

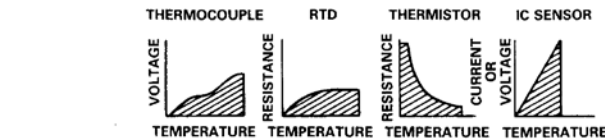
## 消除热电偶温度测量中的不确定性(使用AD594/AD595)

作者: Bob LeFort和Bob Ries

温度是测量最频繁的物理参数。不过, 温度测量技术却被严重误解, 通常会导致高度不精确或无意义的的数据。本应用笔记旨在澄清部分常见误解, 并提供一些有趣和实用的电路解决方案。

### 温度传感器技术

目前最常用的电子温度测量器件包括热电偶、电阻式温度检测器(RTD)、热敏电阻和集成电路温度传感器。这些器件各有相关应用优势和局限, 如表1所述。



	THERMOCOUPLE	RTD	THERMISTOR	IC SENSOR
LINEARITY		*		**
SENSITIVITY			*	**
RUGGEDNESS	*			
COST	**		*	*
STABILITY		*		
ACCURACY		**		*
RESPONSE TIME	*			
NOISE IMMUNITY				*
POWER DISP.	**			*
MAX TEMP RANGE <sup>†</sup> (°C)	-270 TO +2980	-180 TO +630	-80 TO +150	-55 TO +150

\*GOOD  
\*\*EXCELLENT  
†TEMPERATURE RANGE INDICATED IS NOT NECESSARILY FOR A SINGLE VERSION OF THE TRANSDUCER TYPE.

表1. 传感器比较

### 热电偶特性

热电偶是使用最广泛的仪器仪表温度传感器。因此, (美国)国家标准局(NBS)已经广泛表征各种金属组合, 即J型(铁-康铜)、K型(镍铬-镍铝)、E型(镍铬-康铜)和T型(铜-康铜)。热电偶质量包括固有精度、宽温度范围、快速热响应、耐用性、低成本、可重复性和应用多功能性。除广泛使用外, 热电偶也是误解最多的温度传感器。冷结补偿、

塞贝克系数、等温连接或模块等等术语已经搅得许多用户晕头转向。本应用笔记解释了这些术语, 并提供信息来帮助读者精确、轻松地测量温度。

### 热电偶环路

两根异质金属导线两头相连便构成基本的热电偶环路(参见图1a)。此环路产生的电压与两结点间的温度差异成正比。由于热电偶基本上是差分温度测量器件, 测量单一温度时需要得知结点之一(基准结点)的温度。热电偶使用者依赖各种技术来确定和补偿基准或“冷”结温度。

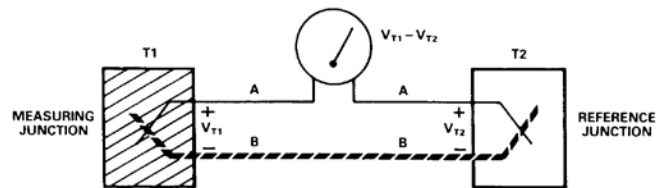


图1a. 热电偶环路

### 冰点基准

所有热电偶(如NBS表格所列)的电压输出以0°C为基准。这意味着仅在基准结点保持在0°C时热电偶两端的电压才对应于测量结点的温度。这可以用图1b所示的冰点单元和“冰池”来完成。不幸的是, 这些方法笨拙、昂贵, 仅在实验室环境可行。在量产环境中, 将基准结点维持在0°C不切实际。

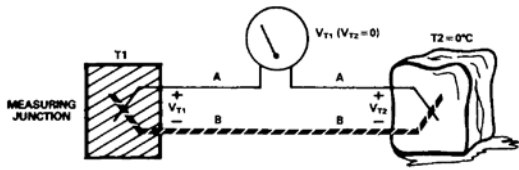


图1b. 冰点基准

## 中间金属法则

实际操作中，为了避免明显基准结点（如图1a所示），实施等效于基本热电偶回路的直接连接（参见图1c）。依据中间金属法则，只要连接具有相同温度，连接到热电偶两种不同金属的第三种金属（大多数情况为铜）对输出电压无任何影响。

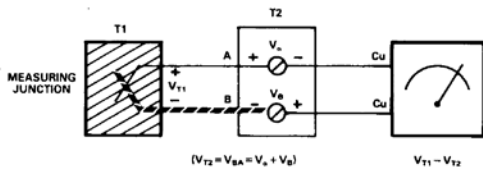


图1c. “间接”基准结点

## 实用热电偶测量

在量产环境中，可对基准结点形成的电压进行冰点补偿。这可以借助向热电偶回路增加电压的电路来完成，电压等于基准结点电压但方向相反（参见图1d）。

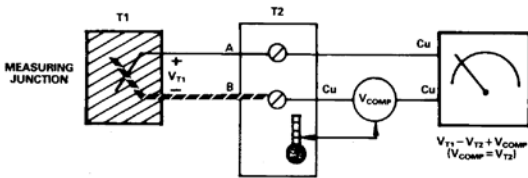


图1d. 冷结补偿

AD594/AD595正是包含此功能的器件。框图和基本连接如图2所示。内部冰点补偿模块监控基准结点温度，并在内部求和结点为热电偶回路增加适当的电压。此净电压接着

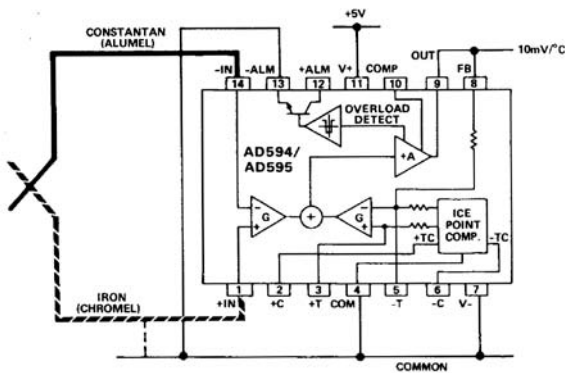


图2. AD594/AD595框图

放大至 $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ 的标称输出。AD594经工厂校准用于J型热电偶，而AD595设置用于K型。

## 塞贝克系数

热电偶的塞贝克系数定义为给定温度下热电压相对于温度的变化速率，通常用 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 表示。热电偶非线性表示为此系数随温度的变化。图3提供了各种热电偶的塞贝克系数曲线图。

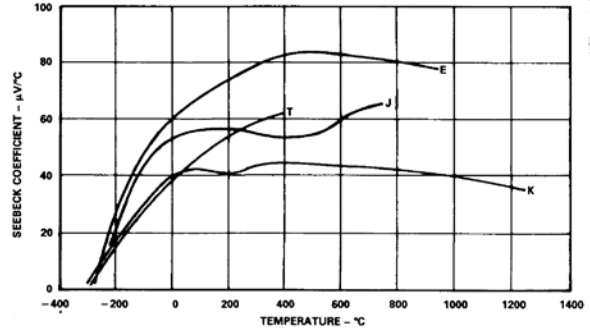


图3. 塞贝克系数与温度的关系

## 热电偶类型

一般用于区分热电偶类型的两个特性是灵敏度和操作温度范围。图4中的曲线图针对某些常见金属组合描述上述特性。

虽然经工厂校准用于调理J型热电偶，利用简单的外部调节，AD594也可调理E型热电偶，如AD594/AD595数据手册中所示。校准用于K型热电偶的AD595也可直接连接到T型热电偶，且附加误差小于 $0.2^\circ\text{C}$ 。

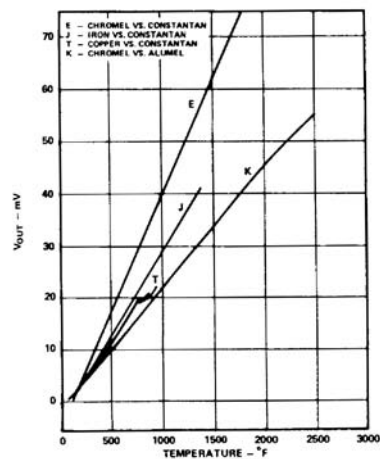


图4. 热电偶输出与温度的关系

## 利用AD594/AD595优化性能

用AD594或AD595实现完整额定精度需要遵循以下设计原则：

### 1. 冷结误差

AD594/AD595采用片内冷结补偿。为使此功能发挥作用，器件必须保持在与热电偶冷结相同的温度下。避免其他元件或热源直接接触AD594/AD595，否则散热可能导致冷结补偿相关误差。(AD594/AD595仅吸收160 $\mu$ A静态电源电流；这可以最大程度地减少自热相关误差。)

### 2. 电路板布局

图5所示的印刷电路板连接布局(具有可选校准电阻)在冷结与AD594/AD595间提供了热均衡。这里器件与电路板在引脚1和14下通过铜印刷电路板走线进行热接触。基准结点现由铜-康铜(或铜-镍铝)连接和铜-铁(或铜-镍铬)连接构成，两者均保持在与AD594/AD595相同的温度下。

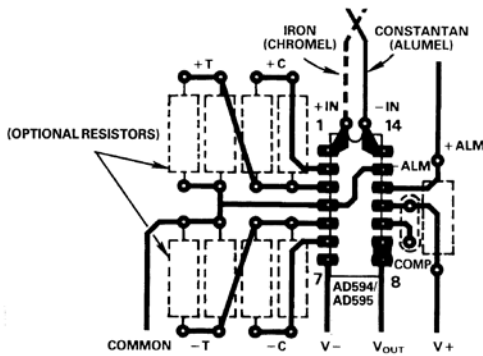


图5. PCB连接

### 3. 焊接

为确保安全焊接并将 $I \times R$ 压降降至最低，应在焊接前清洁热电偶导线以消除氧化。非腐蚀性焊剂对于铁、康铜、镍铬和镍铝及以下焊料有效：95%锡-5%铋、95%锡-5%银或90%锡-10%铅。

### 4. 接地考量

AD594/AD595输入级的晶体管需要偏置电流从热电偶输入流至地面。如果未提供此路径，这些电流将迫使输入级中断，导致输出端出现错误读数。为提供返回路径，应使用直接接地连接。

### 5. 将噪声降至最小

引脚9、10以及10、11间的补偿电容可最大程度地降低热电偶所拾取的高频噪声的放大。图6所示值在60Hz下提供零值，但会增加电路响应时间。

为避免接地线路中的 $I \times R$ 压降，所有接地点应直接连接到中央点。结合0.1 $\mu$ F电容的100 $\Omega$ 电阻可过滤掉电源线路上的纹波和瞬态尖峰。

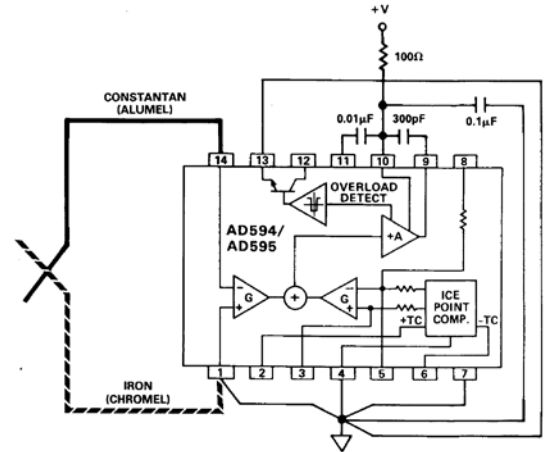


图6. 通过滤波、补偿和接地减少误差

### 扩展环境温度误差计算

AD594/AD595的额定环境工作温度范围为0至50 $^{\circ}$ C，以便将热电偶非线性(变化塞贝克系数)相关误差降至最小，并优化25 $^{\circ}$ C环境的精度。AD594/AD595冰点补偿电压为线性，且匹配热电偶输出在0至50 $^{\circ}$ C范围内的最佳拟合直线。在此范围以外，热电偶与补偿电压间的偏差会越来越明显。这意味着虽然AD594/AD595在额定温度范围以外可以正常工作，但可能无法保持在额定温度稳定性误差限制内。表II提供了与商用、工业、和扩展环境工作温度范围相关的最大计算误差列表。环境温度指的是器件和基准结点。测量结点可处于热电偶额定限制内的任何温度。

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：  
温度抑制误差具有两个成分，(a)实际基准结点与冰点补偿电压间的差异乘以增益(b)从0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。

表II. 各种环境温度下的最大计算误差

## 电路概念 可选调整方案

图7中的电路将AD594/AD595的残留校准误差归零。通过向-T(引脚5)注入对应于大约-3°C失调的电流，15MΩ电阻确保失调为负。调整电位器(R<sub>CAL</sub>)允许向+T(引脚3)注入平衡电流，从而将“强制”负失调调整至零值。利用此电路，可以通过单次单向调整将任何校准误差归零。

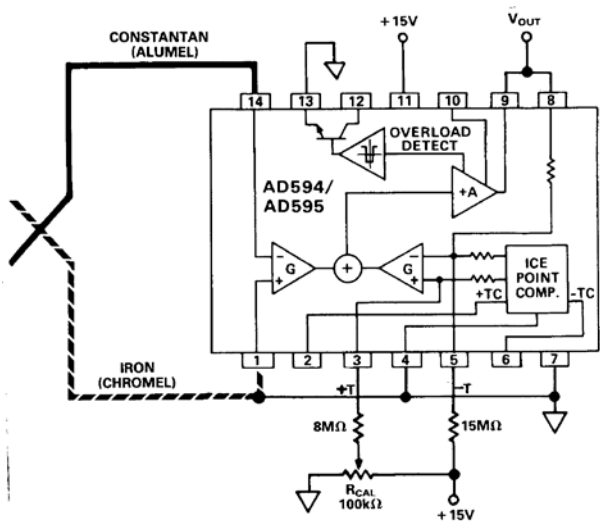


图7. 校准误差调节

## 华氏输出

图8说明了允许用户直接读取10mV/°F电压输出的电路。温标转换公式：

$$\text{华氏度} = (9/5)(\text{摄氏度}) + 32$$

完全实施于硬件中。注入引脚3的200nA/°C电流产生32°F失调，同时输出端电阻网络将增益增加9/5。

为了校准输出：

1. 移除热电偶，向引脚1和14输入10mV p-p、100Hz的交流信号。（利用交流激励，增益和失调调节相互独立。）
2. 针对3.481V(AD594)或4.451V(AD595)的峰峰值输出调节R<sub>GAIN</sub>。
3. 将0°C冰池或冰点单元内的热电偶重新连接到引脚1和14。
4. 调节R<sub>OFFSET</sub>，直至输出读数为320mV。

在热电偶处于0°C时进行调整，AD594/AD595华氏输出的理想传递函数为：

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

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

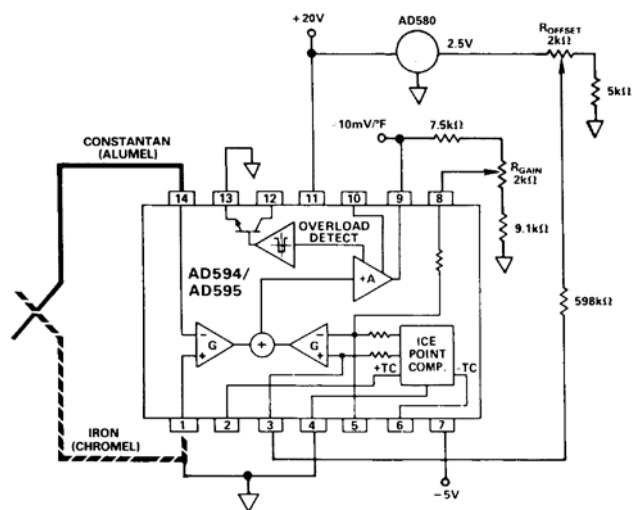


图8. °C至°F转换

### 直接平均温度

平均温度可直接用单个AD594/AD595来测量，器件配置如图9所示。此电路的输出等于 $(T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_N)/N$  (单位为 $^{\circ}\text{C}$ )乘以标称 $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。无论并联连接任何数量的热电偶-电阻对，AD594/AD595仍可提供正确的冷结补偿。 $300\Omega$ 串联电阻可将热电偶支路间的循环电流降至最低。温度低于/高于均值时，这些电阻将给热电偶带来正/负平衡压降。该电路也可为温度梯度显著的物体生成精确平均读数。

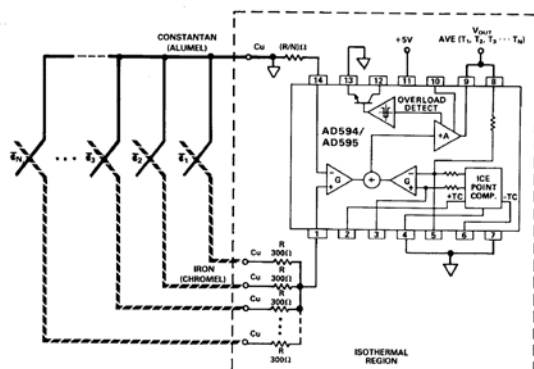


图9. 测量平均温度

### 温度多路复用

多路复用热电偶信号可将较大温度测量数据采集系统(参见图10)所需的AD594/AD595数目减至最少。此技术也有另一重要功能：将多个基准结点连接从端子板组件转换至AD594/AD595上的单一结点。

通过在AD594/AD595下方放置热电偶(热触点内)并返回等温连接器，可以有效地消除在等温模块生成的基准结点电压。对于给定的多路复用器ON位置，康铜(镍铝)-铜结点与铜-康铜(镍铝)结点串联地构成相等但方向相反的电压。

也就是说，由于模块等温， $V_1 = V_2$ 。类似的逻辑可应用于铁(镍铬)-铜结点。

由于这些消除措施，AD594/AD595内置的冷结补偿器现在可补偿IC正下方的热电偶。因此，端子板可位于任何远程位置。不过，AD594/AD595和连接的热电偶应保持在 $0$ 至 $50^{\circ}\text{C}$ 范围内。

使用AD7502，可通过单个AD594/AD595监控4个温度(AD7507允许监控8个温度)。热电偶导线约有一半可通过使用单端多路复用器消除，不过系统将更易受共模噪声影响。

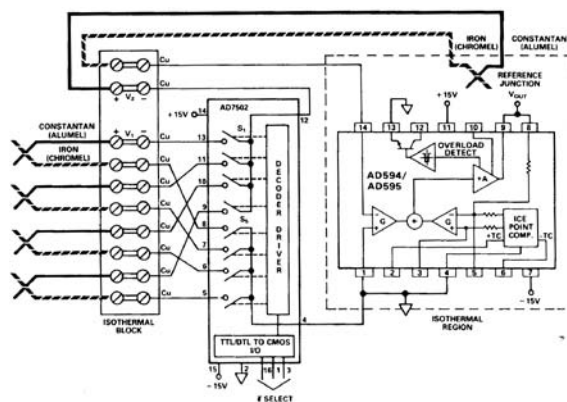


图10. 多路复用热电偶

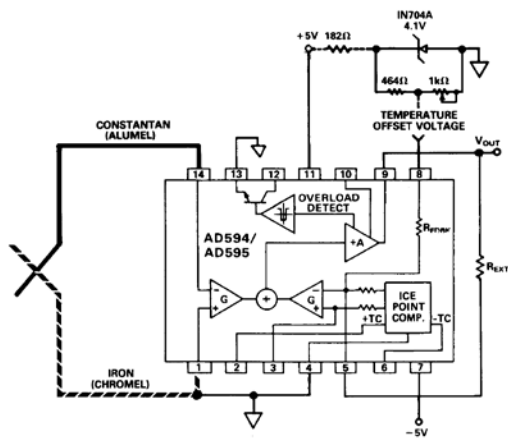


图11. 零抑制和灵敏度变化

## 失调和改变增益

图11所示电路起两种作用：1)允许用户向AD594/AD595添加失调以转换输出，从而在任何温度下读取到0 V(即抑制零)，以及2)改变AD594/AD595增益，产生不同的输出灵敏度(热电偶每度变化的输出电压变化)。

转换输出以在非0°C温度下读取0 V通过向反馈电阻(引脚8)施加失调电压(从而施加于右侧放大器连接到求和节点的负输入)便可实现。

失调电压(摘自AD594/AD595数据手册中的表I输出列)将零电压输出调换为施加电压的等效温度。灵敏度可通过用较大/较小外部电阻取代内部反馈电阻来提高/降低。计算新反馈电阻值的一种方法是：

1. 决定所需输出灵敏度(单位为mV/°C)。
2. 决定温度范围T1至T2。
3. 在该温度范围上计算平均热电偶灵敏度； $(V_{\xi_1} - V_{\xi_2}) / (T_1 - T_2)$ 。
4. 用所需灵敏度除以平均热电偶灵敏度：(1)结果 ÷ (3)计算值。此值即为AD594/AD595的新增益( $G_{NEW}$ )。如果计算过程无误，结果应无量纲。
5. 测量实际反馈电阻(引脚8至引脚5)。

$$6. R_{INTERNAL} = \frac{R_{FDBK}}{193.4 - I} = \frac{\text{Result of (5)}}{193.4 - I}$$

注意：AD595使用247.3代替193.4。

$$7. \text{新反馈电阻 } R_{EXTERNAL} = (G_{NEW} - 1)(R_{INTERNAL}) = ((4) \text{结果} - 1) \times ((6) \text{结果})$$

利用该技术，可以用5 V电源和100mV/°C输出测量300至330°C的温度范围，从0 V输出、300°C开始。可使用4.1V齐纳二极管和电阻分压器抑制零值。

## 电流模式传输

当在高噪声环境下发送信号时，最好传输电流而不是电压。图12显示的是发送AD594/AD595输出信号作为电流，然后在控制点将电流转换回电压的方法。

此电路中，引脚9的反馈电压迫使 $R_{SENS}$ 两端的电压等于热电偶电压。正确选择 $R_{SENS}$ (AD594为5.11Ω，AD595为4.02Ω)便可生成10μA/°C电流。由于 $R_{SENS}$  E两端电压等于热电偶电压，基准结点电压出现在AD594/AD595输入两端。放大器 + A驱动2N2222晶体管的基极，从而将输出电压转换为电流。

由于160μA静态电流流经 $R_{SENS}$ ，不会产生任何误差。然而，这意味着可测量的最小温度为16°C。电路精度取决于初始AD594/AD595校准误差以及 $R_{SENS}$ 与测量点上1 kΩ电阻至电压转换电阻间的匹配。

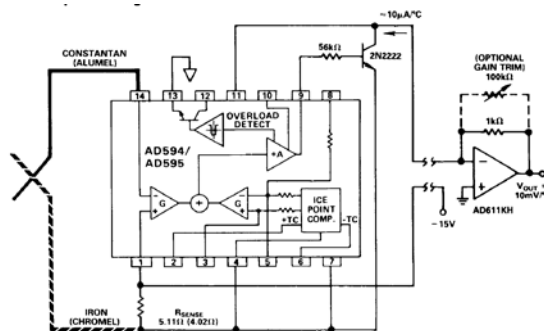


图12. 远程温度测量