

利用 AD594/AD595 调理热电偶信号

作者：Joe Marcin

简介

热电偶是使用最广泛的温度测量器件之一。无论是工业、商业还是科研应用，热电偶都能在许多宽温度范围环境下提供、高性价比的温度测量解决方案。然而，热电偶的基本工作原理常常遭到误解，导致发生严重的测量误差。本应用笔记将回顾热电偶的基础知识，并且说明使用单芯片 IC AD594/AD595 的热电偶信号调理电路设计。

回顾基础

热电偶的基本原理于 1821 年由托马斯·塞贝克发现。让两种异质金属的两端相接合，并且在一端加热时，所形成的环路中将产生电流。如果在中心位置断开环路，将产生与两结温差成正比的开路电压（即“塞贝克电压”）。因此，要确定测量结的温度，必须知道参考结的温度。

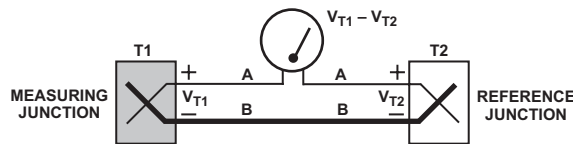


图 1a. 热电偶环路

冰池可为参考结提供明确定义的 0°C 温度，它已成为许多金属组合的热电偶输出电压与温度关系表的标准参考点。

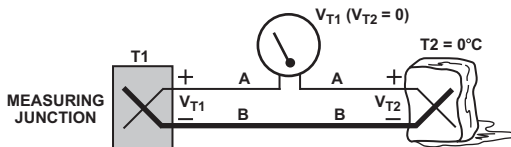


图 1b. 冰点基准

这些组合已由美国国家标准技术研究院（前身为美国国家标准局）测定并分类，下表列出了一些常用热电偶的类型、组成和特性。

表 I. 热电偶特性

ANSI 代码	合金组合	最大温度范围	mV 输出
B	铂 / 铑	0°C 至 +1700°C	0 至 +12.426
E	镍铬 / 康铜	-200°C 至 +900°C	-8.824 至 +68.783
J	铁 / 康铜	0°C 至 +750°C	0 至 +42.283
K	镍铬 / 镍铝	-200°C 至 +1250°C	-5.973 至 +50.633
N	镍铬硅 / 镍硅	-270°C 至 +1300°C	-4.345 至 +47.502
R	铂 / 铑铂合金	0°C 至 +1450°C	0 至 +16.741
S	铂 / 铑铂合金	0°C 至 +1450°C	0 至 +14.973
T	铜 / 康铜	-200°C 至 +350°C	-5.602 至 +17.816

通常使用电压表来测量塞贝克电压，然而，将其与热电偶相连时必须特别小心。参考图 1c，热电偶与电压表的连接处形成了两个额外结 J2 和 J3，这两结会在热电偶环路中产生相反的电压。在连接点处使用一个等温块，使这些结保持热均衡，产生相同但相反的电动势。这样，测得的电压将等于测量结与用作参考结的等温块之间的电位差。

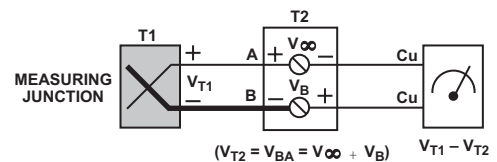


图 1c. 利用电压表测量热电偶电压

实用热电偶测量

对于大多数应用，使用冰池提供参考结温度并不现实。通过补偿参考结产生的电压，可以不使用冰点基准。这可以通过向热电偶环路增加一个电压来实现，该电压等于参考结的电压，但方向相反。AD594/AD595 系列热电偶信号调理 IC 就内置这样一个电路，它不仅提供冷结补偿，而且提供放大和热电偶开路检测功能。

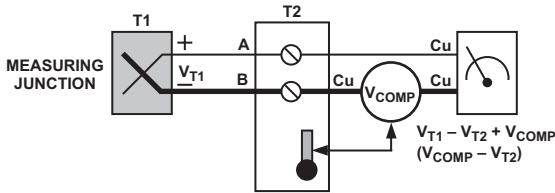


图 1d. 冷结补偿

AD594/AD595 电路描述

图 2 为热电偶信号调理 IC AD594/AD595 的功能框图。J 型（用于 AD594）或 K 型（用于 AD595）热电偶连接到仪表放大器差分级的输入引脚 1 和引脚 14，该输入放大器内置于一个以本地温度作为基准的环路中。IC 也处于本地温度，冰点补偿电路产生一个电压，它等于以本地温度为基准的热电偶环路的偏差。然后将该电压施加于第二前置放大器，其输出与输入放大器的输出相加，所得到的输出再施加于主输出放大器的输入，并通过反馈设置合并信号的增益。冰点补偿电压经调整，与一个以冰池为基准的 IC 温度测量热电偶产生的电压相等，该电压然后与以本地温度为基准的环路电压相加，所得即为相对于冰点的环路电压。

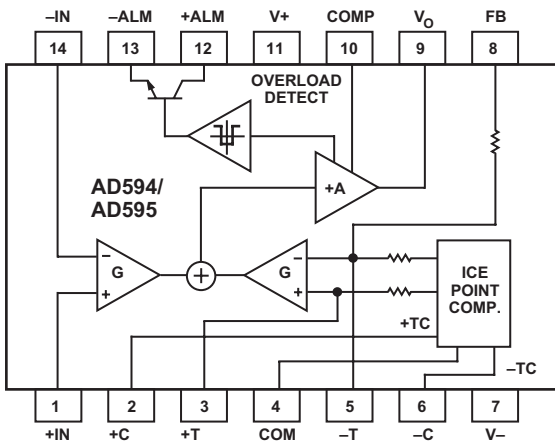


图 2. AD594/AD595 功能框图

在反馈路径中，主放大器的输入保持平衡。如果热电偶损坏或器件输入端开路，这些输入将变得不平衡，IC 就会检测到故障；过载检测电路驱动一个限流 n-p-n 晶体管，可以将其连接为报警电路。

虽然这些 IC 专门针对 J 型或 K 型热电偶进行了校准，但经过重新校准，也可以用于其他类型热电偶。这些 IC 具有连接到内部温度控制电压和反馈节点的引脚，可用于执行重新校准。

AD594/AD595 输出电压解读

为产生 10 mV/°C 的温度比例输出，以及在额定工作温度范围内提供一个精确的参考结，AD594/AD595 的增益在工厂进行过调整，与 +25°C 时 J 型和 K 型热电偶的传递特性匹配。在该校准温度，J 型热电偶的塞贝克系数（即给定温度下热电压相对于温度的变化率）为 51.70 μV/°C，K 型为 40.44 μV/°C。要实现 10 mV/°C 输出，AD594 的增益需设置为 193.4，AD595 的增益需设置为 247.3。虽然器件经过调整，在 +25°C 提供 250 mV 输出，但输入失调误差会带入输出放大器中，导致 AD594 和 AD595 分别具有 16 μV 和 11 μV 的失调电压。为了确定 AD594/AD595 的实际输出电压，应使用下列方程式：

$$AD594 \text{ 输出} = (J \text{ 型电压} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4$$

$$AD595 \text{ 输出} = (K \text{ 型电压} + 11 \mu\text{V}) \times 247.3$$

其中，J 型和 K 型电压来自以 0 摄氏度为基准的热电偶电压表。

必须注意，热电偶的输出仅在很窄的温度范围内是线性的。在宽温度范围内，塞贝克系数会引入非线性项。AD594/AD595 不提供线性化功能，任何线性化技术必须在外部执行，这将涉及到利用高阶多项式计算热电偶温度。美国国家标准技术研究院针对不同热电偶类型提供了多项式系数表，线性化过程中可以使用。

表 II. 各种环境温度下的计算误差

环境温度 °C	AD594C 温 度抑制误差 °C	AD594C 总误差 °C	AD594A 温 度抑制误差 °C	AD594A 总误差 °C	AD595C 温 度抑制误差 °C	AD595C 总误差 °C	AD595A 温 度抑制误差 °C	AD595A 总误差 °C
-55	4.83	5.83	6.83	9.83	5.28	6.28	7.28	10.28
-25	1.98	2.98	3.23	6.23	2.04	3.04	3.29	6.29
0	0.62	1.62	1.25	4.25	0.62	1.62	1.25	4.25
+25	0.00	1.00	0.00	3.00	0.00	1.00	0.00	3.00
+50	0.62	1.62	1.25	4.25	0.62	1.62	1.25	4.25
+70	1.46	2.46	2.59	5.59	1.38	2.38	2.50	5.50
+85	2.25	3.25	3.75	6.75	1.99	2.99	3.49	6.49
+125	4.90	5.90	7.40	10.40	3.38	4.38	5.88	8.88

注意

温度抑制误差包括两个部分：(a) 实际参考结与冰点补偿电压之差乘以增益；(b) 从 0°C 至 +50°C 限值外推的失调和增益 TC。总误差为温度抑制误差加初始校准误差。

性能优化

冷结误差

当热电偶冷结与器件处于热均衡时，AD594/AD595 能够实现最佳性能。避免在 AD594/AD595 附近放置发热器件或元件，因为这可能产生冷结相关误差。AD594/AD595 的额定环境温度范围为 0°C 至 +50°C，其冷结补偿电压与热电偶输出在此范围内的最佳拟合直线匹配。在此范围外工作会产生额外误差。表 II 列出了各种环境温度下的最大计算误差。

电路板布局布线

图 3 所示的电路板布局（具有可选校准电阻）在冷结与 AD594/AD595 之间实现了热均衡。封装温度与电路板在引脚 1 和引脚 14 下通过铜印刷电路板走线进行热接触。参考结由铜 - 康铜（或铜 - 镍铝）连接和铜 - 铁（或铜 - 镍铬）连接构成，两者与 IC 处于热均衡状态。

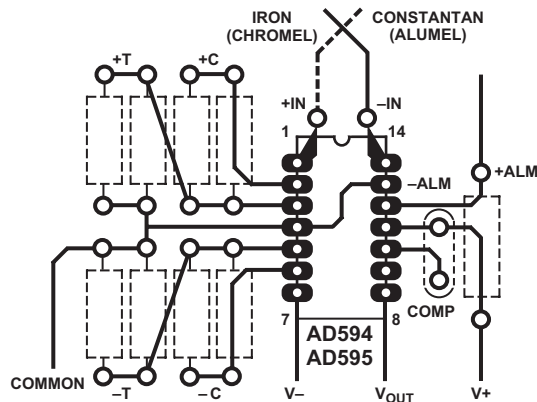


图 3. PCB 布局布线

焊接

为将热电偶焊接到 PC 走线，需要采用合适的焊接技术并适当地进行表面处理。焊接之前应清洁热电偶导线，消除氧化。非腐蚀性焊剂可以与以下焊料一起使用：95% 锡 -5% 铟、95% 锡 -5% 银或 90% 锡 -10% 铅。

偏置电流回路

AD594/AD595 的输入仪表放大器需要为其输入偏置电流提供一个返回路径，因而不可以是悬空的。如果热电偶测量结进行电气隔离，则 IC 的引脚 1 应连接到电源公共地引脚 4。在某些应用中，无法将热电偶直接连接到公共地。从引脚 1 到公共地的电阻可提供偏置电流返回路径，但当 100 nA 偏置电流流过其中时，会产生额外的输入失调电压。如果热电偶必须在测量结接地，或者存在一个较小的共模电位，则引脚 1 与引脚 4 之间不应连接。

噪声抑制

检测热电偶提供的低电平输出电压时，降噪是首要问题。无论是内部产生的还是辐射源引起的，噪声都是限制动态范围和分辨率的因素之一。解决噪声问题涉及到消除噪声源和/或屏蔽。当无法控制或识别噪声源时，屏蔽更有效。

使用长导线热电偶时，噪声可能会进入 AD594/AD595 输入放大器。为了确定该噪声路径是否是元凶，应将热电偶与 AD594/AD595 断开连接，并将引脚 1 和引脚 14 连接到引脚 4，此时 AD594/AD595 引脚 9 的输出电压将指示环境温度（+25°C 为 250 mV）。如果输出端（引脚 9）的噪声消失，则需要屏蔽输入端。屏蔽热电偶导线（屏蔽体连接到 IC 的引脚 4）能够有效抑制噪声。如果输出中仍然存在噪声，则噪声可能是通过电源进入电路，适当的电源旁路和去耦可以缓解这一状况。

放大信号之前，对热电偶输入进行滤波将会衰减噪声。图 4 显示了一个有效的输入滤波器，它由一个电阻和一个电容组成，电阻与引脚 1 串联，电容连接在该引脚与地之间。输入偏置电流流过电阻时会产生失调电压。由于反相输入端（引脚 14）的输入偏置电流随输入电压而变化，因此与此输入端串联的任何电阻都会产生一个输入相关的失调电压。所以，强烈建议将此引脚直接连接到公共地。此外，当热电偶损坏时，输入引脚之间的电容会增加报警电路的响应时间。

添加电容到频率补偿引脚（引脚 10）会使 AD594/AD595 输出放大器的带宽滚降，从而限制噪声。无补偿时，3 dB 带宽约为 10 kHz。引脚 10 与引脚 11 之间连接一个 0.1 μF 电容时，3 dB 点降至 120 Hz。然而，这种技术只有在噪声未将输入级驱动至饱和时才有用。

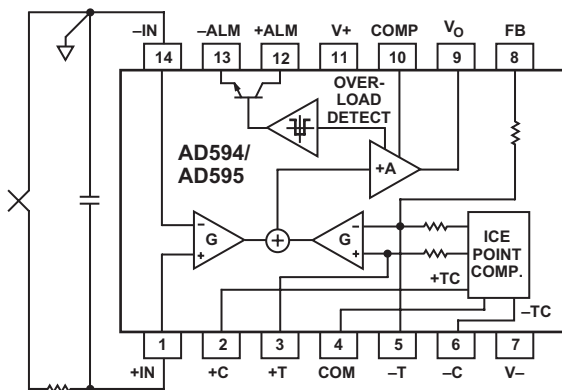


图 4. 输入滤波

调整校准误差

AD594/AD595 按性能分为两种等级，经过工厂调整，其最大校准误差分别为 1°C 或 3°C。对于多数应用，这一误差范围是可以接受的。但是，通过增加图 5 所示的可选调整电路，可以将该误差调零。向引脚 5 注入大约 3°C 的负偏移，调整电位计向引脚 3 提供平衡电流，从而消除校准误差。

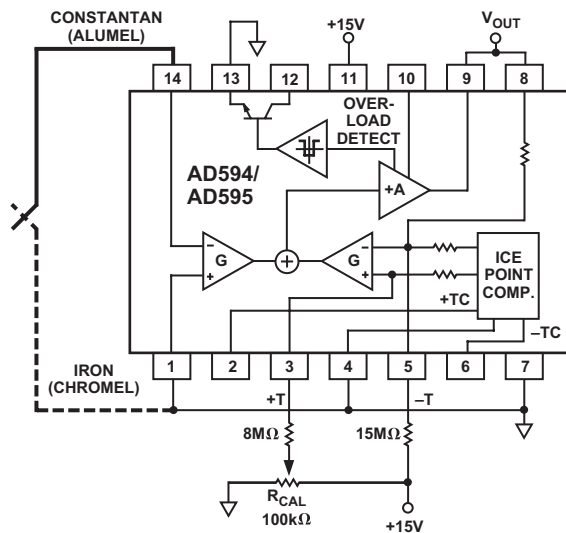


图 5. 可选校准电路

偏移和增益变化

AD594/AD595 设计在 0°C 时提供 0 V 输出，标称增益为 10 mV/°C，但也可轻松实现其他范围。向引脚 8 施加一个偏移电压，可以更改 0 输出温度。此电压的幅度利用给定热电偶温度下的 AD594/AD595 输出电压方程式计算。增益可以轻松改变，给标称 47 k Ω 反馈电阻添加串联电阻可提高增益，并联电阻可降低增益。下面的方法阐释了这一原理。

1. 选择一个温度范围 T1-T2。
2. 根据此范围，确定将最大输出范围限制在 $(-V_s + 2.5)$ 至 $(+V_s - 2)$ （双电源供电）或 0 至 $(+V_s - 2)$ （单电源供电）的输出灵敏度 (mV/°C)。
3. 计算选定的温度范围的平均热电偶灵敏度： $(VT_1 - VT_2) / (T_1 - T_2)$ 。
4. 将所需输出灵敏度 (mV/°C) 除以平均热电偶灵敏度 (mV/°C)，产生 AD594/AD595 的新增益 (G)。
5. 测量引脚 8 与引脚 5 之间的实际反馈电阻 R_{FB} 。
6. $R_{IN} = R_{FB} / 193.4 - 1$ ，其中 R_{FB} 为实测反馈电阻。注意：AD595 使用 247.3 代替 193.4。
7. 新反馈电阻 $R_{EXT} = (G \times 1) (R_{IN})$ 。

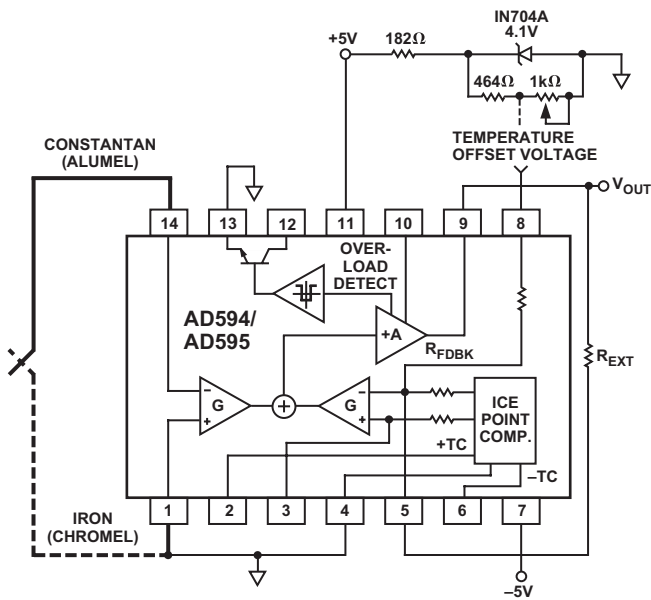


图 6. 偏移和增益变化

电流模式传输

在许多应用中，AD594/AD595 可能位于高噪声、遥远的位置，其输出需驱动很长的电缆。在这些严苛条件下，电流传输能够更好地抑制噪声，消除电缆电阻引起的误差。图 7 所示电路可将 AD594/AD595 的输出转换为电流，然后在控制点再转回电压。引脚 9 的反馈电压迫使 R_{SENSE} 两端的电压等于热电偶电压。利用所示的 R_{SENSE} 值，可得出电流输出比例因子为 $10 \mu A/^{\circ}C$ 。注意，AD594/AD595 静态电流会流过该检测电阻，从而将最小测量温度限制为 $16^{\circ}C$ 。AD711 运算放大器在控制点将此电流转回标称 $10 mV/^{\circ}C$ 。总误差取决于 AD594/AD595 校准误差以及检测电阻与控制点上用于电流至电压转换的 $1 k\Omega$ 电阻之间的匹配。

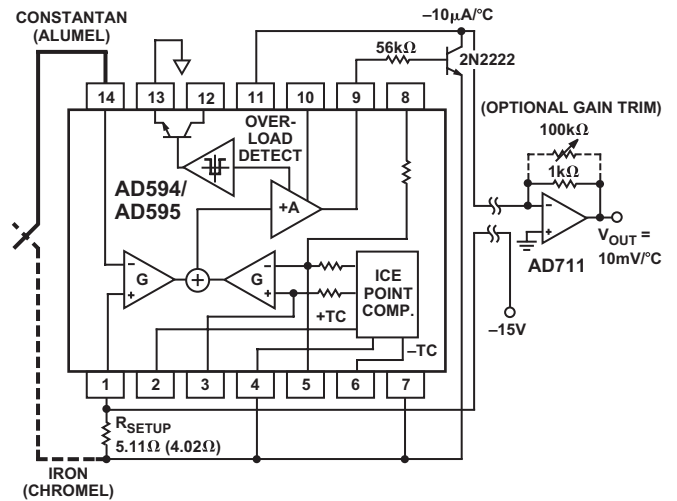


图 7. 电流模式传输

温度频率转换

将 AD594/AD595 电压输出转换为频率，可以产生数字形式的输出。这种形式不仅支持长距离传输的噪声抑制，而且能提供可以与计算机直接接口的信息。低成本电压频率转换器 AD654 可将 $10 mV/^{\circ}C$ 电压输出转换为 TTL 兼容的方波输出。如图 8 所示，整个系统采用 5 V 单电源供电，提供 $0^{\circ}C$ 至 $+300^{\circ}C$ 的温度测量范围。为了维持 AD594/AD595 最大（电源以下 2.5 V）的输出摆幅，热电偶温度越高，则所需的电源电压越高。AD594/AD595 输出电压通过一个串联电阻连接到 AD654 输入端，产生 0 mA 至 1 mA 满量程电流。电容 C_T 决定满量程输出频率，最大可用频率为 500 kHz，非线性误差为 0.4%。也可以实现其他温度范围和输出频率。欲了解更多信息，请参考 AD654 数据手册。

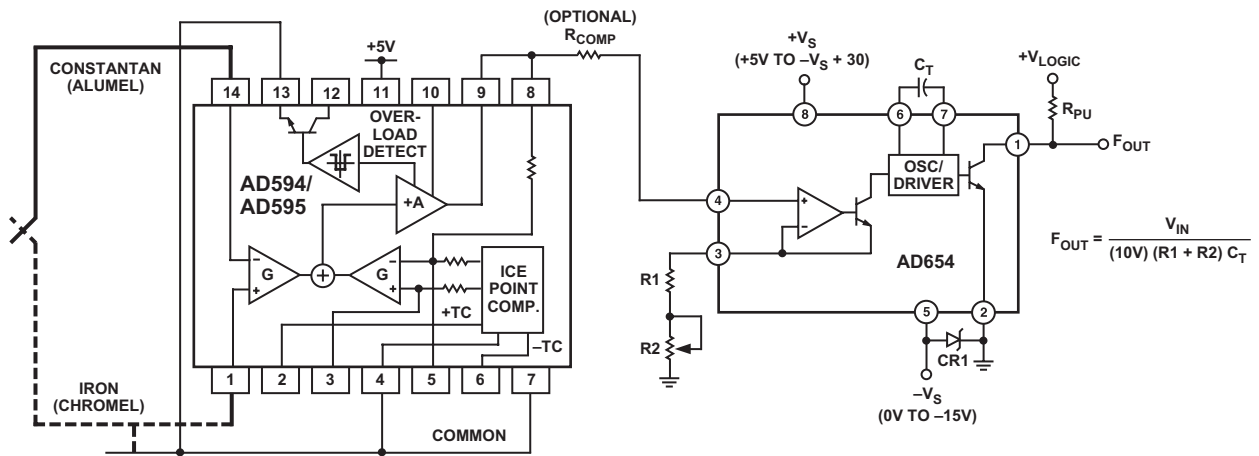


图 8. 温度频率转换

$$F_{OUT} = \frac{V_{IN}}{(10V)(R1 + R2) C_T}$$

华氏输出

可以配置 AD594/AD595 以产生与华氏温度成比例的电压。摄氏度到华氏度的换算是将摄氏度乘以 9/5，再加上 32 度的偏移。该偏移是通过向引脚 3 注入 200 nA/°C 的电流而产生，同时提高反馈电阻以支持 9/5 的增益。输出校准程序如下：

1. 断开热电偶，向引脚 1 和引脚 14 施加 10 mV p-p、100 Hz 交流信号。
2. 调整 R_{GAIN} 以在引脚 9 获得 3.481 V (AD594) 或 4.451 V (AD595) 的峰峰值输出。
3. 连接热电偶并测量 0°C，调整 R_{OFFSET} 直到引脚 9 的输出读数为 320 mV。

基于华氏输出的理想传递函数为：

$$\text{AD594 输出} = (\text{J 型电压} + 919 \mu\text{V}) \times 348.12$$

$$\text{AD595 输出} = (\text{K 型电压} + 719 \mu\text{V}) \times 445.14$$

在热电偶的可用范围内，这将产生更高的输出电压摆幅，从而需要更高的电源电压来维持最大输出电压（电源以下 2.5 V）。

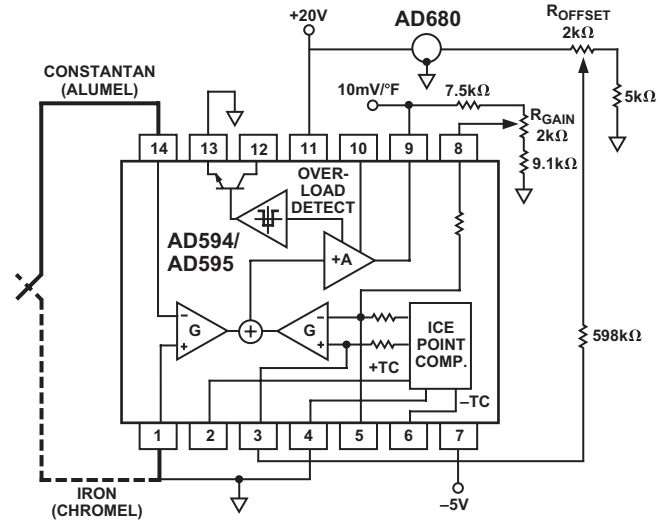


图 9. 华氏输出

平均温度

将多个热电偶并联到 AD594/AD595 输入端，可以测量平均结温。如图 10 所示，各有一个 300 Ω 电阻与每个热电偶的一端串联，用以限制在热电偶分支之间流动的电流。当热电偶温度高于或低于平均值时，将产生正或负压降。

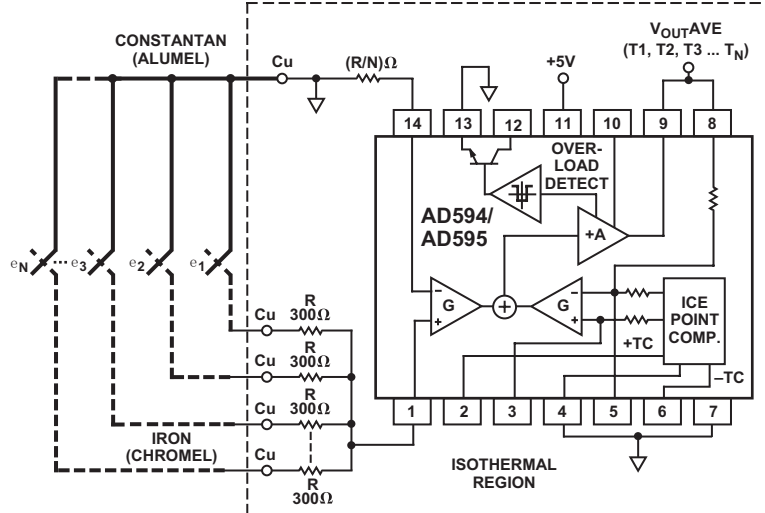


图 10. 测量平均温度

多路复用热电偶

多个热电偶可以通过 ADG507A 等外部 CMOS 模拟多路复用器连接到单个 AD594/AD595 器件。为确保正常工作,热电偶、多路复用器与 AD594/AD595 输入端之间的互连全部采用铜,并且通过等温块保持热均衡。如图 11 所示,一个热电偶用来测量 IC 温度,以及抵消等温块处的参考结电压。多路复用器使能时,由等温块处的热电偶连接形成的康铜(镍铝)—铜结与参考热电偶连接形成的铜—康铜(镍铝)结串联。

由于等温块温度相等,该串联连接产生相等但极性相反的电压。在此条件下,AD594/AD595 内部冷结补偿电路现在补偿 IC 处的参考结,它必须保持 0°C 至 +50°C 之间的温度。但应注意,等温块可以处于任何方便的温度或位置。未用的多路复用器输

入端应连接到公共地,使杂散信号拾取最小。为防止 AD594/AD595 输入端悬空而引起输出饱和,应将多路复用器的使能输入连接到 +5V,使其永久使能。

参考文献

1. Sheingold, Dan, ed. *Transducer Interface Handbook*, Analog Devices, 1980.
2. *1992 Amplifier Applications Guide*, Analog Devices, Pub. No. G1646-10-4/92.
3. American Society for Testing and Materials, *Manual On The Use Of Thermocouples In Temperature Measurement*, ASTM PCN 04-470020-40.

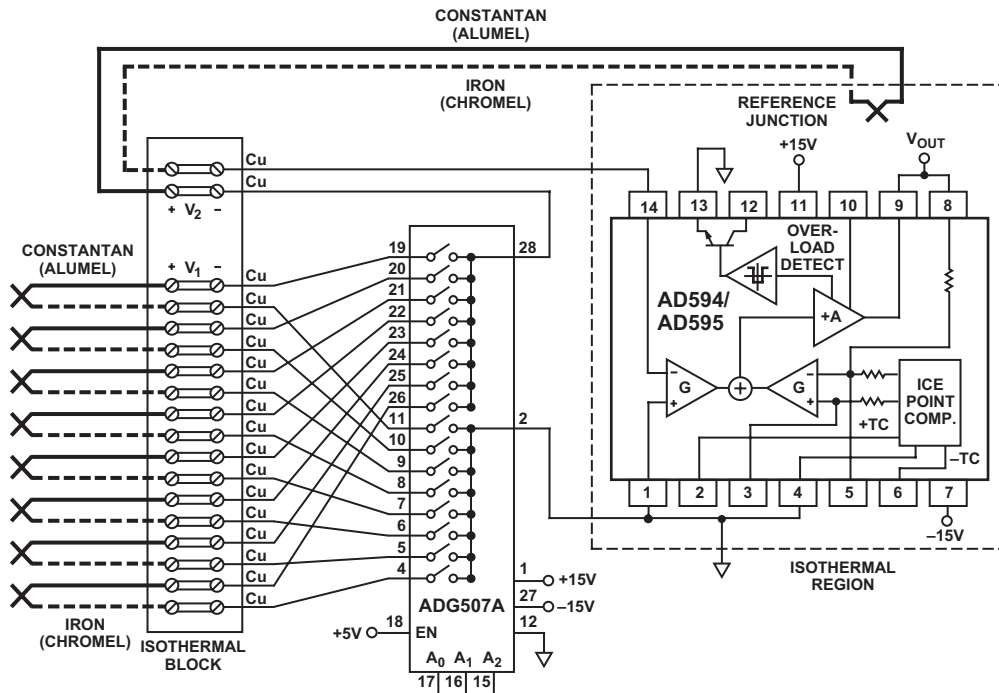


图 11. 多路复用输入