

课题三 热电偶测温

引言

- 热电偶是工程上应用最广泛的温度传感器。
- 它构造简单，使用方便，具有较高的准确度、稳定性及复现性，温度测量范围宽，在温度测量中占有重要的地位。



学习目标

知识目标：

- (1) 了解热电偶的工作原理及结构；
- (2) 理解和掌握热电偶测温的补偿方法。

能力目标：

热电偶测温方法。

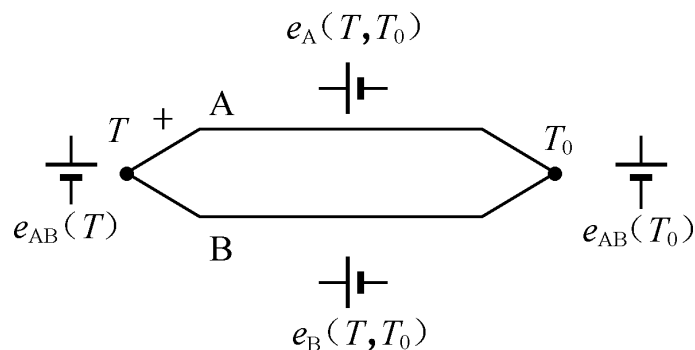
重点难点

- (1) 热电偶的工作原理；
- (2) 热电偶测温的补偿方法。

1. 工作原理

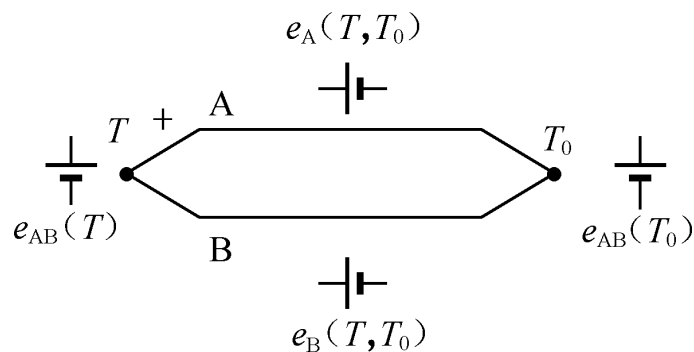
1) 热电效应

- 将两种不同材料的导体组成一个闭合回路，当闭合回路的两个结点分别置于不同的温度场 T 和 T_0 中时，回路中将产生一个电势，这种现象称为“热电效应”。



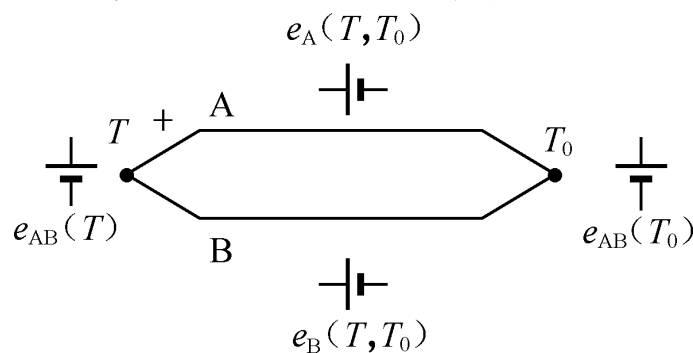
1. 工作原理

- 1821 年由 Seebeck 发现的，故又称为赛贝克效应。



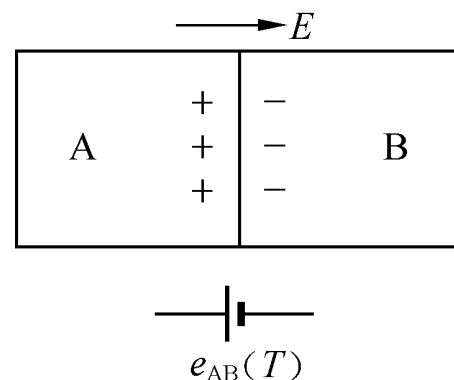
热电势由两部分组成

- 两种导体组成的回路称为“热电偶”，这两种导体称为“热电极”，产生的电势则称为“热电势”，热电偶的两个结点，一个称为测量端（工作端或热端），另一个称为参考端（自由端或冷端）。
- 一部分是两种导体的接触电势，另一部分是单一导体的温差电势。



2. 接触电势

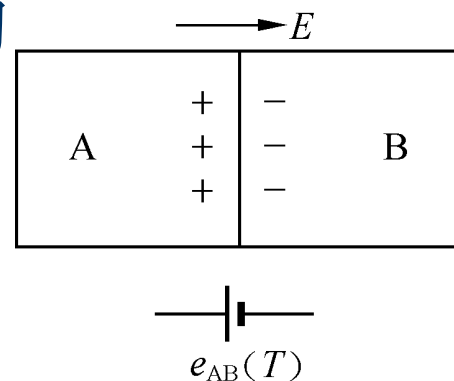
- 当 A 和 B 两种不同材料的导体接触时，由于两者内部单位体积的自由电子数目不同（即电子密度不同），因此，电子在两个方向上扩散的速率就不一样。



(a) 接触电动势原理示意图

2. 接触电势

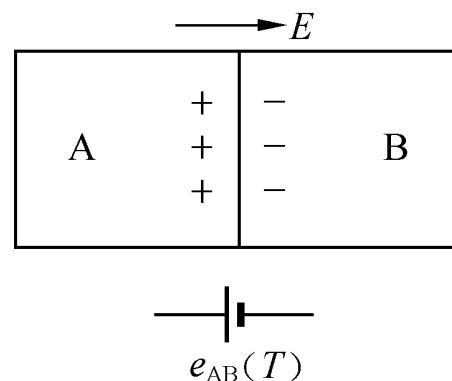
- 假设导体 A 的自由电子密度大于导体 B 的自由电子密度，则导体 A 扩散到导体 B 的电子数要比导体 B 扩散到导体 A 的电子数大。所以导体 A 失去电子带正电荷，导体 B 得到电子带负电荷。于是，在 A、B 两导体的接触界面上便形成一个由 A 到 B 的



(a) 接触电动势原理示意图

形成机理

- 该电场对电子作用力的方向与扩散的方向相反，它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，便处于一种动态平衡状态。

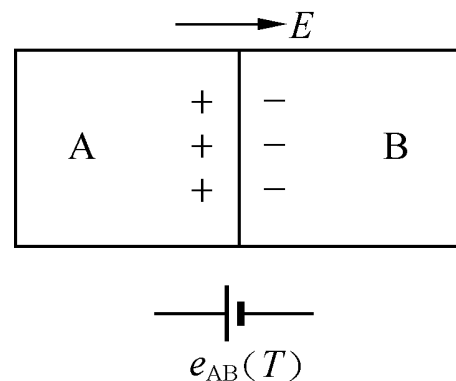


(a) 接触电动势原理示意图

形成机理

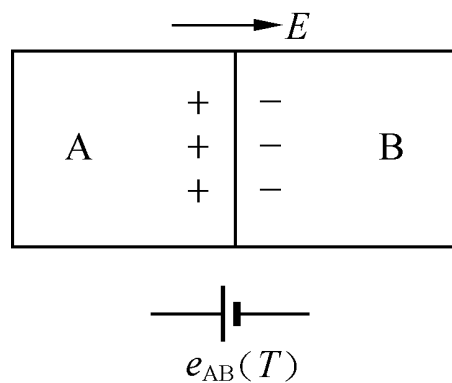
- 在这种状态下，A 与 B 两导体的接触处产生了电位差，称为接触电势。接触电势的大小与导体材料、结点的温度有关，与导体的直径、长度及几何形状无关。

$$e_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

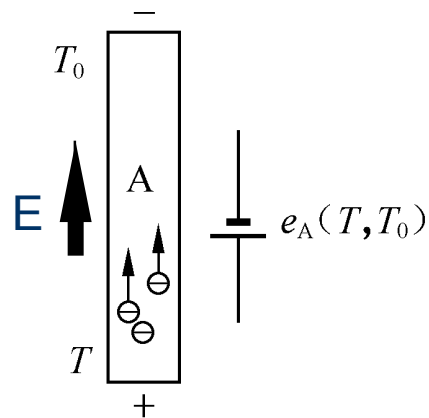


(a) 接触电动势原理示意图

热电动势示意图



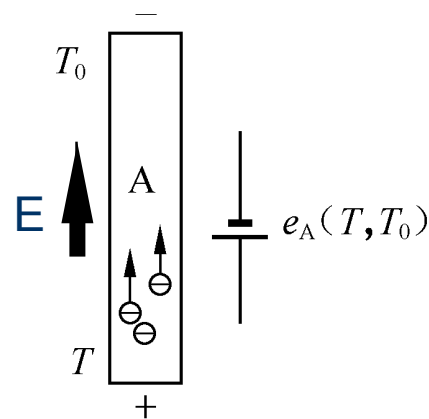
(a) 接触电动势原理示意图



(b) 温差电动势原理示意图

3. 温差电动势

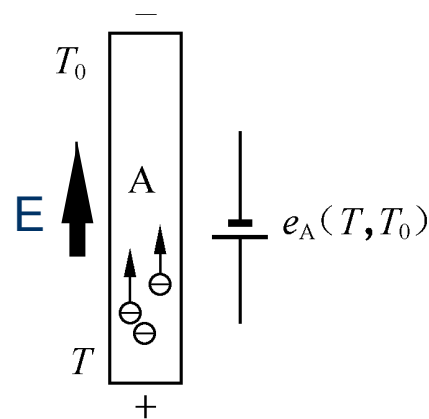
- 将某一导体两端分别置于不同的温度场 T 、 T_0 中，在导体内部，热端自由电子具有较大的动能，向冷端移动，从而使热端失去电子带正电荷，冷端得到电子带负电荷。



(b) 温差电动势原理示意图

3. 温差电动势

- 这样，导体两端便产生了一个由热端指向冷端的静电场，该静电场阻止电子从热端向冷端移动，最后达到动态平衡。这样，导体两端便产生了电势，我们称为温差电动势。

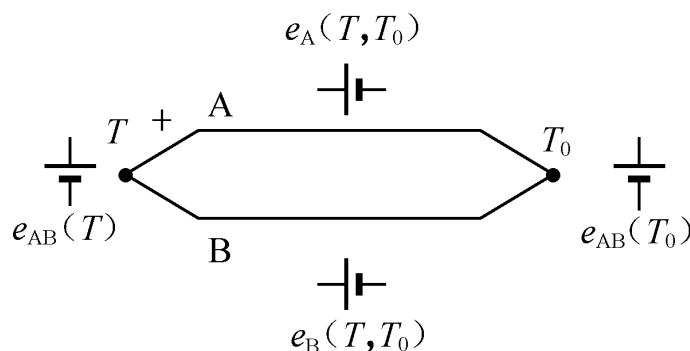


(b) 温差电动势原理示意图

4. 热电偶的电势

- 设导体 A、B 组成热电偶的两结点温度分别为 T 和 T_0 ，热电偶回路所产生的总电动势，

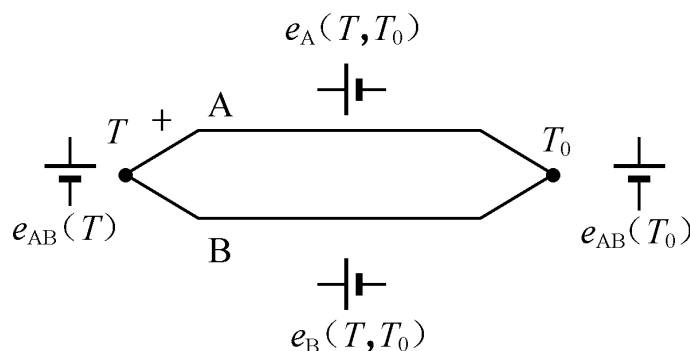
$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) - e_A(T, T_0) + e_B(T, T_0)$$



4. 热电偶的电势

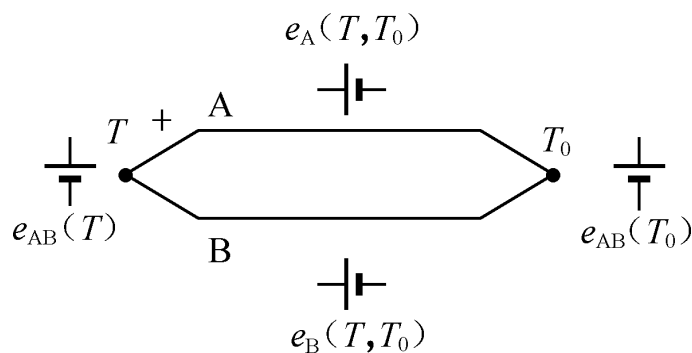
- 在热电偶回路中接触电动势远远大于温差电动势，所以温差电动势可以忽略不计

$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} = \frac{k}{e} (T - T_0) \ln \frac{n_A}{n_B}$$



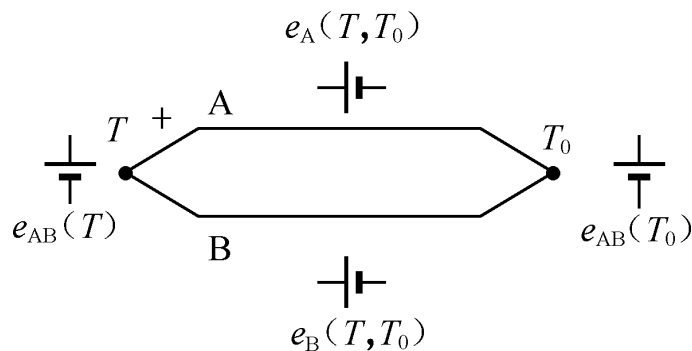
结论

- (1) 如果热电偶两材料相同, 则无论结点处的温度如何, 总电势为 0。
- (2) 如果两结点处的温度相同, 尽管 A、B 材料不同, 总热电势为 0。



结论

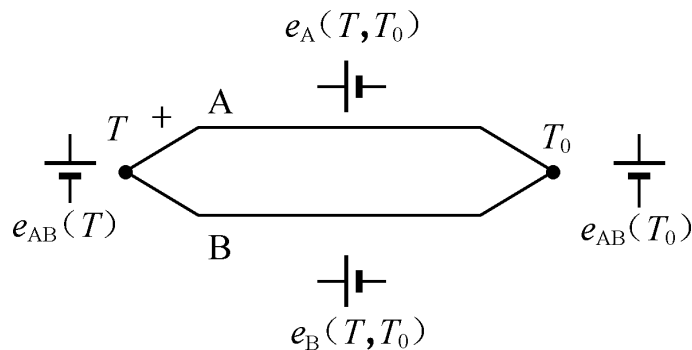
- (3) 热电偶热电势的大小，只与组成热电偶的材料和两结点的温度有关，而与热电偶的形状尺寸无关；与材料的中间温度分布无关，当热电偶两电极材料固定后，热电势便是两结点电势差。



结论

- (4) 如果使冷端温度 T_0 保持不变, 则热电动势便成为热端温度 T 的单一函数。

$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} = \frac{k}{e} (T - T_0) \ln \frac{n_A}{n_B}$$

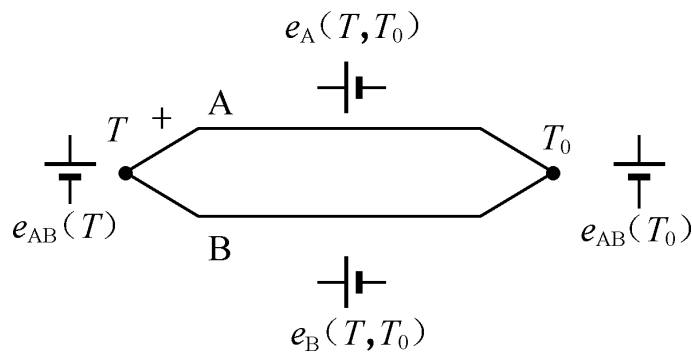


5、 热电偶的基本定律

- 1 . 均质导体定律
- 2 . 中间导体定律
- 3 . 标准电极定律
- 4 . 中间温度定律

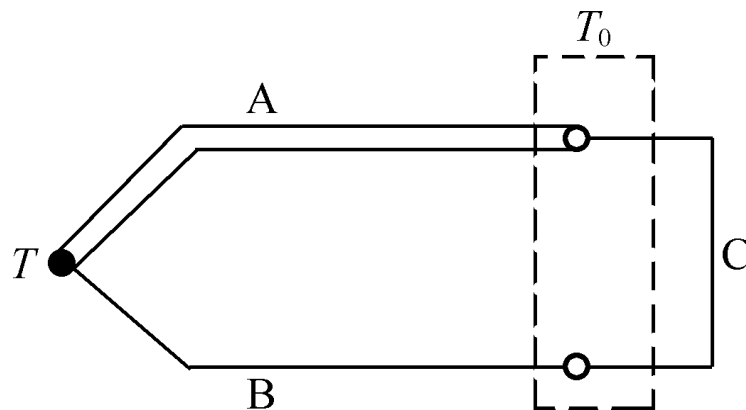
1. 均质导体定律

- 由一种均质导体组成的闭合回路中，不论导体的截面和长度如何以及各处的温度分布如何，都不能产生热电势。



2. 中间导体定律

- 在热电偶中接入第 3 种均质导体，只要第 3 种导体的两结点温度相同，则热电偶的热电势不变。



第 3 种导体接入热电偶回路

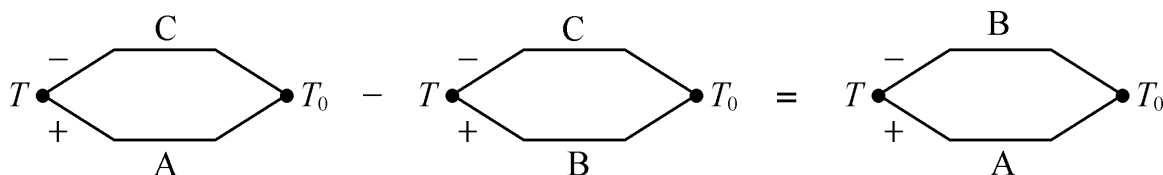
推论

- 热电偶的这种性质在实用上有很重要的意义，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测量。
- 推论：在热电偶中接入第 4、5……种导体，只要保证插入导体的两结点温度相同，且是均质导体，则热电偶的热电势仍不变。

3. 标准电极定律

- 已知热电极 A、B 分别与标准电极 C 组成热电偶在结点温度为 (T , T_0) 时的热电动势分别为 $E_{AC}(T, T_0)$ 和 $E_{BC}(T, T_0)$ ，则在相同温度下，由 A、B 两种热电极配对后的热电动势为

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



三种导体分别组成的热电偶

例 1

已知铂铑₃₀-铂热电偶的 $E_{AC}(1084.5, 0) = 13.937$ (mV)，铂铑₆-铂热电偶的 $E_{BC}(1084.5, 0) = 8.354$ (mV)。求铂铑₃₀-铂铑₆在相同温度条件下的热电动势。

解：

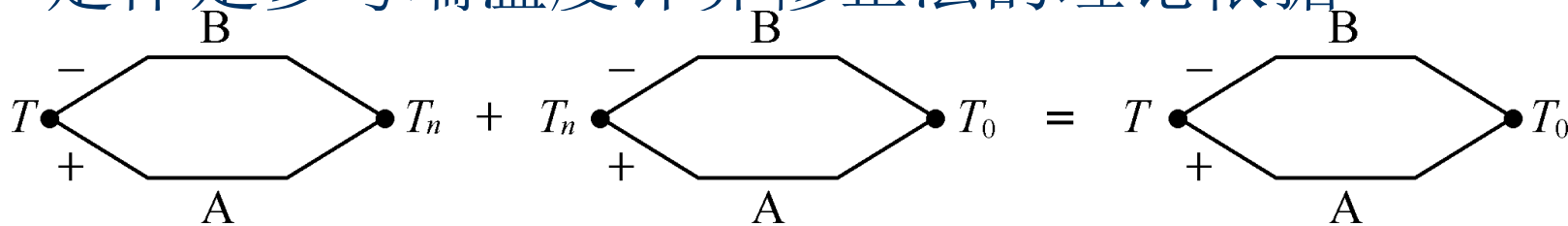
- 由标准电极定律可知，
- $E_{AB} (1\ 084.5, 0) = E_{AC} (1\ 084.5, 0) - E_{BC} (1\ 084.5, 0) = 13.937 - 8.354 = 5.583$
(mV)

4. 中间温度定律

- 热电偶在两结点温度分别为 T 、 T_0 时的热电势等于该热电偶在结点温度为 T 、 T_n 和 T_n 、 T_0 相应热电势的代数和，

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0)$$

- 定律是参考端温度计算修正法的理论依据



热电偶中间温度定律示意图

例 2

- 镍铬 - 镍硅热电偶，工作时其自由端温度为 30°C ，测得热电势为 39.17mV ，求被测介质的实际温度。

解：

- 由 $t_0=0^{\circ}\text{C}$ ，查镍铬 - 镍硅热电偶分度表， $E(30, 0) = 1.2\text{mV}$ ，又知 $E(t, 30) = 39.17\text{mV}$
- 所以 $E(t, 0) = E(30, 0) + E(t, 30) = 1.2\text{mV} + 39.17\text{mV} = 40.37\text{mV}$ 。
- 再用 40.37mV 反查分度表得 977°C ，即被测介质的实际温度。

3、热电偶类型

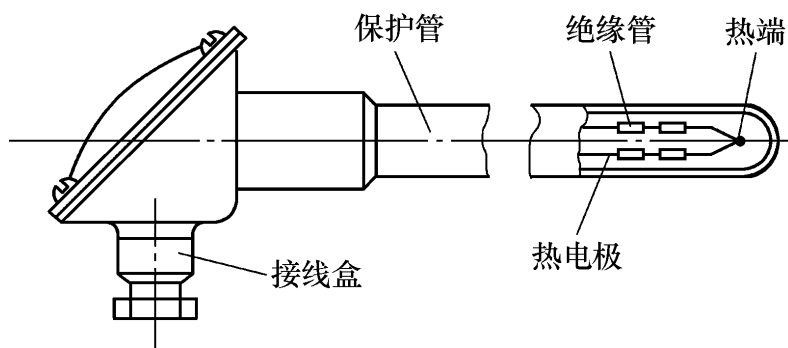
铂铑—铂热电偶用于测量较高的温度；

镍铬—镍铝（镍铬—镍硅）热电偶是贵重金属热电偶中最稳定的一种，用途很广，线性较好，热电势较大；

铜—康铜热电偶用于较低温度测量，具有较好的稳定性，尤其在 $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围内，误差小于 0.1°C 。

4、热电偶的结构形式

热电偶的结构形式较多，应用最广泛的主要有普通型热电偶及铠装热电偶。



普通型热电偶结构图



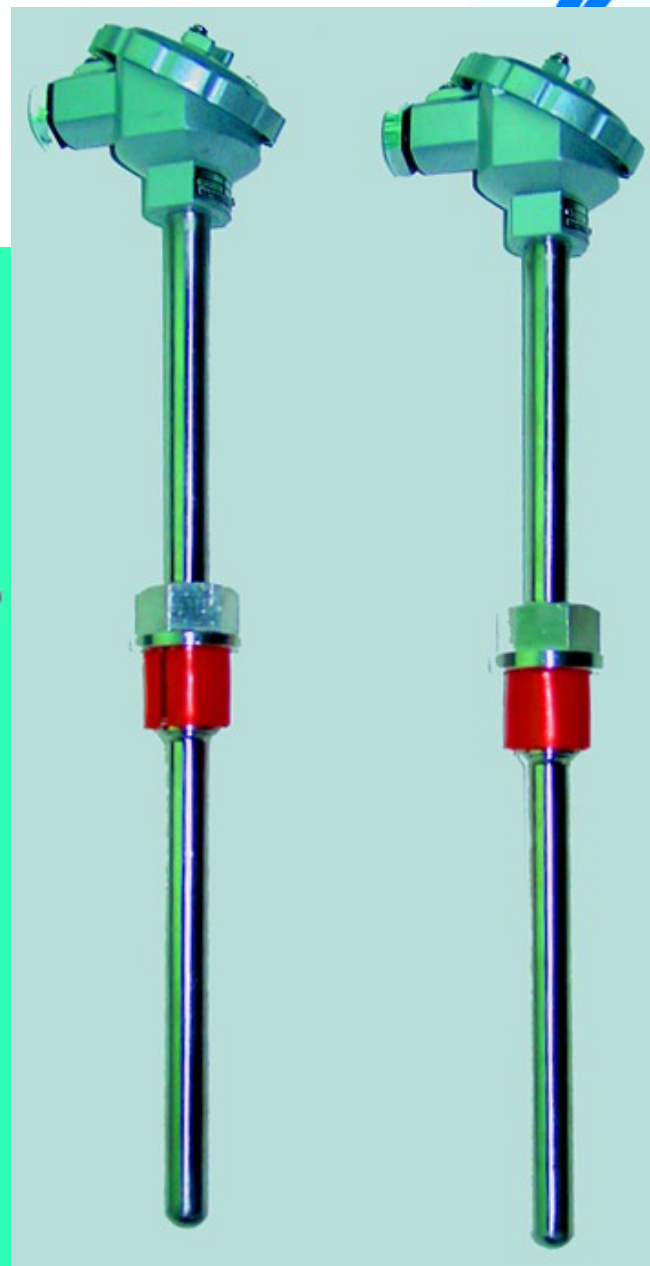
普通型热电偶实物图

普通装配型热电偶的外形

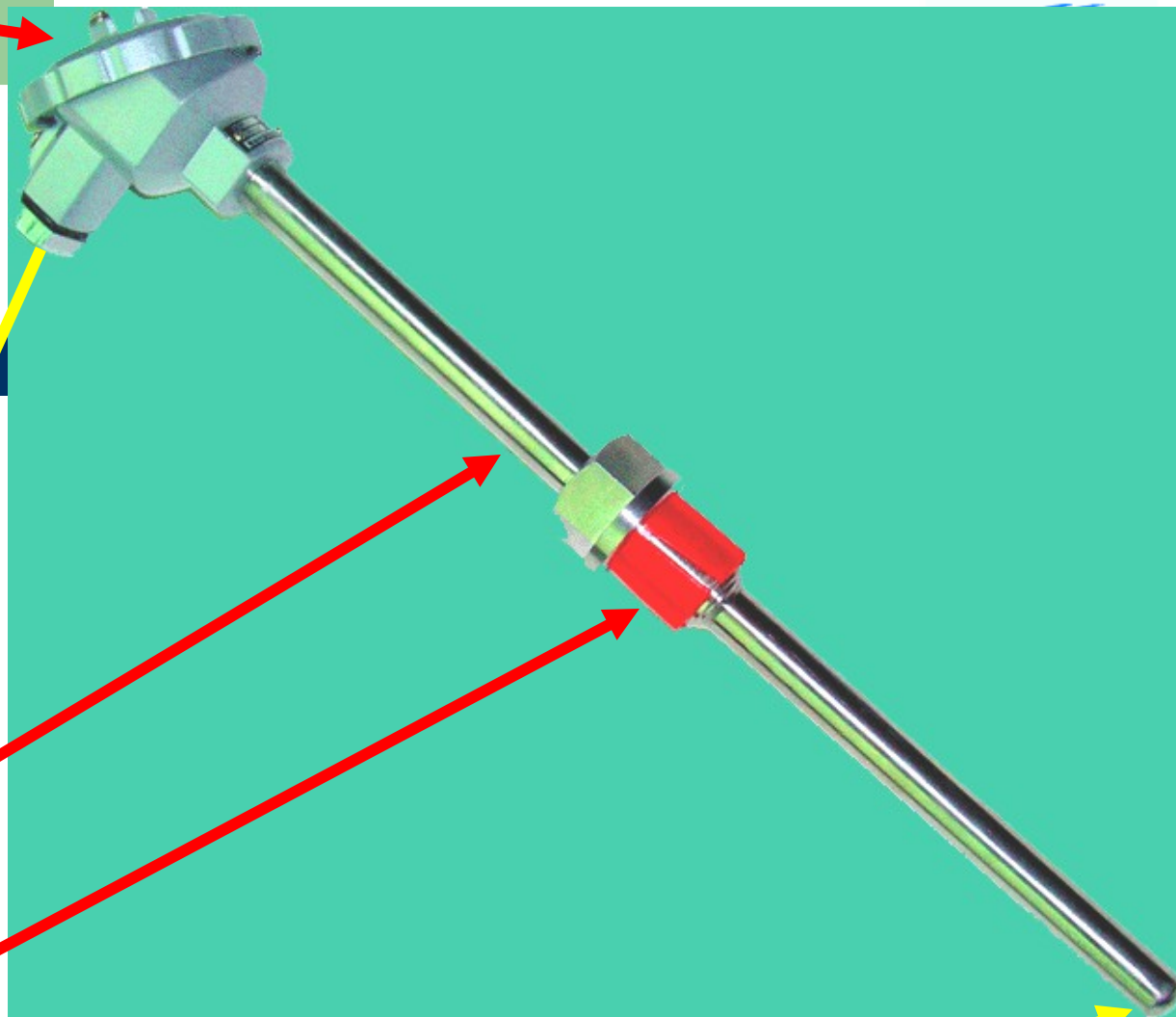
安装
螺纹



安装
法兰



接线盒



引出线套管

不锈钢保护管

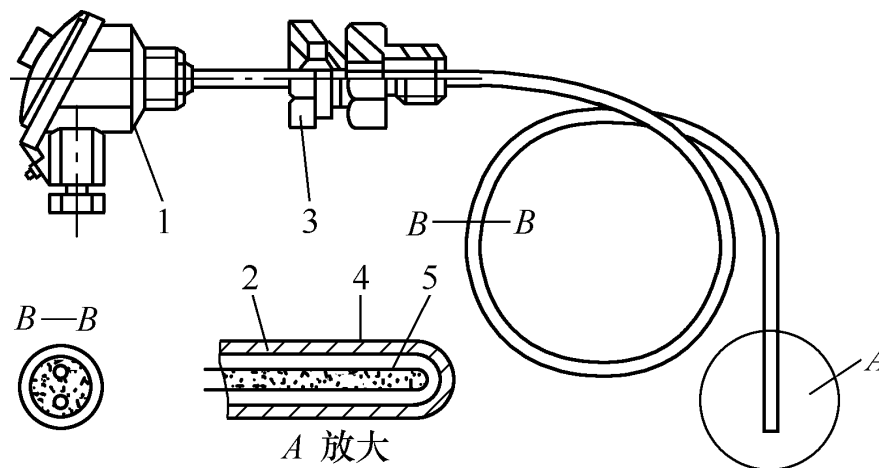
固定螺纹

(出厂时用塑料包裹)

热电偶工作端 (热端)

2. 铠装型热电偶

- 铠装型热电偶又称套管热电偶。它是由热电偶丝、绝缘材料和金属套管三者经拉伸加工而成的坚实组合体。



2. 铠装型热电偶

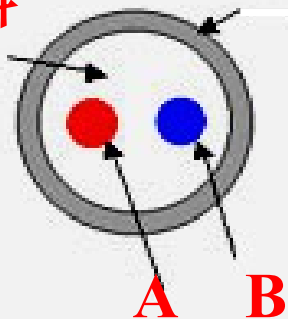
- 它可以做得很细很长，使用中随需要能任意弯曲。铠装型热电偶的主要优点是测温端热容量小，动态响应快，机械强度高，挠性好，可安装在结构复杂的装置上，因此被广泛用在许多工业部门中。

铠装型热电偶外形



铠装型热电偶可
长达上百米

绝缘
材料



薄壁金属
保护套管
(铠体)

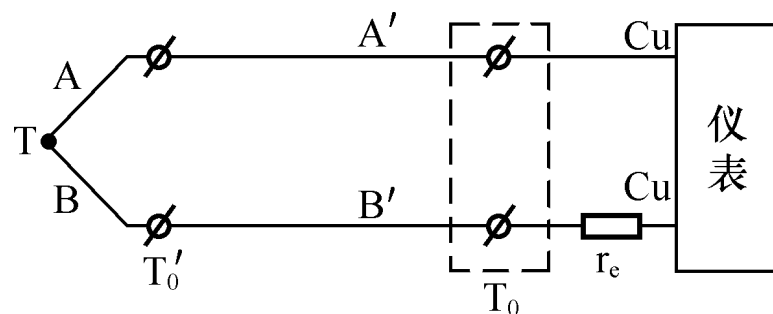
铠装型热电偶
横截面



法兰

5、热电偶与仪表的连接

热电偶的两个触点中，一个为热端或工作端；另一个为冷端。



热电偶的温度补偿

- 热电偶产生的热电势与两端温度有关。只有将冷端的温度恒定，热电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°C 时作出的，因此在使用时要正确反映热端温度，最好设法使冷端温度恒为 0°C 。
- 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，其温度不是恒定不变的。

1. 冷端恒温法

- (1) 0°C 恒温法 在实验室及精密测量中，通常把参考端放入装满冰水混合物的容器中，以便参考端温度保持 0°C ，这种方法又称冰浴法。
- (2) 其他恒温法 将热电偶的冷端置于各种恒温器内，使之保持恒定温度，避免由于环境温度的波动而引入误差。这类恒温器可以是盛有变压器油的容器，利用变压器油的热惰性恒温，也可以是电加热的恒温器，这类恒温器的温度不为 0°C ，故最后还需对热电偶进行冷端修正。

2. 补偿导线法

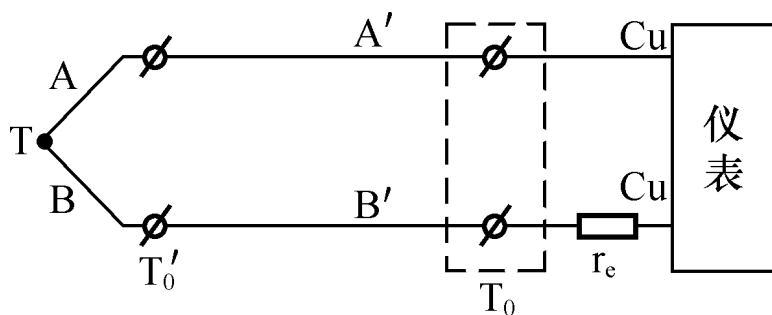
- 补偿导线的作用是将热电偶的冷端延长到温度相对稳定的地方。只有当冷端温度恒定时，产生的热电势才与热端温度成单值函数关系。
- 所谓补偿导线，实际上是一对材料化学成分不同的导线，在 $0 \sim 1500^{\circ}\text{C}$ 温度范围内与配接的热电偶有一致的热电特性，价格相对要便宜。

使用补偿导线必须注意以下几个问题。

- （1）两根补偿导线与两个热电极的结（接）点必须具有相同的温度。
- （2）只能与相应型号的热电偶配用，而且必须满足工作范围。
- （3）极性切勿接反，常用补偿导线负极的颜色均为白色。

测量某点温度的基本电路

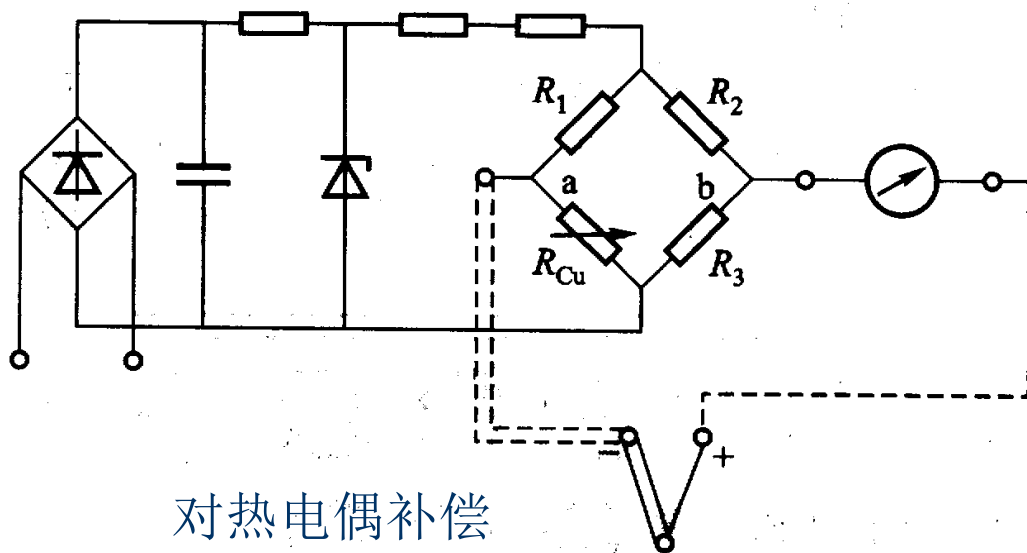
- 基本测量电路包括热电偶、补偿导线、冷端补偿器、连接用铜线、显示仪表。



热电偶基本测量电路

补偿电桥法

利用电桥产生的不平衡电压补偿冷端的温度。



对热电偶补偿

三、课题小结

- (1) 热电偶的工作原理及结构;
- (2) 热电偶的测温方法。

模块总结

- 介绍了 3 种常见的测温传感器的原理、结构及转换电路；
- 重点是如何应用测温传感器进行温度测量，并能够熟悉其相应外部接线方式及信号处理转换电路

- 作业：

书上 P32. 综合练习

一、填空题 第 3，4 题

二、选择题 第 3 题