 1 to temperature; // By lookup table or calculation Add
thermocouple 2 voltage to temperature thermoelectric voltage; Convert resulting
voltage for thermocouple 2 to temperature; // By lookup table or calculation }
  
```

#### 设计中采用的器件

器件	主要特性	链路	其他可能的器件
ADS1118	具有内部基准和温度传感器的超小型低功耗 SPI™ 兼容型 16 位模数转换器	具有 PGA、振荡器、基准电压、温度传感器和 SPI 的 16 位、860SPS、4 通道 $\Delta$ - $\Sigma$ ADC	精密 ADC (1)

(1) 对于冷端补偿, 请检查器件是否具有指定限值的内部温度传感器。或者, 外部温度传感器可与 ADC 通道一起用于冷端测量。

## 其他资源

- 德州仪器 (TI), [ADS1118 评估模块](#), 产品概述
- 德州仪器 (TI), [ADS1118EVM 用户指南和软件教程](#), 用户指南
- 德州仪器 (TI), [热电偶测量基本指南](#), 应用手册
- 德州仪器 (TI), [模拟工程师计算器](#), 工具概述
- 德州仪器 (TI), [具有小于 1°C 精度的简单热电偶测量参考设计](#), 产品概述

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司