

直流电路 与温差电现象

- 一、电路
- 二、简单电路（§ 3.3）
- 三、复杂电路（§ 3.4）
- 四、温差电现象

■ 电磁学

■ 场：

- 对象：电场、磁场
- 研究场的通量、环流

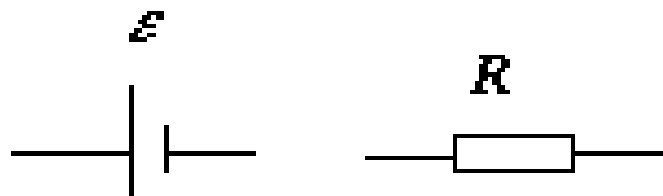
■ 路：

- 对象：由元件和源构成的电路或磁路
- 研究电荷在场的作用下的迁移传导规律
——场的规律在电路中的具体实现

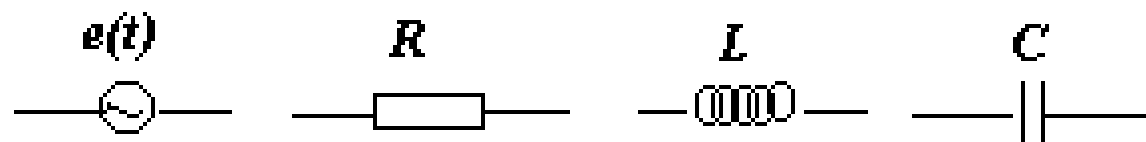
电路的分类

定态电路

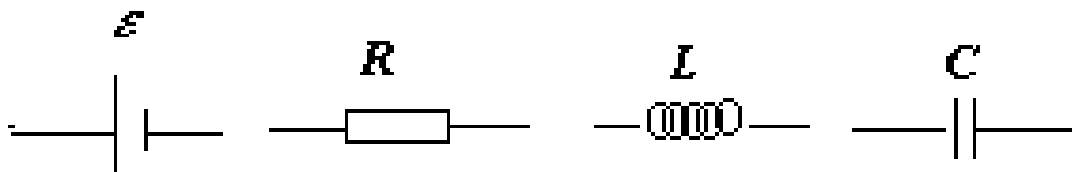
➤ 直流电路:



➤ 交流电路:



暂态电路:



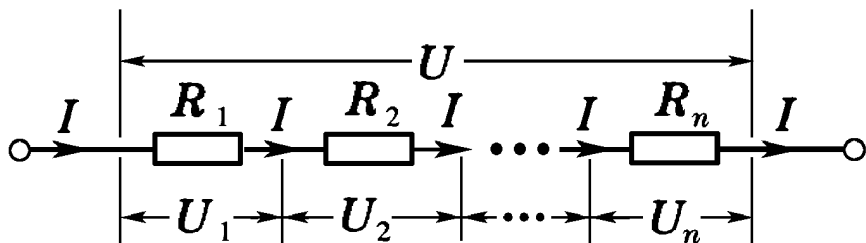
直流电路

■ 直流电路满足的基本方程

$$\oiint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0, \quad \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

- 简单电路：能够通过运用元件串、并联的计算法将电路化为一个单回路。
- 复杂电路：不能将元件的联结方式归并为串、并联的电路。

简单电路



$$I = I_1 = I_2 = \cdots = I_n$$

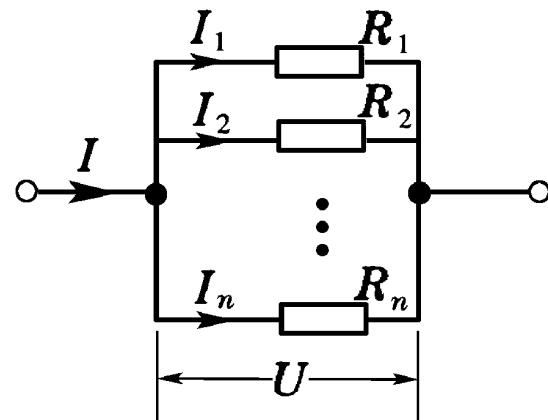
$$U = U_1 + U_2 + \cdots + U_n$$

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$$

$$U_i \propto R_i; \quad P_i = I^2 R_i$$

高阻起主要作用

低阻起主要作用

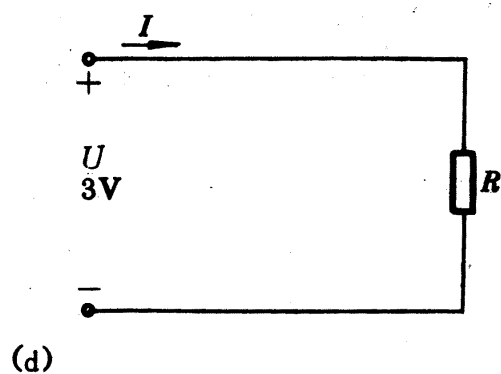
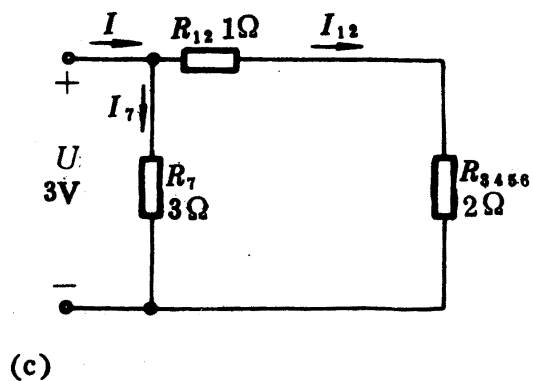
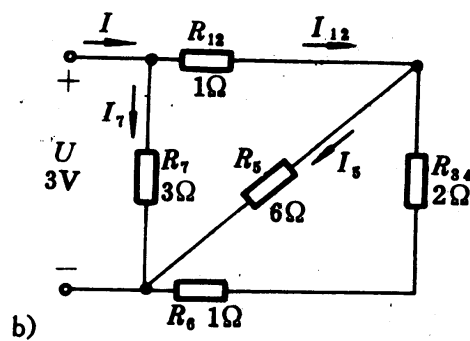
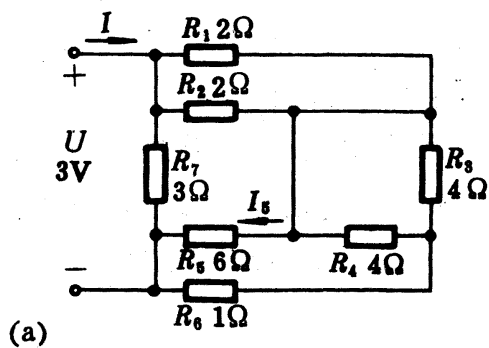


$$U = U_1 = U_2 = \cdots = U_n$$

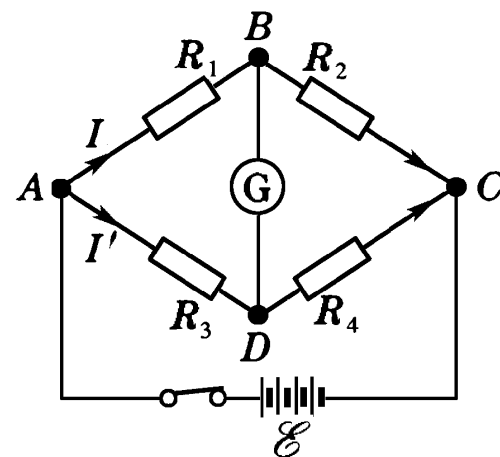
$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

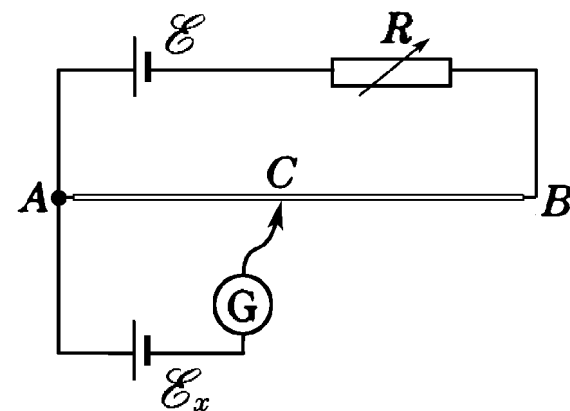
$$I_i \propto \frac{1}{R_i}; \quad P_i = \frac{U^2}{R_i} \propto \frac{1}{R_i}$$



等效——简单电路



平衡电桥



电势差计——补偿电路

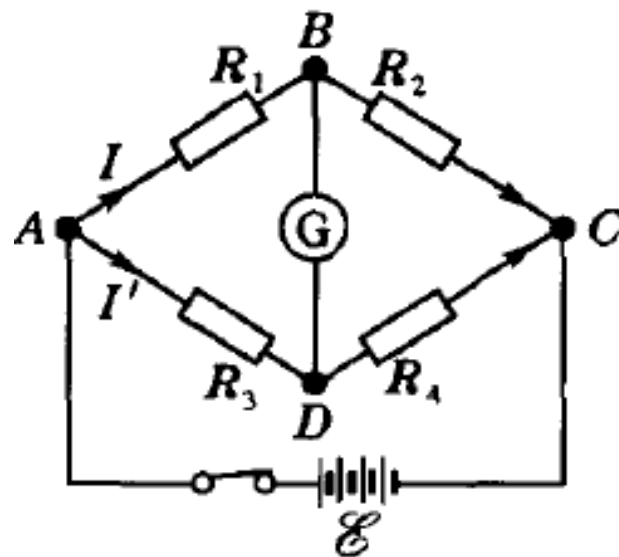
简单实用电路举例

电桥

平衡时: $U_{AB} = U_{AD}; U_{BC} = U_{DC}$

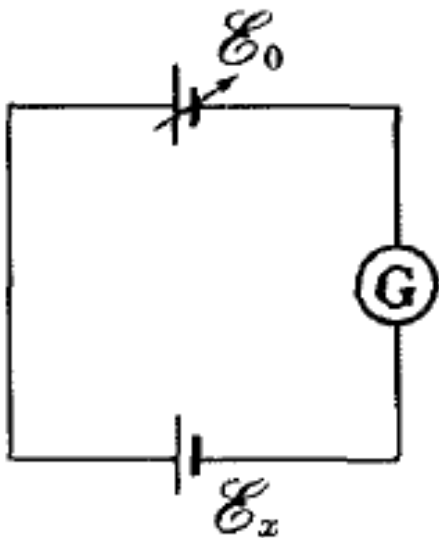
$$IR_1 = I'R_3; IR_2 = I'R_4$$

电桥的平衡条件: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$

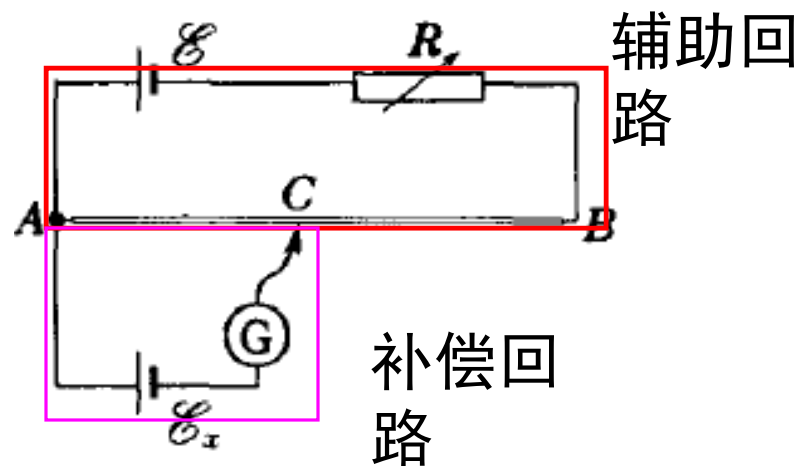


电势差计

补偿法原理图



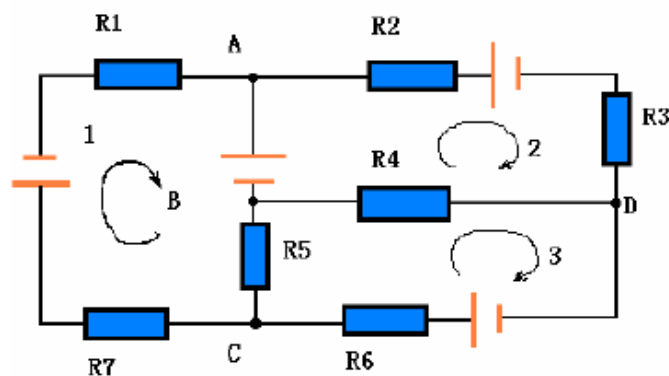
滑动电势差计



$$\mathcal{E}_x = IR_{AC}$$

复杂电路

■由多个电源和多个电阻**复杂联接**而成的电路，在一般情况下，这类电路**不能用电阻串并联等效变换化简**的电路。



■解复杂电路的方法：

■基尔霍夫电路定律；

P202

■等效电源定理（即戴维南定理和诺顿定理）；

p206

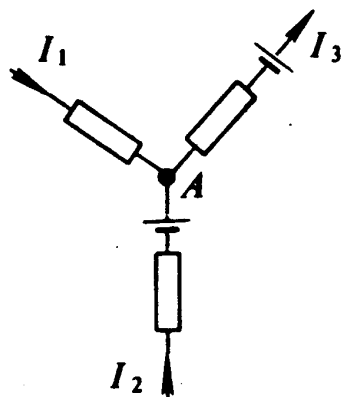
■叠加定理；

p209

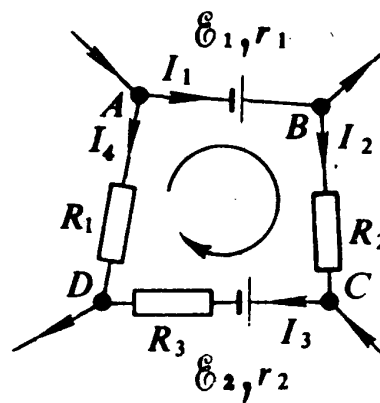
■等效变换等

p211

名词解释



a. 节点



b. 回路

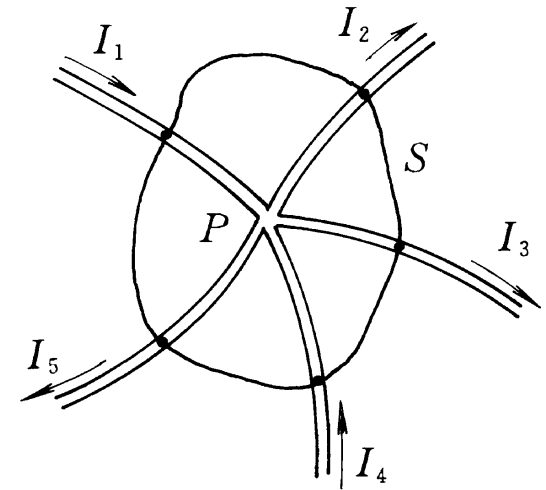
- **支路：** 电路中由电源、电阻串联而成的通路，支路中电流强度处处相等
- **节点或分支点：** 三条或更多条支路的联接点。
- **回路：** 几条支路构成的闭合通路

1、基尔霍夫第一定律(Kirchhoff's first law)

汇集同一节点的各支路电流的代数和必定为零

$$\sum_i (\pm I_i) = 0$$

基尔霍夫第一方程组，
或节点电流方程组。



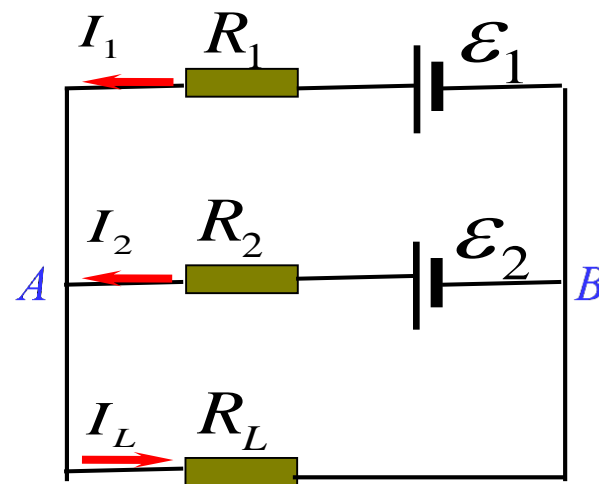
基尔霍夫第一定律的正确性是由恒定电流条件
得到保证的。

$$\oiint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0$$

列基尔霍夫第一方程组遵循的约定：

1. 对各支路的电流及其方向作出假设，假设的电流方向作为该支路电流的标定方向；

2. 根据电流的标定方向，从节点流出的电流前写加号，流向节点的电流前写减号；



$$I_1 + I_2 - I_L = 0 \quad (\text{节点B})$$

3. 若解出的电流为正值，表示该支路电流的实际方向与所设标定方向一致，若解出的电流为负值，表示该支路电流的实际方向与所设标定方向相反。

2、基尔霍夫第二定律 (*Kirchhoff's second law*)

沿回路一周，电势降落的代数和为零

$$\sum_i (\pm I_i R_i) + \sum_i (\pm \mathcal{E}_i) = 0$$

基尔霍夫第二方程组，或回路电压方程组。

恒定电流场中的电场遵从
静电场的环路定理

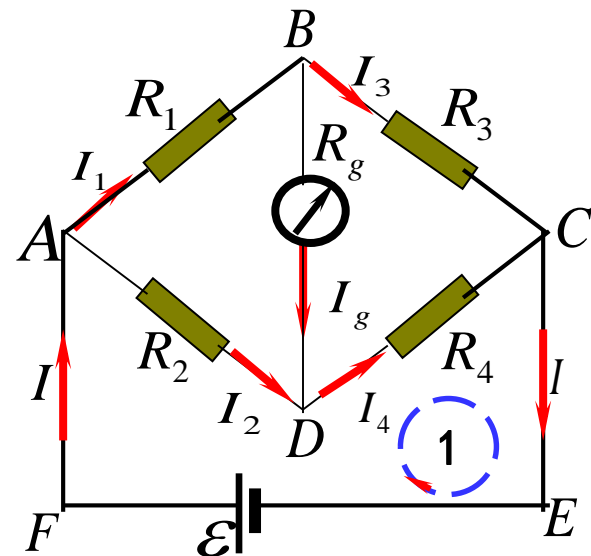
$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

列基尔霍夫第二方程组遵循的约定：

1. 对各回路设定一绕行方向，
作为该回路电势降落的标定方向；

2. 当支路上电流的标定方向与绕行方向一致时，
该支路上电阻的电势降落前取加号，否则取减号；

3. 对电源，沿标定方向遇到电源正极则取加号，
遇负极则取减号。



$$I_2 R_2 + I_4 R_4 - \varepsilon = 0$$

3、独立方程的个数

1. 若整个电路可以化为平面电路, 可以把电路看成一张网络, 网孔的数目就是独立回路的数目.
2. 对于一个有 n 个节点, p 条支路的电路, 共有 $p-n+1$ 个独立回路.
3. 根据基尔霍夫第一定律可列出 $n-1$ 个独立节点电流方程组; 根据第二定律可列出 $p-n+1$ 个独立回路电压方程组; 总方程数为 p , 独立方程的数目与未知量的数目相等, 方程组有唯一解.

例1：右图所示的闭合面包围的是一个三角形电路，它有三个节点。求流入闭合面的电流 I_A 、 I_B 、 I_C 之和是多少？

解：应用基尔霍夫电流定律可列出

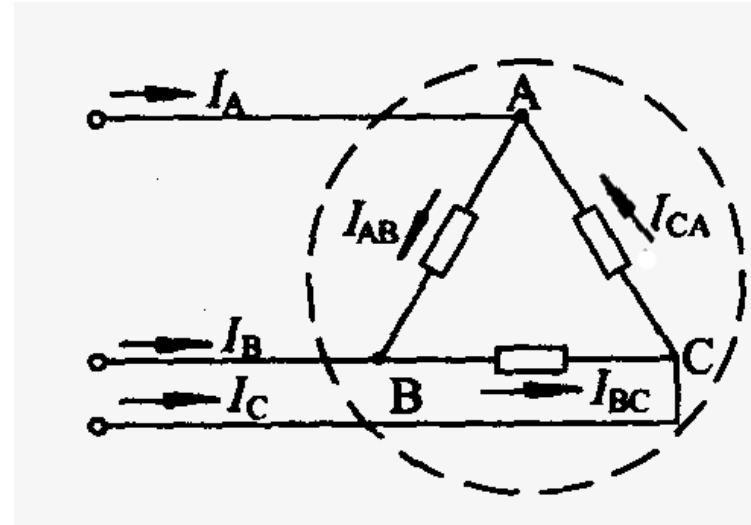
$$-I_A + I_{AB} - I_{CA} = 0$$

$$-I_B + I_{BC} - I_{AB} = 0$$

$$-I_C + I_{CA} - I_{BC} = 0$$

上列三式相加可得

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

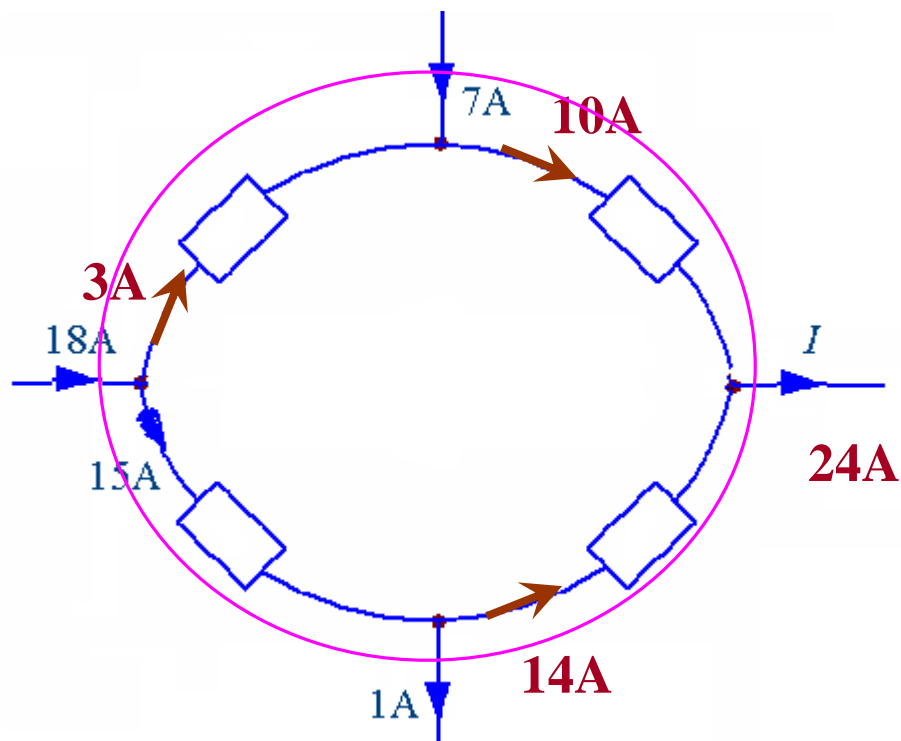


通过任一包含多个节点闭合面的电流的代数和也恒等于零。

基尔霍夫第一定律可以推广到任一包含多个节点的闭合面。

$$\oiint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

例2 求电流 I



$$-18 - 7 + 1 + I = 0$$

$$I = 24A$$

例3：如图所示，电动势 $\varepsilon_1=3.0\text{V}$ ， $\varepsilon_2=1.0\text{V}$ ，内阻 $r_1=0.5\Omega$ ， $r_2=1.0\Omega$ ，电阻 $R_1=10.0\Omega$ ， $R_2=5.0\Omega$ ， $R_3=4.5\Omega$ ， $R_4=19.0\Omega$ ，求电路中电流的分布。

解：标定各段支路的电流 I_1, I_2

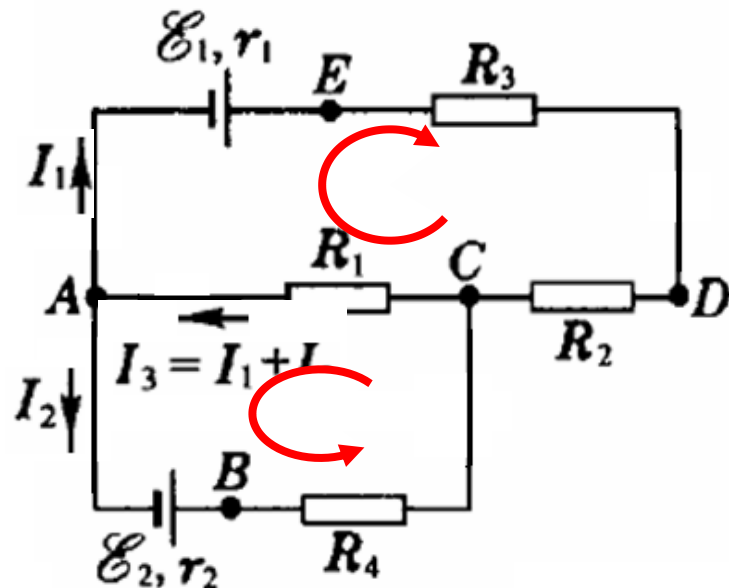
$$I_3 = I_1 + I_2$$

基尔霍夫第二方程组：

$$\text{回路ABCA} : -\varepsilon_2 + I_2 r_2 + I_2 R_4 + (I_1 + I_2) R_1 = 0$$

$$\text{回路AEDCA} : -\varepsilon_1 + I_1 r_1 + I_1 R_3 + I_1 R_2 + (I_1 + I_2) R_1 = 0$$

$$I_1 = 160\text{mA}; \quad I_2 = -20\text{mA}$$



例4：两个直流电源向负载供电，电源电动势 $\varepsilon_1=220\text{V}$ ， $\varepsilon_2=200\text{V}$ ， $R_1=R_2=10\Omega$ ， $R_L=45\Omega$ ，求各支路上的电流，忽略电源内阻。

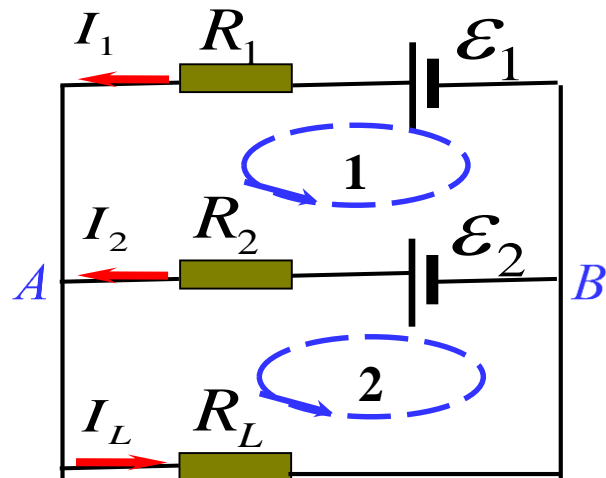
解：1) 先假设电流方向；
2) 由于只有A、B两个节点，故可取节点B列出节点电流方程

$$I_1 + I_2 - I_L = 0 \quad (1)$$

3) 选定回路1和2，标明绕行方向为逆时针。

$$1: \quad -\varepsilon_1 + I_1 R_1 - I_2 R_2 + \varepsilon_2 = 0 \quad (2)$$

$$2: \quad -\varepsilon_2 + I_2 R_2 + I_L R_L = 0 \quad (3)$$



4) 联立(1)、(2)、(3)式求解得:

$$I_1 = \frac{(R_2 + R_L)\varepsilon_1 - R_L\varepsilon_2}{R_1R_2 + R_1R_L + R_2R_L} \quad I_1 = 3.1\text{A}$$

$$I_2 = 1.1\text{A}$$

$$I_2 = \frac{(R_1 + R_L)\varepsilon_2 - R_L\varepsilon_1}{R_1R_2 + R_1R_L + R_2R_L} \quad I_L = 4.2\text{A}$$

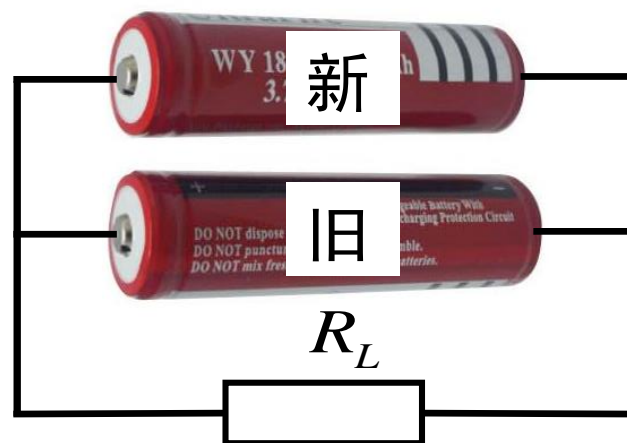
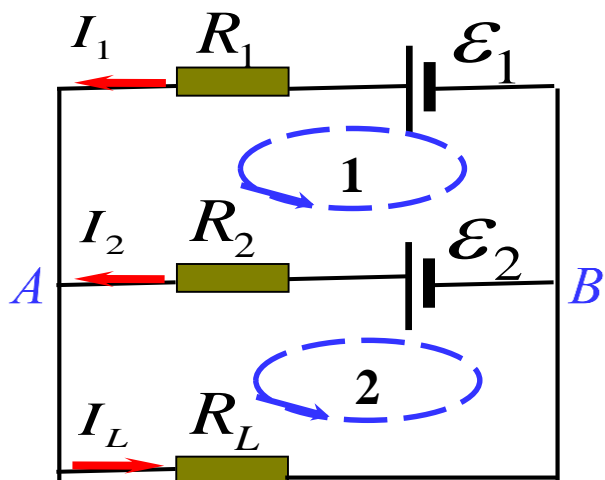
$$I_L = \frac{R_2\varepsilon_1 + R_1\varepsilon_2}{R_1R_2 + R_1R_L + R_2R_L}$$

I_1, I_2, I_L 均为正, 两电源并联给负载供电。

如 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, R_1, R_2$ 均不变, 仅负载电阻 $R_L=145\Omega$ 。

$$I_1 = 1.7\text{A}; \quad I_2 = -0.3\text{A}; \quad I_L = 1.4\text{A}$$

两个电动势不同的电源并联, 并不一定同时向负载供电。 $\varepsilon_1=\varepsilon_2$, 两电源同时对负载供电。

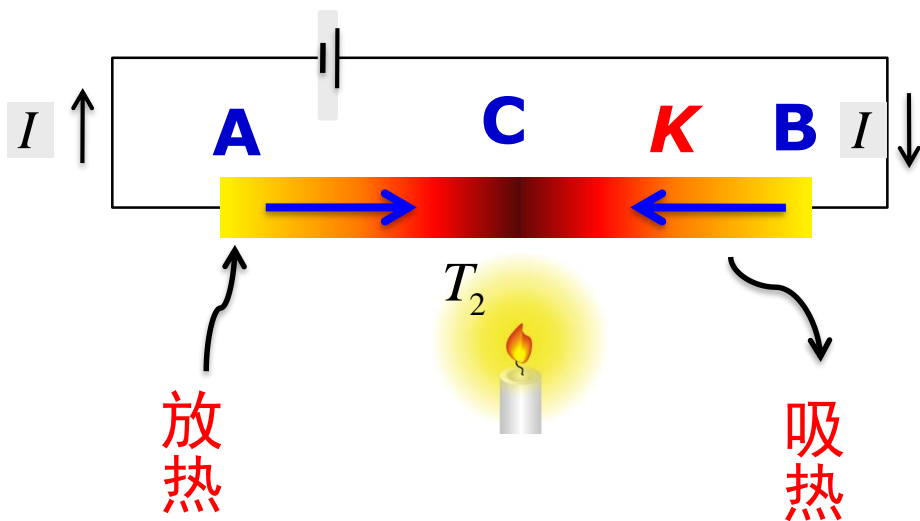


新旧电池混用时，旧电池可能不对外输出功率，
由于内阻存在，反而消耗功率。

温差电现象及应用

1. 汤姆孙效应
2. 佩尔捷效应
3. 温差电效应及其应用

汤姆孙效应



实验现象：

1. 中部C加热，并使C处温度比A，B处温度高。
2. 当棒中通电流时发现，BC段吸热；AC段放热。
3. 当电流反向时，BC段放热，AC段吸热。

4. 金属导体中除了产生与电阻有关的焦耳热外，还要吸收或释放一定的热量，这种效应称为汤姆孙热效应。

5. 来源于自由电子由于温度不均匀时产生的热扩散。

K：非静电力，来源于热扩散。

$K = \sigma(T) \frac{dT}{dl}$ 比例系数与金属材料及温度有关，称为材料的**汤姆逊系数**。

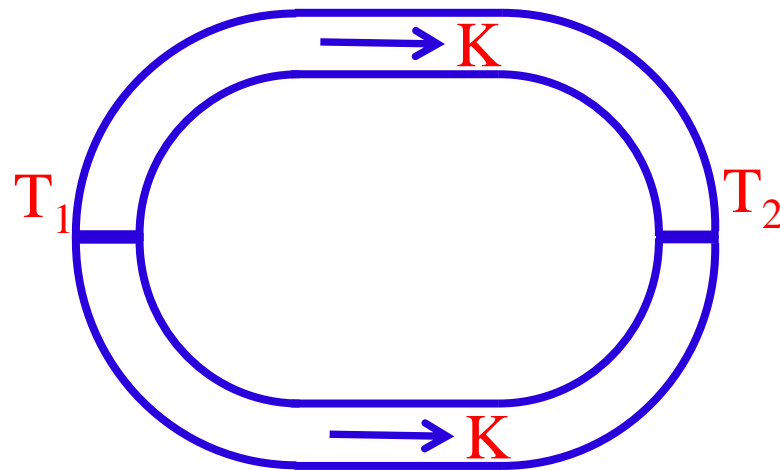
$$\varepsilon(T_1, T_2) = \int_0^l \vec{K} \cdot d\vec{l} = \int_0^l \sigma(T) \frac{dT}{dl} \cdot dl$$

$$\varepsilon(T_1, T_2) = \int_{T_1}^{T_2} \sigma(T) dT$$

汤姆逊电动势很小，室温下，铋的汤姆逊系数的数量级为 10^{-5} V/K。

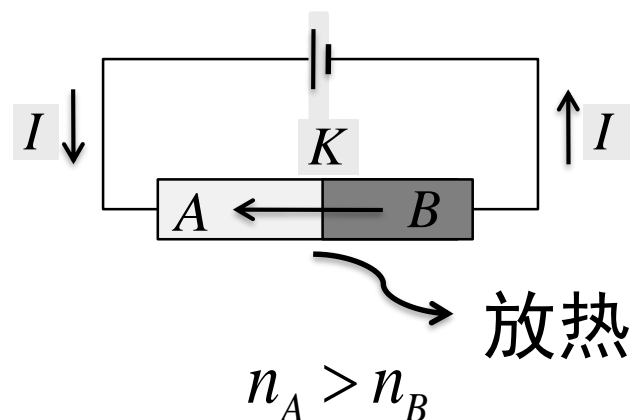
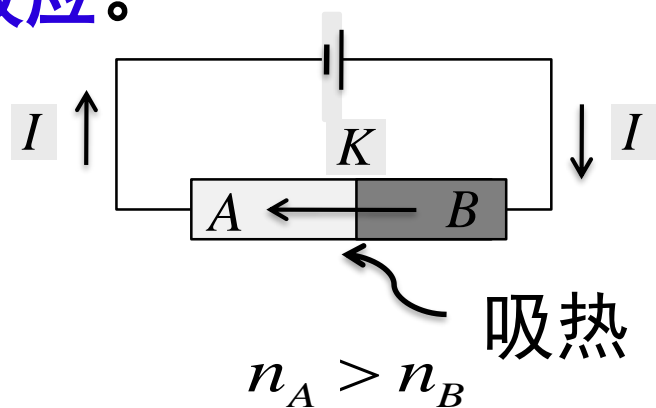
用**同一种金属**，只依靠汤姆孙效应，**不能**在闭合回路中产生恒定电流。

不同金属，汤姆孙电动势不相等，闭合回路中**可以**产生恒定电流。



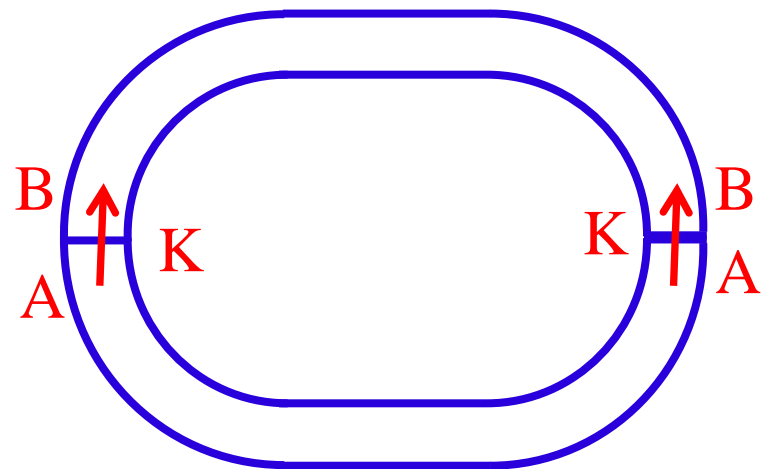
佩尔捷效应

当电流通过两种不同金属A(Bi)和B(Sb)间的接触面时，也会有吸热或放热的现象，这种效应称为**佩尔捷效应**。



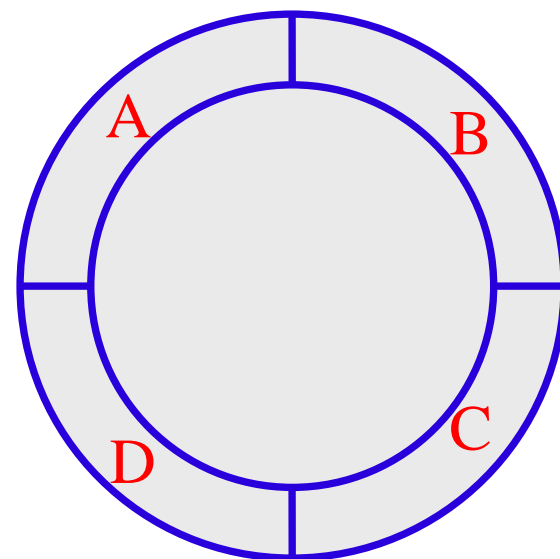
该效应来源于不同金属内部自由电子的数密度不同(化学势梯度)导致的扩散，对应的电动势数值很小。

单一温度下，两种金属组成的闭合回路，接触处的两个佩尔捷电动势大小相等，方向相反。



单一温度下只依靠佩尔捷电动势也不能在闭合回路中产生恒定电流。

多种金属连成的闭合回路，当接触点的温度相同时，总的佩尔捷电动势也等于0.



温差电现象

将两种不同的金属相连接，并在两接头处保持不同的温度，电路中将存在温度梯度和电子数密度梯度（化学势梯度）。

汤姆孙电动势：

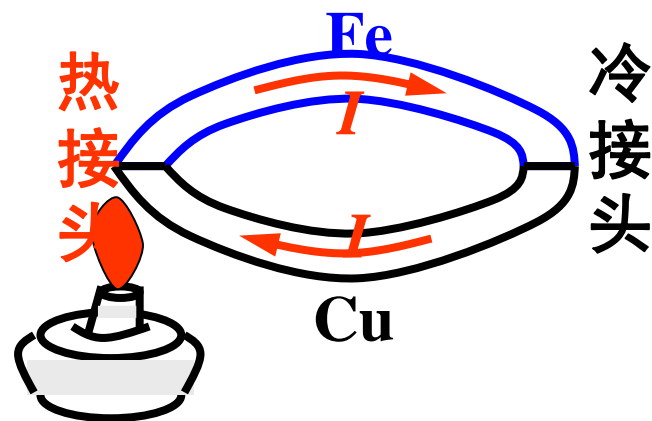
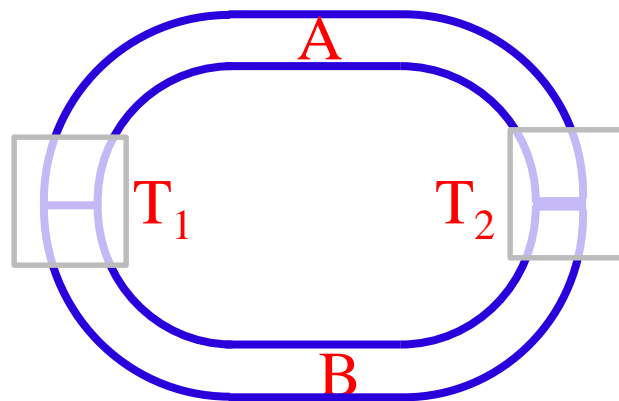
$$\varepsilon_A(T_1, T_2) + \varepsilon_B(T_2, T_1) = \int_{T_1}^{T_2} \sigma_A dT + \int_{T_2}^{T_1} \sigma_B dT$$

佩尔捷电动势： $\varepsilon_{AB}(T_2) + \varepsilon_{BA}(T_1)$

两者相加不等于0整个闭合回路的电动势-**塞贝克电动势**，或温差电动势：

$$\mathcal{E} = \varepsilon_{AB}(T_2) + \varepsilon_{BA}(T_1) + \int_{T_1}^{T_2} \sigma_A dT + \int_{T_2}^{T_1} \sigma_B dT \neq 0$$

低温触点放热，高温触点吸热，在闭合回路中形成温差电流。



温差电现象主要应用在:

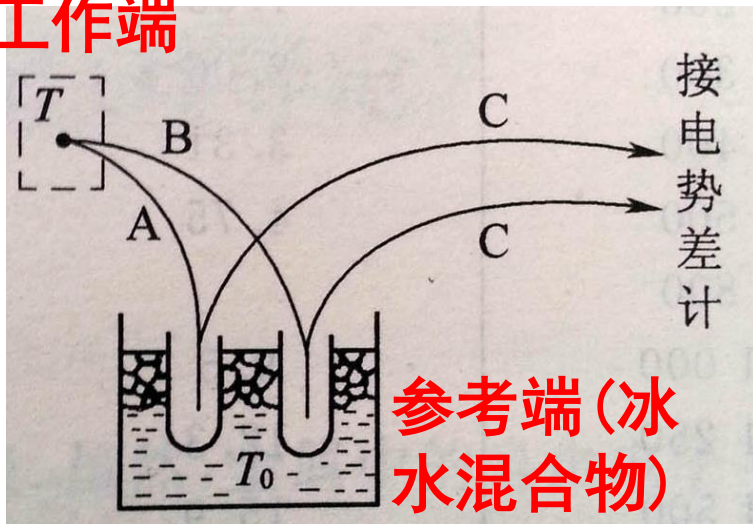
1.温度测量

2.温差发电

3.温差电制冷

温差电偶温度计：两种不同的金属丝焊接在一起形成工作端，另两端与测量仪表连接，形成电路。把工作端放在被测温度处，工作端与参考端温度不同时，就会出现电动势，因而有电流通过回路。通过测量电势差，利用已知处的温度，就可以测定另一处的温度。

工作端



一般 $\varepsilon \sim \text{mV}/100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Bi – Sb $\varepsilon \sim 10^{-2}\text{V}/100\text{ }^{\circ}\text{C}$
(铋) (锑)

温差电偶温度计

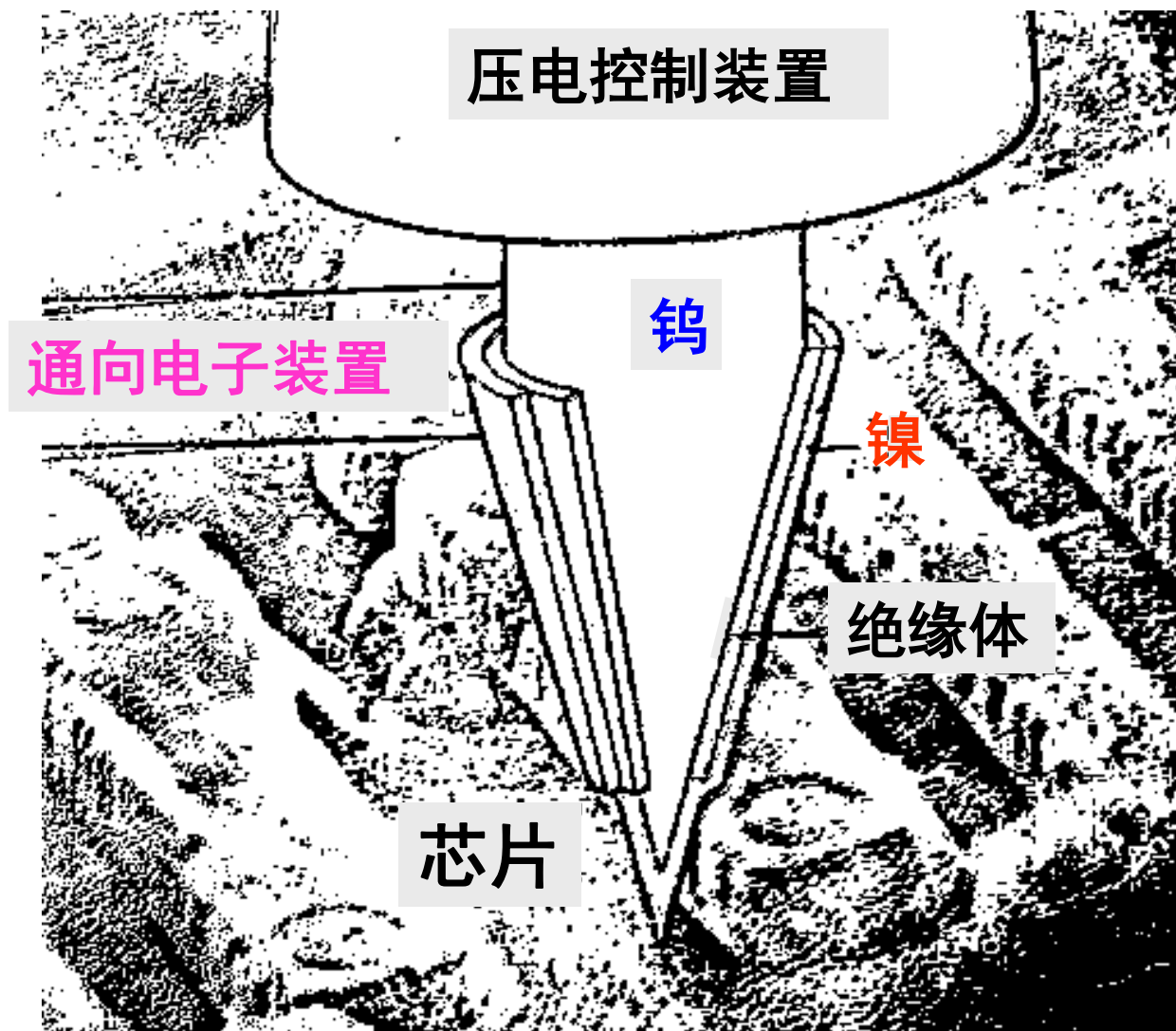
温差电偶测量温度的优点：

- **测量范围广**：从4.2K(-268.95°C)的深低温直至 2800°C 的高温。
- **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。
- **受热面积和热容量可做得很小**，如研究金相变化、小生物体温变化，水银温度计则难于可比。
- **构造简单，使用方便**
- 由于热电偶测温是**将温度测量转换为电学量**的测量，因而非常适用于自动调温和控温系统。

常见的热电偶材料及性能

名称	型号（代号）	分度号	测温范围（℃）	允许偏差（℃）
镍铬-镍硅	WRN	K	0—1200	± 2.5 或 $0.75\% t $
镍铬-铜镍	WRE	E	0—900	± 2.5 或 $0.75\% t $
铂铑 10-铂	WRP	S	0—1600	± 1.5 或 $0.25\% t $
铂铑 30-铂铑 6	WRR	B	600—1700	± 1.5 或 $0.25\% t $
铜-铜镍	WRC	T	-40—350	± 1.0 或 $0.75\% t $
铁-铜镍	WRF	J	-40—750	± 2.5 或 $0.75\% t $

温差电现象的现代应用实例：



钨和镍
在探针尖
处相接，
形成热电
偶的测温
端。

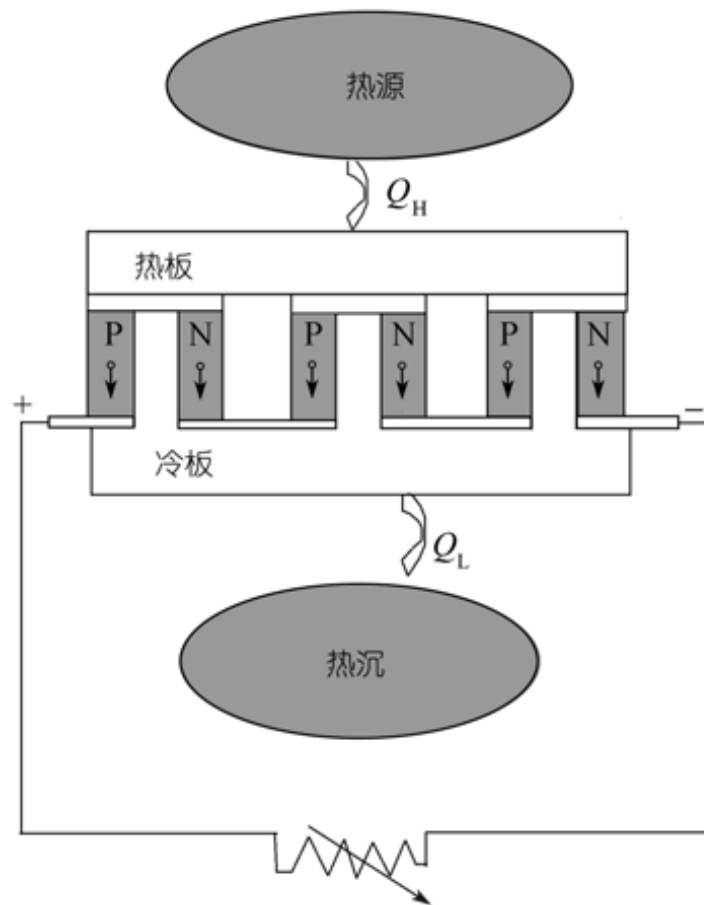
扫描热显微镜

扫描热显微镜简介

- ▲ **性能：**热探针针尖直径只有约30nm，可在数十纳米尺度上，测出万分之一度的温度变化。
- ▲ **工作原理：**通电流使探针加热并接近试样表面。
针尖和被测表面距离↓ → 针尖散热↑ → 温度↓；
针尖和被测表面距离↑ → 针尖散热↓ → 温度↑。
由此可反映出探针尖与试样表面间隙的大小。
当探针在试样表面上扫描时，就能测出试样表面的起伏状况。

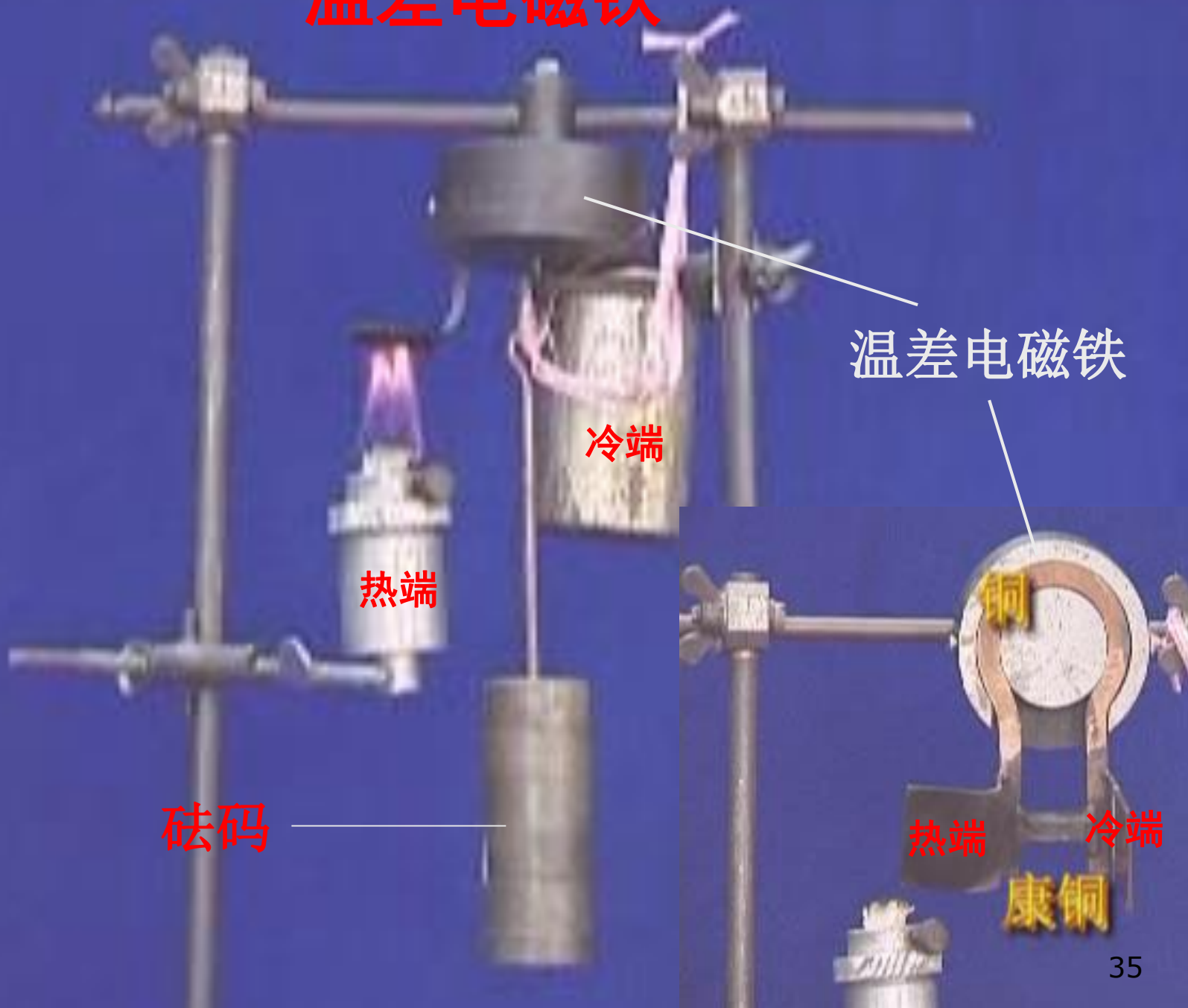
2. 温差发电

- 原理：将两种不同类型的热电转换材料N和P的一端结合并将其置于高温状态，另一端开路并给以低温。由于高温端的热激发作用较强，此端的空穴和电子浓度比低温端高，在这种载流子浓度梯度的驱动下，空穴和电子向低温端扩散，从而在低温开路端形成电势差。将许多对P型和N型热电转换材料连接起来组成模块，就可得到足够高的电压，形成一个温差发电机。

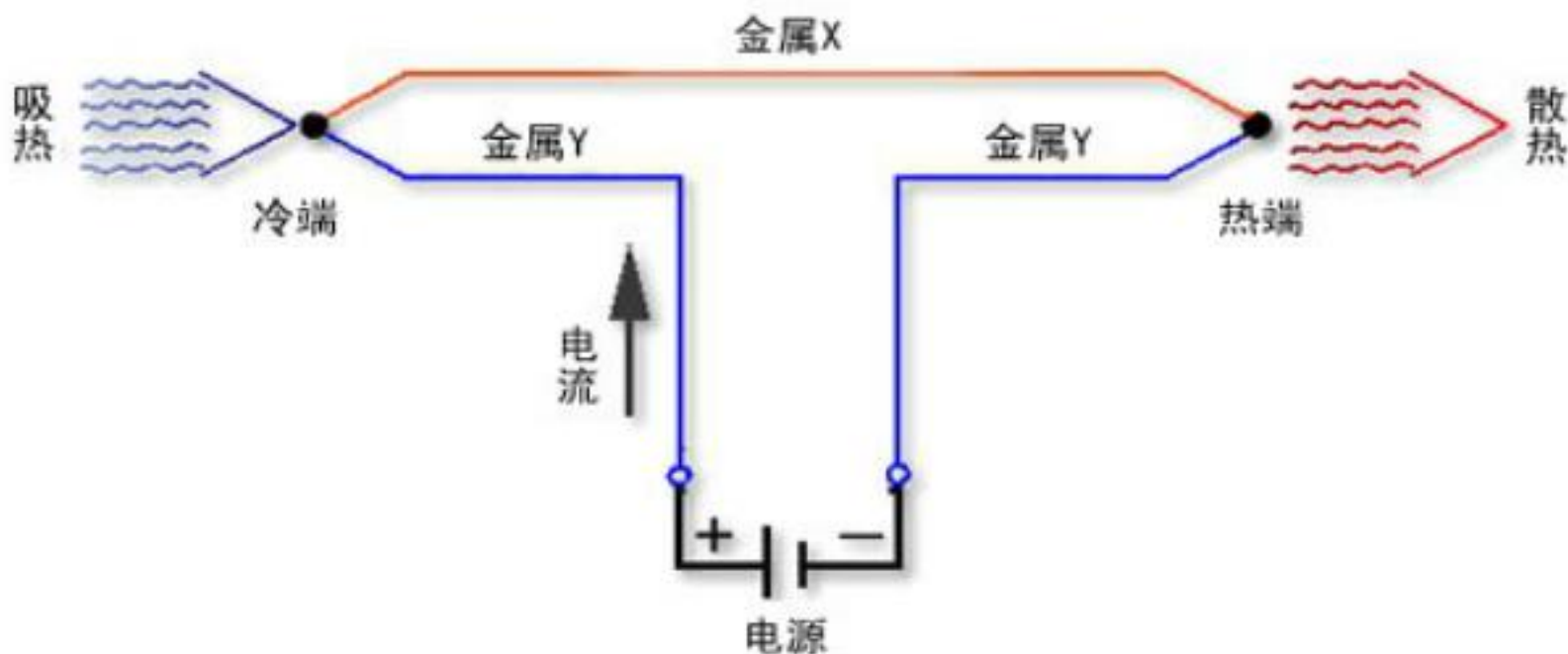


特点：设备结构紧凑、性能可靠、运行时无噪声、无磨损、无泄漏、移动灵活等优点，有微小温差存在的条件下即可产生电势，在军事、航天、医学、微电子领域具有重要的作用³⁴

温差电磁铁



3. 温差电致冷



温差电致冷是用电能来传递热量。由于温差电致冷所用的材料一般为半导体材料，因而温差电致冷常被称做半导体致冷或电子致冷。温差电致冷产品的核心为温差电致冷组件。致冷组件的外表面一般为绝缘且导热良好的氧化铝陶瓷。

电子发射与气体导电（自学）