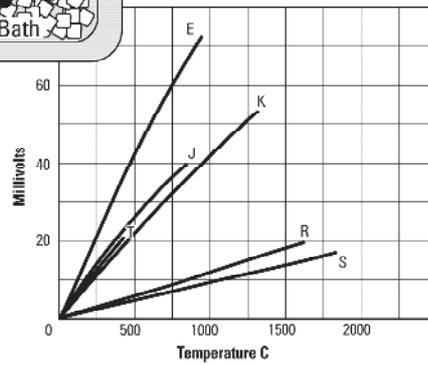
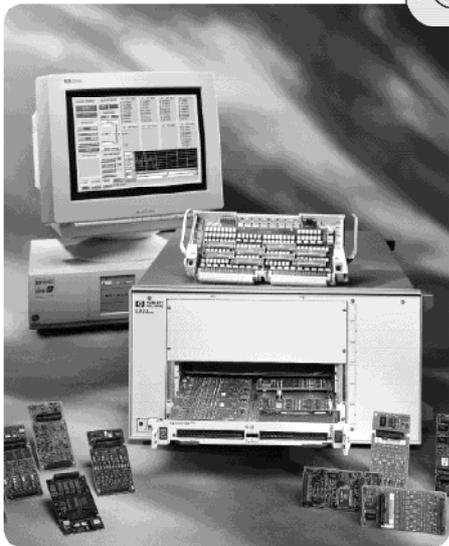
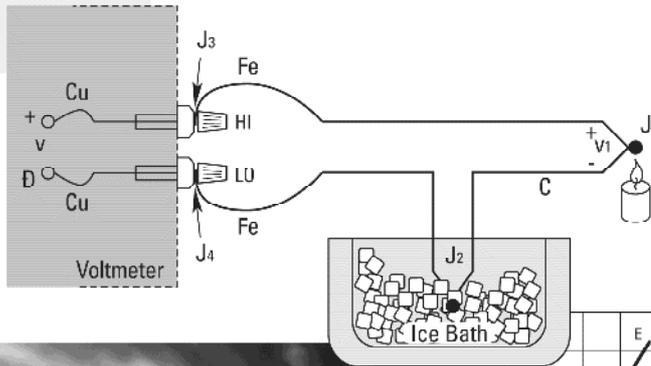
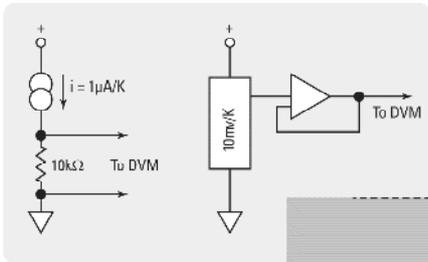
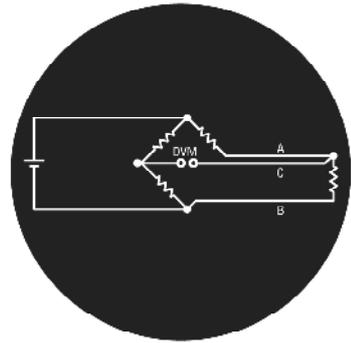
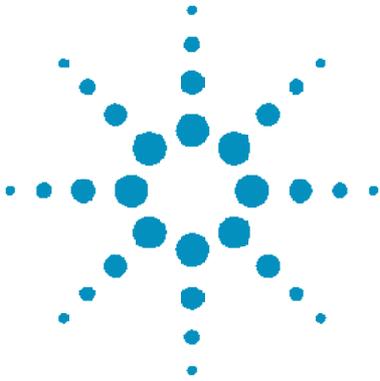


# 实用温度测量

应用指南 290



Agilent Technologies

## 目录

简介	2
热电偶	4
热电偶测量	11
RTD	18
热敏电阻器	22
集成电路线性温度传感器	23
测量系统	24
附录一	27
附录二	28
热电偶硬件	30
参考书目	31

## 简介

本应用指南的目的是考察比较常用的温度测量技术，介绍改进测量精度使用的程序。

我们将重点介绍四种最常用的温度传感器：热电偶、RTD（电阻温度检测器）、热敏电阻器和集成电路温度传感器。尽管热电偶非常流行，但它经常会被滥用。基于这一原因，我们将主要集中在介绍热电偶测量技术。

附录一包含着热电偶经验定律，这些定律是本文使用的所有推论的基础。如果读者希望更加全面地讨论热电偶理论，请参阅参考资料中的参考资料3。

对特定的热电偶应用，附录二可以协助选择最优秀的热电偶类型。

在整个应用指南中，我们将重点介绍在实践中传感器放置、信号调节和仪器选择等考虑因素。

### 早期测量设备

伽利略约在1592年发明了温度计，而在业内享有盛誉。1,2 在装有彩色酒精的开口容器中，他挂上一个长的窄口玻璃管，在上端有一个空球。在加热时，球体中的空气膨胀，气泡会通过液体。球体冷却时，会引导液体沿着玻璃管下降。1 然后，通过观察液体在管内的位置，可以观察球体的温度波动。这种“颠倒式”的温度计测量效果很差，因为水

平面随着大气压变化，而且管上没有标度。佛罗伦萨温度计的开发，大大改善了温度测量的精度，这种温度计采用了密封结构和标度。

在之后的几十年中，人们设想出许多温度计标度，所有这些构想都基于两个或多个固定点。但是，只是到了18世纪早期，才出现普遍公认的一个标度，当时，德国仪器制造商 Gabriel Fahrenheit 生产出准确、可重复的水银温度计。对温标低端的固定点，Fahrenheit 使用冰水与盐的混合物(或氯化铵)。这是他可以复现的最低温度，然后他把这里标为“0度”。对标度的高端，他选择了人体血液的温度，称为96度。

为什么使用96度、而不是100度呢？早期的标度被分成12等分。Fahrenheit 为了实现更高的分辨率，把标度分成24等分，然后分成48等分，最后分成96等分。

Fahrenheit 标度得以流行的主要原因，是因为 Fahrenheit 设计的温度计的可重复性和质量。

大约在1742年，Anders Celsius 建议使用冰的融化温度和水的沸腾温度作为低点和高点。Celsius 选择0度作为冰的融化温度，选择100度作为水的沸腾温度。之后，这两点得以保留，摄氏度诞生了。1948年，温度的名称正式改变为摄氏度。

在19世纪初, William Thomson (Lord Kelvin)研制出一种通用的热力标度,其基于理想气体的膨胀系数。Kelvin确立了绝对零度的概念,他的标度一直是现代温度测定法的标准。

这四种现代温标的转换公式是:

$$\begin{aligned} ^\circ\text{C} &= 5/9 (^{\circ}\text{F} - 32) & ^\circ\text{F} &= 9/5^{\circ}\text{C} + 32 \\ \text{k} &= ^\circ\text{C} + 273.15 & ^\circ\text{R} &= ^\circ\text{F} + 459.67 \end{aligned}$$

兰金温标( $^{\circ}\text{R}$ )是开氏温标的华氏等价物,是以温度测定领域的早期开创者 W. J. M. Rankine 的名字命名的。注意,正式的开氏温度不带度的符号。单位用“开氏温标”表示,而不是开氏度。

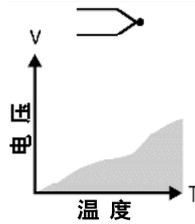
### 参考温度

我们不能象分压器那样设计一个分温器,也不能象在测量距离时增加长度一样增加温度。我们必须依赖可以简便观察、并具有一致性特点的物理现象所确定的温度。

国际温标(ITS)就基于这些现象。ITS是在1990年修订的,它确定了17个固定点和相应的温度。表1是部分实例。

由于我们只能使用这些固定温度作为参考温度,因此我们必须使用仪器在这些固定温度之间插补。但是,在这些温度之间准确地插补可能要求某些相当奇异的传感器,许多传感器过于复杂或过于昂贵,不适合用于实际环境中。我们将把我们的讨论限定在四种最常用的温度传感器上:热电偶、电阻温度检测器(RTD's)、热敏电阻器和集成电路温度传感器。

### 热电偶



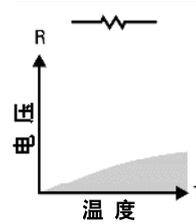
#### 优点

- 自己供电
- 简单
- 坚固
- 价格低
- 采用各种物理形式
- 温度范围广

#### 缺点

- 非线性
- 电压低
- 要求参考温度
- 稳定性最差
- 敏感性最差

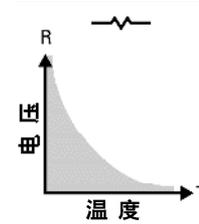
### RTD



- 最稳定
- 最准确
- 线性度高于热电偶

- 价格高
- 速度低
- 要求电流电源
- 电阻变化小
- 四线测量

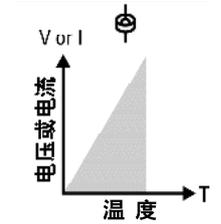
### 热敏电阻器



- 输出高
- 速度快
- 两线欧姆测量

- 非线性
- 温度范围有限
- 易碎
- 要求电流电源
- 自热

### 集成电路温度传感器



- 线性度最高
- 输出最高
- 价格低

- $T < 250^{\circ}\text{C}$
- 要求电源
- 速度低
- 自热
- 配置有限

表1  
ITS-90 固定点

元素	类型	温度 K	$^{\circ}\text{C}$
(H <sub>2</sub> ) 氢	三态点	13.8033 K	-259.3467 $^{\circ}\text{C}$
(Ne) 氖	三态点	24.5561 K	-248.5939 $^{\circ}\text{C}$
(O <sub>2</sub> ) 氧	三态点	54.3584 K	-218.7916 $^{\circ}\text{C}$
(Ar) 氩	三态点	83.8058 K	-189.3442 $^{\circ}\text{C}$
(Hg) 汞	三态点	234.315 K	-38.8344 $^{\circ}\text{C}$
(H <sub>2</sub> O) 水	三态点	273.16 K	+0.01 $^{\circ}\text{C}$
(Ga) 镓	熔点	302.9146 K	29.7646 $^{\circ}\text{C}$
(In) 铟	凝固点	429.7485 K	156.5985 $^{\circ}\text{C}$
(Sn) 锡	凝固点	505.078 K	231.928 $^{\circ}\text{C}$
(Zn) 锌	凝固点	692.677 K	419.527 $^{\circ}\text{C}$
(Al) 铝	凝固点	933.473 K	660.323 $^{\circ}\text{C}$
(Ag) 银	凝固点	1234.93 K	961.78 $^{\circ}\text{C}$
(Au) 金	凝固点	1337.33 K	1064.18 $^{\circ}\text{C}$

## 热电偶

在由不同的金属制成的两条线在两端联接在一起、其中一端加热时，将产生连续的电流，电流在热电路中流动。Thomas Seebeck 在 1821 年发现这一现象(图 2)。

如果这条电路在中心断开，那么净开路电压(Seebeck 电压)是联接温度和两种金属混合物的函数(图 3)。

所有不同的金属都具有这种效应。本应用指南第 28 页列出了最常见的两种金属组合，同时列明了其重要特点。对小的温度变化，Seebeck 电压与温度成线性比例关系： $e_{AB} = \alpha T$ 。

其中  $\alpha$  是 Seebeck 系数，它是比例常数。(对实际环境中的热电偶， $\alpha$  并不是恒定的，而是随着温度变化。第 9 页“电压到温度转换”中讨论了这一系数。)

### 测量热电偶电压

我们不能直接测量 Seebeck 电压，因为我们必须先把电压表连接到热电偶上，电压表引线本身创建了一条新的热电路。

让我们在铜-铜镍合金(T 类)热电偶上连接一个电压表，然后查看其电压输出(图 4)。

我们希望电压表只读出  $V_1$ ，但通过连接电压表，以测量联接  $J_1$  的输出，我们创建了两条额外的金属联接： $J_2$  和  $J_3$ 。由于  $J_3$  是铜-铜联接，因此它不创建热 e.m.f. ( $V_3 = 0$ )；但  $J_2$  是一种铜-铜镍合金联接，它将与  $V_1$  相反增加一个 e.m.f. ( $V_2$ )。得到的电压表读数  $V$  将与  $J_1$  和  $J_2$  之间的温度差成比例。这说明，除非我们先找到  $J_2$  的温度，否则我们找不到  $J_1$  的温度。

### 参考联接

确定  $J_2$  的方式之一是在物理上把联接放到一个冰盆中，强迫其温度降到  $0^\circ\text{C}$ ，把  $J_2$  作为参考联接。由于两个电压表终端联接现在都是铜-铜联接，因此它们没有创建热 e.m.f.，电压表上读出的电压与  $J_1$  和  $J_2$  之间的温差成比例。

现在，电压表的读数是(参见图 5)：

$$V = (V_1 - V_2) \cong \alpha(t_{J_1} - t_{J_2})$$

如果我们指定  $T_{J_1}$  的摄氏度：

$$T_{J_1} (^{\circ}\text{C}) + 273.15 = t_{J_1} (\text{K})$$

那么  $V$  变成：

$$V = V_1 - V_2 = \alpha[(T_{J_1} + 273.15) - (T_{J_2} + 273.15)] \\ = \alpha(T_{J_1} - T_{J_2}) = (T_{J_1} - 0)$$

$$V = \alpha T_{J_1}$$

图 2  
Seebeck 效应

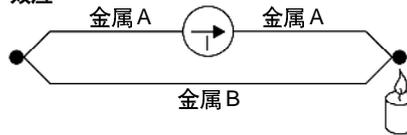
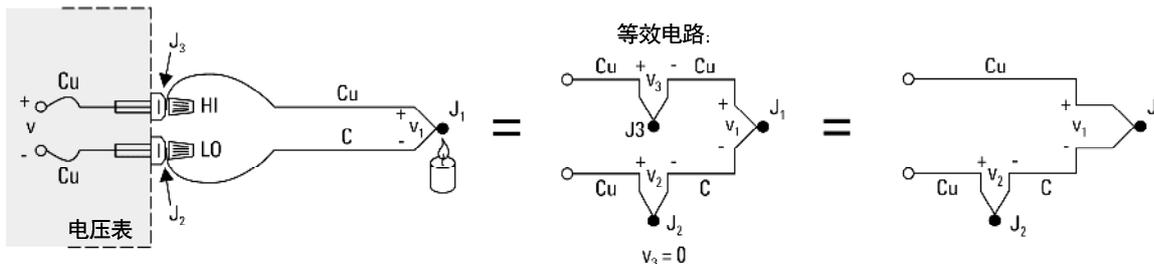


图 3



图 4  
使用 DVM  
测量联接电压



我们之所以用这么大的篇幅来介绍温度计的发展历史，是为了强调冰盆联接输出  $V_2$  不是 0V。它是绝对温度的函数。

通过增加冰点参考联接的电压，我们现在参考了  $0^\circ\text{C}$  的读数  $V$ 。这种方法非常准确，因为可以精密地控制冰点温度。美国标准和技术学会(NIST)使用冰点作为热电偶的基本参考点，因此我们现在可以查NIST表，直接从电压  $V$  转换成温度  $T_{J_1}$ 。

图5  
外部参考  
联接

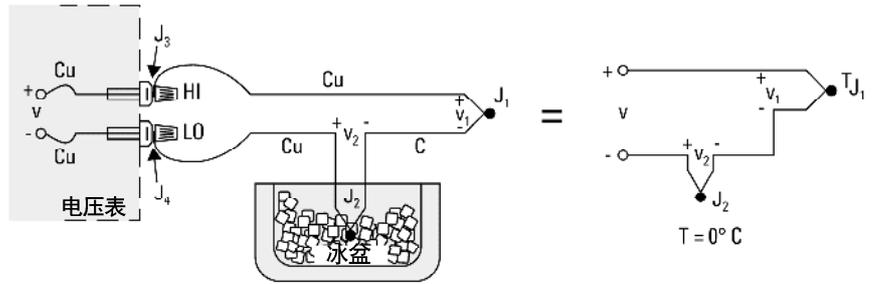


图5中所示的铜-铜镍合金热电偶是一个独特的例子，因为铜线使用的金属与电压表端子相同。让我们使用铁-铜镍合金(J类)热电偶，而不是铜-铜镍合金。铁线(图6)提高了电路中不同金属联接的数量，两个电压表端子都变成 Cu-Fe 热电偶联接。

只要电压表高低端子( $J_3$  和  $J_4$ )相反工作(图7)，这条电路仍将提供精度适当的测量结果。

图6  
铁-铜镍合金  
耦合

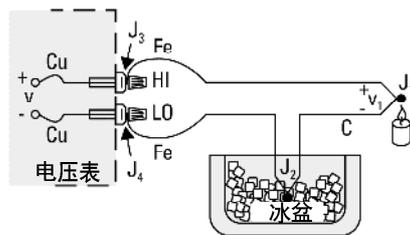
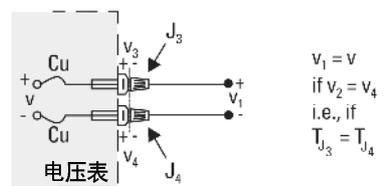


图7  
联接电压  
抵消

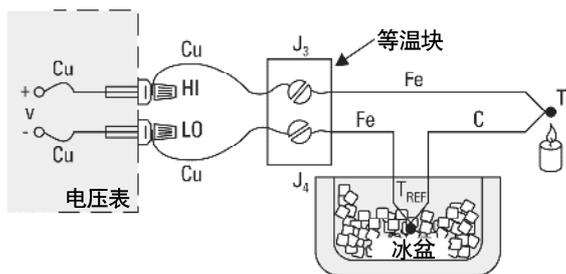


如果两个前面板端子的温度不同，那么将产生误差。为实现更加精确的测量结果，应延长铜电压表的引线，这样可以在等温(温度相同)模块上进行铜-铁联接(图8)。

等温块是一个电绝缘体，但也是一个良好的热导体，它用来使  $J_3$  和  $J_4$  保持在相同的温度。绝对模块温度并不重要，因为两个 Cu-Fe 联接作反向动作。我们仍令：

$$V = \alpha (T_{J_1} - T_{REF})$$

图8  
从 DVM 端子中  
去掉联接



## 参考电路

图 8 中的电路将为我们提供准确的读数, 但如果在可能时去掉冰盆会更好。

让我们把冰盆放上另一个等温块(图 9)。

新等温块在参考温度  $T_{REF}$  上, 由于  $J_3$  和  $J_4$  仍处在相同的温度, 因此我们再次得到:  $V = \alpha (T_1 - T_{REF})$ 。

这仍是一条相当不便的电路, 因为我们必须连接两个热电偶。让我们把 Cu-Fe 联接( $J_4$ )和 Fe-C 联接( $J_{REF}$ )组合在一起, 去掉低(LO)引线中额外的 Fe 线。

我们可以通过先联接两个等温块, 来实现这一点(图 9b)。

我们没有改变输出电压  $V$ , 它还是:  $V = \alpha (T_{J_1} - T_{REF})$

现在, 我们运用中间金属定律(参见附录一), 去掉额外的联接。这一经验定律规定, 在热电偶联接的两个不同金属中插入第三种金属(在本例中是铁), 只要由第三种金属形成的两个联接的温度相同(图 10), 将不会影响输出电压。

这是一个有用的结论, 因为它完全不需要 LO 引线中的铁(Fe)线(图 11)。

再次得到  $V = \alpha (T_1 - T_{REF})$ , 其中  $\alpha$  是 Fe-C 热电偶的 Seebeck 系数。

联接  $J_3$  和  $J_4$  代替了冰盆。这两个联接现在成为参考联接。

图 9a  
去掉冰盆

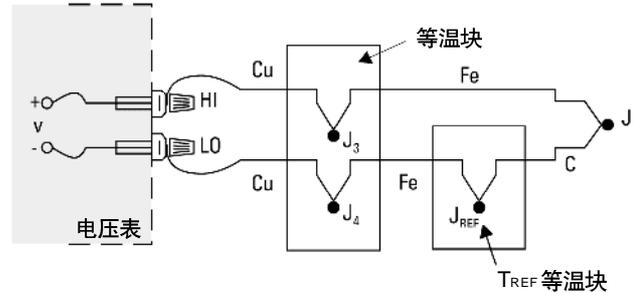


图 9b  
联接等温度

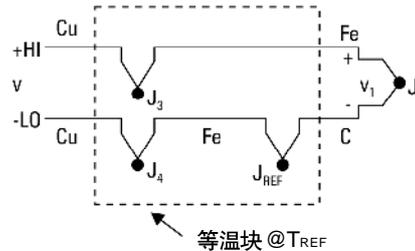
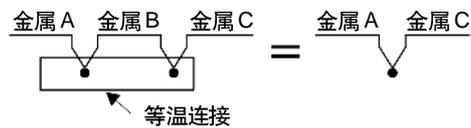
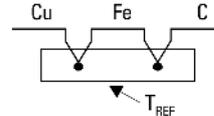


图 10  
中间金属定律



因此图 9b 中的低引线



变成

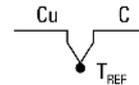
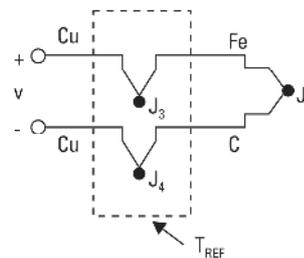


图 11  
等效电路



现在，我们可以继续下一步：直接测量等温块(参考联接)的温度，并使用这些信息，计算未知的温度 $T_{J_1}$  (图12)。

热敏电阻器为我们测量参考联接的绝对温度提供了一种方式，其电阻 $R_T$ 是温度的函数。由于等温块的设计，联接 $J_3$ 和 $J_4$ 及热敏电阻器都被假设成温度相同。通过使用数字万用表(DMM)，我们只需：

1. 测量 $R_T$ ，得到 $T_{REF}$ ，把 $T_{REF}$ 转换成等效参考联接电压 $V_{REF}$ 。
2. 测量 $V$ ，加上 $V_{REF}$ ，得到 $V_1$ ，把 $V_1$ 转换成温度 $T_{J_1}$ 。

这一程序称为软件补偿，因为它依靠仪器或计算机中的软件，补偿参考联接的效应。等温端子块温度传感器可以是其特点与绝对温度成比例的任何设备，包括RTD、热敏电阻器或集成电路传感器。

似乎必然要问，如果我们已经有一台设备测量绝对温度(如RTD或热敏电阻器)，为什么我们还要使用要求参考联接补偿的热电偶呢？对这个问题，最重要的一个答案是热敏电阻器、RTD和集成电路传感器只在某个温度范围内有效。而热电偶则可以用于一定的温度范围内，并为各种空气而优化。它们要比热敏电阻器坚固得多，热电偶经常焊到金属部分或使用螺钉夹紧，就可以说明这一点。它们可以在现场制成，如通过焊接。简而言之，热电偶是市场上提供

图12  
外部参考  
联接—  
无冰盆

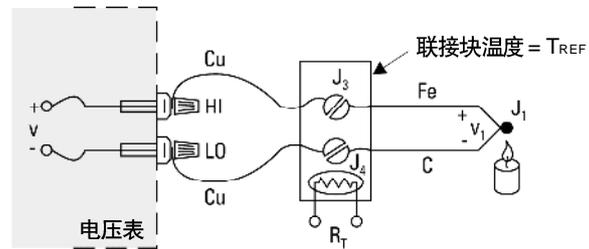
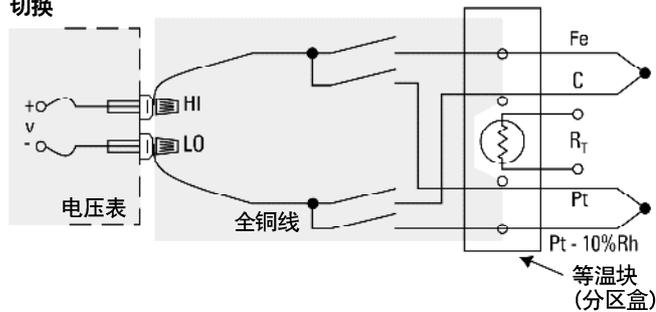


图13  
多个热电偶  
类型之间的  
切换



的最通用的温度传感器。由于测量系统执行参考补偿和软件电压到温度转换的整个任务，因此使用热电偶非常简便，它只需连接一对导线即可。

当我们需要监测大量的数据点时，热电偶测量变得尤其方便。这通过对一个以上的热电偶单元使用等温参考联接完成(图13)。中继扫描仪把电压表顺序连接到各种热电偶上。所有电压表和扫描仪线都是铜线，而不管选择哪种热电偶。事实上，只要我们知道每个热电偶是什么，我们就可以在相同的等温联接块(通常称为分区盒)上组合热电偶类型，并在软件中进行相应的修改。联接块温度传感器 $R_T$ 位于联接块的中心，使得因温度梯度导致的误差达到最小。

软件补偿是我们测量热电偶使用的最通用的技术。许多热电偶连接在一个联接块上，在整个扫描仪中使用铜线，其技术与选择的热电偶类型无关。此外，在使用具有内置分区盒的数据采集系统时，我们只需连接热电偶，因为我们有一对试线。所有转换操作都由仪器的软件执行。其中一个缺点是它要求额外的少量时间，计算参考联接温度。为实现最大速度，我们可以使用硬件补偿技术。

## 硬件补偿

在软件补偿中，我们需要测量参考联接的温度，计算等效功率，而在硬件补偿中，我们可以插入一块电池，抵消参考联接的偏置电压。这种硬件补偿电压与参考联接电压的组合，等于 $0^{\circ}\text{C}$ 联接的电压(图 14)。

补偿电压 $e$ 是温度传感电阻器 $R_T$ 的函数。电压 $V$ 现在参考 $0^{\circ}\text{C}$ ，可以使用 NIST 表直接读出及转换成温度。

这条电路也叫作电子冰点参考电路。6 这些电路已经商用化，用于任何电压表和各种热电偶。其主要缺点是通

常对每个单独的热电偶类型，都需要一条唯一的冰点参考电路。

图 15 是一个实用的冰点参考电路图，它可以与中继扫描仪一起使用，补偿整块热电偶输入。模块中的所有热电偶必须类型相同，但每个输入块可以通过简单地改变增益电阻器，容纳一种不同的热电偶。

硬件补偿电路或电子冰点参考电路的优点是，我们不需要计算参考温度。这可以节约两个计算步骤，使得硬件补偿温度测量在一定程度上快于软件补偿测量。但是，当前速度更快的微处理器

和先进的数据采集设计方案，使得这两种方法之间的界限越来越模糊，在实际应用中，软件补偿的速度正在挑战硬件补偿的速度(表 2)。

表 2

硬件补偿	软件补偿
<ul style="list-style-type: none"> <li>速度快</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>要求更多的软件处理时间</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>受到每个参考联接一种热电偶类型的限制</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>通用: 接受任何热电偶</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>重新配置困难: 对新的热电偶类型, 要求改动硬件</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>重新配置简便</li> </ul>

图 14  
硬件补偿电路

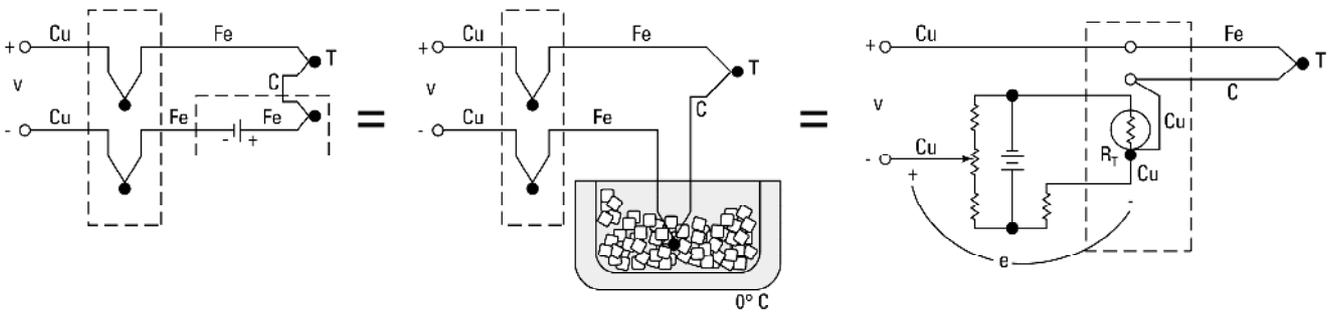
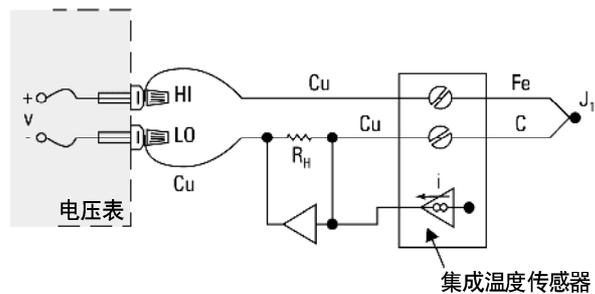


图 15  
实用硬件补偿



## 电压到温度转换

我们已经使用硬件和软件补偿，合成冰点参考。现在，我们只需读数字电压表，把电压读数转换成温度。遗憾的是，热电偶的温度与电压关系不是线性关系。某些流行的热电偶的输出电压是温度的函数，如图16所示。如果画出曲线相对于温度的斜率(Seebeck系数)，如图17所示，可以非常明显地看出，热电偶是一种非线性设备。

图17中的横线表明常数 $\alpha$ ，换句话说，这是一台线性设备。我们注意到，K型热电偶的斜率在0°C到1000°C的温度范围内接近常数。结果，K型可以与复用电压表和外部冰点参考一起使用，获得精度适中的温度的直接读数。也就是说，温度显示只涉及一个温标。

通过考察 Seebeck 系数的变化量，我们可以简便地看到，使用一个恒定标度将限制系统的温度范围，并限制系统的准确性。通过读取电压表，并参阅 NIST 热电偶表4(NIST 专论 175 - 参见表3)，可以获得更好的转换精度。

我们可以把这些查表得到的值存储在计算机中，但它们将占用大量的内存。比较可行的方法是使用功率连续多项式，获得表中的近似值：

$$t_{90} = C_0 + C_1X + C_2X^2 + C_3 X^3 + \dots + C_nX^n$$

其中：

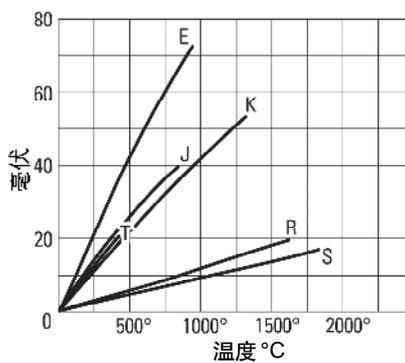
$t_{90}$  = 温度

$x$  = 热电偶电压

$c$  = 每个热电偶唯一的多项式系数

$n$  = 多项式的最高次幂

图16  
热电偶温度  
与电压关系图



类型	金属
	+ -
E	铬 对 铜镍合金
J	铁 对 铜镍合金
K	铬 对 氧化铝
R	铂 对 铂
S	铂 对 铂
	13% 铱
T	铜 对 铜镍合金
	10% 铱

图17  
Seebeck 系数与  
温度关系图

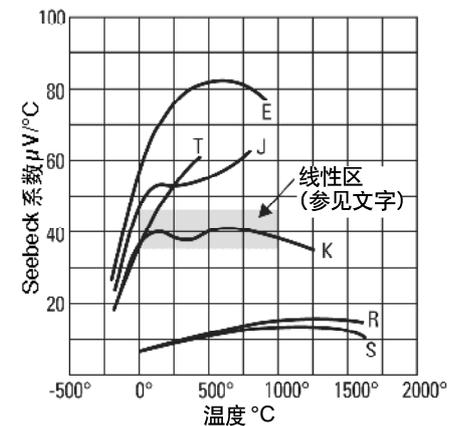


表3  
E类热电偶

温度, °C (ITS-90)												
mV	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09	.10	mV
0.00	0.00	0.17	0.34	0.51	0.68	0.85	1.02	1.19	1.36	1.53	1.70	0.00
0.10	1.70	1.87	2.04	2.21	2.38	2.55	2.72	2.89	3.06	3.23	3.40	0.10
0.20	3.40	3.57	3.74	3.91	4.08	4.25	4.42	4.59	4.76	4.92	5.09	0.20
0.30	5.09	5.26	5.43	5.60	5.77	5.94	6.11	6.28	6.45	6.61	6.78	0.30
0.40	6.78	6.95	7.12	7.29	7.46	7.63	7.79	7.96	8.13	8.30	8.47	0.40
0.50	8.47	8.64	8.80	8.97	9.14	9.31	9.48	9.64	9.81	9.98	10.15	0.50
0.60	10.15	10.32	10.48	10.65	10.82	10.99	11.15	11.32	11.49	11.66	11.82	0.60
0.70	11.82	11.99	12.16	12.33	12.49	12.66	12.83	12.99	13.16	13.33	13.50	0.70
0.80	13.50	13.66	13.83	14.00	14.16	14.33	14.50	14.66	14.83	15.00	15.16	0.80
0.90	15.16	15.33	15.50	15.66	15.83	16.00	16.16	16.33	16.49	16.66	16.83	0.90
1.00	16.83	16.99	17.16	17.32	17.49	17.66	17.82	17.99	18.15	18.32	18.49	1.00
1.10	18.49	18.65	18.82	18.98	19.15	19.31	19.48	19.64	19.81	19.98	20.14	1.10
1.20	20.14	20.31	20.47	20.64	20.80	20.97	21.13	21.30	21.46	21.63	21.79	1.20
1.30	21.79	21.96	22.12	22.29	22.45	22.61	22.78	22.94	23.11	23.27	23.44	1.30
1.40	23.44	23.60	23.77	23.93	24.10	24.26	24.42	24.59	24.75	24.92	25.08	1.40

在n提高时，多项式的准确性得到改善。可以在较窄的温度范围内使用较低次幂的多项式，获得更高的系统速度。表4是在数据采集系统中与软件补偿技术一起使用的多项式的实例。该软件并不是直接计算指数，而是编程为使用嵌套多项式形式，节约执行时间。在温度范围之外，多项式拟合迅速降级，如表4所示，在这些极限范围之外不应进行推断。

即使对当前处理能力很高的微处理器来说，高次幂多项式的计算仍是一项耗时的工作。前面我们提到，我们可以对较小的温度范围使用较低次幂的多项式。在一个数据采集系统使用的软件中，热电偶特点曲线分成8个段，每个段接近三次幂多项式(图18)。

数据采集系统测量输出电压，把它划到八个段中的一段，然后为该段选择相应的系数。这种技术的速度和精度都要超过高次幂多项式。

许多新型数据采集系统使用了速度更快的算法。通过使用多得多的段和一系列一次幂等式，它们可以每秒进行几百次、甚至几千次内部计算。

所有上述程序都假设可以准确简便地测量热电偶电压，速查表5可以看到，热电偶输出电压事实上非常小。看一下系统电压表的要求。

表4  
NIST ITS-90 多项式系数

热电偶类型	J型		K型	
温度范围	-210°C到0°C	0°C到760°C	-200°C到0°C	0°C到500°C
误差范围	± 0.05°		C ± 0.04°	
多项式阶数	8阶		9阶	
C <sub>0</sub>	0	0	0	0
C <sub>2</sub>	1.9528268 x 10 <sup>-2</sup>	1.978425 x 10 <sup>-2</sup>	2.5173462 x 10 <sup>-2</sup>	2.508355 x 10 <sup>-2</sup>
C <sub>1</sub>	-1.2286185 x 10 <sup>-6</sup>	-2.001204 x 10 <sup>-7</sup>	-1.1662878 x 10 <sup>-6</sup>	7.860106 x 10 <sup>-8</sup>
C <sub>3</sub>	-1.0752178 x 10 <sup>-9</sup>	1.036969 x 10 <sup>-11</sup>	-1.0833638 x 10 <sup>-9</sup>	-2.503131 x 10 <sup>-10</sup>
C <sub>4</sub>	-5.9086933 x 10 <sup>-13</sup>	-2.549687 x 10 <sup>-16</sup>	-8.9773540 x 10 <sup>-13</sup>	8.315270 x 10 <sup>-14</sup>
C <sub>5</sub>	-1.7256713 x 10 <sup>-16</sup>	3.585153 x 10 <sup>-21</sup>	-3.7342377 x 10 <sup>-16</sup>	-1.228034 x 10 <sup>-17</sup>
C <sub>6</sub>	-2.8131513 x 10 <sup>-20</sup>	-5.344285 x 10 <sup>-26</sup>	-8.6632643 x 10 <sup>-20</sup>	9.804036 x 10 <sup>-22</sup>
C <sub>7</sub>	-2.3963370 x 10 <sup>-24</sup>	5.099890 x 10 <sup>-31</sup>	-1.0450598 x 10 <sup>-23</sup>	-4.413030 x 10 <sup>-26</sup>
C <sub>8</sub>	-8.3823321 x 10 <sup>-29</sup>		-5.1920577 x 10 <sup>-28</sup>	1.057734 x 10 <sup>-30</sup>
C <sub>9</sub>				-1.052755 x 10 <sup>-35</sup>

温度转换公式:  $t_{90} = C_0 + C_1X + C_2X^2 + \dots + C_9X^9$

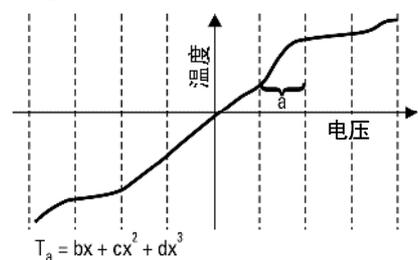
嵌套多项式构成 (四次幂实例):  $t_{90} = C_0 + X(C_1 + X(C_2 + X(C_3 + C_4X)))$

表5  
要求的DVM灵敏性

热电偶类型	25°C时的Seebeck系数(μV/°C)	0.1°C的DVM灵敏度(μV)
E	61	6.1
J	52	5.2
K	40	4.0
R	6	0.6
S	6	0.6
T	41	4.1

即使对常见的K型热电偶，电压表也必须能够提供4μV的分辨率，以检测0.1°C的变化。这需要DMM提供完美的分辨率(位数越多越好)及测量精度。这个信号的幅度特别容易导致噪声进入任何系统。基于这一原因，仪器设计人员采用多种基本噪声抑制技术，包括树型开关、正常模式滤波、集成和隔离。

图18  
分成几段的曲线



## 实际热电偶测量

### 噪声抑制技术

**树型开关** — 树型开关是把扫描仪的通道整理到多个小组中、每个小组都有市电开关的一种方法。

如果不使用树型开关，每条通道都可能通过杂散电容，直接导致噪声。有了树型开关，多组并行通道电容与单个树型开关电容是串联的。结果，大大降低了大型数据采集系统中的噪声，因为降低了通道之间的电容(图 19)。

**模拟滤波器** — 可以在电压表输入处直接使用滤波器，以降低噪声。它可以明显降低干扰，但会导致电压表对步进输入响应速度下降(图 20)。

**集成** — 集成是一种 A/D 技术，它基本上在整个线路周期内平均噪声，从而几乎可以消除与电源线有关的噪声及其谐波。如果选择的集成周期小于整数线路周期，那么基本上可以消除噪声抑制属性。

由于覆盖长距离的热电偶电路对电源线相关噪声特别敏感，因此建议使用集成模数转换器，测量热电偶电压。鉴于最新技术发展已经使其成本与过去价格较低的模数转换技术持平，因此集成技术是一种特别具有吸引力的模数转换技术。

图 19  
树型开关

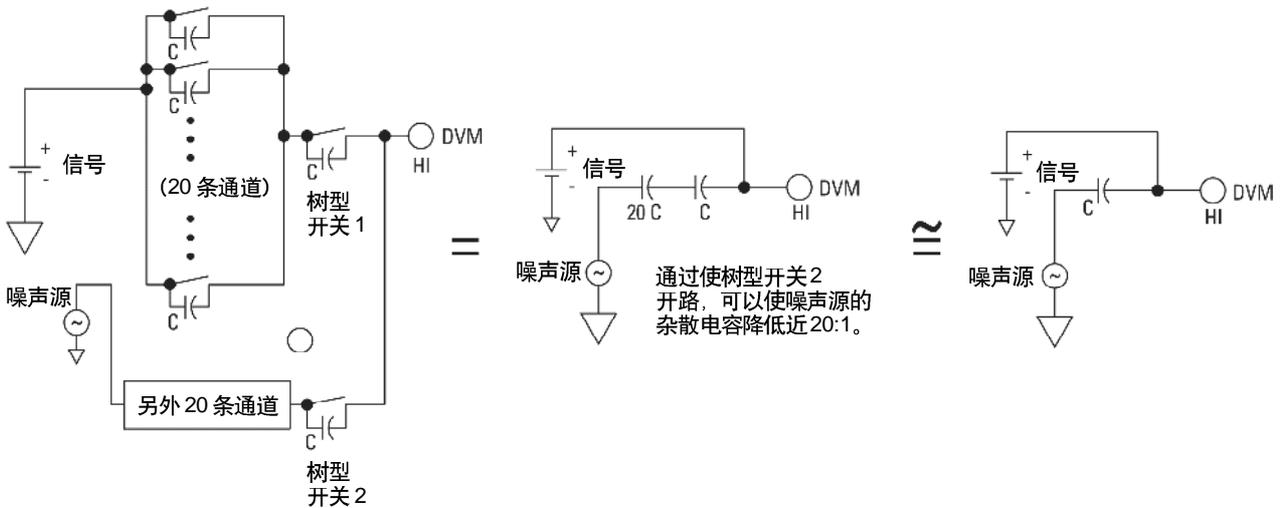
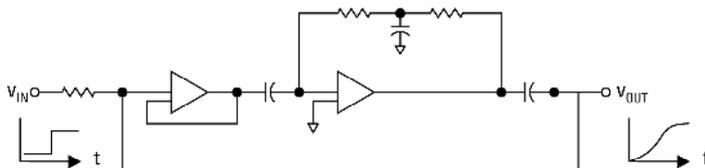


图 20  
模拟滤波器



**隔离** — 高低测量引线共用的噪声源称为共模噪声。隔离式输入有助于降低这种噪声，同时防止测量系统发生接地环路和瞬变(图21)。

让我们假设已经把一条热电偶线拉过同一条电缆导管,作为220V交流电源线。电源线和热电偶线之间的电容将在这两条热电偶线上产生幅度几乎相等的AC信号。这在理想电路中并不是问题,但电压表并不是理想的电路。在低端子和安全接地(地线)之间有某些电容。电流通过这个电容和热电偶引线电阻,产生一个正常模式的信号,其表现为测量误差。

通过认真设计,使低接地电容达到最小,把输入端子与安全接地隔开,可以减少这种误差。未隔离或参考地输入(“单端输入”通常参考地)不能抑制共模噪声。相反,共模电流流经直接接地的低引线,导致可能非常大的读数误差。

当热电偶联接直接接触共模噪声源时,隔离输入对消除产生的接地环路特别有用。

在图22中,我们希望测量熔铸金属盆中心的温度,金属盆通过电流加热。盆中心的电位是120 VRMS。图23中画出了等效电路。

通过在LO和接地之间保持高阻抗,隔离输入抑制噪声电流。非隔离系统(如图24所示)形成接地路径,导致接地环路。得到的电流可能会非常高,而导致

图21  
隔离使  
共模电流  
达到最小

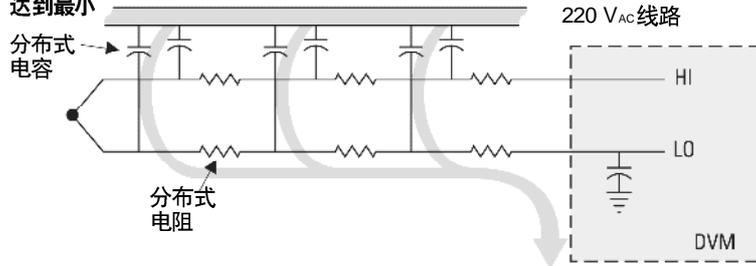


图22

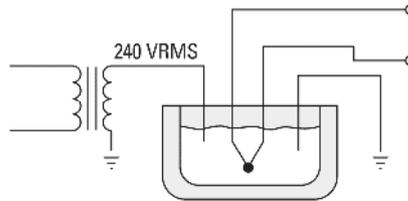


图23

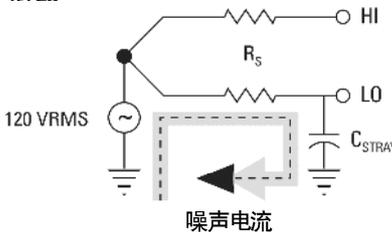
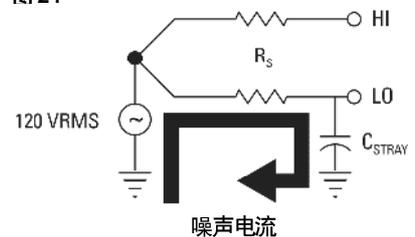


图24



危险,可能会损害仪器和操作人员。必须使用隔离输入,测量高共模噪声。

有时仅有隔离输入是不够的。在图23中,电压表输入在120 VRMS共模噪声源上漂移。它们必须经得住较接地 $\pm 170$  V的峰值偏置,同时仍进行准确的测量。带有电子FET开关的隔离系统一般只能处理较接地 $\pm 12$  V的偏置;如果用于这种应用中,输入将受到破坏。

解决方法是使用商用外部信号调节技术(隔离变压器和放大器),缓冲输入,抑制共模电压。另一种简便的方式是使用可以漂移几百伏的数据采集系统。

注意,我们还可以通过使Rs达到最小,使噪声减至最低。我们可以使用串联电阻较小的大型热电偶线。此外,为降低磁性感应噪声的可能性,热电偶应以统一的方式绞合。在市场上,热电偶扩展线以双绞线结构方式提供。

## 实践中的注意事项

我们已经讨论了参考联接的概念、怎样使用多项式提取绝对温度数据及在数据采集系统中考察哪些因素，以使噪声的影响达到最小。现在，让我们看一下热电偶线本身。多项式曲线拟合依赖热电偶线本身的完美性，也就是说，在进行温度测量操作过程中，它不能变成反校准。我们现在讨论热电偶温度测量的某些缺点。

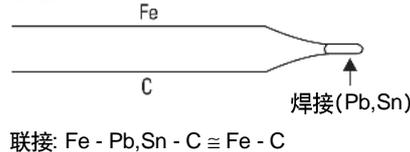
除数据采集系统及等温参考连接的指定精度外，大多数测量误差可以追溯到下述主要原因：

1. 联接不良
2. 热电偶线反校准
3. 并联阻抗和电流动作
4. 热并联
5. 噪声和泄漏电流
6. 热电偶规范
7. 文档资料

## 联接不良

可以通过许多可以接受的方式，把两条热电偶线连接起来，如焊接、镀银、电焊等。在把热电偶线焊接在一起时，我们在热电偶电路中引入第三种金属。只要热电偶两侧的温度相同，那么焊接应不会引入误差。焊接限制着我们可以进行联接的最大温度(图25)。为达到高的测量温度，必须把联接焊在一起。但是，电焊并不是一种可以轻松采用的流程。5温度过高可能会降低导线质量，气焊和焊接的导线中的空气可能会扩散到热电偶金属中，改变热电偶金属的特点。如果联接的两种金属的特点差异非常大，将使情况进一步复杂化。

图25  
焊接  
热电偶



商用热电偶通过昂贵的机械焊在一起，这些机械使用电容放电技术保证一致性。

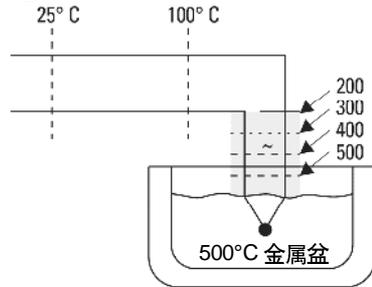
当然，焊接质量差会导致开路，通过进行开路热电偶检查，可以在测量环境中检测到开路。这是许多数据记录系统和数据采集系统通常提供的一种测试功能。

## 反校准

反校准要比开路热电偶严重得多，因为它会导致似乎正确的温度读数。反校准描述了因疏忽而改变热电偶线物理结构、致使其不再符合NIST多项式规定极限的流程。空气颗粒扩散到金属中、温度极限都可能会导致反校准。它可能是由于高温退火或金属冷加工导致的。

Robert Moffat 在他的《热电偶温度测量的梯度方法》一书中阐述道，热电偶电压实际上是由包含温度梯度的导线段产生的，而不一定是由联接产生的。9例如，如果我们把热探头放在熔铸的金

图26  
梯度产生  
电压



属盆中，将有两个区域几乎是等温的，而其中一个区域的梯度较高。

在图26中，热电偶联接将不会产生任何部分的输出电压。共享段将产生几乎整个热电偶输出电压。如果由于老化或退火而发现这个热电偶的输出漂移，那么仅更换热电偶联接并不能解决问题。我们必须更换整个阴影部分，因为它是热电偶电压的来源。

很明显，不能完美地制造热电偶线，将有某些瑕疵，导致输出电压误差。如果发生在温度梯度陡的区域，这些不均一性将产生非常大的误差。

由于我们不知道一条导线中哪里将发生不完美性，因此最好的方法是避免产生陡的梯度。通过使用金属套管或认真地放置热电偶线，可以降低梯度。

## 并联阻抗

高温还会影响热电偶线绝缘器。随着温度提高，绝缘电阻会呈指数级下降，甚至会降到产生虚拟联接。假设我们有一个在高温下操作的完全开路的热电偶(图27)。

泄漏电阻 $R_L$ 可以足够低，构成电路路径，为我们提供不正确的电压读数。现在，让我们假设热电偶没有开路，但我们使用非常长的一段小直径导线(图28)。

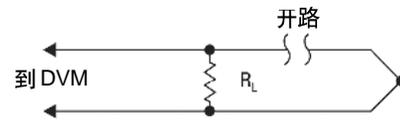
如果热电偶线很小，其串联电阻 $R_S$ 将非常高，并位于极度条件 $R_L \ll R_S$ 。这意味着热电偶联接似乎是在 $R_L$ ，输出将与 $T_1$ 成比例，而不是和 $T_2$ 成比例。

高温还对热电偶线具有其它有害的影响。绝缘内部不纯和化学成分可能会实际扩散到热电偶金属中，导致温度电压相关，偏离公布的值。在高温下使用热电偶时，应认真选择绝缘。通过选择适当的保护金属或陶瓷外套，可以使大气效应达到最小。

## 流电动作

某些热电偶绝缘中使用的染料在遇水时会形成电解液。这会产生流电动作，得到的输出会比Seebeck效应高出几百倍。应采取相应措施，把热电偶线与所有严酷的空气和液体隔开。

图27  
泄漏电阻

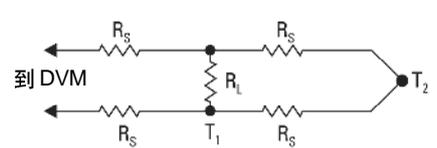


## 热串联

热电偶的生产离不开质量。由于它需要能量加热任何质量，热电偶将略微改变它需要测量的温度。如果测量的质量较小，热电偶自然必须很小。但带有小导线的热电偶更容易发生污染、退火、损伤和串联阻抗等问题。为使这些效应达到最小，可以使用热电偶延长线。

延长线是商用线，主要用来覆盖测量热电偶和电压表之间的长距离。延长线由具有Seebeck系数的金属制成，它与特定的热电偶类型非常类似。它的规格一般比较大，以使其串联电阻在长距离上传送时不会成为不利因素。与非常小的热电偶线相比，它还可以更容易地拉过电缆管道。一般来说，其规定的温度范围要远远低于特级热电偶线。除提供实用规格优势外，延长线要比标准热电偶线价格低，在基于铂的热电偶中尤为如此。

图28  
虚拟联接



由于延长线在较窄的温度范围内指定，更可能受到机械压力，因此延长线中的温度梯度应保持在最小。根据梯度理论，这保证了延长线几乎不会影响任何输出信号。

**噪声**——我们已经讨论了与线路有关的噪声，因为它与数据采集系统相关。集成、树型开关和隔离技术可以抵消大多数与线路有关的干扰。通过模拟滤波器，可以抑制宽带噪声。

数据采集系统不能抑制的一种噪声是系统中的DC泄漏电流导致的DC偏置。尽管具有足够幅度的DC泄漏电流可以感受到的误差并不常见，但应该注意到并防止其存在的可能，特别热电偶线非常小、相关的串联阻抗很高时。

## 导线校准

热电偶线是根据特定的规范制造的，这意味着它符合NIST表。通过校准导线(在已知温度上对其进行测试)，有时可以增强规范。连续线轴上的连续几条线一般可以互相跟踪，其紧密程度要超过规定的容限，尽管可能会从绝对规范中心中略微去掉其输出电压。

如果校准导线，以改善其基本指标，那么必需保证满足所有上述条件，以避免反校准。

## 文档资料

说文档是电压测量误差的来源之一似乎并不合适，但事实是，热电偶系统使用起来非常简便，因此带来了大量的数据点。大量的数据可能会变得很难处理。在采集大量的数据时，由于线路标记错误、使用错误的NIST曲线等导致错误的概率会提高。由于信道数量总是在不断变化，因此可以按测量指标、而不

只是通道数量对数据分类。10可以在一个数据文件中维护与任何给定指标有关的信息，如传感器类型、输出电压、典型值和位置。这可以在PC控制下实现，或通过填充预先打印的表格实现。不管怎样维护数据，均不应低估精确系统的重要性，特别是在开始实施复杂的数据采集项目时。

## 诊断

前面我们提到，使用温度极限附近的热电偶会使大多数误差来源加剧。在大多数应用中，会偶尔遇到这些情况。但是，我们在高温下，在严酷的大气环境中使用小型热电偶会怎么样呢？我们怎样才知道热电偶将产生错误结果呢？我们需要开发一套可靠的诊断程序。

通过使用诊断技术，R.P. Reed已经为检测有问题的热电偶和数据信道研制出一种完善的系统。10这个系统分成三个部分，即：事件记录、分区盒测试和热电偶电阻历史。

**事件记录** — 第一个诊断项目根本不是测试，而是记录所有甚至会远程影响测量的相关事件。例如：

**图 29**  
**3月18日事件记录**

10:43	电源失效
10:47	恢复系统电源
11:05	把 M821 改成 K 型热电偶
13:51	新的数据采集程序
16:07	M821 似乎出现读取问题

我们查看我们的程序列表，发现指标#M821使用J型热电偶，我们新的采集程序把它理解为J型热电偶。但从事件记录中我们看到，很明显热电偶#M821变成了K型，这一变动没有输入程序。尽管这没有简便地发现大多数异常情况，事件记录可以有效地考察系统测量中无法说明的变动原因。这特别适合配置成测量几百个数据点的系统。

**分区盒测试** — 分区盒是一个等温端子块，它使用已知的温度代替冰盆参考。如果我们在分区盒上直接使热电偶临时短路，那么系统应读取与分区盒非常接近的温度(图30)。

如果热电偶线电阻要远远大于并联电阻，铜线并联强制  $V = 0$ 。在正常的未短路的情况下，我们希望测量  $T_J$ ，系统读数为：

$$V = \alpha (T_J - T_{REF})$$

但在功能测试中，我们已经使端子短路，以便  $V = 0$ 。显示的温度  $T_J$  是：

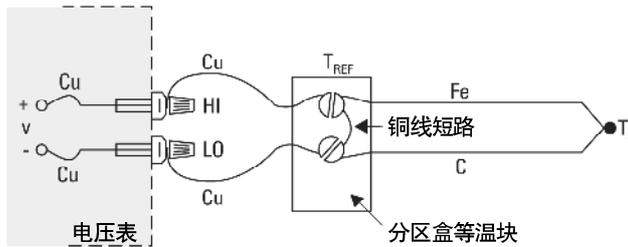
$$0 = \alpha (T_J - T_{REF})$$

$$T_J = T_{REF}$$

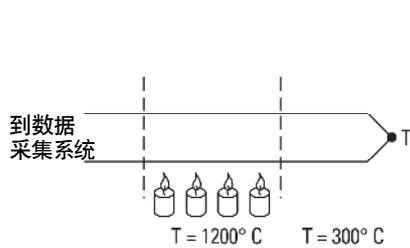
因此，对  $V = 0$  的 DVM 读数，系统将显示分区盒温度。首先，我们先观察温度  $T_J$  (强制使其不同于  $T_{REF}$ )，然后我们使用铜线使热电偶短路，保证系统显示分区盒温度，而不是  $T_J$ 。

这项简单测试检验了控制器、扫描仪、电压表和分区盒补偿均工作正常。事实上，这一简单程序测试了除热电偶本身之外的所有其它项目。

**图 30**  
使端子上的  
热电偶短路



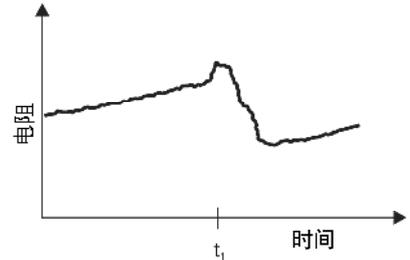
**图 31**  
煤层燃烧



**热电偶电阻** — 热电偶电路的电阻突然变化可以作为一个警报指示。如果我们画出每套热电偶线的电阻与时间关系图，我们可以立即确定突然的电阻变化，这可能表明导线开路、由于绝缘失效导致导线短路、由于振动疲劳导致变化或多种失效机制中的一种机制。例如，假设我们进行图 31 所示的热电偶测量。

我们希望测量已经点燃的地下煤层的温度廓线。导线穿过高温层，进入较

**图 32**  
热电偶  
电阻与时间  
关系



冷的区域。突然，我们测得的温度从  $300^{\circ}\text{C}$  提高到  $1200^{\circ}\text{C}$ 。煤层的燃烧部分是否转到不同位置？还是热电偶绝缘失效，从而导致热区中两条导线之间发生短路？

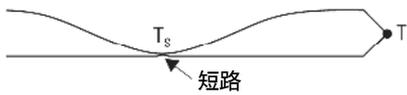
如果我们具有热电偶线电阻的连续历史记录，我们可以推论出实际上发生了哪些情况(图 32)。

在导线的电阻系数因温度变化而变化时，热电偶的电阻自然会随着时间推移而变化。但是，电阻突然变化表明出现了问题。在这种情况下，电阻急剧下降，表明绝缘失效，使热电偶环路发生短路(图33)。

新联接将测量温度 $T_s$ 、而不是 $T_1$ 。电阻测量为我们提供了额外的信息，帮助解释已经发生的物理现象。标准开路热电偶检查中并没有发现这种失效。

**测量电阻** — 我们已经不经意地提到检查热电偶线的电阻，好象这种测量非常简明。但要记住，在热电偶产生电压时，这种电压可能会导致大的电阻测量误差。测量热电偶的电阻与测量电池的内部电阻类似。我们可以使用称为偏置补偿欧姆测量的技术解决这个问题。

图33  
电阻变化的原因

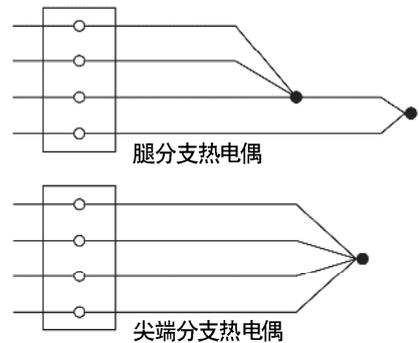


顾名思义，数据采集单元先测量热电偶偏置电压，而不使用欧姆电流电源。然后打开欧姆电流电源，再次测量电阻中的电压。仪器固化软件补偿热电偶的偏置电压，计算实际热电偶源电阻。

**专用热电偶** — 在极端条件下，我们甚至可以使用诊断的热电偶电路配置。尖端分支热电偶和腿分支热电偶是四线热电偶电路，允许冗余测量温度、噪声电压和电阻，检查导线的完整性(图34)。参考资料8中更加详细地讨论了各自的指标。

只有严格的热电偶应用才要求全面的诊断，但最好知道可以使用某些程序，检验重要热电偶测量的完整性。

图34



**摘要**

总之，通过注意下述事项，可以改善热电偶系统的完整性：

- 使用并联热量不会偏离测量区域的最大导线
- 如果要求小型导线，仅在测量区域中使用它，并在没有温度梯度的区域中使用延长线
- 避免机械压力和振动，这可能会拉伤导线
- 在使用长热电偶线，使用屏蔽双绞线延长线
- 避免急剧的温度梯度
- 尽量在额定温度范围内使用热电偶线
- 使用分辨率高、准确性好的集成模数转换器
- 使用具充足的偏置功能的隔离输入
- 在严酷的环境中使用适当铠装的材料，保护热电偶线
- 仅在低温及在小梯度的区域中使用延长线
- 保持事件日志及热电偶电阻的连续记录

## RTD

### 发展历史

在 Seebeck 得到热电发现的同一年，Humphrey Davy 先生宣布，金属的电阻系数表现出与温度具有明显的相关性。50 年以后，William Siemens 先生使用铂作为电阻温度计中的元素。实践证明，这一选择是非常正确的，因为今天，铂已被作为所有高精度电阻温度计中的主要元素。事实上，从稳态氢的三态点 (-259.3467°C) 到银的凝固点 (961.78°C)，目前人们正使用铂电阻温度检测器或 PRTD 作为插补标准。

铂特别适合这一目的，因为它可以耐受高温，同时仍保持杰出的稳定性。作为一种贵金属，它很少受到杂质的影响。

C.H. Meyers 于 1932 年提出采用铂制成的典型电阻温度检测器 (RTD)。12 他在十字形云母套圈上旋紧一个螺旋状铂线圈，把组装件安装在玻璃管内部。这种结构使线上的应力达到最小，同时使电阻达到最大 (图 35)。

尽管这种结构产生了非常稳定的元素，但铂和被测点之间的热接触非常差。这导致热响应时间很慢。这种结构的弱点使其目前主要用于实验室标准中。

另一种实验室标准已经取代了 Meyer 的设计方案，这是由 Evans 和 Burns 提出的鸟笼元素。16 铂元素一直没有得到大力支持，因为在温度变化而导致其膨胀和收缩时，铂元素允许其自由移动 (图 36)。

图 35  
Meyers RTD  
结构

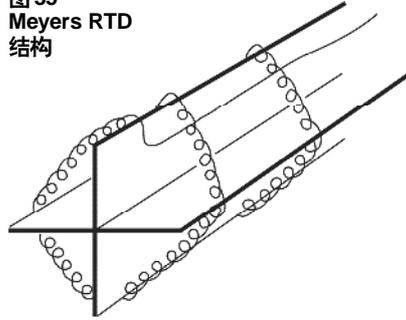


图 36  
鸟笼式  
PRTD

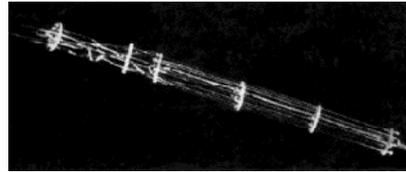
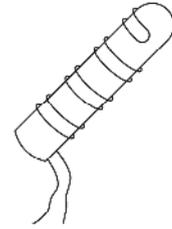
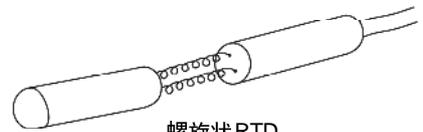


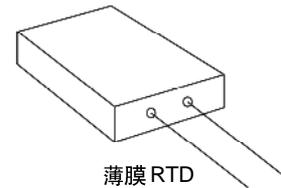
图 27



密封的双线缠绕



螺旋状 RTD



薄膜 RTD

这样，就使得时间和温度导致的应力引起的电阻变化达到最小，鸟笼则成为最终的实验室标准。由于没有支撑结构及容易受到振动的影响，这种配置仍不太适合用于工业环境中。

更加坚固的结构技术如图 37 所示。铂线采用双线，缠在玻璃或陶瓷线轴上。双线缠绕减少了线圈的有效封闭区域，使磁性拾波及相关噪声达到最小。一旦导线缠到线轴上，将使用熔化的一层玻璃密封组装件。密封工艺保证了

RTD 在极度振动条件下仍能保持完整性，但这也限制了铂金属在高温时的膨胀。如果铂和线轴的膨胀系数不能完美匹配，那么在温度变化时，将给导线带来压力，导致应力引起的电阻变化。这可能会导致导线电阻发生永久变化。

目前有部分支撑的 RTD，它位于鸟笼方法和密封螺旋线轴方法之间。其中一种方法使用铂螺旋线轴，线轴经过陶瓷圆柱，通过玻璃原料贴粘。这些器件将在适度加强的振动应用中保持完美的稳定性。

## 金属薄膜 RTD

在最新结构的技术中，铂或金属玻璃浆薄膜沉淀或涂到小的陶瓷平面基底上，然后用激光修整系统进行蚀刻，然后密封。薄膜 RTD 明显降低了组装时间，并可以提高给定规格的电阻。由于制造技术，器件尺寸本身很小，因此可以迅速对温度中的步进变化作出反应。薄膜 RTD 的稳定性要比缠线系统差，但它们要更加流行，因为其在规格、生产成本和坚固性方面有着既定的优势。

**金属**——对温度的正向变化，所有金属都产生正的电阻变化。当然，这是 RTD 的主要功能。我们不久将会看到，在 RTD 电阻的额定值很大时，可以使系统误差达到最小。这意味着电阻系数高的金属线。金属的电阻系数越低，我们必须使用的材料越多。

表 6 列明了常见的 RTD 材料的电阻系数。

由于其电阻系数较低，金和银很少作为 RTD 元素使用。钨的电阻系数相对较高，但主要用于温度非常高的应用，因为它非常易碎，处理起来十分困难。

铜偶尔作为 RTD 元素使用。铜的电阻系数低，使得铜元素不如铂元素，但其线性度和超低成本，使其成为一个经济的备选方案。其温度上限仅在 120°C 左右。

图 38  
引线电阻  
的效应

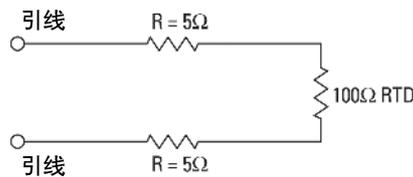


表 6

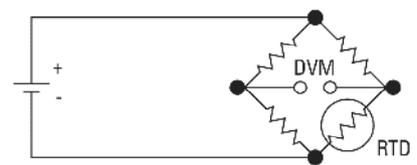
金属		电阻系数 $\Omega / \text{CMF}$ (cmf = circular mil foot)
金	Au	13.00
银	Ag	8.8
铜	Cu	9.26
铂	Pt	59.00
钨	W	30.00
镍	Ni	36.00

最常用的 RTD 是由铂、镍或镍合金制成的。经济的镍衍生线在有限的温度范围内使用。它们的线性度非常低，一般会随着时间变化漂移。为保证测量完整性，铂是明显的选择。

### 电阻测量

铂 RTD 的常用电阻值在 10 欧姆 (鸟笼模型) 到几千欧姆 (薄膜 RTD) 之间。一个最常用的值是 0°C 时 100 欧姆。铂线的 DIN 43760 标准温度系数是  $\alpha = .00385$ 。对 100 欧姆线，这与 0°C 时  $+0.385 \alpha / ^\circ\text{C}$  相对应。对  $\alpha$ ，这个值实际上是从 0°C 到 100°C 的平均斜率。在铂电阻标准中使用的化学纯度更高的铂线， $\alpha$  等于  $+0.00392$  欧姆/欧姆/°C。

图 39  
惠斯通电桥



斜率和绝对值都是很小的数值，特别是在引到传感器的测量线可能是几欧姆、甚至是几十欧姆时。小的引线阻抗可能会给温度测量导致明显的误差 (图 38)。

10 欧姆引线阻抗在我们的测量中相当于  $10 / 385 \alpha 26^\circ\text{C}$  的误差。即使引线的温度系数也可能导致可以测量的误差。为避免这个问题，典型的方法是使用电桥 (图 39)。

电桥输出电压间接表明了 RTD 电阻。电桥要求四条连接线、一个外部电源和三个温度系数为零的电阻器。为了避免三个电桥接通的电阻器使用与 RTD 相同的温度,使用一对延长线把 RTD 与电桥分开(图 40)。

这些延长线重建了我们一开始时遇到的问题:延长线的阻抗影响着温度的读数。通过使用三线电桥配置,可以使这种效应达到最小(图 41)。

如果线 A 和线 B 的长度完美匹配,其阻抗效应将抵消,因为接地是电桥的一个相反的腿。第三条线 C 作为传感线使用,不携带任何电流。

图 41 中所示的惠斯通电桥在电阻变化和电桥输出电压变化之间不会产生非线性关系。这使得 RTD 已经非线性的温度-电阻特点进一步复杂化,因为它要求额外的等式,把电桥输出电压转换成同等的 RTD 阻抗。

图 40

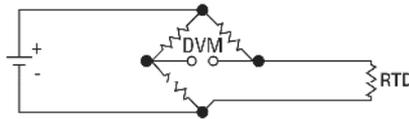
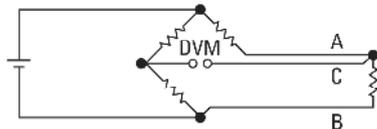


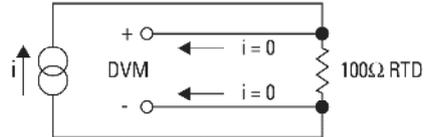
图 41  
3 线电桥



**4线欧姆**—使用电流电源及远程传感的数字电压表的技术,消除了与电桥有关的许多问题。由于没有电流流经电压传感线,在这些线中没有 IR 下跌,因此在测量中没有引线电阻误差。

DVM 读出的输出电压与 RTD 电阻直接成比例,因此只需一个转换公式。三个电桥接通的电阻器换上了一个参考电阻器。数字电压表仅测量 RTD 中下降的电压,对引线长度并不灵敏(图 42)。

图 42  
4 线欧姆  
测量



使用 4 线欧姆的唯一缺点是,我们需要在 3 线电桥之外使用另外一条延长线。如果我们担心的是温度测量的精度,那么这只是一个很小的代价。

### 电阻到温度转换

RTD 是一种线性度高于热电偶的器件,但它仍然要求曲线拟合。多年来,人们一直使用 Callendar-Van Dusen 方程式,近似确定 RTD 曲线<sup>11,13</sup>

$$R_T = R_0 + R_0 \alpha \left[ T - \delta \left( \frac{T}{100} \right)^{-1} \right] - \beta \left( \frac{T}{100} \right)^{-1} \left( \frac{T}{100} \right)^3$$

其中:

$R_T$  = 温度 T 时的电阻

$R_0$  = T = 0°C 时的电阻

$\alpha$  = T = 0°C 时的温度系数  
(典型 + 0.00392 Ω/Ω/°C)

$\delta$  = 1.49 (.00392 铂的典型值)

$\beta$  = 0 T > 0

0.11 (典型) T < 0

通过在四个温度上测试RTD，并对得到的方程式求解，可以确定系数  $\alpha$ ,  $\delta$  和  $\beta$  的确切值。1968年，用户熟悉的这个方程式被代之以20次幂多项式，以提供更准确的曲线拟合。这个方程式的示意图说明了RTD是线性度高于热电偶的一种器件(图43)。

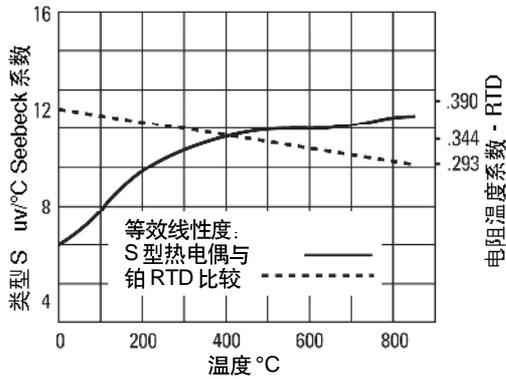
### 实践中的注意事项

适用于热电偶的注意事项同样适用于RTD，即使用屏蔽和双绞线，使用适当的铠装，避免压力和急剧梯度，使用大的延长线，保持良好的文档，使用集成DMM。此外，还应注意下述事项。

**结构**— 由于其结构，RTD有时要比热电偶更容易破碎，必须采取措施进行保护。

**自热**— 与热电偶不同的是，RTD不是自己供电。电流必须流经器件，提供可以测量的电压。电流在RTD内部导致焦耳( $I^2R$ )热量，改变其温度。这种自热会表现为测量误差。因此，必须注意电阻表提供的测量电流的幅度。在自由空气中，典型的自热误差值是每毫瓦 $1/2^\circ\text{C}$ 。很明显，浸入热传导介质中的

图43



#### 小型RTD

响应时间快  
热并联低  
自热误差高

#### 大型RTD

响应时间慢  
热并联差  
自热误差低

RTD将把焦耳热量分布给介质，因为自热导致的误差将比较小。在自由空气中每毫瓦提高 $1^\circ\text{C}$ 的同一个RTD，在以每秒一米速率流动的空气中，其每毫瓦将仅提高 $1/10^\circ\text{C}$ 。<sup>6</sup>

为降低自热误差，可以使用最小欧姆的、同时仍能提供要求的分辨率的测量电流，并使用最大的、仍能提供良好的响应时间的RTD。很明显，应该不会损害质量。

**热并联**— 热并联是通过插入一个测量传感器、改变测量温度的动作。与热电偶相比，热并联对RTD是一个更大的问题，因为RTD的物理体积要大于热电偶。

**热EMF**— 在测量RTD时，进行的铂-铜连接会导致热偏置电压。可以使用偏置补偿欧姆技术，消除这种效应。

## 热敏电阻器

与RTD一样，热敏电阻器也是一个对温度敏感的电阻器。热电偶是最通用的温度传感器，PRTD是最稳定的温度传感器，而热敏电阻器则应该用灵敏来描述。在三大类传感器中，热敏电阻器随着温度变化而参数变化最大。

热敏电阻器一般由半导体材料制成。尽管使用正的温度系数单位，但大多数热敏电阻器的温度系数(TC)是负的，也就是说，它们的电阻会随着温度上升而下降。负TC可以大到每摄氏度百分之几，允许热敏电阻器电路检测到温度中的细微变化，而在使用RTD或热电偶电路时，是不能观察到这种细小变化的。

为提高灵敏度，我们付出的代价是线性度下降。热敏电阻器是一种极度的非线性器件，高度依赖于流程参数。结果，制造商标准化热敏电阻器曲线的程度没有达到RTD和热电偶标准化的程度(图44)。

通过使用Steinhart-Hart方程式，可以非常近似地得到一条单独的热敏电阻器曲线：<sup>18</sup>

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3$$

其中：

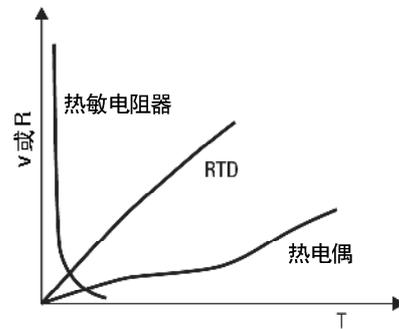
T = 开氏温标

R = 热敏电阻器的电阻

A,B,C = 曲线拟合常数

通过在公布的数据曲线上选择三个数据点，同时对三个方程式求解，可以得出A, B和C。在选择的数据点跨度不超过热敏电阻器温度范围额定中心内100°C时，这个方程式会接近相当明显的±0.2°C曲线拟合。

图44



通过比较简单的方程式，可以实现略快的电脑执行时间：

$$T = \frac{1}{(\ln R) - A} - C$$

其中仍可以选择三个(R,T)数据点，然后对三个同时得到的方程式求解，来得到A, B和C。必须在较窄的温度范围内使用这个方程式，以接近Steinhart-Hart方程式的精度。

### 测量

热敏电阻器的电阻系数高为其提供了明确的测量优势，它可能不会与RTD一样要求四线电阻测量。例如，在25°C时常用的热敏电阻器值是5000Ω。在4%/°C的典型TC时，10Ω的测量引线电阻只会产生.05°C的误差。这种误差要比同等的RTD误差小500倍。

**缺点 —** 由于它们是半导体，因此与RTD或热电偶相比，热敏电阻器在高温时更容易发生反校准。热敏电阻器一般仅限于用于几百摄氏度，制造商会警告说，即使还远远低于最大工作极限，但仍会导致热敏电阻器漂移出规定的容许误差。

热敏电阻器可以制造成非常小的规格，因此它们可以对温度变化迅速作出反应。这还意味着小的热质量使其特别容易发生自热误差。热敏电阻器比RTD或热电偶更容易破碎，必须小心安装，避免损坏或粘接处散开。

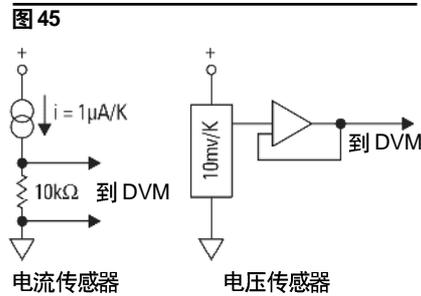
## 单调线性温度传感器

热电偶的创新技术是集成电路温度传感器，这分成电压输出和电流输出两种配置。这种配置都提供与绝对温度成线性比例的输出。典型值是 $1\ \mu\text{A}/\text{K}$ 和 $10\ \text{mV}/\text{K}$  F (图 45)。

某些集成传感器甚至以微处理器可以直接读取的数字输出格式表示温度。

除了提供与温度具有非常强的线性关系的输出外，这些集成电路传感器拥有与热敏电阻器相同的所有缺点。它们是半导体器件，因此温度范围有限。自热和易碎等问题同样也非常明显，另外它们也要求外部电源。

这些器件为产生与温度成比例的、容易读取的输出提供了一种方便的方式。热电偶参考联接硬件中提出了这种需求，事实上，这些器件正日益用于热电偶补偿。



## 测量系统

图 46 是实现热电偶参考联接的一种可行方法。箭头指向的是一个IC 传感器，用来进行软件热电偶补偿。

Agilent 34970A 固化软件中内置的转换程序接受 B, E, J, K, N, R, S 和 T 型热电偶, 2.2k $\Omega$ , 5k $\Omega$  和

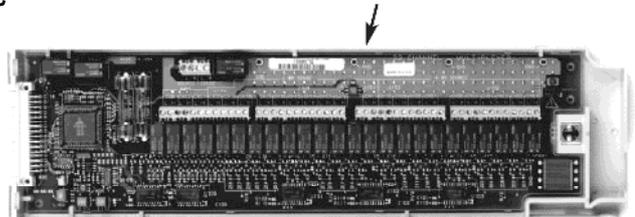
10k $\Omega$ 热敏电阻器, 以及各种RTD。结果直接用摄氏度、华氏度或开氏温度显示。

Agilent 34970A 数据采集系统包括本应用指南中提到的所有希望的功能:

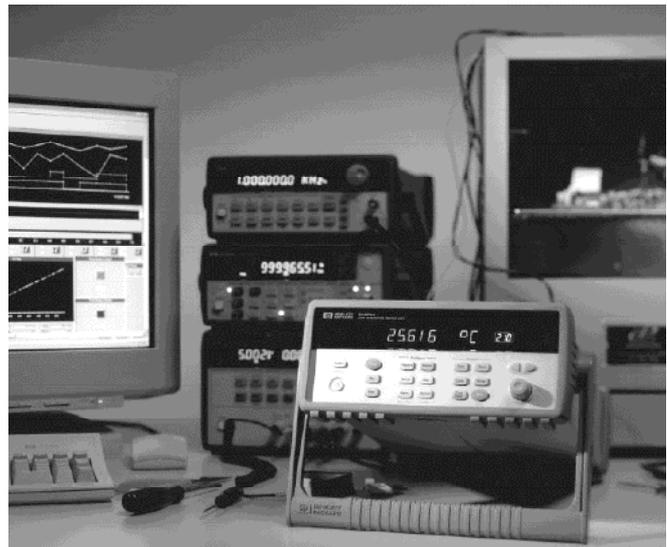
- 内置 6½ 位 DMM
- 集成模数转换器, 用来抑制噪声
- 使用内置热电偶参考联接进行低温扫描
- 开路热电偶检查
- 内置热电偶、热敏电阻器和 RTD 线性化程序, 符合 ITS-90 标准
- 四线欧姆功能, 支持偏移补偿
- 隔离输入, 最高可漂移到 300 V

Agilent 34970A 标准配备 RS-232 和 GPIB 接口、用于独立数据记录的 50,000 个读数的非易失性内存、及用于简便地进行基于 PC 的测试的 Agilent Benchlink Data Logger 软件。此外, 其灵活的三插槽结构可以简便地为变化的应用增加通道。

**图 46**  
Agilent 34970A  
数据采集 / 开关单元  
使用的通用多路  
复用器模块



**图 47**  
Agilent 34970A  
数据采集 / 开关单元



Agilent DAC1000 数据采集和控制系统(图48)是另一个解决方案,它在点数高的情况下提供了高速温度测量功能。在配置成温度测量时,它包括:

- E1419A 扫描模数转换器(ADC)模块,带有64条通道,可以配置成温度测量。扫描速率是每秒56,000条通道。通过使用多个模块,可以实现几百条通道配置。
- 信号调节插件(SCP),骑在ADC模块的背上,为热电偶提供输入。
- 外部端子块,带有内置热电偶参考联接和到应用的端子连接。
- 四线欧姆 SCP,支持偏移补偿,进行RTD和热敏电阻器测量。
- 内置工程设计单元转换,进行热电偶、热敏电阻器和RTD测量。

**图48**  
**Agilent DAC1000**  
**系统**



这种基于VXI的系统提供的功能远不止于温度测量。它提供了机电产品设计人员及需要严格地监测和控制物理流程的制造商要求的各种模拟/数字输入和输出功能。DAC1000是推荐的配置,包括E1419A、6插槽VXI主机、GPIB接口和用于PC的Agilent VEE。Agilent VEE是一种强大的、节约时间的图形编程语言,可以通过连接大量的图标或对象,重组方框图,来进行编程。

Agilent VEE提供了数据收集、测试报告和友好的图形用户界面。

安捷伦还为温度测量提供其它基于VXI的解决方案。可供选择的产品从用于便携式或远程操作的小型紧凑的系统,到提供高级控制和分析功能的高速扫描系统。

## 摘要

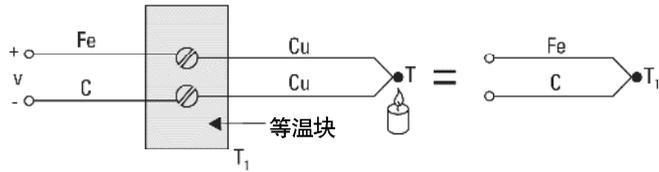
可靠的温度测量要求在选择和使用传感器、以及选择适当的测量系统中要特别注意。通过适当地注意自热、热并联、传感器反校准、各种指标和噪声抑制等事项，即使最复杂的温度监测项目，也将产生可重复的、可靠的数据。当前的数据采集系统可以有效地处理这种负担，允许我们把精力放在有意义的测试结果上。

## 附录 A

### 热电偶的经验法则<sup>2</sup>

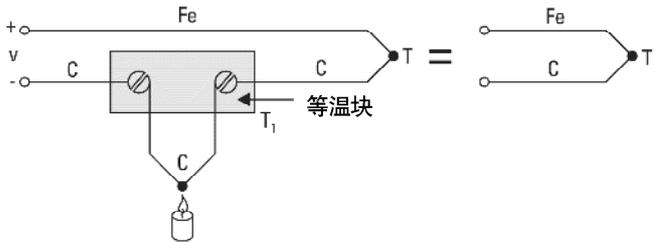
下面的实例说明了热电偶根据经验推导得出的法则，这些法则有助于理解和诊断热电偶电路。

#### 临时金属法则



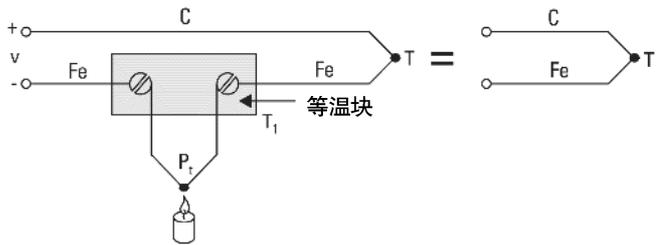
不管铜线的温度是多少，在铁和铜镍合金引线之间插入铜线，将不会改变输出电压 $V$ 。电压 $V$ 是Fe-C热电偶在温度 $T_1$ 时的电压。

#### 内部温度法则



输出电压 $V$ 将是Fe-C热电偶在温度 $T$ 时的电压，而不管测量线使用的外部热源是什么。

#### 插入的金属法则



电压 $V$ 是Fe-C热电偶在温度 $T$ 时的电压，前提是铂线两端的温度相同。铂线产生的两个热电偶(Fe-Pt和Pt-Fe)动作相反。

所有上述实例都假设测量线类型相同，即没有瑕疵和不纯的问题。

## 附录 B

### 热电偶特点

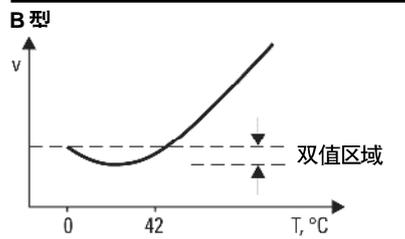
近几年来，业内已经开发了某些成对的热电偶合金，解决独特的测量问题。这里讨论了比较常见的热电偶的特质。

我们将使用“标准导线误差”，指代每年ASTM标准手册中出版的常用商用规范。它表示实际热电偶输出电压与NIST专论175中的表格预测的电压之间的允许差值。

**贵金属热电偶**——贵金属热电偶包括类型B、R和S，都是铂或铂铑热电偶，因此具有许多相同的特点。

**扩散**——在高温时的金属蒸汽扩散可能会改变铂线校准，因此仅应在非金属铠装内部使用铂线，如高纯度氧化铝。这一规则的一个例外是由铂制成的铠装，这一选项异常昂贵。

**稳定性**——到目前为止，基于铂的热电偶是所有常用的热电偶中最稳定的热电偶。S型非常稳定，因此被指定为铈点(630.74°C)和金点(1064.43°C)之间的温度校准标准。



**B型**——B型热电偶是唯一具有模糊的两个值的常用热电偶。

由于双值曲线和低温时超低Seebeck系数，B型在50°C以下时几乎没有用处。由于从0°C到42°C的输出接近零，B型具有一个独特的优势是，只要位于0°和40°C之间，参考联接温度几乎无关轻重。当然，测量联接温度一般非常高。

### 基本金属热电偶

与贵金属热电偶不同，基本金属热电偶没有规定的化学成分。可以使用多种金属的任意组合，这导致电压与温度关系拟合曲线落在标准导线误差范围之内。这会得到某些相当有趣的金属组合。例如，铜镍合金根本不是一种具体的金属合金，而是整个系列铜镍合金的通用名称。难以置信的是，T型(铜-铜镍合金)热电偶中使用的铜镍合金与J型(铁-铜镍合金)热电偶中使用的铜镍合金不同。<sup>3</sup>

**E型**——尽管没有规定低于0°C时的E型标准线误差，由于其高Seebeck系数(58 V/°C)、低热传导系数和抗腐蚀能力，E型热电偶特别适合低温测量。

E型的Seebeck系列高于所有其它标准热电偶，可以用来检测小的温度变化。

**J型**——铁作为J型热电偶中的正极元素，是一种价格低廉、很少以纯粹方式制造的金属。J型热电偶的一致性特点较差，因为铁的纯度不够。即便如此，J型热电偶仍非常流行，因为其Seebeck系数高、而且价格低。

在温度超过760°C时，即使在恢复较低温度时，仍可能会导致突然的磁性转换，因此在温度超过760°C时不能使用J型热电偶。

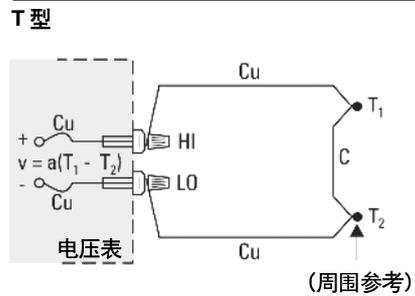
**T型** — 这是唯一对低于0°C的温度区域公布了标准线误差的热电偶；但是，E型实际上更适合超低温，因为它的Seebeck系数较高、热传导系数较低。

T型具有一个独特的特点是有一条铜线。这在希望温差的专用监测环境中可能是一个优势。

T型热电偶的优点在于，铜热电偶线采用的金属与DVM端子相同，因此不必进行导线补偿。

**K型和N型** — K型长期来一直是一个流行的热电偶。由于耐氧化，它特别适合温度较高的应用。

N型热电偶有代替K型热电偶的流行趋势。它的输出略低于K型(N型的Seebeck系数较小)，但耐氧化的能力更高。N型热电偶输出曲线取决于线号，在NIST专论175中公布了两种不同的Nicrosil-Nisil特点曲线，其区别在于线号和温度范围上。<sup>14</sup>



**钨** — 有三种常用类型的钨热电偶。所有都是钨和铼的合金，使得这种金属的柔韧性更高。

G型\* W与W-26% Re

C型\* W-5% Re与W-26% Re

D型\* W-3% Re与W-25% Re

钨热电偶用来测量真空管或惰性气体中的超高温。

\* 不是ANSI符号。

## 热电偶硬件



类型	金属		标准 美国色码		$\Omega$ / 双足 @20°C 20号	Seebeck 系数 ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )@T(°C)		导线误差, °C			NIST 规定的 材料范围? (°C)
	+	-	+	-		量程	标准	专用			
B	铂- 30%铱	铂- 6%铱	灰色	红色	0.22	5.96	600	870 - 1700	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.25\%$	0 - 1820
E	镍- 10%铬	铜镍合金	紫色	红色	0.71	58.67	0	0 - 900	$\pm 1.7$ 或 $\pm 0.5\%$	$\pm 1$ 或 $\pm 0.4\%$	-270 到 1000
J	铁	铜镍合金	白色	红色	0.36	50.38	0	0 - 750	$\pm 2.2$ 或 $\pm 0.75\%$	$\pm 1.1$ 或 $\pm 0.4\%$	-210 到 1200
K	镍- 10%铬	镍	黄色	红色	0.59	39.45	0	0 - 1250	$\pm 2.2$ 或 $\pm 0.75\%$	$\pm 1.1$ 或 $\pm 0.4\%$	-270 到 1372
N	镍铬硅 铸铁	镍铬硅 铸铁	橙色	红色	0.78	25.93	0	0 到 1250	$\pm 2.2$ 或 $\pm 0.75\%$	$\pm 1.1$ 或 $\pm 0.4\%$	-270 到 1300
R	铂- 13%铱	铂	黑色	红色	0.19	11.36	600	0 到 1450	$\pm 1.5$ 或 $\pm 0.25\%$	$\pm 0.6$ 或 $\pm 0.1\%$	-50 到 1768
S	铂- 10%铱	铂	黑色	红色	0.19	10.21	600	0 到 1450	$\pm 1.5$ 或 $\pm 0.25\%$	$\pm 0.6$ 或 $\pm 0.1\%$	-50 到 1768
T	铜	铜镍合金	蓝色	红色	0.30	38.75	0	0 到 350	$\pm 1$ 或 $\pm 0.75\%$	$\pm 0.5$ 或 $\pm 0.4\%$	-270 到 400

† 材料范围适用于8号线，随着线号下降而下降。

## 参考资料

1. Charles Herzfeld, F.G. Brickwedde: Temperature - Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 3, Part 1, Reinhold, New York, 1962.
2. Robert P. Benedict: Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.
3. Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, Fourth Edition, Revision of ASTM Special Publication 470B, Philadelphia, PA., 1993.
4. Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90, NIST Monograph 175, National Institute of Standards and Technology, Washington, D.C., 1993
5. H. Dean Baker, E.A. Ryder, N.H. Baker: Temperature Measurement in Engineering, Omega Press, Division of Omega Engineering Inc.
6. Temperature Measurement Handbook 1983, Omega Engineering, Stamford, Connecticut, 06907.
7. R.L. Anderson: Accuracy of Small Diameter Sheathed Thermocouples for the Core Flow Test Loop, Oak Ridge National Laboratories, ORNL-5401, (available from National Information Service), April, 1979.
8. R.P. Reed: Branched Thermocouple Circuits in Underground Coal Gasification Experiments, Proceedings of the 22nd ISA International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America, 1976.
9. R.J. Moffat: The Gradient Approach to Thermocouple Circuitry, from Temperature - Its Measurement and Control in Science and Industry, Reinhold, New York, 1962.
10. R.P. Reed: A Diagnostics-oriented System for Thermocouple Thermometry, Proceedings of 24th ISA International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America, 1978.
11. Harry R. Norton: Handbook of Transducers for Electronic Measuring Systems, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
12. C.H. Meyers: Coiled Filament Resistance Thermometers, NBS Journal of Research, Vol. 9, 1932.
13. Bulletin 9612, Rev. B: Platinum Resistance Temperature Sensors, Rosemount Engineering Co., 1962.
14. Burley, Powell, Burns, & Scroger: The Nicrosil vs. Nisil Thermocouple: Properties and Thermoelectric Reference Data, NBS Monograph 161, U.S. Dept. Of Commerce, Washington, D.C., 1978.
15. J.P. Tavener: Platinum Resistance Temperature Detectors - State of the Art, Measurements & Control, Measurements & Data Corporation, Pittsburgh, PA., April 1974.
16. J.P. Evans and G.W. Burns: A Study of Stability of High Temperature Platinum Resistance Thermometers, in Temperature - Its Measurement and Control on Science and Industry, Reinhold, New York, 1962.
17. D.D. Pollock: The Theory and Properties of Thermocouple Elements, ASTM STP 492, Omega Press, Ithaca, New York, 1979.
18. YSI Precision Thermistor, Yellow Springs Instruments, Inc., Yellow Springs, Ohio, 1977.
19. R.P. Reed: Thermoelectric Thermometry. A Functional Model, from Temperature - Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 5, American Institute of Physics, N.Y. 1982.

## 安捷伦科技测试和测量技术支持、服务和协助

安捷伦科技有限公司的宗旨是使您获得最大效益,而同时把您的风险和问题减到最小。我们努力保证您获得的测试和测量能力物有所值,并得到所需要的支持。我们广泛的技术支持和服务能够帮助选择正确的安捷伦产品,并在应用中获得成功。我们销售的每一类仪器和系统都提供全球保修服务。对于停产的产品,在5年内均可享受技术服务。“我们的承诺”和“用户至上”这两个理念高度概括了安捷伦公司的整个技术支持策略。

## 我们的承诺

我们的承诺意味着安捷伦测试和测量设备将符合其广告宣传的性能和功能。在您选择新设备时,我们将向您提供产品信息,包括切合实际的性能指标和资深测试工程师提供的实用建议。在您使用安捷伦设备时,我们可以验证这些设备的工作正常,帮助产品投入生产,及要求对一些特别的功能免费提供基本的测量协助。此外,我们还提供许多自助工具。

## 用户至上

用户至上意味着安捷伦公司可以提供大量的专门测试和测量服务,您可以根据自己的独特技术和商务需要来获得这些服务。通过与我们联系取得有关校准、有偿升级、超过保修期的维修、现场讲解和培训、设计和系统组建、工程计划管理和其它专业服务,使用户能够有效地解决问题,并取得竞争优势。安捷伦遍布全球的资深工程师和技术人员能够帮助您最大限度地提高生产效率,使您在安捷伦仪器和系统中的投资有最佳回报,并在产品的整个生命周期内获得可靠的测量精度。

您可以通过互联网、电话或传真,获得与所有测试测量需求有关的协助。

网上支持:

[www.agilent.com/find/assist](http://www.agilent.com/find/assist)

### 安捷伦科技有限公司总部

地址: 北京市朝阳区建国路乙118号  
招商局中心4号楼京汇大厦16层  
电话: 800-810-0189  
(010) 65647888  
传真: (010) 65647666  
邮编: 100022

### 上海分公司

地址: 上海淮海中路887号  
永新大厦12层  
电话: (021) 64745500  
传真: (021) 64748523  
邮编: 200020

### 广州分公司

地址: 广州市天河北路233号  
中信广场66层07-08室  
电话: (020) 86685500  
传真: (020) 86695074  
邮编: 510613

### 成都分公司

地址: 成都市大业路39号  
大业大厦22楼  
电话: (028) 86655500  
传真: (028) 86674321  
邮编: 610016

### 深圳办事处

地址: 深圳市深南东路5002号  
信兴广场地王商业中心  
4912-4915室  
电话: (0755) 82465500  
传真: (0755) 82460880  
邮编: 518008

### 西安办事处

地址: 西安市科技二路68号  
西安软件园A106室  
电话: (029)7669812  
(029)7669811  
传真: (029)7669810  
邮编: 710075

### 安捷伦科技香港有限公司

地址: 香港太古城英皇道1111号  
太古城中心1座24楼  
电话: (852) 31977777  
传真: (852) 25069256



## 安捷伦电子期刊

[www.agilent.com/find/emailupdates](http://www.agilent.com/find/emailupdates)

得到您所选择的产品和应用的最新信息。

本文中的产品规范和说明如有变更,恕不另行通告。

5965-7822CHA

2003年11月 印于北京



Agilent Technologies