

第二章 温度检测



概述

- 温度是表征物体冷热程度的物理量，温度单位是国际单位制中的七大基本单位之一，自然界中任何物理或化学过程都紧密地与温度相联系。
- 在许多生产过程中，温度测量和控制直接和安全生产、保证产品质量、提高生产效率、节约能源等重大技术经济指标联系在一起。



- 从**宏观**上看，**温度的概念建立在热平衡基础上**，即两个各自处于热平衡状态下的热力学系统相互接触，发生热交换（高温物体放热，低温物体吸热），最终达到热平衡。
- 从**微观**上说，物体或系统由于分子不停运动而具有内部能量。**分子的平均动能越大，物体或系统的温度就越高。**



温标用于表示温度的数值，
它规定了温度的**读数起点**和测量
温度的**基本单位**。

- 目前**常用的温标**有以下几种：
- 1. 摄氏温标 ($^{\circ}C$)
- 2. 华氏温标 ($^{\circ}F$)
- 3. 国际（协议性实用）温标 (K)



1. 摄氏温标 ($^{\circ}\text{C}$)

- 1742年，瑞典人摄西阿斯建立。
- 规定在标准大气压下，冰的熔点为零度，水的沸点为100度。将之间划分100个等分，则每一等分为摄氏一度。



2. 华氏温标 ($^{\circ}F$)

- 1720年代前后，德国人华伦海特提出并建立。
- 规定在标准大气压下，冰的熔点为 $32^{\circ}F$ 水的沸点为 $212^{\circ}F$ 将 $32 \sim 212$ 之间划分 180 个等分，则每一等分为华氏一度。



华氏温度与摄氏温度的关系为：

$$n(^{\circ}C) = (1.8n + 32)(^{\circ}F)$$

n 为摄氏温标的度数



3. 国际（协议性实用）温标

- 1927年制定了第一个国际协议性温标（ITS—27）
- 建立该温标的 **3个基本条件** 是：
 1. 尽量与理想的热力学温标靠近；
 2. 温度复现性要高；
 3. 用于复现温标的标准温度计应使用方便，性能稳定。

随着科学技术的发展，对测温精度的要求在不断f提高，1927年制定的国际协议性温标已经过了多次修改（1948，1960，1968，1978）。目前使用1990年国际温标（ITS—90）。

ITS—1990规定：热力学温度（符号为T）是基本温度，温度的单位为凯尔文（K），其大小为水的三相点热力学温度的 $\frac{1}{273.16}^{\circ}$ 。

固、液、气
三态平衡

K 氏温度与摄氏温度的关系为：

$$t = T - 273.16$$

T 为热力学温度

t 为摄氏温度

2.1 温度检测方法

一. 测量方法的分类

- **温度**不能直接加以测量，只能借助于冷热不同的物体之间的热交换，以及借助于物体的某些物理性质随冷热程度不同而变化的特性，来**间接地加以测量**。
- 物体的尺寸、体积、密度、粘度、电导率、光导率、热容、光辐射强度等都随温度的变化而变化，通过测量上述特性改变的大小就可以间接测量温度的高低。
- 测温方法分为：**接触式测温**和**非接触式测温**。

1. 接触式测温

- **测温原理：**

让两个冷热程度不同的物体相接触，使得热量从高温物体传到低温物体上，直到两个物体的冷热程度完全一致（热平衡）。

测出测温物体的某一物理量（液体的体积或导体的电阻），就能得出被测物体的温度。

- **对用于测温的物体的物理性质的要求是：**

能连续、单值地随温度变化，且有较好的复现性。

优点：

- 直观、可靠；
- 测量精度高。

缺点：

- 因必须与被测介质接触，容易影响被测温度场的分布，带来测量误差；
- 在受到限制不能与被测介质充分接触时，由于检测元件的温度与被测温度不一致而带来误差；
- 若被测介质为高温或有腐蚀性，对测温元件的寿命有很大影响。
- 存在滞后时间。

常用的接触式测温仪表：

1. 膨胀式温度计

（玻璃液体温度计、双金属温度计）

2. 压力式温度计

3. 热电偶温度计

4. 热电阻温度计

2. 非接触式测温

- **热辐射原理：**

凡温度高于绝对零度的物体，均会以热辐射的形式发射或吸收一定的能量。

物体的热辐射能量随其温度的变化而变化。

- 非接触式的测温方法**利用热辐射原理进行测温**，测温元件不需与被测介质接触。

优点：

- 测温范围广（仪表的测温上限不受传感器材料的熔点限制）；
- 反应速度快（传感器不必和被测介质达到热平衡）；
- 不会破坏被测物体的温度场，从而可以测量运动物体的温度；
- 灵敏度较高，在一定的应用环境下，精度较好。

缺点：

- 在受到物体的发射率、对象到仪表之间的距离、烟尘和水蒸汽等介质的影响时，测量误差较大。

非接触式测温仪表：

1. 辐射式温度计
2. 亮度温度计
3. 比色温度计
4. 红外测温仪

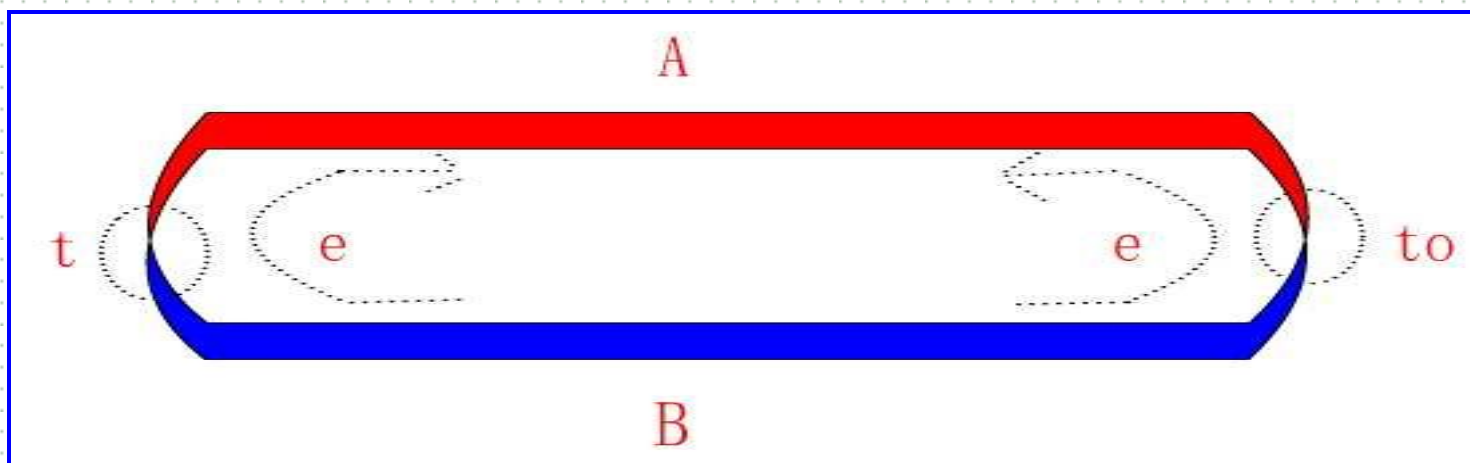
测温方式	类别和仪表		测温范围 (°C)	作用原理	使用场合
接触式	膨胀式	玻璃液体	-100~600	液体受热时产生热膨胀	轴承、定子等处的温度 作现场指示
		双金属	-80~600	两种金属的热膨胀差	
	压力式	气体	-20~350	封闭在固定体积中的气体、 液体或某种液体的饱和蒸汽 受热后产生体积膨胀或 压力变化	用于测量易爆、易燃、 振动处的温度，传送距 离不很远
		蒸汽	0~250		
		液体	-30~600		
	热电类	热电偶	0~1600	热电效应	液体、气体、蒸汽的中、 高温，能远距离传送
	热电阻	铂电阻	-200~850	导体或半导体材料受热后 电阻值变化	液体、气体、蒸汽的中、 低温，能远距离传送
		铜电阻	-50~150		
		热敏电阻	-50~300		
	其他电学	集成温度传感器	-50~150	半导体器件的温度效应	
		石英晶体温度计	-50~120	晶体的固有频率随温度变化	
非接触式	光纤类	光纤温度传感器	-50~400	光纤的温度特性或作为传 光介质	强烈电磁干扰、强辐射 的恶劣环境
		光纤辐射温度计	200~4000		
	辐射式	辐射式	400~2000	物体辐射能随温度变化	用于测量火焰、钢水等 不能接触测量的高温场 合
		光学式	800~3200		
		比色式	500~3200		

2.2 热电偶温度计

- 热电偶温度计利用**热电效应**来测量温度，即由冷端温度固定的热电偶产生**热电势**，通过导线与测量仪表组成闭合回路，测出电流或电势的大小就可知温度的高低。
- 热电偶温度计的**优点**：
 - ❖ 测量范围广（ $-200\sim 2800^{\circ}\text{C}$ ）；
 - ❖ 便于远距离测量、自动记录等操作；
 - ❖ 热电偶可做成各种形式，以适应各种测量要求；
 - ❖ 结构简单，可应用的材料广泛，制造容易。

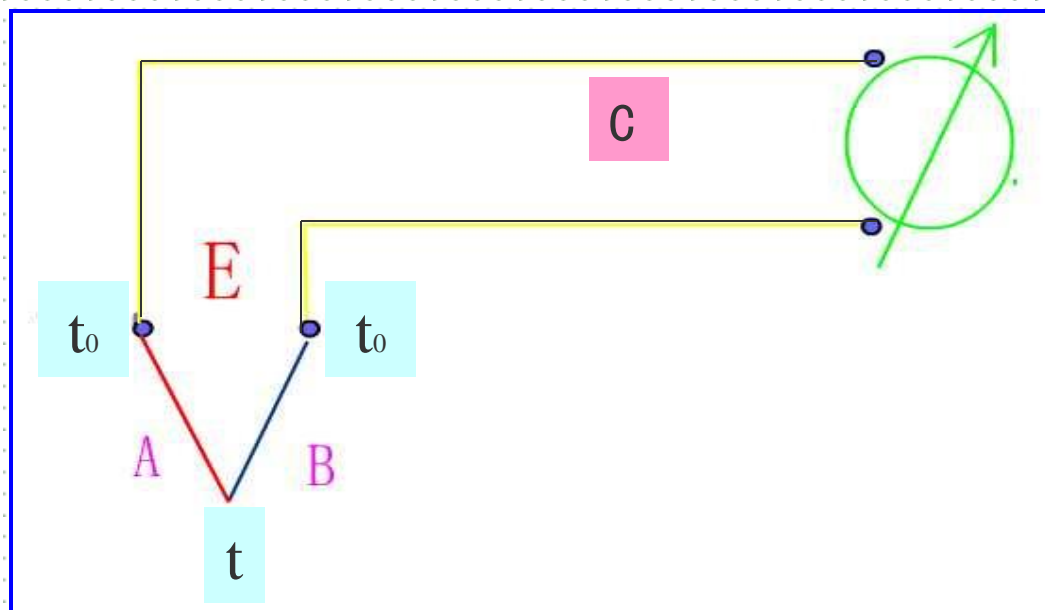
热电效应（Seebeck效应）：

将两种不同材料的导体 组成一个封闭回路，如果两端结点的温度不同，回路中就会产生一定大小的热电势。这种现象称为**热电效应**。



一. 热电偶温度计的组成及工作原理

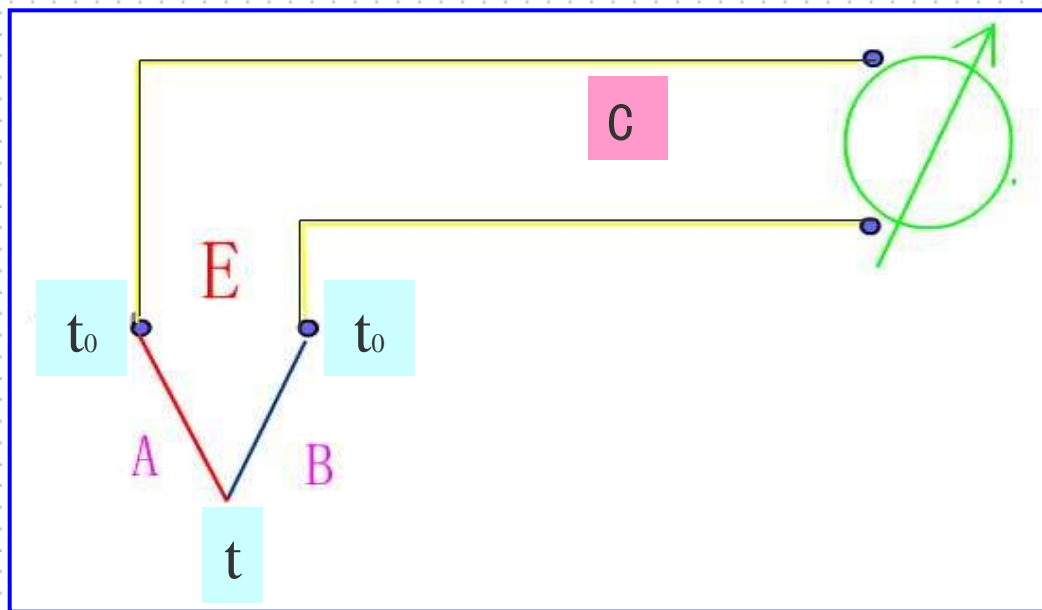
热电偶由两根不同材料的导体或半导体组成，其中的一端焊接在一起，插在被测温的设备中，故称作为热电偶的**热端（测量端）**。热电偶的另一端称为**冷端（参比端）**，通过导线连接到测量仪表上去。

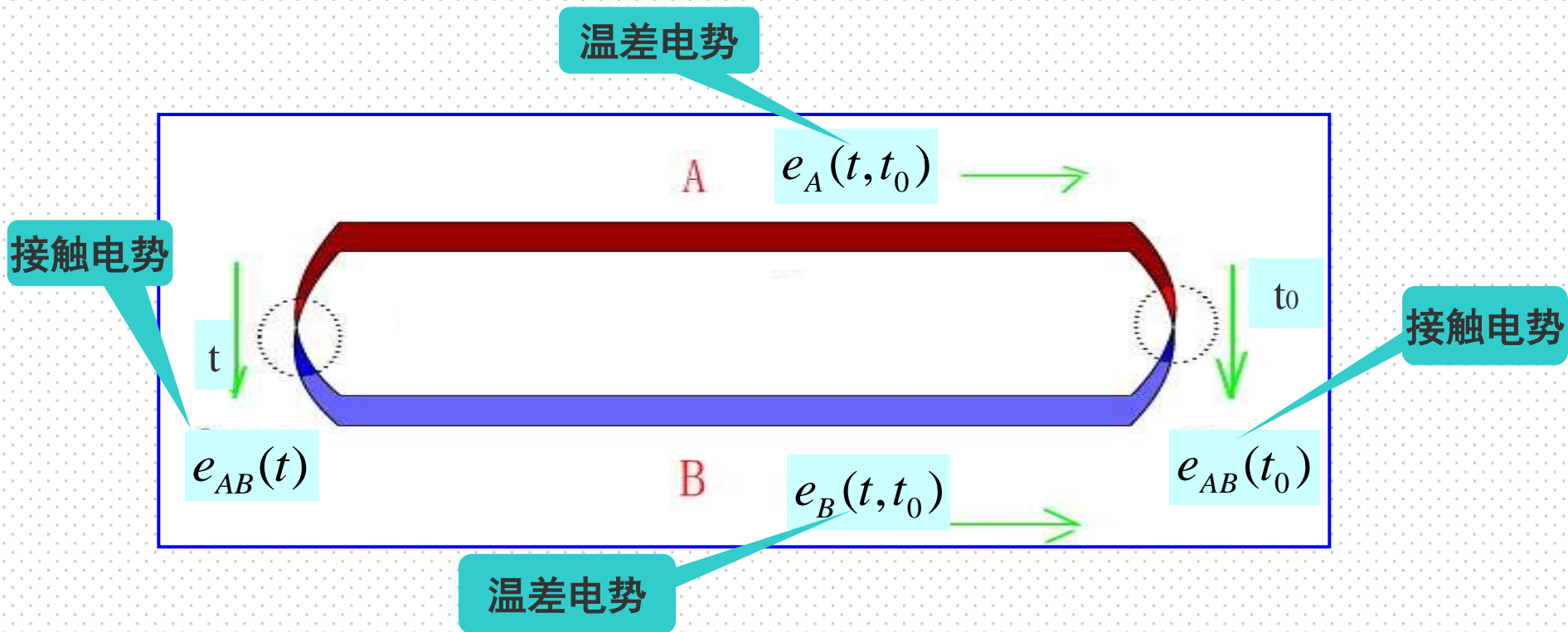
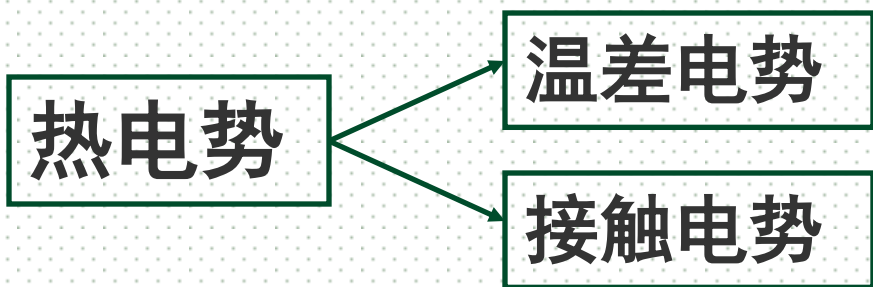


最简单的热电偶测温系统

工作原理:

- 当热端温度（ t ）与冷端温度（ t_0 ）不相等时，就会产生**热电势**，其大小是**热电偶材料及冷热端温差的函数**。只要保持冷端温度（ t_0 ）不变，热电势就只与热端温度（ t ）有关。用仪表测出热电势的大小，便可知被测温度。





温差电势：

当同一导体两端的温度不同时，由于**高温端的电子能量较大**，因而有较多的电子跑向低温端，结果在高、低温端之间就形成一个静电场（方向为高温端指向低温端），使导体的两端有一个电位差，称为温差电势。

$$e_A(t, t_0) = \frac{K}{e} \int_{t_0}^t \frac{1}{N_A} \cdot \frac{d(N_A \cdot t)}{dt} dt = \int_{t_0}^t \sigma_A dt$$

$$e_B(t, t_0) = \frac{K}{e} \int_{t_0}^t \frac{1}{N_B} \cdot \frac{d(N_B \cdot t)}{dt} dt = \int_{t_0}^t \sigma_B dt$$

e --- 单位电荷

N --- 电子密度

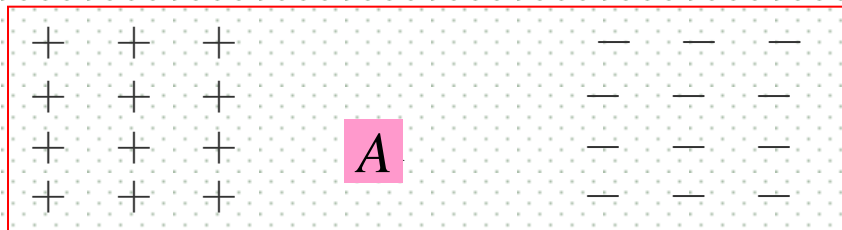
K --- 波尔茨曼常数

σ --- 导体的汤姆逊系数

电场方向



t



t_0

电子扩散方向



接触电势：

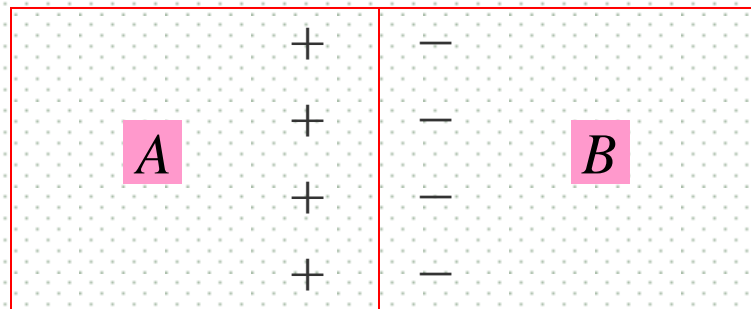
当两种不同的导体相接触时，由于**电子的密度不同**，**向对方扩散的速率就不同**，从而在接触面上形成一个静电场（方向为密度大的导体指向密度小的导体），使导体之间有一个电位差，称为接触电势。

$$e_{AB}(t) = \frac{kt}{e} \cdot \ln \frac{N_{At}}{N_{Bt}}$$

$$e_{AB}(t_0) = \frac{kt_0}{e} \cdot \ln \frac{N_{At_0}}{N_{Bt_0}}$$

e --- 单位电荷
 N --- 电子密度
 k --- 波尔茨曼常数

电场方向



电子扩散方向



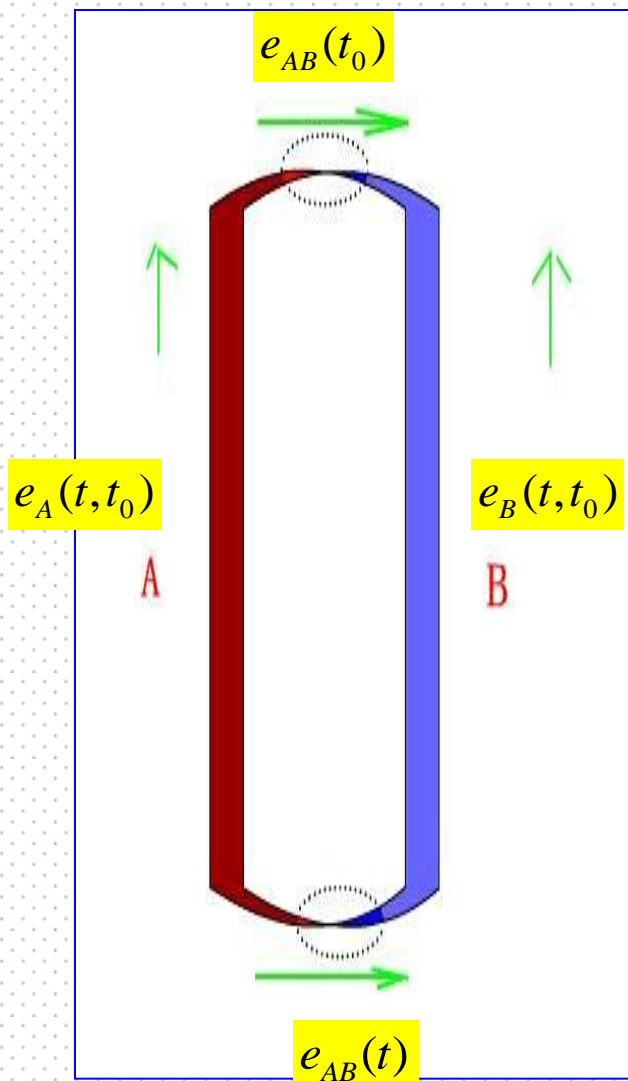
假定：

导体A的电子密度大于导体B的电子密度 ($N_A > N_B$) ；

两个结点的温度为 t 和 t_0 ，且 $t > t_0$ 。

回路中的总电势：

$$\begin{aligned} E_{AB}(t, t_0) &= e_{AB}(t) + e_B(t, t_0) - e_{AB}(t_0) - e_A(t, t_0) \\ &= \frac{kt}{e} \ln \frac{N_{At}}{N_{Bt}} + \int_{t_0}^t \sigma_B \cdot dt - \frac{kt_0}{e} \ln \frac{N_{At_0}}{N_{Bt_0}} - \int_{t_0}^t \sigma_A dt \end{aligned}$$

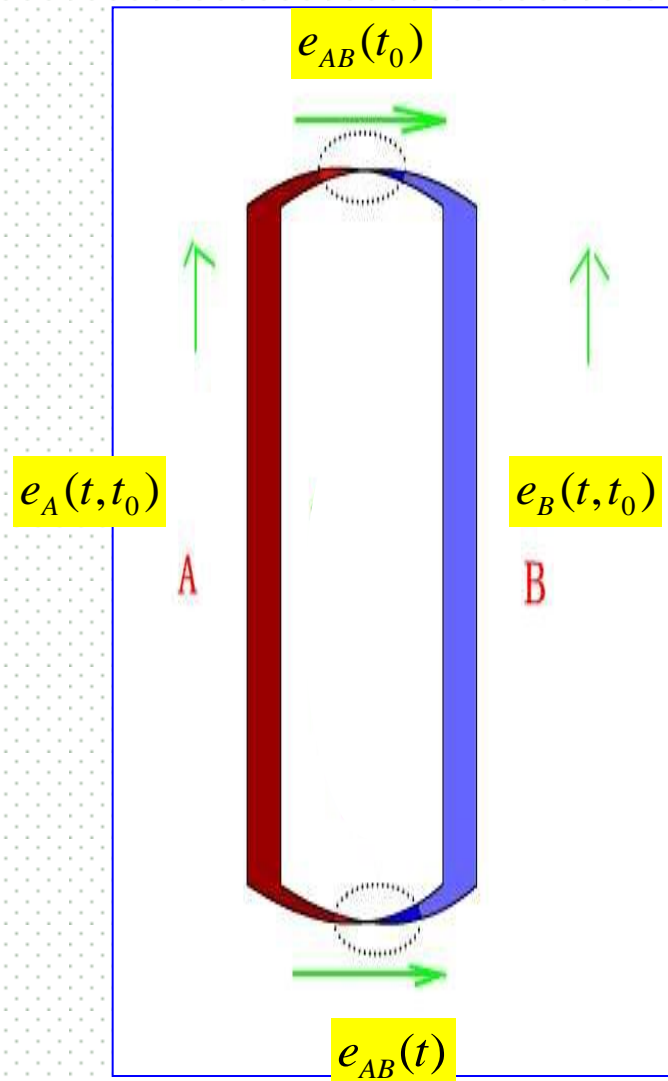


注意：

1. 由于接触电势大于温差电势，且 $t > t_0$ ，电势方向由 $e_{AB}(t)$ 所决定。

2. $e_{AB}(t)$ 的注脚 AB 的顺序代表电位差的方向，如果顺序颠倒，则电位差的符号也要改变，即：

$$e_{AB}(t) = -e_{BA}(t)$$



$$E_{AB}(t, t_0) = \frac{kt}{e} \ln \frac{N_{At}}{N_{Bt}} + \int_{t_0}^t \sigma_B \cdot dt - \frac{kt_0}{e} \ln \frac{N_{At_0}}{N_{Bt_0}} - \int_{t_0}^t \sigma_A dt$$

不同材料制成的热电偶，
在相同的温度下产生的
热电势是不同的。

从公式中可知，在材料一定的情况下，
回路中的热电势就仅与两个结点的温度有关，
即：

$$E_{AB}(t, t_0) = f(t) - f(t_0)$$

如果将一端（冷端）的温度（ t_0 ）固定，
回路中的热电势就与另一端（热端）的温度成
单值函数，即：

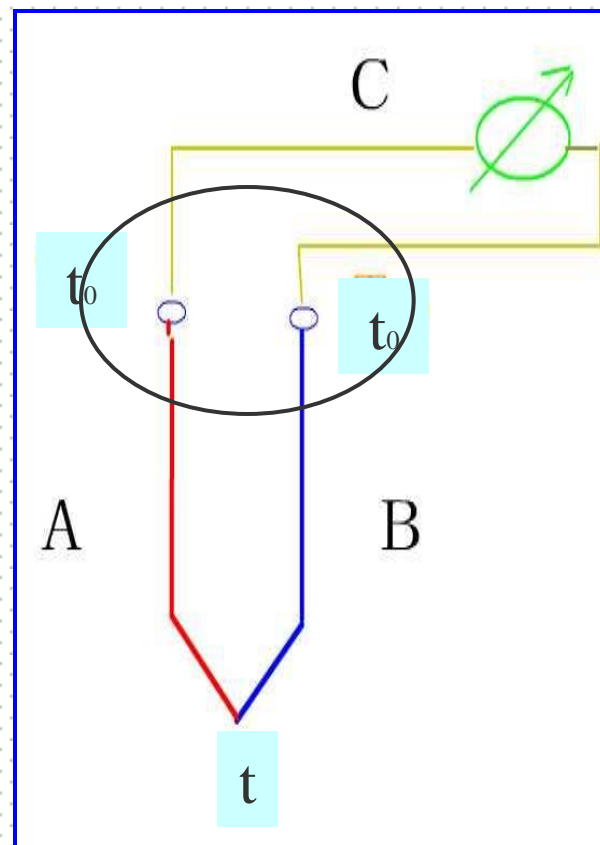
$$E_{AB}(t, t_0) = f(t) - c = \varphi(t)$$

若 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ，则测出的热电势完全与被
测温度相对应（查热电偶分度表）。

二. 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线C时，**只要C的两个端点温度相同**，回路中的总电势不变。
- 可以在回路中引入各种用以测量热电势的导线和仪表，而不会对测量产生影响。



证明:

$$E_{ABC}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_B(t, t_0) + e_{BC}(t_0) + e_C(t_0, t_0) + e_{CA}(t_0) - e_A(t, t_0)$$

$$= e_{AB}(t) + e_B(t, t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) - e_A(t, t_0)$$

$$e_{BC}(t_0) = \frac{kt_0}{e} \cdot \ln \frac{N_{Bt_0}}{N_{Ct_0}}$$

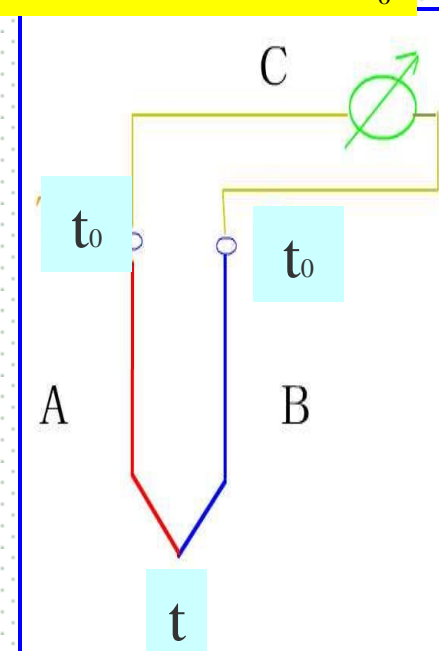
$$e_{CA}(t_0) = \frac{kt_0}{e} \cdot \ln \frac{N_{Ct_0}}{N_{At_0}}$$

$$e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$$

$$E_{ABC}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_B(t, t_0) - e_{AB}(t_0) - e_A(t, t_0)$$

$$= E_{AB}(t, t_0)$$

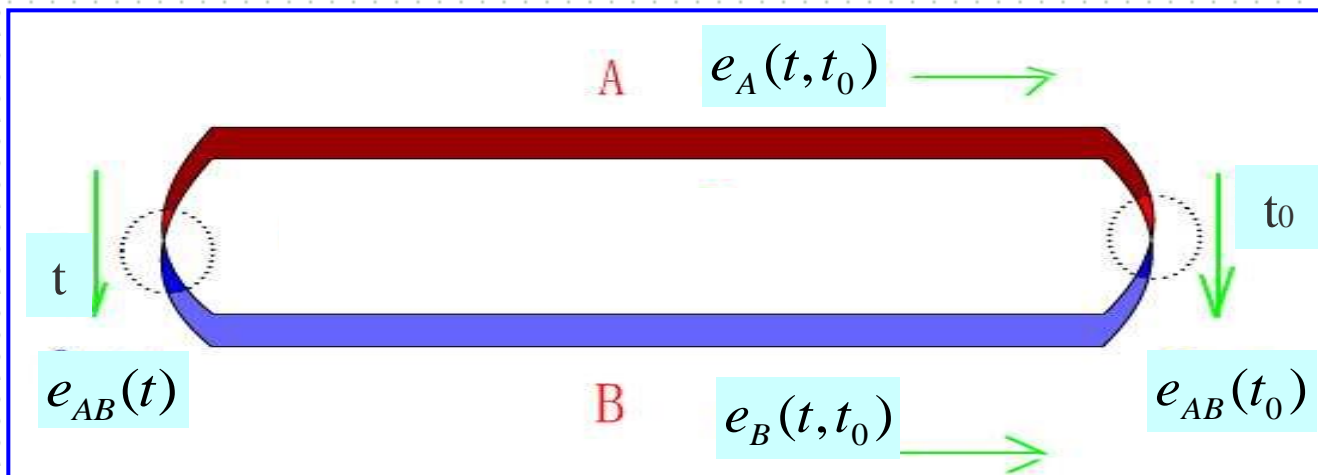
与导线
C 无关



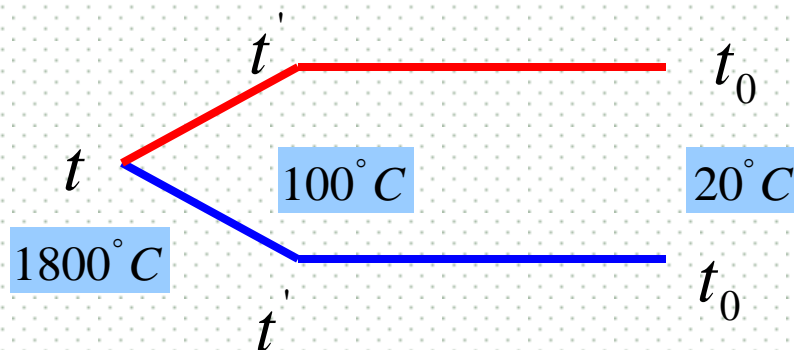
2. 均质导体定则

由**一种均质导体**组成的闭合回路, 不论导体的**截面**和**长度**以及其**温度**分布如何, 都不能产生热电势。

一种均质导体不能构成热电偶。



3. 中间温度定律



- 热电偶的热电势只与端点温度有关，而与A、B材料的中间温度无关，即：

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t') + E_{AB}(t', t_0)$$

- 该定律使热电偶与补偿导线的连接问题得以解决。

三. 热电偶冷端温度的处理办法

$$E_{AB}(t, t_0) = \frac{kt}{e} \ln \frac{N_{At}}{N_{Bt}} + \int_{t_0}^t \sigma_B \cdot dt - \frac{kt_0}{e} \ln \frac{N_{At_0}}{N_{Bt_0}} - \int_{t_0}^t \sigma_A dt$$

只有当冷端温度保持恒定时, $E_{AB}(t, t_0)$ 才是 t 的单值函数。

需要处理冷端温度的理由：

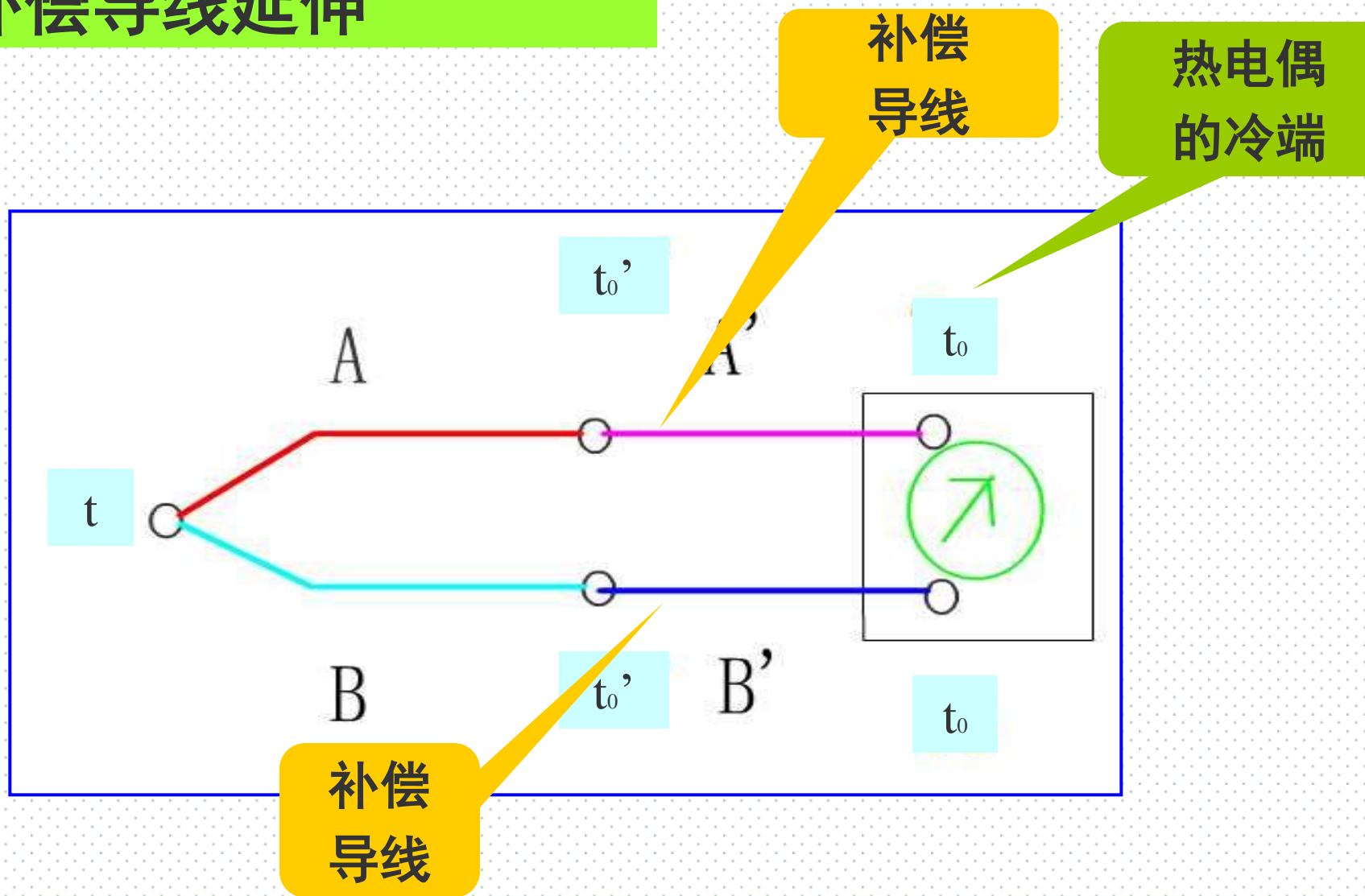
- 热电偶是用**贵金属**制成，不可能做得很长，因此其冷端就在热端的附近，无法不受热端温度的影响；
- 冷端暴露在空间，很容易受**环境温度**的影响。
- 各种热电偶的分度表均是在冷端温度为 0°C 的条件下，得到的热电势与温度之间的关系。而在工业上使用时，要使热电偶的冷端保持在 0°C 是比较困难的。

- **冷端温度处理要解决两个问题：**
 - ❖ 冷端温度不稳定；
 - ❖ 冷端温度不为零。

冷端温度的处理措施：

- 计算修正法
- 冰点法
- 仪表零点校正法
- 补偿电桥法

补偿导线延伸

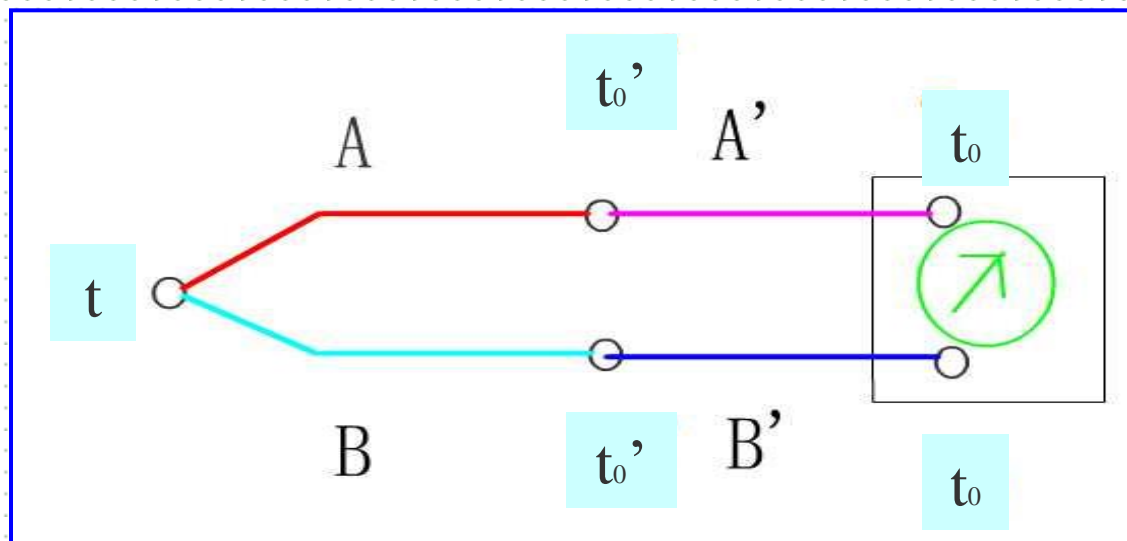


对补偿导线的要求：

- 用廉价金属制成；
- 在一定的温度范围内（ $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ ）具有与所连接的热电偶有相同或十分相近的热电性能。

使用补偿导线时应注意：

1. 热电偶的冷端温度 t_0' 必须小于 100°C ，否则会因热电特性不同而带来测量误差。
2. 新的冷端温度 t_0 必须恒定，否则将使补偿导线失去其应有的作用。
3. 与合适的热电偶相配合。



计算修正法

中间温度定律

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t') + E_{AB}(t', t_0)$$

虽然采用补偿导线后，热电偶的冷端温度已经恒定，但只要不等于零，仪表测得的热电势就小于被测温度相对应的电势，故必须加以修正，以求得真实的温度。

根据中间温度定律，有：

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t_0, 0)$$

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, 0) - E_{AB}(t_0, 0)$$

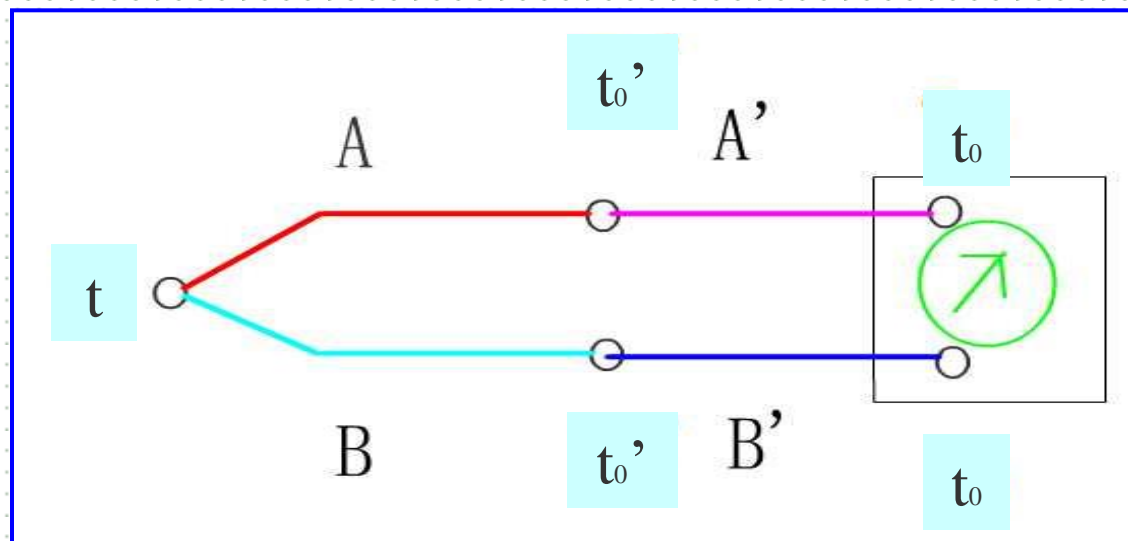
$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, 0) - E_{AB}(t_0, 0)$$

仪表测到的
电势

与冷端温度
对应的电势

与被测温度对应的电势：

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t_0, 0)$$



“常用热电偶分度表”是根据冷端温度为 0°C 时的热电偶的温度—热电势的关系曲线加以分度后得出的。利用该表，查出 $E_{AB}(t_0, 0)$ ，就可以进行修正了。

例题：

某镍铬-镍硅热电偶（分度为K）的冷端温度 $t_0 = 30^\circ\text{C}$ ，测得的热电势为 $E(t, t_0) = 39.168\text{mV}$ ，求被测的真实温度。

解：

在分度表中查得 $E(30^\circ, 0) = 1.203\text{mV}$

$$\begin{aligned} E(t, 0) &= E(t, t_0) + E(t_0, 0) \\ &= 39.17 + 1.20 = 40.37\text{mV} \end{aligned}$$

再查热电偶分度表，得到实际温度为 977°C 。

附录 1-2 镍铬-镍硅热电偶分度表

(参比端温度为 0℃)

分度号, K	热电动势/ μV								
温度/℃	0	1	2	3	4	5	6	7	8
-270	-8458	-8468	-8478	-8488	-8498	-8508	-8518	-8528	-8538
-260	-8441	-8451	-8461	-8471	-8481	-8491	-8501	-8511	-8521
-250	-8424	-8434	-8444	-8454	-8464	-8474	-8484	-8494	-8504
-240	-8407	-8417	-8427	-8437	-8447	-8457	-8467	-8477	-8487
-230	-8390	-8400	-8410	-8420	-8430	-8440	-8450	-8460	-8470
-220	-8373	-8383	-8393	-8403	-8413	-8423	-8433	-8443	-8453
-210	-8356	-8366	-8376	-8386	-8396	-8406	-8416	-8426	-8436
-200	-8339	-8349	-8359	-8369	-8379	-8389	-8399	-8409	-8419
-190	-8322	-8332	-8342	-8352	-8362	-8372	-8382	-8392	-8402
-180	-8305	-8315	-8325	-8335	-8345	-8355	-8365	-8375	-8385
-170	-8288	-8298	-8308	-8318	-8328	-8338	-8348	-8358	-8368
-160	-8271	-8281	-8291	-8301	-8311	-8321	-8331	-8341	-8351
-150	-8254	-8264	-8274	-8284	-8294	-8304	-8314	-8324	-8334
-140	-8237	-8247	-8257	-8267	-8277	-8287	-8297	-8307	-8317
-130	-8220	-8230	-8240	-8250	-8260	-8270	-8280	-8290	-8300
-120	-8203	-8213	-8223	-8233	-8243	-8253	-8263	-8273	-8283
-110	-8186	-8196	-8206	-8216	-8226	-8236	-8246	-8256	-8266
-100	-8169	-8179	-8189	-8199	-8209	-8219	-8229	-8239	-8249
-90	-8152	-8162	-8172	-8182	-8192	-8202	-8212	-8222	-8232
-80	-8135	-8145	-8155	-8165	-8175	-8185	-8195	-8205	-8215
-70	-8118	-8128	-8138	-8148	-8158	-8168	-8178	-8188	-8198
-60	-8101	-8111	-8121	-8131	-8141	-8151	-8161	-8171	-8181
-50	-8084	-8094	-8104	-8114	-8124	-8134	-8144	-8154	-8164
-40	-8067	-8077	-8087	-8097	-8107	-8117	-8127	-8137	-8147
-30	-8050	-8060	-8070	-8080	-8090	-8100	-8110	-8120	-8130
-20	-8033	-8043	-8053	-8063	-8073	-8083	-8093	-8103	-8113
-10	-8016	-8026	-8036	-8046	-8056	-8066	-8076	-8086	-8096
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	397	407	417	427	437	447	457	467	477
20	798	808	818	828	838	848	858	868	878
30	1203	1213	1223	1233	1243	1253	1263	1273	1283
40	1611	1621	1631	1641	1651	1661	1671	1681	1691
50	2022	2032	2042	2052	2062	2072	2082	2092	2102
60	2436	2446	2456	2466	2476	2486	2496	2506	2516
70	2850	2860	2870	2880	2890	2900	2910	2920	2930
80	3264	3274	3284	3294	3304	3314	3324	3334	3344
90	3681	3691	3701	3711	3721	3731	3741	3751	3761
100	4099	4109	4119	4129	4139	4149	4159	4169	4179
110	4508	4518	4528	4538	4548	4558	4568	4578	4588
120	4919	4929	4939	4949	4959	4969	4979	4989	4999
130	5327	5337	5347	5357	5367	5377	5387	5397	5407
140	5733	5743	5753	5763	5773	5783	5793	5803	5813
150	6137	6147	6157	6167	6177	6187	6197	6207	6217
160	6539	6549	6559	6569	6579	6589	6599	6609	6619
170	6939	6949	6959	6969	6979	6989	6999	7009	7019
180	7338	7348	7358	7368	7378	7388	7398	7408	7418
190	7737	7747	7757	7767	7777	7787	7797	7807	7817
200	8137	8147	8157	8167	8177	8187	8197	8207	8217
210	8537	8547	8557	8567	8577	8587	8597	8607	8617
220	8938	8948	8958	8968	8978	8988	8998	9008	9018
230	9341	9351	9361	9371	9381	9391	9401	9411	9421
240	9745	9755	9765	9775	9785	9795	9805	9815	9825
250	10151	10161	10171	10181	10191	10201	10211	10221	10231

温度/℃	热电动势/ μV									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
260	10560	10600	10641	10682	10723	10764	10805	10846	10887	10928
270	10969	11010	11051	11093	11134	11175	11216	11257	11298	11339
280	11381	11422	11463	11504	11546	11587	11628	11669	11711	11752
290	11793	11835	11876	11918	11959	12000	12042	12083	12125	12166
300	12207	12249	12290	12332	12373	12415	12456	12498	12539	12581
310	12623	12664	12706	12747	12789	12831	12872	12914	12955	12997
320	13039	13080	13122	13164	13205	13247	13289	13331	13372	13414
330	13456	13497	13539	13581	13623	13665	13706	13748	13790	13832
340	13874	13915	13957	13999	14041	14083	14125	14167	14208	14250
350	14292	14334	14376	14418	14460	14502	14544	14586	14628	14670
360	14712	14754	14796	14838	14880	14922	14964	15006	15048	15090
370	15132	15174	15216	15258	15300	15342	15384	15426	15468	15510
380	15552	15594	15636	15679	15721	15763	15805	15847	15889	15931
390	15974	16016	16058	16100	16142	16184	16227	16269	16311	16353
400	16395	16438	16480	16522	16564	16607	16649	16691	16733	16775
410	16818	16860	16902	16945	16987	17029	17072	17114	17156	17199
420	17241	17283	17326	17368	17410	17453	17495	17537	17580	17622
430	17664	17707	17749	17792	17834	17876	17919	17961	18004	18046
440	18088	18131	18173	18216	18258	18301	18343	18385	18428	18470
450	18513	18555	18598	18640	18683	18725	18768	18810	18853	18895
460	18938	18980	19023	19065	19108	19150	19193	19235	19278	19320
470	19363	19405	19448	19490	19533	19576	19618	19661	19703	19746
480	19788	19831	19873	19916	19959	20001	20044	20086	20129	20172
490	20214	20257	20299	20342	20385	20427	20470	20512	20555	20598
500	20640	20683	20725	20768	20811	20853	20896	20938	20981	21024
510	21066	21109	21152	21194	21237	21280	21322	21365	21407	21450
520	21493	21535	21578	21621	21663	21706	21749	21791	21834	21876
530	21919	21962	22004	22047	22090	22132	22175	22218	22260	22303
540	22346	22388	22431	22473	22516	22559	22601	22644	22687	22729
550	22772	22815	22857	22900	22942	22985	23028	23070	23113	23156
560	23198	23241	23284	23326	23369	23411	23454	23497	23539	23582
570	23624	23667	23710	23752	23795	23837	23880	23923	23965	24008
580	24050	24093	24136	24178	24221	24263	24306	24348	24391	24434
590	24476	24519	24561	24604	24646	24689	24731	24774	24817	24859
600	24902	24944	24987	25029	25072	25114	25157	25199	25242	25284
610	25327	25369	25412	25454	25497	25539	25582	25624	25667	25709
620	25751	25794	25836	25879	25921	25964	26006	26048	26091	26133
630	26176	26218	26260	26303	26345	26387	26430	26472	26515	26557
640	26599	26642	26684	26726	26769	26811	26853	26896	26938	26980
650	27022	27065	27107	27149	27192	27234	27276	27318	27361	27403
660	27445	27487	27529	27572	27614	27656	27698	27740	27783	27825
670	27867	27909	27951	27993	28035	28078	28120	28162	28204	28246
680	28288	28330	28372	28414	28456	28498	28540	28583	28625	28667
690	28709	28751	28793	28835	28877	28919	28961	29002	29044	29086
700	29128	29170	29212	29254	29296	29338	29380	29422	29464	29506
710	29547	29589	29631	29673	29715	29756	29798	29840	29882	29924
720	29965	30007	30049	30091	30132	30174	30216	30257	30299	30341
730	30383	30424	30466	30508	30549	30591	30632	30674	30716	30757
740	30799	30840	30882	30924	30965	31007	31049	31090	31131	31173
750	31214	31256	31297	31339	31380	31422	31463	31504	31546	31587
760	31629	31670	31712	31753	31794	31836	31877	31918	31960	32001
770	32042	32084	32125	32166	32207	32249	32290	32331	32372	32414
780	32455	32496	32537	32578	32619	32661	32702	32743	32784	32825
790	32866	32907	32948	32990	33031	33072	33113	33154	33195	33236
800	33277	33318	33359	33400	33441	33482	33523	33564	33604	33645
810	33686	33727	33768	33809	33850	33891	33931	33972	34013	34054

续表

温度/℃	热电动势/ μV								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
820	34695	34736	34776	34817	34858	34899	34939	34980	35021
830	34702	34743	34783	34824	34865	34905	34946	34987	35027
840	34709	34749	34790	34830	34871	34911	34952	34993	35033
850	35314	35354	35395	35435	35476	35516	35557	35597	35637
860	35718	35758	35799	35839	35880	35920	35960	36000	36041
870	36121	36162	36202	36242	36282	36323	36363	36403	36443
880	36524	36564	36604	36644	36684	36724	36764	36804	36844
890	36925	36965	37005	37045	37085	37125	37165	37205	37245
900	37325	37365	37405	37445	37484	37524	37564	37604	37644
910	37724	37764	37803	37843	37883	37923	37963	38002	38042
920	38122	38162	38201	38241	38281	38320	38360	38400	38439
930	38519	38558	38598	38638	38677	38717	38756	38796	38835
940	38815	38854	38894	38933	38972	39012	39052	39091	39131
950	39310	39349	39388	39428	39467	39507	39546	39585	39625
960	39703	39743	39782	39821	39861	39900	39939	39979	40018
970	40096	40136	40175	40214	40253	40292	40332	40371	40410
980	40488	40527	40566	40605	40645	40684	40723	40762	40801
990	40879	40918	40957	40996	41035	41074	41113	41152	41191
1000	41269	41308	41347	41385	41424	41463	41502	41541	41580
1010	41657	41696	41735	41773	41812	41851	41890	41929	41968
1020	42045	42084	42123	42161	42200	42239	42277	42316	42355
1030	42432	42470	42509	42548	42586	42625	42663	42702	42740
1040	42817	42856	42894	42933	42971	43010	43048	43087	43125
1050	43202	43240	43279	43317	43356	43394	43432	43471	43509
1060	43585	43624	43662	43700	43739	43777	43815	43853	43891
1070	43969	44006	44044	44082	44121	44159	44197	44235	44273
1080	44349	44387	44425	44463	44501	44539	44577	44615	44653
1090	44729	44767	44805	44843	44881	44919	44957	44995	45033
1100	45108	45146	45184	45222	45260	45297	45335	45373	45411
1110	45486	45524	45561	45599	45637	45675	45712	45750	45788
1120	45863	45900	45938	45975	46013	46051	46088	46126	46163
1130	46238	46275	46313	46350	46388	46425	46463	46500	46537
1140	46612	46649	46687	46724	46761	46799	46836	46873	46910
1150	46985	47022	47059	47096	47133	47170	47208	47245	47282
1160	47354	47391	47428	47465	47502	47539	47576	47613	47650
1170	47724	47761	47798	47835	47872	47909	47946	47983	48020
1180	48095	48132	48169	48205	48242	48279	48316	48352	48389
1190	48462	48499	48536	48572	48609	48645	48682	48718	48755
1200	48828	48865	48901	48937	48974	49010	49047	49083	49120
1210	49192	49229	49265	49301	49338	49374	49410	49446	49483
1220	49555	49591	49627	49663	49700	49736	49772	49808	49844
1230	49914	49950	49986	50022	50058	50094	50130	50166	50202
1240	50274	50311	50347	50383	50419	50455	50491	50526	50562
1250	50633	50669	50705	50741	50776	50812	50847	50883	50919
1260	50990	51026	51061	51096	51132	51167	51203	51238	51274
1270	51344	51380	51415	51450	51486	51521	51556	51592	51627
1280	51697	51733	51768	51803	51838	51873	51908	51943	51979
1290	52049	52084	52119	52154	52189	52224	52259	52294	52329
1300	52398	52433	52468	52503	52538	52573	52608	52642	52677
1310	52747	52781	52816	52851	52886	52920	52955	52989	53024
1320	53093	53128	53162	53197	53232	53266	53301	53335	53370
1330	53439	53473	53507	53542	53576	53611	53645	53679	53714
1340	53782	53817	53851	53885	53920	53954	53988	54022	54057
1350	54125	54159	54193	54228	54262	54296	54330	54364	54398
1360	54466	54501	54535	54569	54603	54637	54671	54705	54739
1370	54807	54841	54875						

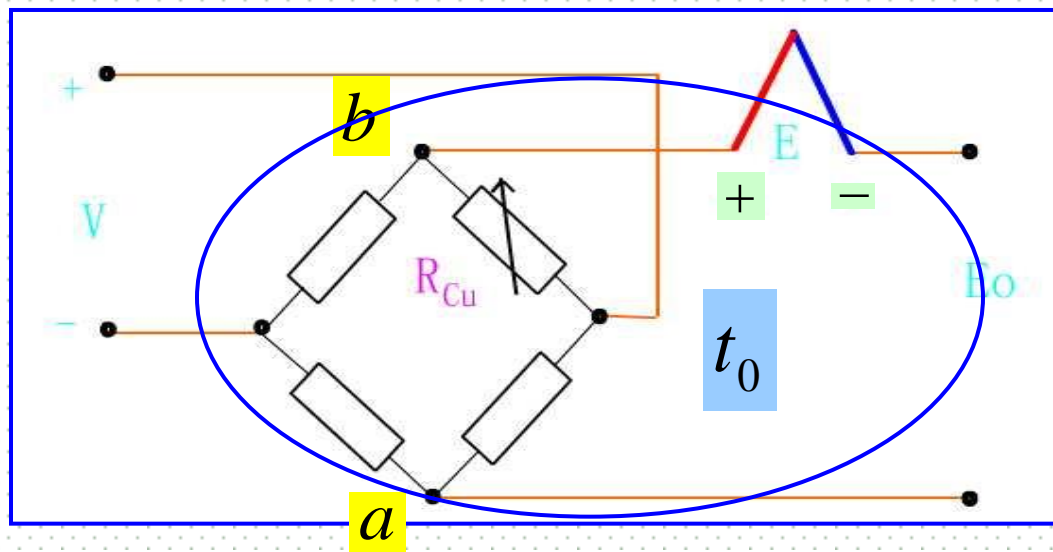
冰浴法

在实验室中常常采用**冰浴法**，即将热电偶的冷端放在盛有绝缘油的试管中，再把试管浸在装满冰水混合物的容器内，使冷端温度恒定在 0°C ，以免去每次要查表修正的麻烦。

补偿电桥法

在不能满足冷端温度恒定的情况下，采用补偿电桥法可以自动补偿冷端温度波动时带来的误差。

常用的
低内阻
补偿电桥



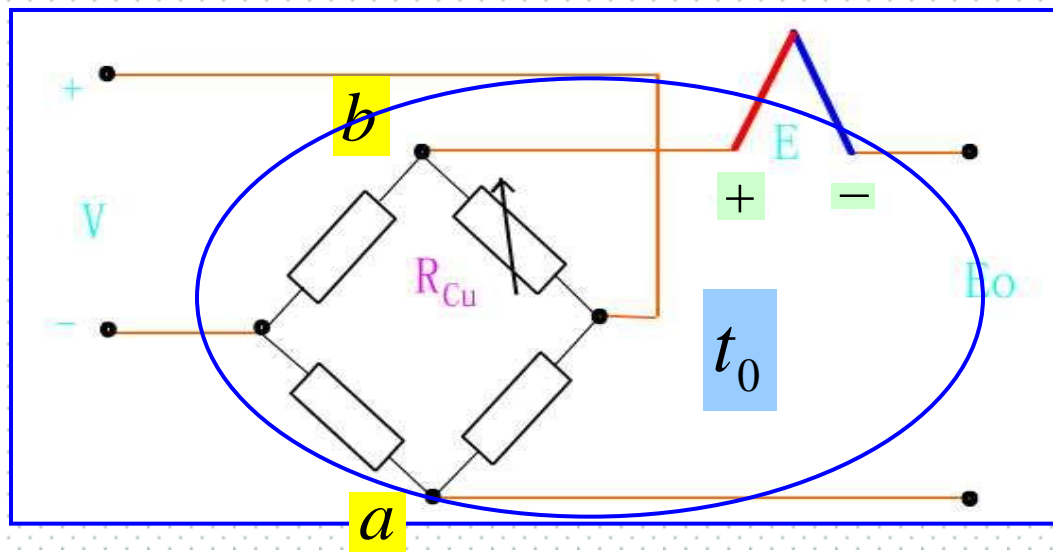
补偿原理：

$$E_o = U_{ab} + E = U_{ab} + E(t, 0) - E(t_0, 0)$$

当电桥处于平衡，即桥路输出电压 U_{ab} 为零时，电桥对仪表的读数不产生影响。

$$R_{Cu} = R_1 = R_2 = R_3 = 1\Omega$$

常用的
低内阻
补偿电桥



$$E_o = U_{ab} + E = U_{ab} + E(t,0) - E(t_0,0)$$

冷端温度发生变化时，铜电阻的阻值发生变化，在电桥的对角线上产生一个不平衡电压，叠加在热电偶的热电势上，一起送到测量仪表去。

如果设计得当，可以使电桥产生的不平衡电压正好补偿因冷端温度变化而引起的**热电势的变化值**。

$$E_o = U_{ab} + E = U_{ab} + E(t,0) - E(t_0,0)$$

注意：

- 补偿电桥仅补偿了由于冷端温度变化而引起的热电势的变化量，并没有抵消电势 $E(t_0,0)$ ，需采取其他的补偿措施。
- 只能在一个温度点上得到完全补偿，而在其余的温度点上则是近似得到补偿。
- 通常在 20°C 时，电桥平衡； 50°C 时，得到完全补偿。

$$E_o = U_{ab} + E = U_{ab} + E(t,0) - E(t_0,0)$$

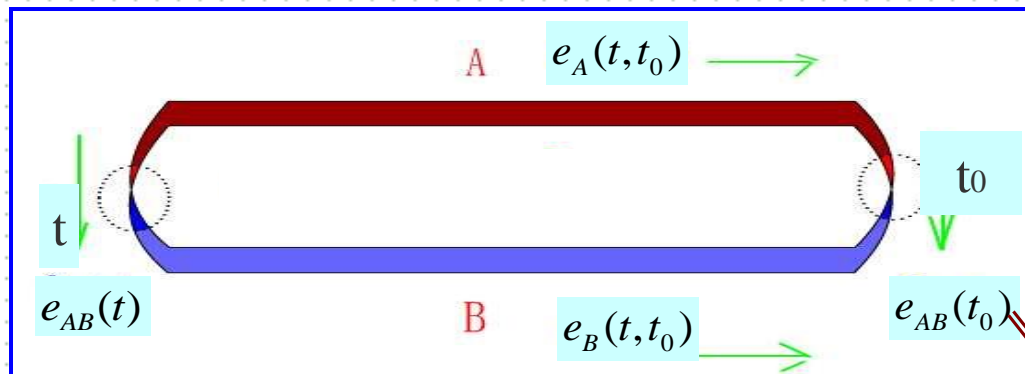
仪表零点校正法

将仪表的零点校正在补偿电桥平衡时的设计温度。

若 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ 时电桥平衡，则仪表的零点校正 在 0°C 上；

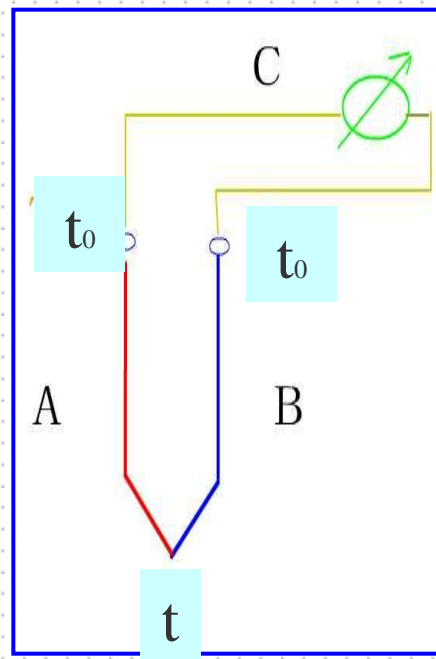
若 $t_0 = 20^\circ\text{C}$ 时电桥平衡，则仪表的零点校正 在 20°C 上。

以补偿由于冷端温度不是零所减少的热电势。



中间导体定律

中间温度定律



在材料一定的情况下，回路中的**热电势**就仅与**两个结点的温度**有关。

只有当**冷端温度保持恒定**时，回路中的**热电势**才是被测温度t的单值函数。

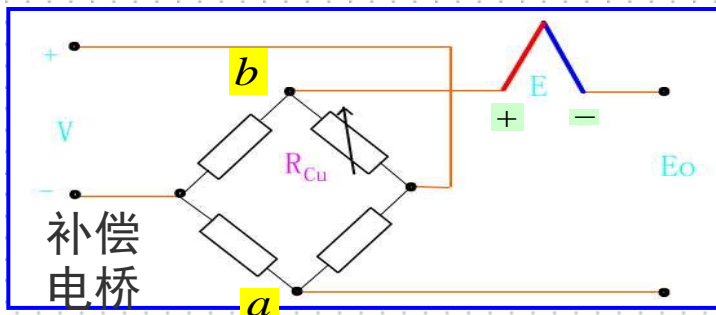
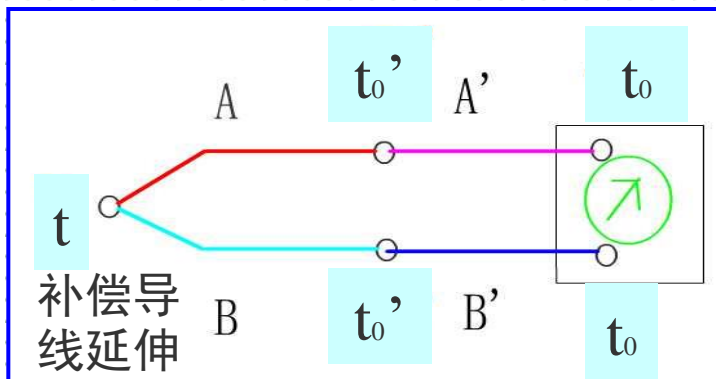
只有当**冷端温度为0**时，测出的热电势完全与被测温度相对应。

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, 0) - E_{AB}(t_0, 0)$$

零温处理
的措施不为冷端

冰点恒温法
计算修正法
仪表零点校正法

处理冷端温度不稳定的措施



四. 热电偶材料和结构组成

- 组成热电偶的两根热电丝称为**热电极**。
- **对热电极的要求：**
 - 物理、化学稳定性要高；
 - 电阻温度系数要小、导电率要高；
 - 组成热电偶后产生的热电势要大；
 - 热电势与温度要有线性关系或简单的函数关系；
 - 复现性要好；
 - 便于加工成丝。

国际电工委员会向世界各国推荐了8种标准化热电偶

常用的热电偶材料：

铂铑₁₀－铂热电偶(分度号为 S)

镍铬－镍硅热电偶(分度号为 K)

镍铬－康铜热电偶(分度号为 E)

1. 铂铑₁₀ - 铂热电偶 (S)

- 由 $\phi = 0.5mm$ 的纯铂丝和铂铑丝（90%铂，10%铑）组成。其中铂铑丝为正极，纯铂丝为负极。分度号为S。
- 测温范围：0 ~ 1300°C
在良好的使用环境下可短期测量 1600°C。
- 铂铑 - 铂热电偶主要用于精密温度测量和作基准热电偶；
- 补偿导线：铜 - 铜镍。

优点：

- 复制精度较高；
- 在氧化性和中性介质中具有较高的物理、化学稳定性；
- 测量准确度较高（ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ）。

缺点：

- 热电势较弱；
- 材料为贵金属，成本较高；
- 在高温下易受还原性气体发出的蒸气和金属蒸气的侵害而变质。

2. 镍铬－镍硅 热电偶 (K)

- 由 $\phi = 0.5mm$ 的镍铬丝和镍硅丝组成。其中镍铬丝为正极，镍硅丝为负极。分度号为K。

- 测温范围： $0 \sim 1000^{\circ}C$

在良好的使用环境下可短期测量 $1300^{\circ}C$ 。

- 镍铬－镍硅热电偶是工业生产中**最常用**的一种热电偶；

- 补偿导线：铜－康铜。

优点：

- 复制性好；
- 产生的热电势大；
- 在氧化性和中性介质中具有较高的物理、化学稳定性；
- 线性好；
- 价格便宜。

缺点：

- 在还原性介质中使用时，只能测量 500°C 以下的温度，否则会很快受到腐蚀；
- 测量精度偏低 ($\pm(1.5 \sim 2.5)^{\circ}\text{C}$)，但能满足一般工业测温的要求)。

3. 镍铬－康铜 热电偶 (E)

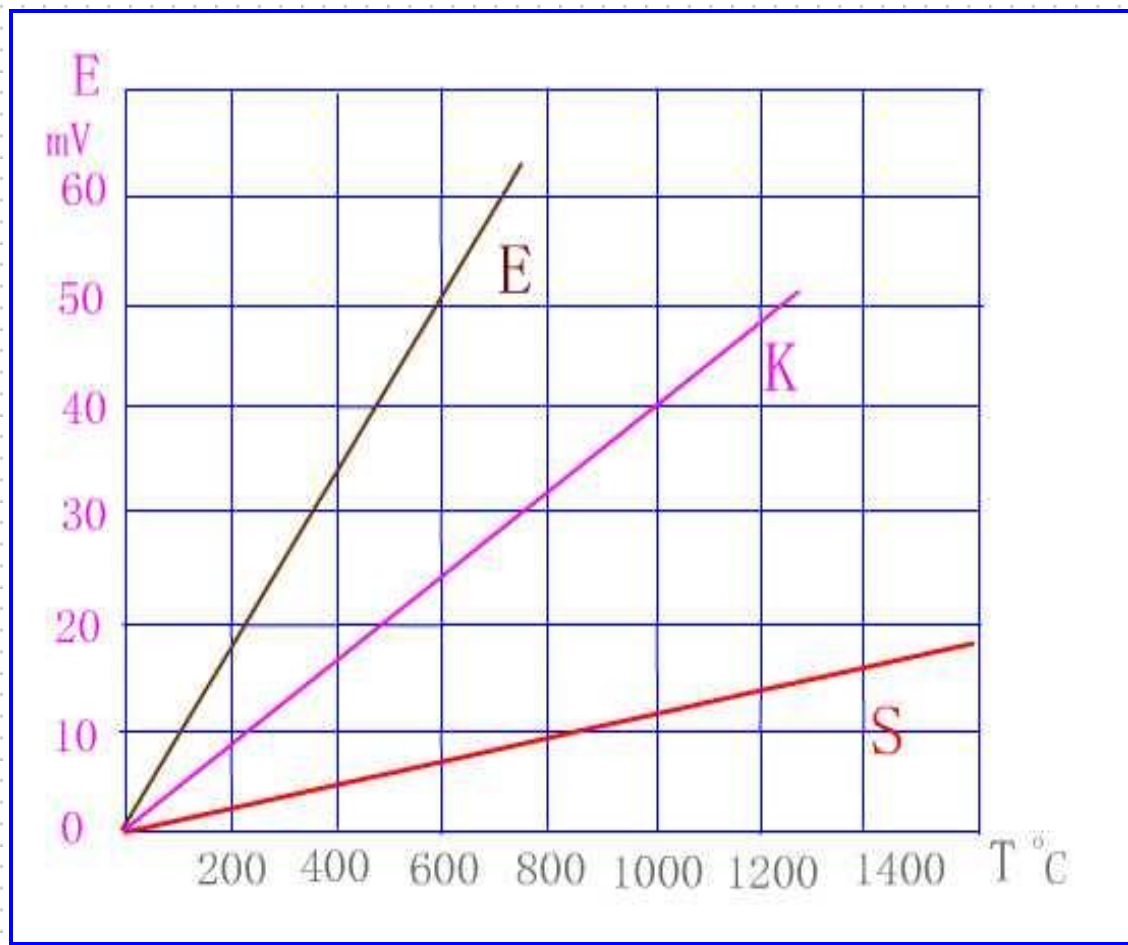
- 由 $\phi = 1.2 \sim 2mm$ 的镍铬丝和康铜丝组成。其中镍铬丝为正极，康铜丝为负极。分度号为E。
- 测温范围： $0 \sim 600^{\circ}C$
在良好的使用环境下可短期测量 $800^{\circ}C$ 。

优点：

- 热电灵敏度高；
- 价格便宜。

缺点：

- 测温范围低而且窄；
- 康铜合金易受氧化而变质；
- 由于材料的质地坚硬而不易得到均匀的线径；
- 测量误差为 $\pm (1.5 \sim 2.5)^{\circ}\text{C}$ 。



常用热电偶的热电势与温度的关系曲线

4. 其他热电偶

铂铑₁₃ - 铂热电偶 (R)

在日本使用较多

铜 - 康铜热电偶 (T)

铁 - 康铜热电偶 (J)

廉价金属
热电偶

钨铼系列热电偶

超高温热电偶 (2800°C)
但极易氧化

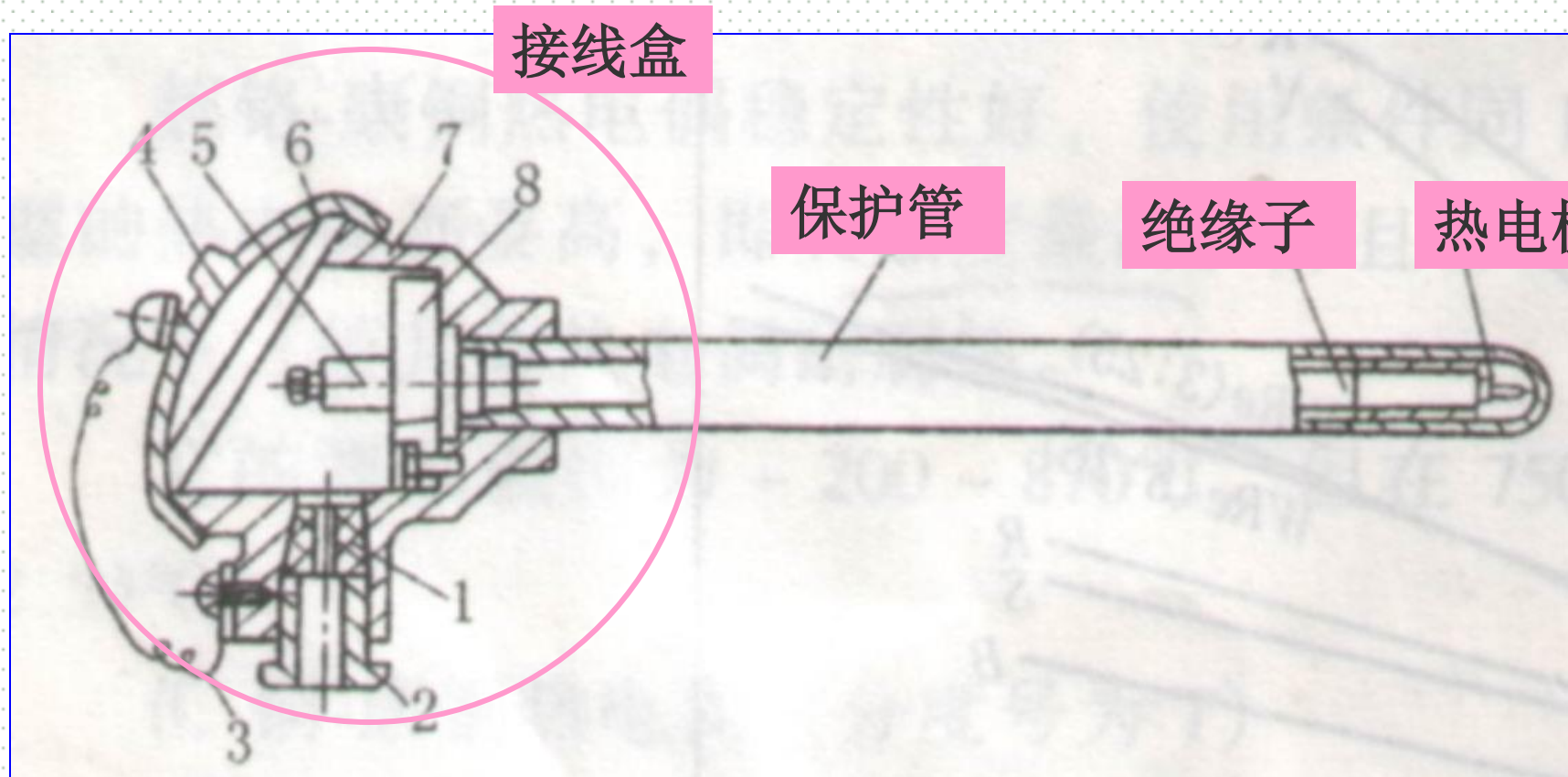
- 各种热电偶具有不同的测温范围，且具有不同的优缺点。
- 在使用中，应根据测温范围及介质情况，选用合适的热电偶。

五. 工业热电偶的结构

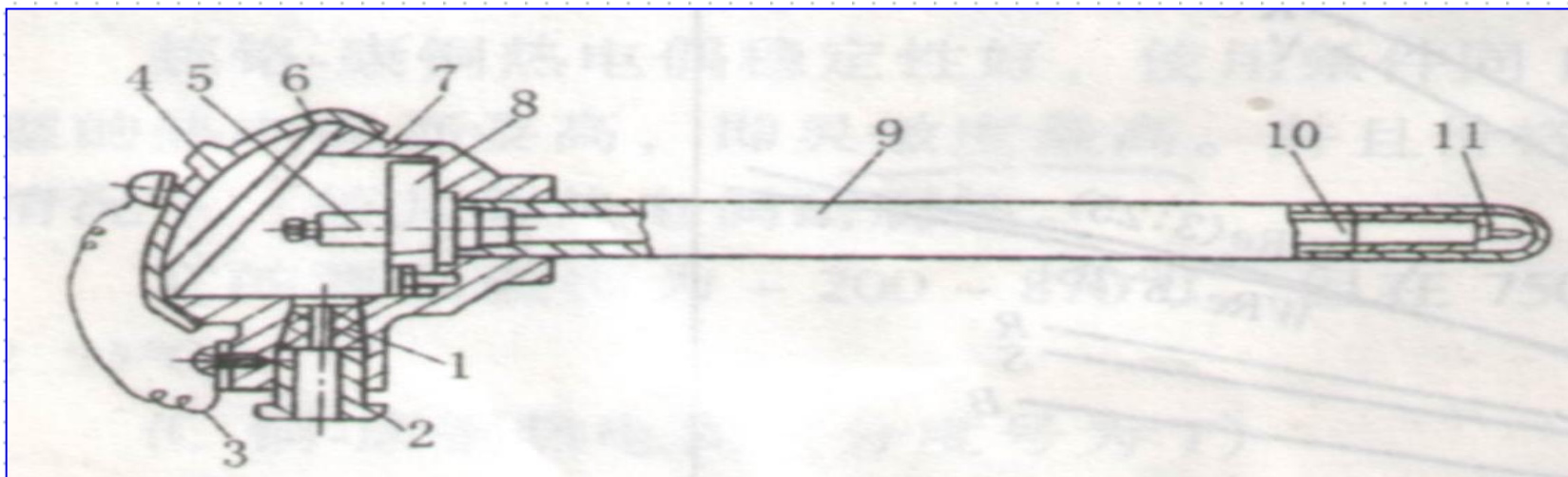
从热电偶的工业产品结构来看可分为：

1. 普通型热电偶；
2. 铠装热电偶；
3. 表面热电偶等。

1. 普通型热电偶



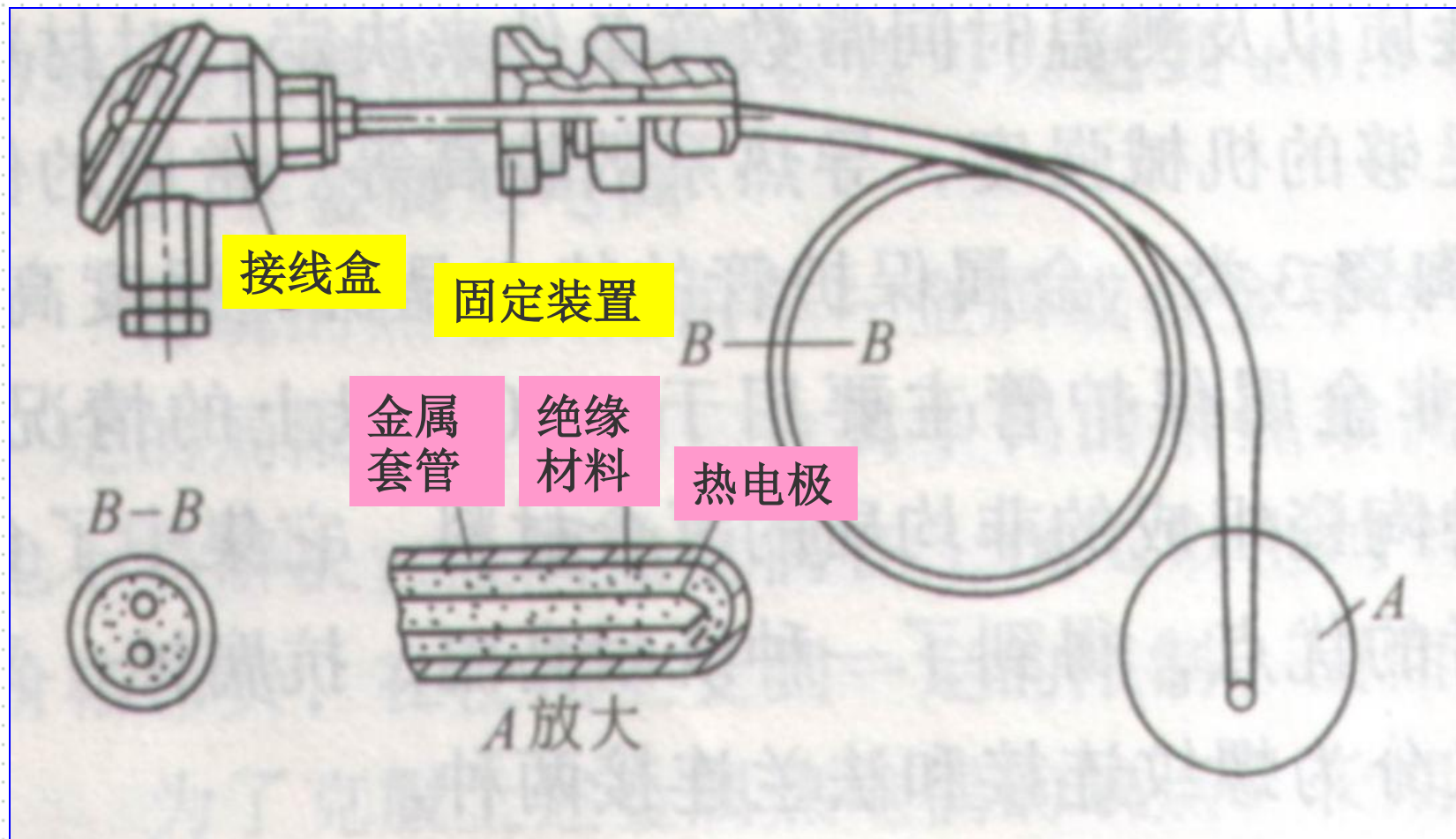
- **普通型热电偶**用于测量液体、气体、蒸气等介质的温度。
- **热电极**：长度视需要由几毫米到几米，电极结点用对焊连接或绞绕后再焊接。
- **绝缘套管**：又称绝缘子，套在电极上，以防止电极短路或电极与保护套管短路。材料有陶瓷与非陶瓷两类，前者适应高温测量。
- **保护套管**：热电极经绝缘后再装进保护管内，以防止机械损伤或化学腐蚀，保证工作可靠，提高使用寿命。
- **接线盒**：盒内有接线端座，以方便热电偶与补偿导线的连接。另外，兼有密封和保护接线端子的作用。



注意：

- 加了套管之后，测温的滞后时间增大，一般热电偶的时间常数为 $1.5 \sim 4 \text{ min}$ ，小惯性热电偶的时间常数约为几秒。
- 1000°C 以下使用金属保护管， 1000°C 以上使用陶瓷保护管。

2. 铠装热电偶（套管热电偶）



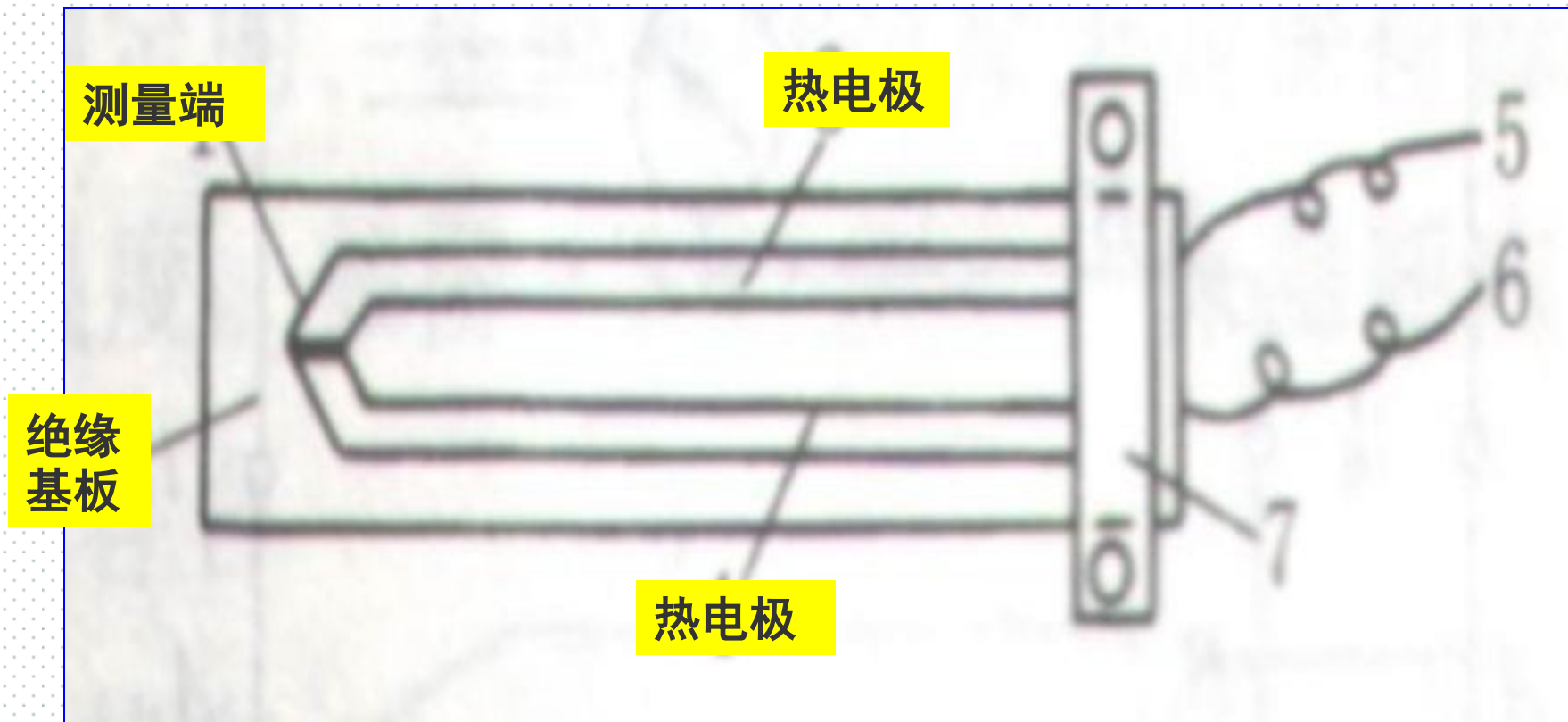
铠装热电偶：

- 由热电极、绝缘材料（氧化物粉末）和金属套管三者组合后拉伸而成为坚实的一个整体。是一种小型化、结构牢固、使用方便的特殊热电偶。
- 常用的热电偶材料均可制成铠装热电偶形式，其套管直径为2-5mm，长度为0.05m-15m。

优点:

- 热惯性小，时间常数可达0.01s；
- 套管材料退火，挠性好，适应复杂结构上的安装要求；
- 机械性能好，耐冲击和震动；
- 寿命长。

3. 表面热电偶



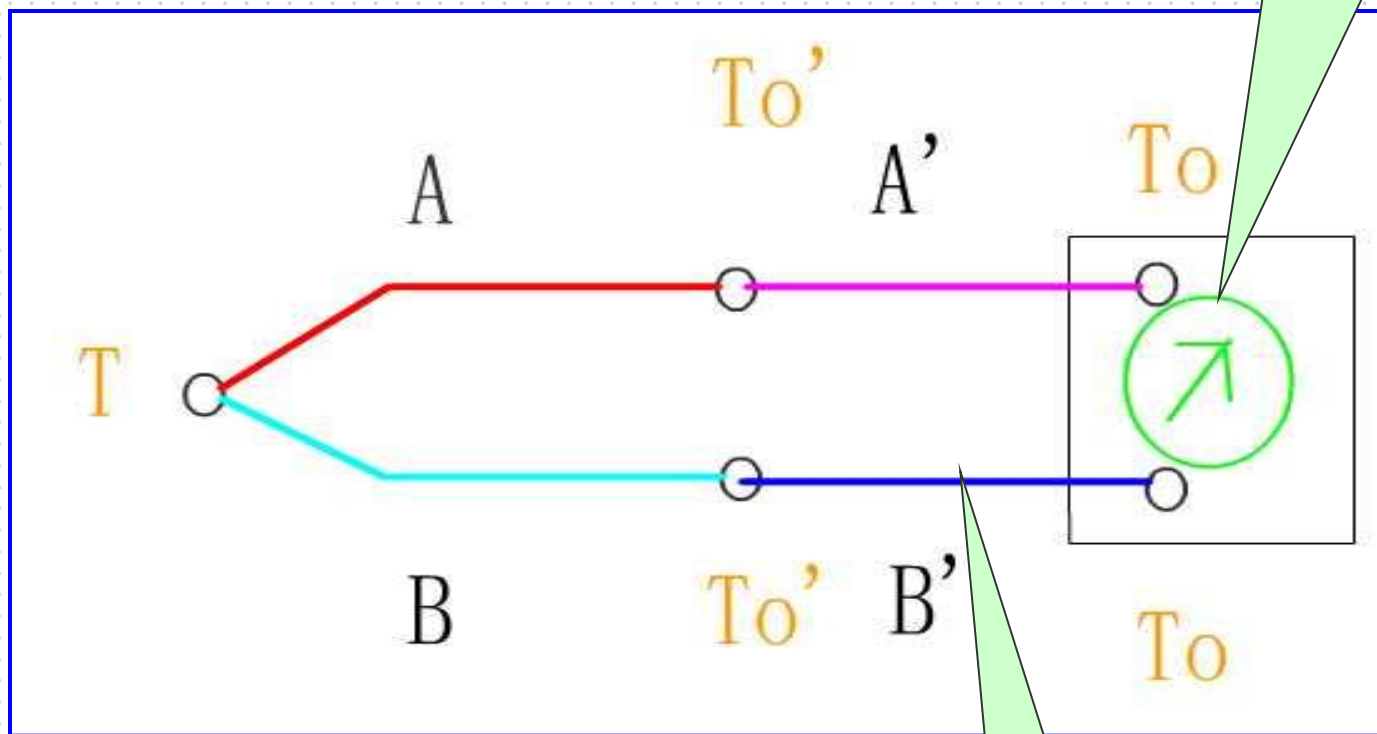
表面热电偶：

- 表面热电偶是专用于测量各种固体表面温度的热电偶，薄膜热电偶是其中的一种，即用**真空镀膜**的方法，将热电极材料（金属）蒸镀到绝缘基板上，形成薄膜电极。
- 特点：热容量小，反应速度非常快，时间常数一般为几十毫秒至一秒。但限于粘接剂的耐热性，测量范围为 $-200 \sim +300^{\circ}\text{C}$

六. 热电偶的测温线路

- 在实际测温中，热电偶的连接方法可以有所不同，应根据不同的需求，选择准确、方便的测量线路。
 - ❖ 典型测温线路；
 - ❖ 正向串联线路；
 - ❖ 反向串联线路；
 - ❖ 并联线路。

1. 典型测温线路



有冷端温度
自动补偿的
显示仪表

补偿导线

2. 正向串联线路

将n支**同型号**的热电偶**依次按正、负极性**连接，各热电偶的冷端采用补偿导线延伸到同一温度下。

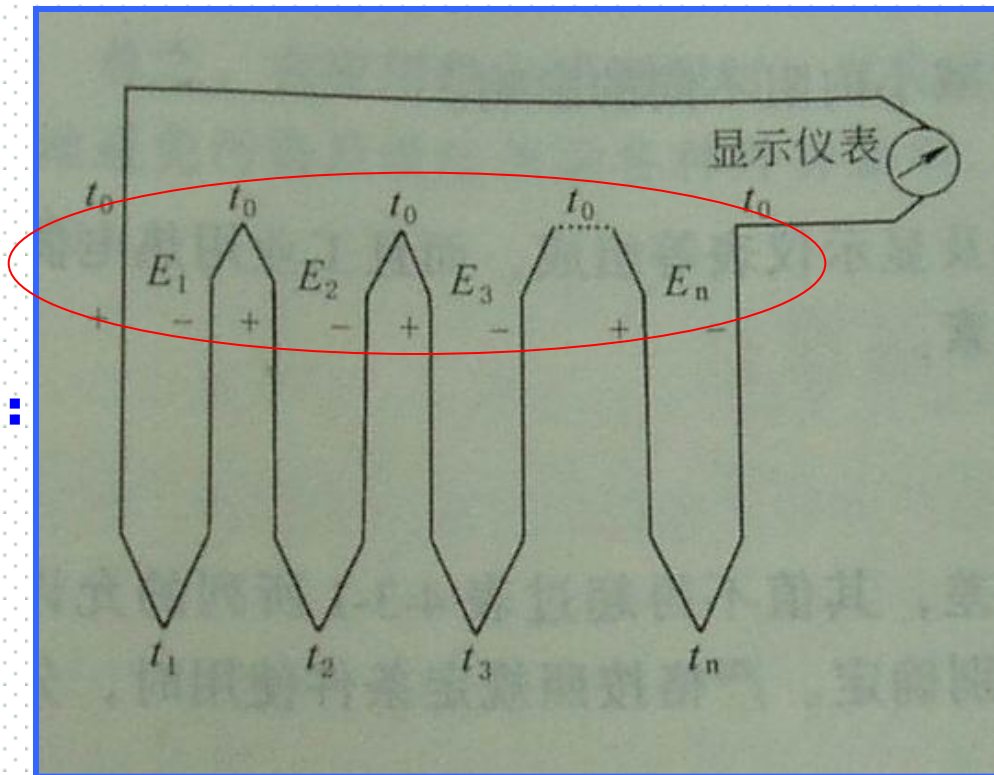
正向串联线路测得的热电势为：

$$E = E_1 + E_2 + \cdots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i$$

优点：热电势大；

测量精度比单支热电偶高。

缺点：只要有一支热电偶断路，整个测量系统就不能工作。



3. 反向串联线路

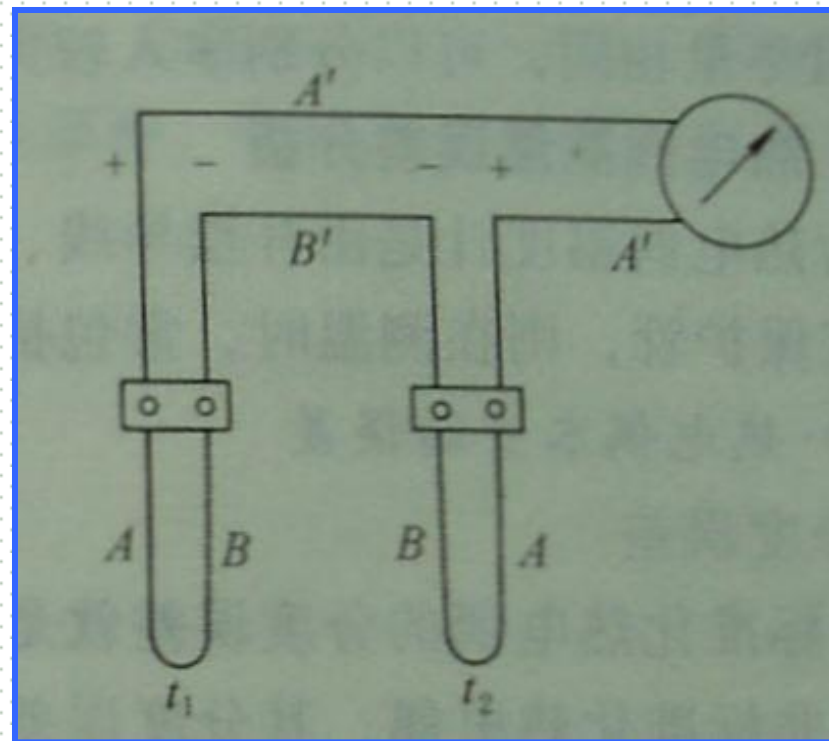
将**两支同型号**热电偶的**同极性端**串联在一起，各热电偶的冷端采用补偿导线延伸到同一温度下。

反向串联线路通常用于**测量两点的温度差**，其测得的**热电势**为：

$$E = E_1 - E_2$$

注意：

采用反向串联线路测温时，所用的热电偶的热电特性应为**线性或近似线性**，否则会产生测量误差。



4. 并联线路

将n支**同型号**热电偶的正极和负极分别连接在一起。

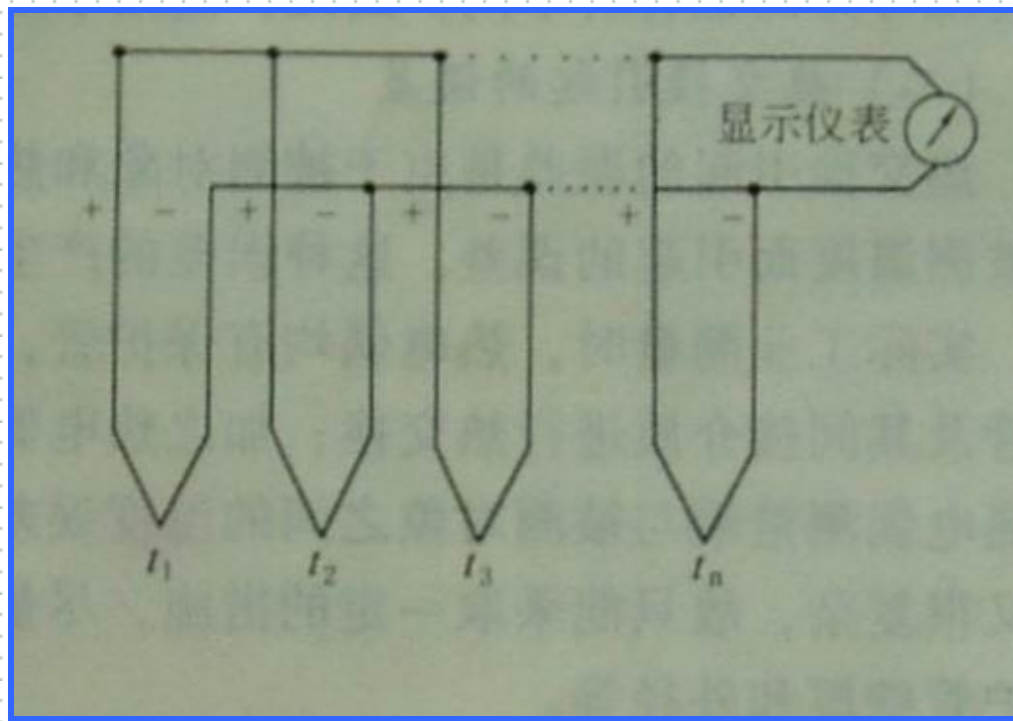
并联线路通常用于**测量平均温度**。在各热电偶的**内阻相同**的情况下，其测得的**热电势**为：

$$E = \frac{E_1 + E_2 + \cdots + E_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i$$

特点：

热电势虽然比串联线路小，但相对误差也小（仅为单支热电偶的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ ）。

当某支热电偶断路时，测温系统可以照常工作。



七. 热电偶测温误差的分析

1. 分度误差

- ❖ 指工作中具体使用的热电偶的**热电特性与统一分度表不一致**而出现的误差，即检验时的误差。
- ❖ 其值不得超过标准化热电偶的主要性能中规定的值。

2. 热电特性变化引起的误差

- ❖ 在使用过程中，由于热电极被腐蚀、污染等因素，会导致热电特性发生变化，从而产生较大的误差。
- ❖ 因此在使用中，要注意对热电偶进行定期的检查和校验。

3. 热交换引起的误差

- ❖ 根据热平衡原理，热电偶必须保持与被测对象的热平衡，才能准确测量温度。
- ❖ 由于热电偶都带有保护套管，其热电极难以与被测对象直接接触，而是经过保护套管及其间介质进行热交换；另外，热电偶及其保护套管向周围环境也有热损失，从而使得热电偶温度达不到被测温度。
- ❖ 可见，该误差是由于**热辐射损失及导热损失**的存在所造成的。
- ❖ **减小误差的措施：**
 - 尽量使管壁表面与被测介质温度相接近；
 - 尽可能减小保护套管的外径；
 - 增加被测介质的流速；
 - 增加热电偶的插入深度；等等。

4. 补偿导线引入的误差

- ❖ 该误差是由于补偿导线和热电偶内在的热电特性不同而产生的。

5. 显示仪表的误差

- ❖ 大多数显示仪表均带有冷端温度补偿作用，当环境温度变化较大时，不可能对冷端温度进行完全补偿，则会引入一定的误差。

6. 动态误差

- ❖ 由于热电偶的热惰性，使得被测温度变化后，不能立即反应出来，从而引起读数误差。
- ❖ **措施：**测量快速变化的温度时，可采用小惯性的热电偶。

八. 热电偶的安装

■ 正确选择测温点

- ❖ 使感温元件与被测介质能进行充分的热交换。

■ 应与被测介质充分接触

- ❖ 插入深度一般不小于温度计全长的2/3；
- ❖ 应迎着被测介质流向插入，至少要与被测介质流向成正交安装。

■ 避免热辐射、减少热损失

- ❖ 应尽量减小被测介质与设备或管壁表面之间的温差。

■ 安装应确保正确、安全、可靠

■ 热电偶连接导线的安装

2.3 热电阻温度计

对于 500°C 以下的中、低温度，不宜使用热电偶温度计。因为在该范围内，热电偶输出的热电势很小，这样一来对测温系统中的其他仪表的要求就很高，否则会带来较大的测量误差。

在中、低温范围一般使用热电阻温度计来测量温度。

热电阻温度计的特点：

- ❖ 性能稳定，测量精度高；
- ❖ 不需要冷端温度处理；
- ❖ 动态特性不如热电偶（热容量较大）；
- ❖ 抗机械冲击与震动的性能较差。

一. 测温原理

- ❖ 热电阻温度计利用金属导体的电阻值随温度变化而变化的特性来测量温度。
- ❖ 金属导体电阻的阻值与温度的关系一般可表示为：

$$R_t = R_{t_0} [1 + \alpha \cdot (t - t_0)]$$

α --- 电阻温度系数

R_t --- 温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值

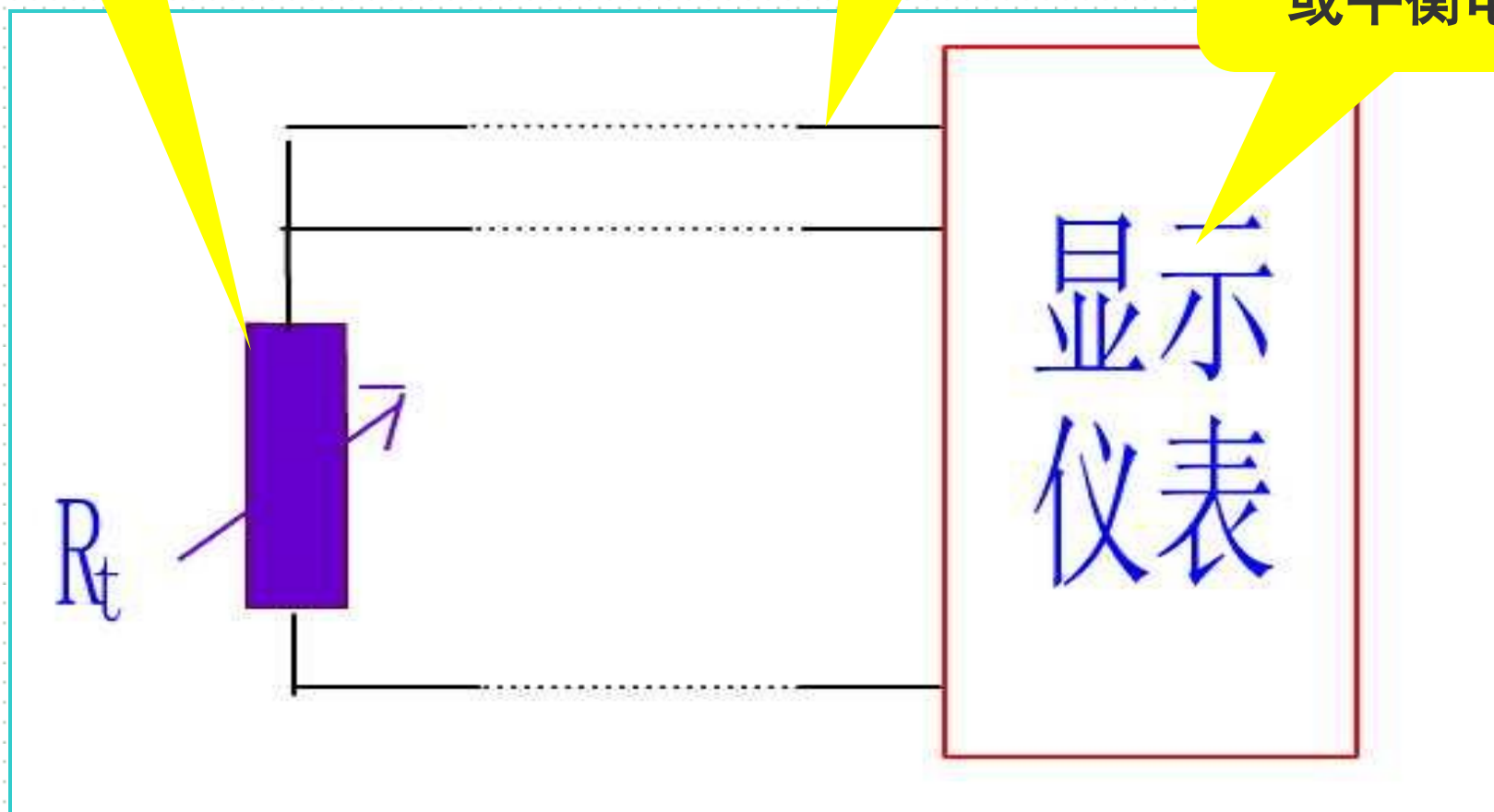
R_{t_0} --- 温度为 $t_0^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值

- ❖ 只要测出热电阻的阻值变化，就可以达到测温的目的。

热电阻

三根连接导线

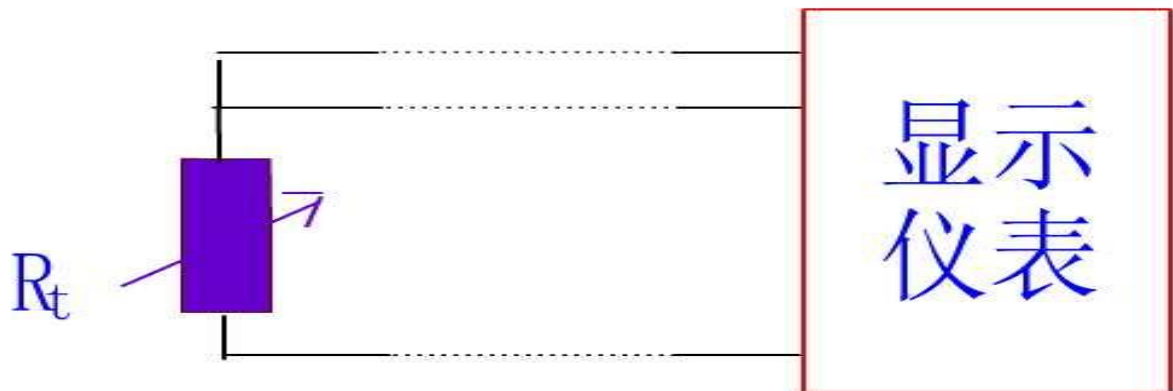
带不平衡电桥
或平衡电桥



热电阻测温系统

三线制连接：

- ❖ 通常，热电阻插在被测介质中，而显示仪表则放在仪表箱或仪表室里，两者的距离相隔较远，因此连接导线很长。
- ❖ 当环境温度变化时，连接导线的阻值会有明显的变化，从而影响温度计的测量精度。
- ❖ 在实际使用中，通常显示仪表中带有不平衡电桥或平衡电桥。采用**三线制**的连接方法，使得连接**导线的电阻**可以分别加在电桥相邻的两个桥臂上，从而大大**减小**因连接导线的阻值随环境温度变化所带来的测量误差。



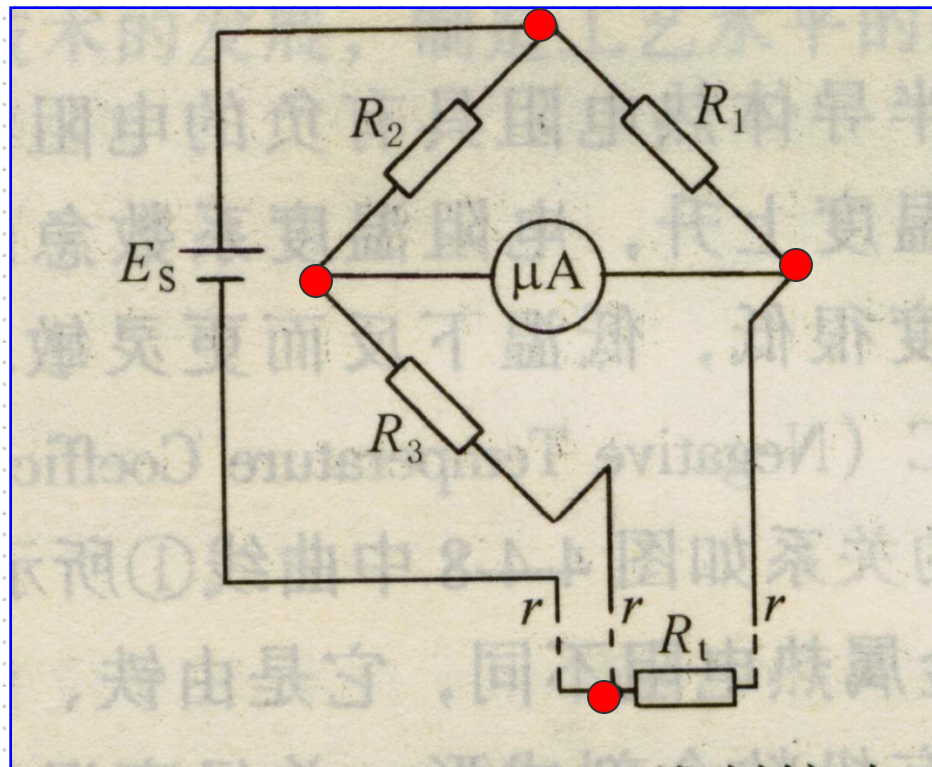
在**电桥平衡**的情况下，有：

$$R_2 \cdot (R_t + r) = R_1 \cdot (R_3 + r)$$

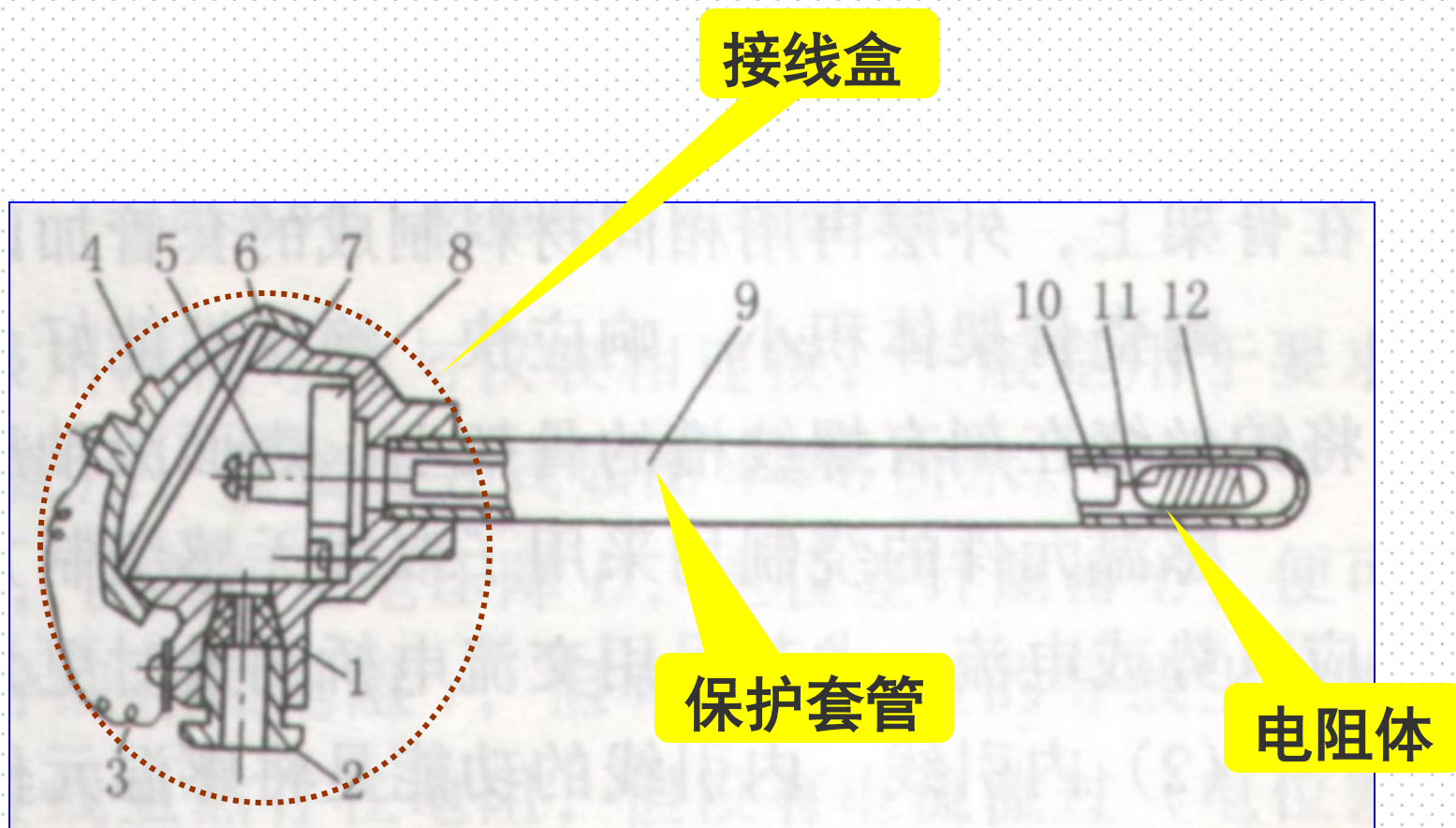
$$\begin{aligned} R_t &= \frac{R_1 \cdot (R_3 + r)}{R_2} - r \\ &= \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} + \frac{R_1 \cdot r}{R_2} - r \end{aligned}$$

只要满足 $R_1 = R_2$ ，导线电阻的变化就对热电阻没有影响。

在**电桥不平衡**的情况下，虽然不能完全消除连接导线电阻对测量的影响，但由于在电桥的两个相邻桥臂中都串入了导线电阻，可以大大减小其对测量的影响。

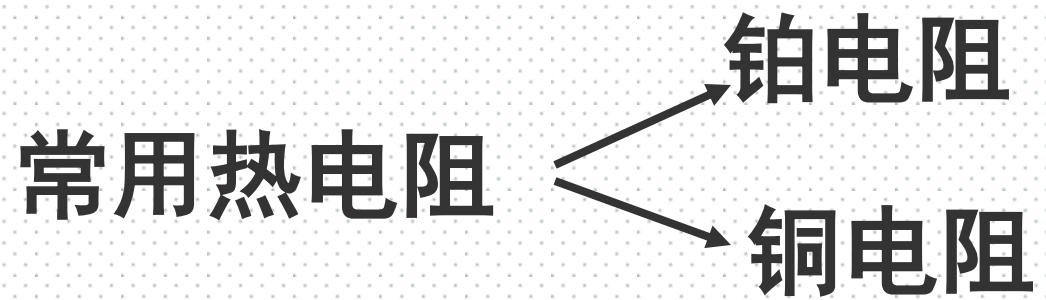


二. 工业上常用热电阻



对**电阻体**的要求为：

- ❖ 电阻的温度系数及电阻率要大，热容量要小；
- ❖ 在整个测温范围内，应具有稳定的物理和化学性质，有良好的复现性；
- ❖ 电阻值随温度的变化关系呈线性；
- ❖ 价格低廉，复制性强，加工方便。



1. 铂电阻

- ❖ 由 $\phi = 0.03 \sim 0.07mm$ 的铂丝绕在云母、石英或陶瓷支架上制成。
- ❖ 测温范围： $-200 \sim 500^{\circ}C$
- ❖ 国际规定的铂电阻分度号为 $Pt10(R_0 = 10\Omega)$ 以及 $Pt100(R_0 = 100\Omega)$
- ❖ 其中 R_0 代表铂电阻在冰点时的电阻值。
- ❖ 测温范围： $-200 \sim +500^{\circ}C$ ；
特殊情况下，低温可测量 $1 \sim 3K$ ；
高温可测量 $1000 \sim 1300^{\circ}C$ 。

电阻丝较粗，主要用于 $600^{\circ}C$ 以上的温度测量

电阻值与温度的关系式：

$$\begin{aligned} \text{其中: } A &= 3.90802 \times 10^{-3} \\ B &= -5.80195 \times 10^{-7} \\ C &= -4.27350 \times 10^{-12} \end{aligned}$$

0 ~ 850°C的范围内：

$$R_t = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2)$$

-200 ~ 0°C的范围内：

$$R_t = R_0 \cdot [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C(t - 100) \cdot t^3]$$

平均温度系数为： $\alpha = 3.85 \times 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$

特点：

- ❖ 在氧化性介质中，即使高温下的物理、化学性质都很稳定，因而精度高、稳定性好，性能可靠；
- ❖ 有较大的测量范围，特别是在低温方面；
- ❖ 易于使用在自动测量中，也便于远距离传送；
- ❖ 在高温下，易受还原性介质沾污，使铂丝变脆，并改变其电阻与温度之间的关系。工业用铂热电阻须采用外保护套。

2. 铜电阻

- ❖ 铜电阻体是一个铜丝绕组，由 $\phi = 0.1mm$ 的绝缘铜丝双线无感地绕在圆柱形塑料支架上，用锰铜补偿绕组来调整铜电阻体的电阻温度系数（**锰铜的阻值不随温度而变化**）。
- ❖ 铜电阻分度号为 $Cu50(R_0 = 50\Omega)$ 和 $Cu100(R_0 = 100\Omega)$ 。
- ❖ 测温范围： $-50 \sim +150^\circ C$ ；
- ❖ 适用于测量精度要求不是很高且温度较低の場合。

电阻值与温度的关系式：

$$R_t \approx R_0 (1 + \alpha \cdot t)$$

$$\alpha = 4.25 \sim 4.28 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$$

(铂电阻在0 ~ 100°C的范围内,
 α 的平均值为 $3.85 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$)

特点：

- ❖ 铜电阻与温度的线性度好；
- ❖ 电阻的温度系数比铂电阻的大；
- ❖ 易于提纯，加工性能好，可拉成细丝，故价格便宜；
- ❖ 在测温范围内，稳定性好；
- ❖ 电阻率比铂电阻的要小，故电阻的体积较大；
- ❖ 易于氧化，不适合于在腐蚀性介质或高温下工作。

此外，还有**半导体热电阻**（亦称热敏电阻），大多数半导体热电阻具有负的电温度系数（NTC），主要用于较低温度范围的**连续测量**。

半导体热电阻也有正温度系数（PTC）型热敏电阻和临界型热敏电阻（CTR），适合**位式作用**的温度传感器。

半导体热电阻的优点：

电阻温度系数大，灵敏度高；

电阻率大，可忽略连接导线电阻的变化；

结构简单，可做成体积小巧的感温部件。

2.4 热电偶、热电阻的选用

选择：

一般热电偶用于较高温度的测量，在 500°C 以下（特别是 300°C 以下）中低温区采用热电阻进行测温。

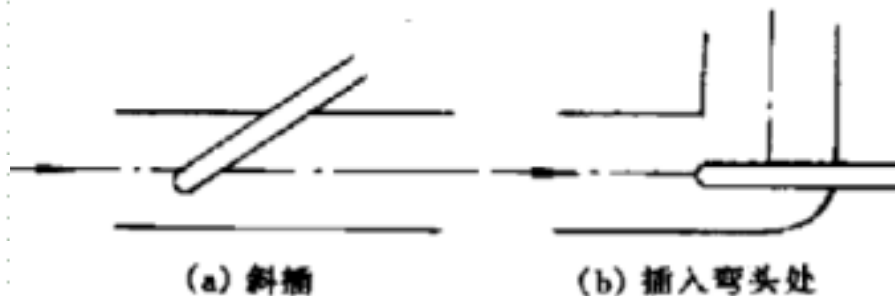
- 在中低温区，热电偶输出的热电势很小，对测量仪表放大器和抗干扰要求很高。
- 由于参比端温度变化不易得到完全补偿，在较低温度区内引起的相对误差就很突出。

选用热电偶和热电阻时，应注意工作环境，如环境温度、介质性质（氧化性、还原性、腐蚀性）等，选择适当的保护套管、连接导线等

2.4 热电偶、热电阻的选用

安装：

- (1) 选择有代表性的测温点位置，测温元件有足够的插入深度。测量管道流体介质温度时，应迎着流动方向插入，至少与被测介质正交。测温点应处在管道中心位置，且流速最大。
- (2) 热电偶或热电阻的接线盒的出线孔应朝下，以免积水及灰尘等造成接触不良，防止引入干扰信号。
- (3) 检测元件应避开热辐射强烈影响处。要密封安装孔，避免被测介质逸出或冷空气吸入而引入误差。



2.5 非接触式测温方法及仪表

热辐射原理：

从一个热源体不经过任何媒介物，又不直接接触就把热能传递给另一个物体的现象称为热辐射。

产生热辐射现象的原因：

任何物体受热后都有一部分热能转变成辐射能，物体的温度越高，辐射到周围空间的能量就越多。

辐射能以波动形式表现出来，波长范围极广，包括X光、紫外光、可见光、红外光、无线电波等。一般工程测温中常用的是**可见光和红外光**，因为**这些光被物体接收以后，又能转变成热能，使物体升温，以便测量。**

测温原理：

如果接收物体是能够将热辐射能全部吸收的**绝对黑体**，则根据**普朗克定律**，辐射强度 $E_{o\lambda}$ （辐射能力与波长之比）与绝对温度 T 的关系为：

$$E_{o\lambda} = C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}$$

λ — — — 波长

测出辐射强度的大小，就可以测量被测对象的温度。

- 绝大多数的被测对象都是非黑体，如果把黑体辐射定律直接用于实际的测温将出现困难，即确定物体的热辐射并不一定能确定该物体的**真实温度**。
- **表观温度**：包括**亮度温度**、**辐射温度**和**颜色温度**，它们能在物体的发射率未知的情况下把实际物体的温度测量同黑体辐射定律直接联系起来。
- 由这三种表观温度可以引伸出三种测温方法及其仪器。

目前广泛应用的热辐射温度计：

亮度高温计——光学高温计（人工操作）、
光电高温计（连续测量）

辐射高温计

比色温度计

红外测温仪（非接触测量0~700℃中低温）

除了上述常用的测温方法之外，还可以应用一些新型的测温方法来测量温度：

光导纤维测温技术；

半导体硅PN结温度传感器测温技术；

基于半导体硅PN结集成电路测温技术；

石英振荡器温度传感器测温技术。

光纤测温技术

- **光导纤维**是一种由透明度很高的材料制成的**传输光信息**的导光纤维。
- 光纤温度计的特点：
 - ❖ 电、磁绝缘性好，适合一些特殊情况下的温度测量；
 - ❖ 灵敏度高，传输损耗小；
 - ❖ 体积小、重量轻、强度高、可挠性好。

光纤温度计

接触式——荧光光纤温度传感器（光纤不作为感温元件，而仅起导光作用，且只适合于低温区的测量。）

非接触式——辐射光纤温度传感器（工作原理与相对应的辐射温度计相似，不同之处在于：由光纤代替一般辐射温度计的空间传输光路，让耐高温光纤探头靠近被测物体。该温度计在高温下具有很高的灵敏度，但无法用于低温区域。）

END