

## 具有内部温度传感器 **CJC** 的双通道 **K** 型热电偶测量电路

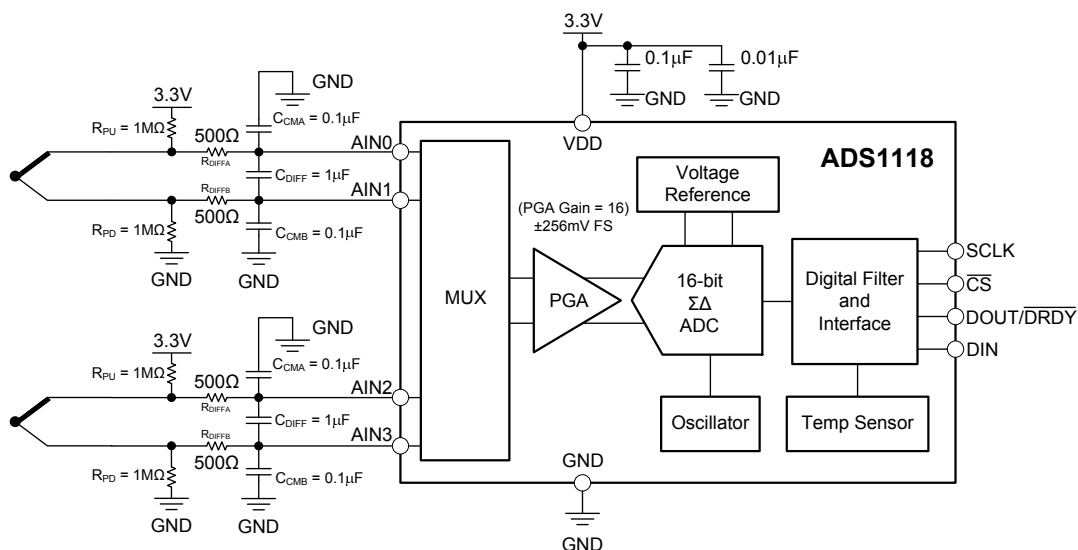
Joseph Wu

输入测量	ADC 输入电压	ADC 数字输出
$T = -270^{\circ}\text{C}$	$\text{AINP} - \text{AINN} = -6.5\text{mV}$	$\text{FCC0}_H$ 或 $-832_{10}$
$T = 1370^{\circ}\text{C}$	$\text{AINP} - \text{AINN} = 55\text{mV}$	$1\text{B80}_H$ 或 $7040_{10}$

电源	
VDD	GND
3.3V	0V

### 设计 说明

本指导手册的设计介绍采用 [ADS1118](#) 和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  $-270^{\circ}\text{C}$  至  $1370^{\circ}\text{C}$ 。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。该电路 可用于 适用于 PLC 的 [模拟输入模块](#)、[实验室仪表](#) 和 [工厂自动化](#) 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 0.1μF 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可在电压、频率和温度变化时提供最稳定的电气特性。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。如需使用其他热电偶进行测量以及使用它们的指南，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（网址为 <http://srdata.nist.gov/its90/menu/menu.html>）上找到。此外，可从模拟工程师计算器确定一些热电偶转换。

## 组件选择

1. 确定热电偶的工作范围。

如果温度测量范围是 -270°C 至 1370°C，那么 K 型热电偶具有大约 -6.5mV 至 +55mV 的范围。该范围用于最大化测量的分辨率（考虑 ADC 的满量程范围）。

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 ±0.256V 的满量程范围。这远远大于热电偶的 -6.5mV 至 +55mV 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：

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

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

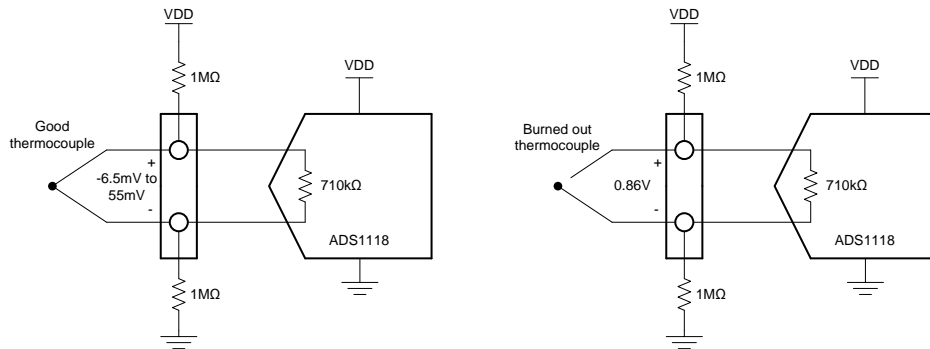
热电偶的温度范围为 -270°C 至 1370°C，7864 代码用于表示 1640°C 的温度范围。这相当于每个 ADC 代码大约 0.21°C，对于大多数热电偶应用来说应该足够了。

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，确保热电偶偏置接近中间电源，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中间电源。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 500kΩ 至 10MΩ），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 1MΩ。该值会将电阻器偏置电流设置为低至 1.65μA。但是，对于烧坏的热电偶，1MΩ 可提供足够的电流将 ADC 输入与 ADS1118 的 710kΩ 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中间电源（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：

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

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. 选择 ADC 输入和基准输入的差分 and 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 and 共模输入 RC 滤波。差分输入滤波的带宽设置为至少是 ADC 的数据速率的 10 倍。将共模电容器选择为差分电容器值的  $1/10$ 。由于电容器选择，共模输入滤波带宽大约是差分输入滤波带宽的 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，后者会被器件的 PGA 显著抑制。共模电容器的失配会导致非对称噪声衰减，这会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：

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

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

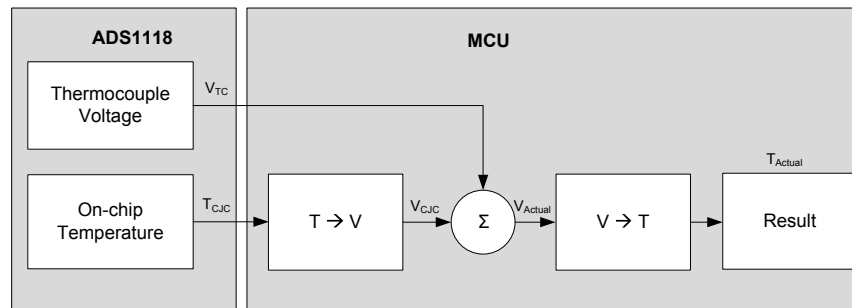
对于 ADC 输入滤波， $R_{\text{IN}} = 500\Omega$ ， $C_{\text{IN\_DIFF}} = 1\mu\text{F}$ ， $C_{\text{IN\_CM}} = 0.1\mu\text{F}$ 。这会将差分滤波器带宽设置为  $160\text{Hz}$ ，将共模滤波器带宽设置为  $3.2\text{kHz}$ 。

#### 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：

1. 将冷端温度 ( $T_{\text{CJ}}$ ) 转换为电压 ( $V_{\text{CJ}}$ )
2. 将冷端电压与测量到的热电偶电压相加 ( $V_{\text{CJ}} + V_{\text{TC}}$ )
3. 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（网址为 <http://srdata.nist.gov/its90/menu/menu.html>）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°C 至 70°C 温度范围内的典型精度为 0.2°C。这种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 (±0.256V)。

测量值 1（热电偶 1）：

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

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

测量值 2（热电偶 2）：

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

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

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°C，负数用二进制补码格式表示。

测量值 3（内部温度传感器）：

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

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

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）：Config 寄存器 (8D0Bh)

位	字段	正在设置	说明
15	SS	1	开始一次转换
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	MODE	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）：Config 寄存器 (BD0Bh)

位	字段	正在设置	说明
15	SS	1	开始一次转换
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	MODE	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）：Config 寄存器 (8D1Bh)

位	字段	正在设置	说明
15	SS	1	开始一次转换
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	MODE	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 Config 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  $\pm 256\text{mV}$ ，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	链接	其他可能的器件
<a href="#">ADS1118</a>	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	<a href="http://www.ti.com.cn/product/cn/ADS1118">http://www.ti.com.cn/product/cn/ADS1118</a>	指向类似器件的链接 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> 对于冷端补偿，请确保器件具有指定了极限的内部温度传感器。或者，外部温度传感器可与 ADC 通道一起用于冷端测量。

## 设计参考资料

请参阅《[模拟工程师电路说明书](#)》，了解有关 TI 综合电路库的信息。

## 其他资源

- 德州仪器 (TI)，[ADS1118 评估模块](#)
- 德州仪器 (TI)，[《ADS1118EVM 用户指南软件教程》](#)
- 德州仪器 (TI)，[《热电偶测量基本指南》](#)
- 德州仪器 (TI)，[模拟工程师计算器](#)
- 德州仪器 (TI)，[《使用 ADS1118 进行精密热电偶测量》](#)
- 德州仪器 (TI)，[《简单热电偶测量解决方案参考设计，精度 <1°C》](#)

如需 TI 工程师的直接支持，请使用 **E2E** 社区：

[e2echina.ti.com](http://e2echina.ti.com)

## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

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 © 2019 德州仪器半导体技术（上海）有限公司



## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

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 © 2019 德州仪器半导体技术（上海）有限公司