

第 6 章 热电式传感器

热电式传感器是一种将温度的变化转换为电量变化的装置。它利用传感元件的电磁参数随温度变化的特性来达到测量的目的。温度是与人类生活息息相关的物理量，工业、农业、商业、科研、国防、医学及环保等部门都与温度有着密切的关系。在工业生产自动化流程中，温度测量要占全部测量的一半左右。热电式传感器是实现温度检测和控制的重要器件。在种类繁多的传感器中，测量温度用的热电式传感器是应用最广泛、发展最快的传感器之一。

热电式传感器所基于的物理原理主要有：热电效应、热阻效应、热辐射、介电常数和磁导率随温度变化等。其中利用热电效应将温度转换为电势变化的热电式传感器称为热电偶，利用热阻效应将温度转换为金属或半导体材料的电阻变化的热电式传感器称为热电阻或热敏电阻。另外，还有利用半导体 PN 结与温度的关系制成的 PN 结型温度传感器，利用热辐射原理制成的辐射高温计等。

热电式传感器发展的主要方向是朝着提高传感器的精度和可靠性，降低成本，扩大测温范围(包括超高温与超低温的测量)，扩展和完善管缆热电偶与热敏电阻，发展薄膜热电偶，研究节约贵重金属的热电阻，研制系列晶体管测温元件和快速高灵敏的热电偶以及各类非接触式温度传感器，发展数字化、集成化和自动化的温度传感器。

通过本章的学习，要求了解热电式温度传感器的作用、地位、分类和发展趋势，掌握热电偶定律及相关计算，掌握热敏电阻不同类型的特点及应用场合，掌握集成温度传感器的使用方法，了解其他温度传感器的工作原理。

6.1 热 电 偶

热电偶是目前温度测量中使用最普遍的传感元件之一。它具有结构简单，测量范围宽，精确度高，热惯性小，输出信号为电信号，便于远距离传输或信号转换等优点。另外，由于热电偶是一种有源传感器，测量时不需外加电源，使用十分方便，所以常被用于测量炉子、管道内的气体或液体的温度及固体的表面温度。微型热电偶还可用于快速及动态温度的测量。

6.1.1 热电偶的工作原理

1. 热电效应

把两种不同的导体或半导体 A 和 B 组合成如图 6-1(a)所示的闭合回路，只要两接点处的

温度不同,一端(称为工作端或热端)温度为 T , 另一端(称为自由端,也称参考端或冷端)温度为 T_0 , 在闭合回路中就会有电流产生。如果在回路中接入电流计 M , 电流计的指针就会发生偏转,如图 6-1(b)所示,这种现象称为**热电效应**,产生的电动势则称为**热电动势**(或**热电势**),用 $E_{AB}(T, T_0)$ 表示。两种导体组成的回路称为**热电偶**,这两种导体 A 和 B 称为**热电极**。这种现象是在 1821 年由德国物理学家赛贝克(T. Seebeck)发现的,所以又称为**赛贝克效应**。

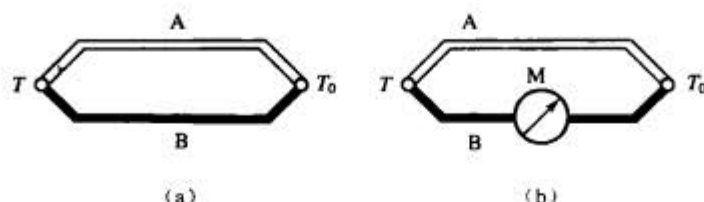


图 6-1 热电效应

由理论分析知道,回路中所产生的热电动势由两部分组成,一部分是两种导体的接触电动势,另一部分是单一导体的温差电动势。

(1) 接触电动势

由于所有的金属都具有自由电子,而且在不同的金属中自由电子的密度不同,因此当两种不同材料的金属 A 和 B 接触时,由于两者内部单位体积的自由电子数目不同(即电子密度不同),电子在两个方向上扩散的速率就不一样。现假设导体 A 的自由电子密度大于导体 B 的自由电子密度,则导体 A 扩散到导体 B 的电子数要比导体 B 扩散到导体 A 的电子数多。所以导体 A 失去电子而带正电荷,导体 B 得到电子而带负电荷。于是,在 A 、 B 两导体的接触界面上便形成了一个由 A 到 B 的电场 E ,如图 6-2 所示。该电场将引起反方向的电子转移,阻碍扩散作用的继续进行。当扩散作用与阻碍扩散作用相等时,即自导体 A 扩散到导体 B 的自由电子数与在电场作用下自导体 B 到导体 A 的自由电子数相等时,便处于一种动态平衡状态。在这种状态下, A 与 B 两导体的接触处就产生了电位差,称为**接触电动势**。

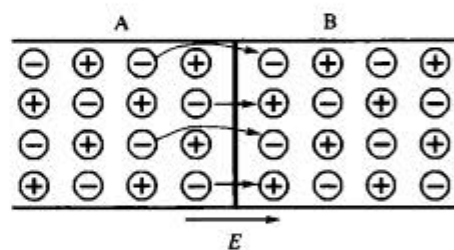


图 6-2 接触电动势原理图

接触电动势的大小与两种金属的材料、接点的温度有关,与导体的直径、长度及几何形状无关。对于温度为 T 的接点,有下列接触电动势公式

$$e_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B} \quad (6-1)$$

式中: $e_{AB}(T)$ 为导体 A 、 B 接点在温度为 T 时形成的接触电动势;

e 为电子电荷电量, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$;

k 为波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

N_A 、 N_B 为导体 A 、 B 在温度为 T 时的电子密度。

(6-1)式说明接触电动势的大小与接点温度的高低及导体中的电子密度有关。

(2) 温差电动势

将导体 A (或 B) 的两端分别置于不同的温度场 T 、 T_0 ($T > T_0$) 中,在导体内部,由于

热端的自由电子具有较大的动能, 所以导体内部自由电子的运动总体上是由热端向冷端移动, 使热端失去电子而带正电荷, 冷端得到电子而带负电荷。这样, 导体两端便产生了一个由热端指向冷端的静电场。该电场阻止电子从热端向冷端继续移动, 并使电子反方向移动, 最后也达到了动态平衡状态, 导体两端便形成了恒定的电位差, 我们将该电位差称为温差电动势, 也称汤姆森电动势, 如图 6-3 所示。温差电动势的大小取决于导体的材料及两端的温度, 导体 A 两端的温差电动势可用下式表示:

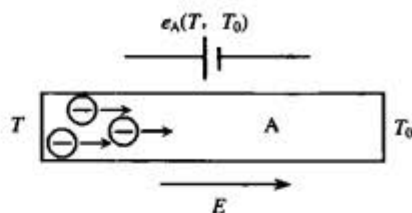


图 6-3 温差电动势原理图

$$e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT \quad (6-2)$$

式中: $e_A(T, T_0)$ 为导体 A 两端温度分别为 T 、 T_0 时形成的温差电动势;

T 、 T_0 为高、低温端的热力学温度;

σ_A 为汤姆逊系数, 表示导体 A 两端的温度差为 1°C 时所产生的温差电动势, 例如在 0°C 时, 铜的 $\sigma = 2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

同样, 导体 B 两端的温差电动势如下式所示:

$$e_B(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_B dT \quad (6-3)$$

(3) 回路总电动势

综上所述, 若导体 A 和 B 首尾相接组成回路, 如果导体 A 的电子密度大于导体 B 的电子密度, 且两接点的温度不相等 ($T > T_0$), 则在热电偶回路中存在着四个电动势: 两个接触电动势和两个温差电动势, 如图 6-4 所示。它们分别是:

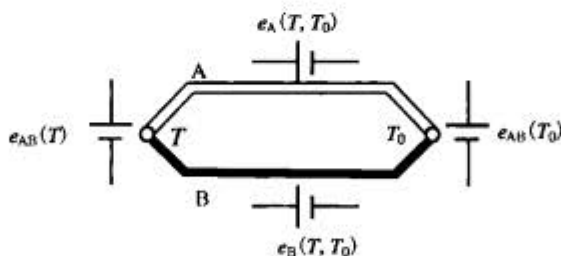


图 6-4 闭合回路总的热电动势

- ① 金属 A 和金属 B 的一个接点在温度为 T 的一端产生的接触电动势 $e_{AB}(T)$,

$$e_{AB}(T) = U_{AT} - U_{BT} \quad (\text{设 A 的电子密度大于 B 的})$$

式中: U_{AT} 、 U_{BT} 分别为金属 A 和 B 在温度为 T 的一端的电势。

- ② 金属 A 和金属 B 的另一个接点在温度为 T_0 的一端产生的接触电动势 $e_{AB}(T_0)$,

$$e_{AB}(T_0) = U_{AT_0} - U_{BT_0} \quad (\text{设 A 的电子密度大于 B 的})$$

式中: U_{AT_0} 、 U_{BT_0} 分别为金属 A 和 B 在温度为 T_0 的一端的电势。

- ③ 金属 A 两端温度为 T 、 T_0 时, 形成的温差电动势 $e_A(T, T_0)$,

$$e_A(T, T_0) = U'_{AT} - U'_{AT_0} \quad (\text{设 } T > T_0)$$

- ④ 金属 B 两端温度为 T 、 T_0 时, 形成的温差电动势 $e_B(T, T_0)$,

$$e_B(T, T_0) = U'_{BT} - U'_{BT_0} \quad (\text{设 } T > T_0)$$

因此, 在整个闭合回路中总的热电动势 $E_{AB}(T, T_0)$ 为

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= [e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0)] + [e_B(T, T_0) - e_A(T, T_0)] \\ &= \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{N_{AT_0}}{N_{BT_0}} + \int_{T_0}^T (\sigma_B - \sigma_A) dT \end{aligned} \quad (6-4)$$

式中: N_{AT} 、 N_{BT} 为金属 A 和 B 分别在温度为 T 的一端的电子密度;

N_{AT_0} 、 N_{BT_0} 为金属 A 和 B 分别在温度为 T_0 的一端的电子密度;

σ_A 、 σ_B 为金属 A 和 B 的汤姆逊系数。

由于在金属中自由电子数目很多, 温度对自由电子密度的影响很小, 这就使得:

① 金属 A 或 B 在温度为 T 和 T_0 的两端的电子密度近似相等;

② 因为温差电动势是由同一种金属两端温度不同导致两端的电子密度不同而产生的, 既然金属两端的电子密度近似相等, 故温差电动势可以忽略不计, 在热电偶回路中起主要作用的是接触电动势。

把 N_{AT} 或 N_{AT_0} 记作 N_A , N_{BT} 或 N_{BT_0} 记作 N_B , 则(6-4)式可以写成

$$E_{AB}(T, T_0) \approx e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) = \frac{k}{e} (T - T_0) \ln \frac{N_A}{N_B} \quad (6-5)$$

上式中, 由于我们假设导体 A 的电子密度大于导体 B 的电子密度, 所以 A 为正极, B 为负极。下标 AB 的顺序表示电动势的方向。当改变下标的顺序时, 电动势前面的符号(指正、负号)也应随之改变。故上式也可以写成

$$E_{AB}(T, T_0) \approx e_{AB}(T) + e_{BA}(T_0)$$

从(6-5)式可以看出, 热电偶回路总的热电动势是 T 和 T_0 的函数差, 实际使用起来很不方便。为此, 在标定热电偶时, 一般使 T_0 为常数, 即

$$e_{AB}(T_0) = f(T_0) = C \quad (\text{常数})$$

则(6-5)式可以改写成

$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) = e_{AB}(T_0) - f(T_0) = f(T) - C \quad (6-6)$$

上式表明, 当热电偶回路的一个端点(冷端)保持温度不变时, 热电偶回路总的热电动势 $E_{AB}(T, T_0)$ 只随另一个端点(热端)的温度的变化而变化。这样, 回路总的热电动势就可以看成 T 的函数。

对于各种不同金属组成的热电偶, 温度与热电动势的函数关系是不一样的。在工程应用中, 常用实验的方法得出不同热电偶的温度与热电动势的关系, 并做成表格或绘成如图 6-5 所示的曲线, 以供备查。图中 E 代表镍铬-铜镍热电偶, K 代表镍铬-镍硅热电偶, S 代表铂铑₁₀-铂热电偶。

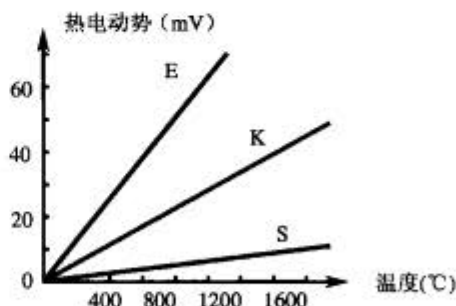


图 6-5 几种型号热电偶的热电动势与温度的关系

2. 热电偶基本性质

分析(6-5)式、(6-6)式, 可以总结出热电偶有以下基本性质。

① 热电偶回路的热电动势只与组成热电偶的材料及两端接点的温度有关, 与热电偶的

长度、粗细、形状无关。

② 只有用不同性质的材料才能组合成热电偶, 相同材料不会产生热电动势。因为当 A、B 两种导体是同一种材料时, $\ln(N_A/N_B) = 0$, 所以 $E_{AB}(T, T_0) = 0$ 。

③ 只有当热电偶两端温度不同时, 不同材料组成的热电偶才能有热电动势产生。当热电偶两端温度相同时, 不同材料组成的热电偶也不产生热电动势, 即 $E_{AB}(T, T_0) = 0$ 。

④ 导体材料确定后, 热电动势的大小只与热电偶两端的温度有关。如果使 $e_{AB}(T_0) = \text{常数}$, 则回路热电动势 $E_{AB}(T, T_0)$ 就只与温度 T 有关, 而且是 T 的单值函数, 这就是利用热电偶测温的基本原理。

⑤ 对于由几种不同材料串联组成的闭合回路, 若各接点温度分别为 $T_1, T_2, \dots, T_N$, 闭合回路总的热电动势为

$$E_{AB \dots N} = e_{AB}(T_1) + e_{BC}(T_2) + \dots + e_{NA}(T_N) \quad (6-7)$$

3. 热电偶基本定律

(1) 均质导体定律

如果热电偶回路中的两个热电极材料相同, 无论两接点的温度如何, 热电动势均为零; 反之, 如果有热电动势产生, 两个热电极的材料则一定是不同的。

根据这一定律, 可以检验两个热电极材料的成分是否相同(称为同名极检验法), 也可以检查热电极材料的均匀性。

(2) 中间导体定律

若在热电偶回路中接入第三种导体, 只要第三种导体的两接点温度相同, 则回路中总的热电动势不变。

证明: 如果按如图 6-6 (a) 所示的方式, 在导体 A、B 组成的热电偶回路中接入第三种导体 C, 设导体 A 与 B 接点处的温度为 T , A 与 C、B 与 C 两接点处的温度相同, 都是 T_0 , 根据(6-7)式, 回路中的总电动势为

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) \quad (6-8)$$

如果回路中三个接点的温度都相同, 即 $T = T_0$, 则回路总电动势必为零, 即

$$e_{AB}(T_0) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) = 0$$

即

$$e_{AB}(T_0) = -e_{BC}(T_0) - e_{CA}(T_0) \quad (6-9)$$

将(6-9)式代入(6-8)式, 可得

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) = E_{AB}(T, T_0) \quad (6-10)$$

如果按图 6-6 (b) 所示的方式, 在导体 A、B 组成的热电偶回路中接入第三种导体 C, 设导体 A 与 B 两个接点处的温度分别为 T, T_0 , A 与 C 的两个接点处的温度相同, 都为 T_1 , 根据(6-7)式, 回路中的总电动势为

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_{BA}(T_0) + e_{AC}(T_1) + e_{CA}(T_1) \quad (6-11)$$

由于

$$e_{AC}(T_1) = -e_{CA}(T_1)$$

所以(6-11)式可写成

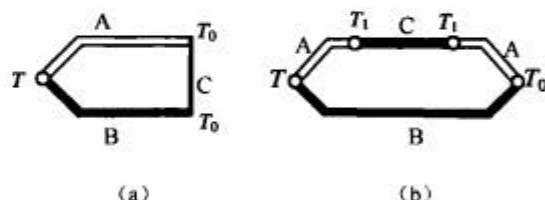


图 6-6 热电偶中加入第三种材料

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_{BA}(T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) = E_{AB}(T, T_0) \quad (6-12)$$

由(6-10)式、(6-12)式可知：在热电偶的任何一个位置，接入用第三种导体引入的测量仪表，只要两个接入点的温度相同，则回路的总热电动势是不变的。

热电偶的这种性质在实用上有着重要的意义，它使我们可以方便地在回路中直接接入各种类型的显示仪表或调节器，也可以将热电偶的两端不焊接而直接插入液态金属中或直接焊在金属表面进行温度测量。

(3) 标准电极定律

如果两种导体分别与第三种导体组成的热电偶所产生的热电动势已知，则由这两种导体组成的热电偶所产生的热电动势也就可知。

如图 6-7 所示，若导体 A、B 分别与导体 C 组成热电偶，其接点温度都是一端为 T ，另一端为 T_0 ，如果它们所产生的热电动势为已知，即

$$E_{AC}(T, T_0) = e_{AC}(T) - e_{AC}(T_0)$$

$$E_{BC}(T, T_0) = e_{BC}(T) - e_{BC}(T_0)$$

两式相减得

$$\begin{aligned} E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0) &= e_{AC}(T) - e_{AC}(T_0) - e_{BC}(T) + e_{BC}(T_0) \\ &= [e_{AC}(T) - e_{BC}(T)] - [e_{AC}(T_0) - e_{BC}(T_0)] \end{aligned} \quad (6-13)$$

由热电偶基本性质③和基本性质⑤可知，若一个热电偶由 A、B、C 三种导体组成，如果回路中三个接点的温度都相同，则回路总电动势必为零，即

$$e_{AC}(T) + e_{CB}(T) + e_{BA}(T) = 0$$

$$e_{AC}(T_0) + e_{CB}(T_0) + e_{BA}(T_0) = 0$$

或

$$e_{AC}(T) - e_{BC}(T) = e_{AB}(T)$$

$$e_{AC}(T_0) - e_{BC}(T_0) = e_{AB}(T_0)$$

代入(6-13)式可得

$$\begin{aligned} E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0) &= [e_{AC}(T) - e_{BC}(T)] - [e_{AC}(T_0) - e_{BC}(T_0)] \\ &= e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \\ &= E_{AB}(T, T_0) \end{aligned} \quad (6-14)$$

即导体 A 与 B 组成的热电偶的热电动势也可知。故导体 C 通常被称作标准电极。

标准电极定律是一个极为实用的定律。因为可以制作热电极的金属或合金的种类非常多，要得出这些金属(或合金，或金属与合金)之间组合而成的热电偶的热电动势，其工作量是非常巨大的。由于铂的物理、化学性质稳定，熔点高，易提纯，所以，我们通常选用高纯铂丝作为标准电极，只要测得各种材料与纯铂组成的热电偶的热电动势，则各种材料相互组合而成的热电偶的热电动势即可根据(6-14)式直接计算出来。

例 6-1 热端为 100°C 、冷端为 0°C 时，镍铬合金与纯铂组成的热电偶的热电动势为 2.95mV ，而考铜与纯铂组成的热电偶的热电动势为 -4.0mV ，求镍铬和考铜组合而成的热电偶所产生的热电动势。

解：由标准电极定律可知，镍铬和考铜组成的热电偶所产生的热电动势应等于镍铬合金

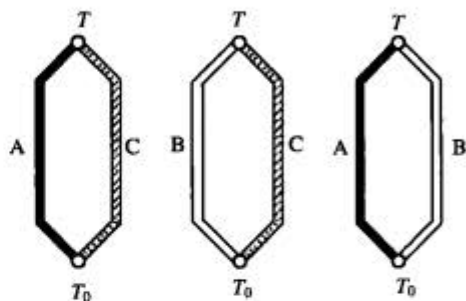


图 6-7 三种材料组成的三个热电偶

与纯铂组成的热电偶的热电动势和考铜与纯铂组成的热电偶的热电动势的差, 即

$$2.95\text{mV} - (-4.0\text{mV}) = 6.95\text{mV}$$

(4) 中间温度定律

热电偶在两接点温度分别为 T 、 T_0 时的热电动势等于该热电偶在接点温度分别为 T 、 T_n 和接点温度分别为 T_n 、 T_0 时的相应热电动势的代数和。

证明:

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0) &= [e_{AB}(T) - e_{AB}(T_n)] + [e_{AB}(T_n) - e_{AB}(T_0)] \\ &= e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \\ &= E_{AB}(T, T_0) \end{aligned}$$

$$\text{即} \quad E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0) \quad (6-15)$$

中间温度定律为冷端温度不是 0°C 时的热电偶制定分度表提供了依据。

因为当 $T_n = 0^\circ\text{C}$ 时, (6-15) 式可写成

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= E_{AB}(T, 0) + E_{AB}(0, T_0) \\ &= E_{AB}(T, 0) - E_{AB}(T_0, 0) \end{aligned}$$

上式说明: 只要 A、B 组成的热电偶在冷端温度为 0°C 时的热电动势-温度关系已知, 则它在冷端温度不为 0°C 时的热电动势即可知。

中间温度定律还为补偿导线的使用提供了理论依据。由于热电偶的长度一般只有 1m 左右, 在实际测量中, 需要将热电偶的电动势传输到远距离的显示和控制仪表, 因而必须将电极延伸。中间温度定律表明: 当在原来热电偶回路中分别引入与导体材料 A、B 相同热电特性的材料 C、D (见图 6-8), 即引入所谓补偿导线时, 只要它们之间连接的两点温度相同, 则总回路的热电动势与两连接点温度无关, 只与热电偶两端的温度有关。

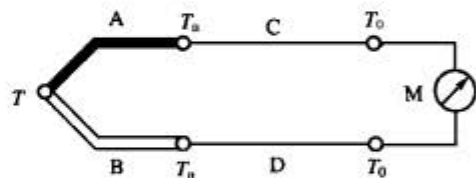


图 6-8 热电偶补偿导线接线图

由于 A 与 C、B 与 D 的热电特性相同, 由热电偶的基本性质可知: $e_{AC}(T_n) = e_{BD}(T_n) = 0$, 则回路总电动势为

$$\begin{aligned} E &= e_{AB}(T) + e_{BD}(T_n) + e_{DC}(T_0) + e_{CA}(T_n) \\ &= e_{AB}(T) + e_{DC}(T_0) = e_{AB}(T) + e_{BA}(T_0) = E_{AB}(T, T_0) \end{aligned}$$

上式说明: 接入补偿导线后, A、B 组成的热电偶的热电动势不变。

6.1.2 常用热电偶的结构

1. 普通工业用装配式热电偶

普通工业用装配式热电偶作为测量温度的变送器, 通常和显示仪表、记录仪表和电子调节器配套使用。它可以直接测量各种生产过程中 $0 \sim 1800^\circ\text{C}$ 范围的液体、蒸汽和气体介质以及固体的表面温度。热电偶通常由热电极、绝缘套管、保护套管和接线盒等几个主要部件组成, 其常见外形结构如图 6-9 所示。实验室使用时, 也可不装保护套管, 以减小热惯性。

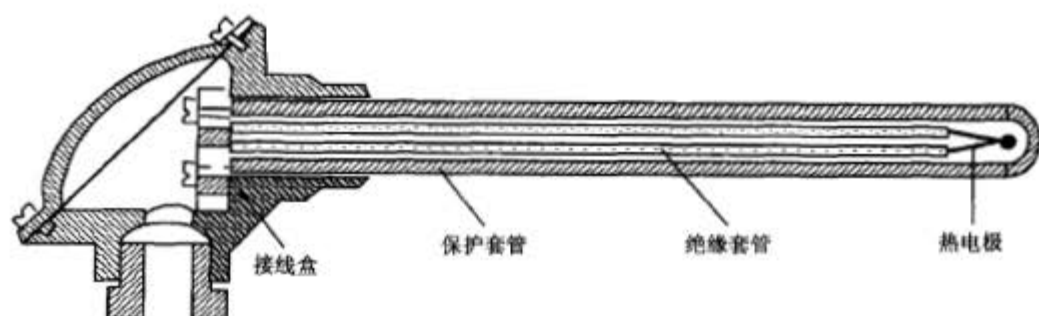


图 6-9 工业用装配式热电偶结构示意图

(1) 热电极

热电极又称偶丝，它是热电偶的基本组成部分。普通金属做成的偶丝，其直径一般为 $0.5 \sim 3.2\text{mm}$ ；贵金属做成的偶丝，直径一般为 $0.3 \sim 0.6\text{mm}$ 。偶丝的长度则由使用情况、安装条件，特别是工作端在被测介质中插入的深度来决定，通常为 $300 \sim 2000\text{mm}$ ，常用的长度为 350mm 。

(2) 绝缘套管

绝缘套管又称绝缘子，是用于热电极之间及热电极与保护套管之间进行绝缘保护的零件。其形状一般为圆形或椭圆形，中间开有两个、四个或六个孔，偶丝穿孔而过。材料为黏土质、高铝质、刚玉质等，材料的具体选用视使用的热电偶而定。在室温下，绝缘套管的绝缘电阻应在 $5\text{M}\Omega$ 以上。

(3) 保护套管

保护套管是用来保护热电偶感温元件免受被测介质化学腐蚀和机械损伤的装置。保护套管应具有耐高温、耐腐蚀的性能，要求导热性能好，气密性好。其材料有金属、非金属以及金属陶瓷三大类。金属材料有铝、黄铜、碳钢、不锈钢等，非金属材料有高铝质、刚玉质，使用温度都在 1300°C 以上。金属陶瓷材料如氧化镁加金属钼，这种材料使用温度在 1700°C ，且在高温下有很好的抗氧化能力，适用于钢水温度的连续测量。保护套管的形状一般为圆柱形。

(4) 接线盒

接线盒是用来固定接线座和作为连接补偿导线的装置，根据被测量温度的对象及现场环境条件，设计有普通式、防溅式、防水式和接插座式四种结构形式。普通式接线盒无盖，仅由盒体构成，其接线座用螺钉固定在盒体上，适用于环境条件良好、无腐蚀性气体的现场。防溅式、防水式的接线盒有盖，且盖与盒体是由密封圈压紧密封，适用于雨水能溅到的现场或露天设备现场。接插座式接线盒结构简单，安装所占空间小，接线方便，适用于需要快速拆卸的环境。

2. 铠装热电偶的结构

铠装热电偶又称缆式热电偶，它可以做得很细（直径 $0.25 \sim 12\text{mm}$ ）、很长，使用时可任意弯曲。铠装热电偶的主要优点是测温端热容量小，耐高压，热响应时间快和坚固耐用。和工业用装配式热电偶一样，铠装热电偶作为测量温度的变送器，通常和显示仪表、记录仪表和电子调节器配套使用，同时亦可作为装配式热电偶的感温元件。它可以直接测量各种生产过程中从 $0 \sim 800^\circ\text{C}$ 范围内的液体、蒸汽和气体介质以及固体表面的温度。

铠装热电偶的断面结构如图 6-10 所示。它是由热电偶丝、高绝缘材料氧化镁、不锈钢

② 性能稳定。要求在规定的温度测量范围内使用时热电性能稳定,均匀性和复现性好。

③ 物理化学性能好。要求在规定的温度测量范围内有良好的化学稳定性、抗氧化性或抗还原性能。

满足上述条件的热电偶材料并不很多。我国把性能符合专业标准或国家标准并具有统一分度表的热电偶材料称为定型热电偶材料。

6.1.4 热电偶的种类

常用热电偶可分为标准热电偶和非标准热电偶两大类。所谓标准热电偶是指国家标准规定了其热电势与温度的关系、允许误差,并有统一的标准分度表的热电偶,有与其配套的显示仪表可供选用。非标准化热电偶在使用范围或数量级上均不及标准化热电偶,一般也没有统一的分度表,主要用于某些特殊场合的测量。

1. 标准型热电偶

从1988年1月1日起,我国热电偶和热电阻的生产全部按国际电工委员会(IEC)的标准,并指定S、B、E、K、R、J、T七种标准化热电偶为我国统一设计型热电偶。但其中的R型(铂铑₁₃-铂)热电偶,因其温度范围与S型(铂铑₁₀-铂)重合,我国没有生产和使用。

(1) 铂铑₃₀-铂铑₆热电偶(分度号B)

这种热电偶旧的分度号为“LL-2”。它的正极是铂铑丝(铂70%,铑30%),负极也是铂铑丝(铂94%,铑6%),俗称双铂铑。测量温度最高长期可达1600℃,短期可达1800℃。其优点是材料性能稳定,测量精度高,测温上限高;缺点是在还原性气体中易被侵蚀,成本高。

B型热电偶在冶金反应、钢水测量等高温领域中得到了广泛的应用。

(2) 铂铑₁₀-铂热电偶(分度号S)

这种热电偶旧的分度号为“LB-3”。它的正极是铂铑丝(铂90%,铑10%),负极是纯铂丝。测量温度最高长期可达1300℃,短期可达1600℃,一般用来测量1000℃以上的高温。其优点是材料性能稳定,测量准确度较高,可做成标准热电偶或基准热电偶,抗氧化性强,宜在氧化性、惰性气氛中工作;缺点是在高温还原性气体中(如气体中含CO、H₂等)易被侵蚀,需要用保护套管,另外其热电极材料属贵金属,成本较高,热电势也较弱。

由于铂铑₁₀-铂热电偶的精度高,故国际温标中规定它为630.74~1064.43℃温度范围内复现温标的标准仪器。

(3) 镍铬-镍硅热电偶(分度号K)

这种热电偶旧的分度号为“EU-2”。它的正极是镍铬合金(88.4%~89.7%镍,9%~10%铬,0.6%硅,0.3%锰,0.4%~0.7%钴),负极为镍硅(95.7%~97%镍,2%~3%硅,0.4%~0.7%钴)。测温范围为-200~+1300℃。其特点是测温范围很宽,热电动势与温度关系近似线性,热电动势大,高温下抗氧化能力强,价格低,所以在工业上应用广泛;缺点是热电动势的稳定性和精度较B型或S型热电偶差,在还原性气体和含有SO₂、H₂S等的气体中易被侵蚀。测量温度长期可达1000℃,短期可达1300℃。

(4) 镍铬-铜镍热电偶(分度号E)

这种热电偶旧的分度号为“EA-2”。它的正极是镍铬合金,负极是铜镍合金(铜55%,镍45%)。测温范围为-200~+1000℃。其特点是热电动势较其他常用热电偶大,适宜在氧化

性或惰性气氛中工作。

(5) 铁-铜镍热电偶(分度号 J)

这种热电偶的正极是铁, 负极是铜镍合金。测温范围为 $-200\sim+1300^{\circ}\text{C}$ 。其特点是价格低, 热电动势较大(仅次于 E 型热电偶), 灵敏度高(约为 $53\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$), 线性度好, 价格便宜, 可在 800°C 以下的还原介质中使用; 主要缺点是铁极易氧化。

(6) 铜-铜镍热电偶(分度号 T)

这种热电偶的正极是铜, 负极是铜镍合金, 测温范围为 $-200\sim+400^{\circ}\text{C}$, 热电动势略高于镍铬-镍硅热电偶, 约为 $43\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 。其优点是精度高, 复现性好, 稳定性好, 价格便宜; 缺点是铜极易氧化, 故在氧化性气氛中使用, 一般不能超过 300°C 。

由于铜-铜镍热电偶在低温下具有较好的稳定性, 所以在低温技术中应用广泛。目前在 $0\sim-100^{\circ}\text{C}$ 范围内, 铜-铜镍热电偶已被定为三级标准热电偶, 用以检测低温仪表的精度, 误差不超过 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

现将我国标准热电偶的技术数据列于表 6-1, 供参考。

表 6-1 标准热电偶技术数据

热电偶名称	分度号	热电极材料		20℃时电阻系数 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	使用温度($^{\circ}\text{C}$)		允许误差($^{\circ}\text{C}$)			
		极性	识别		长期	短期	温度	误差	温度	误差
铂铑 ₁₀ -铂	S	正	较硬	0.24	1300	1600	≤ 600	± 2.4	> 600	$\pm 0.4\%t$
		负	柔软	0.16						
铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆	B	正	较硬	0.245	1600	1800	≤ 600	± 3	> 600	$\pm 0.5\%t$
		负	稍软	0.215						
镍铬-镍硅	K	正	不亲磁	0.68	1000	1200	≤ 400	± 4	> 400	$\pm 0.75\%t$
		负	稍亲磁	0.25~0.33						
镍铬-铜镍	E	正	色较暗	0.68	600	800	≤ 400	± 4	> 400	$\pm 1\%t$
		负	银白色	0.49						
铜-铜镍	T	正	红色	0.17	200	300	$-200\sim-40$	$\pm 2\%t$	$-40\sim 400$	$\pm 0.75\%t$
		负	银白色	0.49						
铁-铜镍	J	正	红	0.26	600	900	$-200\sim-40$	$\pm 0.4\%t$	$-40\sim 900$	$\pm 0.75\%t$
		负	银白色	0.49						

目前工业上常用的有四种标准化热电偶, 即铂铑₃₀-铂铑₆、铂铑₁₀-铂、镍铬-镍硅和镍铬-铜镍(我国通常称作镍铬-康铜)热电偶, 它们的分度表分别见表 6-2、表 6-3、表 6-4 和表 6-5。

表 6-2

B 型(铂铑₃₀-铂铑₆)热电偶分度表

分度号: B

(参考端温度 0°C)

测量端温度($^{\circ}\text{C}$)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	热电动势(mV)									
0	-0.000	-0.002	-0.003	-0.002	0.000	0.002	0.006	0.011	0.017	0.025
100	0.033	0.043	0.053	0.065	0.078	0.092	0.107	0.123	0.140	0.159
200	0.178	0.199	0.220	0.243	0.266	0.291	0.317	0.344	0.372	0.401
300	0.431	0.462	0.494	0.527	0.561	0.596	0.632	0.669	0.707	0.746

续表

测量端温度(°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	热电动势(mV)									
400	0.786	0.827	0.870	0.913	0.957	1.002	1.048	1.095	1.143	1.192
500	1.241	1.292	1.344	1.397	1.450	1.505	1.560	1.617	1.674	1.732
600	1.791	1.851	1.912	1.974	2.036	2.100	2.164	2.230	2.296	2.363
700	2.430	2.499	2.569	2.639	2.710	2.782	2.855	2.928	3.003	3.078
800	3.154	3.231	3.308	3.387	3.466	3.546	3.626	3.708	3.790	3.873
900	3.957	4.041	4.126	4.212	4.298	4.386	4.474	4.562	4.652	4.742
1000	4.833	4.924	5.016	5.109	5.202	5.297	5.391	5.487	5.583	5.680
1100	5.577	5.875	5.973	6.073	6.172	6.273	6.374	6.475	6.577	6.680
1200	6.783	6.887	6.991	7.096	7.202	7.308	7.414	7.521	7.628	7.736
1300	7.845	7.953	8.063	8.172	8.283	8.393	8.504	8.616	8.727	8.839
1400	8.592	9.065	9.178	9.291	9.405	9.519	9.634	9.748	9.863	9.979
1500	10.094	10.210	10.325	10.441	10.558	10.674	10.790	10.907	11.024	11.141
1600	11.257	11.374	11.491	11.608	11.725	11.842	11.959	12.076	12.193	12.310
1700	12.426	12.543	12.659	12.776	12.892	13.008	13.124	13.239	13.354	13.470
1800	13.585									

表 6-3

S 型(铂铈₁₀-铂)热电偶分度表

分度号: S

(参考端温度 0°C)

测量端温度(°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	热电动势(mV)									
0	-0.000	0.055	0.113	0.173	0.235	0.299	0.365	0.432	0.502	0.573
100	0.033	0.719	0.795	0.872	0.950	1.029	1.109	1.190	1.273	1.356
200	0.178	1.525	1.611	1.698	1.785	1.873	1.962	2.051	2.141	2.232
300	0.431	2.414	2.506	2.599	2.692	2.786	2.880	2.974	3.069	3.164
400	0.786	3.356	3.452	3.549	3.645	3.743	3.842	3.938	4.036	4.135
500	1.241	4.333	4.432	4.532	4.632	4.732	4.832	4.933	5.034	5.136
600	1.791	5.339	5.442	5.544	5.648	5.751	5.855	5.960	6.064	6.169
700	2.430	6.380	6.486	6.592	6.699	6.805	6.913	7.020	7.128	7.236
800	3.154	7.454	7.563	7.672	7.782	7.892	8.003	8.114	8.225	8.336
900	3.957	8.560	8.673	8.786	8.899	9.012	9.126	9.240	9.355	9.470
1000	4.833	9.700	9.816	9.932	10.048	10.165	10.282	10.400	10.517	10.635
1100	5.577	10.872	10.991	11.110	11.229	11.348	11.467	11.587	11.707	11.827
1200	6.783	12.067	12.188	12.308	12.429	12.550	12.671	12.792	12.913	13.034
1300	7.845	13.276	13.397	13.519	13.640	13.761	13.883	14.004	14.125	14.247
1400	8.592	14.489	14.610	14.731	14.852	14.973	15.094	15.215	15.336	15.456
1500	10.094	15.697	15.817	15.939	16.057	16.176	16.296	16.415	16.534	16.653
1600	11.257	16.890	17.008	17.125	17.245	17.360	17.477	17.594	17.711	17.826
1700	12.426									
1800	13.585									

表 6-4

E 型(镍铬-铜镍)热电偶分度表

分度号: E

(参考端温度 0℃)

测量端温度(℃)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	热电动势(mV)									
-0	-0.000	-0.581	-1.151	-1.709	-2.254	-2.787	-3.306	-3.811	-4.301	-4.777
+0	0.000	0.591	1.192	1.801	2.419	3.047	3.683	4.329	4.983	5.646
100	6.317	6.996	7.633	8.377	9.078	9.787	10.501	11.222	11.949	12.681
200	13.419	14.061	14.909	15.661	16.417	17.178	17.942	18.710	19.481	20.256
300	21.033	21.814	22.597	23.383	24.171	24.961	25.754	26.549	27.345	28.143
400	28.943	29.744	30.546	31.350	32.955	32.960	33.767	34.574	35.382	36.190
500	36.999	37.808	38.617	39.426	40.236	41.045	41.853	42.662	43.470	44.278
600	45.085	45.891	46.697	47.502	48.306	49.109	49.911	50.713	51.513	52.312
700	53.110	53.907	54.703	55.498	56.291	56.183	57.837	58.663	59.451	60.237
800	61.022									

表 6-5

K 型(镍铬-镍硅)热电偶分度表

分度号: K

(参考端温度 0℃)

测量端温度(℃)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	热电动势(mV)									
-0	-0.000	-0.392	-0.777	-1.156	-1.527	-1.889	-2.243	-2.586	-2.920	-3.242
+0	0.000	0.397	0.798	1.203	1.611	2.022	2.436	2.850	3.266	3.681
100	4.095	4.508	4.949	5.327	5.733	6.137	6.539	6.939	7.338	7.737
200	8.137	8.537	8.938	9.341	9.745	10.151	10.560	10.969	11.381	11.739
300	12.207	12.623	13.039	13.456	13.874	14.292	14.712	15.132	15.552	15.947
400	16.395	16.818	17.241	17.664	18.088	18.513	18.938	19.363	19.788	20.214
500	20.640	21.066	21.493	21.919	22.346	22.772	23.198	23.624	24.050	24.476
600	24.902	25.327	25.751	26.176	26.599	27.022	27.445	27.867	28.288	28.709
700	29.128	29.547	29.965	30.383	30.799	31.214	31.629	32.042	32.455	32.866
800	33.277	33.686	34.095	34.502	34.909	35.314	35.718	36.121	36.524	36.925
900	37.325	37.724	38.122	38.519	38.915	39.310	39.703	40.096	40.488	40.897
1000	41.269	41.657	42.045	42.432	42.817	43.202	43.585	43.968	44.349	44.729
1100	45.108	45.486	45.863	46.238	46.612	46.985	47.356	47.726	48.095	48.462
1200	48.828	49.192	49.555	49.916	50.276	50.633	50.990	51.344	51.697	52.049
1300	52.398									

2. 非标准型热电偶

① 铱和铱合金热电偶。如铱₅₀-铑-铱₁₀、铱₄₀-铑、铱₆₀-铑热电偶,它们能在氧化

环境中测量高达 2100℃ 的高温,且热电动势与温度关系的线性好。

② 钨铼热电偶。是 20 世纪 60 年代发展起来的,为目前一种较好的高温热电偶,可使用在真空惰性气体介质或氢气介质中,但高温抗氧化能力差;国产钨铼₃-钨铼₂₅、钨铼-钨铼₂₀热电偶使用温度范围在 300~2000℃,分度精度为 1%;主要用于钢水连续测温、反应堆测温等场合。

③ 金铁-镍铬热电偶。主要用于低温测量,可在 2~273K 范围内使用,灵敏度约为 10 μ V/℃。

④ 钽-铂铱₁₅热电偶。是一种高输出性能的热电偶,在 1398℃ 时的热电动势为 47.255mV,比铂铱₁₀-铂热电偶在同样温度下的热电动势高出 3 倍,因而可配用灵敏度较低的指示仪表,常应用于航空工业。

非标准型热电偶的主要性能和特点见表 6-6。

表 6-6 非标准型热电偶的主要性能和特点

名称	材料		测温范围 (℃)	允许误差(℃)	特点	用途
	正极	负极				
高温热电偶	铂铑 ₃	铂	0~1600	≤600 为±10 >600 为±0.5% <i>t</i>	热电动势较铂铑 ₁₀ 大,其他一样	测钴合金熔液温度(1501℃)
	铂铑 ₁₃	铂铑 ₁	0~1700		在高温下抗沾污性能和机械性能好	各种高温测量
	铂铑 ₂₀	铂铑 ₅	0~1700		在高温下抗氧化性能、机械性能好,化学稳定性好,50℃以下热电动势小,参考端可以不用温度补偿	
	铱铑 ₄₀	铂铑 ₂₀	0~1850			
	铱铑 ₄₀	铱	300~2200	≤1000 为±10 >1000 为±1.0% <i>t</i>	热电动势与温度线性好,适用于氧化、真空、惰性气体,热电动势小,价贵,寿命短	航空和空间技术及其他高温测量
	铱铑 ₆₀	铱				
	钨铼 ₃	钨铼 ₂₅	300~2800	≤1000 为±10 >1000 为±1.0% <i>t</i>	上限温度高,热电动势比上述材料大,线性较好,适用于真空、还原性和惰性气体	钢水温度测量及其他高温测量
	钨铼 ₅	钨铼 ₂₀				
低温热电偶	镍铬	金铁 0.07%	-270~0	±1.0	在极低温下,灵敏度较高,稳定性好,热电极材料易复制,是较理想的低温热电偶	用于超导、宇航、受控热核反应等低温工程以及科研部门
	铜	金铁 0.07%	-270~-196			
非金属热电偶	碳	石墨	测温上限 2400	±1.0	热电动势大,熔点高,价格低廉,但复现性和机械性能差	用于耐火材料的高温测量
	碳化锆	碳化锆	测温上限 2000			
	二硅化钨	二硅化钼	测温上限 1700			

6.1.5 热电偶的冷端补偿方法

从热电效应的原理可知,热电偶产生的热电动势与两端温度有关。只有将冷端的温度恒定,热电动势才是热端温度的单值函数。由于热电偶分度表是以冷端温度为 0℃ 时做出的,因此在使用时要正确反映热端的温度(被测温度),最好设法使冷端温度恒为 0℃。但在实际应用中,热电偶的冷端通常靠近被测对象,且受到周围环境温度的影响,其温度不是恒定不

查分度表知, 对应 31.255mV 的温度是 751℃, 即这样测出的炉温是 751℃, 与炉内真实温度相差 49℃。

如果在热电偶与仪表之间用补偿导线连接, 相当于将热电极延伸到仪表室, 输入仪表的热电势为

$$\begin{aligned} E(800, 20) &= E(800, 0) - E(20, 0) \\ &= (33.277 - 0.798)\text{mV} \\ &= 32.479\text{mV} \end{aligned}$$

查分度表知, 对应 32.479mV 的温度是 781℃, 与炉内真实温度相差 19℃。可见使用补偿导线可以减小测量误差, 但在使用热电偶补偿导线时必须注意型号相配, 极性不能接错, 补偿导线与热电偶连接端的温度不能超过 100℃。常用热电偶的补偿导线见表 6-7。

表 6-7 常用热电偶的补偿导线

配用热电偶分度号	补偿导线型号	补偿导线正极		补偿导线负极		补偿导线在 100℃ 的热电势允许误差(mV)	
		材料	颜色	材料	颜色	A(精密级)	B(精密级)
S	SC	铜	红	铜镍	绿	0.645 ± 0.023	0.645 ± 0.037
K	KC	铜	红	铜镍	蓝	4.095 ± 0.063	4.095 ± 0.105
K	KX	镍铬	红	镍硅	黑	4.095 ± 0.063	4.095 ± 0.105
E	EX	镍铬	红	铜镍	棕	6.317 ± 0.102	6.317 ± 0.170
J	JX	铁	红	铜镍	紫	5.268 ± 0.081	5.268 ± 0.135
T	TX	铜	红	铜镍	白	4.277 ± 0.023	4.277 ± 0.047

注: 补偿导线型号头一个字母与热电偶分度号相对应; 第二个字母 X 表示延伸型补偿导线, 字母 C 表示补偿型补偿导线。

3. 计算修正法

若冷端温度恒定, 但并非 0℃, 要使测出的热电动势只反映热端的实际温度, 则必须对温度进行修正。修正公式如下:

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_1) + E_{AB}(T_1, T_0) \quad (6-16)$$

式中: $E_{AB}(T, T_0)$ 为热电偶热端温度为 T 、冷端温度为 0℃ 时的热电动势;

$E_{AB}(T, T_1)$ 为热电偶热端温度为 T 、冷端温度为 T_1 时的热电动势;

$E_{AB}(T_1, T_0)$ 为热电偶热端温度为 T_1 、冷端温度为 0℃ 时的热电动势。

例 6-3 用镍铬-镍硅热电偶测某一水池内水的温度, 测出的热电动势为 2.436mV, 再用温度计测出环境温度为 30℃ (且恒定), 求池水的真实温度。

由镍铬-镍硅热电偶分度表查出

$$E(30, 0) = 1.203\text{mV}$$

根据 (6-16) 式计算出

$$\begin{aligned} E(T, 0) &= E(T, 30) + E(30, 0) \\ &= 2.436\text{mV} + 1.203\text{mV} \\ &= 3.639\text{mV} \end{aligned}$$

再通过分度表查出其对应的实际温度为 $T=88^\circ\text{C}$, 即池水的真实温度是 88℃。

4. 电桥补偿法

计算修正法虽然很精确,但不适合连续测温。为此,有些仪表的测温线路中带有补偿电桥(又称冷端补偿器),利用不平衡电桥产生的电动势补偿热电偶因冷端波动引起的热电动势的变化。

冷端补偿器的原理如图 6-14 所示。 R_1 、 R_2 、 R_3 及 R_T 均为桥臂电阻,其中 R_1 、 R_2 、 R_3 是三个由电阻温度系数较小的锰铜丝绕成的电阻,阻值稳定; R_T 是用漆包铜丝绕制成的,它和热电偶的冷端感受同一温度。供桥电压 E 为 4V。

在桥路设计时,使 $R_1 = R_2$,并且 R_1 、 R_2 的阻值要比桥路中的其他电阻大得多。这样,即使电桥中其他电阻的阻值发生变化,左右两桥臂中的电流却差不多保持不变,从而认为其具有恒流特性。线路设计使得 $I_1 = I_2 = I/2 = 0.5\text{mA}$ 。

回路输出电压 U 为热电偶的热电动势 $E(T, T_0)$ 、桥臂电阻 R_T 的压降 U_T 及另一桥臂电阻 R_3 的压降 U_3 三者的代数和

$$U = E(T, T_0) + (U_T - U_3)$$

当热电偶的热端温度 T 一定、冷端温度 T_0 升高时,热电动势 $E(T, T_0)$ 将会减小;与此同时,铜电阻 R_T 的阻值将增大,从而使 U_T 增大;而因为 R_3 不变,故 U_3 不变。因此只要能满足下面的关系式即可达到自动补偿的目的。

$$\Delta E = \Delta U_T = I_1 R_T \alpha \Delta T \quad (6-17)$$

式中: ΔE 为热电偶冷端温度变化引起的热电动势的变化;

ΔU_T 为铜电阻 R_T 的阻值随热电偶冷端温度变化而引起的压降的变化;

I_1 为流过电阻 R_T 的电流,即 0.5mA ;

α 为铜电阻 R_T 的温度系数,一般取 $0.00391/^\circ\text{C}$;

ΔT 为热电偶冷端温度的变化。

如果热电偶的冷端温度变化范围为 $0 \sim +50^\circ\text{C}$,热电偶选用铂铑₁₀-铂,查分度表得出 ΔE 为 0.299mV ,因此补偿电阻 R_T 的阻值可以根据(6-17)式求出。

$$R_T = \frac{\Delta E}{\alpha \Delta T I_1} = \frac{0.299}{0.00391 \times 50 \times 0.5} = 3.07\Omega$$

使用冷端补偿器时应注意以下几点。

① 不同材料的热电偶所配用的冷端补偿器中的限流电阻 R_T 的大小是不同的,必须按上面的方法重新计算。

② 桥臂电阻 R_T 必须和热电偶的冷端靠近,使处于同一温度之下。冷端补偿器只能在热电偶的冷端温度变化不大(不超过 50°C)的范围内起补偿作用。

③ 冷端补偿器所设计的电桥是在 20°C 输出为零。

④ 热电偶所产生的热电动势与温度之间的关系是非线性的,而补偿电阻 R_T 的阻值变化与温度之间的关系却是线性的。因此,这种补偿方法是近似的。但在实际使用时,由于热电偶冷端温度变化范围不会太大,这种补偿方法常被采用。

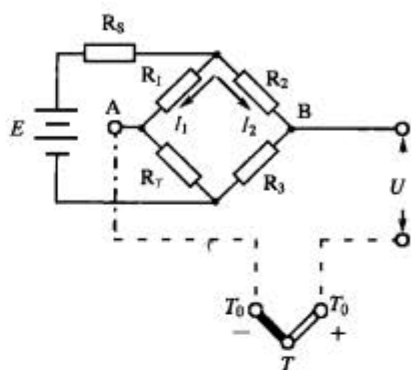


图 6-14 冷端补偿器

5. 显示仪表零位调整法

当热电偶通过补偿导线连接显示仪表时, 如果热电偶冷端温度不是 0°C , 但十分稳定 (如恒温车间或有空调的场所), 可预先将有零位调整器的显示仪表的指针从刻度的初始值调至已知的冷端温度值上, 这时显示仪表的示值即为被测量的实际温度值。

6. 软件处理法

对于计算机系统, 不必全靠硬件进行热电偶冷端处理。例如冷端温度恒定但不为 0°C 的情况, 只需在采样后加一个与冷端温度对应的常数即可。

对于 T_0 经常波动的情况, 可利用热敏电阻或其他传感器把 T_0 信号输入计算机, 按照运算公式设计一些程序, 便能自动修正。后一种情况必须考虑输入的采样通道中除了热电动势之外还应该有冷端温度信号, 如果多个热电偶的冷端温度不相同, 还要分别采样, 若占用的通道数太多, 宜利用补偿导线把所有的冷端接到同一温度处, 只用一个冷端温度传感器和一个修正 T_0 的输入通道就可以了。冷端集中, 对于提高多点巡检的速度也很有利。

6.1.6 热电偶测温电路

热电偶测温电路常见形式如下。

1. 测量某一点的温度

图 6-15 所示是一只热电偶和一个仪表配用的连接电路, 用于测量单点的温度。A、B 为热电偶, C、D 为补偿导线, E 为铜导线 (实际使用时可把补偿导线一直延伸到仪表的接线端子, 这样冷端温度即为仪表接线端子所处的环境温度), M 为配用的毫伏表 (或数字仪表)。T、 T_0 分别为工作端和冷端温度。

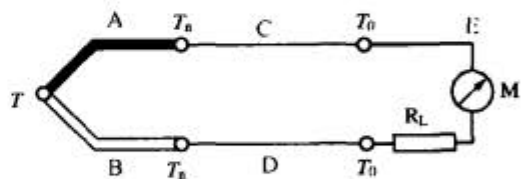


图 6-15 单点测温电路

流过测温毫伏表的电流为

$$I = \frac{E_{AB}(T, T_0)}{R_z + R_c + R_M} \quad (6-18)$$

式中: R_z 为热电偶的电阻;

R_c 为铜导线电阻、补偿导线电阻和平衡电阻的总和;

R_M 为仪表的内阻 (包括 R_L)。

2. 测量两点之间的温度差

图 6-16 所示是用两只热电偶和一个仪表配合测量两点之间温差的电路。图中两只热电偶型号相同并配用相同的补偿导线。工作时, 两只热电偶产生的热电动势方向相反, 故输入仪表的是其差值, 这一差值正反映了两只热电偶热端的温差。为了减少测量误差, 提高测量精度, 要尽可能选用热电特性一致的热电偶, 同时要保证两热电偶的冷端温度相同。

回路内的总电动势为

$$E_T = e_{AB}(T_1) + e_{BD}(T_0) + e_{DB}(T'_0) + e_{BA}(T_2) + e_{AC}(T'_0) + e_{CA}(T_0)$$

因为 C、D 为补偿导线，其热电性质分别与 A、B 材料相同，所以有

$$e_{BD}(T_0) = 0$$

$$e_{DB}(T'_0) = 0$$

$$e_{AC}(T'_0) = 0$$

$$e_{CA}(T_0) = 0$$

故

$$\begin{aligned} E_T &= e_{AB}(T_1) + e_{BA}(T_2) \\ &= e_{AB}(T_1) - e_{AB}(T_2) \end{aligned} \quad (6-19)$$

3. 热电偶并联电路

有些大型设备需测量多点的平均温度，可以通过采用几只型号相同的热电偶并联的测量电路来实现，如图 6-17 所示。在每一个热电偶电路中分别串接平衡电阻 $R_1, R_2, \dots, R_n$ ，其作用是为了在 $T_1, T_2, \dots, T_n$ 不相等时，每一个热电偶电路中的电流不受热电偶电阻变化的影响，故它们的阻值都比较大。

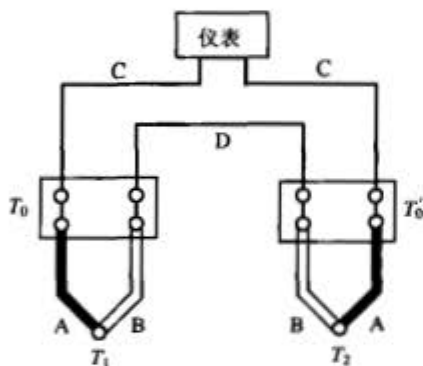


图 6-16 测两点温差电路

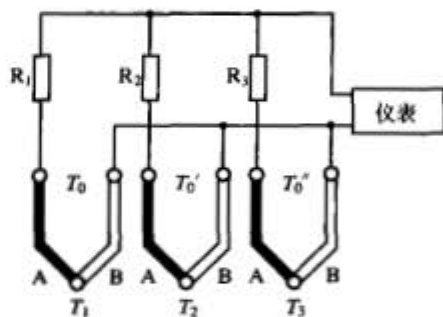


图 6-17 并联测量电路

将 n 只同型号热电偶的正极和负极分别连接在一起的电路称为并联测量电路。如果 n 只热电偶的电阻均相等，则测量仪表中指示的是 n 只热电偶热电动势的平均值。每只热电偶的输出为

$$E_1 = E_{AB}(T_1, T_0)$$

$$E_2 = E_{AB}(T_2, T'_0)$$

$$E_3 = E_{AB}(T_3, T''_0)$$

...

回路总的热电动势为

$$E_T = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_n}{n} \quad (6-20)$$

热电偶并联测量电路中，当其中一只热电偶断路时，不会中断整个测温系统的工作。

4. 热电偶串联电路

将 n 只同型号的热电偶依次按正负极相连接的电路称为串联测量电路，串联测量电路的总热电动势等于 n 只热电偶的热电动势之和。如果是如图 6-18 所示的三只热电偶串联，则

$$E_T = e_{AB}(T_1) + e_{DC}(T_0) + e_{AB}(T_2) + e_{DC}(T_0) + e_{AB}(T_3) + e_{DC}(T_0)$$

因为
所以

$$e_{DC}(T_0) = e_{BA}(T_0) = -e_{AB}(T_0)$$

$$\begin{aligned} E_T &= e_{AB}(T_1) - e_{AB}(T_0) + e_{AB}(T_2) - e_{AB}(T_0) + e_{AB}(T_3) - e_{AB}(T_0) \\ &= E_{AB}(T_1, T_0) + E_{AB}(T_2, T_0) + E_{AB}(T_3, T_0) \end{aligned} \quad (6-21)$$

串联电路的主要优点是热电动势大，仪表的灵敏度大为增加；缺点是只要有一只热电偶断路，整个测量系统便无法工作。

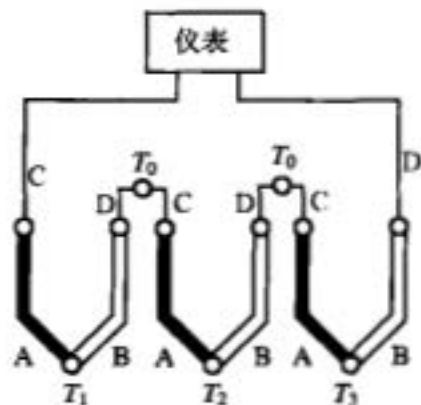


图 6-18 串联测量电路