

第2章 温度测量

2.1 温标与测温措施

2.2 膨胀式与压力式温度计

2.3 热电偶温度计

2.4 热电阻温度计

2.5 接触式测温误差及对策

2.6 非接触式测温

2.7 新型温度传感器

2.1 温标与测温措施

一、基本概念

热平衡

两个冷热程度不同的物体相接触后会产生热互换，热互换结束后两物体处于热平衡状态，此时它们的温度相同

温度

宏观上，表征物体冷热程度的物理量；

微观上，表征物体内部分子无规则运动的剧烈程度。

温标

衡量温度高下、表达温度数值的一套规则。

建立当代温标必须具备的条件：

- 1) 固定的温度点（基准点）
- 2) 测温仪器
- 3) 温标方程（内插公式）

温标

经验温标

由特定的测温质和测温量拟定的温标。

华氏温标

摄氏温标

摄氏温度和华氏温度的关系： $t_F = \frac{9}{5}t_C + 32$

热力学温标

由热力学第二定律拟定的温标。

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

特点：与选用的测温介质的性质无关，克服了经验温标随测温介质而变的缺陷

理想气体温标

由玻意耳—马略特定律拟定的温标。

$$T = \frac{P}{P_s} T_s = \frac{P}{P_s} \times 273.16$$

国际实用温标

国际实用温标

这是一种协议温标，用来统一各国之间的温度计量。

• 具有的条件：

- ① 尽可能的接近热力学（开氏）温度；
- ② 复现精度高，各国均能以很高的精度复现一样的温标；
- ③ 用于复现温标的原则温度计使用以便、性能稳定。

• **发展：** 第一种国际温标是1927年国际计量大会决定采用的，“1927国际温标”，后来又不断改善修订，相继有1948国际温标、 1968国际实用温标和1990国际实用温标。

★ 目前推行的是1990年国际实用温标**ITS-90**:

热力学温度用符号 T_{90} 表达，单位为开尔文，符号为K。

摄氏温度的符号为 t_{90} ，单位是摄氏度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。

温度测量原理

利用物体的某一物理性质（**物理性质随温度变化的特征**）将其作成温度敏感元件，经过温度敏感元件与被测对象的热互换，测量有关的物理量，即可间接的获取被测对象的温度值。

二、测温措施的分类

1. 接触式测量

测温元件直接与被测对象相接触，依托**传热和对流**进行热互换，当传热量为零时，两者温度相等。

优点：

测温精度相对较高； 直观可靠； 测温仪表价格相对较低

缺陷：

感温元件影响被测温度场的分布； 接触不良会带来测温误差； 具有腐蚀性或温度太高的被测介质对感温元件性能和

寿命会产生不利影响。

2. 非接触式测量

感温元件不与被测对象直接接触，而是经过接受被测物体的**热辐射能**实现热互换

优点：

不变化被测物体的温度分布； 具有较高的测温上限；
热惯性小，便于测量运动物体的温度及迅速变化的温度。

电涡流式、辐射式

接触式与非接触式测温特点比较

方式	接触式	非接触式
测量条件	感温元件要与被测对象良好 接触 ；感温元件的加入几乎 不变化对象的温度 ；被测温度 不超出 感温元件能承受的 上限温度 ；被测对象 不对 感温元件产生 腐蚀	需精确懂得被测对象表面 发射率 ；被测对象的辐射能 充分照射 到检测元件上
测量范围	尤其 适合1200℃ 下列、热容大、无腐蚀性对象的连续在线测温，对高于1300℃以上的温度测量较困难	原理上测量范围能够 从超低温到极高温 ，但1000℃下列，测量误差大，能测运动物体和热容小的物体温度
精度	工业用表一般为1.0、0.5、0.2及0.1级， 试验室用表可达0.01级	一般为1.0、1.5、2.5级
响应速度	慢，一般为几十秒到几分钟	快，一般为2~3秒钟
其他特点	整个测温系统 构造简朴、体积小、可靠、维护以便、价格低廉 ，仪表读数直接反应被测物体实际温度；可以便地构成多路集中测量与控制系统	整个测温系统 构造复杂、体积大、调整麻烦、价格昂贵 ；仪表读数一般只反应被测物体体现温度(需进一步转换)；不易构成测温、控温一体化的温度控制装置

三、测温仪器的分类

按物理性质分：

❖ 物质的热膨胀与温度的关系—液体膨胀温度计（玻璃水银）、固体膨胀温度计（双金属）、气体膨胀温度计（压力表式）

❖ 利用热电效应—热电偶（两种不同金属导体在两个端点上相互接触，当其两个接点温度不同步，回路中会产生热电势）

❖ 利用金属或半导体阻值与温度的关系—热电阻（铂、铜等）

❖ 利用物体的辐射能与温度的关系—辐射温度计
（辐射能与温度存在一定的关系，如光电高温计）

●按温度计感温部分是否与被测物体相接触分：

接触式温度计

非接触式温度计



注意

按照温度测量范围，可分为超低温、低温、中高温和超高温温度测量。超低温一般是指 $0\sim 10\text{K}$ ，低温指 $10\sim 800\text{K}$ ，中温指 $800\sim 1900\text{K}$ ，高温指 $1900\sim 2800\text{K}$ 的温度， 2800K 以上被以为是超高温。

2.2 膨胀式与压力式温度计

一、膨胀式温度计

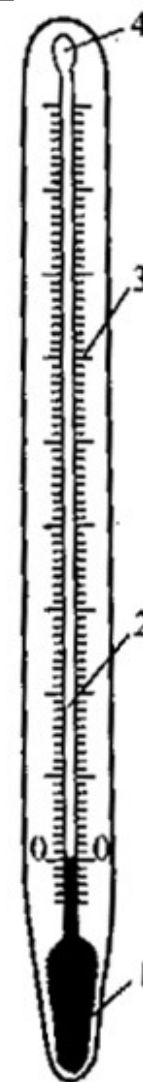
利用物质**热胀冷缩**现象，经过测量**物质膨胀或收缩量**来反应被测温度的温度计

⊕ 液体膨胀式温度计

利用液体的热胀冷缩现象

经典应用：玻璃管温度计

玻璃管温度计是由液体储囊，毛细管，刻度标尺和膨胀室四部分构成。



1-液体
储囊

2-毛细
管

3-刻度
标尺

4-膨胀
室

某液体在温度为 t_1 时的体积为 V_{t_1} ，在温度为 t_2 时的体积为 V_{t_2} ，因为**温度变化引起的体积变化**能够用下式表达：

$$\Delta V = V_{t_2} - V_{t_1} = \alpha_{t_1 t_2} \Delta t V_0$$

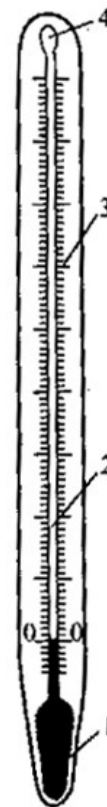
$\alpha_{t_1 t_2}$ — 液体在温度 t_1 到 t_2 下的平均体膨胀系数

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

V_0 — 液体在 0°C 时的体积

✓ 液体在玻璃管内的**视膨胀系数**：

$$\gamma = \alpha - \beta$$



常见液体的体膨胀系数和相对玻璃的视膨胀系数见表2-2

✓ 温度计的敏捷度:

$$L = \gamma_{100,0} \frac{V_0}{S}$$

$L = \frac{L_{100} - L_0}{100}$ — 温度计上相应刻度每 1°C ，液体在毛细管中的长度

$\gamma_{100,0}$ — 液体在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 间的视膨胀系数

V_0 — 液体储囊的容积

S — 毛细管的横截面积

玻璃管液体温度计的特点：

优点：测量精确、读数直观、构造简朴、价格低廉，使用以便

缺陷：易碎、不能远传信号和自动统计等

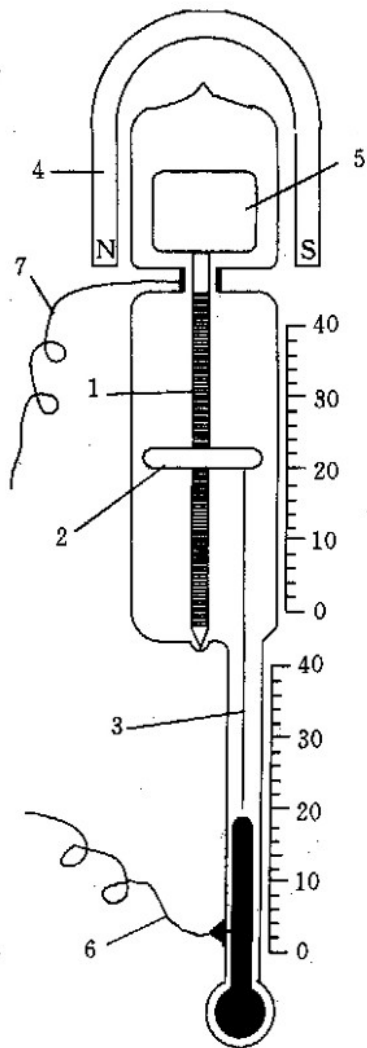
玻璃管液体温度计的分类：

按照基本构造形式不同，玻璃液体温度计可分为：棒式、内标式、外标式

根据所填充的工作液体不同，可分为水银温度计和有机液体温度计两类。

水银温度计不粘玻璃，不易氧化，轻易取得较高精度，在相当大的范围内（ $-38\sim 356^{\circ}\text{C}$ ）保持液态，在 200°C 下列，其膨胀系数几乎和温度呈线性关系，所以可作为精密的原则温度计。

电接点温度计:



怎样实现接点的变化，即温度额定值的设置？

应用： 恒温水槽、油槽及空调系统

优点： 构造简朴、使用以便，既可指示温度，也可控制温度

缺陷： 易碎，且破碎后水银会污染环境。

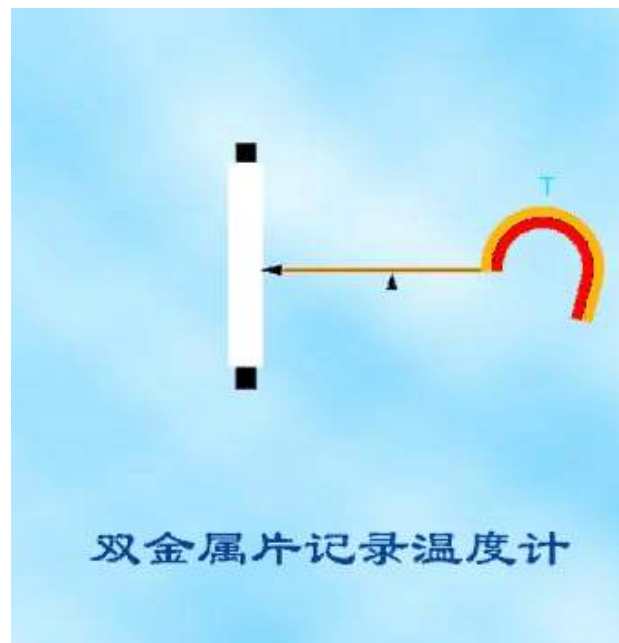
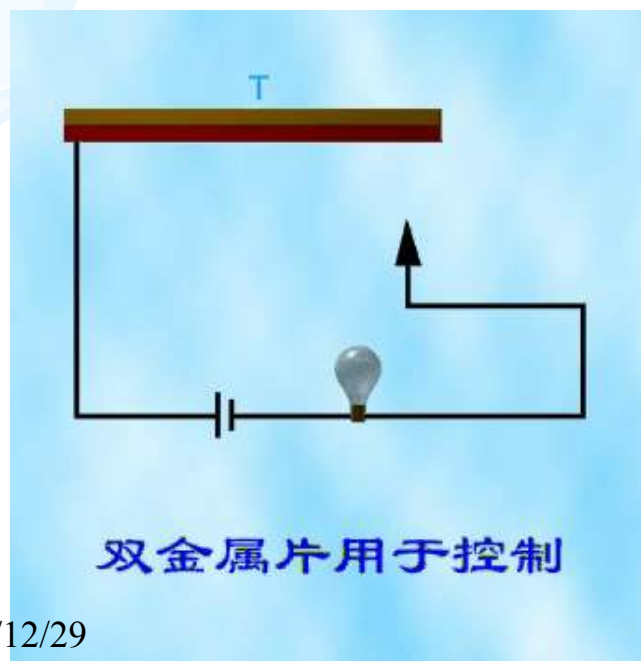
- 1-细长螺钉；
- 2-椭圆形螺母；
- 3-细导线；
- 4-磁钢帽；
- 5-扁平铁块；
- 6、7-外引线

⊕ 固体膨胀式温度计：应用固体线膨胀原理测温

经典应用：双金属片温度计。

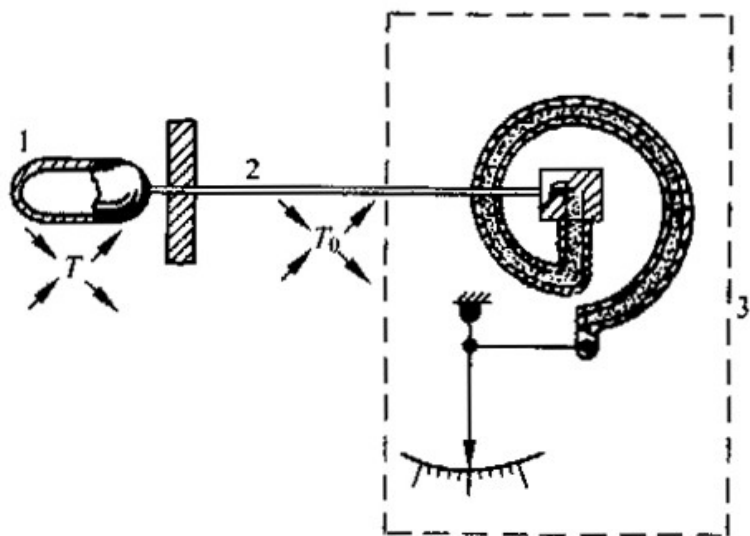
原理：利用**线膨胀系数差别较大**的两种金属材料制成双层片状元件，在温度变化时因弯曲变形而使其另一端有**明显位移**，借此带动指针在温度刻度盘上移动。

应用



二、压力式温度计

根据封闭系统的液体或气体受热后压力变化的原理



1-温包； 2-毛细导管；
3-压力计

根据工作物质的不同，可分为气体、液体、蒸汽式压力温度计。

气体式，一般充氮气，测温上限可达 500°C ，线性刻度，但是温包体积大，热惯性大。

液体式，一般充二甲苯、甲醇等，温包小些，测温范围分别为 $-40^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ 和 $-40^{\circ}\text{C}\sim 170^{\circ}\text{C}$ ，

蒸汽式，一般充丙酮、乙醚等，利用低沸点蒸发液体的饱和压力随被测温度而变的原理，用于 $50^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。刻度呈非线性关系，温度计刻度是不均匀的。

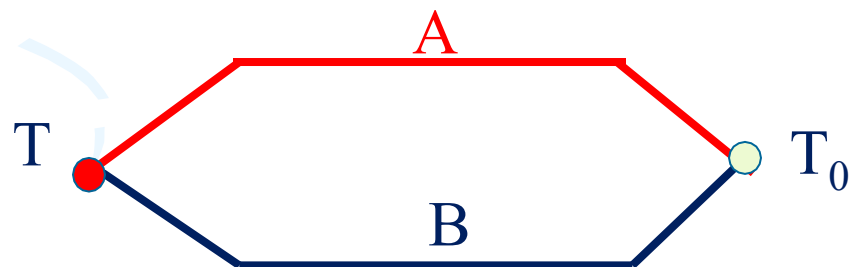
2.3 热电偶温度计

特点:

应用广泛；敏捷度好；精度高；易确保单值函数关系；稳定性、复现性好；响应时间较快、材料易得到；互换性好，价格较低；测温范围宽（ $-296^{\circ}\text{C} \sim 2800^{\circ}\text{C}$ ）。

一.测温原理

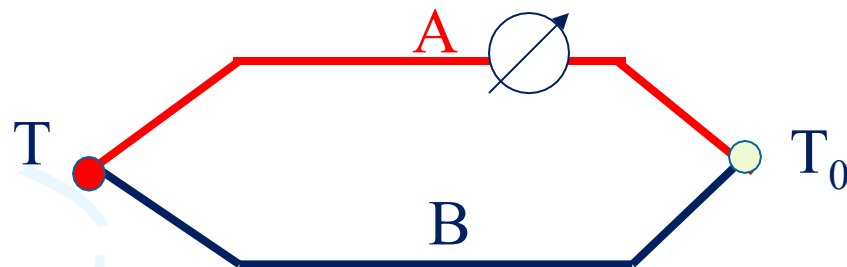
- ★ **热电效应thermoelectricity effect**（或塞贝克效应）：将两种不同的导体或半导体A和B连成闭合回路，当两个接点处的温度（ T 和 T_0 ）不同步，回路中将产生热电动势的现象。
- ★ 两种不同导体（或半导体）构成的闭合回路称为**热电偶**。导体A或B称为**热电极**。两个接点中，置于温度为 T 的被测对象中的称为**测量端（工作端或热端）**，温度为参照温度 T_0 的接点称为**参比端或参照端**，也叫**自由端或冷端**。



✚ 闭合回路的热电动势由两种电动势构成：**温差电动势**（同一导体）和**接触电动势**（两种不同导体）

在热电偶回路中接一毫伏表，测量发觉，热电势与热电极的材料和两端的温差有关：

$$\text{热电势} = \text{接触电势} + \text{温差电势}$$



✚ 接触电动势 (珀尔帖电动势): 指两种不同的导体相接触时, 因各自的自由电子密度不同而产生电子扩散, 当到达动态平衡后所形成的电势。

$$\text{接触电动势: } e_{AB}(T) = \frac{\kappa T}{e} \ln \frac{N_A}{N_B}$$

κ —波尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$)

T —接点温度


e —单位电荷, 4.802×10^{-10} 绝对静电单位

N_A, N_B —导体 A 、 B 在温度 T 时的自由电子密度



接触电势的大小与温度和热电极的电子密度差 (导体的材料) 成正比:

- 温度越高, 接触电势越大;
- 电子密度差越大, 接触电势也越大。

 温差电动势（汤姆逊电动势）：**同一导体**两端因**温度不同**而产生的电势。

$$\text{温差电势: } e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \delta_A dt = e_A(T) - e_A(T_0)$$

δ_A —汤姆逊系数，表示温差为 1°C 时所产生的电动势，它与材料的性质有关。

$e(T)$ —只与导体性质及温度有关，与导体长度、截面积及温度分布无关。



注意

温差电动势的大小，取决于**热电极**两端的**温差**：

➤ 温差越大，温差电动势越大；

✚ 热电偶回路中总的热电势为:

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

$$= [e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0)] - [e_A(T, T_0) - e_B(T, T_0)]$$



两个接触电动势 两个温差电动势

$$E_{AB}(T, T_0) = \frac{k}{e} (T - T_0) \ln \frac{N_A}{N_B} - \int_{T_0}^T (d_A - d_B) dt$$

讨论

1. A、B为同一种材料, ($N_A = N_B, \delta_A = \delta_B$), 则 $E_{AB}(T, T_0) = 0$
2. $T = T_0$, 则 $E_{AB}(T, T_0) = 0$

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= f_{AB}(T) - f_{AB}(T_0) \\ &= f_{AB}(T) + f_{BA}(T_0) \end{aligned}$$

讨论

1. 热电动势是温度的函数之差，不是温差的函数；若 $T_0 = \text{const}$ ，则热电动势与 T 一一相应。
2. 热电动势大小只与导体材质和接点温度有关，而与形状、接触面积无关。

3. 热电偶中电子密度高的导体称**正电极**，电子密度低的导体称为**负电极**；热电动势的符号 $E_{AB}(T, T_0)$ 要求了正、负电极顺序和高温、低温端顺序，若电极和或温度顺序互换，热电动势的极性就反相。

例： $E_{AB}(T, T_0) = -E_{AB}(T_0, T)$ $E_{BA}(T, T_0) = -E_{AB}(T, T_0)$

4. 在热电偶回路中，**接触电势比温差电势大得多**，所以总热电势的极性总是取决于接触电势的极性。

二. 热电偶的基本定律

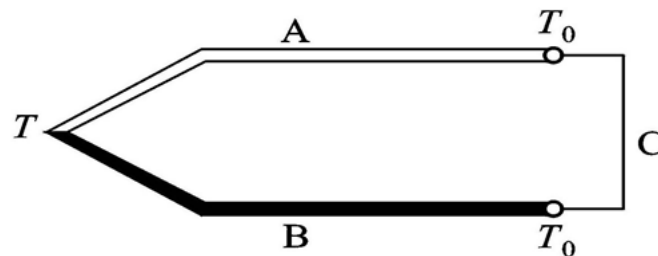
1、均质导体定律

同种均质导体（或半导体）构成的闭合回路，不论导体的截面、长度以及温度分布怎样，都不能产生热电势。

阐明：

- (1) 一种均质材料不能构成热电偶，必须由两种不同材料的均质导体构成；
- (2) 若热电极材料不均匀，因为温度梯度的存在，将产生附加热电动势

应用： 检验热电极材料的均匀性（两极用同一种材料）
检验热电极材料成份是否相同



2、中间导体定律

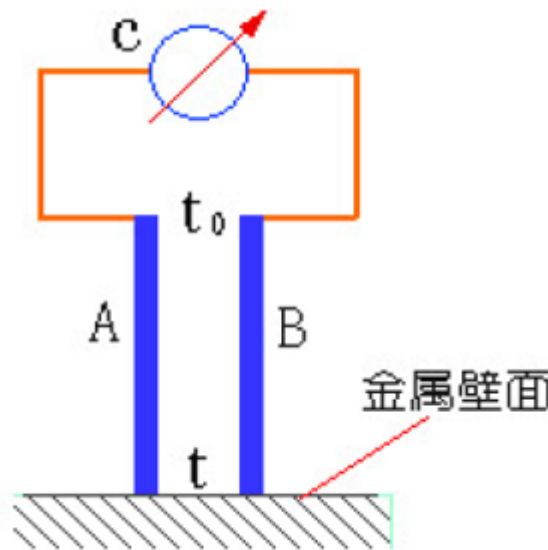
在热电偶回路中接入中间均质导体后，只要中间导体两端的温度相同，对热电偶回路的总热电动势没有影响

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



注意

热电偶回路中还能够加入第四、五两接点温度相等，回路的总热电动势



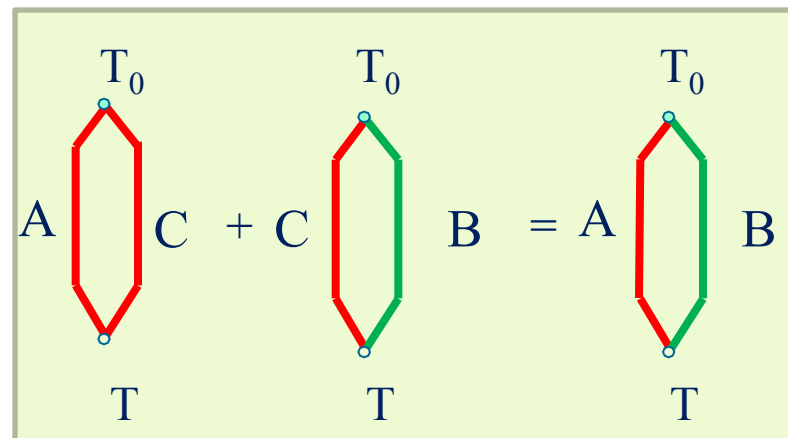
体的温度相同。

应用： 采用仪表测量热电偶的热电动势
用热电偶开路测量金属壁温、液态金属温度

3、原则电极定律

假如A、B对原则电极C材料的热电动势已知，则A、B构成热电偶时的热电动势是它们分别对C构成热电偶时产生的热电动势的代数和。

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



阐明：

只要经过试验取得各电极与原则电极的热电动势，则其中任意两个电极构成的热电偶的热电动势都可经过计算取得

一般选择高纯铂丝作为原则电极

例1、 已知在热端 100°C ，冷端 0°C 时，铜铂相配热电动势为 0.75mV ，考铜与铂相配的热电动势为 -4.0mV ，问铜-考铜热电偶在此温度下的热电动势？

解： 设铜为A，考铜为B，铂为C

由已知

$$E_{AC}(100, 0) = 0.75\text{mV},$$

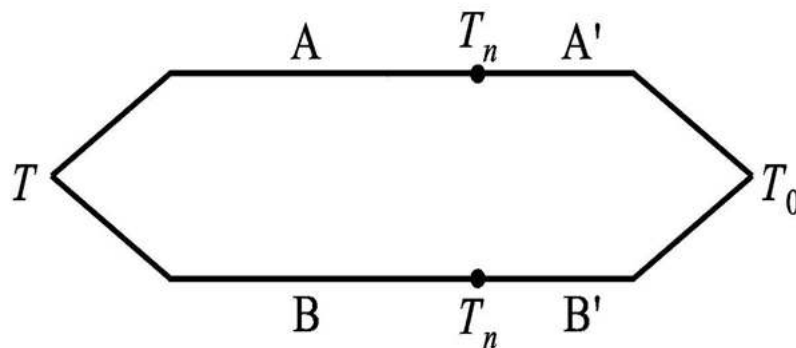
$$E_{BC}(100, 0) = -4\text{mV}$$

$$\text{则, } E_{AB}(100, 0) = E_{AC}(100, 0) + E_{CB}(100, 0) = 4.75\text{mV}$$

4、连接导体定律

热电偶回路中，假如热电极A、B分别与导体A'、B'相接，接点温度分别为 T 、 T_n 、 T_0 ，则回路总电动势等于热电偶热电动势和连接导体热电动势的代数和。

$$E_{ABBA'}(T, T_n, T_0, T_n) = E_{AB}(T, T_n) + E_{A'B'}(T_n, T_0)$$

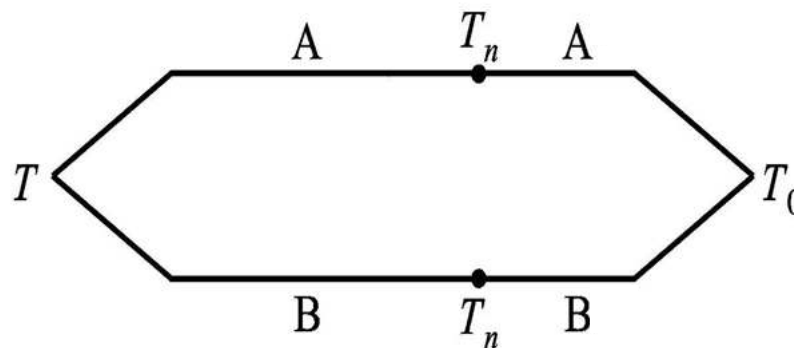


应用：热电偶补偿导线

5、中间温度定律

两种均质材料A、B构成热电偶，接点温度分别为 T 、 T_0 ，若有一种中间温度 T_n ，则回路总电动势不受中间温度的影响。

$$\begin{aligned} E_{ABBA}(T, T_n, T_0, T_n) \\ &= E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0) \\ &= E_{AB}(T, T_0) \end{aligned}$$



等价形式

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

$$E_{AB}(T, T_n) = E_{AB}(T, 0) - E_{AB}(T_n, 0)$$

应用：使用《热电偶分度表》

三、热电偶的种类和构造

■热电偶材料应满足下列要求：

1. 材质要**均匀**，能耐高温，**机械性能好**，能加工成丝，化学、物理**性能稳定**，不易氧化、变形及腐蚀
2. **热敏捷度高**，**热电势大**，**测温范围宽**，热电势随温度的变化率要大，热电势与温度尽量成**线性**相应关系
3. 导体的**电阻温度系数要小**，**电阻率小**
4. 材料**复制性和互换性好**，便于批量生产，制造简朴，**价值低廉**

按照工业原则化要求:

原则化热电偶

S型、R型、B型、K型、N型、E型、J型、T型

贵金属

非原则化热电偶

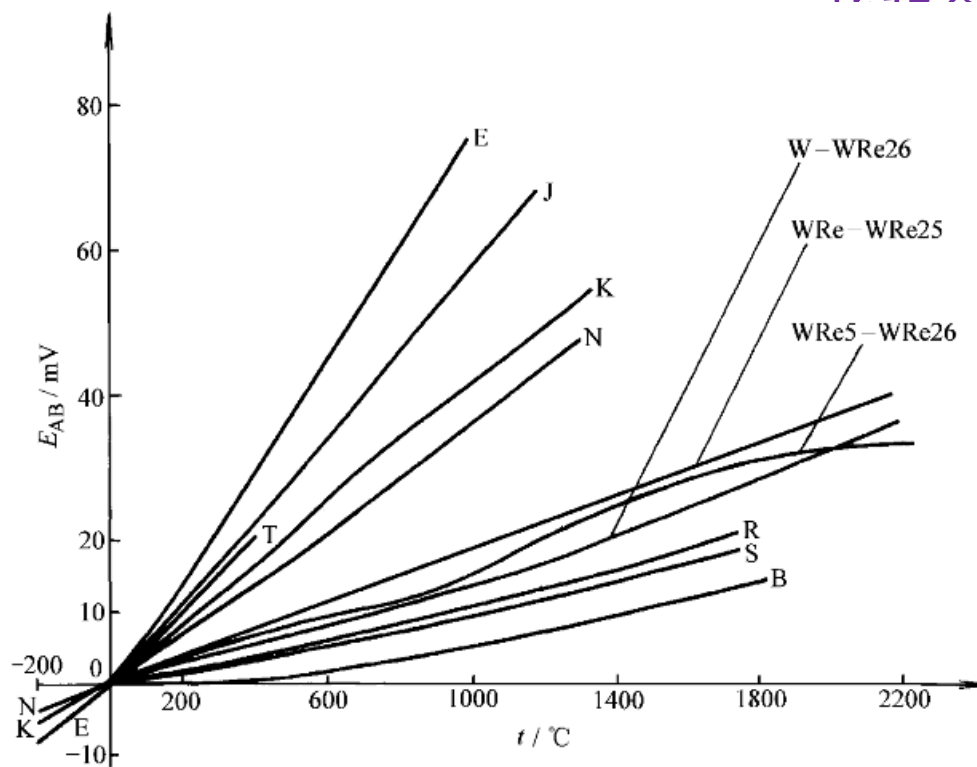
贵金属（铂铑系列、
贵-廉金属混合式（

难熔金属（钨铼合

非金属

统一的分度表，
并统一要求热电
极材料、热电性
质允许偏差

2-3



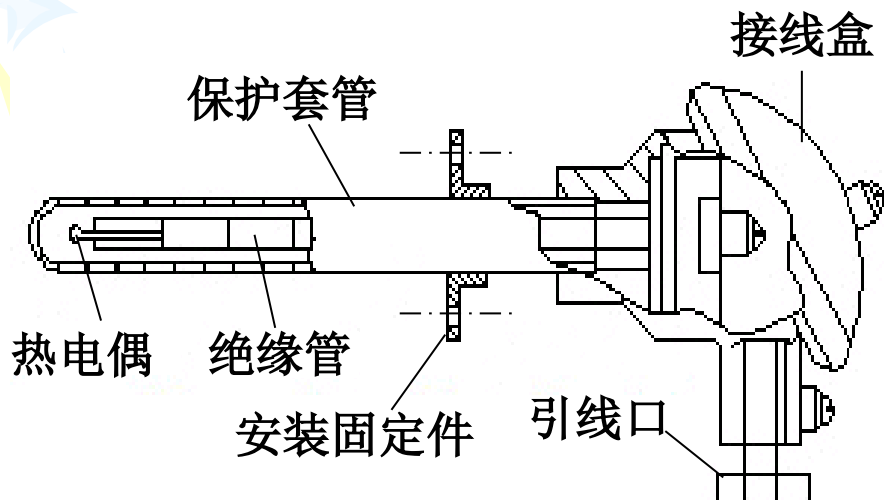
热电势-温度特征曲线

■ 热电偶的构造

工程上使用的热电偶大多是由热电极、绝缘子、保护套管和接线盒等几部分构成。热电偶与显示仪表、统计仪表或计算机等配套使用。

经典构造有一般装配式构造和柔性安装的铠装构造。

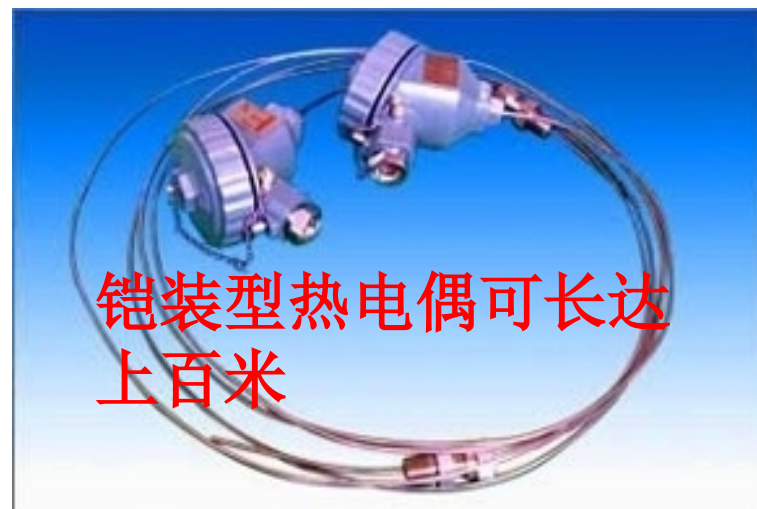
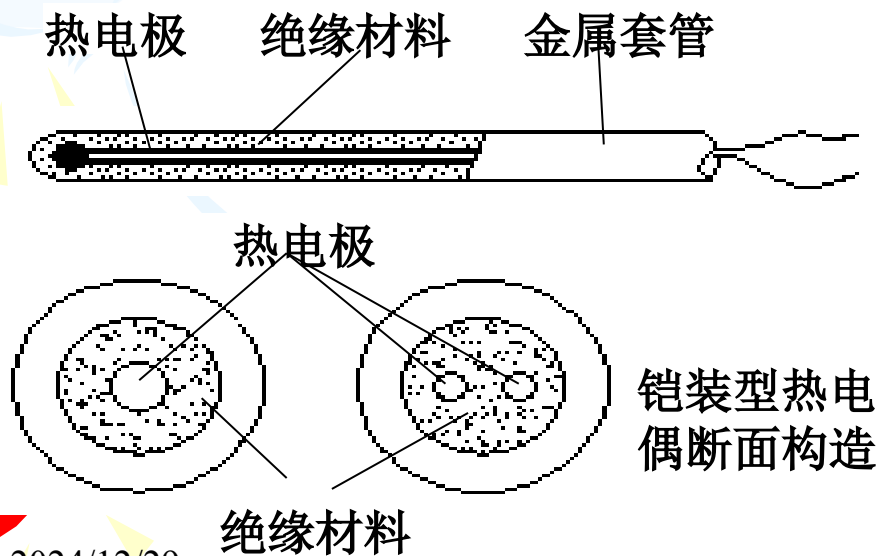
1、一般装配式热电偶构造



2、铠装热电偶

将热电偶丝、绝缘材料和金属保护套管三者经拉伸加工而成的一种坚实的组合体。构造形式多样：碰底型、不碰底型、露头型、帽型。

特点：铠装热电偶具有**动态响应快、机械强度高、抗震性好、柔软可弯曲**等优点，可安装在狭窄或构造较复杂的装置上。



三、热电偶的冷端处理

常用冷端处理措施：

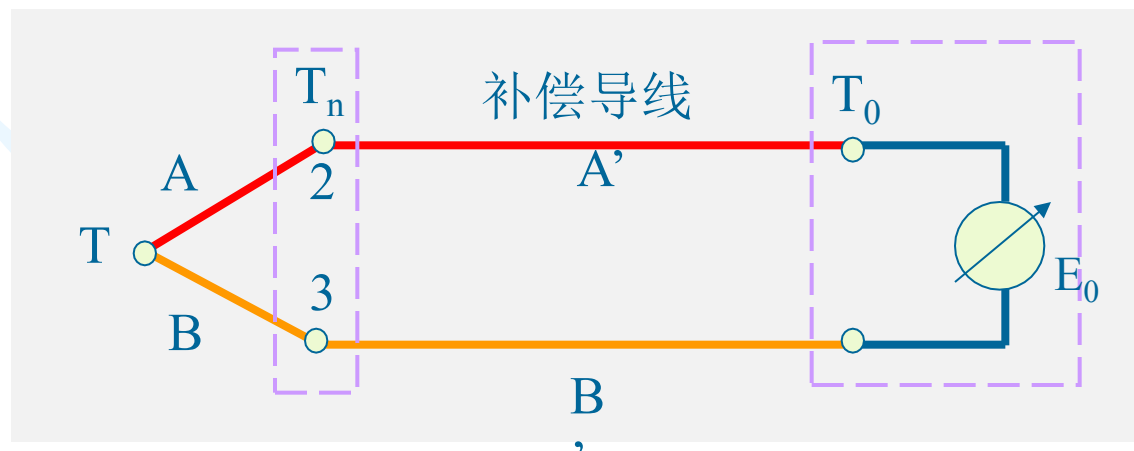
- 1、补偿导线法
- 2、参比端恒温法
- 3、计算修正法
- 4、冷端补偿器法
- 5、软件修正法

1、补偿导线法

✓基本原理： 连接导体定律

✓补偿导线的热电特征在 100°C （或 200°C ）下列范围内应与所取代的热电偶丝的热电特征基本一致，且电阻率低，价格必须比主热电偶丝便宜。

补偿导线的连接线路：



✓ 伴随热电偶的原则化，补偿导线也形成了原则系列。国际电工委员会也制定了国际原则，适合于原则化热电偶使用。

补偿导线分延长型和补偿型两种：

延长型(X)：导线的化学成份及热电势标称值与被补偿的热电偶相同。

补偿型(C)：导线的化学成份与被补偿热电偶不同；热电势值在 100°C （或 200°C ）下列与与补偿的热电偶相同。

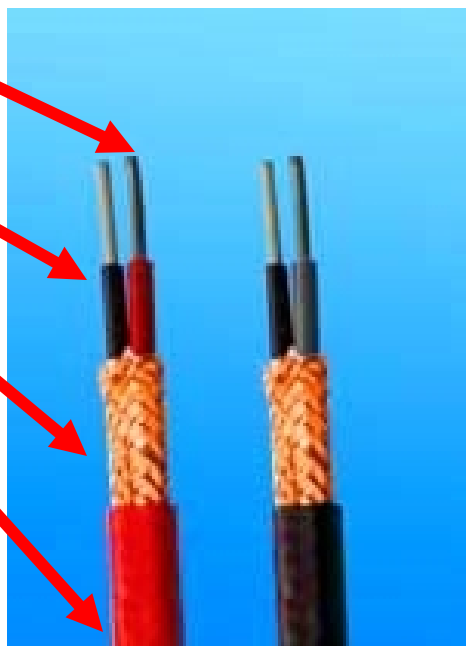
表2-4， 2-5.



注意

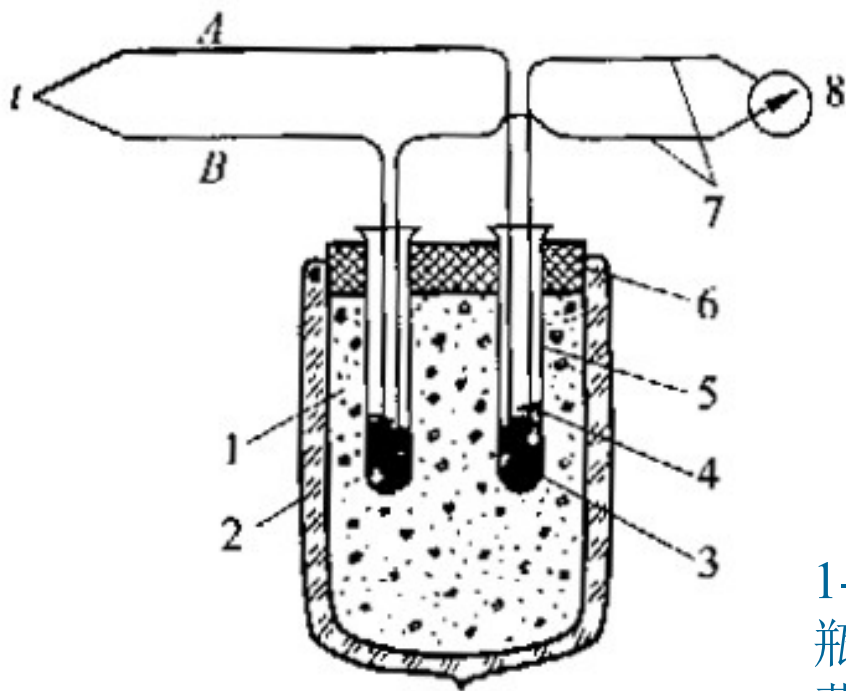
- 1、多种延长线只能与相应型号的热电偶配用，而且必须在要求的温度范围内使用。
- 2、注意极性，不能接反，不然会造成更大的误差。
- 3、延长线与热电偶连接的两个接点温度必须相同。

A'
B'
屏蔽层
保护层



2、参比端恒温法

将参比端置于恒温的容器中。



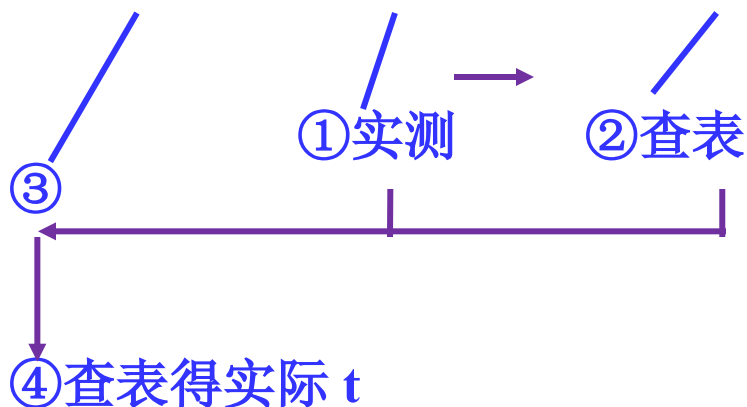
一般在试验室中或精密测量中使用。

1-冰水混合物； 2-保温瓶； 3-油类或水银； 4-蒸馏水； 5-试管； 6-盖； 7-铜导线； 8-热电势测量仪表

3、计算修正法

若参比端温度恒为环境温度 T_0 ，测出 $E(T, T_0)$ ，并根据中间温度定则，求：

$$E(T, 0) = E(T, T_0) + E(T_0, 0)$$



例：用K型热电偶测温，显示仪表读数为500 °C，且仪表以分度表为根据，但此时冷端温度为50 °C，问实际被测温度为多少

? 解：由分度表查得： $E(500,0)=20.664\text{mV}$

设被测温度为 T ，则 $E(T, 50)=20.664\text{mV}$

$$E(T,0) = E(T, 50) + E(50,0) = 20.664 + 2.023 = 22.667\text{mV}$$

查表插值计算

547	22.649
548	22.691
T	22.667

$$\frac{547 - 548}{22.649 - 22.691} = \frac{T - 548}{22.667 - 22.691}$$

$$T = 547.43 \text{ } ^\circ\text{C}$$



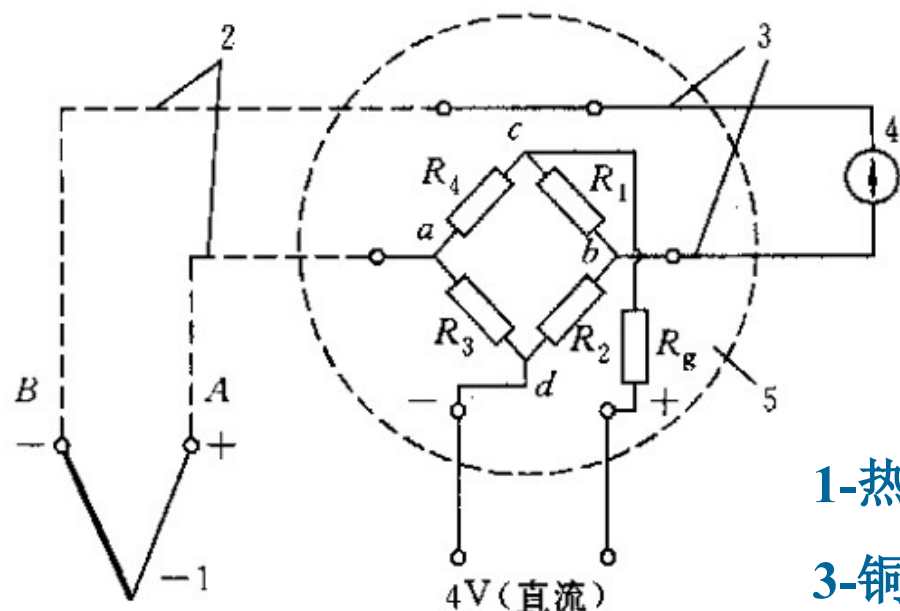
注意

在分度表的相邻数据之间可采用**线性内插算法**求中间值。

4、冷端补偿器（补偿电桥法）

利用不平衡电桥产生电势补偿热电偶因为参比端温度变化而引起的热电势变化。

当 $T_0 \uparrow$ $\nearrow R_4 \rightarrow U_{ab}$
 $\searrow E(T, T_0) \downarrow$ $\rightarrow U = E(T, T_0) + U_{ab}$ 不变



$$R_1 = R_2 = R_3 = 1\Omega$$

$$R_4 = 1\Omega \text{ (平衡点)}$$

实际的补偿电桥一般是按 $T_0 = 20^\circ\text{C}$ 设计。

- 1-热电偶； 2-补偿导线；
- 3-铜导线； 4-指示仪表；
- 5-冷端补偿器

➤ 冷端补偿器要求:

- ✓ 不同分度号的热电偶配用不同的冷端补偿器
- ✓ 冷端补偿器中的铜电阻必须与冷端同温
- ✓ 补偿范围有限（一定精度内，一般为 $0\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）
- ✓ 极性不能接反
- ✓ 热电偶的热电特性的关系也是非线性，只能是近似补偿



E与温度
成正比，只

5、软件修正法

对于计算机系统，不必全靠硬件进行热电偶冷端处理。例如冷端温度恒定但不为 0°C 的情况，只需使用计算修正法。对于经常波动的情况，可利用热敏电阻或其他传感器把信号输入计算机，按照运算公式设计某些程序，便能自动修正。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/626011111125010224>