

Joseph Wu

## 摘要

热电偶是广泛用于各种商业和工业应用的常见温度传感器。虽然热电偶的精度略低于电阻温度检测器 (RTD)，但热电偶支持的温度范围广、采用自供电方式且响应迅速。热电偶的结构简单，因此价格低廉、经久耐用。由于传感器电压较小且噪声要求较低， $\Delta$ - $\Sigma$  模数转换器 (ADC) 是热电偶测量的理想数据转换器。本应用报告概述了热电偶，讨论了温度测量的工作原理、功能和方法。报告中介绍了多个电路，旨在展示热电偶与精密 ADC 的连接。不同的拓扑侧重于针对 ADC 输入和烧毁测量进行热电偶偏置。

## 内容

1 热电偶概述.....	2
2 热电偶测量电路.....	12
3 总结.....	34
4 修订历史记录.....	34

## 插图清单

图 1-1. 热电偶电压.....	2
图 1-2. 热电偶响应.....	3
图 1-3. 热电偶结构类型.....	5
图 1-4. K 型 IEC-EN 60584-2 容差等级误差.....	7
图 1-5. 使用电阻偏置热电偶.....	8
图 1-6. 使用电压偏置热电偶.....	9
图 1-7. 热电偶和冷端测量值转换为温度.....	10
图 1-8. 使用各种查找表时的插值误差比较.....	10
图 1-9. 使用电阻偏置进行烧毁检测.....	11
图 1-10. 使用 BOCS 进行烧毁检测.....	11
图 2-1. 具有上拉和下拉电阻的热电偶测量电路.....	13
图 2-2. 将偏置电阻连接到负极引线的热电偶测量电路.....	15
图 2-3. 使用 VBIAS 实现传感器偏置并具有上拉电阻的热电偶测量电路.....	17
图 2-4. 使用 REFOUT 实现传感器偏置并具有 BOCS 的热电偶测量电路.....	19
图 2-5. 具有 REFOUT 偏置和上拉电阻的热电偶测量电路.....	21
图 2-6. 具有 REFOUT 偏置和 BOCS 的热电偶测量电路.....	23
图 2-7. 具有双极电源和接地偏置的热电偶测量电路.....	25
图 2-8. 具有双线 RTD 冷端补偿的热电偶测量电路.....	27
图 2-9. 具有热敏电阻冷端补偿的热电偶测量电路.....	29
图 2-10. 工作温度范围内的热敏电阻和线性化响应.....	30
图 2-11. 使用并联电阻和分压器对热敏电阻进行线性化.....	30
图 2-12. 热敏电阻电路的线性化输出.....	31
图 2-13. 具有温度传感器冷端补偿的热电偶测量电路.....	32

## 表格清单

表 1-1. 常见热电偶类型.....	3
表 1-2. 用于根据温度确定电压的 ITS-90 热电偶直接多项式的特性.....	4
表 1-3. K 型热电偶的 ITS-90 温度系数.....	4
表 1-4. 热电偶容差等级信息.....	6

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 热电偶概述

热电偶是温度测量传感器，可产生随温度变化的电压。热电偶由两根不同金属制成的引线构成。引线焊接在一起以形成结点。随着从结点到引线末端的温度变化，结点上会产生电压。

不同金属的组合会产生各种电压响应。因此可以采用不同类型的热电偶来进行不同温度范围和精度的测量。选择热电偶通常取决于应用中所需的测量温度范围。其他考虑因素包括温度精度、耐用性、使用条件和预期使用寿命。

### 1.1 塞贝克电压

1820 年，托马斯·约翰·塞贝克 (Thomas Johann Seebeck) 发现，加热金属棒的一端时，在整根金属棒上都会产生电压 (称为塞贝克电压)。该电压随温度而变化，并根据金属棒所用的金属类型而不同。通过在温度检测结点处联接具有不同塞贝克电压的不同金属，可产生热电偶电压 ( $V_{TC}$ )。

不同的金属在温度检测结点 ( $T_{TC}$ ) 处连接将形成热电偶。电压是在基准温度 ( $T_{CJ}$ ) 下通过两种金属测得的。热电偶的引线需要处于相同的温度，并且通常通过等温块连接到 ADC。图 1-1 展示了一个由两种不同金属制成的热电偶，热电偶的引线连接到等温块。

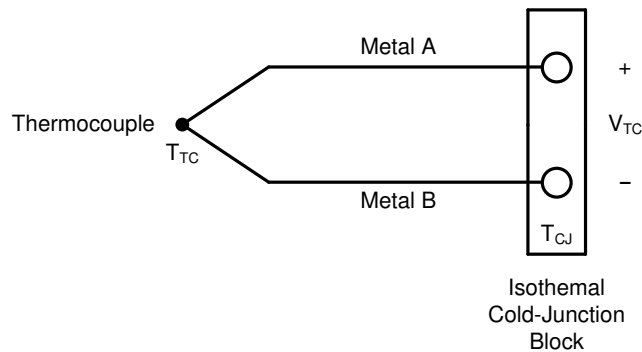


图 1-1. 热电偶电压

热电偶与等温块的连接对于温度测量很重要。为了进行准确的热电偶测量，不同金属的回路引线必须处于相同的已知温度。

两种不同金属之间的任何连接都会形成热电偶结点。为避免产生意外的热电偶结点，热电偶与 ADC 之间的连接应简单对称。这些额外的结点会导致测量误差。

当热电偶信号连接到 ADC 集成电路时，路径中的每次阶跃都可能会遇到几个额外的热电偶。如果电路中存在温度梯度，这将引发测量问题。从接线端子到焊料、到铜线、到 IC 引脚、到键合线、到芯片触点的每个连接都会产生新的结点。但是，如果是差分信号，并且每对热电偶都处于同一温度，则热电偶电压会抵消，最终对测量没有影响。对于高精度应用，用户必须确保这些假设是正确的。使用差分输入进行测量会产生意外的热电偶电压，如果热电偶不靠近在一起，或者电路板或器件上存在热梯度，这些电压不会抵消。

## 1.2 热电偶类型

### 1.2.1 常见热电偶金属

用于构造热电偶的所有不同金属都会显示出塞贝克效应引起的电压变化，但可使用几种特定组合来制作热电偶。热电偶可分为两种不同的结构类型：贱金属热电偶和贵金属热电偶。

贱金属热电偶是较常见的热电偶。贵金属热电偶由铂和铑等贵金属制成。贵金属热电偶更昂贵，用于温度更高的应用。

无论使用哪种金属引线，每种热电偶类型都会指定一个字母来表示所使用的两种金属。例如，J 型热电偶由铁和康铜制成。每种热电偶的热电属性都是标准化的，因此温度测量是可以复现的。热电偶引线和连接器采用特定颜色的插头和插孔进行标准化，以表明热电偶的类型。绝缘和引线的不同颜色也表示热电偶等级和扩展等级。表 1-1 列出了几种常见的热电偶类型及其特性。

表 1-1. 常见热电偶类型

热电偶类型	引线金属 A (+)	引线金属 B (-)	温度范围 (°C)	温度范围内的电动势 (mV)	塞贝克系数 (0°C 时的 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 值)
J	铁	康铜	-210 至 1200	-8.095 至 69.553	50.37
K	铬镍合金	铝镍锰合金	-270 至 1370	-6.458 至 54.886	39.48
T	铜	康铜	-200 至 400	-6.258 至 20.872	38.74
E	铬镍合金	康铜	-270 至 1000	-9.385 至 76.373	58.70
S	铂和 10% 铑	铂	-50 至 1768	-0.236 至 18.693	10.19

### 1.2.2 热电偶测量灵敏度

美国国家标准与技术研究院 (NIST) 分析了各种热电偶的输出电压与温度间的关系。图 1-2 展示了这些热电偶类型在不同温度下的典型响应。

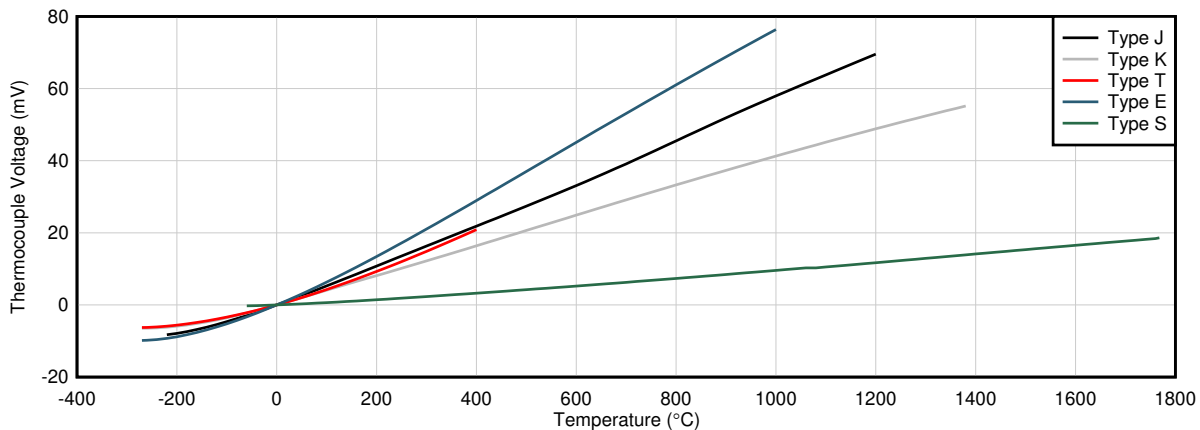


图 1-2. 热电偶响应

1990 年国际温标 (ITS-90) 标准定义了多个将温度与电压输出关联起来的多项式方程。此数据可在 NIST 网站 (<http://srdata.nist.gov/its90/main/>) 上找到。使用这些方程可以根据温度计算热电电压或根据热电电压计算温度。

#### 1.2.2.1 根据温度计算热电电压

直接多项式可构造方程来根据已知温度计算热电电压。这些方程式如方程式 1 所示。

$$E = \sum_{i=0}^n C_i (t_{90})^i \quad (1)$$

其中

- E 以微伏为单位， $t_{90}$  以摄氏度为单位

表 1-2 总结了不同热电偶类型的多项式阶数以及相应温度范围。

**表 1-2. 用于根据温度确定电压的 ITS-90 热电偶直接多项式的特性**

热电偶类型	多项式的温度范围 (°C)	多项式阶数 <sup>(1)</sup>
J	- 210 至 760, 760 至 1200	8 阶, 5 阶
K	- 270 至 0, 0 至 1370	10 阶, 9 阶, + a e <sup>b(t - c)</sup> <sup>2</sup>
T	- 200 至 0, 0 至 400	7 阶, 6 阶
E	- 270 至 0, 0 至 1000	13 阶, 10 阶
S	- 50 至 1064.18, 1064.18 至 1664.5, 1664.5 至 1768.1	8 阶, 4 阶, 4 阶

(1) 对于 0°C 以上的 K 型热电偶, 有一个额外的项用于考虑磁有序效应

### 1.2.2.2 根据热电电压计算温度

通过进行反向转换, 逆多项式函数可根据热电偶电压计算温度。逆多项式函数的方程式如 [方程式 2](#) 所示。

$$t_{90} = d_0 + d_1 E + d_2 E^2 + \dots + d_i E^i \quad (2)$$

其中

- E 以微伏为单位,  $t_{90}$  以摄氏度为单位

例如, K 型热电偶的逆函数如 [表 1-3](#) 所示。多项式是在整个温度范围的三个较小范围内构建的。对于每个范围, 均使用高阶多项式来描述温度。

**表 1-3. K 型热电偶的 ITS-90 温度系数**

温度范围:	-200°C 至 0°C	0°C 至 500°C	500°C 至 1372°C
电压范围	-5891 $\mu$ V 至 0 $\mu$ V	0 $\mu$ V 至 20644 $\mu$ V	20644 $\mu$ V 至 54886 $\mu$ V
$d_0$	0.000 000 0	0.000 000 0	- 1.318 058 x 10 <sup>2</sup>
$d_1$	2.517 346 2 x 10 <sup>-2</sup>	508 355 x 10 <sup>-2</sup>	4.830 222 x 10 <sup>-2</sup>
$d_2$	- 1.166 287 8 x 10 <sup>-6</sup>	7.860 106 x 10 <sup>-8</sup>	- 1.646 031 x 10 <sup>-6</sup>
$d_3$	- 1.083 363 8 x 10 <sup>-9</sup>	- 2.503 131 x 10 <sup>-10</sup>	5.464 731 x 10 <sup>-11</sup>
$d_4$	- 8.977 354 0 x 10 <sup>-13</sup>	8.315 270 x 10 <sup>-14</sup>	- 9.650 715 x 10 <sup>-16</sup>
$d_5$	- 3.734 237 7 x 10 <sup>-16</sup>	- 1.228 034 x 10 <sup>-17</sup>	8.802 193 x 10 <sup>-21</sup>
$d_6$	- 8.663 264 3 x 10 <sup>-20</sup>	9.804 036 x 10 <sup>-22</sup>	- 3.110 810 x 10 <sup>-26</sup>
$d_7$	- 1.045 059 8 x 10 <sup>-23</sup>	- 4.413 030 x 10 <sup>-26</sup>	
$d_8$	- 5.192 057 7 x 10 <sup>-29</sup>	1.057 734 x 10 <sup>-30</sup>	
$d_9$		- 1.052 755 x 10 <sup>-35</sup>	
误差范围	0.04°C 至 -0.02°C	0.04°C 至 -0.05°C	0.06°C 至 -0.05°C

[表 1-2](#) 和 [表 1-3](#) 显示了直接多项式方程和逆多项式方程的复杂程度。用于计算这些高阶方程而不会降低精度的数学运算可能需要进行大量的高分辨率浮点数计算处理。这种类型的计算通常不适合使用嵌入式处理或微控制器。在许多情况下, 使用查找表通过插值法来确定温度的效率要高得多。

### 1.2.3 热电偶结构

如图 1-3 所示，热电偶有多种不同的构造类型。热电偶引线由绝缘层保护，并且通常在热电偶结尖端有保护套可保护传感器元件。

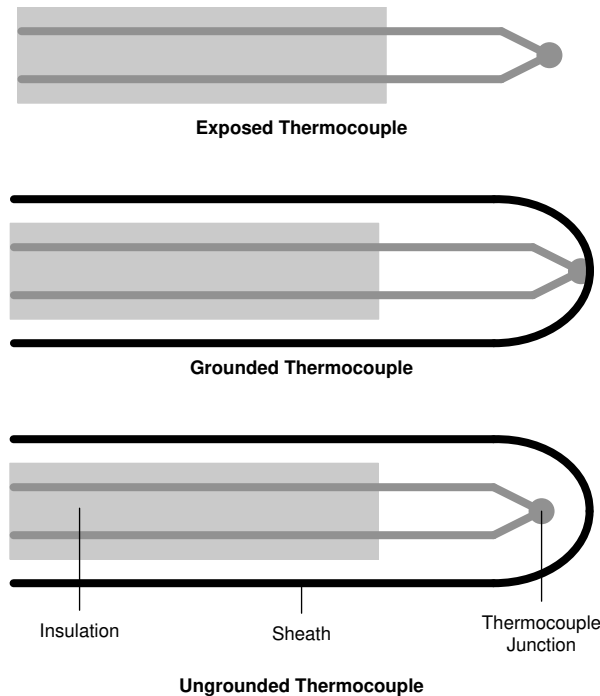


图 1-3. 热电偶结构类型

不带保护套的热电偶称为裸露的热电偶。这样可以使用小型传感器，直接从被测物体传热。这种类型的热电偶可提供快速的传感器响应。

在接地的热电偶中，传感器焊接在护套上。此护套通常由金属组成，因此可以进行传热，但会为恶劣和困难的环境提供额外的保护。不过，由于热电偶焊接在金属护套上，因此存在电接触。这样测量容易受到接地环路的噪声影响。

未接地的热电偶与护套隔离，因此在热电偶与被测物体之间增加一个绝缘层。由于存在隔离层，这种类型的热电偶具有最慢的温度响应。

如前所述，由于金属触点具有出色的传热性，接地和裸露的热电偶都具有更快的温度响应。但是，通过直接金属接触，测量电路与热电偶接触的任何物体之间都会存在电接触。这可能会导致测量出现接地环路问题。

如果电路的接地电位与热电偶的触点电位不同，则测量电路可能会中断。例如，接地或裸露的热电偶可能地面接地，这可能与 ADC 接地不同。这可能会导致各种问题，包括测量数据错误，甚至会损坏电路。即使地面接地和 ADC 接地相同，热电偶也可能不在 PGA 的范围内。使用裸露或接地的热电偶时，请确保热电偶触点不会破坏信号或测量的完整性。

### 1.2.4 容差标准

温度测量精度和范围取决于所使用的热电偶类型和制造商遵循的标准。IEC-EN 60584 中概述的国际电工委员会标准指明了贱金属和贵金属热电偶的制造容差。ASTM E230 介绍了在美国使用的由美国测试与材料协会 (ASTM) 制定的平行标准。表 1-4 展示了基于不同标准和容差等级的不同热电偶的容差。

表 1-4. 热电偶容差等级信息

热电偶类型	容差等级		温度范围 (°C)	热电偶误差 (°C)	
				(两列之间的较大者)	
J	IEC-EN 60584-2	1 级	- 40 < T < 750	±1.5°C	±(0.004 ·  T )
		2 级	- 40 < T < 750	±2.5°C	±(0.0075 ·  T )
		3 级	-	-	-
	ASTM E230 ANSI MC96.1	特殊	0 < T < 750	±1.1°C	±(0.004 ·  T )
		标准	0 < T < 750	±2.2°C	±(0.0075 ·  T )
	K	IEC-EN 60584-2	1 级	- 40 < T < 1000	±1.5°C
2 级			- 40 < T < 1200	±2.5°C	±(0.0075 ·  T )
3 级			- 200 < T < 40	±2.5°C	±(0.015 ·  T )
ASTM E230 ANSI MC96.1		特殊	0 < T < 1250	±1.1°C	±(0.004 ·  T )
		标准	- 200 < T < 0 0 < T < 1250	±2.2°C ±2.2°C	±(0.02 ·  T ) ±(0.0075 ·  T )
T		IEC-EN 60584-2	1 级	- 40 < T < 350	±0.5°C
	2 级		- 40 < T < 350	±1.0°C	±(0.0075 ·  T )
	3 级		- 200 < T < 40	±1.0°C	±(0.015 ·  T )
	ASTM E230 ANSI MC96.1	特殊	- 200 < T < 0 0 < T < 350	±0.5°C ±0.5°C	±(0.008 ·  T ) ±(0.004 ·  T )
		标准	- 200 < T < 0 0 < T < 350	±1.0°C ±1.0°C	±(0.015 ·  T ) ±(0.0075 ·  T )
	E	IEC-EN 60584-2	1 级	- 40 < T < 800	±1.5°C
2 级			- 40 < T < 900	±2.5°C	±(0.0075 ·  T )
3 级			- 200 < T < 40	±2.5°C	±(0.015 ·  T )
ASTM E230 ANSI MC96.1		特殊	- 200 < T < 0 0 < T < 900	±1.0°C ±1.0°C	±(0.005 ·  T ) ±(0.004 ·  T )
		标准	- 200 < T < 0 0 < T < 900	±1.7°C ±1.7°C	±(0.01 ·  T ) ±(0.005 ·  T )
S		IEC-EN 60584-2	1 级	0 < T < 1600	±1.0°C
	2 级		- 40 < T < 1600	±1.5°C	±(0.0025 ·  T )
	3 级		-	-	-
	ASTM E230 ANSI MC96.1	特殊	0 < T < 1450	±0.6°C	±(0.001 ·  T )
		标准	0 < T < 1450	±1.5°C	±(0.0025 ·  T )

例如，图 1-4 以图形方式展示了具有 IEC-EN 60584-2 容差等级的 K 型热电偶的误差。在更高的温度下，热电偶误差会明显增大。

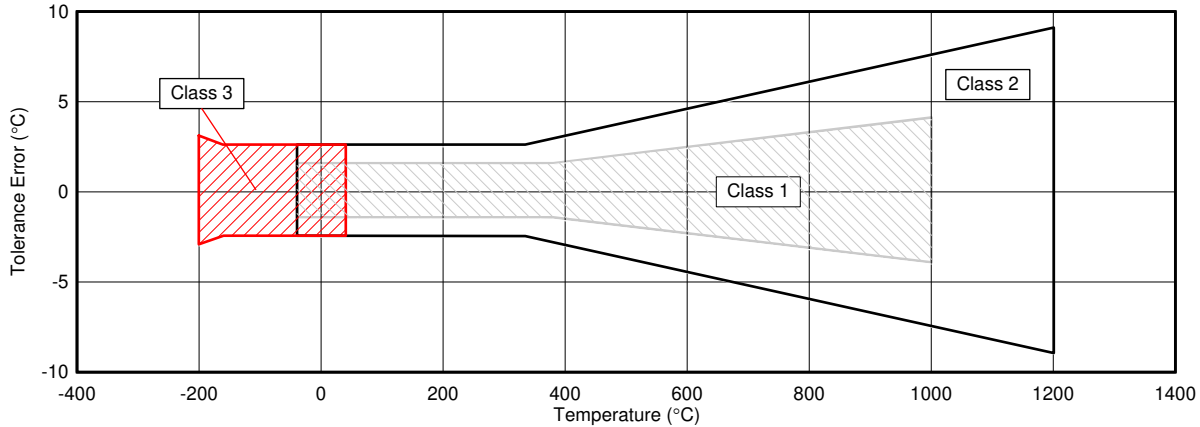


图 1-4. K 型 IEC-EN 60584-2 容差等级误差

热电偶的误差范围很广，具体取决于容差等级。但是，这些热电偶的误差容限基本都优于  $\pm 1^\circ\text{C}$  的热电偶。因此，RTD 更适合需要更高精度和准确度的应用。通常使用 16 位 ADC 进行热电偶测量，使用 24 位 ADC 进行 RTD 测量。

### 1.3 热电偶测量和冷端补偿 (CJC)

如前所述，热电偶会产生一个同热电偶结点与连接到等温块冷端的引线之间的温差相关的电压（请参阅图 1-1）。但是，热电偶产生的电压是非线性的，具体取决于冷端的温度。为了根据冷端温度准确地确定热电偶结温，需要冷端补偿。

对于冷端补偿，热电偶的引线必须处于相同的已知温度。在热电偶测量系统中，采用冷端块将热电偶引线连接到 ADC 测量。该冷端块会让两根热电偶引线保持相同温度，通常是由具有热电容的大金属块制成的连接器。在某些应用中，可能只需要尽可能增大 PCB 结点周围的覆铜面积，从而在金属填充的顶层和底层之间进行连接分层。由于气流可能会影响温度，因此可能需要在冷端块周围安装外壳。

冷端块的精确测量温度可用作冷端的基准温度。此基准测量通常通过二极管、热敏电阻或 RTD 进行。如果已知  $T_{CJ}$  处的基准温度，则可根据热电偶电压计算  $T_{TC}$  处的热电偶温度。将  $T_{CJ}$  纳入考量的过程称为冷端补偿，因为通常假设  $T_{CJ}$  为低温。

在设置冷端温度的典型方法中，热电偶的引线放置在冰浴中，从而确保基准温度为  $0^\circ\text{C}$ 。但是，在大多数系统中，冷端温度是用 RTD 或热敏电阻等器件单独测量的。

测量基准温度后，即可确定该温度（相对于  $0^\circ\text{C}$ ）对应的热电偶电压，然后将此电压与热电偶引线上测得的电压相加。该补偿提供了在  $T_{CJ}$  处于  $0^\circ\text{C}$  时本应产生的电压。请注意，参考 NIST 图表时需要该电压，因为图表值是相对于  $0^\circ\text{C}$  指定的。

热电偶电压与温度呈非线性关系。所以，不能简单地将冷端的温度与根据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 ( $T_{CJ}$ ) 转换为电压 ( $V_{CJ}$ )
2. 将冷端电压与测量到的热电偶电压相加 ( $V_{CJ} + V_{TC}$ )
3. 将冷端电压与热电偶电压之和转换为热电偶温度 ( $T_{TC}$ )

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。

## 1.4 设计说明

以下各节介绍了使用精密 ADC 进行热电偶测量设计时的不同注意事项。首先讨论 ADC 的工作范围、设置电路、进行测量转换和执行冷端补偿。每节介绍了有助于提高测量精度的不同注意事项。

### 1.4.1 确定热电偶工作范围

热电偶电压非常小，需要使用低噪声精密 ADC 进行测量。根据前面的图 1-2，不同的热电偶具有不同的输出电压范围。以工作温度为  $-270^{\circ}\text{C}$  至  $1370^{\circ}\text{C}$  的 K 型热电偶为例，该热电偶的电压范围约为  $-6.5\text{mV}$  至  $55\text{mV}$ 。

由于许多精密 ADC 都具有板载可编程增益放大器 (PGA)，因此该测量信号可进行放大以提高测量精度。使用此热电偶输出电压范围和基准电压，计算在 PGA 不超出范围的情况下允许的最大增益。许多精密 ADC 都具有增益设置为 2 倍的板载 PGA。许多精密 ADC 还具有精密电压基准。热电偶的电压测量需要低噪声的精密基准。基准误差会直接影响测量精度。基准电压与 PGA 一起决定了测量的输入范围。

例如，最大输入为  $55\text{mV}$  时，PGA 增益可设置为 32。这种情况下会产生  $1.76\text{V}$  的等效输入信号。因此，使用  $2.048\text{V}$  的内部基准电压时，可在 PGA 不超出范围的情况下最大限度地扩大 ADC 输入范围。

### 1.4.2 偏置热电偶

计算 PGA 增益后，可考虑 PGA 共模输入范围。许多 PGA 的实现方式与仪表放大器的前端类似。这就要求输入的共模电压必须处于 PGA 工作范围内。随着 PGA 增益的增加，共模输入电压会受到限制，因此放大器输出不会进入正电源轨或负电源轨。如需了解特定的绝对或共模输入电压范围，请参阅器件数据表。在大多数情况下，将输入设置为模拟电源电压的中点可确保热电偶处于 PGA 的范围内。

热电偶需要偏置来设置传感器电压直流工作点。有多种方法可以偏置热电偶。热电偶偏置较常用的方法是使用连接到热电偶任一端的大电阻，如图 1-5 所示。然后，将电阻的另一端连接到任一电源。该方法假设这些电阻相等且热电偶电压相对较小，因此将热电偶工作电压设置为  $1/2 V_s$ 。

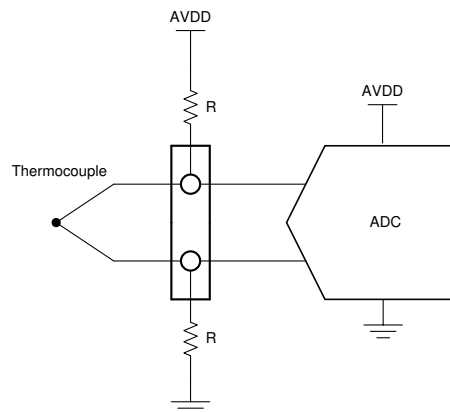


图 1-5. 使用电阻偏置热电偶

电阻值通常选择在  $500\text{k}\Omega$  至  $10\text{M}\Omega$  之间，具体大小取决于输入电流。不同的 ADC 具有不同大小的输入电流。如果电阻过高，则与电阻的 ADC 输入电流相比，偏置电流会变得过小。选择电阻值时应考虑 ADC 输入电流，因为这可能会使偏置点偏移。

如果热电偶引线较长，则电阻偏置可能会产生额外的误差。长阻性引线将与偏置电流相互影响，从而在测量中产生电压误差。在另一种偏置方法中，热电偶负极引线连接到一个已知电压源，如图 1-6 所示。使用电压源可消除



流经热电偶的偏置电流。只会保留 ADC 输入电流，但通常会下降几个数量级。在许多情况下，可使用 ADC 基准或外部基准进行偏置。同样，许多 ADC 都有一条 VBIAS 线路，此线路可用于通过 ADC 的输入多路复用器将特定模拟输入连接到电压发生器。

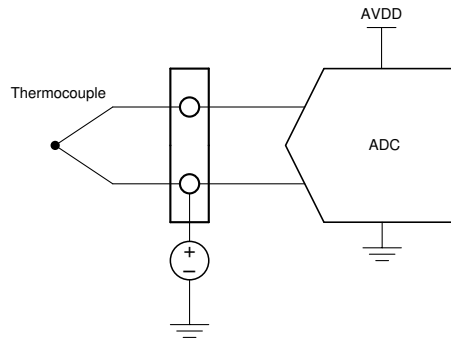


图 1-6. 使用电压偏置热电偶

同样，如果 ADC 使用双极电源，则负热电偶输入可接地。通过接地可以在电源的中点建立输入并将偏置点设置在 PGA 输入范围内。

无论如何，所有这些方法都会为热电偶测量建立一个直流工作点。本应用手册的许多后续章节将讨论用于偏置热电偶的不同电路拓扑。

### 1.4.3 热电偶电压测量

设置增益并将热电偶置于 PGA 的输入范围内后，使用 ADC 测量热电偶电压。如果使用 16 位双极 ADC 并且设定了 PGA 增益，请使用方程式 3 计算热电偶测量电压。通常，基准电压相当于正满量程。

$$V_{TC} = (\text{Output Code} \cdot V_{REF}) / (\text{Gain} \cdot 2^{15}) \quad (3)$$

此处首先以 K 型热电偶为例。此外，假设系统设置为  $V_{REF} = 2.048\text{V}$ ，PGA 增益 = 32，并使用 16 位双极 ADC。如果 ADC 回报的数据读数为 31CFh (12751d)，则可根据方程式 4 计算热电偶电压。

$$V_{TC} = (12751 \text{ codes} \cdot 2.048 \text{ V}) / (32 \cdot 32768 \text{ codes}) = 24.904 \text{ mV} \quad (4)$$

使用转换表可确定该电压时的温度为  $600^{\circ}\text{C}$ 。但是，仅当冷端温度已知为  $0^{\circ}\text{C}$  时，该值才是正确的。要获得实际热电偶温度，您需要确定冷端温度并转换为电压。

### 1.4.4 冷端补偿

有许多方法可以确定冷端温度。RTD 测量通常用于为冷端测量获取更准确的温度读数。还有热敏电阻和其他半导体温度传感器可用于进行冷端测量。无论如何完成，冷端测量都必须准确。冷端测量中的任何误差都会直接增加热电偶测量中的误差。

回到最初的示例，假设冷端测得的温度为  $25^{\circ}\text{C}$ ，根据 K 型热电偶表，这相当于  $1.000\text{mV}$  的热电电压。要获得热电偶电压的精确温度测量值，您需要将热电偶电压与等效冷端电压相加。

$$V = V_{TC} + V_{CJ} = 24.904\text{mV} + 1.000\text{mV} = 25.904\text{mV} \quad (5)$$

现在已将等效热电电压加在一起，接下来请返回到表中并找到等效温度。基于一定的插值，热电偶的最终温度约为  $623.5^{\circ}\text{C}$ 。热电偶电压是非线性的，并取决于冷端电压。

为了提高精度，冷端补偿要求将结温转换为热电压进行测量。相应的表和方程均首先假设冷端为  $0^{\circ}\text{C}$ 。当冷端未处于该温度时，计算过程需要进行特定的转换。如前一节所述，计算热电偶温度的正确方法如下。

等效热电偶温度和冷端温度之间的简单相加将得到  $625^{\circ}\text{C}$ 。由于热电偶在工作温度范围内是非线性的，此处产生了  $1.5^{\circ}\text{C}$  的误差。对热电偶曲线的非线性进行补偿的唯一方法是将冷端温度转换为等效电压，将热电偶测量电压与冷端等效电压相加，然后将结果转换回温度。

如前所述，如果冷端保持在  $0^{\circ}\text{C}$ （就像冰浴保持温度一样），则等效的冷端热电电压为  $0\text{mV}$ 。这样就可以将热电偶电压直接转换为温度。

### 1.4.5 转换为温度

转换来自 ADC 的数据需要测量热电偶电压和冷端温度。通常情况下，每个参数的测量是交错进行的，旨在确保两者的测量都是精确的。图 1-7 中的流程图展示了根据 ADC 测量值确定热电偶实际温度的转换方法。

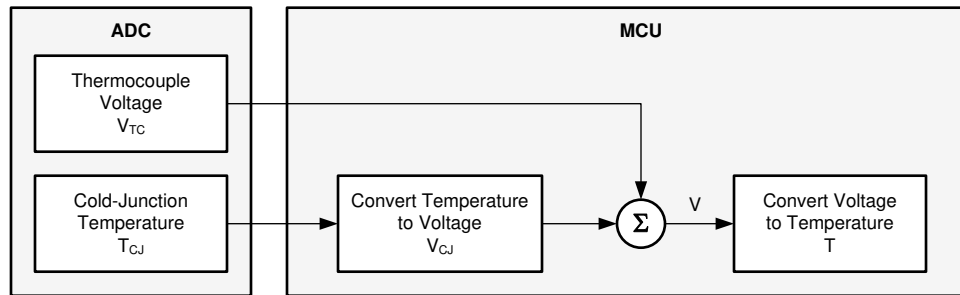


图 1-7. 热电偶和冷端测量值转换为温度

如前所述，冷端温度 ( $T_{CJ}$ ) 首先转换为热电电压 ( $V_{CJ}$ )。然后，将此电压与 ADC 测量的热电偶电压相加，其中  $V = V_{CJ} + V_{TC}$ 。该电压总和会转换为温度以确定热电偶传感器的温度。

通过节 1.2.2 中所述的多项式方程可以计算从温度到电压或从电压到温度的转换。系数可以存储在微控制器中，以便在每次 ADC 转换时进行这些计算。

处理器密集型计算的替代方法是使用查找表对这些多项式进行简单的线性插值。温度和电压范围可以均匀地分解以进行转换。使用 [ADS1118 进行精密热电偶测量](#) 介绍了如何使用具有不同表格条目数的查找表来计算热电偶温度。图 1-8 展示了在  $0^{\circ}\text{C}$  至  $+500^{\circ}\text{C}$  内使用查找表对 K 型热电偶进行线性插值时的预期转换误差。当查找表条目数超过 16 时，精度的提高越来越小。

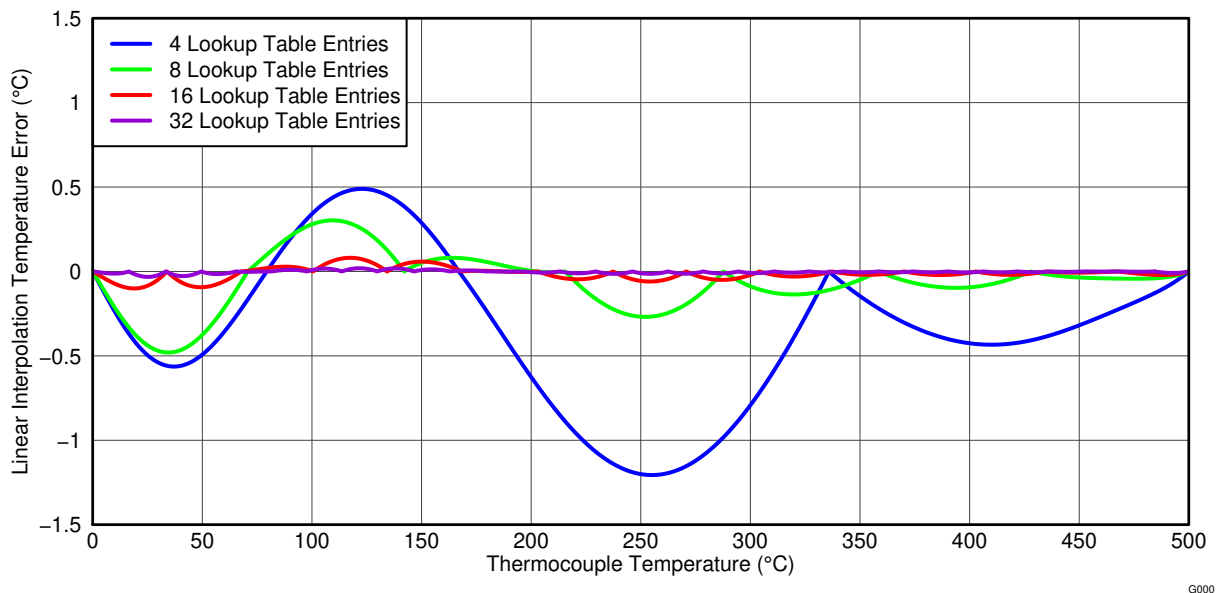


图 1-8. 使用各种查找表时的插值误差比较

### 1.4.6 烧毁检测

如果热电偶发生故障或烧毁，系统设计人员可能希望获得某种表明发生了这种情况的指示。开路传感器的满量程 ADC 读数可用于帮助确定该情况。此测量可能是正常测量的一部分，或者系统可能需要临时测量作为定期检查。

热电偶偏置方法可实现自动烧毁检测。例如，通过从每根热电偶引线连接到任一电源的电阻进行热电偶偏置时，即可实现烧毁检测（如图 1-9 所示）。如果热电偶完好无损并产生小电压，小电阻电流会将热电偶保持在直流偏

置点。如果热电偶烧毁并变为高阻抗，电阻会将每根引线的电压拉至任一电源轨。这会导致 ADC 输入大于满量程范围，并导致 ADC 给出满量程读数（16 位 ADC 为 7FFFh）。同样，为克服 ADC 的输入偏置电流，电阻应足够小。

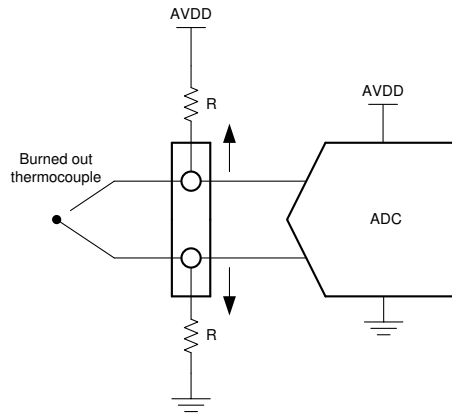


图 1-9. 使用电阻偏置进行烧毁检测

在不同的热电偶偏置方法中，可能并没有上拉电阻来支持烧毁测量。许多精密 ADC 包括烧毁电流源 (BOCS)，其中使用电流源在正模拟输入端进行上拉，而使用电流阱在负模拟输入端进行下拉，如图 1-10 所示。这些电流源用于在烧毁情况下拉开热电偶的正极和负极引线。即使热电偶仅由直流源（例如基准电压或 VBIAS 线路）从一端进行偏置，这也很有用。正烧毁电流源会将正引线拉到足够高，以便 ADC 的读数为正满量程读数。

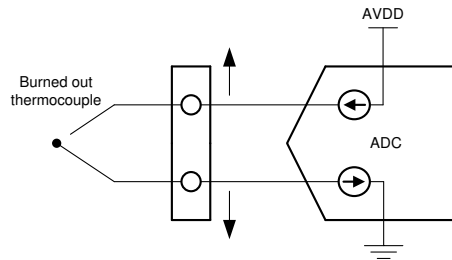


图 1-10. 使用 BOCS 进行烧毁检测

通常，使用 BOCS 进行的烧毁测量应该是与正常温度测量不同的测量。当热电偶未烧毁时，使用 BOCS 可能会引起错误。额外的电流可能会导致传感器自发热。此外，ADC 的前端通常有 RC 滤波器。由于 BOCS 由器件提供，因此从 BOCS 流出的额外电流会在流经串联滤波电阻时产生误差电压。

启用 BOCS 进行烧毁测量时，请确保在两次测量之间有额外的时间进行电压设置。在烧毁和温度测量中，滤波器电容可能需要一些时间来实现电压稳定。

## 2 热电偶测量电路

### 备注

以下应用部分中的信息不属于 TI 元件规范，TI 不担保其准确性和完整性。TI 的客户应负责确定各元件是否适用于其应用。客户应验证并测试其设计实现，以确认系统功能。

以下各节介绍了采用  $\Delta$ - $\Sigma$  ADC 的热电偶电路拓扑。由于热电偶测量主要是简单的电压测量，因此这些电路示例主要侧重于用于偏置热电偶和烧毁检测的不同电路拓扑。可参考 [设计说明](#) 一节完成采用以下系统拓扑的设计。对于每种拓扑，请根据热电偶工作范围确定 PGA 设置，考虑必要的偏置和 PGA 输入范围，并确定冷端补偿。对于以下系统拓扑，还将介绍烧毁检测。本应用手册末尾将讨论冷端测量。

本手册显示了通用 16 位双极 ADC 在使用其正满量程范围时的转换结果。使用 24 位 ADC 进行的转换具有相似的计算方式。结果显示为 PGA 基准电压和增益的函数。转换为温度取决于各个热电偶传感器的线性度和误差以及冷端补偿。

如前几节所述，可在 NIST 网站 (<http://srdata.nist.gov/its90/menu/menu.html>) 上找到根据热电电压确定热电偶温度的转换表。

## 2.1 使用上拉和下拉偏置电阻进行热电偶测量

在此拓扑中，使用匹配的上拉和下拉电阻对热电偶直流电压进行偏置。这是一种常见的偏置方法，可实现烧毁检测。

### 2.1.1 原理图

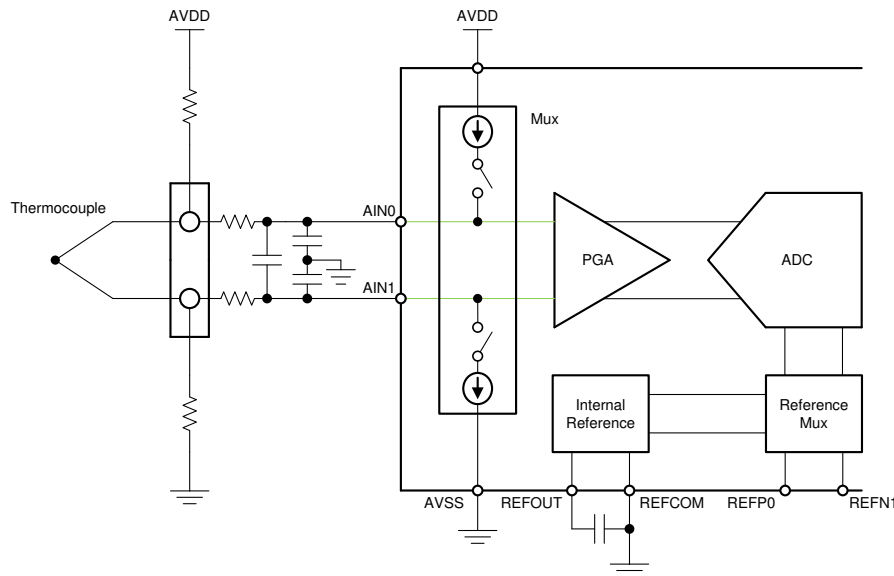


图 2-1. 具有上拉和下拉电阻的热电偶测量电路

### 2.1.2 优缺点

#### 优势：

- 简单偏置
- 通过使用偏置电阻，无需单独测量即可实现烧毁检测

#### 劣势：

- 需要两个外部电阻来进行偏置
- 偏置电流会流经热电偶和电阻引线，产生额外误差

### 2.1.3 设计说明

测量电路需要：

- 上拉和下拉电阻
- AINP 和 AINN 输入
- 内部基准或外部电压基准
- 等温冷端连接和测量

图 2-1 展示了常见的热电偶偏置方法。通过将匹配电阻连接到热电偶的任一引线，即可设置输入信号的直流偏置。第一个电阻将热电偶的正极引线拉至 AVDD，第二个电阻将热电偶的负极引线拉至 AVSS。由于测得的热电偶电压很小，偏置电流可以近似为电源电压除以两个偏置电阻的值。如果电阻匹配，则热电偶电压会偏置到模拟电源的中点。将偏置设置到电源的中点附近可确保输入电压处于 PGA 的输入范围内。请参阅 ADC 数据表，了解特定的 PGA 共模和绝对输入范围。

较大的电阻值可减少流经热电偶和热电偶引线的电流。与长阻性引线相互影响的偏置电流会产生额外的电压，该电压会被 ADC 测量为误差电压。但是，偏置电流必须足够大，使电阻电流明显大于 ADC 的输入电流。如果偏置电流很小或接近 ADC 输入电流电平，则热电偶的直流偏置会从电源的中点偏移。偏置电阻值通常为 500kΩ 至 10MΩ。

测量中的另一个误差来自 ADC 的输入电流。当 ADC 输入电流与串联输入滤波电阻以及输入多路复用器的任何相关串联电阻相互影响时，还会出现额外的电压误差。由于无法消除此电流，因此选择具有低输入电流的 ADC 并计算该误差对测量结果的影响非常重要。

偏置电阻也用于烧毁测量。在热电偶烧毁的情况下，正输入被拉至 AVDD，而负输入被拉至 AVSS。这会在模拟输入端产生一个大电压，使 ADC 超出范围。如果 ADC 超出范围，则 ADC 值的读数将为 7FFFh (假设是 16 位双极 ADC)，显示满量程读数以指示热电偶烧毁。为了确保 ADC 报告满量程读数，请验证偏置电阻是否足够低，以便这些电阻能够拉动 ADC 的输入偏置电流，并产生大于输入满量程电压的电压。由于偏置电阻始终就位，因此不需要单独的烧毁测量。

除非冷端温度为 0°C，否则应进行单独的冷端测量。该测量可以通过几种不同的方法完成：使用 RTD、经过校准的热敏电阻或各种集成电路温度传感器。

#### 2.1.4 测量转换

使用 ADC 内部电压基准或外部电压基准时，输出代码将转换为测得的热电偶电压。输出代码 7FFFh 可能表示传感器开路。

$$V_{TC} = (V_{REF} \cdot \text{Code}) / (2^{15} \cdot \text{Gain}) \quad (6)$$

测量冷端温度并将温度转换为等效的冷端热电电压。将热电偶电压与等效冷端电压相加。

$$V = V_{TC} + V_{CJ} \quad (7)$$

将产生的电压 (V) 转换为温度以确定精确的热电偶温度。

#### 2.1.5 通用寄存器设置

- 启用内部基准或使用外部基准，设置 ADC 基准
- 为 AINP 和 AINN 选择多路复用器设置，以便测量热电偶的引线
- 启用 PGA，将增益设置为所需值
- 选择数据速率和数字滤波器设置
- 冷端补偿测量设置

## 2.2 使用连接到负极引线的偏置电阻进行热电偶测量

另一种用于偏置热电偶的拓扑是将偏置电阻连接到热电偶的一端。这样可以消除通过热电偶长阻性引线产生的任何偏置电流，从而减少任何增加的电压误差，但需要单独进行烧毁传感器测量。

### 2.2.1 原理图

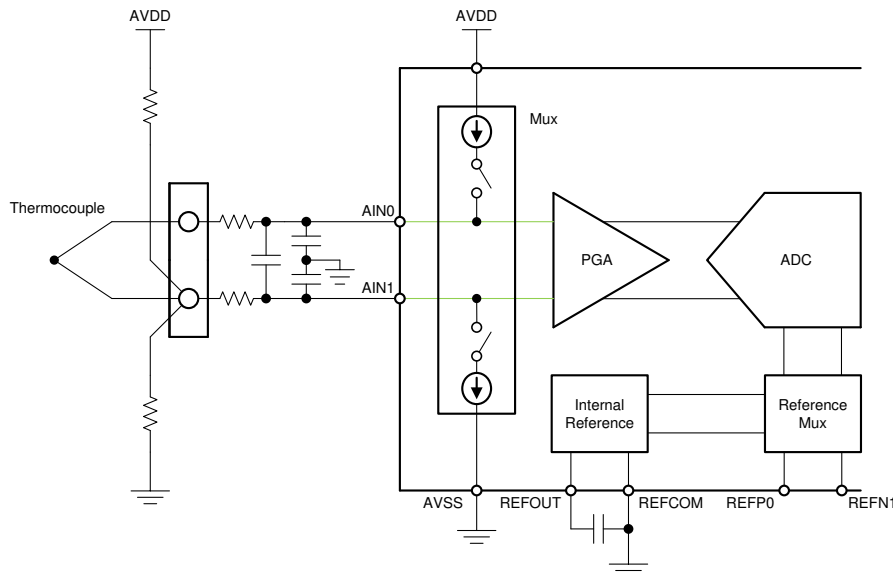


图 2-2. 将偏置电阻连接到负极引线的热电偶测量电路

### 2.2.2 优缺点

优势：

- 通过热电偶的长阻性引线消除由偏置电流产生的电压误差

劣势：

- 需要启用烧毁电流源并进行单独测量以进行烧毁检测

### 2.2.3 设计说明

测量电路需要：

- 连接到热电偶负极引线的偏置电阻
- AINP 和 AINN 输入
- 内部基准或外部电压基准
- 用于单独进行传感器烧毁测量的烧毁电流源
- 等温冷端连接和测量

与第一个设计类似，此拓扑使用匹配电阻来设置热电偶的偏置。在此示例中，匹配电阻仅用于偏置热电偶的负端。只要流经电阻的电流明显大于 ADC 输入电流，电阻偏置就会将负输入置于接近  $1/2 V_s$  的位置。将偏置设置为接近  $1/2 V_s$  可确保输入电压处于 PGA 的范围内。

将偏置电阻仅连接到热电偶负极引线可消除流经热电偶的偏置电流。这样就会消除与热电偶阻性引线相互影响的偏置电流产生的误差。

消除流经热电偶阻性引线的偏置电流并不能消除所有误差。与前一个拓扑一样，由于 ADC 输入电流会与串联输入滤波电阻以及 ADC 输入多路复用器的任何相关串联电阻相互影响，因此仍然存在误差。由于无法消除此电流，因此选择具有低输入电流的 ADC 并计算该误差对测量结果的影响非常重要。

在前一个设计中，在热电偶烧毁的情况下，偏置电阻会将输入拉开。在此设计中，一根引线仍设置为  $1/2 V_s$ ，而另一根引线保持未连接状态。由于在热电偶正极引线上没有电流上拉，因此烧毁检测需要在更改 ADC 设置后进行再次测量。为了检测热电偶烧毁或开路，需启用 ADC 中的烧毁电流源以进行单独的烧毁电流测量。对于正常测

量，烧毁电流源不应保持开启状态。这些电流源会与串联输入滤波电阻以及多路复用器中的串联电阻相互影响，从而增加较大的额外误差。

根据所使用的 ADC，烧毁电流源可设置为不同的电平。请确认烧毁电流电平足够高，以便开路输入会产生用于烧毁检测的满量程读数（假设使用 16 位双极 ADC，此读数为 7FFFh）。

除非冷端温度为 0°C，否则应进行单独的冷端测量。该测量可以通过几种不同的方法完成：使用 RTD、经过校准的热敏电阻或各种集成电路温度传感器。

### 2.2.4 测量转换

使用 ADC 内部电压基准或外部电压基准时，输出代码将转换为测得的热电偶电压。

$$V_{TC} = (V_{REF} \cdot \text{Code}) / (2^{15} \cdot \text{Gain}) \quad (8)$$

测量冷端温度并将温度转换为等效的冷端热电电压。将热电偶电压与等效冷端电压相加。

$$V = V_{TC} + V_{CJ} \quad (9)$$

将产生的电压 (V) 转换为温度以确定精确的热电偶温度。

烧毁检测需要启用 BOCS 并进行单独的测量。输出代码 7FFFh 可能表示传感器开路。

### 2.2.5 通用寄存器设置

- 启用内部基准或使用外部基准，设置 ADC 基准
- 为 AINP 和 AINN 选择多路复用器设置，以便测量热电偶的引线
- 启用 PGA，将增益设置为所需值
- 选择数据速率和数字滤波器设置
- 为单独的烧毁测量启用烧毁电流源（可选）
- 冷端补偿测量设置



## 2.3 使用用于传感器偏置的 VBIAS 和上拉电阻进行热电偶测量

另一种偏置热电偶的拓扑需要启用 ADC 多路复用器中的 VBIAS 发生器。VBIAS 连接到热电偶的负极引线，将热电偶设置为  $1/2 V_s$  电压。在热电偶的正极引线与 AVDD 之间连接一个上拉电阻。这样会在烧毁条件下将正输入拉离 VBIAS，从而产生正的满量程 ADC 读数。

### 2.3.1 原理图

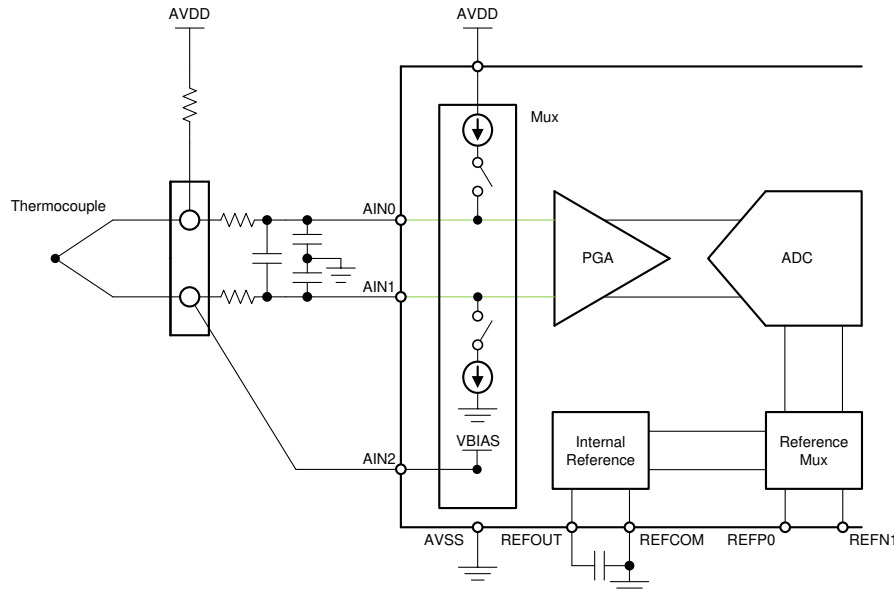


图 2-3. 使用 VBIAS 实现传感器偏置并具有上拉电阻的热电偶测量电路

### 2.3.2 优缺点

#### 优势：

- 使用 VBIAS 来设置传感器直流电压
- 使用上拉至 AVDD 的电阻，无需单独测量即可实现烧毁检测

#### 劣势：

- 需要一个额外电阻作为上拉电阻以进行烧毁检测
- 偏置电流会流经热电偶和电阻引线，产生额外误差
- 需要额外的输入多路复用器线路来连接到 VBIAS

### 2.3.3 设计说明

测量电路需要：

- 连接到热电偶正极引线的单个上拉电阻
- 启用连接到热电偶负极引线的 VBIAS 电压
- AINP 和 AINN 输入，以及用于 VBIAS 连接的 AINx 连接
- 内部基准或外部电压基准
- 等温冷端连接和测量

在许多精密 ADC 中，偏置电压发生器为热电偶等非偏置传感器提供直流输入电压。该 VBIAS 电压可通过连接到 ADC 输入引脚的多路复用器连接到传感器。对于大多数器件，该 VBIAS 可设置为  $(AVDD - AVSS) / 2$  的电压。这样便可提供一个  $1/2 V_s$  电压以用于将传感器偏置设置为 PGA 输入范围的中间值。

可将单个上拉电阻连接到热电偶正极引线以进行烧毁检测。在热电偶烧毁的情况下，负极引线仍设置为  $1/2 V_s$ ，而正极引线上拉至 AVDD。与先前的设计一样，为保持较低的偏置电流，上拉电阻通常较大。与热电偶引线电阻相互影响的任何偏置电流都会在测量中引起的误差。但是，偏置电流必须足够大，才能压制 ADC 输入电流。如果存在烧毁情况，上拉电阻必须能够将正模拟输入拉高至高于 VBIAS 的足够电平，以便提供 ADC 满量程读数（假设使用 16 位双极 ADC，此读数为 7FFFh）。

与先前的拓扑一样，为保持较低的偏置电流，偏置电阻必须很大。与热电偶阻性引线相互影响的偏置电流会被测量为误差电压。此外，ADC 输入电流与串联输入滤波电阻和多路复用器电阻相互影响，从而产生另一个测量误差。

虽然可以将 VBIAS 直接连接到测量负输入端 (AIN1，通过 ADC 多路复用器)，但这种特殊配置可能不会产生精确的结果。偏置电流从上拉电阻流经热电偶，流入输入端，最后灌入 VBIAS 连接。与串联滤波电阻 (以及输入多路复用器中的任何串联电阻) 相互影响的偏置电流会导致测量中出现显著误差。在图 2-3 所示的配置中，VBIAS 从一个外部引脚驱动热电偶引线，从而使偏置电流绕过输入滤波电阻。

除非冷端温度为 0°C，否则应进行单独的冷端测量。该测量可以通过几种不同的方法完成：使用 RTD、经过校准的热敏电阻或各种集成电路温度传感器。

### 2.3.4 测量转换

使用 ADC 内部电压基准或外部电压基准时，输出代码将转换为测得的热电偶电压。输出代码 7FFFh 可能表示传感器开路。

$$V_{TC} = (V_{REF} \cdot \text{Code}) / (2^{15} \cdot \text{Gain}) \quad (10)$$

测量冷端温度并将温度转换为等效的冷端热电电压。将热电偶电压与等效冷端电压相加。

$$V = V_{TC} + V_{CJ} \quad (11)$$

将产生的电压 (V) 转换为温度以确定精确的热电偶温度。

### 2.3.5 通用寄存器设置

- 启用内部基准或使用外部基准，设置 ADC 基准
- 为 AINP 和 AINN 选择多路复用器设置，以便测量热电偶的引线
- 在连接到热电偶负极引线的单独模拟输入引脚上启用 VBIAS
- 启用 PGA，将增益设置为所需值
- 选择数据速率和数字滤波器设置
- 冷端补偿测量设置

## 2.4 使用用于传感器偏置的 VBIAS 和 BOCS 进行热电偶测量

与节 2.3 中的电路类似，此设计使用 VBIAS 进行传感器偏置。但是，不会使用外部电阻进行烧毁测量。启用 ADC 中的烧毁电流源后，将进行单独的烧毁测量。如果没有外部偏置电阻，流经热电偶、滤波电阻和 ADC 多路复用器内部任何电阻的偏置电流就不会产生额外的电压误差。

### 2.4.1 原理图

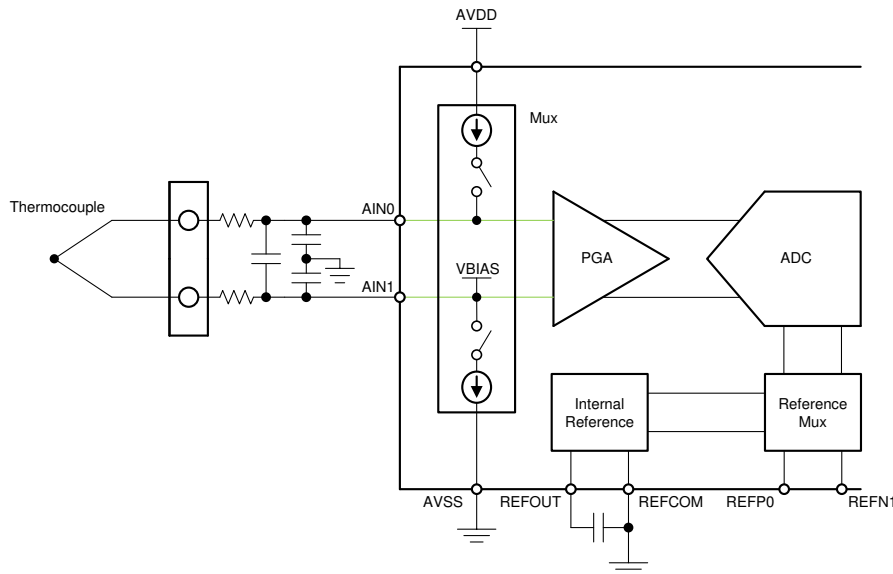


图 2-4. 使用 VBIAS 实现传感器偏置并具有 BOCS 的热电偶测量电路

### 2.4.2 优缺点

#### 优势：

- 使用 VBIAS 来设置传感器直流电压
- 无需通过 ADC 多路复用器进行外部 VBIAS 连接
- 无需外部元件即可进行偏置或烧毁测量

#### 劣势：

- 需要启用烧毁电流源并进行单独测量以进行烧毁检测

### 2.4.3 设计说明

测量电路需要：

- 启用连接到热电偶负极引线的 VBIAS 电压
- AINP 和 AINN 输入
- 内部基准或外部电压基准
- 用于单独进行传感器烧毁测量的烧毁电流源
- 等温冷端连接和测量

与前一个设计一样，VBIAS 为非偏置传感器提供直流输入电压。该 VBIAS 电压可通过多路复用器连接到热电偶负极输入，通常设置为  $(AVDD - AVSS) / 2$  的电压。如前所述，流经热电偶和任何串联输入电阻的偏置电流不会产生额外的电压误差。但是，由于 ADC 输入电流与相同元件的相互影响，可能会产生一定的小误差。请参阅器件数据表，了解有关 ADC 输入电流的信息。

由于在热电偶正极引线上没有电流上拉，因此烧毁检测需要在更改 ADC 设置后进行再次测量。为了检测热电偶烧毁或开路，需启用 ADC 中的烧毁电流源以进行单独的烧毁电流测量。对于正常测量，烧毁电流源不应保持开启状态。这些电流源会与串联输入滤波电阻以及多路复用器中的串联电阻相互影响，从而增加较大的额外误差。

根据所使用的 ADC，烧毁电流源可设置为不同的电平。请确认烧毁电流电平足够高，以便开路输入会产生用于烧毁检测的满量程读数（假设使用 16 位双极 ADC，此读数为 7FFFh）。

除非冷端温度为 0°C，否则应进行单独的冷端测量。该测量可以通过几种不同的方法完成：使用 RTD、经过校准的热敏电阻或各种集成电路温度传感器。

#### 2.4.4 测量转换

使用 ADC 内部电压基准或外部电压基准时，输出代码将转换为测得的热电偶电压。

$$V_{TC} = (V_{REF} \cdot \text{Code}) / (2^{15} \cdot \text{Gain}) \quad (12)$$

测量冷端温度并将温度转换为等效的冷端热电电压。将热电偶电压与等效冷端电压相加。

$$V = V_{TC} + V_{CJ} \quad (13)$$

将产生的电压 (V) 转换为温度以确定精确的热电偶温度。

烧毁检测需要启用 BOCS 并进行单独的测量。输出代码 7FFFh 可能表示传感器开路。

#### 2.4.5 通用寄存器设置

- 启用内部基准或使用外部基准，设置 ADC 基准
- 为 AINP 和 AINN 选择多路复用器设置，以便测量热电偶的引线
- 启用 VBIAS 并连接到热电偶的负极引线
- 启用 PGA，将增益设置为所需值
- 选择数据速率和数字滤波器设置
- 为单独的烧毁测量启用烧毁电流源 ( 可选 )
- 冷端补偿测量设置

## 2.5 使用 REFOUT 偏置和上拉电阻进行热电偶测量

与节 2.3 中的电路类似，此设计使用内部基准来偏置热电偶，而不是使用 VBIAS 连接。虽然该电压可能并未严格位于  $1/2 V_s$  处，但它应该足够接近这个位置，以便将传感器共模电压设置在 PGA 的输入范围内。

### 2.5.1 原理图

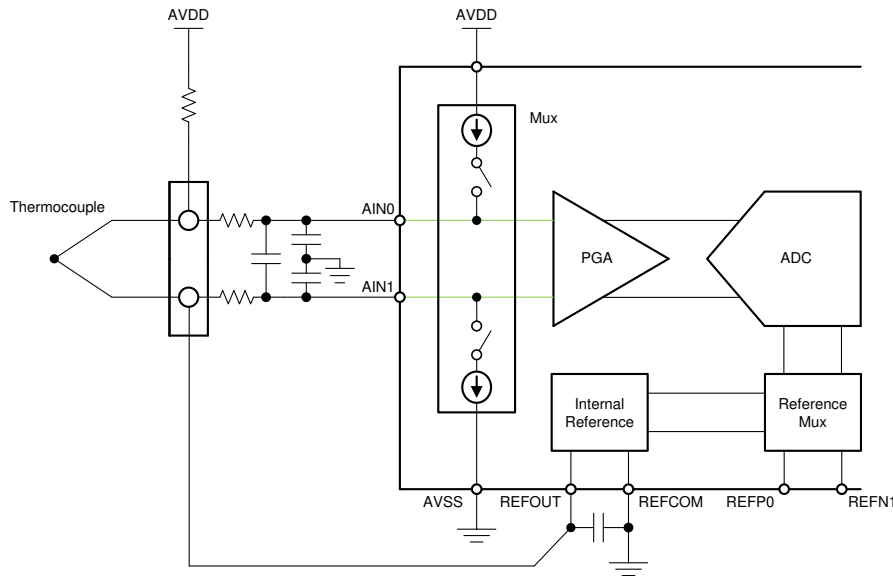


图 2-5. 具有 REFOUT 偏置和上拉电阻的热电偶测量电路

### 2.5.2 优缺点

#### 优势：

- 使用内部基准来设置传感器直流电压
- 使用上拉至 AVDD 的电阻，无需单独测量即可实现烧毁检测

#### 劣势：

- 需要一个额外电阻作为上拉电阻以进行烧毁测量
- 偏置电流会流经热电偶和电阻引线，产生额外误差

### 2.5.3 设计说明

测量电路需要：

- 连接到热电偶正极引线的单个上拉电阻
- 启用从基准输出引脚 (REFOUT) 连接到热电偶负极引线的内部基准电压
- AINP 和 AINN 输入
- 等温冷端连接和测量

许多精密 ADC 的另一个特性是内部基准。内部基准通常仅用作 ADC 基准。但是，如果基准经过缓冲并从器件引出至引脚，则可能将其用于偏置热电偶。虽然该基准电压可能并未严格位于  $1/2 V_s$  电压处，但它很可能处于 PGA 的输入范围内。请参阅 ADC 数据表，了解特定的 PGA 共模和绝对输入范围。

首先，启用内部基准电压。然后，将 REFOUT 线路连接至热电偶负极输入，同时使用电阻将热电偶正极输入上拉至 AVDD。与使用 VBIAS 的类似设计一样，使用较大的上拉电阻进行烧毁检测。如果热电偶已烧毁并变为高阻抗，则 ADC 会超出范围并提供满量程读数。

可将单个上拉电阻连接到热电偶正极引线以进行烧毁检测。在热电偶烧毁的情况下，负极引线仍设置为  $1/2 V_s$ ，而正极引线上拉至 AVDD。与先前的设计一样，为保持较低的偏置电流，上拉电阻通常较大。与热电偶引线电阻相互影响的任何偏置电流都会在测量中引起的误差。但是，偏置电流必须足够大，才能压制 ADC 输入电流。如果存在烧毁情况，上拉电阻必须能够将正模拟输入拉高至高于 VBIAS 的足够电平，以便提供 ADC 满量程读数（假设使用 16 位双极 ADC，此读数为 7FFFh）。

与先前的拓扑一样，为保持较低的偏置电流，偏置电阻必须很大。与热电偶阻性引线相互影响的偏置电流会被测量为误差电压。此外，ADC 输入电流与串联输入滤波电阻和多路复用器电阻相互影响，从而产生另一个测量误差。

除非冷端温度为 0°C，否则应进行单独的冷端测量。该测量可以通过几种不同的方法完成：使用 RTD、经过校准的热敏电阻或各种集成电路温度传感器。

#### 2.5.4 测量转换

使用 ADC 内部电压基准或外部电压基准时，输出代码将转换为测得的热电偶电压。输出代码 7FFFh 可能表示传感器开路。

$$V_{TC} = (V_{REF} \cdot \text{Code}) / (2^{15} \cdot \text{Gain}) \quad (14)$$

测量冷端温度并将温度转换为等效的冷端热电电压。将热电偶电压与等效冷端电压相加。

$$V = V_{TC} + V_{CJ} \quad (15)$$

将产生的电压 (V) 转换为温度以确定精确的热电偶温度。

#### 2.5.5 通用的寄存器设置

- 启用内部基准，设置为 ADC 基准
- 为 AINP 和 AINN 选择多路复用器设置，以便测量热电偶的引线
- 启用 PGA，将增益设置为所需值
- 选择数据速率和数字滤波器设置
- 冷端补偿测量设置

## 2.6 使用 REFOUT 偏置和 BOCS 进行热电偶测量

与前一个设计类似，通过从 ADC 到内部基准的外部连接对热电偶进行偏置。但是，烧毁检测是在启用烧毁电流源的情况下通过第二次测量进行的。

### 2.6.1 原理图

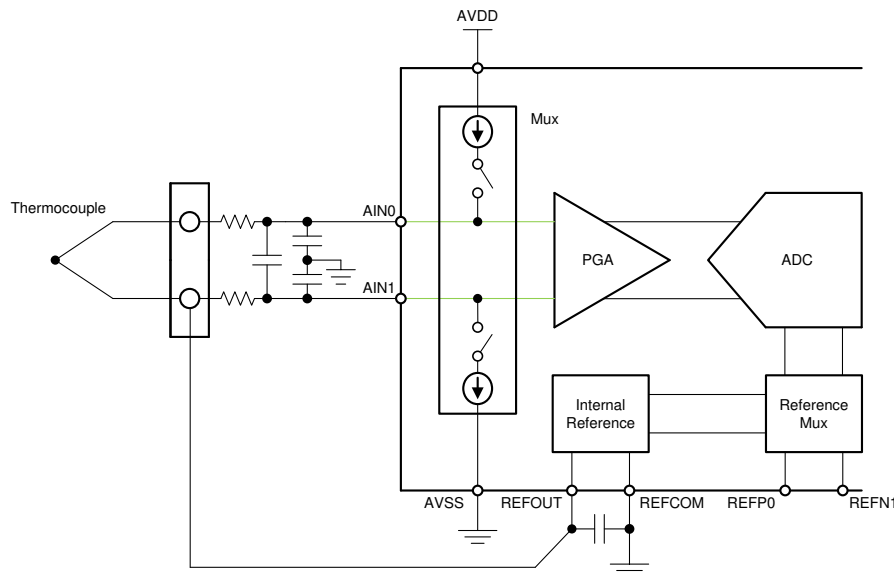


图 2-6. 具有 REFOUT 偏置和 BOCS 的热电偶测量电路

### 2.6.2 优缺点

#### 优势：

- 使用内部基准来设置传感器直流电压
- 无需额外元件即可进行烧毁测量

#### 劣势：

- 需要启用烧毁电流源并进行单独测量以进行烧毁检测

### 2.6.3 设计说明

测量电路需要：

- 启用从基准输出引脚 (REFOUT) 连接到热电偶负极引线的内部基准电压
- AINP 和 AINN 输入
- 用于单独进行传感器烧毁测量的烧毁电流源
- 等温冷端连接和测量

与前一个拓扑一样，REFOUT 线路连接至热电偶负极输入来实现传感器偏置。但是，不会使用连接正极引线和 AVDD 的电阻，而是仅在烧毁传感器测量期间启用烧毁电流源。

由于 ADC 输入电流会与串联输入滤波电阻以及 ADC 输入多路复用器的任何相关串联电阻相互影响，因此仍然存在误差。由于无法消除此电流，因此选择具有低输入电流的 ADC 并计算该误差对测量结果的影响非常重要。

为了检测热电偶烧毁或开路，需启用 ADC 中的烧毁电流源以进行单独的烧毁电流测量。对于正常测量，烧毁电流源不应保持开启状态。这些电流源会与串联输入滤波电阻以及多路复用器中的串联电阻相互影响，从而增加较大的额外误差。

根据所使用的 ADC，烧毁电流源可设置为不同的电平。请确认烧毁电流电平足够高，以便开路输入会产生用于烧毁检测的满量程读数（假设使用 16 位双极 ADC，此读数为 7FFFh）。

除非冷端温度为 0°C，否则应进行单独的冷端测量。该测量可以通过几种不同的方法完成：使用 RTD、经过校准的热敏电阻或各种集成电路温度传感器。

### 2.6.4 测量转换

使用 ADC 内部电压基准或外部电压基准时，输出代码将转换为测得的热电偶电压。

$$V_{TC} = (V_{REF} \cdot \text{Code}) / (2^{15} \cdot \text{Gain}) \quad (16)$$

测量冷端温度并将温度转换为等效的冷端热电电压。将热电偶电压与等效冷端电压相加。

$$V = V_{TC} + V_{CJ} \quad (17)$$

将产生的电压 (V) 转换为温度以确定精确的热电偶温度。

烧毁检测需要启用 BOCS 并进行单独的测量。输出代码 7FFFh 可能表示传感器开路。

### 2.6.5 通用寄存器设置

- 启用内部基准，设置 ADC 基准
- 为 AINP 和 AINN 选择多路复用器设置，以便测量热电偶的引线
- 启用 PGA，将增益设置为所需值
- 选择数据速率和数字滤波器设置
- 为单独的烧毁测量启用烧毁电流源 ( 可选 )
- 冷端补偿测量设置



## 2.7 使用双极电源和接地偏置进行热电偶测量

与使用外部电压源对热电偶进行偏置类似，可以通过将热电偶的负极引线接地来实现偏置，但要对 ADC 使用双极电源。

### 2.7.1 原理图

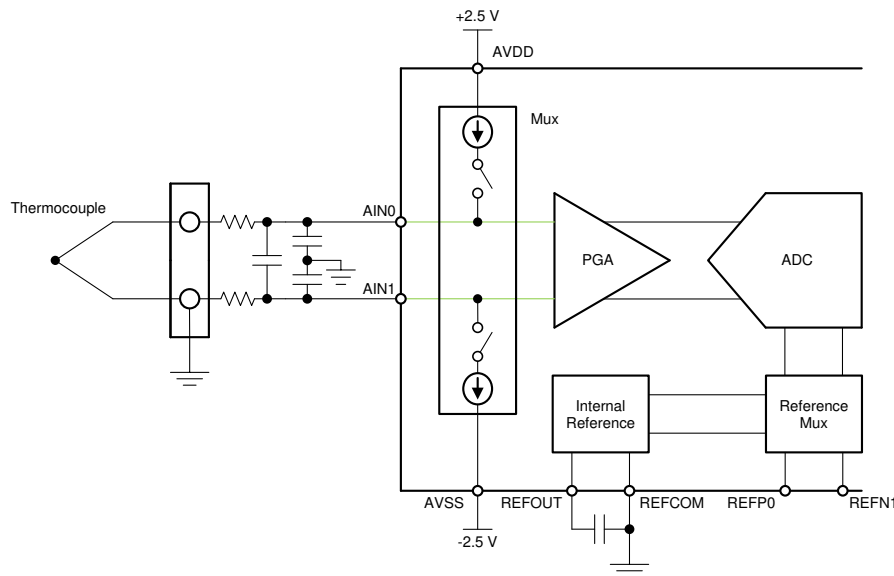


图 2-7. 具有双极电源和接地偏置的热电偶测量电路

### 2.7.2 优缺点

#### 优势：

- 使用地线来设置传感器直流电压
- 无需额外元件即可进行烧毁测量

#### 劣势：

- 需要双极模拟电源
- 需要启用烧毁电流源并进行单独测量以进行烧毁检测

### 2.7.3 设计说明

测量电路需要：

- 双极电源，且接地节点连接至热电偶的负极引线
- AINP 和 AINN 输入
- 内部基准或外部电压基准
- 用于单独进行传感器烧毁测量的烧毁电流源
- 等温冷端连接和测量

在此拓扑中，热电偶的负极引线接地。但是，这些电源是双极电源，因此会将接地端本身置于  $1/2 V_s$ 。这与使用 VBIAS 来偏置热电偶非常相似，因为接地端本身就是  $1/2 V_s$ 。由于输入设置为  $1/2 V_s$ ，因此输入范围在 PGA 的范围内。

如果没有上拉电阻，则流过热电偶阻性引线的偏置电流不会产生误差。但是，由于 ADC 输入电流会与串联输入滤波电阻以及 ADC 输入多路复用器的任何相关串联电阻相互影响，因此仍然存在误差。由于无法消除此电流，因此选择具有低输入电流的 ADC 并计算该误差对测量结果的影响非常重要。

在此设计中，一根引线仍设置为  $1/2 V_s$ ，而另一根引线保持未连接状态。由于在热电偶正极引线上没有电流上拉，因此烧毁检测需要在更改 ADC 设置后进行再次测量。为了检测热电偶烧毁或开路，需启用 ADC 中的烧毁电流源以进行单独的烧毁电流测量。对于正常测量，烧毁电流源不应保持开启状态。这些电流源会与串联输入滤波电阻以及多路复用器中的串联电阻相互影响，从而增加较大的额外误差。

根据所使用的 ADC，烧毁电流源可设置为不同的电平。请确认烧毁电流电平足够高，以便开路输入会产生用于烧毁检测的满量程读数（假设使用 16 位双极 ADC，此读数为 7FFFh）。

除非冷端温度为 0°C，否则应进行单独的冷端测量。该测量可以通过几种不同的方法完成：使用 RTD、经过校准的热敏电阻或各种集成电路温度传感器。

#### 2.7.4 测量转换

使用 ADC 内部电压基准或外部电压基准时，输出代码将转换为测得的热电偶电压。

$$V_{TC} = (V_{REF} \cdot \text{Code}) / (2^{15} \cdot \text{Gain}) \quad (18)$$

测量冷端温度并将温度转换为等效的冷端热电电压。将热电偶电压与等效冷端电压相加。

$$V = V_{TC} + V_{CJ} \quad (19)$$

将产生的电压 (V) 转换为温度以确定精确的热电偶温度。

烧毁检测需要启用 BOCS 并进行单独的测量。输出代码 7FFFh 可能表示传感器开路。

#### 2.7.5 通用寄存器设置

- 启用内部基准或使用外部基准，设置 ADC 基准
- 为 AINP 和 AINN 选择多路复用器设置，以便测量热电偶的引线
- 启用 PGA，将增益设置为所需值
- 选择数据速率和数字滤波器设置
- 为烧毁测量启用烧毁电流源（可选）
- 冷端补偿测量设置

## 2.8 冷端补偿电路

在先前的热电偶电路中，未讨论冷端补偿。以下几节介绍了使用 ADC 的其他输入通道进行冷端温度测量的几个示例。几种不同的温度传感器以不同的电路拓扑显示。

无论使用何种温度传感器，都要确保冷端测量能够准确测量出连接热电偶引线的等温块的温度。

### 2.8.1 RTD 冷端补偿

如其他应用手册中所述，RTD 温度测量可用于冷端补偿。RTD 有多种不同的配置，但图 2-8 所示的配置适用于双线 RTD。在大多数情况下，RTD 测量可能具有更好的精度。

#### 2.8.1.1 原理图

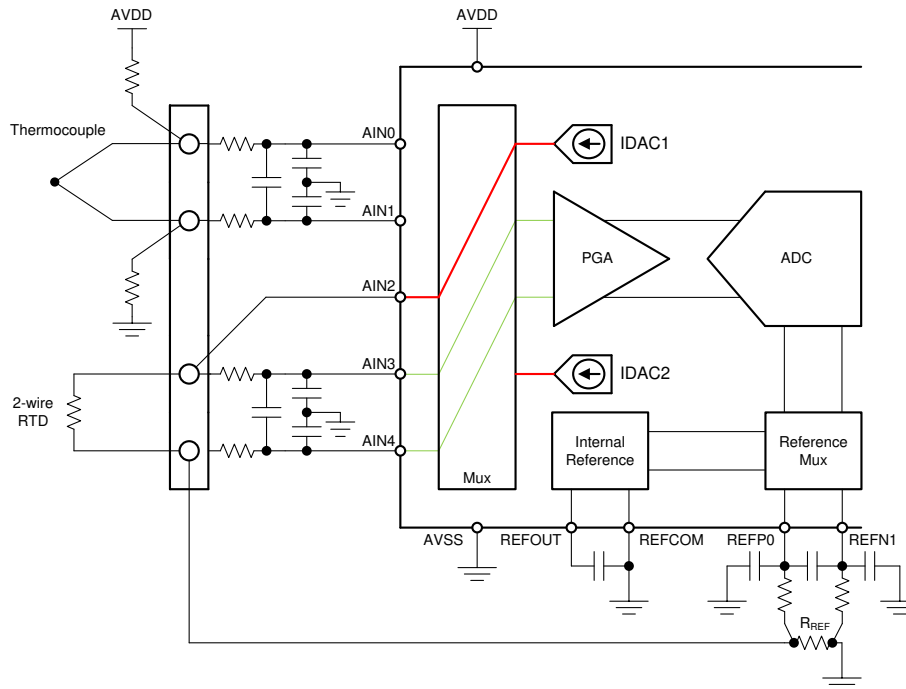


图 2-8. 具有双线 RTD 冷端补偿的热电偶测量电路

#### 2.8.1.1.1 设计说明

RTD 是一种温度传感器，可随温度改变电阻。RTD 结构有多种不同类型，但在任何给定温度下都有良好的电阻特性。RTD 通常用于进行精密温度测量。图 2-8 展示了用于冷端补偿的温度测量的双线 RTD 电路拓扑。

测量电路需要：

- 单个专用 IDAC 输出引脚
- AINP 和 AINN 输入
- 外部基准输入
- 精密参考电阻

IDAC 电流源可驱动 RTD 和基准电阻  $R_{REF}$ 。由于同一电流驱动两个元件，因此 ADC 测量是比例式测量。RTD 电阻的计算不需要转换为电压，但需要具有高精度和低漂移的精密基准电阻。

借助 IDAC1，ADC 使用  $R_{REF}$  上的电压作为基准来测量 RTD 上的电压。这样便可提供与 RTD 电压和基准电压之比成比例的输出代码（如方程式 20 所示）。比例式测量仅产生正输出数据（假设偏移误差为零）。对于全差分测量，这只是 ADC 满量程范围的正半部分，会将测量分辨率降低一位。以下方程假设使用 16 位双极 ADC，并以  $\pm V_{REF}$  表示 ADC 的满量程范围。

$$\text{Output code} = 2^{15} \cdot V_{RTD} / V_{REF} = 2^{15} \cdot I_{IDAC1} \cdot R_{RTD} / (I_{IDAC1} \cdot R_{REF}) \quad (20)$$

电流会抵消，因此方程将简化为方程式 21。

$$\text{Output code} = 2^{15} \cdot R_{\text{RTD}} / R_{\text{REF}} \quad (21)$$

最后，RTD 电阻可通过代码表示为基准电阻的函数。

$$R_{\text{RTD}} = \text{Output code} \cdot R_{\text{REF}} / 2^{15} \quad (22)$$

测量值取决于 RTD 和基准电阻  $R_{\text{REF}}$  的阻值，而不取决于 IDAC1 电流值。因此，激励电流的绝对精度和温度漂移无关紧要。在比例式测量中，只要 IDAC1 在该电路外部没有漏电流，测量值就只取决于  $R_{\text{RTD}}$  和  $R_{\text{REF}}$ 。ADC 转换不需要转换为电压。假设 ADC 具有低增益误差，那么  $R_{\text{REF}}$  通常是最大的误差源。基准电阻必须是具有低漂移和高精度的精密电阻。基准电阻中的任何误差都会在测量中引起增益误差。

RTD 有许多不同的类型和几种不同的构造形式。更多有关 RTD 测量的详细信息，请参阅 [RTD 测量基本指南](#)。

#### 2.8.1.1.2 测量转换

$$\text{Output Code} = 2^{15} \cdot \text{Gain} \cdot V_{\text{RTD}} / V_{\text{REF}} = 2^{15} \cdot \text{Gain} \cdot (I_{\text{IDAC1}} \cdot R_{\text{RTD}}) / (I_{\text{IDAC1}} \cdot R_{\text{REF}}) = 2^{15} \cdot \text{Gain} \cdot R_{\text{RTD}} / R_{\text{REF}} \quad (23)$$

$$R_{\text{RTD}} = R_{\text{REF}} \cdot \text{Output Code} / (2^{15} \cdot \text{Gain}) \quad (24)$$

#### 2.8.1.1.3 通用寄存器设置

- 为 AINP 和 AINN 选择多路复用器设置，以便测量 RTD
- 启用 PGA，将增益设置为所需值
- 选择数据速率和数字滤波器设置
- 选择用于测量  $R_{\text{REF}}$  的基准输入以进行比例式测量
- 启用内部基准 ( IDAC 需要启用内部基准 )
- 设置 IDAC 幅度并选择 IDAC1 输出引脚以驱动 RTD

## 2.8.2 热敏电阻冷端补偿

热敏电阻是另一种常用于冷端补偿的温度测量元件。通常，热敏电阻的温度测量范围更有限，并且具有非线性响应。通常会使用线性化技术在更有限的温度范围内获得更准确的读数。

### 2.8.2.1 原理图

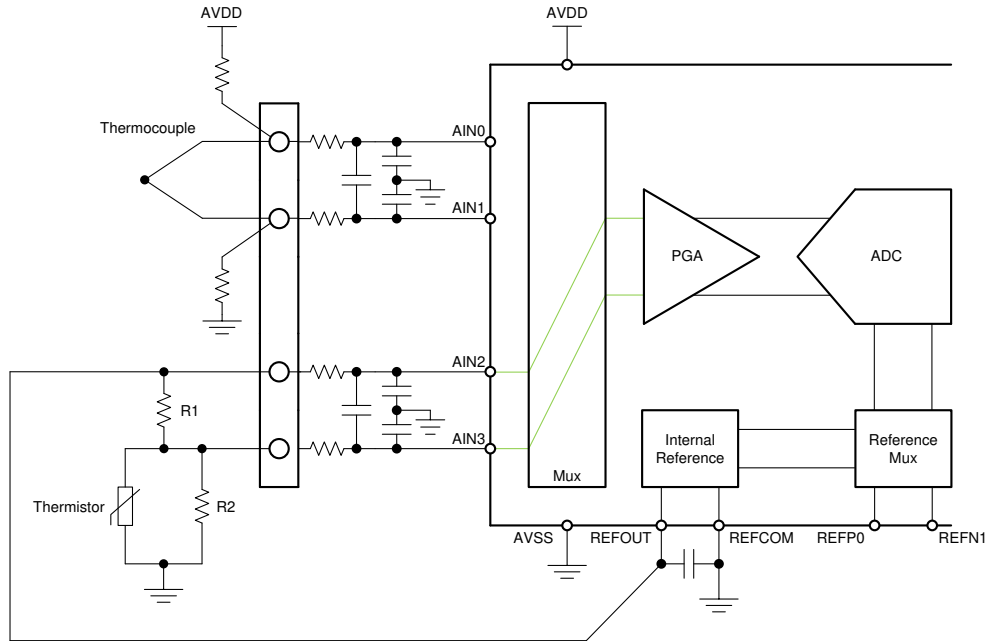


图 2-9. 具有热敏电阻冷端补偿的热电偶测量电路

### 2.8.2.2 设计说明

与 RTD 类似，热敏电阻是阻值随温度变化的传感器。热敏电阻可以是 PTC (正温度系数) 类型或 NTC (负温度系数) 类型。阻值随温度的变化而显著变化，其非线性度远高于 RTD，但其适用的温度范围更有限。图 2-10 展示了用于冷端补偿的 NTC 热敏电阻测量。此示例热敏电阻在 25°C 时的阻值为 5kΩ。在电路中添加了两个电阻，用于在接近室温的冷端温度下对测量进行线性化。

测量电路需要：

- AINP 和 AINN 输入
- 为 ADC 启用内部基准并驱动热敏电阻电路
- 用于热敏电阻线性化电路的精密电阻

对于图 2-9 所示的拓扑，热敏电阻电路由 ADC 内部基准进行驱动。电路中添加了一个与热敏电阻并联的 R<sub>2</sub>，以便在室温附近提供更线性的响应。图 2-10 展示了阻值与温度间的线性化关系图。

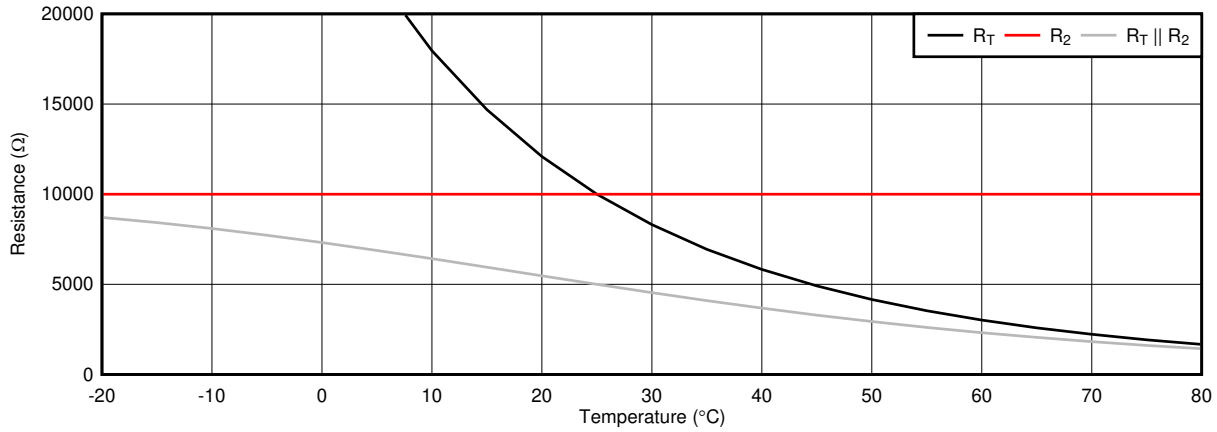


图 2-10. 工作温度范围内的热敏电阻和线性化响应

NTC 热敏电阻的阻值 ( $R_T$ ) 在工作温度范围内是非线性的。在低温条件下，较小的温度变化会导致较大的阻值变化。在高温条件下，较大的温度变化会导致较小的阻值变化。如前所述，热敏电阻在  $25^\circ\text{C}$  时的阻值为  $5\text{k}\Omega$ 。

$R_2$  的阻值为  $10\text{k}\Omega$ ，在工作温度范围内保持恒定。通过添加并联的  $R_2$ ，会在较小的工作温度范围内产生线性的阻值。对于此测量，这是可以接受的，因为与热电偶测量温度相比，冷端温度处于适中的值。

在将  $R_2$  与热敏电阻并联时添加  $R_1$  作为分压器后，测量  $R_1$  会为热敏电阻测量提供正温度系数（在热敏电阻和  $R_2$  上测量会产生负温度系数）。热敏电阻的线性化如图 2-11 所示。

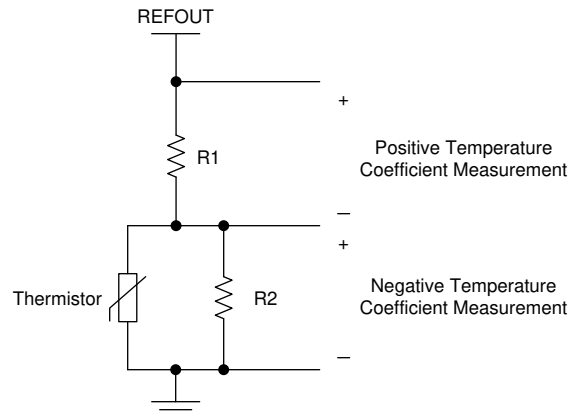


图 2-11. 使用并联电阻和分压器对热敏电阻进行线性化

这种测量很可能不需要 PGA 放大。如果启用了 PGA，请确保在工作温度范围内获得的此测量值处于 PGA 的绝对和共模输入范围内。请注意，许多 PGA 无法测量接地节点。在此示例中，ADC 测量了  $R_1$  上的正温度系数电压。如果需要负温度系数测量，则  $R_1$  应放置在底部并与接地节点相连，同时 REFOUT 将驱动热敏电阻和  $R_2$  的并联组合。

为  $R_1$  选择  $5\text{k}\Omega$  的阻值时，在  $25^\circ\text{C}$  的温度下，输出电压（在  $R_1$  上测量）为  $1.024\text{V}$ 。这种情况下，假设基准电压为  $2.048\text{V}$ 。从热敏电阻电路测得的输出电压如图 2-12 所示。

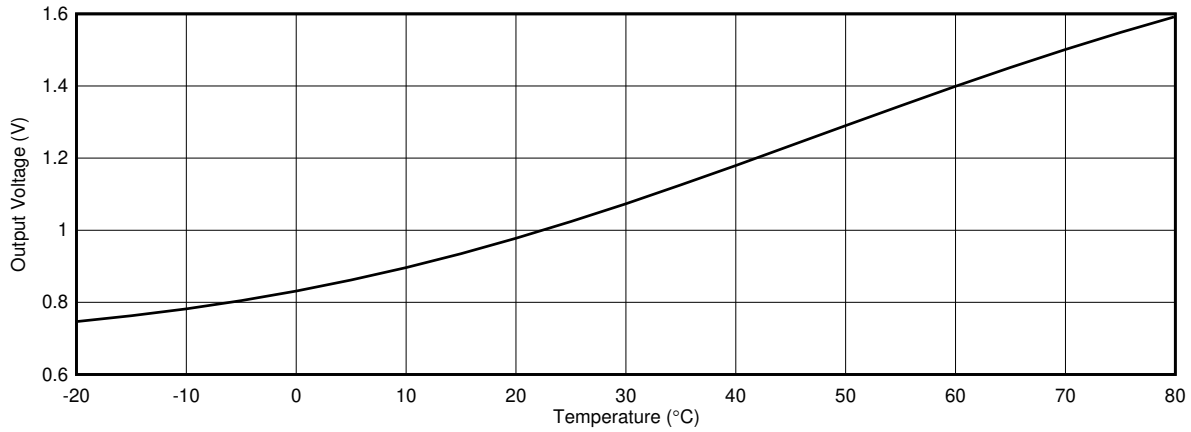


图 2-12. 热敏电阻电路的线性化输出

可以调整温度响应，以便在不同温度下使结果更加线性。调整  $R_1$  可以针对较高或较低温度设置理想的线性度来简化计算，获得冷端温度的理想灵敏度。在此示例中，测量线性度在  $40^{\circ}\text{C}$  至  $50^{\circ}\text{C}$  范围内较好，要使非线性度更接近室温，请增大  $R_1$  的值。

### 2.8.2.3 测量转换

冷端补偿从  $R_1$  上的电压测量开始（如方程式 25 所示）。

$$V_{R1} = (V_{REF} \cdot \text{Code}) / (2^{15}) \quad (25)$$

可将测得的电压与图 2-12 所示的图进行比较。使用计算结果确定冷端的温度。

### 2.8.2.4 通用寄存器设置

- 为 AINP 和 AINN 选择多路复用器设置，以便测量热敏电阻电路
- 禁用 PGA
- 选择数据速率和数字滤波器设置
- 启用内部基准以用作 ADC 基准

### 2.8.3 温度传感器冷端补偿

冷端温度测量的另一种选择是使用半导体器件温度传感器。以下电路显示了使用 LMT70 器件进行冷端测量的情况。

#### 2.8.3.1 原理图

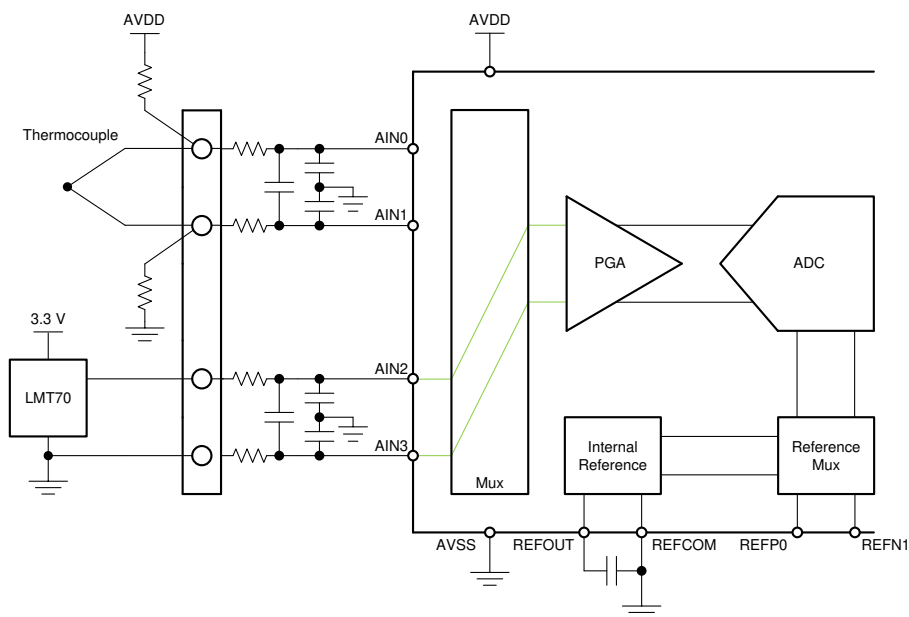


图 2-13. 具有温度传感器冷端补偿的热电偶测量电路

#### 2.8.3.2 设计说明

许多半导体温度传感器的温度测量精度都在  $1^{\circ}\text{C}$  以内，因此可用于冷端补偿。图 2-13 显示了使用 LMT70 进行测量的电路。

测量电路需要：

- 扩展到地的 ADC 输入范围
- AINP 和 AINN 输入
- 用于电压测量的内部基准

此 ADC 测量是一种直接测量电压的方法，需要已知的基准电压。LMT70 的输出提供了可用于计算温度的输出电压。表 2-1 显示了可用于将 LMT70 输出转换为温度的电压。

此测量的一个重要考虑因素是 PGA 的输入范围。LMT70 的输出扩展至接地节点，除非禁用 PGA，否则可能无法准确测量温度。请参阅 ADC 数据表以了解 PGA 规格和运行情况。

更多有关 LMT70 的信息，请参阅 [LMT70](#)、[LMT70A  \$\pm 0.05^{\circ}\text{C}\$  精密模拟温度传感器](#)、[RTD](#) 和 [精密 NTC 热敏电阻 IC](#)。



### 2.8.3.3 测量转换

如方程式 26 所示，冷端补偿从电压测量开始。

$$V_{LMT70} = (V_{REF} \cdot \text{Code}) / 2^{15} \quad (26)$$

然后将得到的电压转换为温度。表 2-1 显示了给定 LMT70 输出电压时对应的温度表。使用此表可以构建器件温度与输出电压之间的分段线性图。

表 2-1. LMT70 从电压到温度的转换

温度 (°C)	V <sub>TAO</sub> (mV)			本地斜率 (mV/°C)
	最小值	典型值	最大值	
-55	1373.576	1375.219	1376.862	-4.958
-50	1348.99	1350.441	1351.892	-4.976
-40	1299.27	1300.593	1301.917	-5.002
-30	1249.242	1250.398	1251.555	-5.036
-20	1198.858	1199.884	1200.91	-5.066
-10	1148.145	1149.07	1149.995	-5.108
0	1097.151	1097.987	1098.823	-5.121
10	1045.9	1046.647	1047.394	-5.134
20	994.367	995.05	995.734	-5.171
30	942.547	943.227	943.902	-5.194
40	890.5	891.178	891.857	-5.217
50	838.097	838.882	839.668	-5.241
60	785.509	786.36	787.21	-5.264
70	732.696	733.608	734.52	-5.285
80	679.672	680.654	681.636	-5.306
90	626.435	627.49	628.545	-5.327
100	572.94	574.117	575.293	-5.347
110	519.312	520.551	521.789	-5.368
120	465.41	466.76	468.11	-5.391
130	411.288	412.739	414.189	-5.43
140	356.458	358.164	359.871	-5.498
150	300.815	302.785	304.756	-5.538

### 2.8.3.4 通用寄存器设置

- 为 AINP 和 AINN 选择多路复用器设置，以便测量 LMT70
- 禁用 PGA，确保 ADC 能够将接地用作 AINN
- 选择数据速率和数字滤波器设置
- 启用内部基准以用作 ADC 基准

### 3 总结

热电偶是由两种不同金属制成的温度传感器。这些金属的结点用作温度检测元件，而其余两条引线连接至等温块。热电偶测量是使用精密 ADC 进行的，但仍需要考虑偏置、烧毁检测和等温块冷端测量。

本应用手册中显示的电路简单展示了如何使用精密 ADC 进行热电偶测量。本手册概述了不同的热电偶偏置拓扑和用于烧毁检测的不同方法，还提供了用于冷端补偿的其他电路。

本手册介绍了不同热电偶拓扑的示例。不同的热电偶偏置和烧毁检测方法可以扩展和组合起来创建具有更多通道的更大系统。此外，还可使用替代温度测量方法进行冷端温度测量。

### 4 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

<b>Changes from Revision * (September 2018) to Revision A (March 2023)</b>	<b>Page</b>
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1

## 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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司