

一、热电偶

(一) 热电偶的工作原理

1. 热电效应

如图 2-25 所示，将两种不同材料导体 A 和 B 的两端紧密连接在一起组成闭合回路，如使两连接点处于不同温度 T 、 T_0 时，则在回路中会产生由接点温差 $(T - T_0)$ 决定的电动势，从而形成电流，这一现象称为热电效应。



图 2-25 热电偶结构示意图

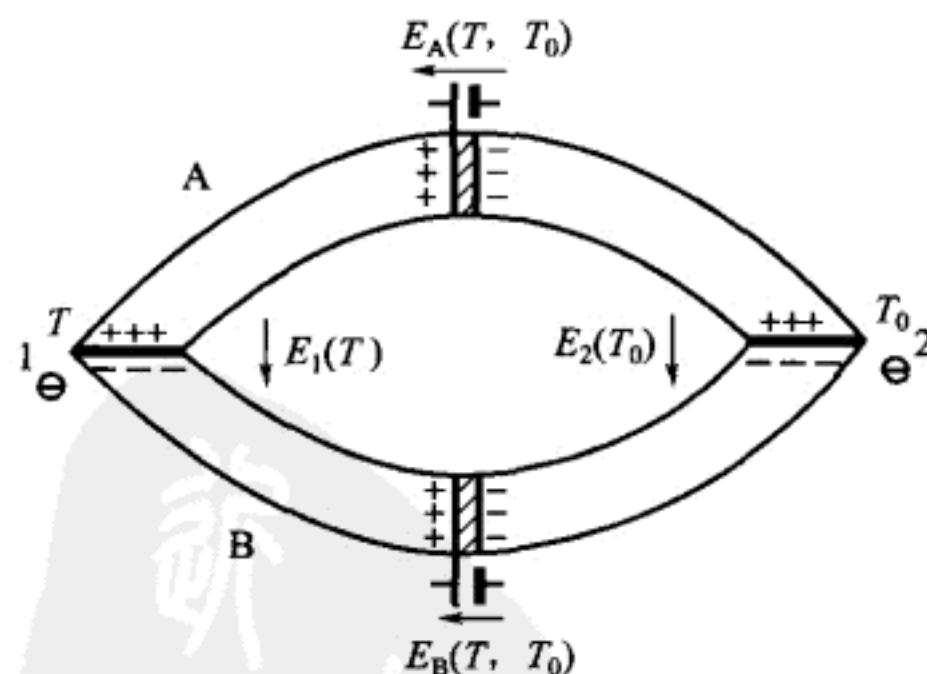


图 2-26 接触电动势和温差电动势

通常把上述两种不同导体的组合称为热电偶，称 A、B 两导体为热电极。两个接点，一个为工作端或热端 (T)，测温时将它置于被测温度场中，另一个自由端或冷端 (T_0)，一般要求恒定在某一温度。

2. 接触电动势和温度电动势

热电偶产生的热电动势是由两种导体的接触电动势和单一导体的温差电动势组成的,如图 2-26 所示。

不同导体的自由电子密度是不同的。当两种不同的导体 A、B 连接在一起时,在 A、B 的接触处就会发生电子的扩散,如图 2-26 所示。电子扩散的速率与金属导体内自由电子密度(用 N 表示)及所处的温度有关。设 $N_A > N_B$,则在单位时间内从导体 A 扩散到导体 B 中的自由电子数要比从导体 B 扩散到导体 A 中的自由电子数多。于是,导体 A 因失去电子而带正电,导体 B 因多得电子而带负电,这样,在接触处就形成电场而具有接触电动势,这个接触电动势的产生将阻碍自由电子从导体 A 向导体 B 的进一步扩散,直到达到动态平衡时为止。这种由于两种金属导体的自由电子密度不同而在接触处产生的电动势称为接触电动势,用符号 $E_{AB}(T)$ 、 $E_{AB}(T_0)$ 表示。由物理学可知

$$E_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B} \quad (2-35)$$

$$E_{AB}(T_0) = \frac{kT_0}{e} \ln \frac{N_A}{N_B} \quad (2-36)$$

式中 k ——波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-16}$;

e ——电子电荷量, $e = 4.802 \times 10^{-10}$ 。

当 $T > T_0$ 时,热电偶回路的总接触电动势 $E_{AB}(T, T_0)$ 为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0) = \frac{k}{e} (T - T_0) \ln \frac{N_A}{N_B} \quad (2-37)$$

对一根均质的金属导体来说,如果两端的温度不同,也会在导体内部产生电动势,这个电动势称为温差电动势,如图 2-26 中 $E_A(T, T_0)$ 、 $E_B(T, T_0)$ 。温差电动势的产生是由于导体高温端自由电子具有动能比低温端大,于是高温端的电子扩散速率大于低温端。在导体内部某一薄层处,温度高的一边因失去电子而带正电,温度低的一边则带负电,从而形成电位差。对导体 A 而言,其温差电动势为

$$E_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT \quad (2-38)$$

同理,导体 B 的温差电动势为

$$E_B(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_B dT \quad (2-39)$$

式中 σ_A , σ_B ——导体 A、B 的汤姆逊系数。

热电偶回路中总的温差电动势为

$$E_A(T, T_0) - E_B(T, T_0) = \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT \quad (2-40)$$

综上所述,在由导体 A、B 组合的闭合回路中,当 1、2 两端温度不同时,在热电偶回路中产生的热电动势为总接触电动势与总温差电动势之和,即

$$E_{AB}(T, T_0) = \frac{k}{e} (T - T_0) \ln \frac{N_A}{N_B} + \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT \quad (2-41)$$

3. 中间导体定律和标准电极定律

(1) 中间导体定律 在 A、B 材料组成的热电偶回路中接入第三种导体 C,如图 2-27 所示。只要引入的第三种导体 C 两端温度相同,则此导体的引入不会改变总电动势 $E_{AB}(T, T_0)$ 的大小。这个规律称为中间导体定律。

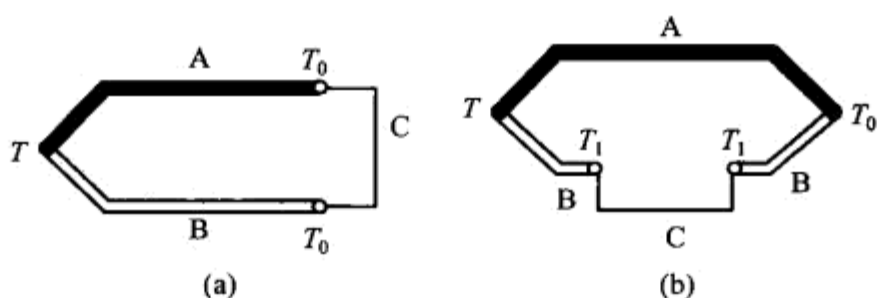


图 2-27 热电偶接入第三种导体

热电偶的这一特性，不但允许在其回路中接入测量仪表，而且还允许热电偶采用任意焊接方法来焊接电极。

(2) 标准电极定律 如果两种导体 (A 和 B) 分别与第三种导体 (C) 组成热电偶所产生的热电动势已知，如图 2-28 所示，则由这两个导体 (A、B) 组成的热电偶产生的热电动势也就已知。即

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0) \quad (2-42)$$

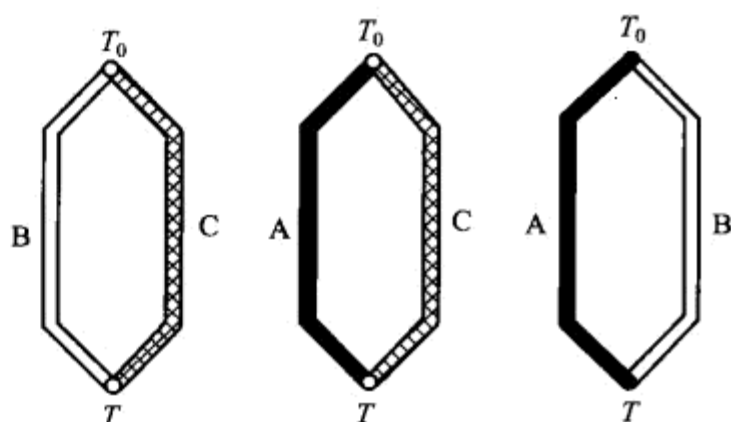


图 2-28 三种导体分别组成的热电偶

实际应用中，通常将纯铂丝作为标准电极，各种热电极材料和铂配成的热电偶，在热端温度为 100°C ，冷端温度为 0°C 时，所产生的热电动势值制成分度表。根据此表可以求出任意两种材料相配合的热电动势。

(二) 热电偶自由端温度补偿

由热电偶测温原理可知，热电偶的输出电势只有在自由端温度不变的条件下，才与工作端温度成单值函数关系。实际应用时，由于热电偶自由端离工作端较近，且又处于大气中，其温度受到测量对象和周围环境温度波动的影响，因而自由端温度难以保持恒定，这样会发生测量误差。为了消除这种误差，可采用下列温度补偿或修正措施。

1. 冷端恒温法

把热电偶自由端置于某些温度不变的装置中。

2. 补偿导线法

采用一种特殊导线，即热电偶补偿导线，将热电极加长，使自由端远离工作端，放置到恒温或温度波动较小的地方。

3. 自由端温度校正法

如热电偶自由端温度偏离 0°C ，但稳定在 T_0 ，应按下式对仪表示值进行修正：

$$E(T, 0^{\circ}\text{C}) = E(T, T_0) + E(T_0, 0^{\circ}\text{C})$$

式中 $E(T, 0^{\circ}\text{C})$ ， $E(T_0, 0^{\circ}\text{C})$ ——热电偶自由端为 0°C ，工作端温度为 T 和 T_0 时的电势值（由热电偶分度表中查得）；

$E(T, T_0)$ ——热电偶工作在 T 和 T_0 时，仪表测出的热电势值。

4. 电桥补偿法

在热电偶与显示仪表之间接入一个直流不平衡电桥（常称为冷端补偿器），当热电偶自由端温度升高，导致回路总电势偏低时，这个电桥感受自由端温度的变化，产生一个电位差，其数值刚好与热电偶降低的电动势相同，两者互相补偿。这样，测量仪表上测到的电动

势将不随自由端温度而变化。

(三) 热电偶的测温电路及应用

1. 测量某点温度的基本电路

常采用一个热电偶通过补偿导线和指示仪表连接的电路，如图 2-29 所示。

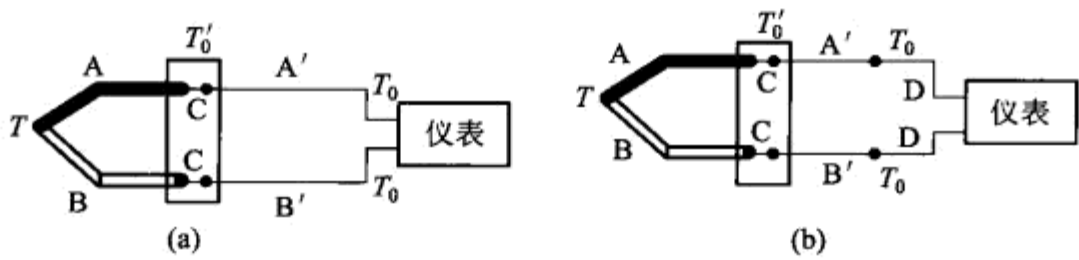


图 2-29 测量某点温度的基本电路

2. 测量两点之间温度差

将两个同型号的热电偶配用相同的补偿导线，其接线应使两热电势反向串联，此时仪表便可测得两点间的温度差值，如图 2-30 所示。

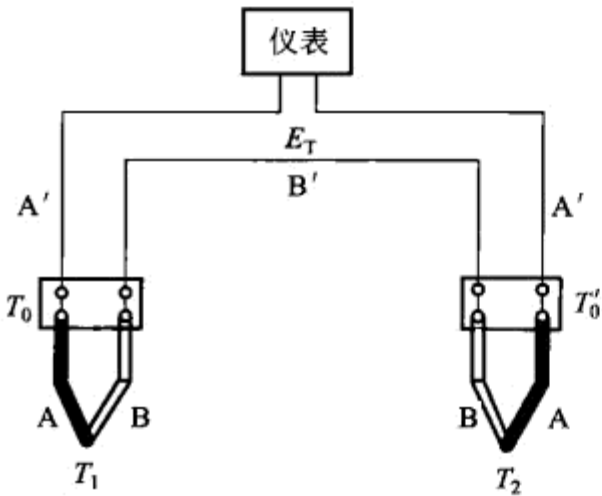


图 2-30 热电偶测温差电路

3. 测量设备中的平均温度

通常用几只同型号的热电偶并联在一起。

二、热电阻

热电阻是利用导体的电阻随温度而变化这一特性来测量温度的。工业上被广泛地应用于测量中低温区 ($-200 \sim 500^\circ\text{C}$) 的温度。

作为测温用的热电阻应满足下述要求：电阻温度系数要尽可能大和稳定，电阻率大，电阻与温度变化最好为线性关系，在整个测温范围内应具有稳定的物理和化学性质，材料易于制取和价格便宜等。目前应用较广泛的热电阻材料是铂和铜。为适应低温测量需要，还研制出用铟、锰和碳等作为热电阻材料。

铂电阻 在氧化性介质中，甚至在高温下，它的物理、化学性能稳定，因此不仅用作工业上的测温元件，而且还作为复现温标的基准器。

铂电阻与温度的关系如下。

在 $0 \sim 630.74^\circ\text{C}$ 以内

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad (2-43)$$

在 $-190 \sim 0^\circ\text{C}$ 以内

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (2-44)$$

式中 R_t ——温度为 t 时的电阻值；

R_0 ——温度为 0°C 时的电阻值；

A, B, C ——分度系数， $A = 3.940 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ， $B = -5.84 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}^2$ ， $C = -4.22 \times 10^{-12}/^\circ\text{C}^3$ 。

(2) 铜电阻 铂电阻虽然优点多，但价格昂贵，在测量精度要求不高且温度较低场合，铜电阻得到广泛应用。在 $-50 \sim 150^\circ\text{C}$ 的温度范围内，铜电阻与温度为线性关系，可用下式表示：

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (2-45)$$

式中 α ——铜电阻温度系数， $\alpha = 4.25 \times 10^{-3} \sim 4.29 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ 。

在实际的温度测量中，常用电桥作为热电阻的测量电路。由于热电阻的阻值很小，所以导线电阻值不能忽略。为了解决导线电阻的影响，采用三线式电桥连接法，如图 2-31 所示。

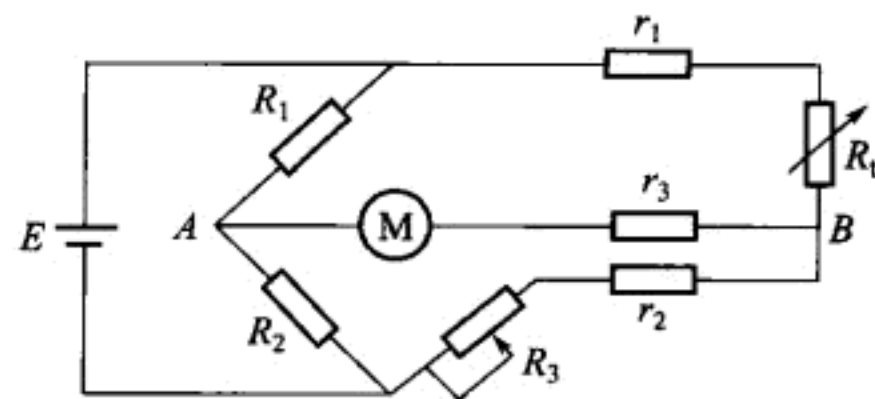


图 2-31 热电阻测温电桥的三线连接

图 2-31 中 R_t 为热电阻， r_1 ， r_2 ， r_3 为引线电阻， R_1 ， R_2 为两桥臂电阻，通常取 $R_1 = R_2$ ， R_3 为调整电桥的精密电阻。作为测量读数用的指示器 M 具有很大的内阻，故流过 r_3 的电流接近于零，当 $U_A = U_B$ 时，电桥平衡，若使 $r_1 = r_2$ ，则 $R_3 = R_t$ ，就可以消除引线电阻的影响。

三、热敏电阻

① 热敏电阻是利用半导体的电阻值随温度显著变化这一特性制成的一种热敏元件。

② 热敏电阻的优点是具有负的温度系数，当温度升高时，电阻值明显地减小，比纯金属的温度系数大，灵敏度高；由于体积小，因而热惯性小，适合快速测量；此外，其电阻值较高，常为数百欧到数千欧，接入测量仪表，导线电阻变化对测量结果的影响较小。缺点是互换性差，测量范围窄（ $-50 \sim 300^\circ\text{C}$ ）。

③ 热敏电阻的阻值与温度的关系不是线性的，可由下面的经验公式表示：

$$R_T = R_0 \exp\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}\right) \quad (2-46)$$

式中 R_T ——温度 T （绝对温度）时的阻值；

R_0 ——参考温度 T_0 （绝对温度）时的阻值；

B ——热敏电阻的材料常数， K 。

④ 除了负温度系数的热敏电阻外，还有正温度系数和临界温度热敏电阻，在某一特定的温度时，后两种热敏电阻的电阻值会剧烈变化，它们不能用于宽范围的温度测量，但特别适用于特定温度的检测。