

## 第二篇 常用传感器的原理及应用

### 第11章 热电式传感器

1. 掌握传感器工作原理及特性（**热电偶**）
2. 理解传感器的测量电路
3. 了解传感器的应用



## 11.1 概述

- 温度是表征物体冷热程度的物理量。它体现了物体内部分子运动状态的特征。
- 温度是不能直接测量的。只能通过物体随温度变化的某些特性（如体积、长度、电阻等）来间接测量。
- 热电式传感器将温度变化转换成电量（电阻、电势等），应用广泛。
- 按测温方法不同，热电式传感器分为接触式和非接触式两种。



- 接触式测温是基于 **热平衡原理**，即测温敏感元件（传感器）必须与被测介质接触，是两者处于平衡状态，具有同一温度。如水银温度计、热敏电阻、热电偶等。
- 非接触式测温是利用 **热辐射原理**，测温的敏感元件不与被测介质接触，利用物体的热辐射随温度变化的原理测定物体温度，故又称辐射测温。如辐射温度计，红外测温仪等。



表11.1 接触式与非接触式测温方法比较

	接触式	非接触式
必要条件	感温元件必须与被测物体相接触。	感温元件能接收到物体的辐射能。
特点	不适宜热容量小的物体温度测量；不适宜动态温度测量；便于多点、集中测量和自动控制	被测物体温度不变；适宜动态温度测量；适宜表面温度测量。
测量范围	适宜1000℃以下的温度测量。	适宜高温测量。
测温精度	测量范围的1%左右。	一般在10℃左右。
滞后	较大。	较小。



表11.2 常用热电式传感器类型及特点

测温方式	传感器类型		测温范围 ( $^{\circ}\text{C}$ )	精度 (%)	特 点	
接触式	热膨胀式	水 银	-100~600	0.1~1	结构简单、耐用，但感温部体积较大	
		双金属		-50~500		1~3
		压力	液	-100~600		1
			气	-200~600		
	热电偶	钨—铼		1000~2800	0.3~0.5	种类多、适应性强，结构简单，应用广泛。须注意冷端温度补偿及动圈式仪表内阻对测量结果的影响
		铂铑-铂		0~1600	0.2~0.5	
		其他		-200~1200	0.4~1.0	
	热电阻	铂		-200~600	0.1~0.3	标准化程度高，精度及灵敏度均较好，感温部大，须注意环境温度的影响
		镍 铜		-150~300 -50~150	0.2~0.5 0.1~0.3	
			热敏电阻	-50~300	0.3~1.5	体积小，响应快，灵敏度高；线性差，须注意环境温度影响



非接触式	辐射温度计	100~3500	1	非接触测温，不干扰被测温度场，辐射率影响小，应用简便，不能用于低温
	光高温计	200~3200	1	
	热电探测器	200~2000	1	非接触测温，不干扰被测温度场，响应快，测量范围大，适于测温度分布，易受外界干扰，定标困难
	热敏电阻探测器	-50~3200	1	
光子探测器	0~3500	1		

本章主要介绍热电阻、**热电偶**及新型热电式传感器。



## ➤ 温标的基本概念

温标是温度的数值表示方法，是用来衡量物体温度的尺度。它规定了温度读数的起点(零点)和测量温度的单位，常用的有摄氏温标、华氏温标和热力学温标等。

### (1) 摄氏温标( $^{\circ}\text{C}$ )

摄氏温标的物理基础是水银温度变化与体膨胀成线性关系。分度方法是把标准大气压下水的冰点定为零度( $0^{\circ}\text{C}$ )，把水的沸点定为100度( $100^{\circ}\text{C}$ )，在这两固定点间划分100等分，每一等分为摄氏一度，计为 $1^{\circ}\text{C}$ 。



## (2) 华氏温标 ( $^{\circ}\text{F}$ )

在标准大气压下，冰的熔点为32度，水的沸点为212度，中间划分180等分，每等分为华氏1度，符号为 $^{\circ}\text{F}$ 。

## (3) 热力学温标 (K)

热力学温标是以热力学第二定律为基础，已由国际计量大会采纳作为国际统一的基本温标。热力学温标所确定的温度数值称为热力学温度（单位为K）。

定义为水三相点（冰水气共存）的热力学温度的 $1/273.16$ 为1K。即从绝对零度到水的三相点之间的温度分为273.16等分，一等分为1K。





## 11.2 热电阻

利用导体或半导体的电阻值随温度的变化来测量温度。热电阻按感温元件的材质分金属与半导体两类。**金属热电阻常用铂、铜两种热电阻；半导体热电阻为热敏电阻等。**

### 1、金属热电阻

对于绝大多数金属，具有**正的温度系数**，电阻随温度升高而增大，其特性方程为：

$$R_t = R_0 [1 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \cdots + \alpha_n t^n]$$

不同的金属导体， $\alpha_i$ 取值的范围不同。通常情况下，它是温度的函数。



## 金属热电阻选用感温材料的要求:

- (1) 温度系数 $a_t$ 值要大，热电阻的灵敏度就越高。
- (2) 在测量范围内，其材料的物理、化学性质应稳定，以保持电阻基值的**稳定性**。
- (3) 在测量范围内，电阻温度系数要保持常数，以确保输入——输出**线性**，提高测量精度。
- (4) 具有较高的电阻率，采用较高电阻率的感温材料，可以**减少热电阻体积和热惯性**。
- (5) 材料容易提纯，确保较好的复制性。



## (1) 铂热电阻

铂的物理、化学性能稳定，测量精度高、电阻率较高；铂丝在0℃以上，其电阻值与温度之间具有较好的线性度。

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$$

铂热电阻使用范围是-200℃~850℃。除作为温度标准外，还广泛用于高精度的工业测量。

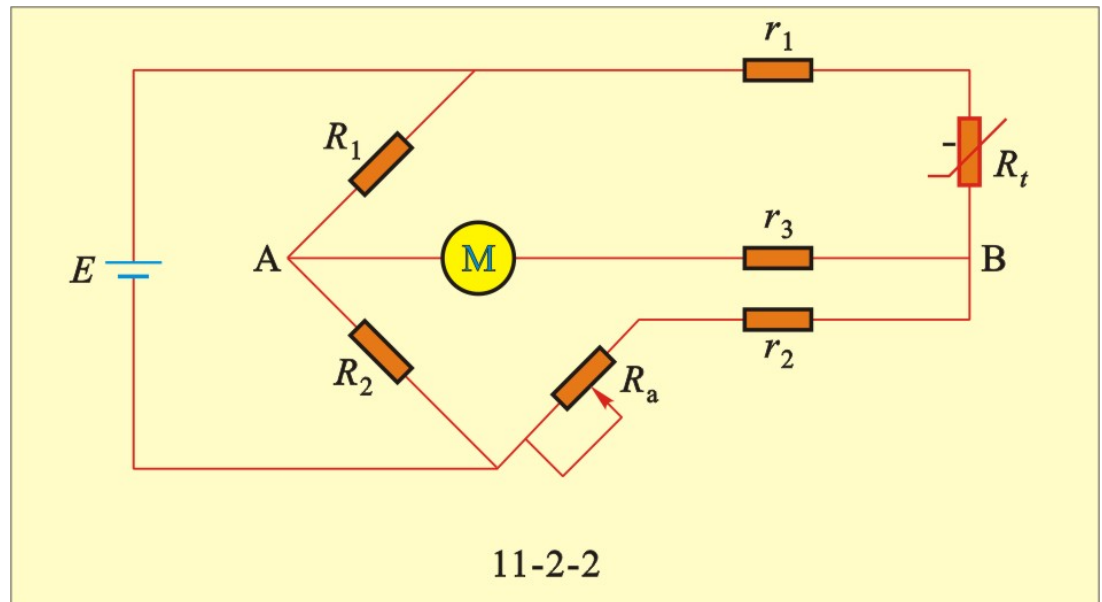


## (2) 铜热电阻

铜热电阻的**线性较好**，具有电阻温度系数大，价格便宜，互换性好等优点。铜热电阻的使用范围是 **$-50\sim 150^{\circ}\text{C}$** 。

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

➤ 热电阻的测量电路  
—— 三线式电桥电路



## 2、热敏电阻

热敏电阻是一种**电阻值随其温度成指数变化**的半导体热敏元件。

**优点：**（1）电阻温度系数大，**灵敏度高**，比一般金属电阻大10~100倍；（2）结构简单，体积小，可以测量“点”温度；（3）电阻率高，热惯性小，**适宜动态测量**；（4）功耗小，不需要参考端补偿，适于**远距离的测量与控制**。

**缺点：**阻值与温度的关系呈**非线性**，元件的稳定性和互换性较差。



热敏电阻是由两种以上的金属氧化物如Mn、Co、Ne、Fe等氧化物构成的烧结体，根据组成的不同，可以调整温度特性构成：

**PTC热敏电阻：**具有正温度系数，灵敏度非常数。

**NTC热敏电阻：**随温度上升电阻呈指数关系减小，具有负温度系数，灵敏度高；——常用

**CTR热敏电阻：**具有很大的负温度系数和负电阻突变特性。

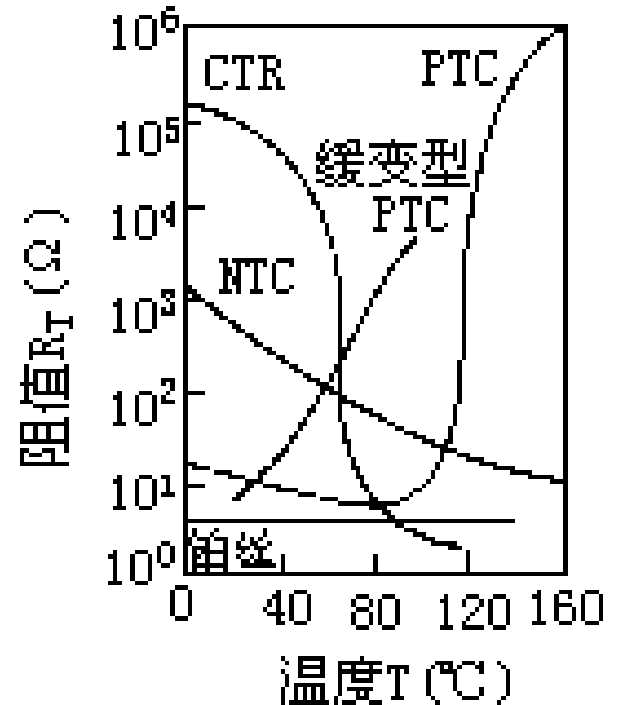
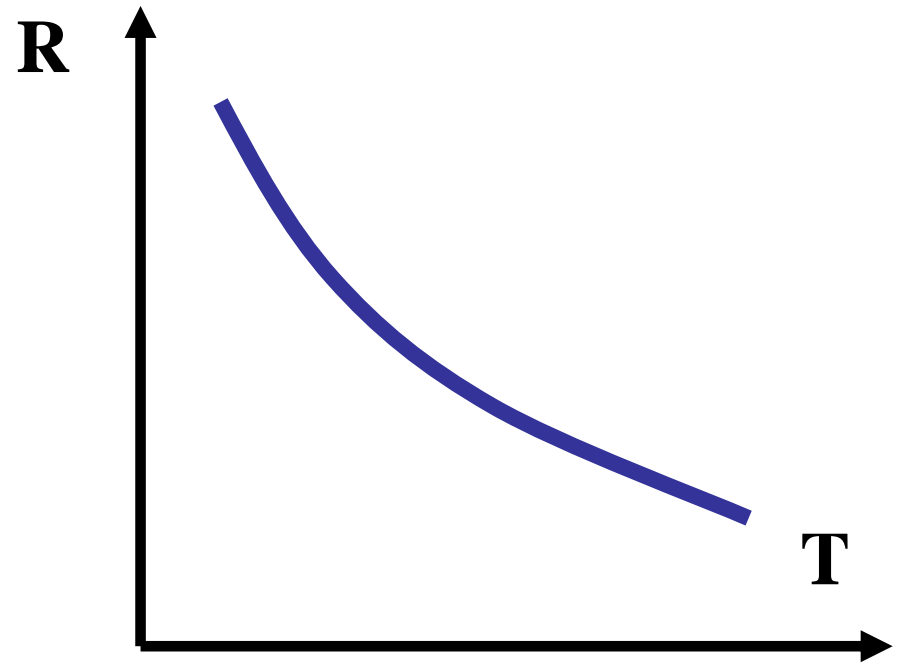


图1 几种热敏电阻阻温曲线

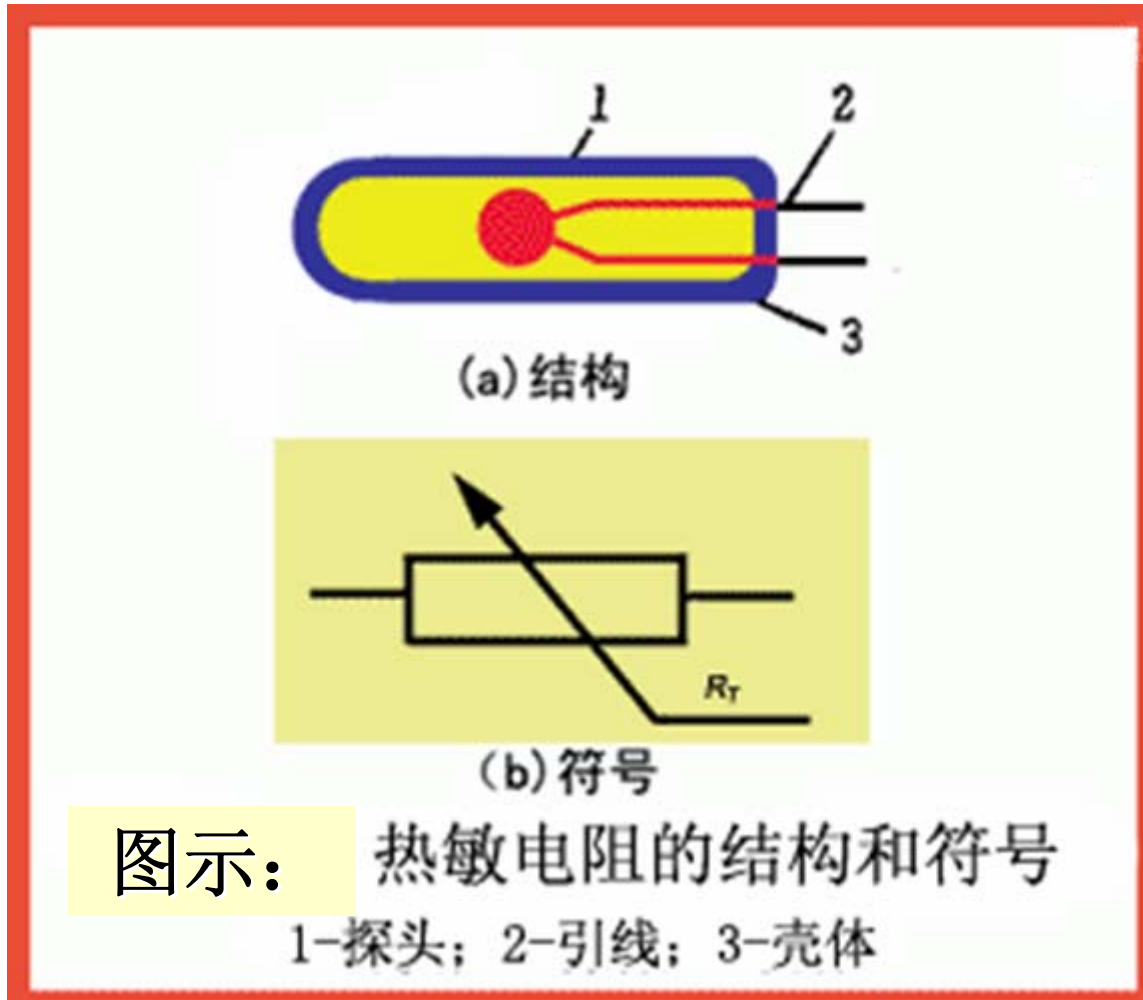
负温度系数的热敏电阻最常用，温度特性为

$$R_T = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

$$a_{NTC} = -\frac{\beta}{T^2}$$

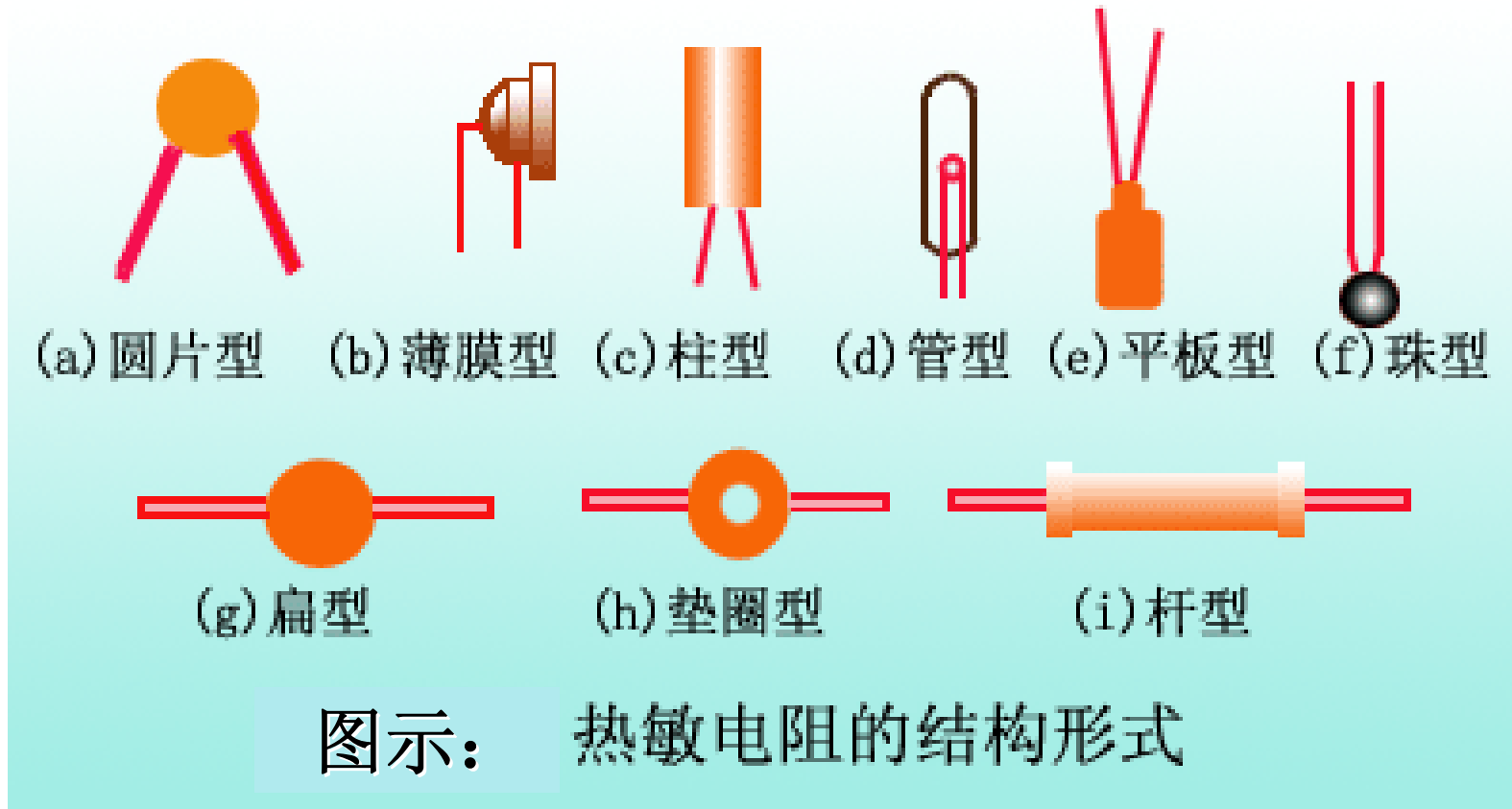


热敏电阻由热敏探头、引线和壳体等构成。

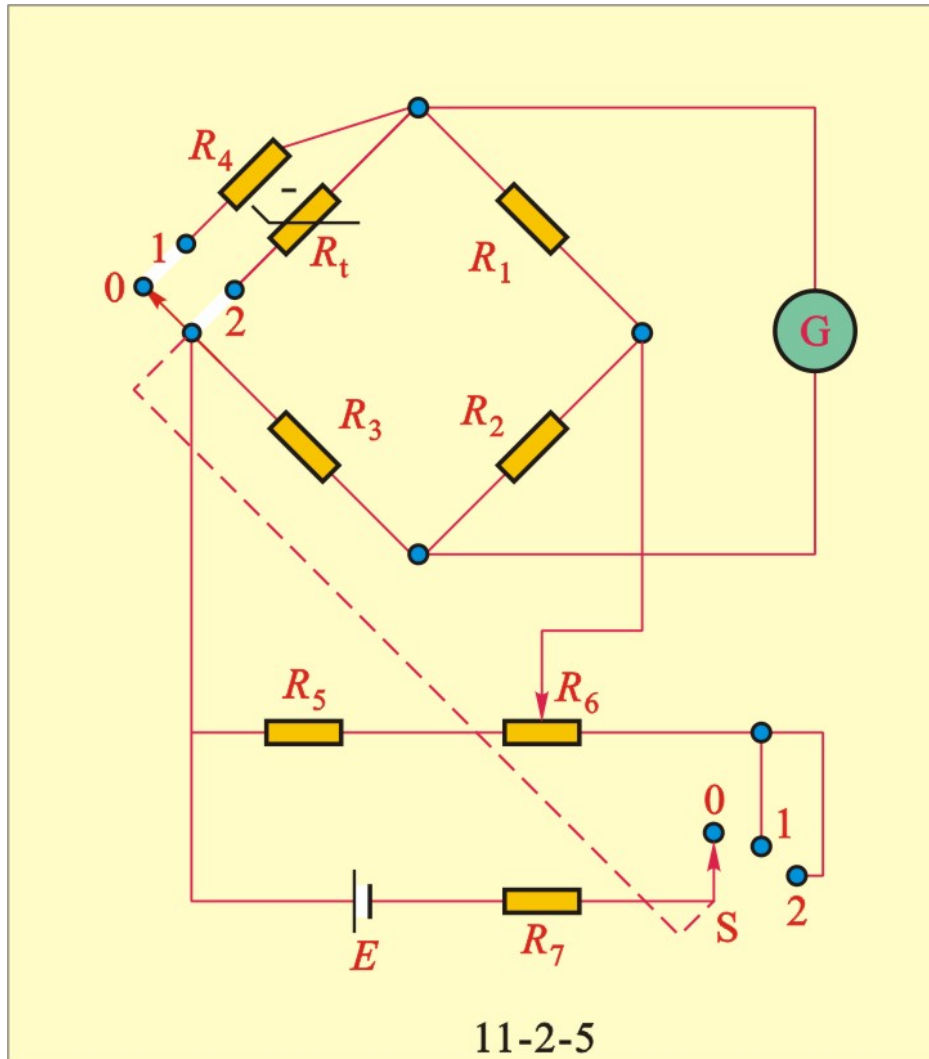




根据不同的使用需求，热敏电阻可制成不同的结构形式。



## ► 热敏电阻的测量电路——电桥电路



11-2-5



# 产品



## 11.3 热电偶

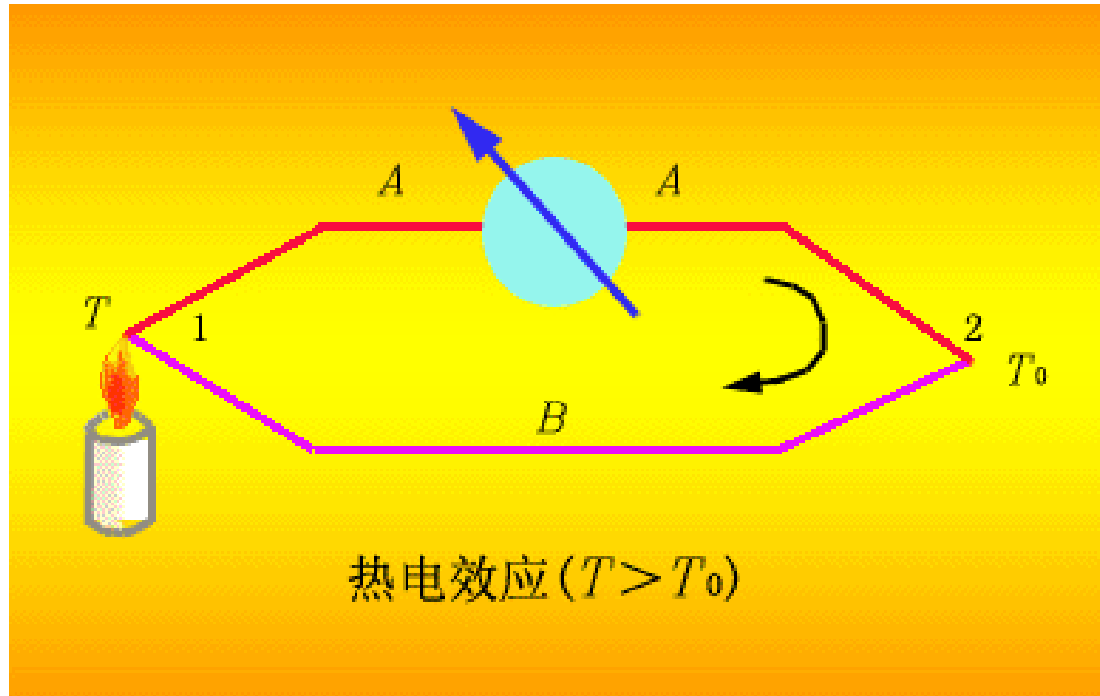
热电偶是工业上最常用的温度检测器件之一。

**优点:**

- **测量精度高**。因热电偶直接与被测对象接触，不受中间介质的影响。
- **测量范围广**。常用的热电偶从 $-50\sim+1600^{\circ}\text{C}$ 均可连续测量，某些特殊热电偶最低可测到 $-269^{\circ}\text{C}$ （如金铁镍铬），最高可达 $+2800^{\circ}\text{C}$ （如钨-铼）。
- **构造简单，使用方便**。热电偶通常是由两种不同的金属组成，而且不受大小的限制，外有保护套管，使用非常方便；适用于远距离测量和自动控制



# 1、热电效应

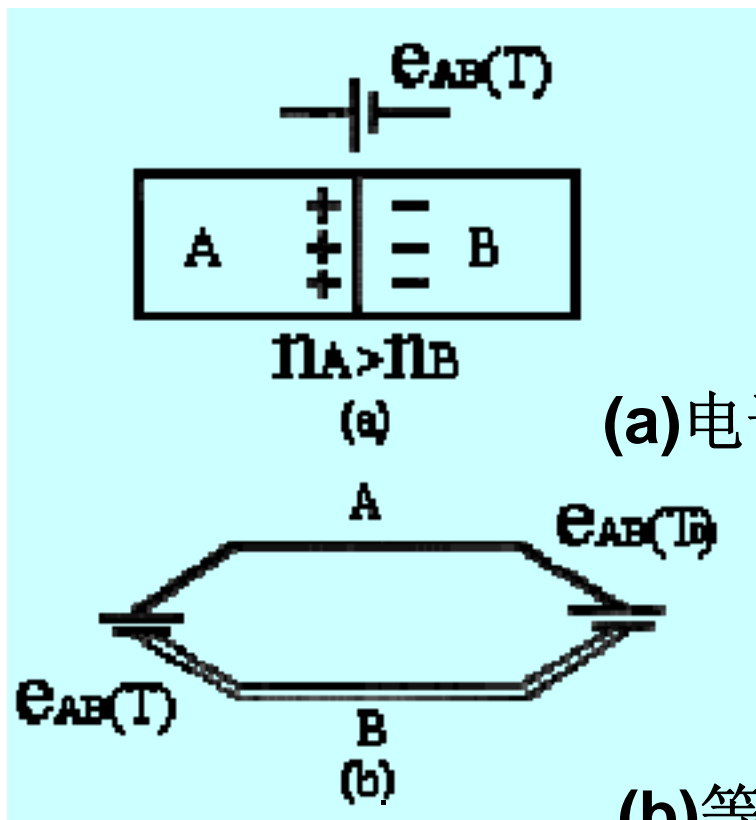


由A、B两种不同的导体组成一个闭合回路，当两接点的温度不等时，回路中就会产生电势，从而形成电流，这一现象通常称为**热电效应**。相应的电势通常称为**热电势**。

热电偶产生的热电势 $E_{AB}(T, T_0)$ 是由两种导体的接触电势 $E_{AB}$ 和单一导体的温差电势 $E_A$ 和 $E_B$ 所形成。

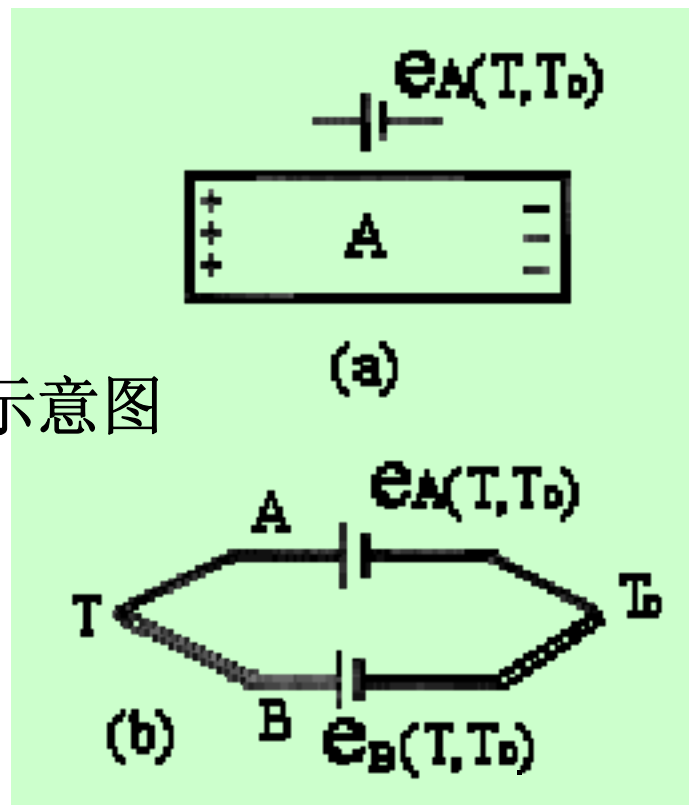
接触电势

温差电势



(a) 电子扩散示意图

(b) 等价电路



(a)

(b)



接触电势

$$E_{AB}(T) = \frac{KT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

温差电势

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

由导体A、B组成的热电偶回路总的热电势为：

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= [E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0)] - [E_A(T, T_0) - E_B(T, T_0)] \\ &= \frac{K}{e} (T - T_0) \ln \frac{n_A}{n_B} - \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT \end{aligned}$$

**由此可知：只有当热电偶的两个电极材料不同，且两个接点的温度也不同时，才会产生电势，热电偶才能进行温度测量——热电偶测温条件。**



当热电偶的两个不同的电极材料确定后，热电势便与两个接点温度 $T$ 、 $T_0$ 有关。即回路的热电势是两个接点的温度函数之差。

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

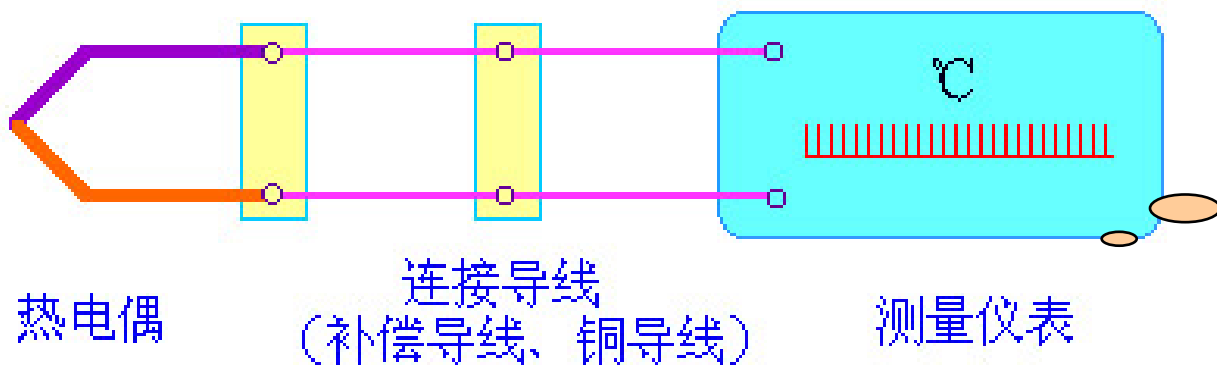
若使冷端温度 $T_0$ 保持不变，则热电势为热端温度 $T$ 的单值函数——**热电偶测温的基本原理**。

在实际测量中，不可能也没有必要单独测量接触电势和温差电势，而**只需要用仪表测量总的热电势**。另外，温差电势与接触电势相比较，数值甚小，因此在工程应用中认为**热电势近似等于接触电势**。





- 实用中，测量出热电势后如何确定温度值？通常不是利用公式计算，而是用查热电偶分度表来确定。
- 热电偶分度表是将冷端温度保持为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，通过实验建立起来的热电势与温度之间的数值对应关系。
- 热电偶测温完全是建立在利用实验热特性和一些热电定律的基础上。



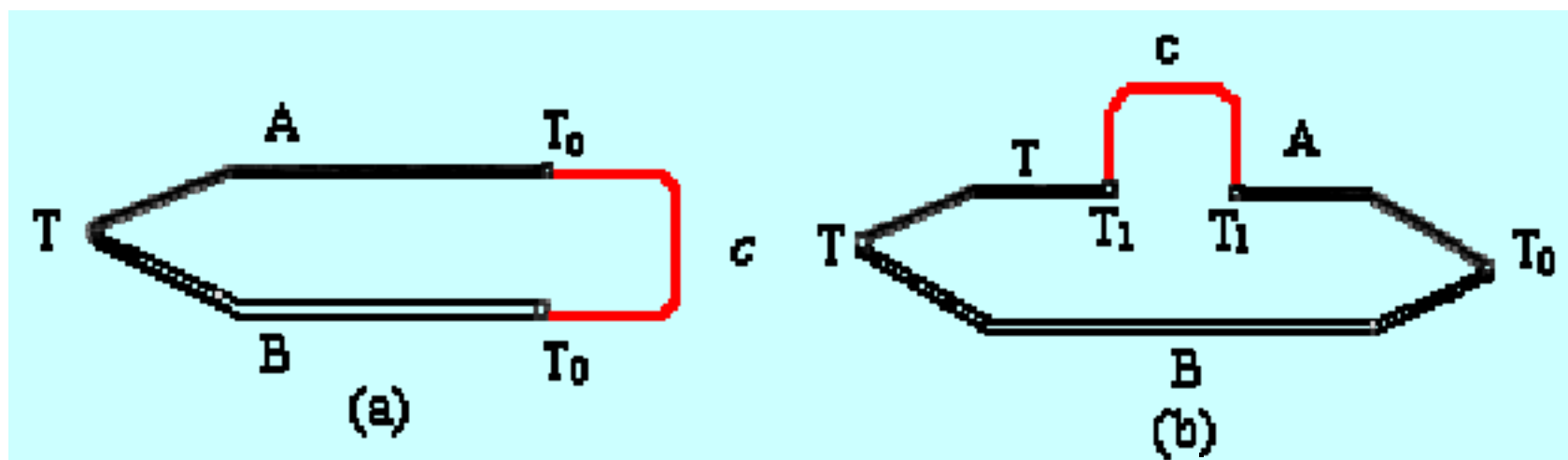
会产生新的  
热电势吗？

最简单的热电偶测温系统

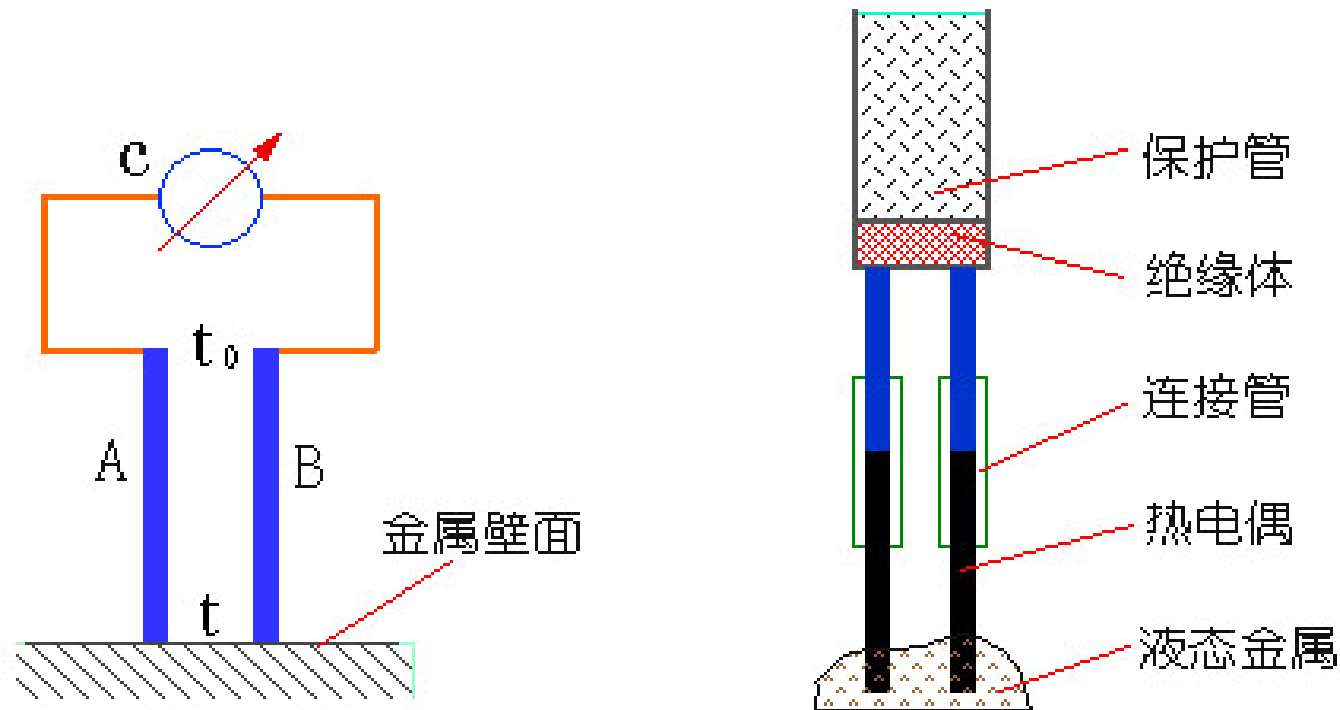
## 2、热电偶的基本定律

### 1) 中间导体定律

在热电偶回路中接入第三种材料的导体，只要其**两端的温度相等**，该导体的接入就不会影响热电偶回路的总热电势。



根据中间导体定律，可以用开路热电偶对液态金属或金属壁面测温。



开路电偶的使用

## 2) 中间温度定律

当热电偶两个接点的温度分别为 $T$ 和 $T_0$ 时，所产生的热电势等于该热电偶两接点温度为 $T$ 、 $T_n$ 和 $T_n$ 、 $T_0$ 时所产生的热电势之代数和，即：

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

中间温度定律是制定热电偶分度表的理论基础。热电偶分度表都是以冷端温度为0时做出的。

一般工程测量中冷端都不为零（任一恒定值），因此，只要测出热端、冷端的热电势，便可利用利用热电偶分度表求出工作端的被测温度值。



例如，用镍铬—镍硅热电偶测量炉温时，当冷端温度  $T_0=30^\circ\text{C}$  时，测得热电势  $E(T, T_0)=39.17\text{mv}$ ，求实际炉温。

由  $T_0=30$  查分度表 (P346) 得  $E(30, 0)=1.2\text{mv}$ ，根据中间温度定律得：

$$\begin{aligned} E(T, 0) &= E(T, 30) + E(30, 0) \\ &= 39.17 + 1.2 \\ &= 40.37 (\text{mv}) \end{aligned}$$

则查表得炉温  $T=946^\circ\text{C}$ 。

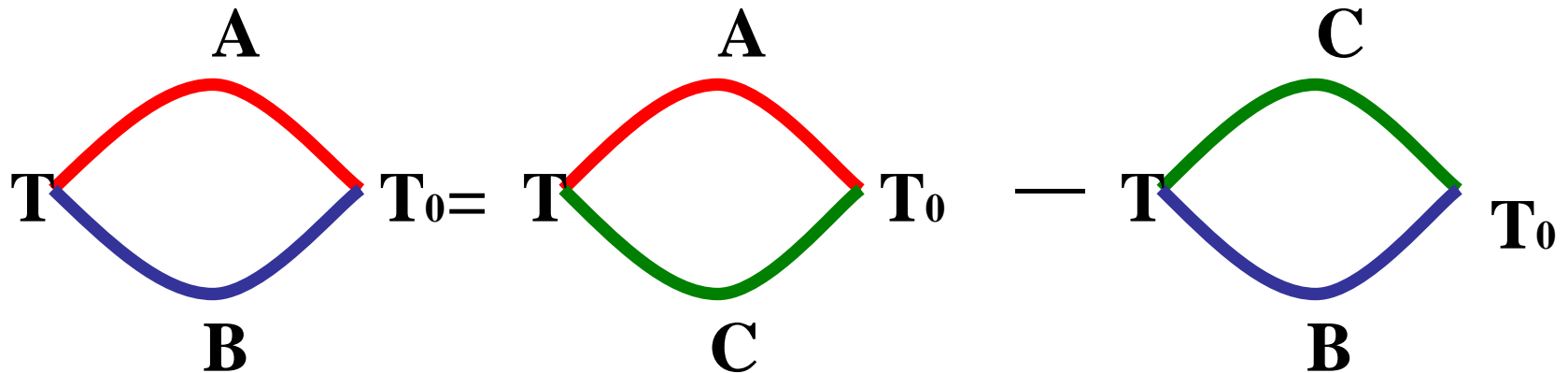


### 3) 标准电极定律

已知两个导体A、B分别与另一导体C组成的热电偶的热电势已知，则在相同接点温度 $(T, T_0)$ 下，由A、B电极组成的热电偶的热电势  $E_{AB}(T, T_0)$  为：

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

C称为标准电极



在工程测量中，由于纯铂的物理化学性能稳定，熔点较高，易提钝，所以目前常将纯铂作为标准电极。

标准电极定律使得热电偶电极的选配提供了方便。

例如，铂铑30—铂热电偶的 $E_{AC}(1084.5, 0) = 13,976\text{mv}$ ，铂铑6—铂热电偶的 $E_{BC}(1084.5, 0) = 8.354\text{mv}$ 。

根据标准电极定律：

铂铑30—铂铑6热电偶

$$E_{AB}(1084.5, 0) = 13,976 - 8.354 = 5.613\text{mv}。$$



### 3、常用热电偶及热电势的测量

热电偶通常以**热电极材料**来命名，例如铂铑—铂、镍铬—镍硅等。

热电极材料的要求：

- 1) 热电特性稳定，不随时间变化。
- 2) 热电势要大，热电特性应为线性或近似线性关系。
- 3) 电阻温度系数小，导电率高。
- 4) 制造方便，易于复制，有良好的互换性。

适于制作**热电偶的材料**有300多种，其中广泛应用的有40~50种。





## ➤ 常用热电偶

- 常用热电偶可分为标准热电偶和非标准热电偶两大类。
- **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，它有与其配套的显示仪表可供选用。
- **非标准热电偶**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。



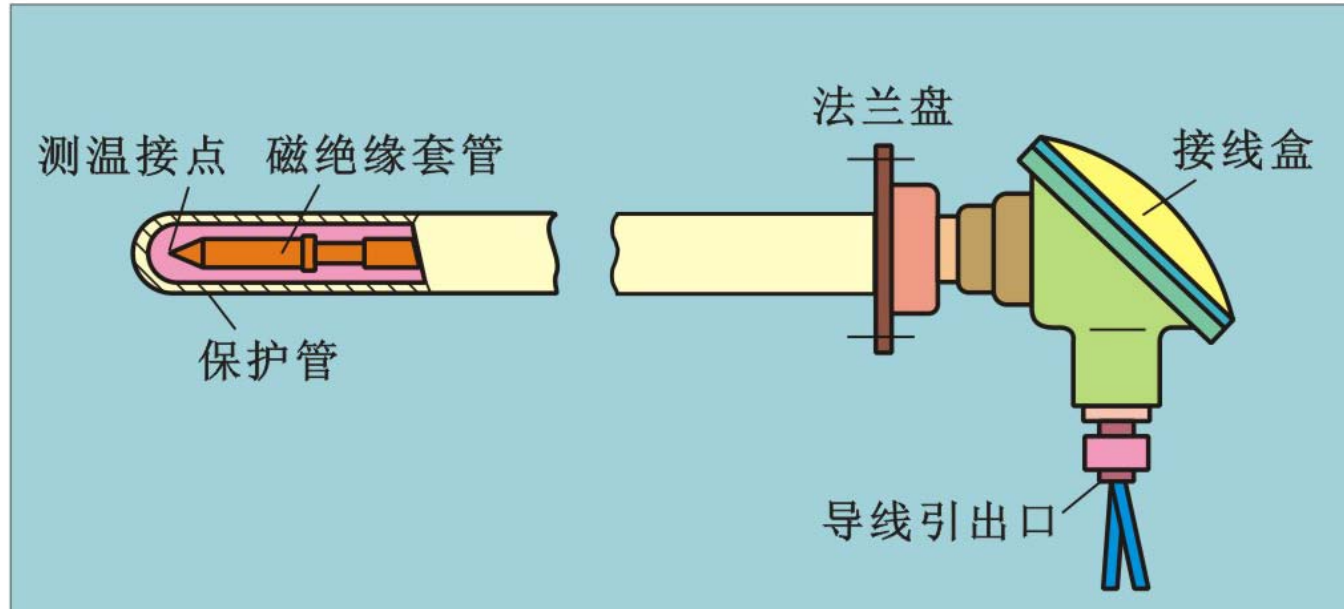
## 常用8种标准化热电偶为：

8种标准化热电偶		
型号标志	材料	使用温度℃
S	铂铑10——铂	-50~1768
R	铂铑13——铂	-50~1768
B	铂铑30——铂铑6	0~1820
K	镍铬——镍硅	-270~1372
N	镍铬硅——镍硅	-270~1300
E	镍铬——铜镍合金（康铜）	-270~1000
J	铁——铜镍合金（康铜）	-210~1200
T	铜——铜镍合金（康铜）	-270~400

同一型号的热电偶可以互换并有统一的分度表。



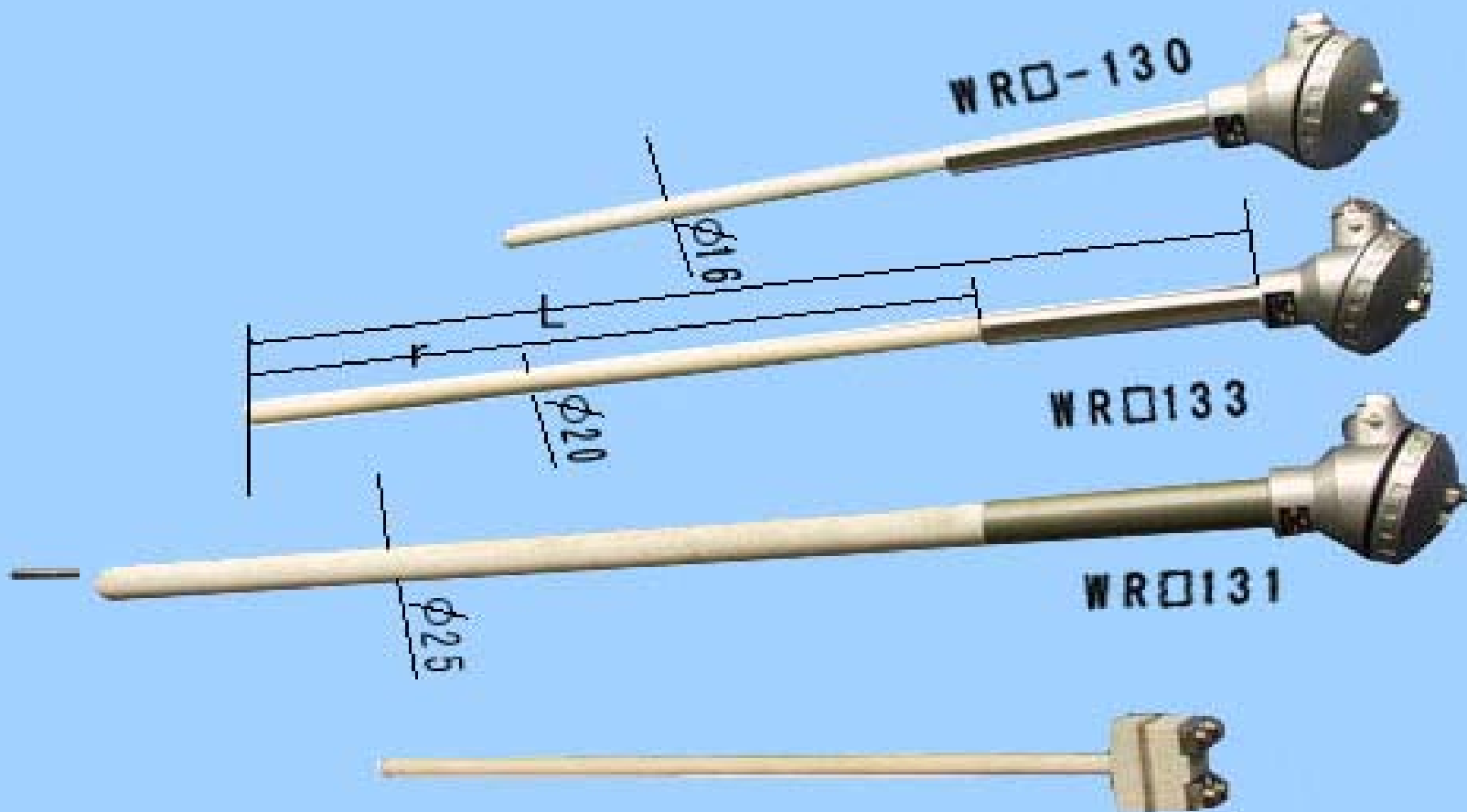
- **铂铑10—铂热电偶**：性能稳定，准确度高，可用于基准和标准热电偶。热电势较低，价格昂贵，不能用于金属蒸汽和还原性气体中；
- **铂铑30—铂铑6热电偶**：较铂铑10—铂热电偶更具较高的稳定性和机械强度，最高测量温度可达 $1800^{\circ}\text{C}$ ，室温下热电势较低，可作标准热电偶，一般情况下，不需要进行补偿和修正处理。由于其热电势较低，需要采用高灵敏度和高精度的仪表；
- **镍铬—镍硅或镍铬—镍铝热电偶**：热电势较高，热电特性具有较好线性，良好的化学稳定性，具有较强的抗氧化性和抗腐蚀性。稳定性稍差，测量精度不高。
- **镍铬—考铜热电偶**：热电势较高，电阻率小，适于还原性和中性气氛下测量，价格便宜，测量上限较低；
- **镍铬—康铜热电偶**：热电势较高，价格低。高温下易氧化，适于低温和超低温测量。



组成：

- 热电极（材料的热电特性稳定）；
- 绝缘套管（防止电极间短路）；
- 保护套管（隔离电极与介质，免受机械损伤或化学腐蚀等）；
- 接线盒。

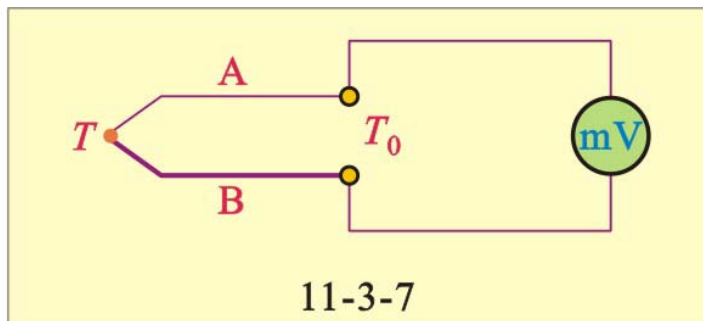
# 产品



## ► 热电势的测量

热电势在mv范围，通常用**动圈式仪表**、**电位差计**、**示波器**和**数字式测温仪表**等测量。

◆ 动圈式仪表实际上是一个**磁电式毫伏计**，它是利用电流流过仪表动圈时，动圈在磁场的作用下带动指针偏转的原理进行工作的。**精度不高**。



$$I = \frac{E_{AB}(T, T_0)}{R_t + R_l + R_G}$$

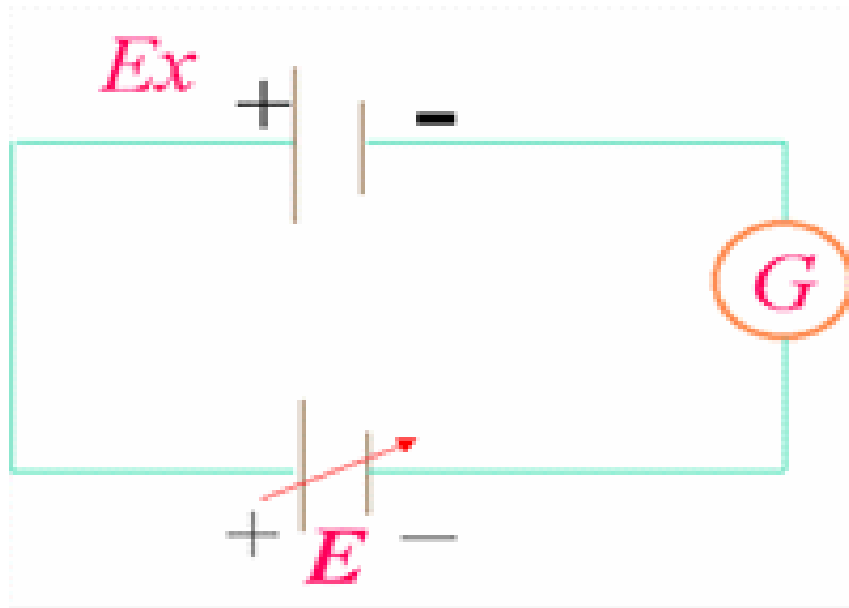
仪表指示电压为：

$$U = I R_G = \frac{E_{AB}(T, T_0)}{R_t + R_l + R_G} R_G$$

$$R_G \gg R_t + R_l$$

$$U \approx E_{AB}(T, T_0)$$

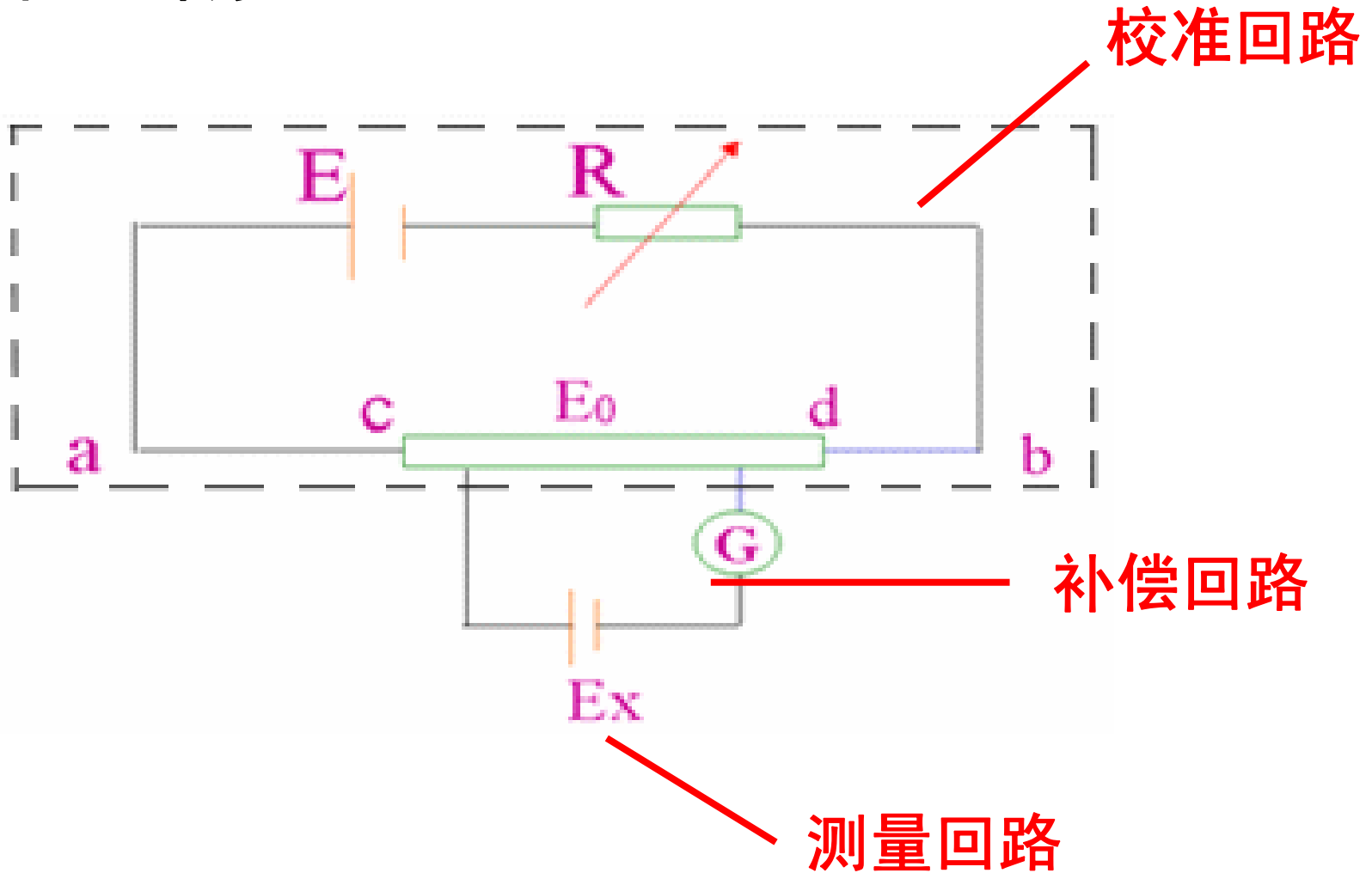
## ◆补偿法测量原理：



测量回路中的电流为零，避免了回路电阻的影响，测量精度较高。

补偿法测量电动势需要一个数值可以调节、大小已知的标准电源，以便能与被测电动势相补偿。

# 电位差计原理:





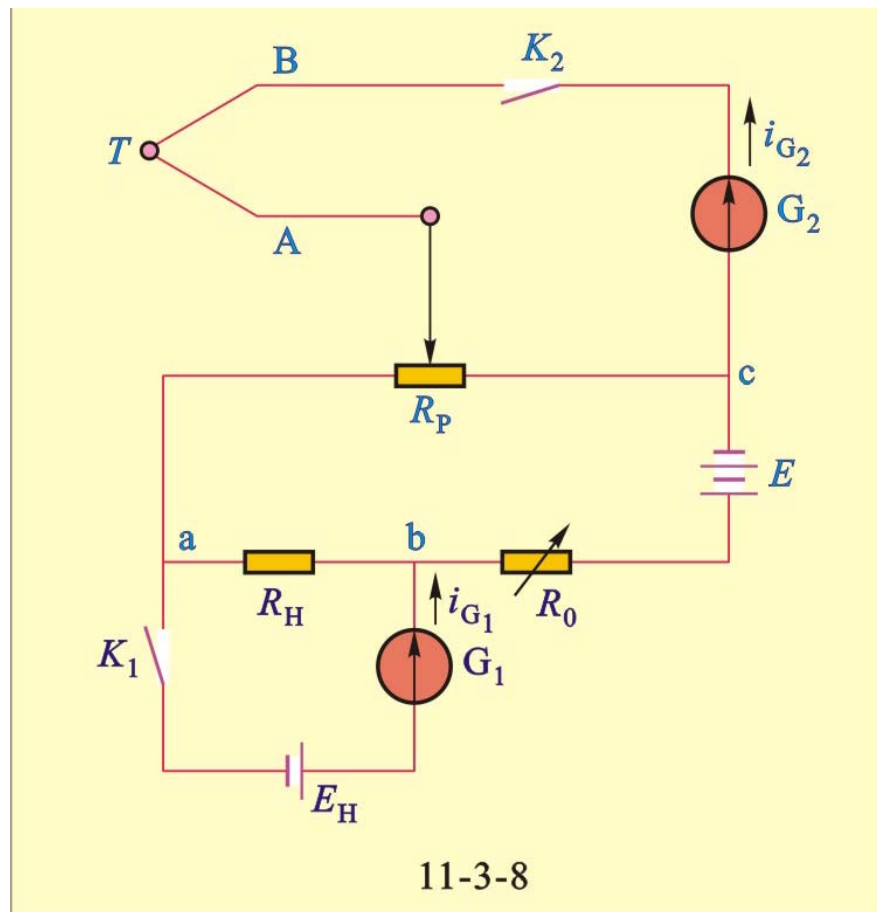
(1)  $K_1$ 合,  $K_2$ 断, 调 $R_0$ 使流过检流计 $G_1$ 的电流为零, 得到一个恒定的工作电流,  $I = E_H / R_H$ , 即ab两点之间的压降与 $E_H$ 平衡。(校准工作电流)

(2)  $K_1$ 断,  $K_2$ 合, 调节电位器 $R_p$ , 使 $G_2 = 0$ , 此时热电偶测量回路的电流为零。

(3) 当热电偶因温度变化产生热电势时,  $G_2$ 将有电流流过, 再次调节 $R_p$ 使 $G_2 = 0$ 。由电位器 $R_p$ 的刻度变化得到一个电阻增量 $\Delta R_p$ , 则所测热电势为

$$E_{AB}(T, T_n) = \Delta R_p \cdot I = \Delta R_p \frac{E_H}{R_H}$$

由于 $E_H$ 和 $R_H$ 均为定值, 热电势的大小则可以用 $\Delta R_p$ 来度量。



11-3-8

## 4、热电偶的冷端温度补偿

- ◆ 热电偶回路的热电势是两个接点温度的函数，为此，必须使冷端温度保持不变，其输出热电势才是热端温度的单值函数。
- ◆ 在实际测量中，热电偶的两端距离很近，冷端温度易受测量对象和环境温度波动的影响，而难以保持恒定，从而引入测量误差。
- ◆ 冷端温度补偿：冷端温度恒定；补偿冷端温度 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ 。补偿方法： $0^\circ\text{C}$ 恒温法；修正法；补偿导线法；补偿电桥法等。



## 0℃恒温法

将热电偶冷端放在冰和水混合的容器中，保持冷端为0℃不变。这种方法精度高，但在工程中应用很不方便，一般在实验室用于校正标准热电偶等高精度温度测量。



## 修正法

实际使用中，设法使冷端温度保持不变（放置在恒温器中），然后采用冷端温度修正的方法，可得到冷端为 $0^{\circ}\text{C}$ 时的热电势。

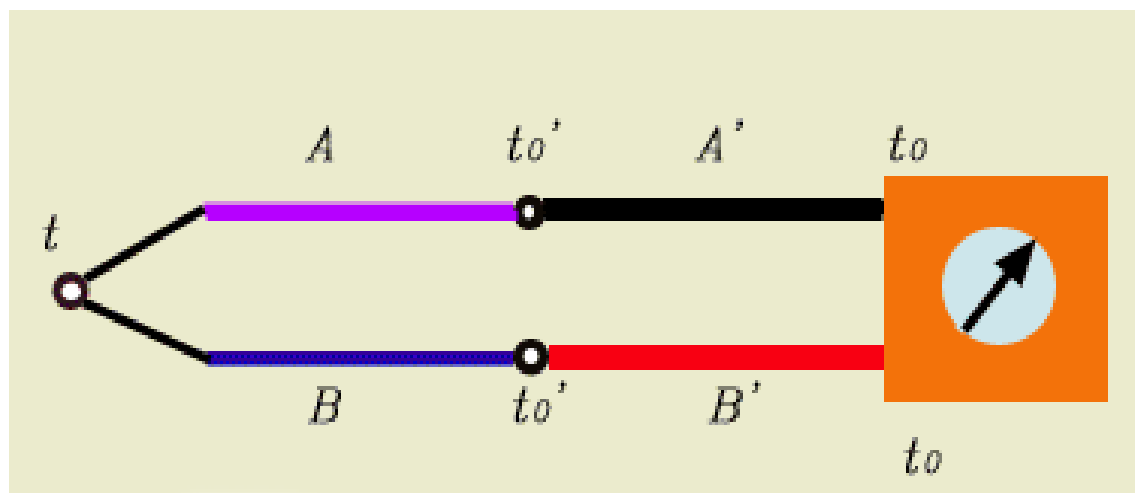
根据**中间温度定律**， $E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T)$ ，因为保持温度 $T_n$ 不变，因而 $E_{AB}(T_n, 0) =$ 常值，该值可以从热电偶分度表中查出。

测量的热电势与查表得到的相加，就可得到冷端为 $0^{\circ}\text{C}$ 时的热电势，然后再查热电偶分度表，便可得到被测温度 $T$ 。



## 补偿导线法——延长热电极法

将热电偶的自由端引至显示仪表，而显示仪表放在恒温或温度波动较小的地方。



图示：补偿导线的应用

$A, B$ —热电极； $A', B'$ —补偿导线

$t_0'$ —原参考端温度； $t_0$ —新参考端温度

采用某两种导线组成的热电偶补偿导线，在一定温度范围内（ $0\sim 100^\circ\text{C}$ ）具有与所连接的热电偶**相同的热电性能**。

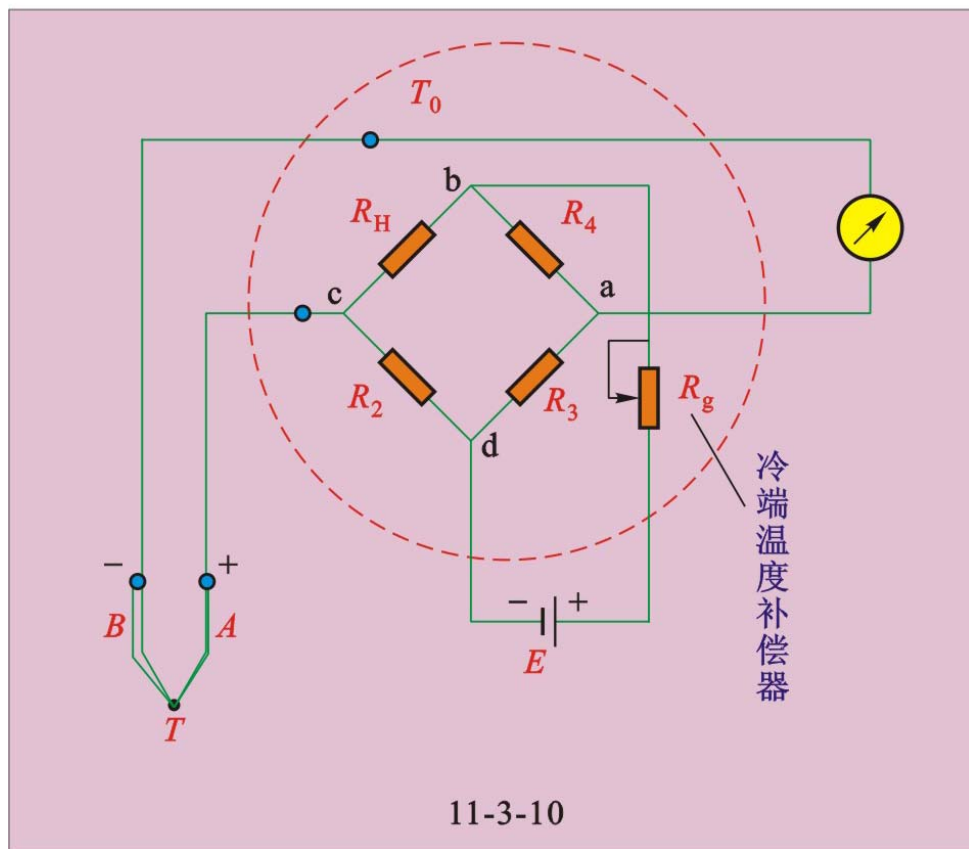
不同的热电偶要配不同的导线，极性也不能接错。

## 补偿电桥法

补偿电桥法是利用不平衡电桥(又称冷端补偿器)产生不平衡电压来自动补偿热电偶因冷端温度变化而引起的热电势变化。

20℃为电桥平衡温度，此时电桥输出电压 $U_{ac}=0$ ；

当温度升高时， $U_{ac} \neq 0$ ；同时由于热电偶冷端温度升高，使热电势减小 $\Delta E$ 。若 $U_{ac} = \Delta E$ 便达到自动补偿冷端温度目的。



## 5、热电偶的校验和标定

### ➤ 校验和标定的目的：

- a. 核对热电偶的热电势——温度曲线和热电偶的电阻——温度曲线是否符合标准。
- b. 标定非标准热电偶的热电势——温度曲线；
- c. 确定测量系统的系统误差并加以修正。

➤ 校验的方法有定点法和比较法。对工业热电偶较多采用比较法（标准热电偶和被校准的热电偶）。

➤ 若热电偶经校验，发现误差超出规定范围时，可将原来的热端剪去一段，重新焊接后再校验。



# 应用

温控器

电子体温计





# 炉温检测



## 11.4 新型热电式传感器

- 半导体PN结温度传感器
- 压电型温度传感器
- 磁热敏传感器



## 本章小结:

1. 工作原理及特性
2. 测量电路（热电偶冷端温度补偿）
3. 传感器的应用



## 习题与思考题：



**P228——2、3**

