



## 第十章 热电式传感器

---

### ◆ 定义

将温度变化转换为电信号/电参量变化的元件或装置

### ◆ 种类

- 热电偶传感器（有源）
- 热电阻（热敏电阻）传感器（无源）
- 集成温度传感器（有源）



# 主要内容

---

## ◆ 热电偶传感器\*\*\*

- 工作原理—热电效应（定性和定量）
- 热电偶基本定律
- 常用热电偶
- 热电偶的冷端补偿

## ◆ 热电阻（热敏电阻）传感器\*

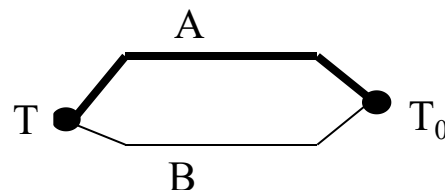
- 金属热电阻测温原理及常用热电阻
- 热敏电阻特性

# 热电偶传感器

## ■ 热电偶工作原理

### ■ 热电偶结构

- 两种电极：导体/半导体A、B
- 热电偶：导体/半导体A、B的组合
- 两个端（结合点）：参考端（低温端  $T_0$ ）、工作端（高温端  $T$ ）



- 热电效应（定性）：两种不同材料导体/半导体在连接处形闭合回路，如将这两个结合点处分别置于不同的温度下（ $T_0$ 和 $T_1$ ），两导体间产生热电势，在回路中形成电流的现象。

### ■ 热电势分类

#### ■ 接触电势

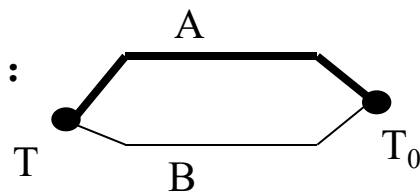
-- 不同材料具有不同的自由电子浓度（密度）；两种不同材料导体接触时，在节点处，高电子浓度导体中的电子向低浓度导体扩散，形成的电动势

# 热电偶传感器

- 接触电势：设：导体A、B的电子浓度分别为 $N_A$ 、 $N_B$ ，则：

$$e_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B} \quad \text{其中：} K \text{ 为波尔兹曼常数}$$

T 为结点所处温度



若 $N_A > N_B$ ，则 $e_{AB}(T) > 0$ ，反之亦然。故：电子浓度高的材料电位高。

- 温差电势

-- 导体中自由电子在不同温度下具有不同的动能；同一种金属导体，由于两头的温度不同，电子从高温段向低温段扩散，形成电动势，高温处带正电。

$$e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT$$

$\sigma_A$ 为汤姆逊系数，表示导体两端单位温度差时产生的电势，与材料性质和两端温度有关。

若 $T > T_0$ ，则 $e_{AB}(T) > 0$ ，反之亦然。

# 热电偶传感器

- 接触电势与温差电势的性质

$$e_{AB}(T) = -e_{BA}(T) \quad e_{AB}(T) + e_{BC}(T) = e_{AC}(T) \quad e_A(T, T_0) = -e_A(T_0, T)$$

- 回路总电势（沿同一回路方向）

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

讨论：①热电偶的材料相同时， $E_{AB}(T, T_0) = 0$     ? ? ?

②热电偶的两个节点所处的温度相同时， $E_{AB}(T, T_0) = 0$     ? ? ?

所以形成热电势的两个必要条件：

①两种导体的材料不同②节点所处的温度不同

- 金属导体—温差电势极小，接触电势起决定作用  $E_{AB}(T, T_0) \approx e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0)$
- 实际测量中：

$$e_{AB}(T_0) = e_{AB}(0) = f(0) = c$$

$$E_{AB}(T, T_0) \approx e_{AB}(T) - e_{AB}(0) = f(T) - c$$

$f(T)$  是T的单值函数



# 热电偶传感器

## ■ 热电偶基本定律

- ①中间导体定律：在热电偶测温回路内，接入第三种导体时，只要第三种导体的两端温度相同，则对回路的总热电势没有影响，即热电偶接过渡（中间）导体（传感器引出）时，总回路电势不变。（应用：测量引线）

$$E_{ABC}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_0)$$

- ②参考电极定律：保证接点温度一样时，导体A、B组成的热电偶产生的热电势等于由导体A、C和C、B组成的热电偶产生的热电势之和。  
（应用：间接测量）

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

- ③中间温度定律：在热电偶测温回路中， $t_c$ 为热电极上某一点的温度，热电偶AB在接点温度为 $t$ 、 $t_0$ 时的热电势 $e_{AB}(t, t_0)$ 等于热电偶AB在接点温度 $t$ 、 $t_c$ 和  $t_c$ 、 $t_0$ 时的热电势（应用：分度表，温度补偿）

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



# 热电偶传感器

---

## ■ 常用热电偶

### ■ 选型基本要求

- 电阻温度系数小，导电率大—保证自身电阻小，减少分流
- 呈线性/近线性的单值函数关系输出—获得线性输出

### ■ 类型

- 铂铑—铂热电偶，特点：精度高，〈1300° C
- 镍铬—镍硅热电偶，特点：线性好，-50~1300° C，价格低
- 镍铬—铐铜热电偶，特点：灵敏度高，常温测量，-50~500° C，价格低
- 钨铼10—钨铼20热电偶，特点：精度高，测高温、~2000° C，成本高



# 热电偶传感器

---

## ■ 热电偶的冷端补偿原因

### ■ 补偿原因

- 仅当热电偶冷端温度保持不变时，热电势才是被测温度的单值函数；
- 测温时，冷端往往暴露在空气中且距离工作段较近，冷端温度易波动；
- 热电偶分度表是以零度为参考温度的

### ■ 补偿方法

- 导线补偿法（测量前）

用合适的金属导线连接热电偶的两冷端，以使得冷端远离工作端，保持恒温

\*\* 在 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围内，补偿导线应和所连接的热电偶具有相同的热电性能 ???



# 热电偶传感器

-- 冰浴法（测量前）

冷端放置在冰水混合物或0° C恒温器中

-- 冷端温度校正法（测量后）

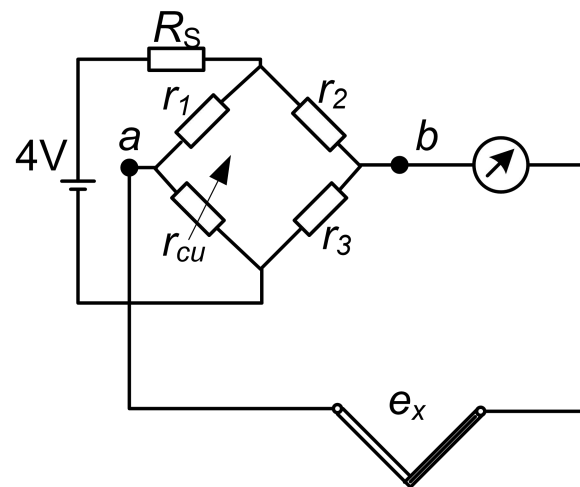
✓ 热电势修正法（间接）—热电偶分度表（中间温度定律）

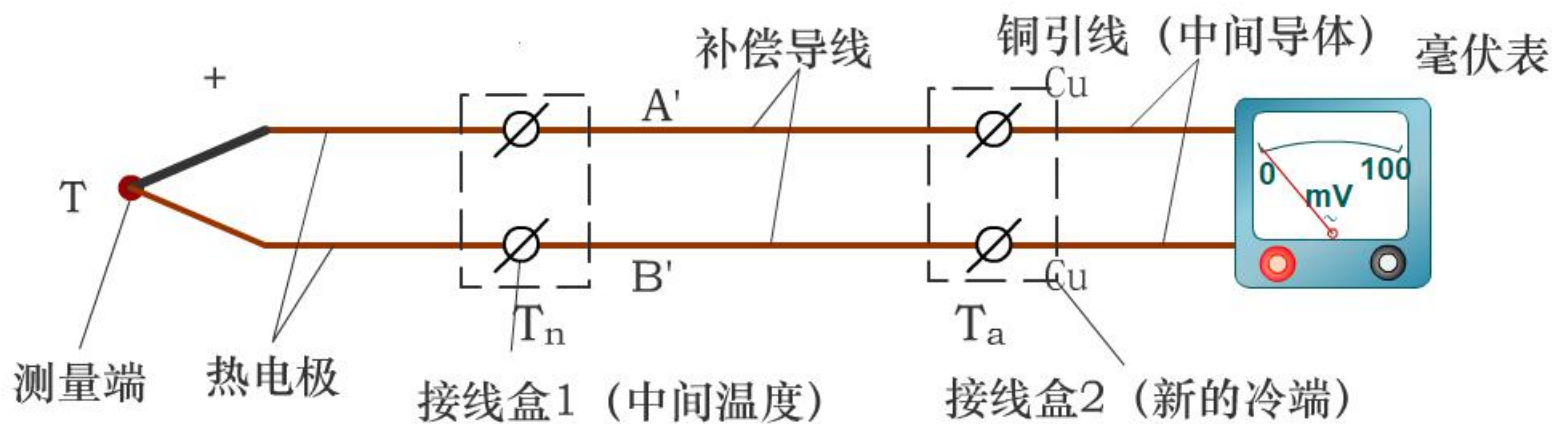
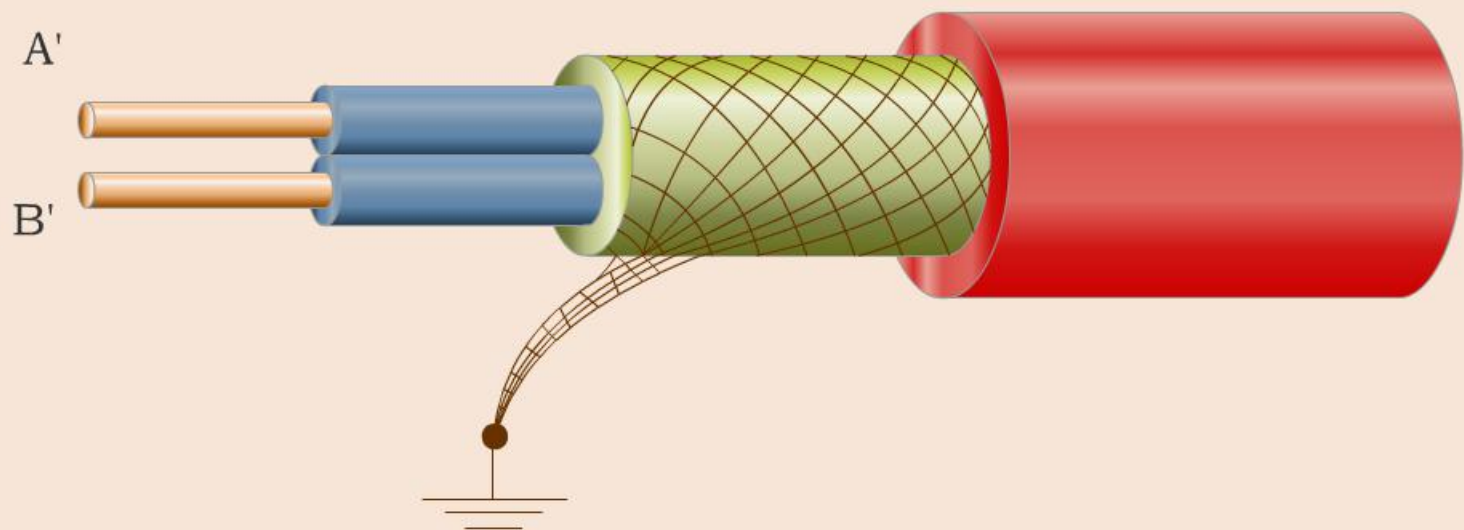
✓ 温度修正法（直接）-- 热电偶修正系数

-- 电桥补偿法（测量后）

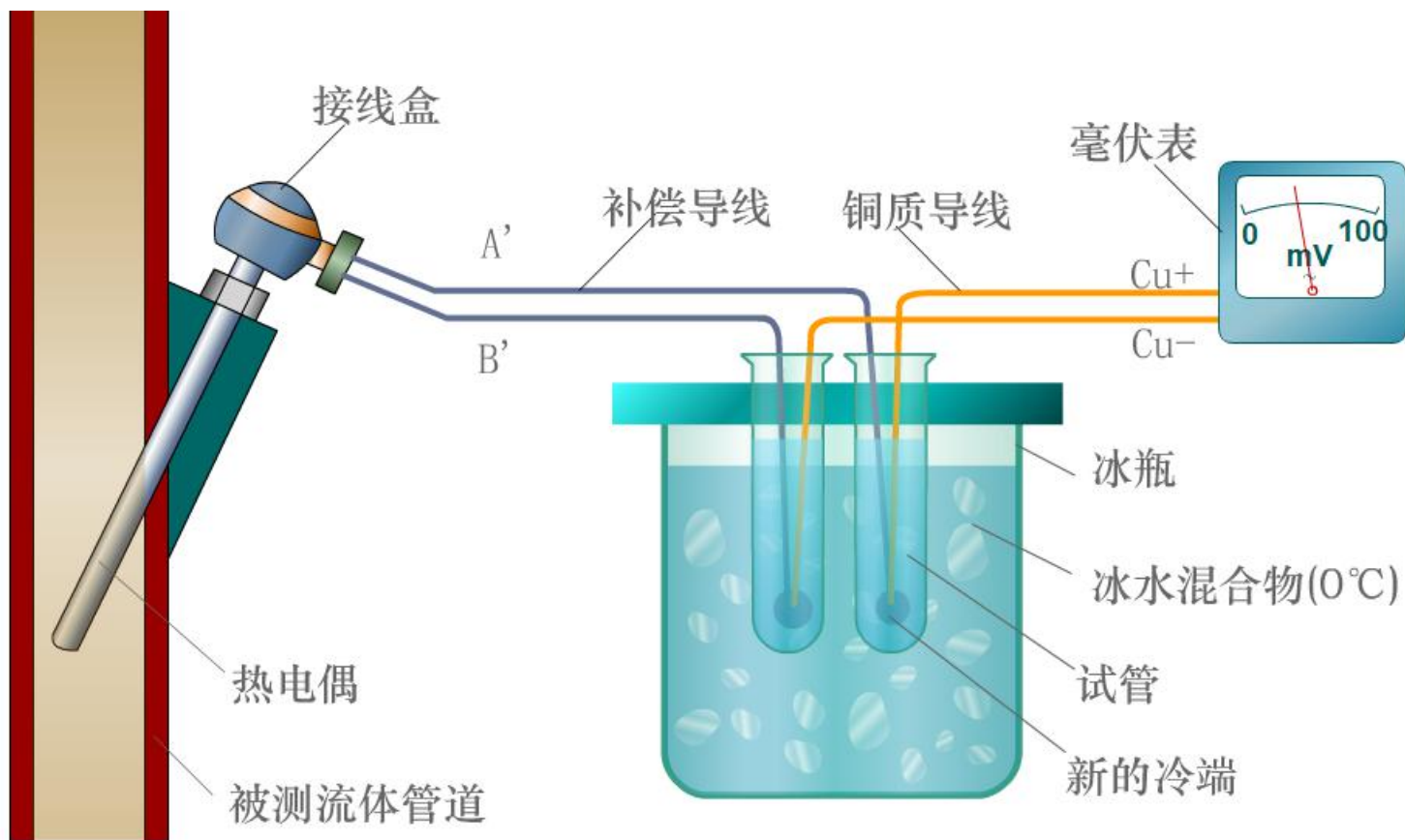
1) 补偿电桥由桥臂电阻（ $r_1, r_2, r_3$ 和补偿电阻 $r_{cu}$ ）、限流电阻 $R_s$ 和稳压电源组成。

2) 补偿电桥与冷端处于相同的温度场，当冷端温度变化引起热电势变化时，补偿电阻将调整电桥输出电压 $U_{ab}$ 以补偿热电势的变化。补偿的效果取决于桥臂电阻和桥路电流的选择。





热电偶补偿导线的外型图



冰浴法接线原理



# 热电阻传感器

---

- 原理：导体的电阻率  $\rho$  随温度  $T$  变化。
- 特点：灵敏度低，但精度高，宜用于常温和低温测量。
- 对导体材料的要求：理化性能稳定， $\rho$  随  $T$  的变化大，线性好。  
常用：铂、铜。

- 铂电阻—高温下，物理、化学性质稳定，故可测高温

$$R_t = \begin{cases} R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3], & t \in (-200, 0)C^\circ \\ R_0 [1 + At + Bt^2], & t \in (0, 850)C^\circ \end{cases}$$

- 铜电阻—线性输出，温度超过100 ° C被氧化

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad t \in (-50, 100)C^\circ$$

- 测量电路：半桥/全桥



# 热敏电阻传感器

---

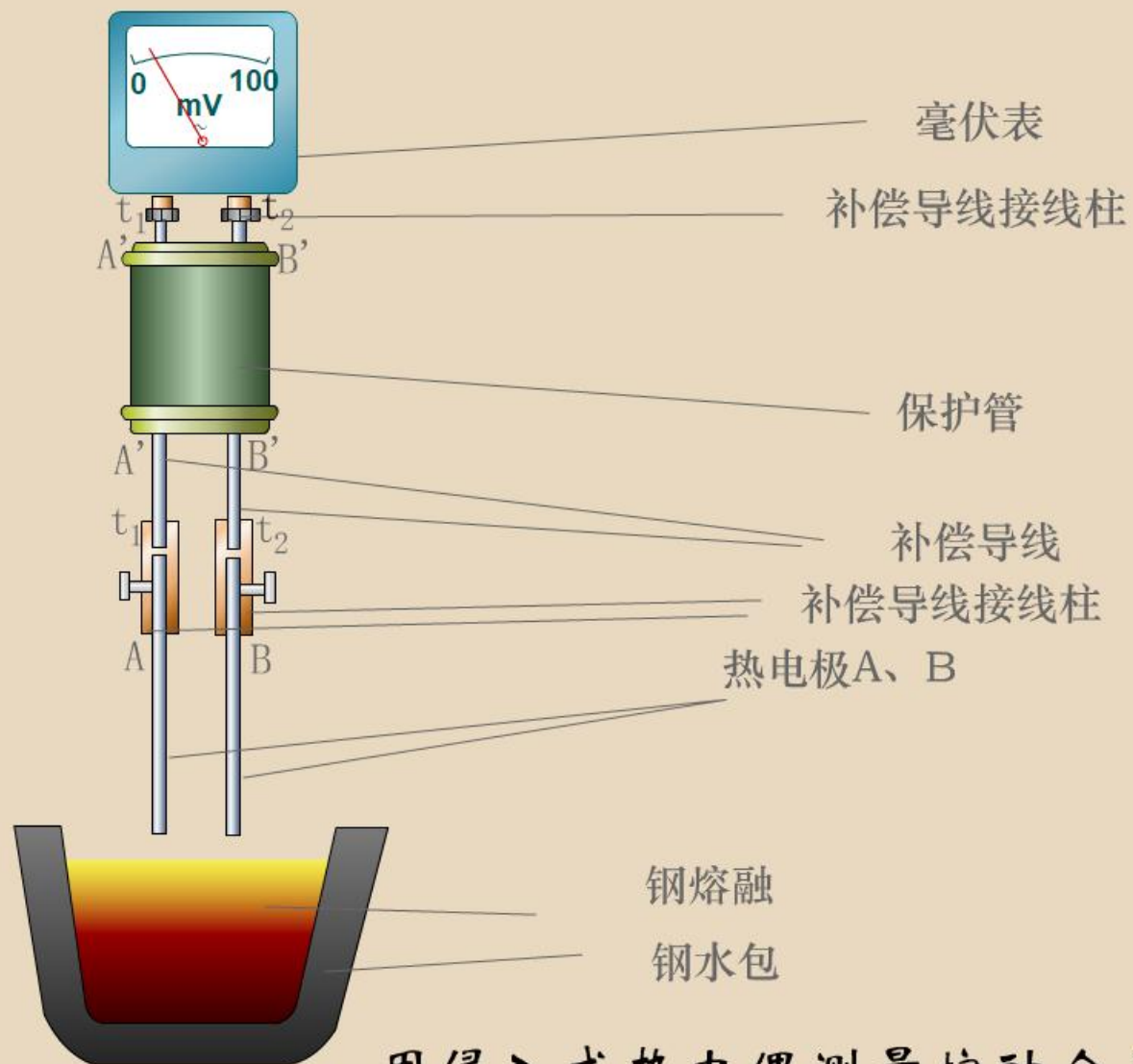
- 原理：半导体的电阻随温度T变化。
- 特点：灵敏度高，但非线性输出、元件稳定性差。
- 分类：负温度系数、正温度系数热敏电阻
- 基本参数

- 电阻温度系数—灵敏度

$$\alpha_t = \frac{1}{R_T} \times \frac{dR_T}{d_T}$$

- 时间常数—对温度的敏感程度

零功率测量状态下，环境温度突变时，热敏电阻阻值从初值变化到初值与现阻值差值的63.2%所需的时间



用侵入式热电偶测量熔融金属的原理