

# 第 8 章

## 热电式传感器

### 热电式传感器

#### 定义

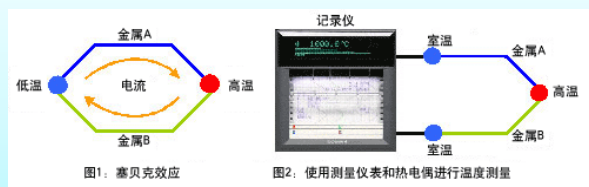
- 利用转换元件参数随温度变化的特性，将与温度有关的参数变化转换为电量变化的元件或装置。

#### 分类

- 按感温方式分两类：接触式和非接触式检测。
- 接触式：热膨胀式，热电势，热电阻，PN结和集成式等温度传感器；
- 非接触式：光学高温传感器，热辐射式温度传感器等。

### 一、热电偶式传感器

- 把被测物理量转化为电源性信号的传感元件
- 应用很广泛的测温传感元件
- 在高温测量中尤其重要

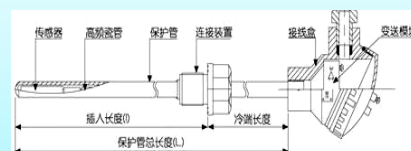
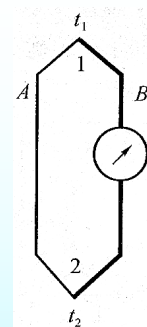


### 一、热电偶式传感器

#### 原理

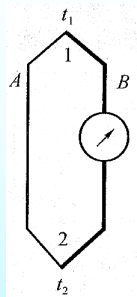
- 热电偶传感器物理原理：温差电势现象
- A、B为两种金属材料，在1、2处有两个结合端，各处于不同的温度 $t_1$ 、 $t_2$ 下
- 不同金属内自由电子逸出电位不同，二者相接后逸出电位低的金属有较多电子进入逸出电位高的金属

——形成接触电位差



### 热电偶式传感器原理 (续)

- 同一金属在不同温度下的逸出电位不相同
- 两种金属的接点处在不同温度点形成不同的接触电位差  
回路中在1、2两点间产生净电势
- 电势取决于两金属材料类型和1、2两点间的温度差
- 选定材料，固定一端温度 $t_2$ ，则温差电势唯一决定于 $t_1$   
可用温差电势测量温度 $t_1$
- 电路中插入电压表测量电势，插入的第三种金属若与回路的两个接点处于相同温度，回路的温差电势不因第三种金属的插入而改变



### 热电势分类

#### 接触电势

不同材料电子浓度不同，在节点处发生扩散导致电势设：导体A、B的电子浓度分别为 $N_A$ 、 $N_B$ ，则：

$$e_{AB}(T) \propto \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B}$$

其中： $k$ 为玻尔兹曼常数， $T$ 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。

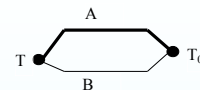
#### 温差电势

同一种金属导体，由于二头的温度不同，电子从高温段向低温段扩散，高温处带正电。

$$e_A(T, T_0) \propto \int_{T_0}^T \alpha_A dT$$

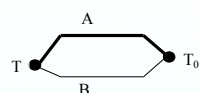
$\alpha_A$ 与 $T_0$ 、 $T$ 有关，汤姆逊系数，表示导体两端单位温度差时产生的电势。

若 $T > T_0$ ，则 $e_{AB}(T) > 0$ ，反之亦然。



## 一、热电偶式传感器

## 接触电势与温差电势性质



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

## 回路总电势

$$E_{AB}(T, T_0) \square \square e_{AB}(T) \square \square e_B(T, T_0) \square \square e_{BA}(T_0) \square \square e_A(T_0, T) \square \square e_{AB}(T) \square \square e_B(T, T_0) \square \square e_A(T, T_0) \square \square e_{AB}(T_0)$$

讨论：①热电偶的材料相同时， $E_{AB}(T, T_0)=0$

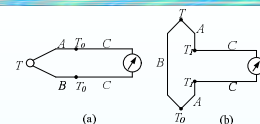
②热电偶的两个节点所处的温度相同时， $E_{AB}(T, T_0)=0$

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

## 一、热电偶式传感器

## 热电偶基本定律



①均质导体定律：热电偶必须由两种不同性质的均质材料构成。

②中间导体定律：在热电偶测温回路内，接入第三种导体，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（传感器引出的测量引线）时，总回路电势不变。

$$E_{ABC}(T, T_0) \square \square e_{AB}(T) \square \square e_B(T, T_0) \square \square e_{BC}(T_0) \square \square e_C(T_0, T_0) \square \square e_{CA}(T_0) \square \square e_A(T_0, T)$$

$$e_C(T_0, T_0) \square \square 0 \quad \square \square E_{ABC}(T, T_0) \quad \square \square e_{AB}(T) \square \square e_B(T, T_0) \square \square e_{BA}(T_0) \square \square e_A(T_0, T) \quad \square \square E_{AB}(T, T_0)$$

## 一、热电偶式传感器

## 热电偶基本定律(续1)

③参考电极定律(标准电极定律)

设结点温度为 $T$ 、 $T_0$ ，则用导体 A、B 组成的热电偶产生的热电势等于导体 A、C 组成的热电偶和导体 C、B 组成的热电偶产生的热电势的代数和。有： $E_{AB}(T, T_0) \square \square E_{AC}(T, T_0) \square \square E_{CB}(T, T_0)$

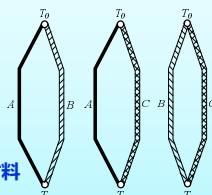
其中，C为参考电极，或称标准电极，一般由铂制成。

$$E_{AC}(T, T_0) \square \square E_{CB}(T, T_0)$$

$$\square \square e_{AC}(T) \square \square e_C(T, T_0) \square \square e_{AC}(T_0) \square \square e_A(T, T_0)$$

$$\square \square e_{CB}(T) \square \square e_B(T, T_0) \square \square e_{CB}(T_0) \square \square e_C(T, T_0)$$

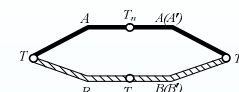
$$\square \square e_{AB}(T) \square \square e_B(T, T_0) \square \square e_{AB}(T_0) \square \square e_A(T, T_0) \square \square E_{AB}(T, T_0)$$



参考电极定律意义：铂丝理化性能稳定，若能测得各种材料热电极对铂丝的热电特性，就可推得任意材料间的热电特性。

## 一、热电偶式传感器

## 热电偶基本定律(续2)



④中间温度定律：在热电偶测温回路中， $t_n$ 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 $t$ 、 $t_n$ 和 $t_n$ 、 $t_0$ 时的热电势（温度补偿）

$$E_{AB}(T, T_0) \square \square E_{AB}(T, T_n) \square \square E_{AB}(T_n, T_0)$$

$$E_{AB}(T, T_n) \square \square e_{AB}(T) \square \square e_{AB}(T_n) \square \square \int_{T_n}^T \frac{1}{T} dT \square \square \int_{T_0}^{T_n} \frac{1}{T} dT$$

所以： $E_{AB}(T, T_n) \square \square e_{AB}(T_n) \square \square e_{AB}(T_0) \square \square \int_{T_0}^T \frac{1}{T} dT \square \square \int_{T_0}^{T_n} \frac{1}{T} dT$ （将 $T_n$ 置换成 $T$ ）

即得： $\square \square E_{AB}(T, T_n) \square \square E_{AB}(T_n, T_0) \square \square e_{AB}(T) \square \square e_{AB}(T_0) \square \square \int_{T_0}^T \frac{1}{T} dT \square \square \int_{T_0}^{T_n} \frac{1}{T} dT$

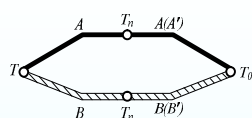
当 $T_0=0$ 时，有： $E_{AB}(T, T_0) \square \square E_{AB}(T, T_n) \square \square E_{AB}(T_n, T_0)$

$$E_{AB}(T, 0) \square \square E_{AB}(T, T_n) \square \square E_{AB}(T_n, 0)$$

中间温度定律为制定热电偶分度表奠定理论基础。从分度表查出参考端为零度时的热电势，即可求得参考端温度不为零时的热电势。

## 一、热电偶式传感器

## 热电偶基本定律(续3)



④中间温度定律（续）：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（温度补偿）

同理，以导体A'和B'分别替代导体 A 和 B 时，有

$$E_{AB}(T, T_0) \square \square E_{AB}(T, T_n) \square \square E_{A'B'}(T_n, T_0)$$

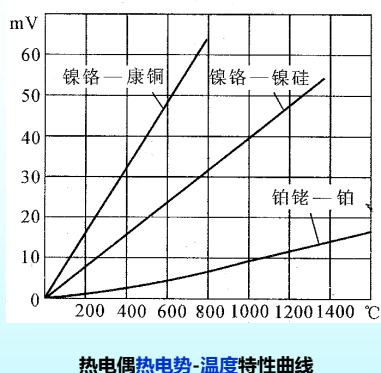
该式为补偿导线的应用提供了理论依据。

## 一、热电偶式传感器

## 常用热电偶

- 铂铑-铂：精度高， $< 1300^\circ\text{C}$
- 镍铬-镍硅：线性好， $-50 \sim 1300^\circ\text{C}$ ，价格低
- 镍铬-康铜：灵敏度高，常温测量， $-50 \sim 500^\circ\text{C}$ ，价格低
- 钨铼10-钨铼20：精度高，测高温， $\sim 2000^\circ\text{C}$ ，成本高

- 热电偶材料随测温范围而定
- 低于1100℃，采用普通金属  
铜-康铜，镍铬-镍硅
- 1100~1600℃，采用铂金属
- 高于1600℃，采用耐极高温材料：钨-铜(掺有1%的铁)
- 热电偶存在非线性问题
- 后续电路需增加非线性校正  
旨在获得与温度成线性关系的输出



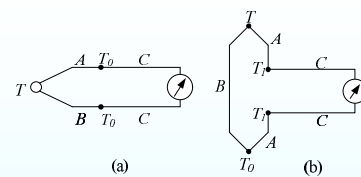
热电偶热电势-温度特性曲线

## 一、热电偶式传感器

### 热电偶的冷端补偿

#### 1. 补偿原因

- 仅当热电偶冷端温度不变时，热电势才是被测温度的单值函数；
- 测温时由于冷端暴露在空气中，冷端往往和工作端比较接近，故冷端温度易波动；
- 热电偶分度表是以零度为参考温度；
- 实际应用中必须进行冷端温度补偿。



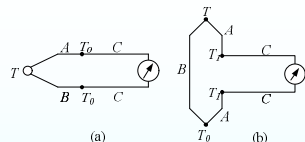
## 一、热电偶式传感器

### 热电偶的冷端补偿

#### 2. 补偿方法

##### (1) 导线法补偿法

- 目的：使冷端远离工作端，和测量仪表一起放到恒温或温度波动小的地方
- 方法：最简单的方法是延长热电偶长度，但安装不便，费用高，实际应用中采用合适的补偿导线。
- 要求：补偿导线在0~100℃范围内，所连接的热电偶有相同的热电性能，且补偿导线是廉价金属。
- 冷端有自动补偿装置，补偿导线才有意义，且连接处应小于100℃；
- 补偿导线不能选错。如：铂铑-铂热电偶用铜-镍铜作补偿导线；镍铬-镍硅热电偶用铜-康铜作补偿导线。



## 一、热电偶式传感器

### 热电偶的冷端补偿

#### 2. 补偿方法 (续1)

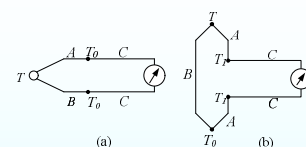
##### (2) 冷端温度计算校正法

热电势修正法：冷端温度不为零时，运用热电偶分度表修正，

温度修正法：设  $T'$  为仪表指示温度， $T_0$  为冷端温度；则被测实际温度  $T$  为

$$T = T' + kT_0$$

式中， $k$  为热电偶修正系数，与热电偶种类和测温范围相关，有表可查。

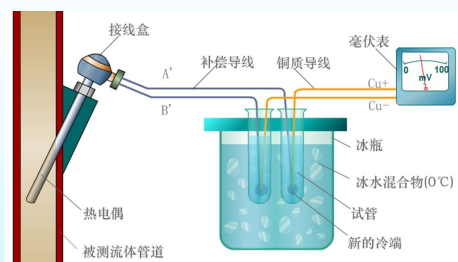


## 一、热电偶式传感器

### 热电偶的冷端补偿

#### 2. 补偿方法 (续2)

##### (3) 冰浴法



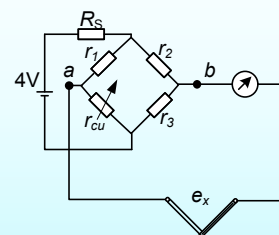
- 冷端用冰水混合物或 0℃ 恒温器保持在 0℃。
- 该方法可避免校正的麻烦，但使用不便，通常在实验室使用。

## 一、热电偶式传感器

### 热电偶的温度补偿

- 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。
- 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。

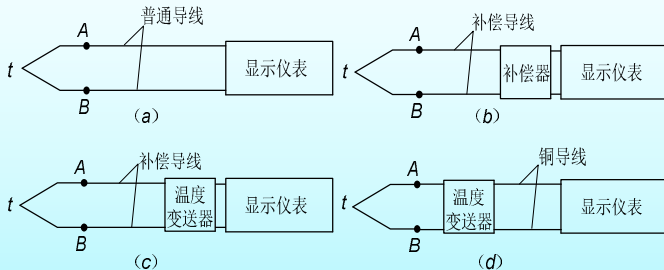
补偿的效果取决于桥臂电阻和桥路电流的选择。



## 一、热电偶式传感器

### 热电偶的应用

#### 1. 热电偶测温系统



## 一、热电偶式传感器

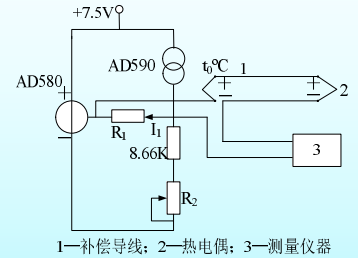
### 热电偶的应用

#### 2. 热电偶冷端补偿电路

AD590与热电偶冷端处于同一温度下。AD590是一个三端稳压器，其输出电压为2.5V。电路工作时，调整电阻  $R_2$ ，使得

$$I_1 = t_0 \times 10^{-3} \text{ (mA)}$$

这样，在电阻  $R_1$  上产生一个随冷端温度  $t_0$  变化的补偿电压  $U_1 = I_1 R_1$ 。

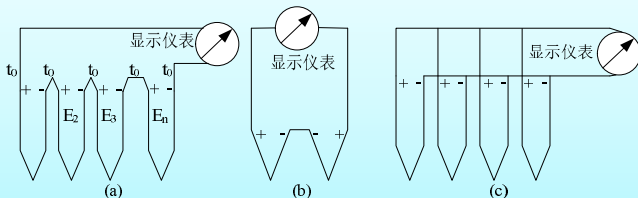


## 一、热电偶式传感器

### 热电偶的应用

#### 3. 热电偶连接

- 特殊情况下，同一分度号的热电偶，冷端温度相同时，可串联和并联使用；
- 正向串联的热电偶可增加热势输出，提高灵敏度；
- 并联可测量平均温度；反向串联可测两点温差。



- 热电偶测温元件的**势容量较大**

热惯性较大

- 接近于一阶惯性环节的特性

测量变化较快的热动态过程很难得到理想的不失真响应

只能测定静态、准静态、慢速变化的热过程

- 测量中需从被测对象中吸热

影响被测对象的温度场

- 负载效应较大

需要予以重视

- 热电偶测温元件的**势容量较大**

热惯性较大

- 接近于一阶惯性环节的特性

测量变化较快的热动态过程很难得到理想的不失真响应

只能测定静态、准静态、慢速变化的热过程

- 测量中需从被测对象中吸热

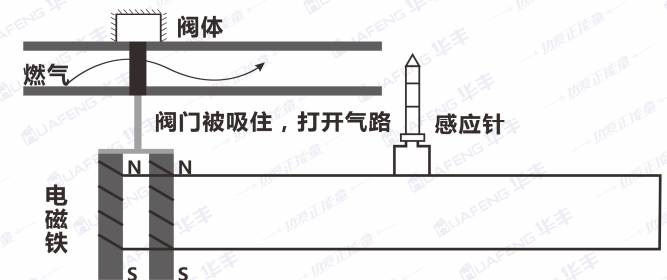
影响被测对象的温度场

- 负载效应较大

需要予以重视



原装西班牙奥克利热电偶  
双核、双线圈、独立运作、双重保险



#华丰社具装配每个热电偶出厂都有独立编码，慎防假冒。

## 二、热电阻传感器

- 原理：导体的  $\rho$  随温度  $T$  变化。
- 特点：灵敏度低，精度高，宜用于常温和低温测量。
- 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。

## 二、热电阻传感器

### 1. 测温原理

- 导体的电阻率  $\rho$  随温度  $T$  变化。
- 很多金属有正电阻温度系数，温度越高，电阻越大，据此制成热电阻。
- 热电阻虽然灵敏度较低，但精度高，宜用于常温和低温测量。
- 制作热电阻的导体材料需满足：
  - 电阻温度系数大，电阻随温度变化保持单值，线性好；热容量小；电阻率尽量大，以减小元件尺寸；
  - 工作范围内，物理、化学性能稳定；材料复制性好，价格便宜。

## 二、热电阻传感器

### 2. 常用金属热电阻

#### (1) 铂电阻

特点：在氧化性介质中，高温下的物理、化学性质稳定；在还原性介质中，电阻-温度特性会发生变化。电阻温度特性可表示为

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

式中： $R_t$ ——温度为  $t^\circ\text{C}$  时，铂电阻的电阻值；  
 $R_0$ ——温度为  $0^\circ\text{C}$  时，铂电阻的电阻值。

## 二、热电阻传感器

### 2. 常用金属热电阻 (续)

#### (2) 铜电阻

特点：电阻值与温度近似线性，电阻温度系数大，易加工，价格便宜；但电阻率小，温度超过  $100^\circ\text{C}$  时易氧化，测温范围一般在  $-50 \sim 100^\circ\text{C}$ 。

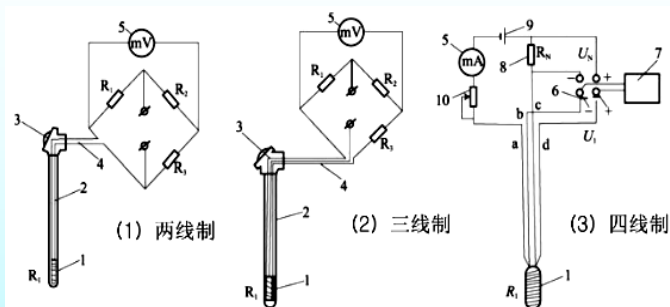
电阻温度特性为：

$$R_t = R_0 [1 + \alpha t]$$

式中： $R_t$ ——温度为  $t^\circ\text{C}$  时，铜电阻的电阻值；  
 $R_0$ ——温度为  $0^\circ\text{C}$  时，铜电阻的电阻值；  
 $\alpha$ ——铜电阻的电阻温度系数。

## 二、热电阻传感器

### 3. 常用测量电路



1-热电阻感温元件；2、4-引线；3-接线盒；5-显示仪表；6-转换开关；7-电位差计；8-标准电阻；9-电池；10-滑线电阻

热电阻的几种引线方式

## 三、半导体热敏电阻传感器

- 热敏电阻的电阻温度系数绝对值比金属电阻大  $10 \sim 100$  倍，灵敏度高；
- 体积小，使用方便，热惯性小，响应速度快，阻值范围大 ( $10^2 \sim 10^3 \Omega$ )；
- 不需要冷端补偿，功耗小，易实现远距离测量；
- 阻值与温度变化呈非线性，元件稳定性、互换性差；
- 热敏电阻根据电阻温度特性，可分为两类：
  - 负温度系数热敏电阻，正温度系数热敏电阻。
- 技术参数
  - 标称电阻值  $R_{25}(\Omega)$ ，电阻温度系数，材料常数  $B$ ，时间常数

# The End