

第4章 温度测量系统

检测技术与自动化工程系

闫蓓

新主楼E905



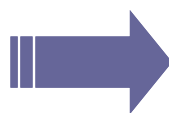
yanbei@buaa.edu.cn



1. 温度测量概述（温标、测温分类）
2. 膨胀式测温
3. 热电偶测温敏感机理、误差及补偿
4. 热电阻测温敏感机理、测量电路
5. 非接触测温方法
6. 半导体测温方法



重点！



次重点！



4.1 概 述

4.2 膨胀式测温

4.3 热电式温度测量

4.4 热电阻式温度测量

4.5 非接触测温方法

4.6 半导体测温方法

4.7 工业测温仪表选型

第4章小结1 第4章小结2

4.1 概 述

4.1.1 温度的概念

- 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。
- 如果两个冷热程度不同的物体相接触，必然会发生热交换现象，热量将从温度高的物体向温度低的物体传递，直到两个物体处于热平衡状态时，两个物体的温度相等。

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，常用的温标：

1. 经验温标

◇ 摄氏温标 $^{\circ}\text{C}$

$$t = \frac{5}{9} \times (F - 32)$$

◇ 华氏温标 $^{\circ}\text{F}$

$$F = 1.8t + 32$$

2. 热力学温标

卡诺循环 K

$$T = t + 273.16$$

3. 国际实用温标

ITS—90

4个温区 17个固定点温度

$$t_{90} = T_{90} - 273.16$$

温标要求

- (1) 有可实现的固定点温度；
- (2) 有在固定点温度上分度的标准仪器；
- (3) 确定相邻固定温度点间的内插公式。

4.1.3 温度测量的主要方法及分类

接触测量法

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。

水银温度计、热电阻、热电偶、PN结

非接触测量法

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，

辐射温度计、高温计、红外测温仪等。

测温方法比较

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

测温范围：适宜1000℃以下的温度测量

精度：测量范围的1%左右

滞后：较大

特点：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：适宜高温测量

精度：一般在10℃左右

滞后：较小



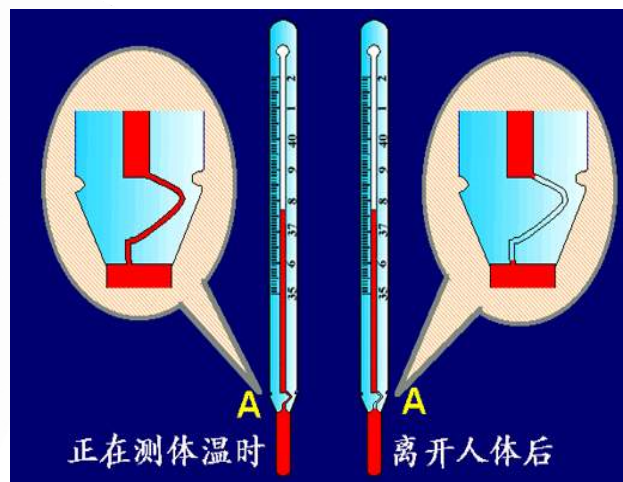
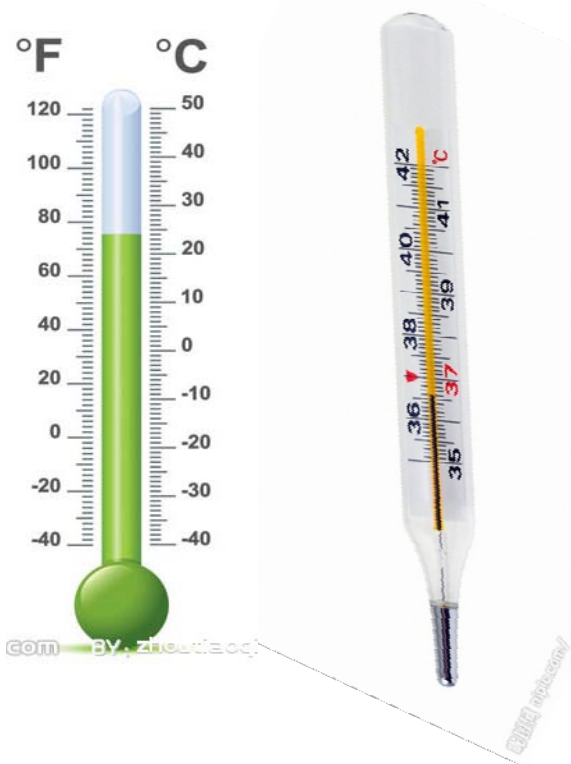
4.2 膨胀式测温

膨胀式温度计—利用气体、液体或固体热胀冷缩的特性

液体膨胀式温度计

固体膨胀式温度计

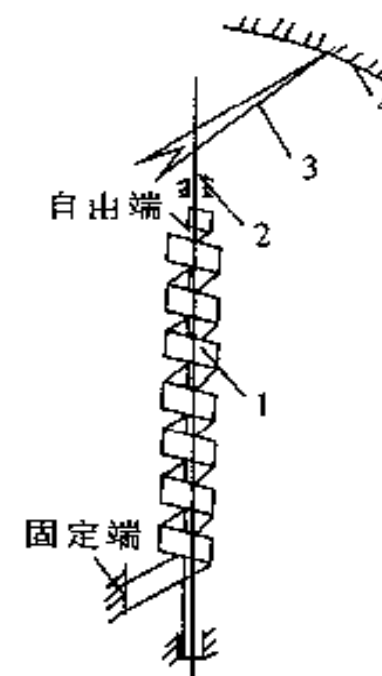
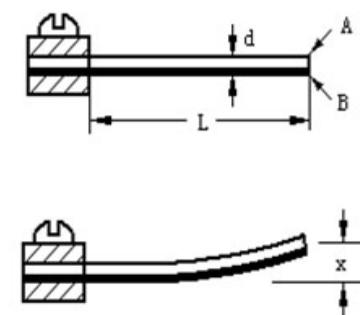
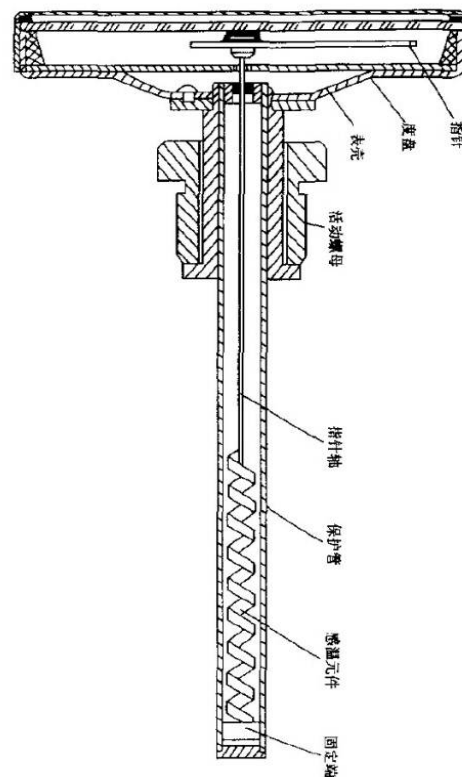
压力式温度计



液体膨胀式温度计

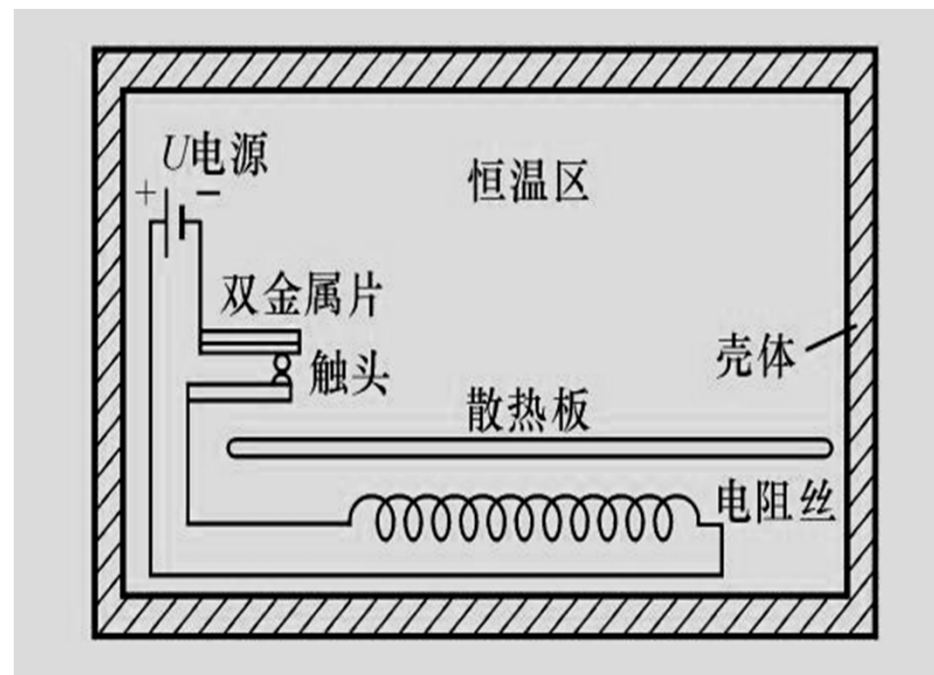
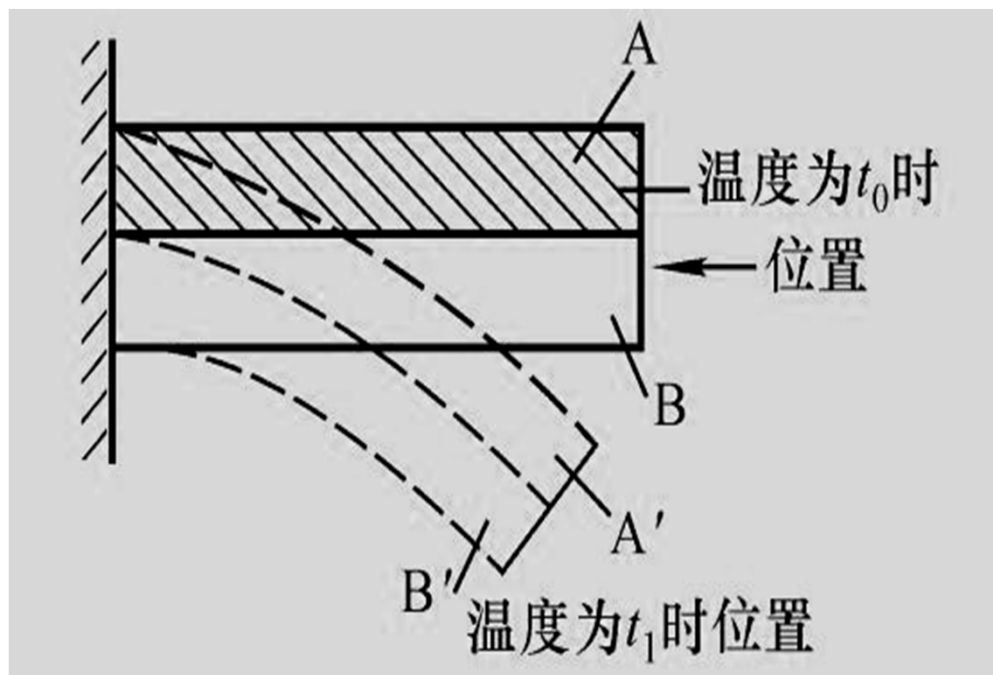


固体膨胀式温度计



HD-WSS系列双金属温度计

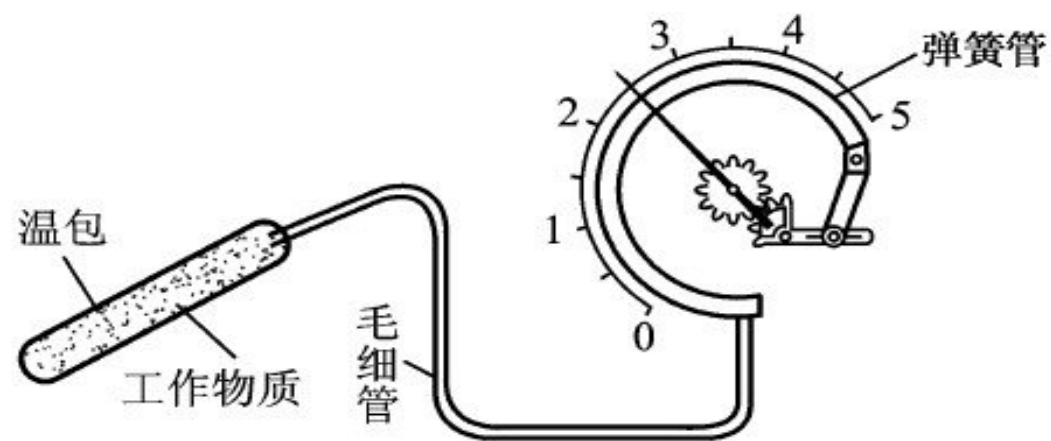
测量中低温度的现场检测仪表。可以直接测量各种生产过程中的 $-80^{\circ}\text{C} \sim +500^{\circ}\text{C}$ 范围



双金属温度计的突出特点是:抗震性能好,结构简单,牢固可靠,读数方便,但它的精度不高,测量范围也不大。



压力式温度计
威卡(德国 WIKA)



气体状态方程 $PV = mRT$

测量原理 内部充惰性气体，
带远传毛细管



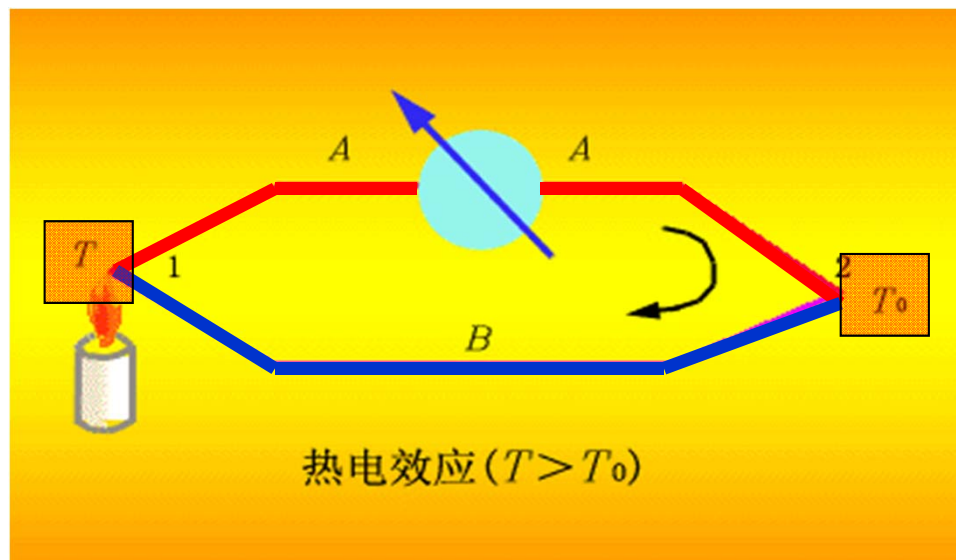
4.3 热电式温度测量——热电偶测温

- 4.3.1 热电效应
- 4.3.2 热电偶的工作原理
- 4.3.3 热电偶的基本定律
- 4.3.4 热电偶的误差及补偿
- 4.3.5 热电偶的组成分类及特点



4.3.1 热电效应

热电效应



帕尔帖效应



帕尔帖电势

汤姆逊电势

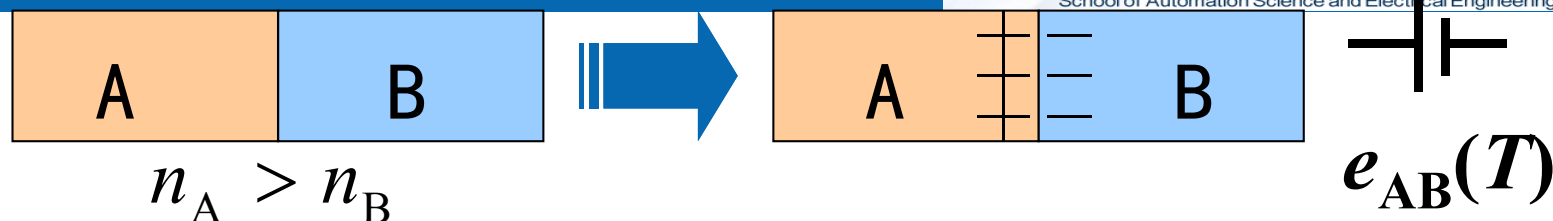


汤姆逊效应

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**。

4.3.1 热电效应

1. 帕尔帖效应：



当具有不同的自由电子浓度的A、B两种材料相互紧密地连接在一起时，自由电子会从浓度高的导体向浓度低的导体扩散，从而在接触处形成电位差。

2. 帕尔帖电势：

帕尔帖效应形成的电位差叫做接触电势（帕尔帖热电势）



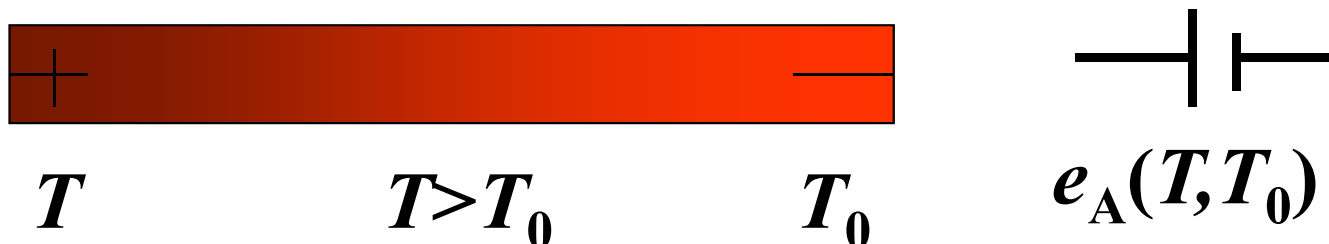
$$e_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A(T)}{n_B(T)}$$

k – 波尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$

e – 电子电荷量, $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

$n_A(T)$, $n_B(T)$ – 材料 A、B 在温度 T 时的自由电子浓度

3. 汤姆逊 (Thomson) 效应:



对于单一均质导体A，当其两端温度不同时，自由电子由温度高的一端向温度低的一端扩散，从而在导体上形成电势差。

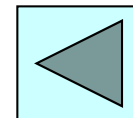
4. 汤姆逊电势 (温差电势)

所形成的电势差称为温差电势，或叫汤姆逊电势。

导体A的温差电势为：

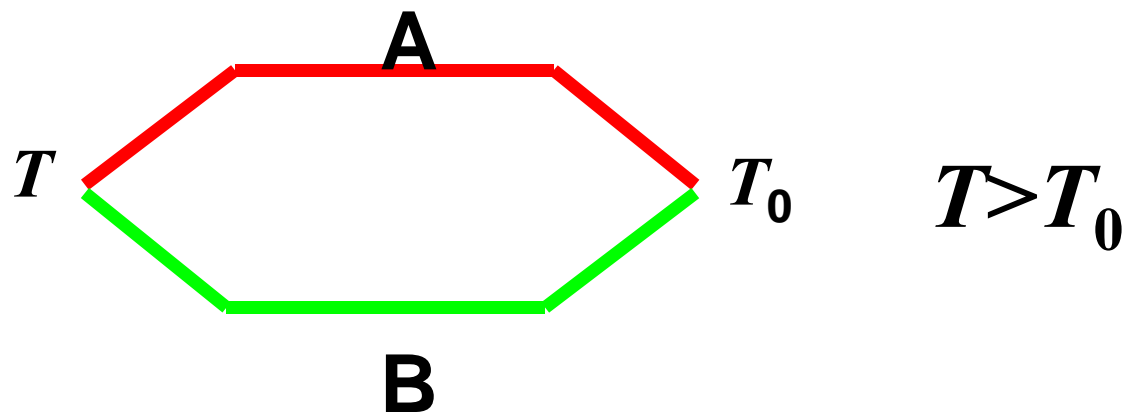
$$e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT$$

σ_A — 材料A的汤姆逊系数 (V/K)

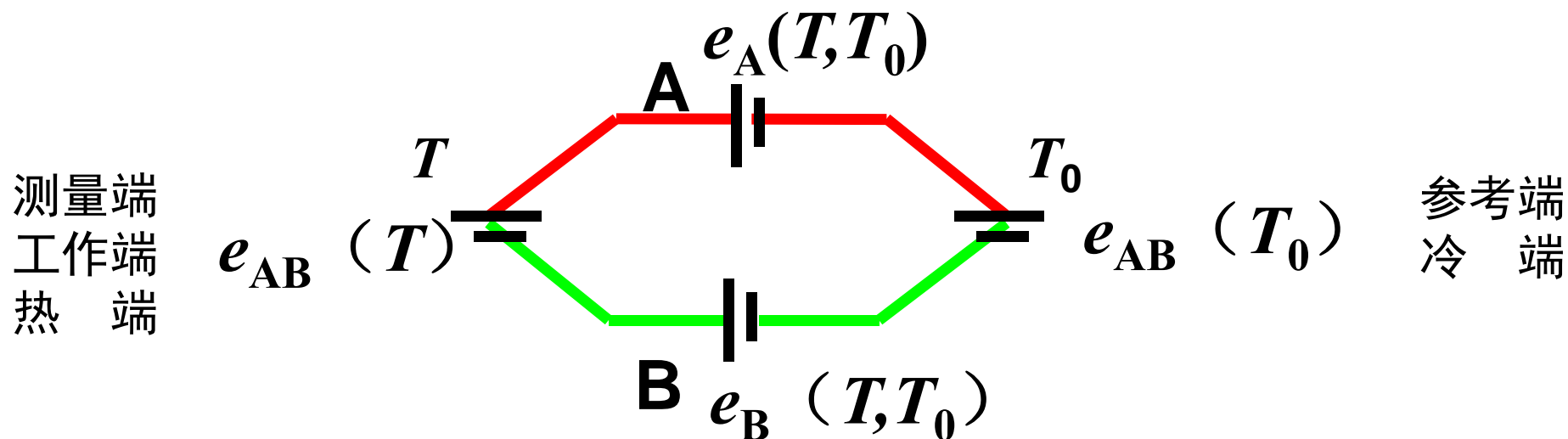


4.3.2 热电偶的工作原理

1. 热电偶的原理结构:



2. 热电偶中热电势示意图:



4.3.2 热电偶的工作原理

3. 回路电势计算：

总接触电势

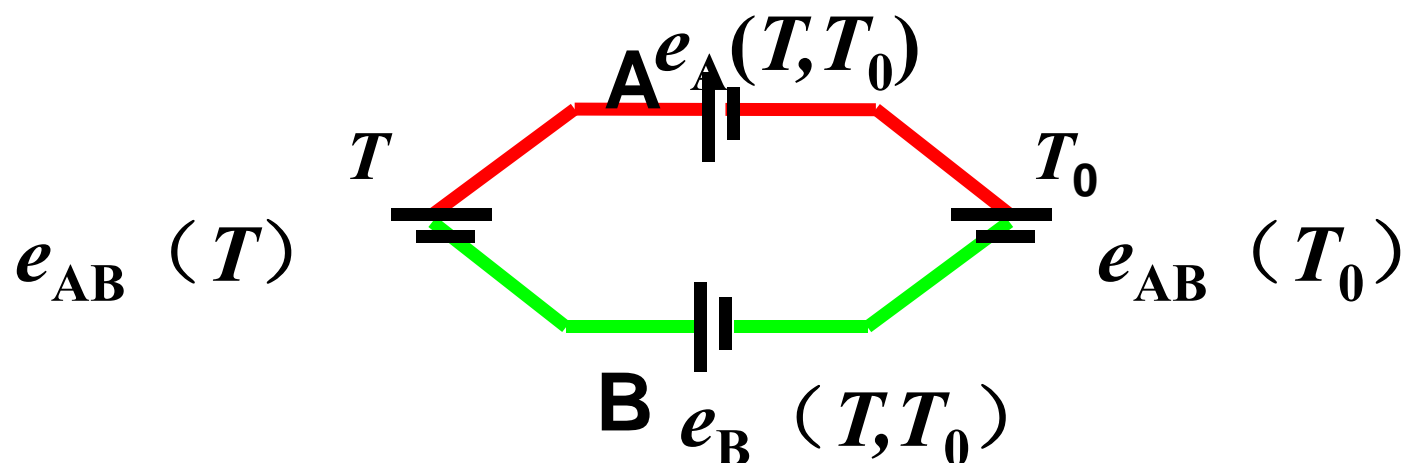
$$e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A(T)}{n_B(T)} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{n_A(T_0)}{n_B(T_0)}$$

总温差电势

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

总热电势

$$E_{AB}(T, T_0) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A(T)}{n_B(T)} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{n_A(T_0)}{n_B(T_0)} - \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT$$



4.3.2 热电偶的工作原理

4. 分析

$$E_{AB}(T, T_0) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A(T)}{n_B(T)} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{n_A(T_0)}{n_B(T_0)} - \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT$$

- 构成热电偶的两种材料相同，则接触电势为零，温差电势相互抵消，热电偶回路内的总热电势为零；

||→ 热电偶的两个电极材料不同

- 如果热电偶两接点温度相等，则温差电势为零，接触电势相互抵消，热电偶回路内的总电势为零；

||→ 热电偶两个接点应处于不同温度场

4.3.2 热电偶的工作原理

$$E_{AB}(T, T_0) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A(T)}{n_B(T)} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{n_A(T_0)}{n_B(T_0)} - \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT$$



两个接点材料确定

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

两个接点的温度有关



温度 T_0 不变

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

回路电势是 T 的单值函数。

热电偶测温
基本原理

5. 热电偶实际应用

接触电势比温差电势大，使用时忽略温差电势；

使用时用仪表直接测量回路电势，不再区分是温差电势还是接触电势；

使用时采用查热电偶分度表来确定被测温度，分度表是通过实验建立的热电势与温度之间的数值对应关系；

分度表将自由端（冷端）温度定为 0°C 。

热电偶分度表

附表I 常用热电偶分度表

附表 I -1 铂铑₁₀-铂热电偶分度表
(参比端温度为0℃)

分度号: S

℃	热 电 动 势 $\times 10^{-3}/\text{mv}$										℃
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
-50	-236										-50
-40	-194	-199	-203	-207	-211	-215	-220	-224	-228	-232	-40
-30	-150	-155	-159	-164	-168	-173	-177	-181	-186	-190	-30
-20	-103	-108	-112	-117	-122	-127	-132	-136	-141	-145	-20
-10	-53	-58	-63	-68	-73	-78	-83	-88	-93	-98	-10
0	0	-5	-11	-16	-21	-27	-32	-37	-42	-48	0
0	0	5	11	16	22	27	33	38	44	50	0
10	55	61	67	72	78	84	90	95	101	107	10
20	112	119	125	131	137	142	148	154	161	167	20
30	173	179	185	191	197	203	210	216	222	228	30
40	235	241	247	254	260	266	273	279	286	292	40
50	299	305	312	318	325	331	338	345	351	358	50
60	365	371	378	385	391	398	405	412	419	425	60
70	432	439	446	453	460	467	474	481	488	495	70
80	502	509	516	523	530	537	544	551	558	566	80
90	573	580	587	594	602	609	616	623	631	638	90

6、常用热电偶

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：有300多种，广泛应用的有40~50种。

- 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。
- **标准热电偶** 国家标准规定了其热电势与温度的关系、允许误差有统一的标准分度表，有与其配套的显示仪表可供选用。
 - **非标准热电偶** 没有统一的分度表，用于某些特殊场合的测量。

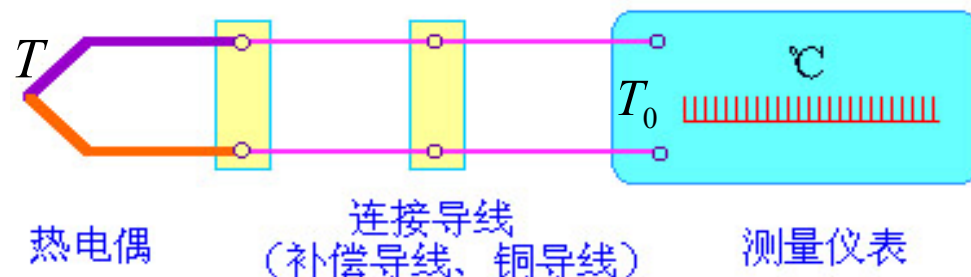
4.3.2 热电偶的工作原理

常用8种标准化热电偶

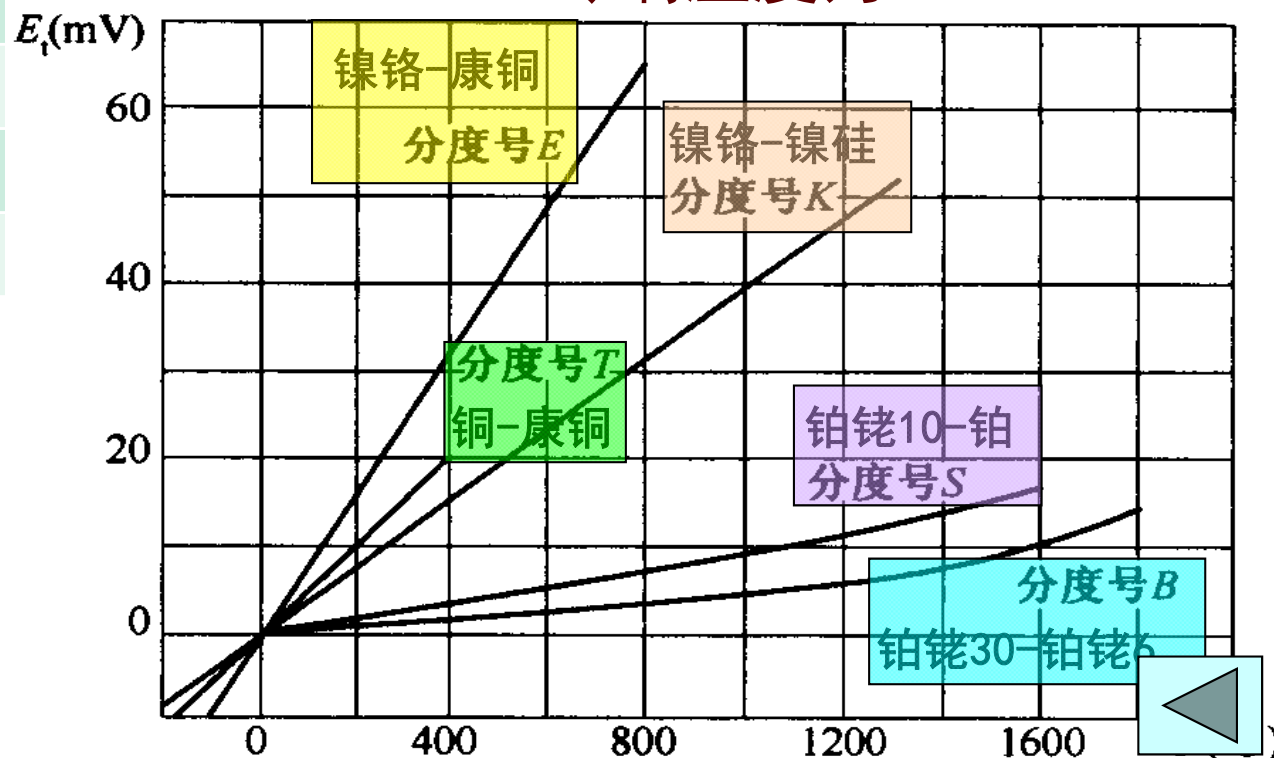
型 号	材 料	测量温度℃
S	铂铑10—铂	-50~1768
R	铂铑13—铂	-50~1768
B	铂铑30—铂铑6	0~1820
K	镍铬—镍硅	-270~1372
N	镍铬硅—镍硅	
E	镍铬—铜镍合金（康铜）	
J	铁—铜镍合金（康铜）	
T	铜—铜镍合金（康铜）	



会产生新的热电势吗？



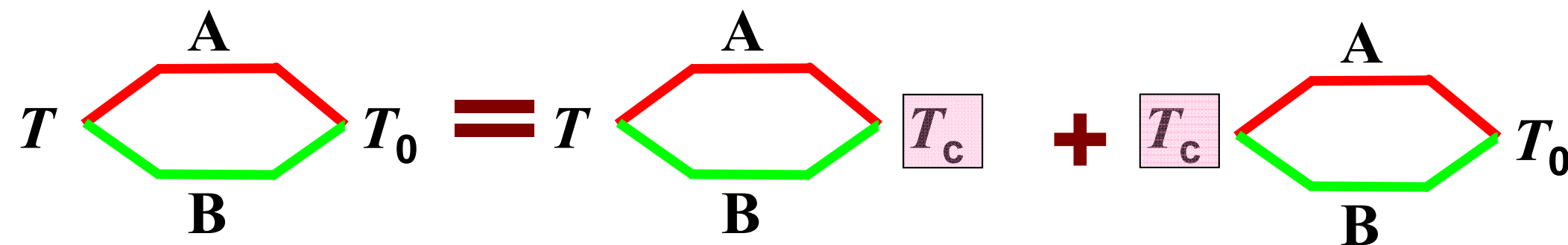
冷端温度为0℃



4.3.3 热电偶的基本定律

1. 中间温度定律

热电偶AB的热电势取决于热电偶的材料和两个接点的温度，而与温度沿热电极的分布及热电极的参数和形状无关。



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

热电偶分度表的理论基础。

4.3.3 热电偶的基本定律

例如，用铂铑10-铂热电偶测量炉温时，当冷端温度 $T_0=30^\circ\text{C}$ 时，测得热电势 $E(T, T_0)=393\mu\text{V}$ ，求实际炉温。

由 $T_0=30$ 查分度表得 $E(30, 0)=173\mu\text{V}$ ，根据中间温度定律得：

$$\begin{aligned} E(T, 0) &= E(T, 30) + E(30, 0) \\ &= 393 + 173 \\ &= 566\mu\text{V} \end{aligned}$$

则查表得炉温 $T=89^\circ\text{C}$ 。

热电偶分度表

$$E(T, 0) = E(T, 30) + E(30, 0)$$

$$= 393 + 173$$

$$= 566\mu V$$

老10-铂热电偶分度表

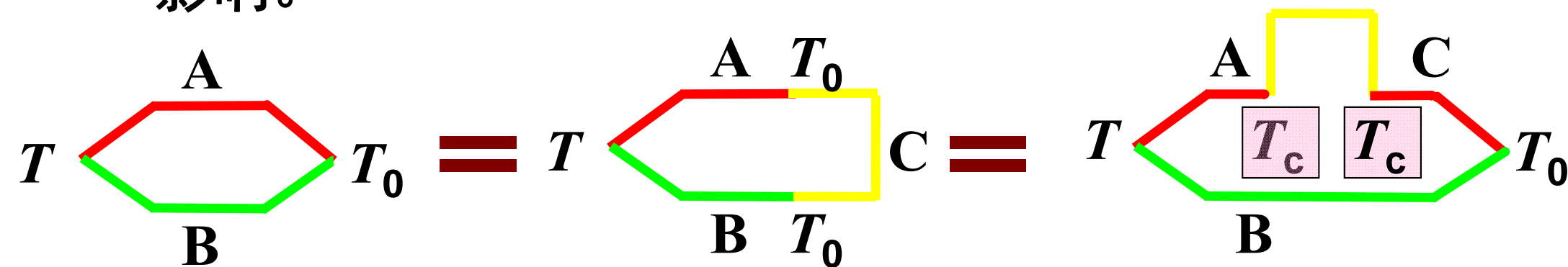
上端温度为0℃

°C	热 电 动 势 $\times 10^{-3}/mV$										°C
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
-50	-236										-50
-40	-194	-199	-203	-207	-211	-215	-220	-224	-228	-232	-40
-30	-150	-155	-159	-164	-168	-173	-177	-181	-186	-190	-30
-20	-103	-108	-112	-117	-122	-127	-132	-136	-141	-145	-20
-10	-53	-58	-63	-68	-73	-78	-83	-88	-93	-98	-10
0	0	-5	-11	-16	-21	-27	-32	-37	-42	-48	0
0	0	5	11	16	22	27	33	38	44	50	0
10	55	61	67	72	78	84	90	95	101	107	10
20	113	119	125	131	137	142	148	154	161	167	20
30	173	179	185	191	197	203	210	216	222	228	30
40	235	241	247	254	260	266	273	279	286	292	40
50	299	305	312	318	325	331	338	345	351	358	50
60	365	371	378	385	391	398	405	412	419	425	60
70	432	439	446	453	460	467	474	481	488	495	70
80	502	509	516	523	530	537	544	551	558	566	80
90	573	580	587	594	602	609	616	623	631	638	90

4.3.3 热电偶的基本定律

2. 中间导体定律

在热电偶AB的任意部位接入第三根导体C，只要保持两接入点的温度相同，则导体C的接入对回路电势没有影响。



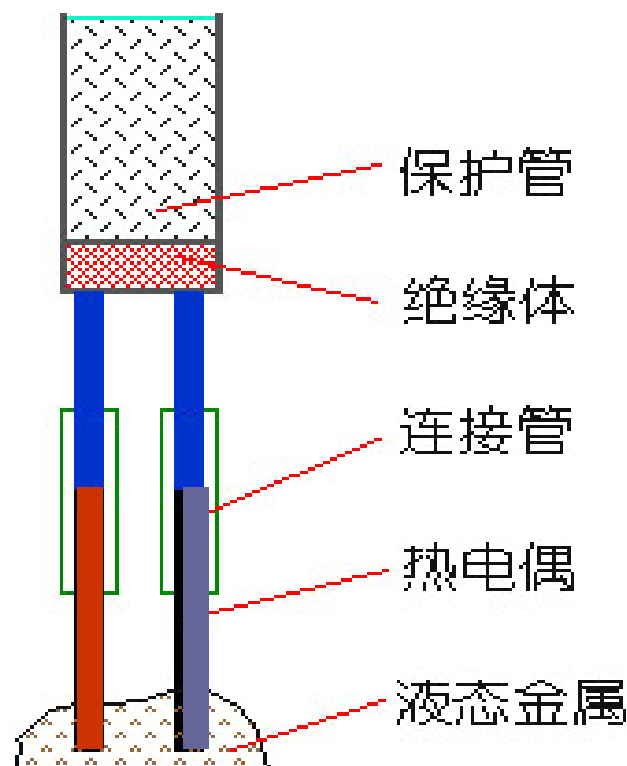
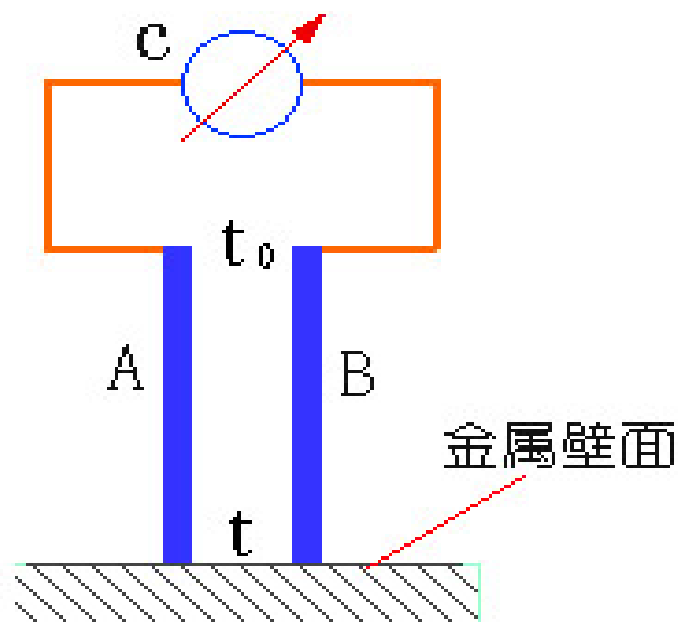
$$E_{ABC}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_0)$$

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

导线将热电偶的热电势引入到仪表中进行测量的理论基础。

4.3.3 热电偶的基本定律

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。

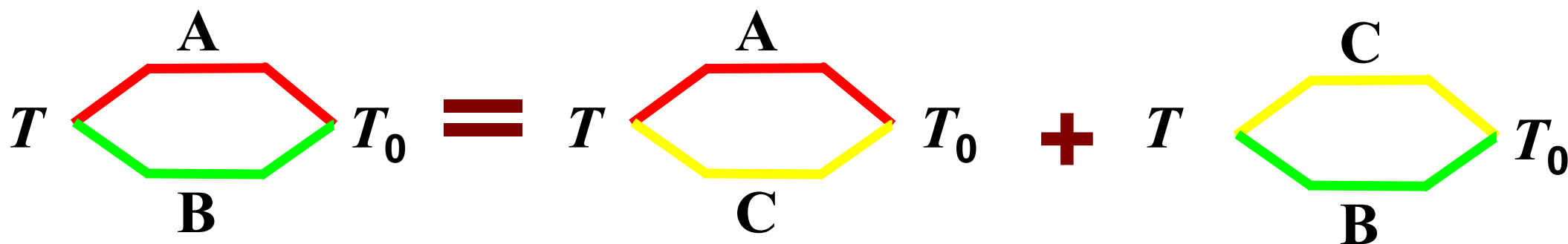


开路电偶的使用

4.3.3 热电偶的基本定律

3. 标准电极定律

任意两导体A、B分别与导体C组成热电偶，且两个热电偶接点温度相同，则用导体AB组成的热电偶的热电势等于热电偶AC和热电偶CB的热电势的代数和。



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

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

方便热电偶电极的选配。

4.3.3 热电偶的基本定律

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

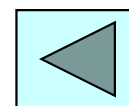
标准电极定律使得热电偶电极的选配提供了方便。

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

$$E_{AB}(1084.5, 0) = 13.976 - 8.354 = 5.622\text{mV}。$$



4.3.4 热电偶的误差及补偿

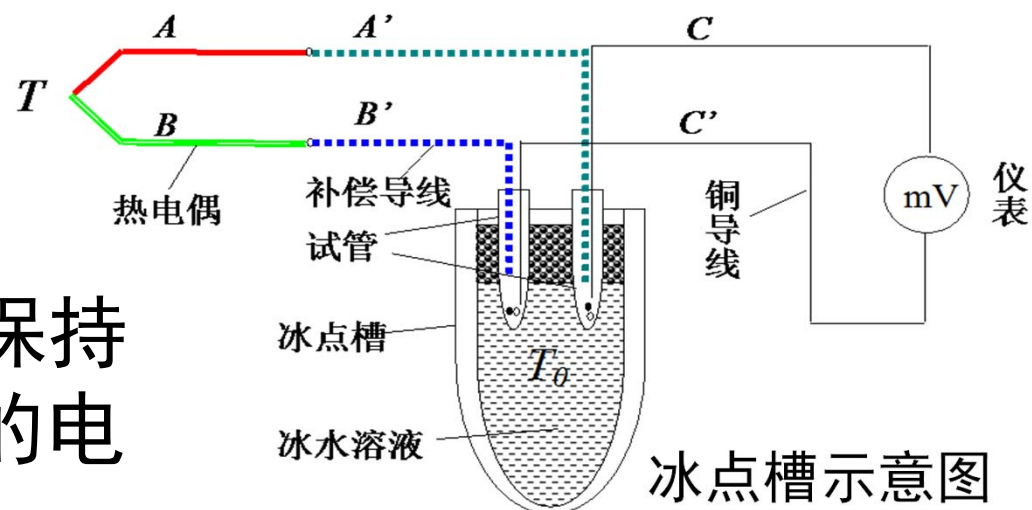
1、热电偶的冷端误差及补偿

(1) 0°C恒温法

(2) 修正法

利用中间温度定律：将冷端保持在某一恒定温度 T_C ，将测得的电势值在加上一个常数即可。

分度表 冷端参考温度0°C



$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_C) + E_{AB}(T_C, T_0) \quad \text{常数}$$

S型热电偶参考端温度非0°C时的校正表 (修正值加上所查的热电势)

t, °C	0	10	20	30	40	50
E, mV	0.000	0.055	0.113	0.173	0.235	0.299

4.3.4 热电偶的误差及补偿

(3) 补偿电桥法

- 利用不平衡电桥产生的电势来补偿因冷端温度变化而引起的热电势变化值

全臂电桥：

R_1, R_2, R_3 --- 锰铜线绕制电阻（固定电阻）

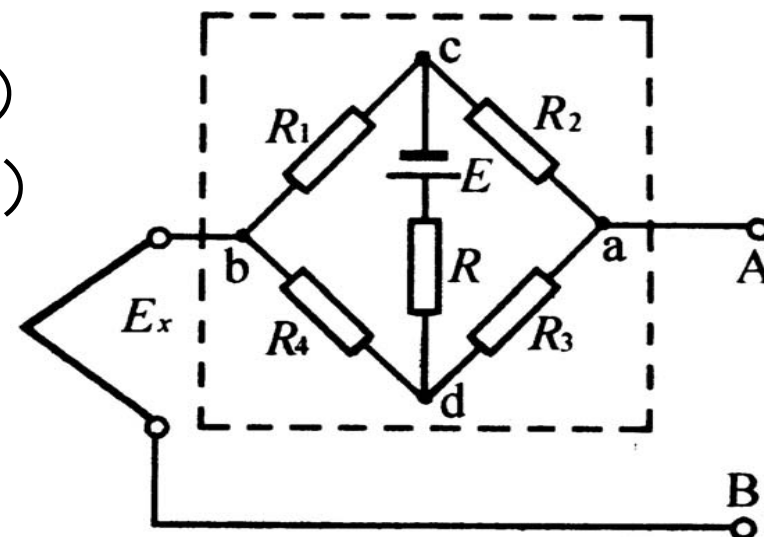
R_4 --- 铜线绕制补偿电阻（热电阻）

R --- 限流电阻

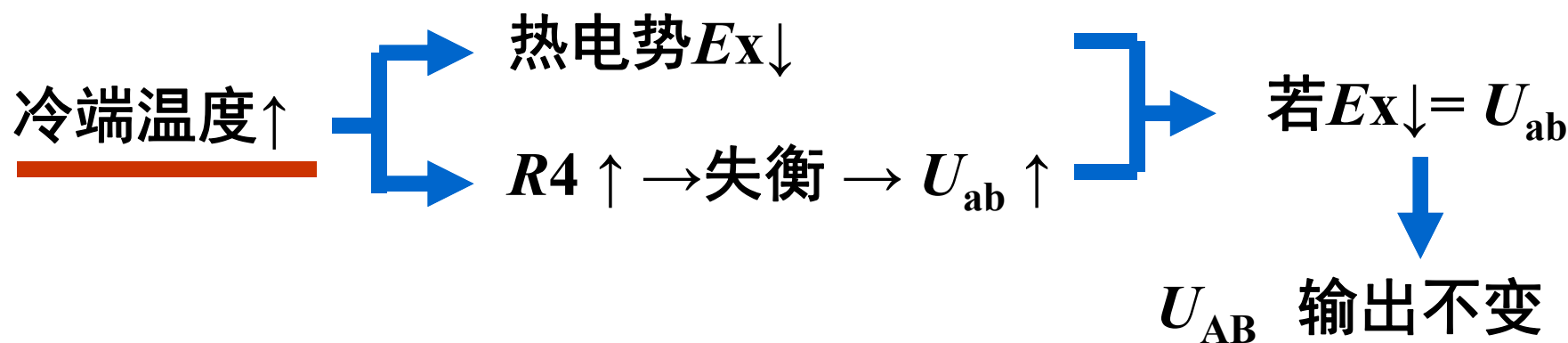
E --- 电桥电源

平衡： 调整 R_4 ，使得电桥输出 $U_{ab}=0$

补偿：



冷端误差补偿电桥



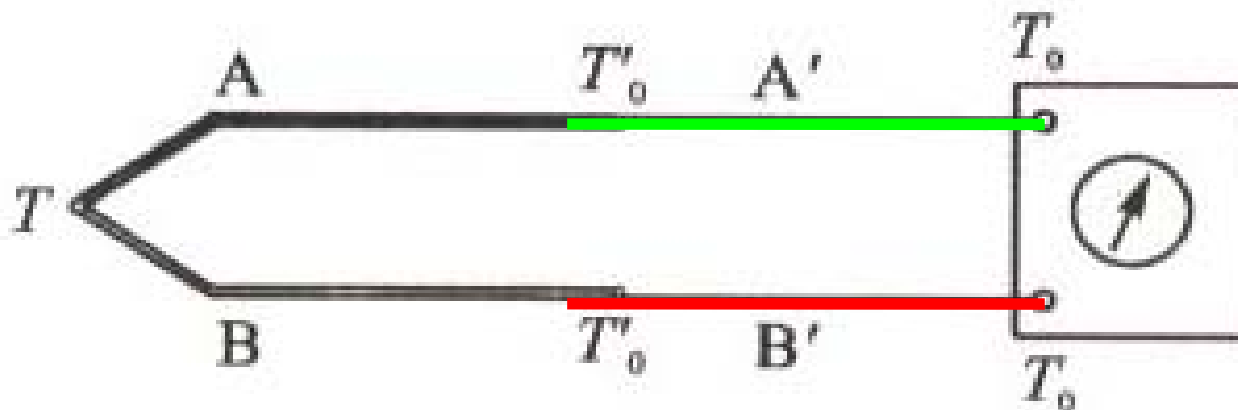
4.3.4 热电偶的误差及补偿

(4) 延引热电极法

用导线将冷端移至温度变化比较平缓的环境中，再采用上述补偿法进行补偿。

便宜电极：直接延长

贵重电极：采用与热电偶热特性相近的补偿导线



补偿条件

$$E_{AB}(T_0', T_0) = E_{A'B'}(T_0', T_0)$$

补偿导线的分类型号与分度号

补偿导线型号	配用热电偶的分度号	补偿导线合金丝		补偿导线颜色	
		正 极	负 极	正 极	负 极
SC	S (铂铑10-铂)	SPC (铜)	SNC (铜镍)	红	绿
KC	K (镍铬-镍硅)	KPC (铜)	KNC (铜镍)	红	蓝
KX	K (镍铬-镍硅)	KPX (镍铬)	KNX (镍硅)	红	黑
EX	E (镍铬-铜镍)	EPX (镍铬)	ENX (铜镍)	红	棕
JX	J (铁-铜镍)	JPX (铁)	JNX (铜镍)	红	紫
TX	T (铜-铜镍)	TPX (铜)	TNX (铜镍)	红	白

所谓补偿导线就是用热电性质与热电偶相近的材料制成导线。用它将热电偶的参比端延长到需要的地方，而且不会对热电偶回路引入超出允许的附加测温误差。

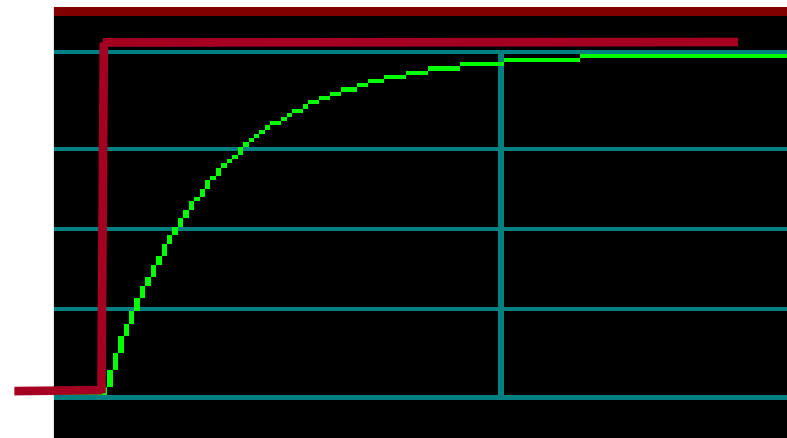
随着热电偶的标准化，补偿导线也形成了标准系列。国际电工委员会也制定了国际标准，适合于标准化热电偶使用。

4.3.4 热电偶的误差及补偿

2、热电偶的动态误差及时间常数

动态误差 T_g 介质温度 T 测量温度

$$T - T_0 = (T_g - T_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$



热电偶时间常数

$$\tau = \frac{c \rho V}{\alpha A_0}$$

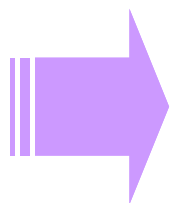
c —— 热接点的比热(J/(kg·K));

ρ —— 热接点的密度(kg/m³);

V —— 热接点容积(m³);

α —— 热接点与被测介质间的对流传热系数(W/m²·K);

A_0 —— 热接点与被测介质间接触的表面积(m²)。



3、热电偶的其它误差：

分度误差

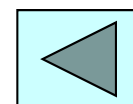
仪表误差与接线误差

干扰和漏电误差



测量仪表内阻要大
测量导线电阻要小

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。



4.3.5 热电偶的组成、分类及特点

1. 普通装配式热电偶

用于测量液体和气体的温度

2. 铠装热电偶的形式

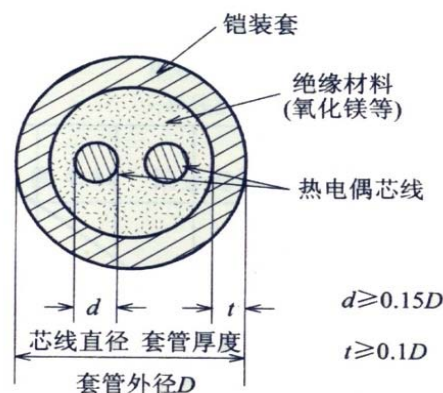
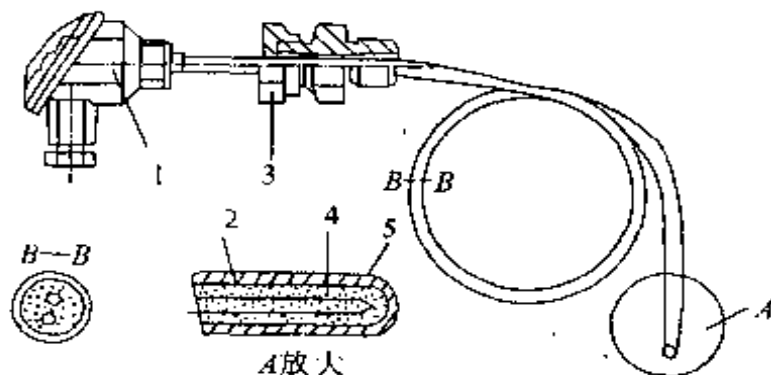
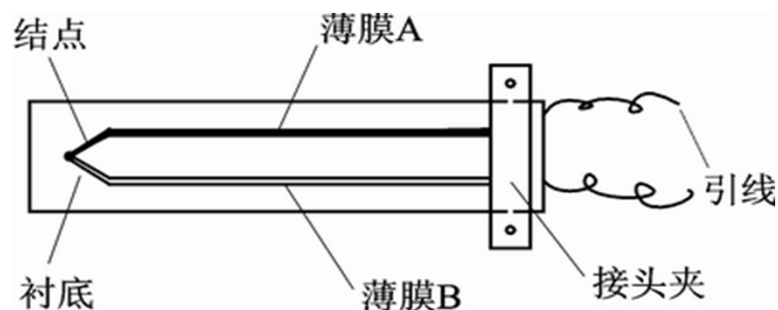


图 4.9 铠装热电偶截面图

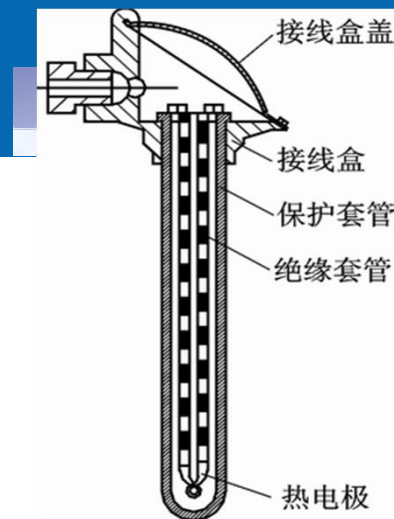
3. 薄膜热电偶



薄膜热电偶（片状）结构



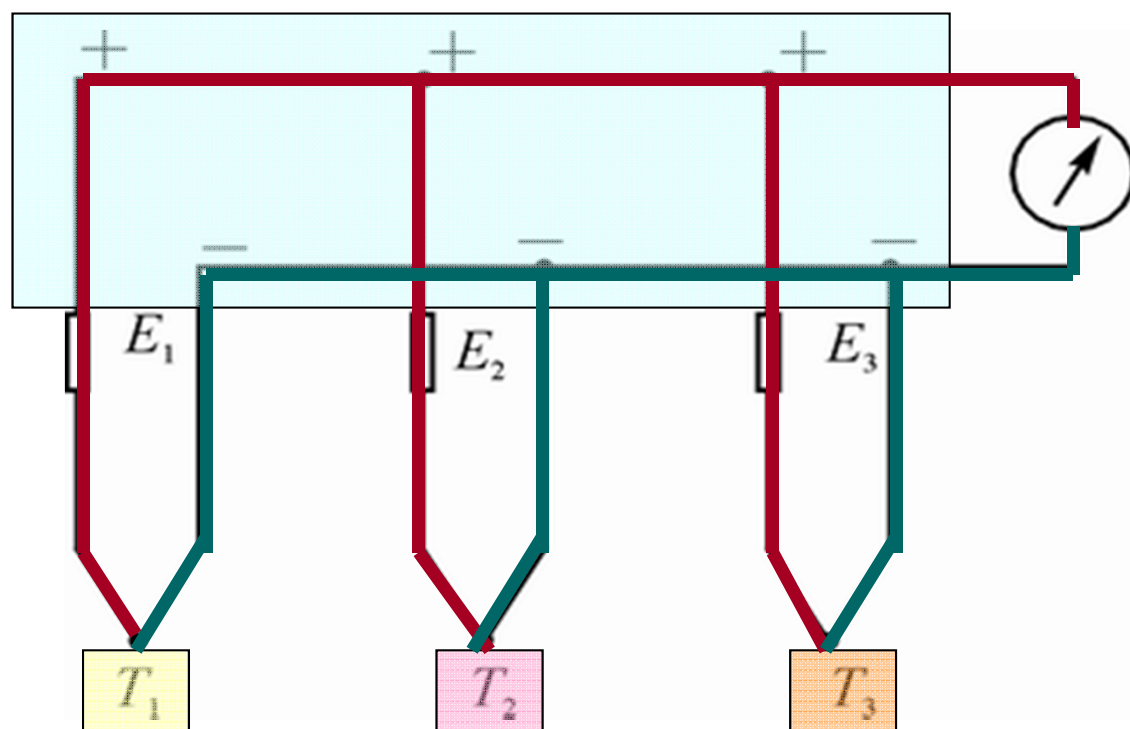
热容小、时间常数小，反映速度快



细长(1~3mm)，热容量小、热惯性小、动态响应快、

4.3.5 热电偶的组成、分类及特点

4. 并联热电偶 平均温度测量



相同型号的热电偶的同
性电极参考端并联
冷端温度相同
热端处于不同温度下
测量平均温度

$$T = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3}$$

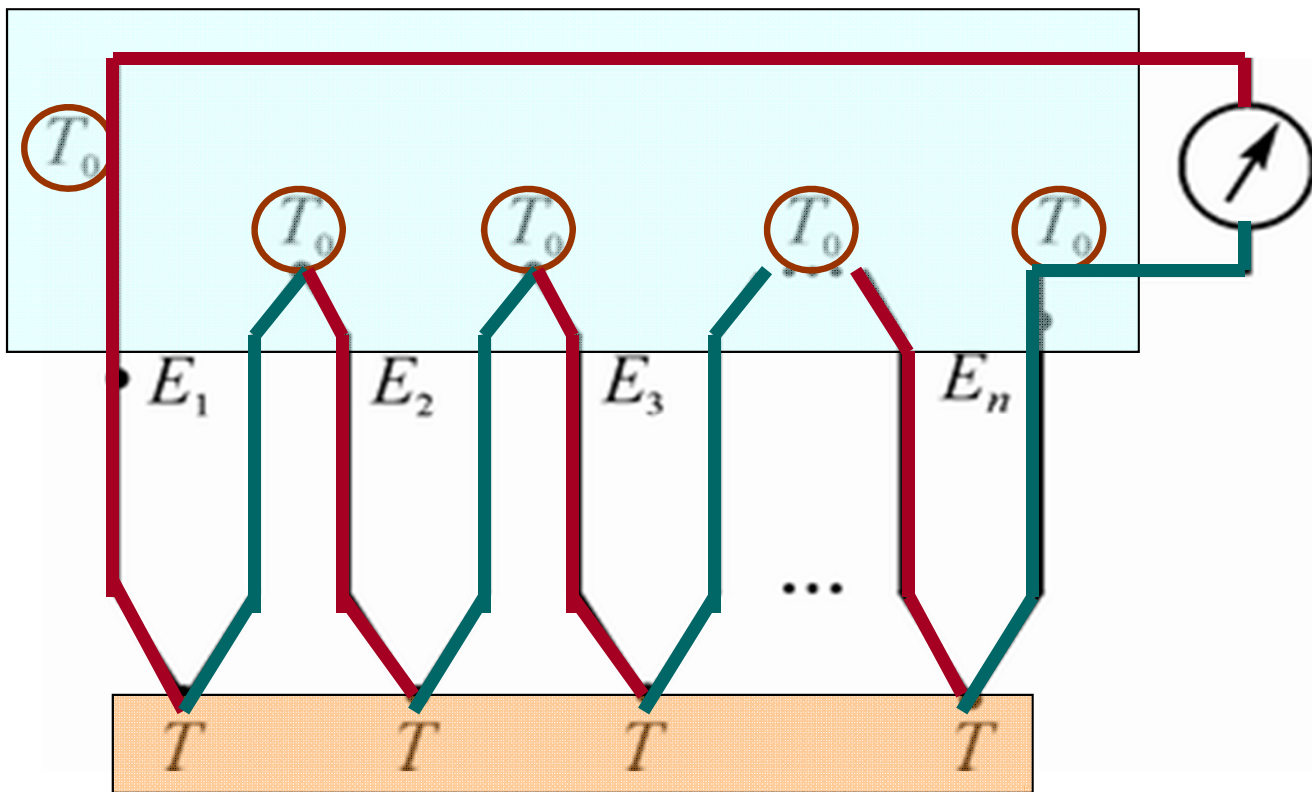
并联热电偶

4.3.5 热电偶的组成、分类及特点

5. 串联热电偶（又称热电堆）



各点温度之和



串联热电偶

相同型号的热电偶串联
测量端处于同一温度之下
连接点处于另一温度中
输出电动势是每个热电动势之和

各点温度之和

$$E = E_1 + E_2 + \cdots + E_n$$

$$T = T_1 + T_2 + \cdots + T_n$$

热电偶产品



装配式热电偶



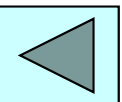
手持式热电偶



铠装热电偶



化工专用隔爆式热电偶



4.4 热电阻测温

4.4.1 热电阻变换原理

1. 热电阻和热阻效应

2. 金属热电阻

3. 半导体热敏电阻

4.4.2 热电阻测量电路

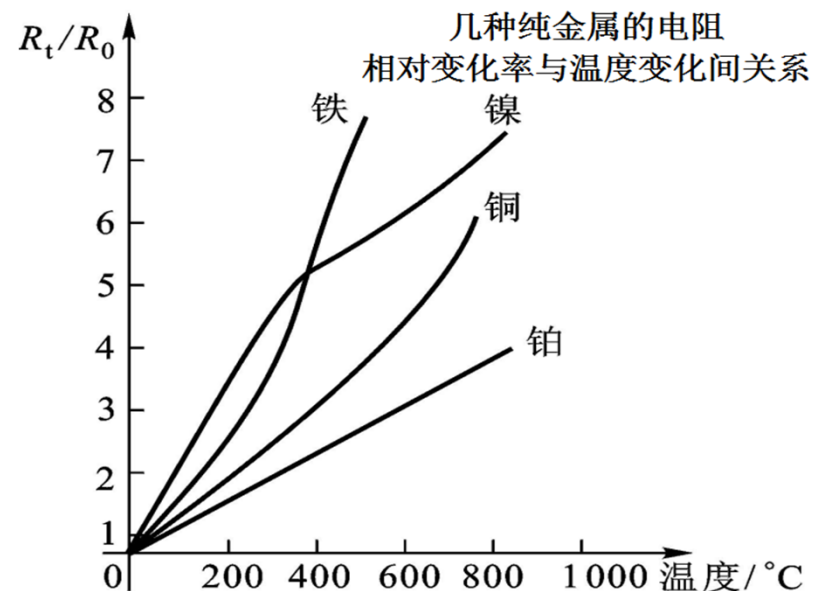
1. 平衡电桥电路

2. 不平衡电桥电路

3. 自动平衡电桥电路

4. 三线制电桥测量电路

5. 四线制电桥测量电路



4.4 热电阻测温

4.4.1 热电阻变换原理

1、热电阻

热阻效应  物质的电阻率随温度变化的物理现象。

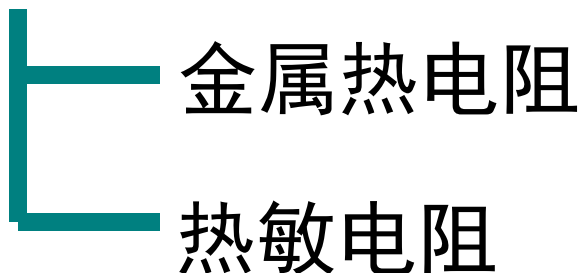
$$R_t = R_0[1 + \alpha(t - t_0)]$$

R_t – 温度 t 时的电阻值

R_0 – 温度 t_0 时的电阻值

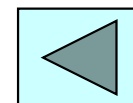
α – 电阻的温度系数 ($1/^\circ\text{C}$)，单位温度引起的电阻相对变化

热电阻的分类

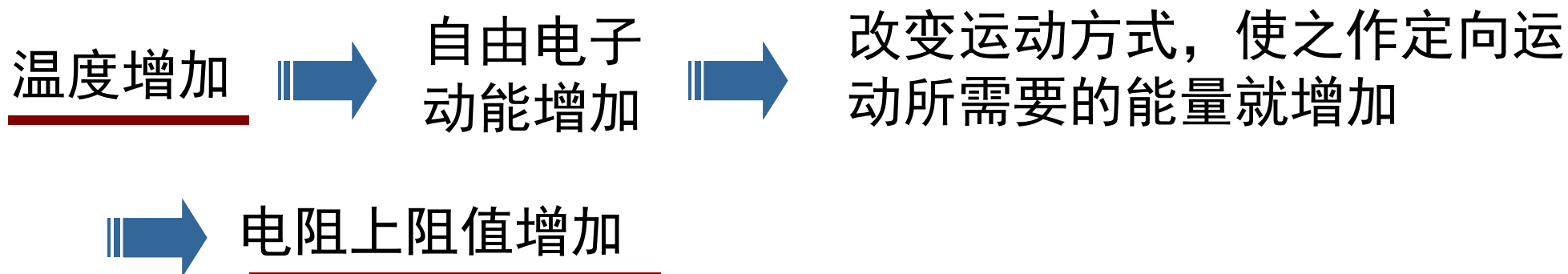


$$\alpha_T = 0.3\% \sim 0.6\% / ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_T = -4.75\% / ^\circ\text{C}$$



2、金属热电阻



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：

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

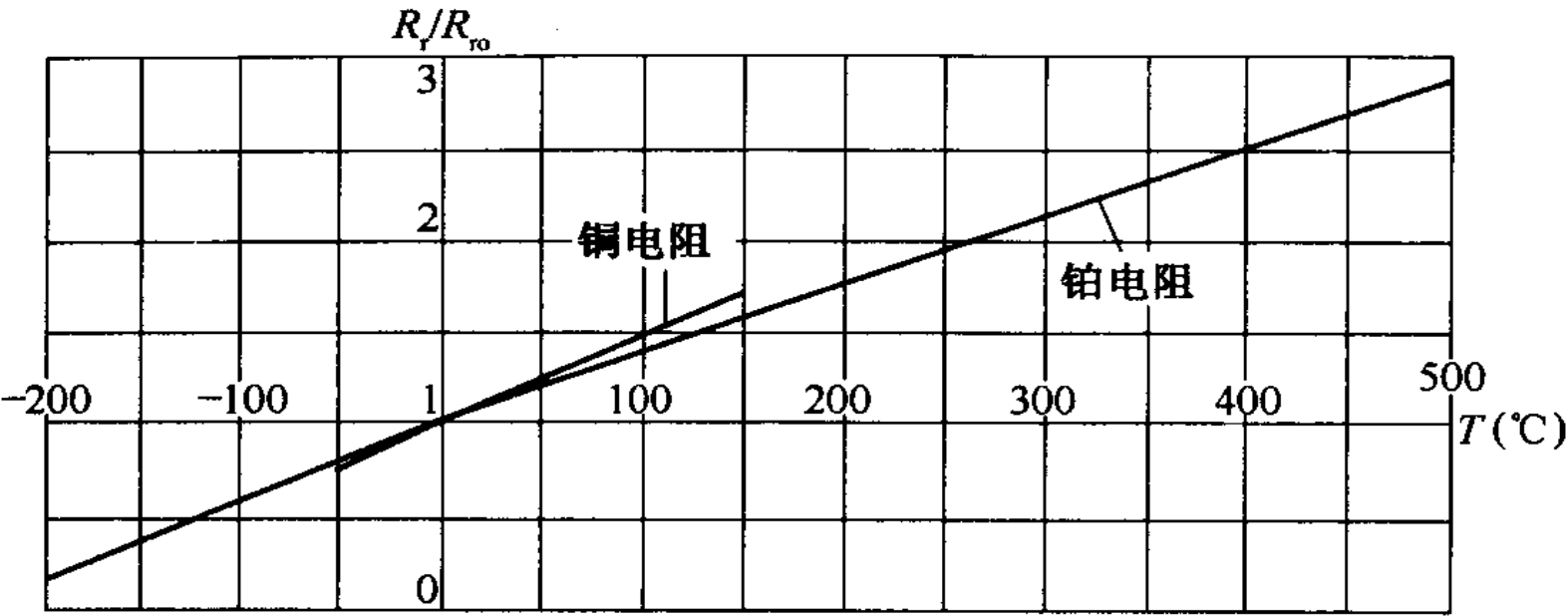
不同的金属导体， α_i 取值的范围不同。

通常情况下，它是温度的函数。

4.4.1 热电阻变换原理

常用的几种金属热电阻比较

种 类	金属特性	测温范围	优 点	缺 点
铂 热电阻	物理、化学性能稳定； 电阻率大；	-200~+850℃	线性好 用于标定	温度系数小 价格高
铜 热电阻	100° C易被氧化，用于 无水、无腐蚀介质	-50~+150℃	线性好 便宜	温度系数小 易氧化 易腐蚀
镍 热电阻	180° C 度特性			



4.4.1 热电阻变换原理

(1) 铂热电阻 10^{-3} 10^{-7} 10^{-12}

在 $-200^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ ，电阻值与温度之间的关系。

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

在 $0^{\circ}\text{C}\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，电阻值与温度之间具有较好的线性度。

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

铂的物理、化学性能稳定，测量精度高、电阻率较高；

铂热电阻使用范围是 $-200^{\circ}\text{C}\sim 850^{\circ}\text{C}$ 。除作为温度标准外，还广泛用于高精度的工业测量。

4.4.1 热电阻变换原理

(2) 铜热电阻

$$10^{-3} \quad 10^{-7} \quad 10^{-9}$$

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 $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。

$$R_t = R_0 \left[1 + At + Bt^2 + Ct^3 \right]$$

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

4.4.1 热电阻变换原理

热电阻结构

铂热电阻结构

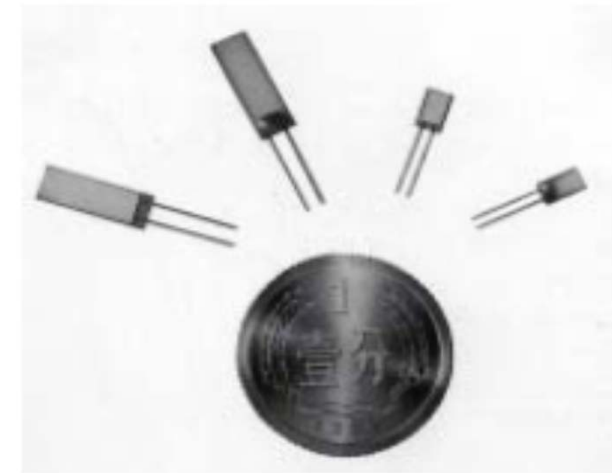


铜热电阻结构



避免感抗或感应电动势，采用双线无感绕制法。

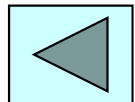
补偿线阻是为了保证铜电阻的电阻温度系数与理论值相等。



薄膜铂热电阻

热电阻类别	测温范围℃	分度号	允许偏差 Δt ℃
WZP型铂电阻	200~420	Pt100	B级(-200~800℃ 允差 $\pm(0.30+0.005 t)$)
			A级(-200~650℃) 允差 $\pm(0.15+0.002 t)$
WZC型铜电阻	-50~100	Cu50	-50~100℃ 允差 $\pm(0.3+6.0\times 10^{-3}t)$

注：式中 t 为感温元件的实测温度绝对值。



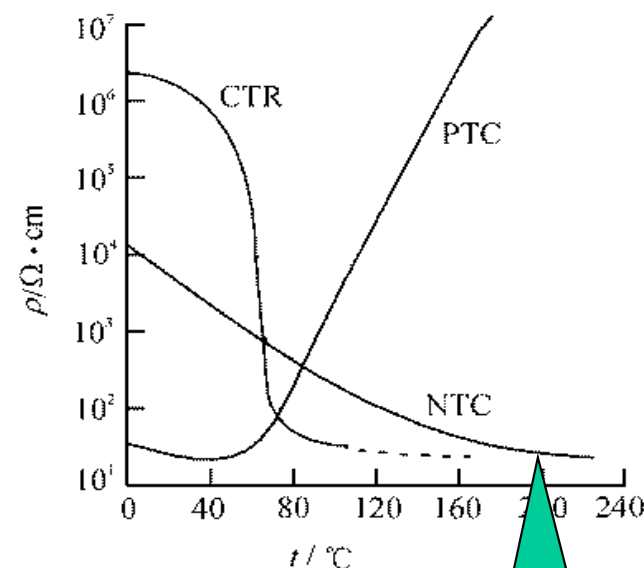
4.4.1 热电阻变换原理

3、半导体热敏电阻

(1) 变换机理：热敏电阻中的载流子的多少随温度变化而导致电阻率发生变化的现象。

(2) 分类：

- └ 正温度系数热敏电阻PTC
- └ 负温度系数热敏电阻NTC
- └ 临界温度电阻CTR



热敏电阻是由两种以上的金属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。

变化缓慢，适于温度测量

(3) 半导体热敏电阻的热电特性（NTC为例）

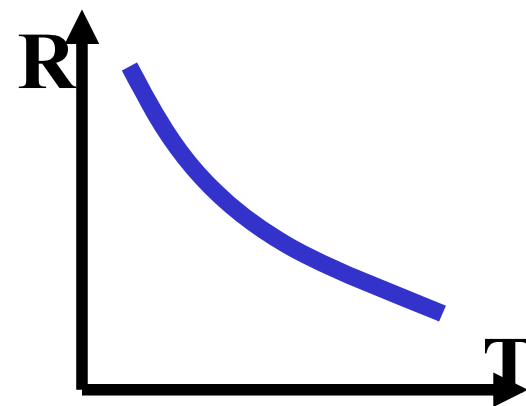
$$R_T = R_0 e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} = R_0 \exp[B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})]$$

T – 被测温度（K）； T_0 – 参考温度（K）

R_T – 温度为 T 时热敏电阻阻值

R_0 – 温度为 T_0 时热敏电阻阻值

B – 热敏电阻的材料常数（K），由实验获得，一般在2000~6000K。



4.4.1 热电阻变换原理

半导体热敏电阻的温度系数

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$



$$B = 4000\text{K}$$

$$T = 293.16\text{K} (t = 20^\circ\text{C})$$

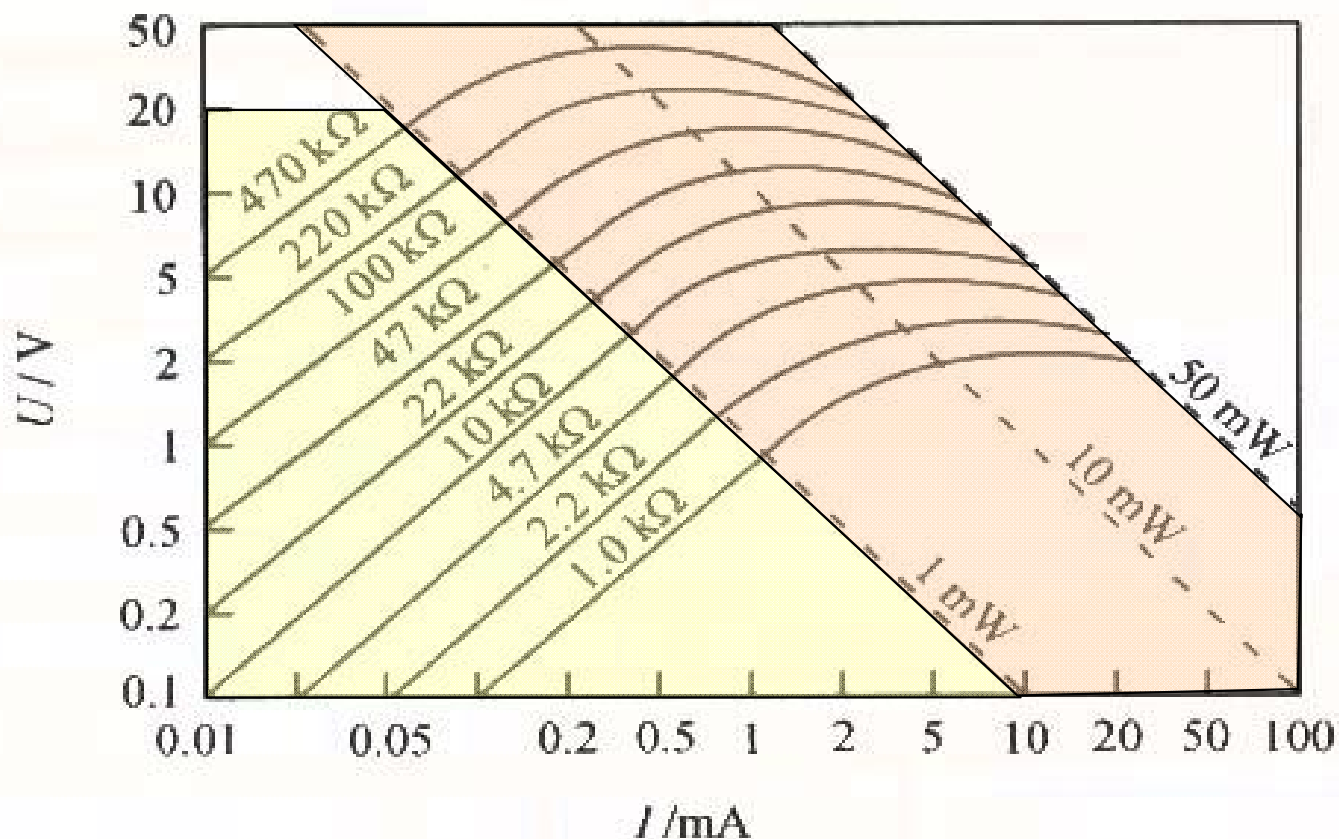
$$\alpha_T = -4.75\% / ^\circ\text{C}$$

半导体热敏电阻的
温度系数是铂热电
阻的10倍以上。

- 温度变化1°C时，热敏电阻本身电阻值的相对变化量。
- 热敏电阻的温度系数随温度的降低而迅速增大。

4.4.1 热电阻变换原理

(4) 半导体热敏电阻的伏安特性



当流过热敏电阻的电流很小时，热敏电阻的伏安特性符合欧姆定律。

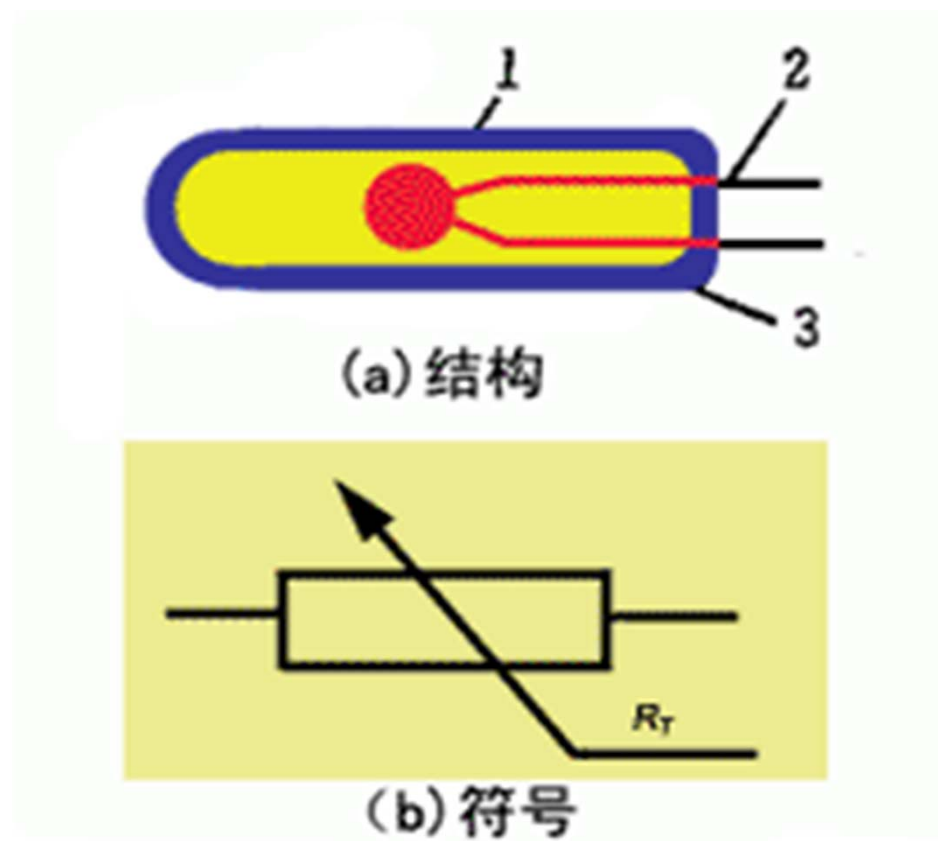
随着流过的电流的增加，热敏电阻自身温度升高，使得热敏电阻出现负阻特性。



热敏电阻的供电电流一般为微安级!!!

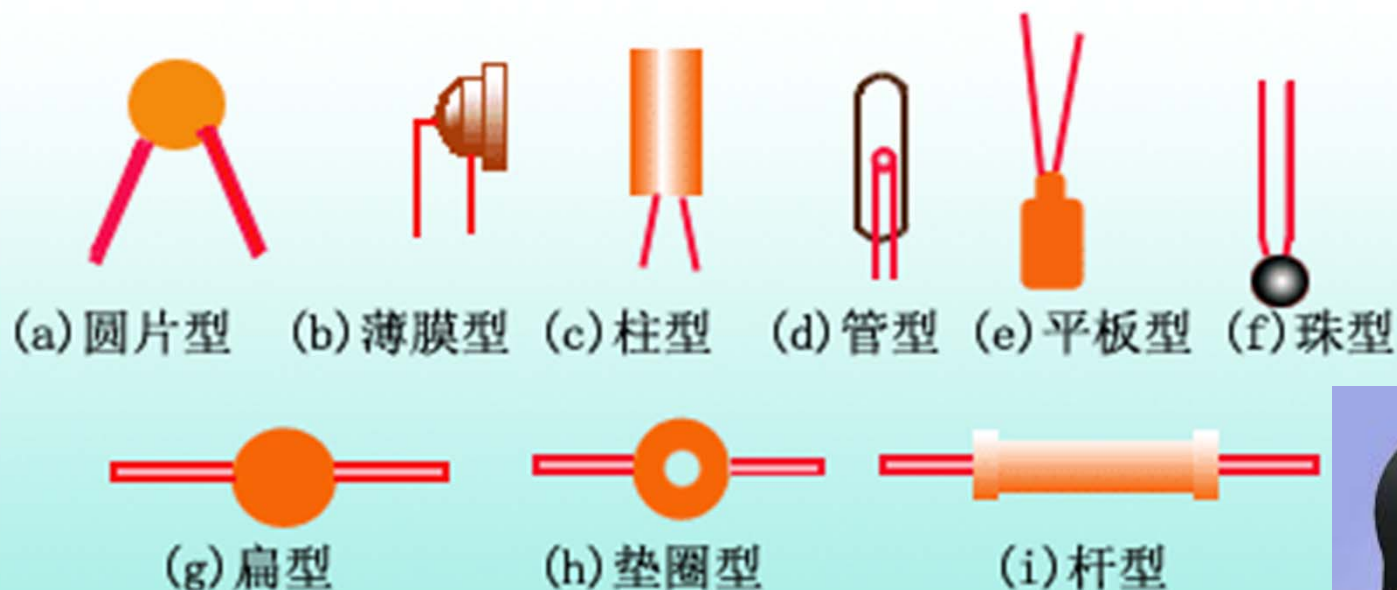
(5) 热敏电阻的结构

热敏电阻由热敏探头、引线和壳体等构成。

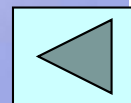
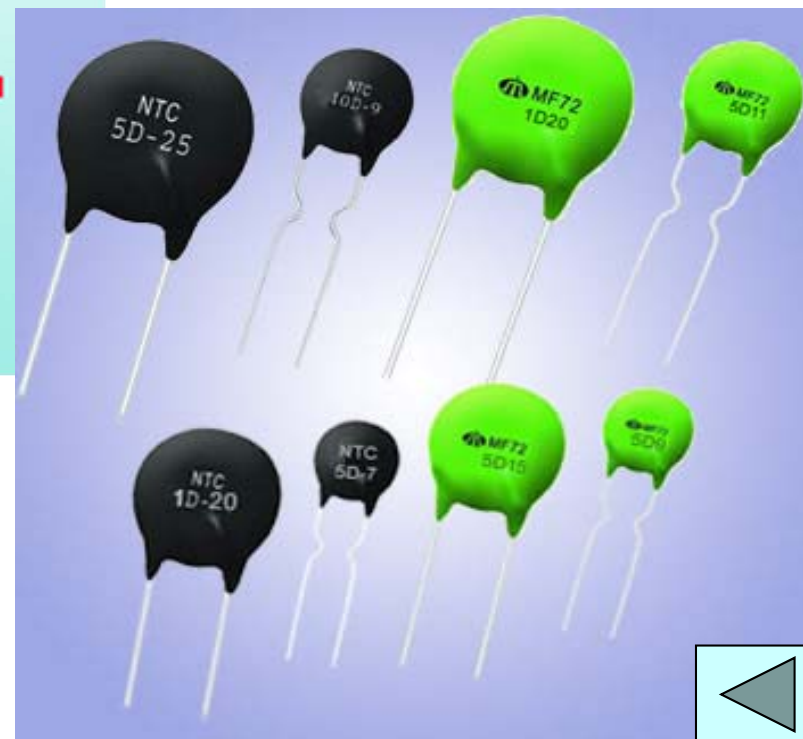


4.4.1 热电阻变换原理

根据使用需求，热敏电阻可制成不同的结构形式。



热敏电阻的结构形式



4.4.2 热电阻测量电路

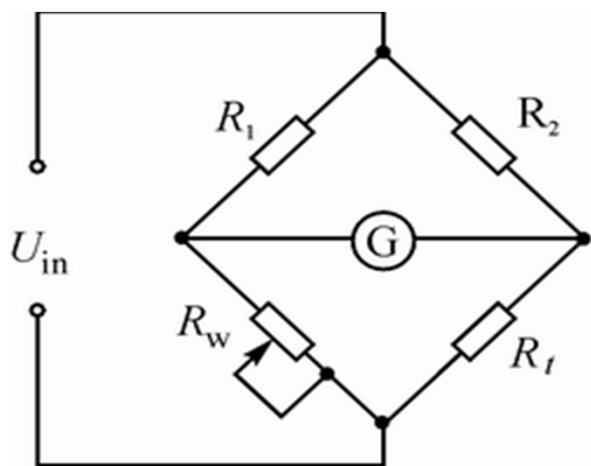
1. 平衡电桥电路

$$R_1 = R_2 = R_0$$

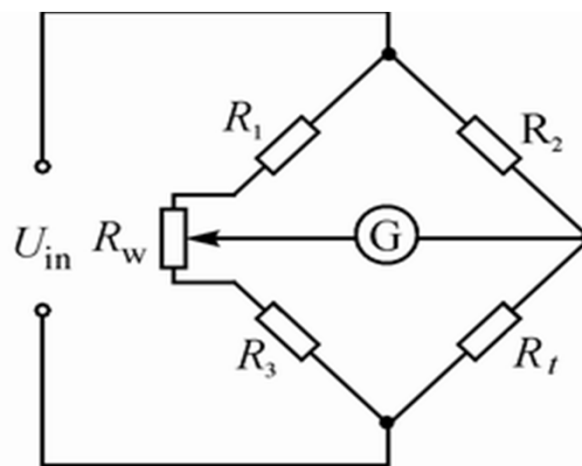
$$R_t = \frac{x}{L} R_0$$

L - 电位器的有效长度 (m) ;

R_0 - 电位器的总电阻。

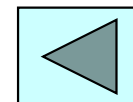


(a)



(b)

平衡电桥电路原理示意图



4.4.2 热电阻测量电路

2. 不平衡电桥电路

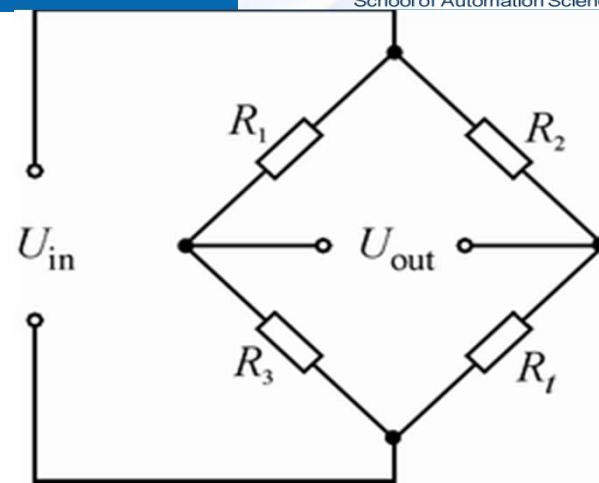
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_0$$

$$\Delta R_t \uparrow$$

$$U_{\text{out}} = \frac{R_0 + \Delta R_t}{2R_0 + \Delta R_t} U_{\text{in}} - \frac{1}{2} U_{\text{in}}$$

$$= \frac{\Delta R_t}{2(2R_0 + \Delta R_t)} U_{\text{in}}$$

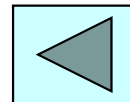
$$U_{\text{out}} \approx \frac{1}{4} U_{\text{in}} \frac{\Delta R_t}{R_0}$$



不平衡电桥电路

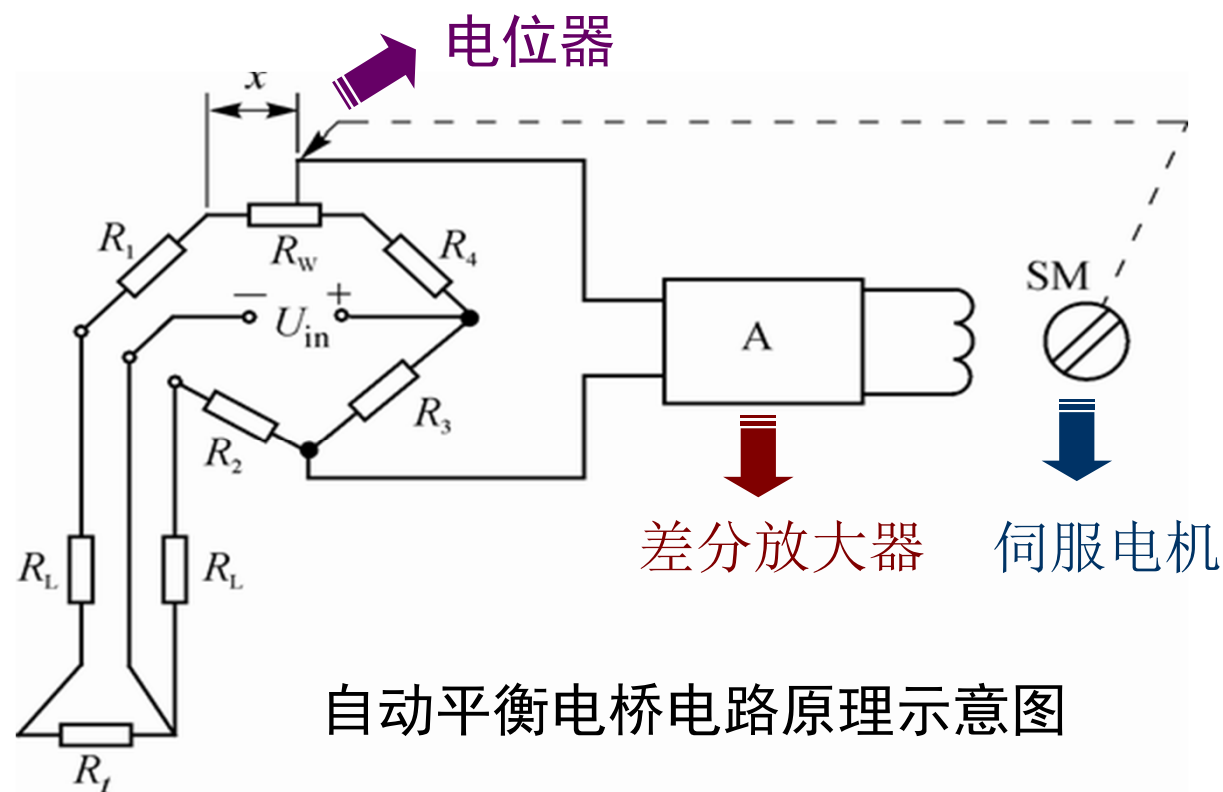
U_{in} —电桥的工作电压 (V) ;
 U_{out} —电桥的输出电压 (V) ;
 ΔR_t —热电阻的变化量 (Ω) 。

引起输出
非线性



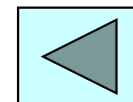
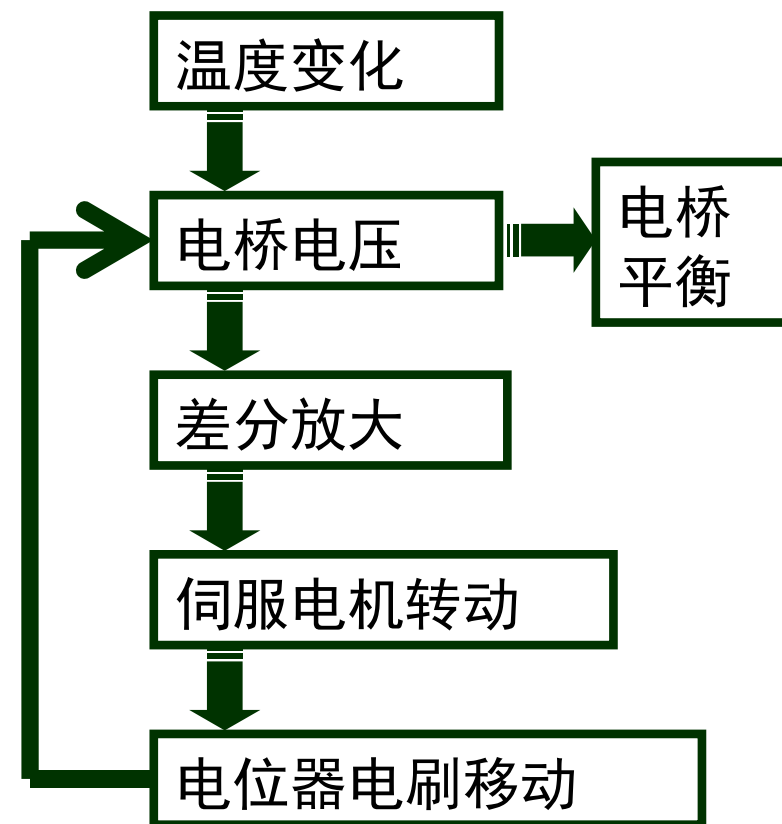
4.4.2 热电阻测量电路

3. 自动平衡电桥电路



伺服电机转动角 $\propto \Delta R_t$

$\propto \Delta t$



4.4.2 热电阻测量电路

4. 三线制电桥测量电路

R_T — 热电阻

r_1, r_2, r_3 — 引线电阻 5Ω

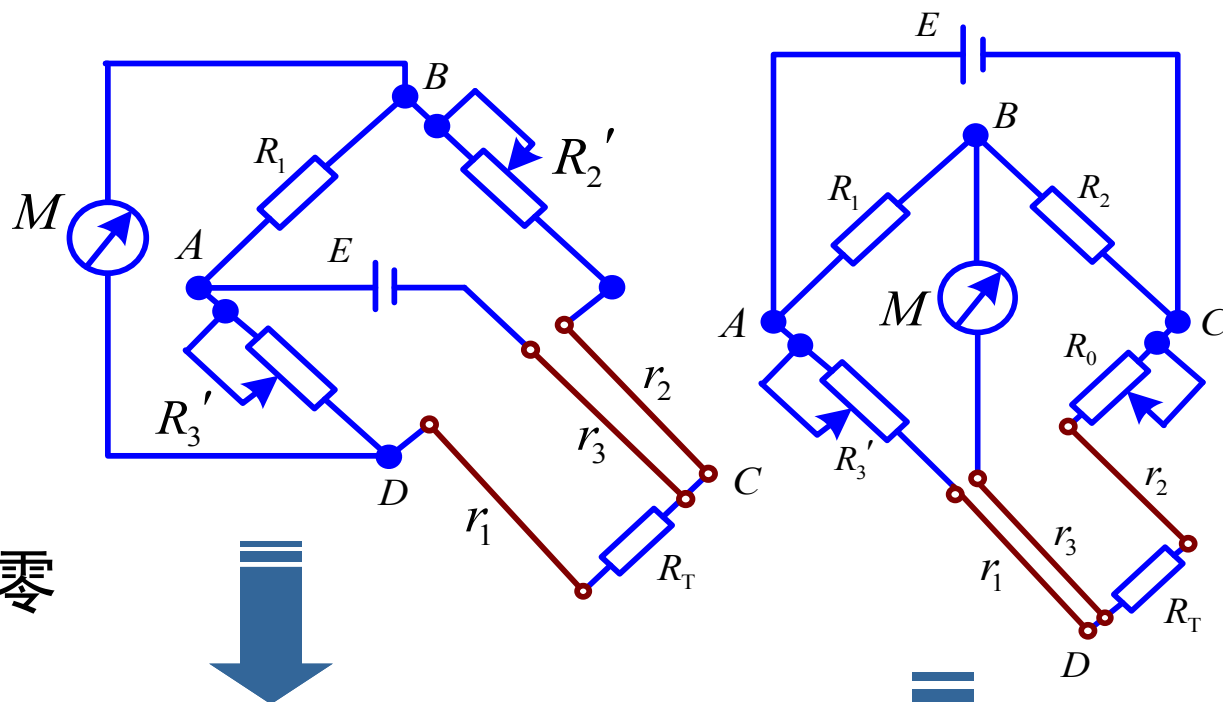
R_2', R_3' — 调整电阻

R_1, R_2, R_3 — 桥臂电阻

为M表内阻很大，电流近似为零

当 $U_B = U_D$ 时电桥平衡，若 $R_1 = R_3, r_1 \rightleftharpoons r_2$

则 $R_2 = R_T$ ，就可消除引线电阻的影响。



当 $U_B = U_D$ 时电桥平衡，若 $R_1 = R_2, r_1 \rightleftharpoons r_2$

则 $R_3 = R_T$ ，就可消除引线电阻的影响。

4.4.2 热电阻测量电路

$$R_2 = R_2' + r_2 \quad R_4 = R_T + r_1$$

未测温时 $R_2' = R_T \quad R_3 = R_3' = R_1 \quad U_{BD} = 0$

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad R_1 (R_T + r_1) = (R_2' + r_2) R_3$$

与 r 无关



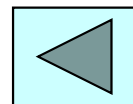
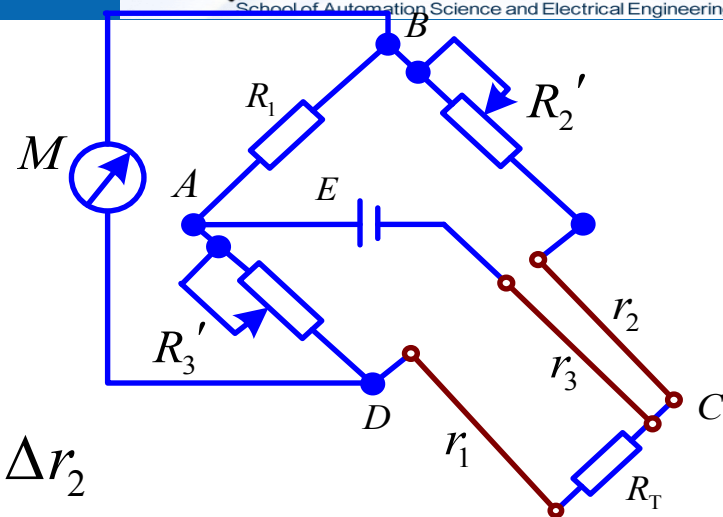
测温时 $R_4 = R_T + r_1 + \Delta R_T + \Delta r_1 \quad R_2 = R_2' + r_2 + \Delta r_2$

$$U_{BD} = E \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$U_{BD} = E \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = E \frac{R_1 (R_T + r_1 + \Delta R_T + \Delta r_1) - (R_2' + r_2 + \Delta r_2) R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

$$U_{BD} = E \frac{R_1 \Delta R_T}{\left((R_1 + R_2') \left(1 + \frac{r_1 + \Delta r_1}{R_1 + R_2'} \right) (R_3 + R_T) \left(1 + \frac{r_1 + \Delta R_T + \Delta r_1}{R_3 + R_T} \right) \right)} \approx \frac{R_1 E}{(R_1 + R_2')^2} \Delta R_T$$

$U_{BD} \propto \Delta R_T$ 与 r 无关



5. 四线式电桥测量电路

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r \quad R_1 = R_T + 2r + R_0'$$

$$R_3 = R_4 = R \quad R_2 = R_2' + 2r + R_0'' = R_2' + 2r + R_0 - R_0'$$

未测温时 $R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad U_{BD} = 0$

$$R_T = R_2' + R_0 - 2R_0' \quad \text{与 } r \text{ 无关}$$

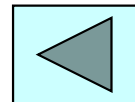
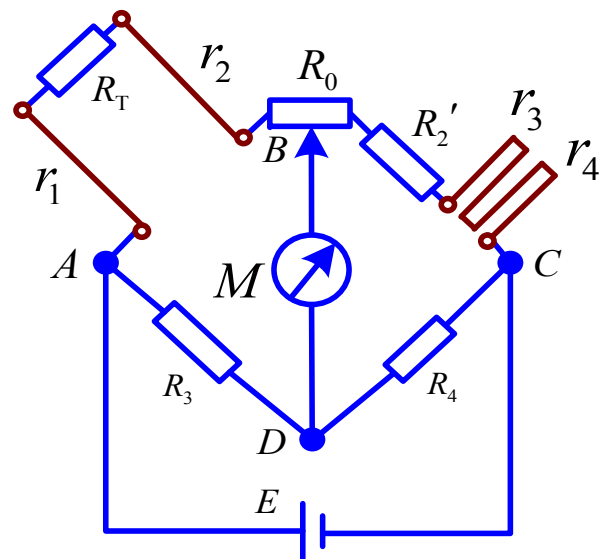
测温时 $R_1 = R_T + 2r + R_0' + \Delta R_T + 2\Delta r$

$$R_2 = R_2' + 2r + R_0 - R_0' + 2\Delta r$$


$$U_{BD} = E \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = E \frac{(R_T + 2r + R_0' + \Delta R_T + 2\Delta r) - (R_2' + 2r + R_0 - R_0' + 2\Delta r)}{2 \left[(R_T + 2r + R_0' + \Delta R_T + 2\Delta r) + (R_2' + 2r + R_0 - R_0' + 2\Delta r) \right]}$$

$$U_{BD} = E \frac{\Delta R_T}{2(R_T + 4r + 4\Delta r + \Delta R_T + R_2' + R_0)} = \frac{E}{2} \frac{\Delta R_T}{(R_T + R_2' + R_0) \left(1 + \frac{4r + 4\Delta r + \Delta R_T}{R_T + R_2' + R_0} \right)}$$


$$U_{BD} \propto \Delta R_T$$



1. 全辐射测温系统


测温原理  物体在全光谱范围内总辐射能量与温度的关系测量温度。

绝对黑体的热辐射与温度之间的关系。

绝对黑体  能够全部吸收辐射到其上能量的物体，实际物体的吸收能力小于绝对黑体。

 测得的温度总是低于物体的真实温度。

 测得的温度称为“辐射温度”。

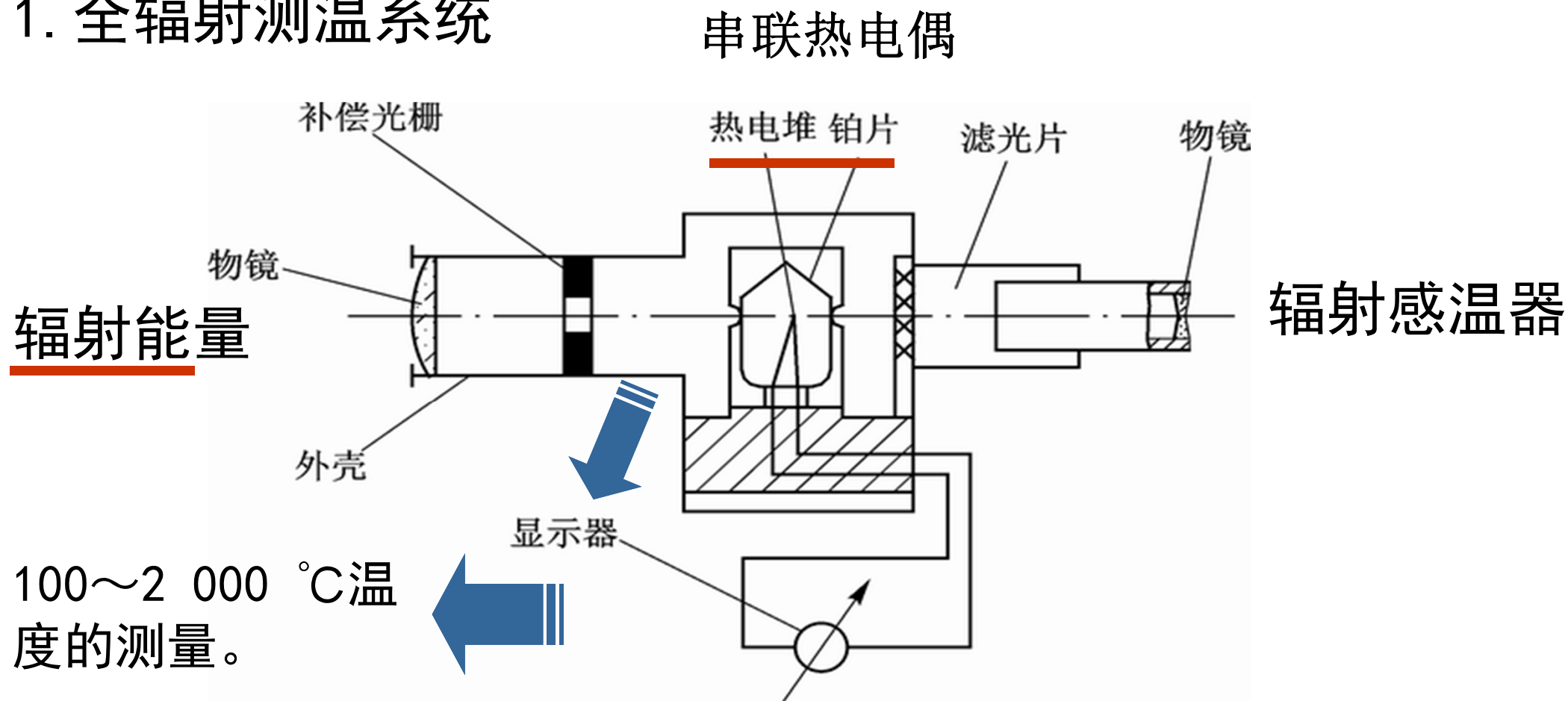
辐射温度  非黑体的总辐射能量 E_T 等于绝对黑体的总辐射能量时，黑体的温度即为非黑体的辐射温度 T_r ，则物体真实温度 T 与辐射温度 T_r 的关系

$$T = T_r \frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon_T}}$$

ε_T - 温度 T 时物体的全辐射发射系数

4.5 非接触式温度测量

1. 全辐射测温系统



全辐射测温系统结构示意图

热能 热电势

4.5 非接触式温度测量


红外测温仪 Infrared Thermometer 红外线的波长 $0.76\sim 100\mu\text{m}$ 。


红外测温仪（点温仪） 温度在绝对零度以上的物体，会因自身的分子运动而辐射出红外线。
红外热像仪 红外热电视


红外测温仪（点温仪） 红外热像仪 红外热电视 热释电摄像管（PEV）
热辐射分布的不可见热图像转变成视频信号



2. 亮度式测温系统

测温原理  利用物体的单色辐射亮度随温度变化的原理，以被测物体光谱的一个狭窄区域内的亮度与标准辐射体的亮度进行比较来测量温度。

亮度温度  测得的温度值低于被测物体的真实温度 T 。

 若以 T_L 表示被测物体的亮度温度，则物体的真实温度与亮度温度 T_L 之间的关系为

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_L} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon_{\lambda T}$$

$\varepsilon_{\lambda T}$ —单色辐射发射系数；

C_2 —第二辐射常数， $0.014388\text{m} \cdot \text{K}$ ；

λ —波长（m）。

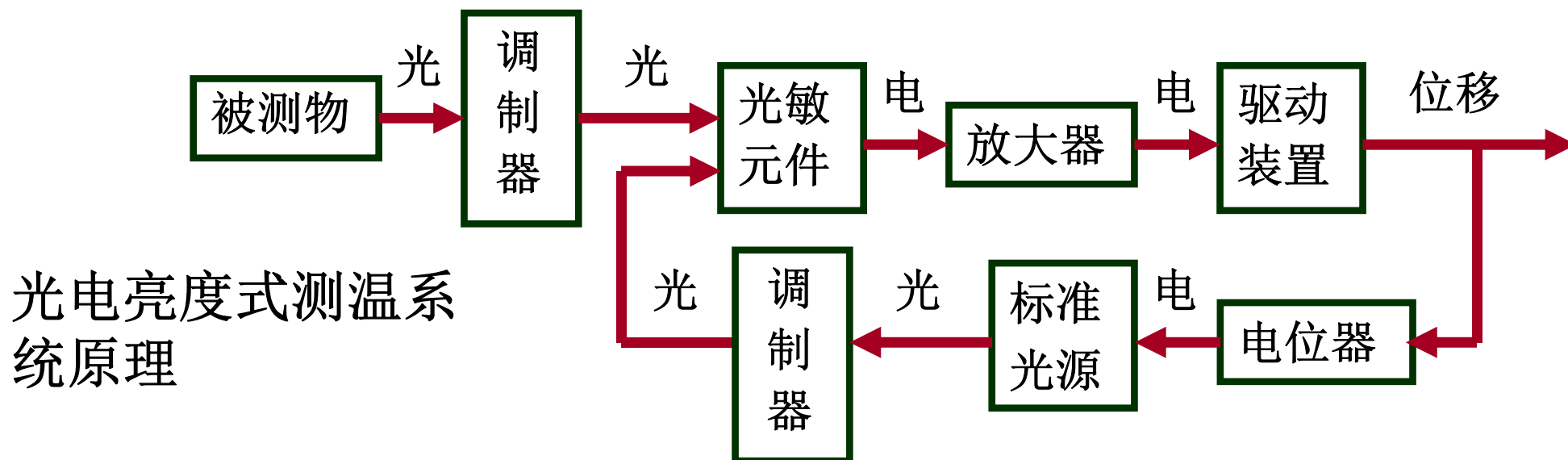
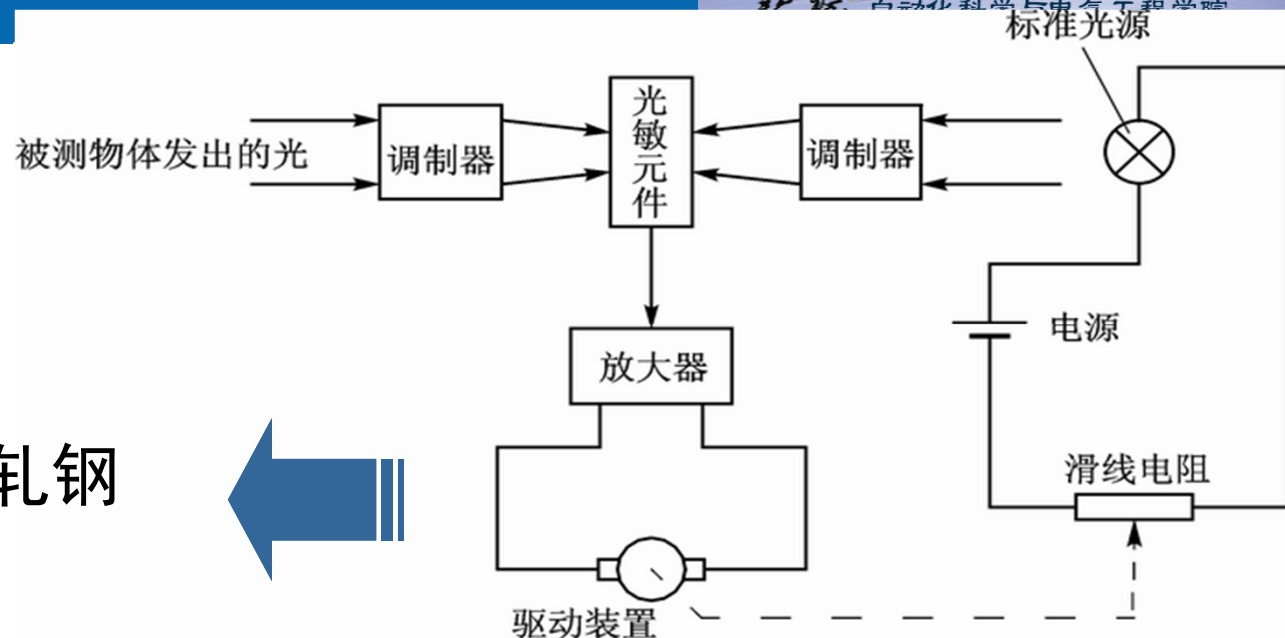
4.5 非接触式温度测量

2. 亮度式测温系统

灯丝隐灭式亮度测温系统

光电亮度测温系统

测量700~3 200 °C 浇铸、轧钢、锻压、热处理时的温度。



光电亮度式测温系统原理

4.5 非接触式温度测量

3. 比色测温系统

测温原理 \Rightarrow 以测量两个波长的辐射亮度之比为基础。通常，将波长选在光谱的红色和蓝色区域内。

比色温度 \Rightarrow λ_1 、 λ_2

$$\text{非黑体} \quad \frac{L_{\lambda_1 T}}{L_{\lambda_2 T}} = \frac{L_{\lambda_1 T}^*}{L_{\lambda_2 T}^*} \quad \text{绝对黑体}$$

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_p} = \frac{\ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

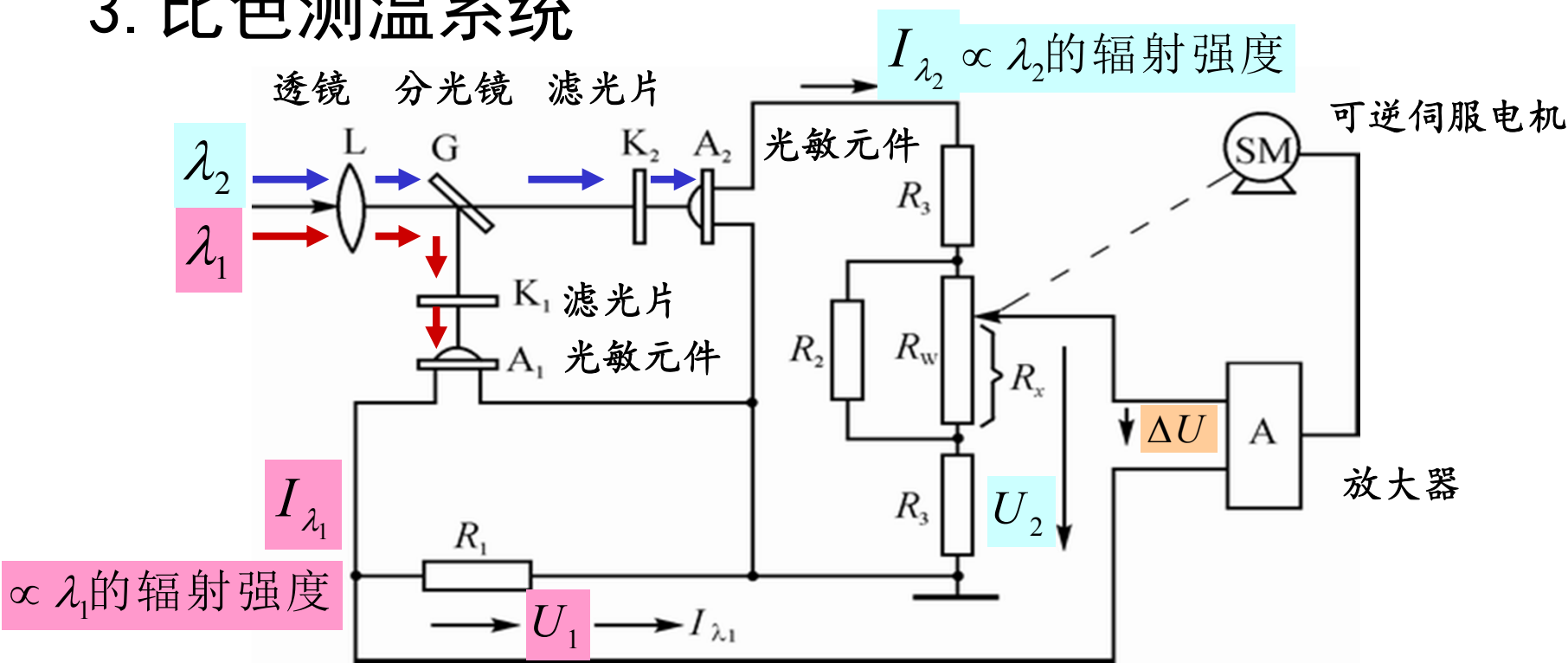
ε_{λ_1} —对应于波长 λ_1 的单色辐射发射系数；
 ε_{λ_2} —对应于波长 λ_2 的单色辐射发射系数；
 C_2 —第二辐射常数， $0.014388\text{m} \cdot \text{K}$ 。

\Rightarrow 比色温度等于真实温度。

\Rightarrow 多数金属略高。

4.5 非接触式温度测量

3. 比色测温系统



800~2 000 °C 温度的测量。

$$R_x = \frac{R_2 + R_w}{R_2} \left(R_1 \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} - R_3 \right)$$

比色测温系统的结构示意图

比色温度计



4.6 半导体P-N结测温系统

1. 温敏二极管

$$U_F = U_{g0} - \frac{k_0 T}{q} \ln \left(\frac{B' T^r}{I_F} \right)$$

U_{g0} ——半导体在0K温度时的电压；

k_0 ——波尔兹曼常数；

q ——电子电荷， $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

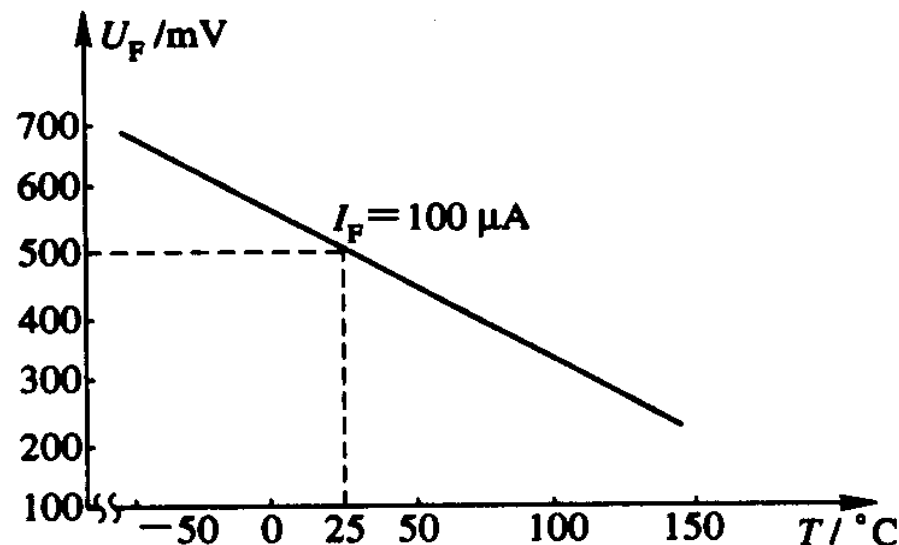
B' ——与结面积有关的常数；

r ——与迁移率有关的常数；

T ——绝对温度，单位为K；

应用：常温检测

--- CPU内置的热敏二极管(英特尔奔腾)



2DWM1硅温敏二极管的 U_F-T 特性

特点：当电流恒定，一定温度范围， $U \propto T$ （线性）

温度范围
内~常温



4.6 半导体P-N结测温系统

2. 温敏三极管

Be结导通电压:

$$U_{be} = U_0 - \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{\beta T^\gamma}{I_c}\right)$$

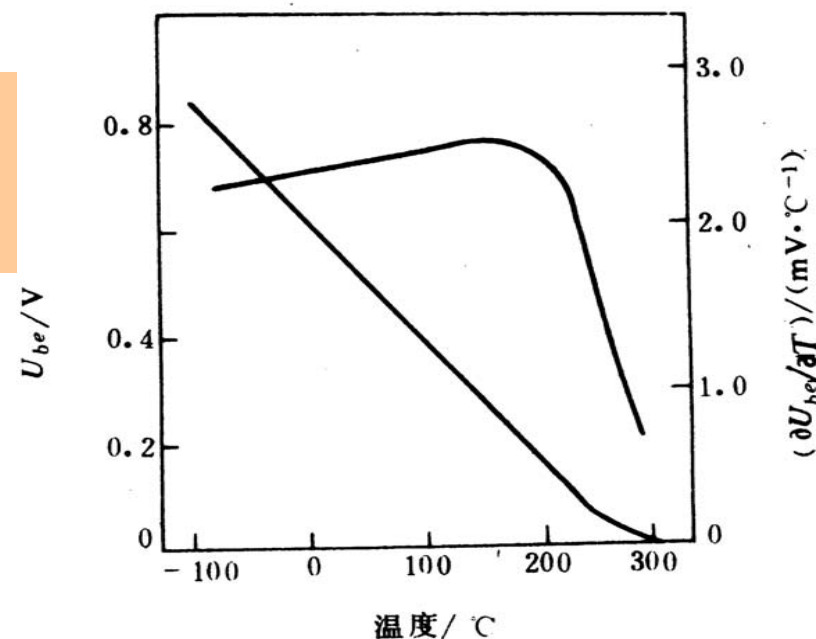
U_0 : 0K时的电压

k : 波尔兹曼常数

e : 电子电荷

I_c : 集电极电流

β 、 γ : 常数



特点: 当电流 I 恒定, 在一定温度范围内, $U_{be} \propto T$ (线性)

测温范围大 (几百度), 精度较低

应用: 大范围测温

4.6 半导体P-N结测温系统

3. 集成温度传感器

测温部分：

$$U_{be1} = U_0 - \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{\beta T^\gamma}{I_{c1}}\right)$$

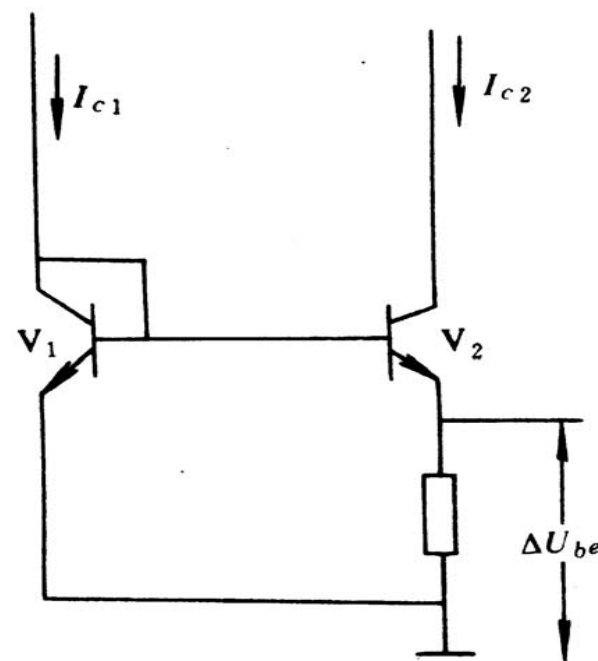
$$U_{be2} = U_0 - \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{\beta T^\gamma}{I_{c2}}\right)$$



$$\Delta U_{be} = U_{be1} - U_{be2} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_{c1}}{I_{c2}}\right)$$

特点：当电流 I_{c1} 、 I_{c2} 恒定， $U_{be} \propto T$ （线性）

集成度高 --- 测温环节 + 放大 + 恒流 + 补偿 +



4.6 半导体P-N结测温系统

3. 集成温度传感器

应用：集成测温、智能测温

典型：AD590

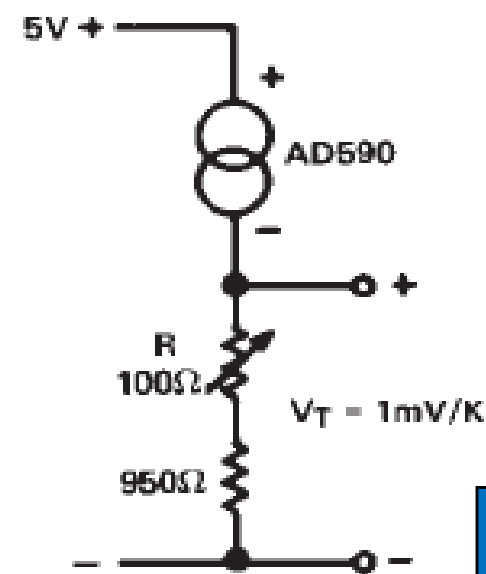
生产商：AD公司

封装：双端器件

测温：-55~150 °C

灵敏度：1 μ A/ K

非线性：0.3 °C(F.S.)



4.6 半导体P-N结测温系统

AD590集成温度传感器

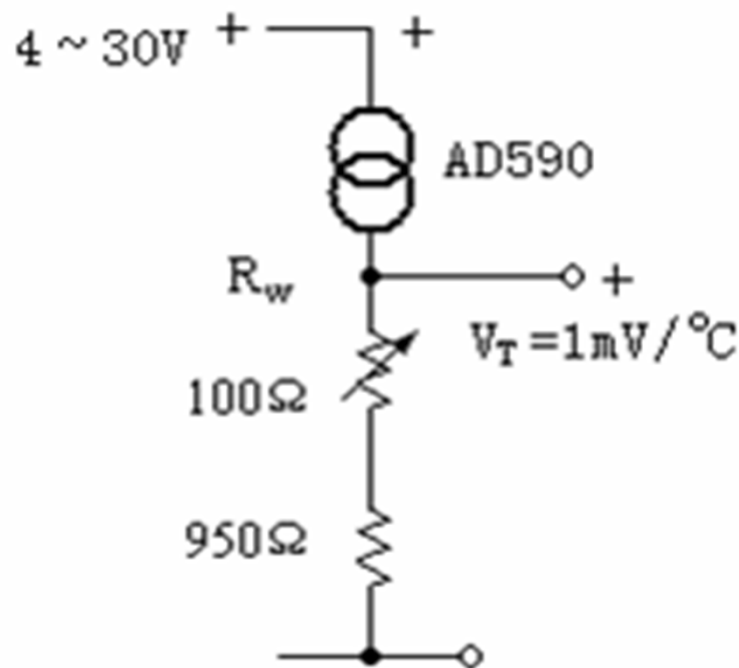
AD590是一种电流输出型的集成温度传感器，电源电压的变化对其电流的影响很小，并且电流随温度线性变化；

它可以当作是一种输出电流与温度成正比的恒流源；

若测量电路串接电阻，就可以将电流转换为电压；

特点：线性度好，灵敏度高，应用方便

测温范围 $-55\sim 150^{\circ}\text{C}$



4
7 工业测温仪表选型框图

