

高中电学原理

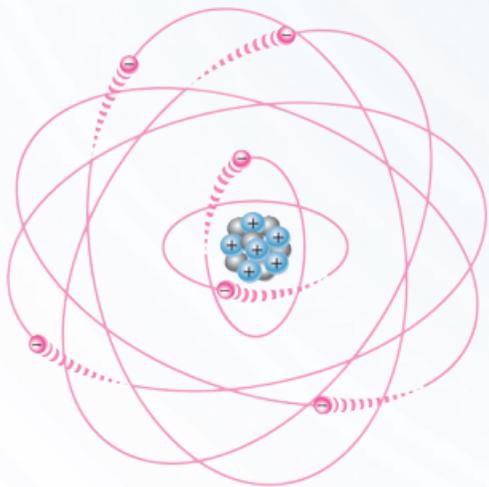
(一): 电的基本概念

主讲：骆家豪

电的特性

- 一种能量，在自然界所存在的现象。
- 电是由带电粒子产生，可从原子发现。

- 原子构造：



⊖ 电子

✓ 带负电
(带电量 = -1.602×10^{-19} 库伦)

✓ 质量 = 1.673×10^{-27} 公斤

● 中子

✓ 不带电

✓ 质量 = 1.675×10^{-27} 公斤

⊕ 质子

✓ 带正电
(带电量 = 1.602×10^{-19} 库伦)

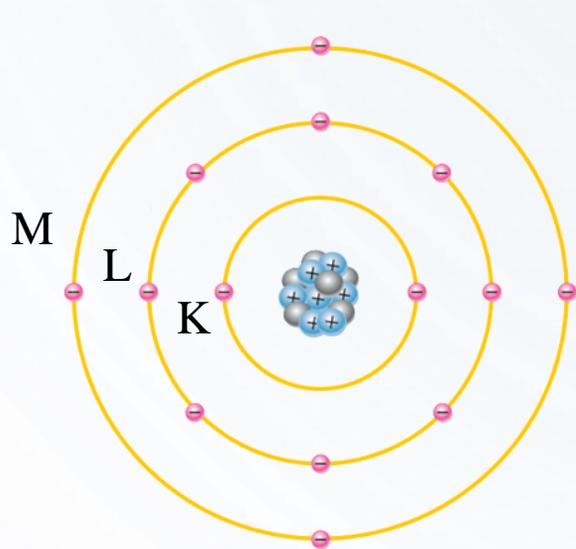
✓ 质量 = 1.673×10^{-27} 公斤

➤ 原子净电量 = 0

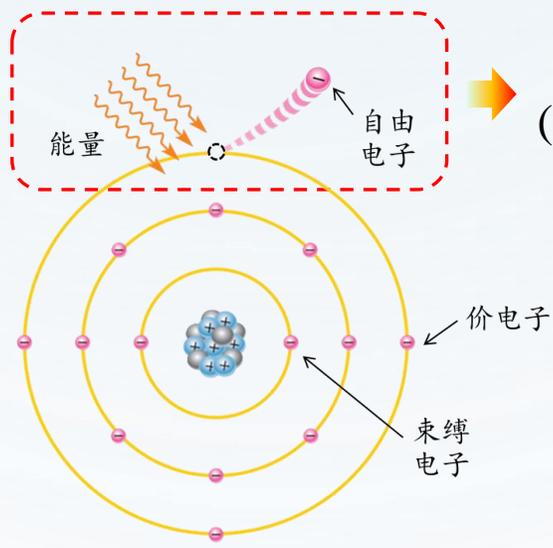
➤ 质子和中子组成原子核。

➤ 电子质量 \gg 质子质量，因此可忽略不计。

- 电子离原子核越近，其能量越低。
- 由于电子在原子内的能量是一定的，因此电子环绕原子核时，两者的距离是一定的。
- 每个特定的距离 (轨道) 对应一定的能量级，被称为主层 (shell)，以 K, L, M, N ... 命名。
- 首四个主层分别拥有的最多电子数量为 $2n^2$ ($n =$ 主层数)。

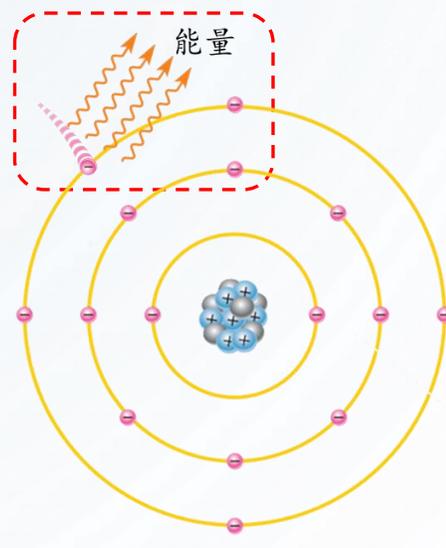


硅原子的简略构造



形成正离子 (positive ion)

游离现象
(ionization)



形成负离子 (negative ion)

- 根据物质内原子的特性，可分成三种：

- 导体 (conductor)

由于原子的价电子受到原子核的束缚较弱，较容易受到能量的影响脱离轨道而形成自由电子，由此较容易产生电流。

例：铁、铜、铝

- 绝缘体 (insulator)

由于原子的价电子受到原子核的束缚较强，较难受到能量的影响脱离轨道而形成自由电子，由此较难产生电流。

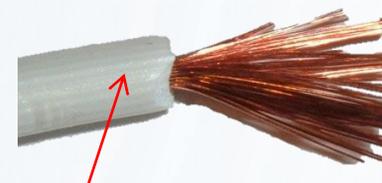
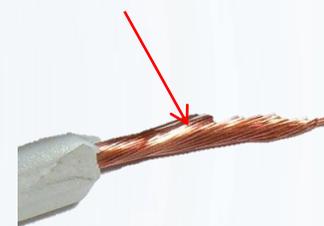
例：塑料、橡胶、玻璃

- 半导体 (semiconductor)

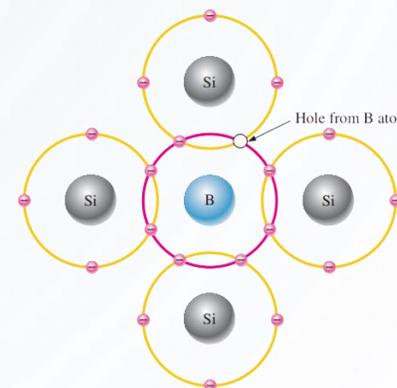
其导电性质在导体与绝缘体之间，拥有单向导电的性质。加入适当杂质可增强其导电性。

例：硅、锗、硼

可导铜丝线



绝缘塑料层



硼 (B) 掺入硅 (Si)

电的单位

- 电学里通常使用的单位是根据国际单位系统 (System of International Unit, SI 制)。

电学里常使用的单位:

物理量	*符号	单位名称	单位
电荷量 / 电量 (charge quantity)	Q 或 q	库伦 (Coulomb)	C
电流 (electric current)	I 或 i	安培 (Ampere)	A
电压 (voltage)	V 或 v	伏特 (Volt)	V
电阻 (resistance)	R 或 r	欧姆 (Ohm)	Ω
电感 (inductance)	L	亨利 (Henry)	H
电容 (capacitance)	C	法拉 (Farad)	F
电能 (electric energy)	W	焦耳 (Joule)	J
电功率 (electric power)	P 或 p	瓦特 (Watt)	W

常用的因次及对应的词头 (prefix):

因次	词头	华文	英文
10^{12}	T	兆	tera
10^9	G	十亿	giga
10^6	M	百万	mega
10^3	k	千	kilo
10^{-3}	m	毫	milli
10^{-6}	μ	微	micro
10^{-9}	n	毫微 / 奈	nano
10^{-12}	p	微微 / 披	pico

*通常使用小字与大字分别代表物理量的瞬时值及平均值。

例： $5.3 \text{ k}\Omega = ? \Omega$

解： $5.3 \text{ k}\Omega = 5.3 \times 10^3 \Omega = 5300 \Omega$

例： $295 \text{ mA} = ? \text{ A}$

解： $295 \text{ mA} = 295 \times 10^{-3} \text{ A} = 0.295 \text{ A}$

例： $4.8 \times 10^{-4} \text{ F} = ? \mu\text{F}$

解： $4.8 \times 10^{-4} \text{ F} = 4.8 \times 10^{-4} \text{ F} \left(\frac{1 \mu\text{F}}{10^{-6} \text{ F}} \right) = 4.8 \times 10^2 \mu\text{F} = 480 \mu\text{F}$

例： $7169000 \text{ V} = ? \text{ MV}$

解： $7169000 \text{ V} = 7169000 \text{ V} \left(\frac{1 \text{ MV}}{10^6 \text{ V}} \right) = 7.169 \text{ MV}$

1. $12.7 \text{ M}\Omega = \underline{\hspace{2cm}} \Omega = \underline{\hspace{2cm}} \text{ k}\Omega$

2. $0.038 \text{ A} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mA} = \underline{\hspace{2cm}} \mu\text{A}$

3. $53 \mu\text{C} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ C} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ nC}$

4. $346000 \text{ V} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kV} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ MV}$

功与能

- 能量 (energy) 是做功 (work) 的能力。
- 能量与功的单位皆为焦耳 (Joule, J)。
- 在自然界中存在许多种类的能量，例：电能、热能、动能、位能
- 能量守恒定律 (law of conservation of energy):
能量不能凭空产生又不能被摧毁，它只能从一个形态转换成另一个或以上的形态。

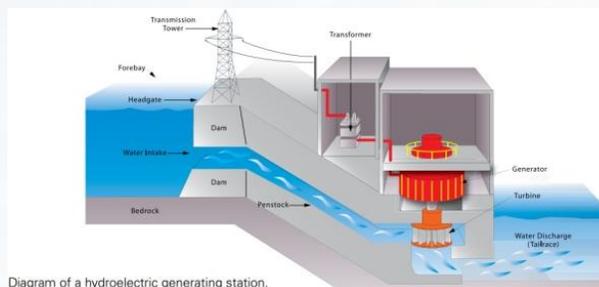
例：



弹性位能 → 动能



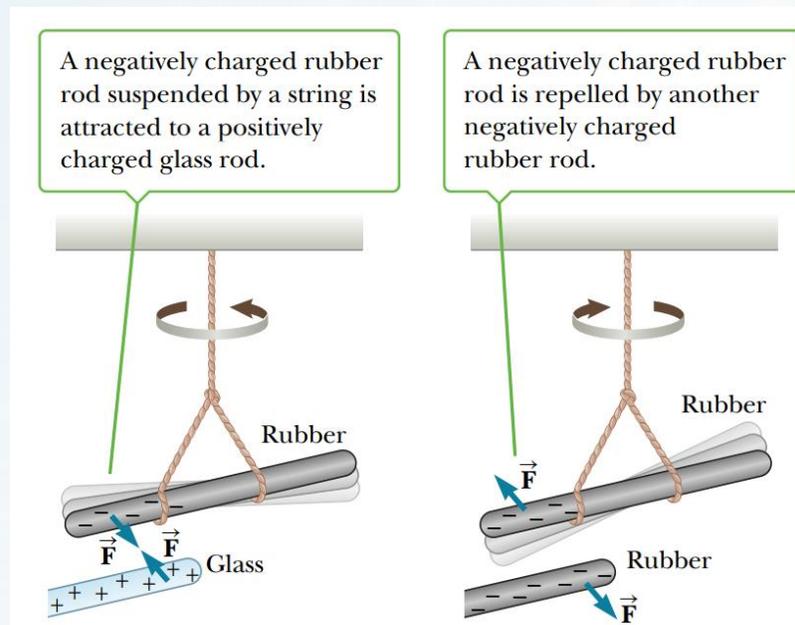
重力位能 → 动能



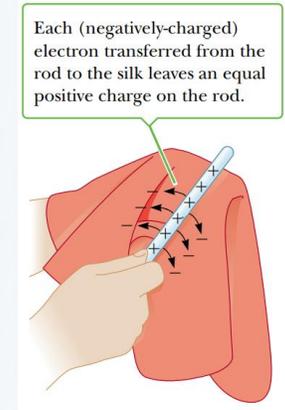
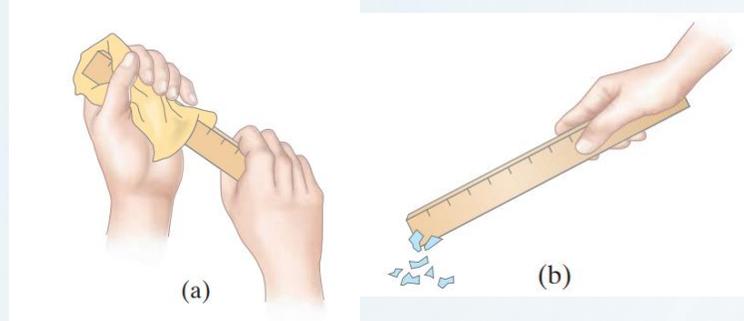
重力位能 → 动能 → 电能

电荷 (electric charge)

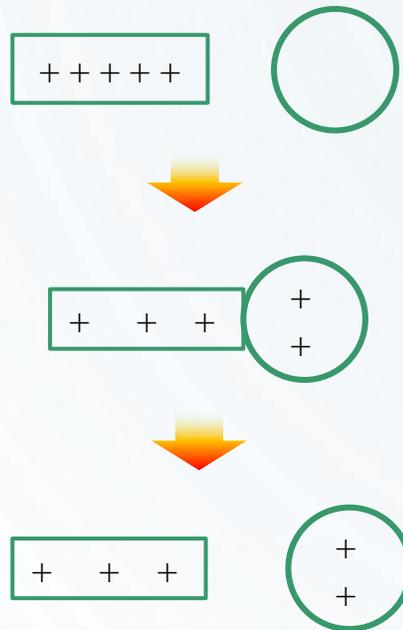
- 可分成正电荷 (positive charge) 和负电荷 (negative charge)。
- 同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。
- 电荷的量 – 电量 (quantity of charge)
(单位: C, 库伦 (Coulomb))
- 基本电荷 (fundamental charge): 带有基本电荷量 (最低电量) 的电荷 (质子或电子)
- 基本电量 = $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$



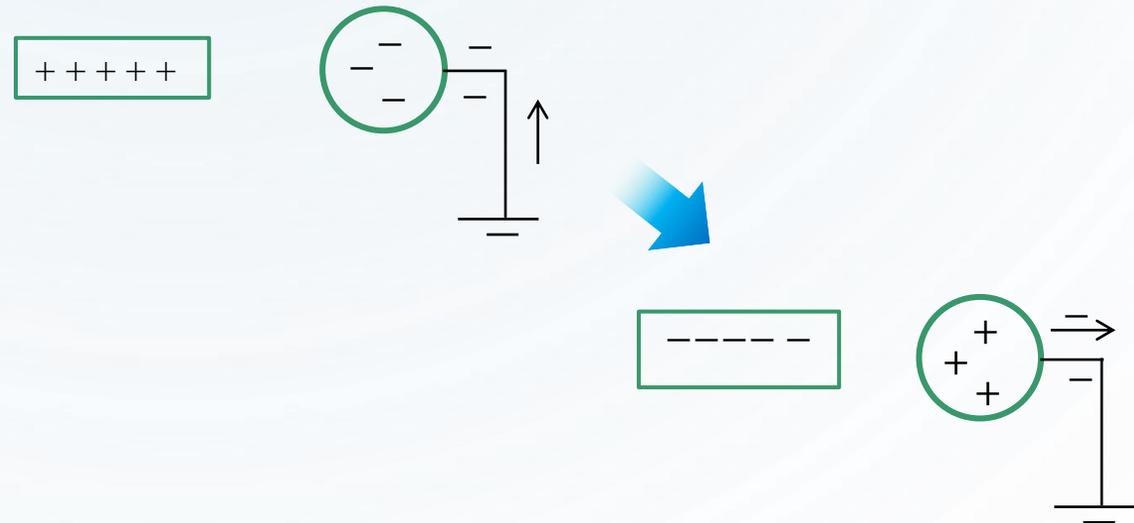
摩擦起电 (Electrification by Friction)



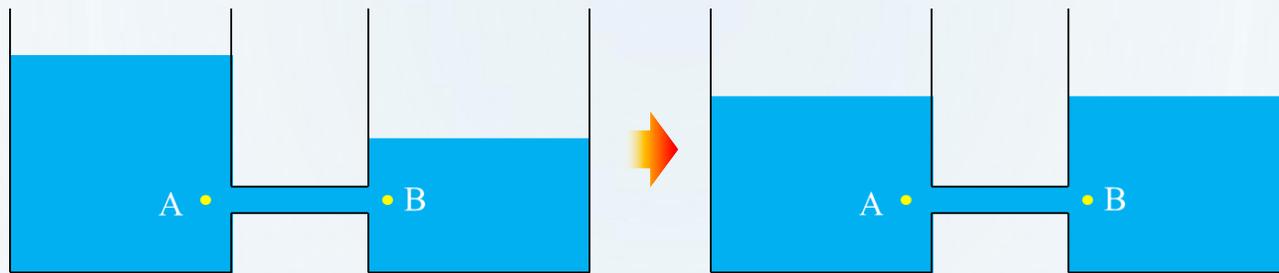
接触起电 (Electrification by Conduction)



静电感应 (Electrostatic Induction)



电压



左方的水位 > 右方的水位



A 点的压强 > B 点的压强



水会从左方 (A 点) 流至右方 (B 点)



两方水位相同，两点的压强相同



水停止从左流至右并保持静止

电流是如何产生的？

与此现象相似，只需将此现象的物理量
转换成电学使用的物理量：

水位 / 压强 = 电位 (electric potential)

水 = 电荷

水位差 / 压强差 = 电压 (voltage)

电位 (V) 的定义:

单位电荷所拥有的电位能 (electric potential energy)

$$V = \frac{W}{Q}$$

W : 电荷拥有的电位能
 Q : 电荷量

单位: 伏特 (V, Volt)

电位差 (electric potential difference) 的定义:

外力 (不是电场力) 移动单位电荷从某个点 (B 点) 至另一个点 (A 点) 需做的功。

$$\text{B 移至 A 时, 两点的电位差: } V_{AB} = V_A - V_B = \frac{W_A - W_B}{Q}$$

$$\text{A 移至 B 时, 两点的电位差: } V_{BA} = V_B - V_A = -(V_A - V_B) = -V_{AB}$$

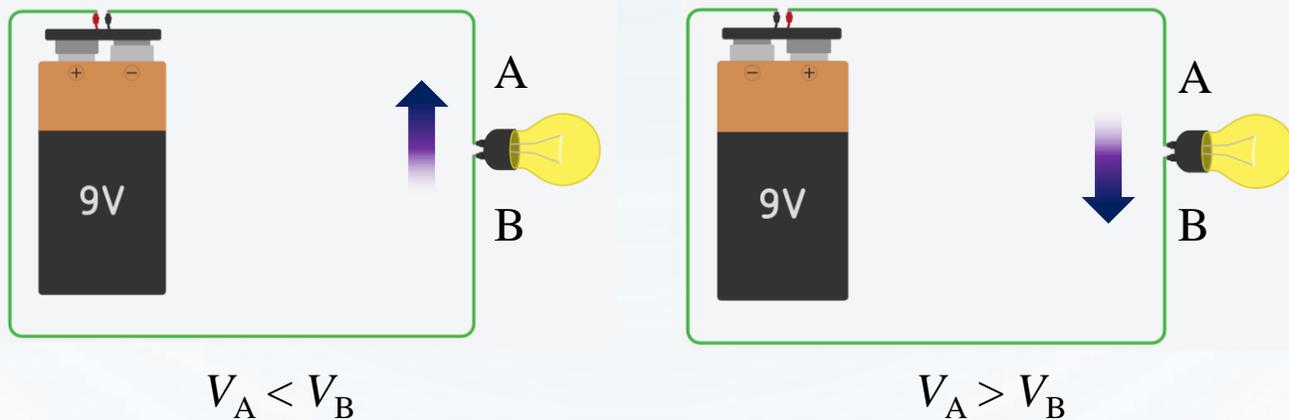
当电池与灯泡连接后，电场力会推动电线内的自由电荷。

这时，带有电量为 Q 的电荷所拥有的电位能转换成动能，并在电线内运动。

由于此转换造成电荷的电位能降低，当电荷自己从 P 点移至 Q 点时，

$$W_P - W_Q > 0; \rightarrow Q(V_P - V_Q) > 0 \rightarrow V_P > V_Q$$

因此，电流 / 正电荷会从高电位流至低电位的位置。

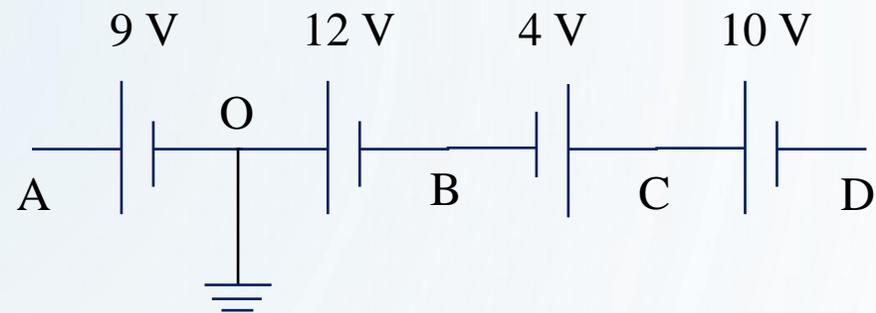


电流方向 

例：4组干电池串联成如右图所示的电路，并在O点接地。

(i) 求每个点(A、B、C和D)的电位。

(ii) 因此，求电流经过这4组电池时流动的方向。



解：

$$(a) V_A - V_O = 9 \text{ V}$$

$$V_O - V_B = 12 \text{ V}$$

$$V_A - 0 = 9$$

$$0 - V_B = 12$$

$$V_A = 9 \text{ V}$$

$$V_B = -12 \text{ V}$$

$$V_B - V_C = -4 \text{ V}$$

$$V_C - V_D = 10 \text{ V}$$

$$-12 - V_C = -4 \text{ V}$$

$$-8 - V_D = 10 \text{ V}$$

$$V_C = -8 \text{ V}$$

$$V_D = -18 \text{ V}$$

$$(b) V_A - V_D = 9 - (-18) = 27 \text{ V} > 0$$

由于 $V_A - V_D > 0$;

$V_A > V_D$, 电流会从左流至右。

电动势 (electromotive force) (ε)

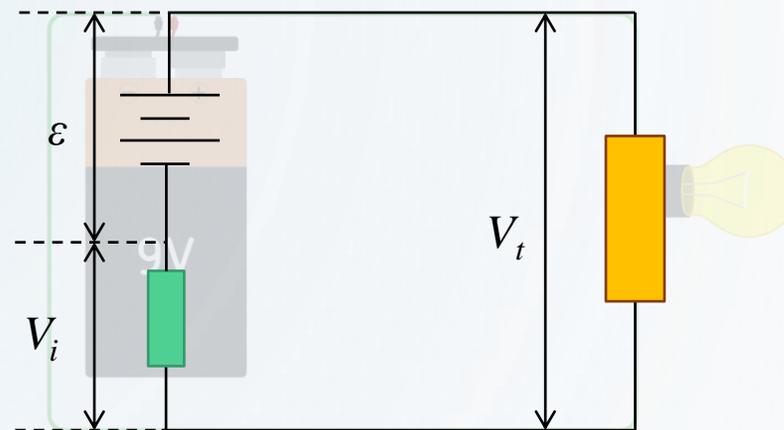
电源所提供的电压。电路内的电荷从中获取能量，并在通过电路中的各个元件时消耗能量。

电压降 (voltage drop)

电荷经过电路元件时需要能量来克服此元件对电荷的阻力，因此经过元件后电位下降。此电路元件两端之间的电位差为电压降。

路端电压 (terminal voltage) (V)

外部电阻元件 (负载 (load)) 两端之间的电位差。



设 V_i 为内部电路元件 (电源内) 的电压降，则

$$\varepsilon - V_i = V_t$$

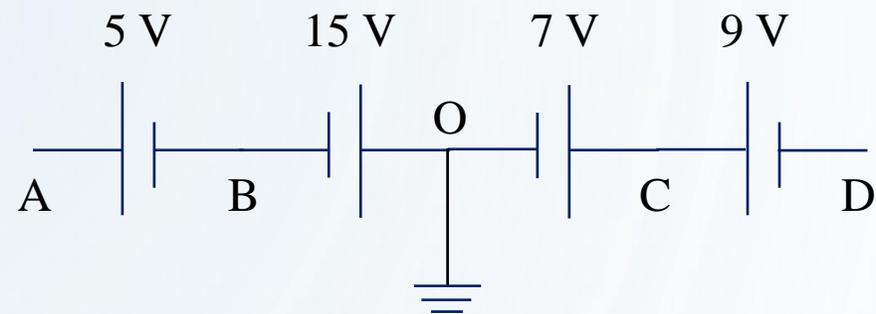
思考题：

为什么是负号而不是正号？

1. 4 组干电池串联成如右图所示的电路，并在 O 点接地。

(i) 求每个点 (A、B、C 和 D) 的电位。

(ii) 因此，求电流经过这 4 组电池时流动的方向。

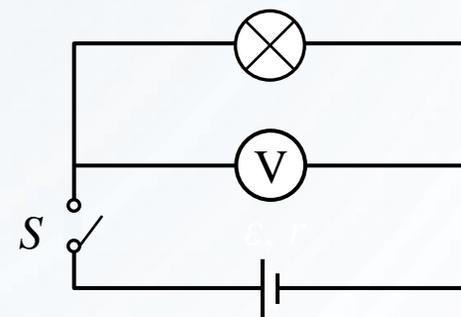


2. 某学生制作了如右图所示的电路。当开关 S 关闭前，伏特计的读数为 12 V。 S 关闭后，伏特计的读数为 11.5 V。求

(i) 电池的电动势；

(ii) 电路的路端电压；

(iii) 电池内部的电压降。



电流

- 电流 (electric current) (I) : 单位时间内通过某一横截面的电量。

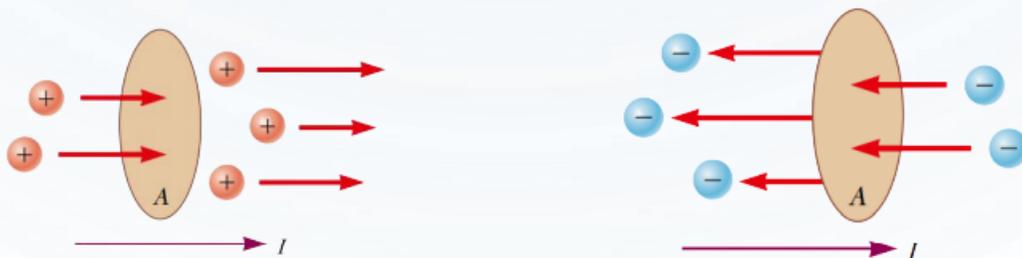
单位: 安培 (A, Ampere)

$$I = \frac{Q}{t} \quad Q: \text{在时间段 } t \text{ 内经过某一横截面的总电量}$$

- 若在时间段 t 内有 N 个自由电子经过某一横截面, 所产生的电量为

$$I = \frac{Ne}{t} \quad e: \text{电子的电量 } (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})$$

- 电流的方向 = 正电荷的定向移动方向 (与负电荷定向移动的方向相反)



自由电子定向移动的速率

设横截面积为 A 的导体，其每单位体积的自由电荷数量为 n ，则体积为 $A\Delta x$ 的电荷带有的电量 Q 为

$$Q = n(A\Delta x)q$$

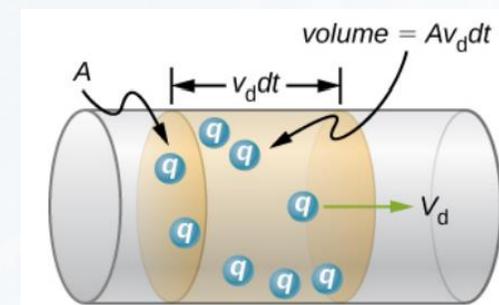
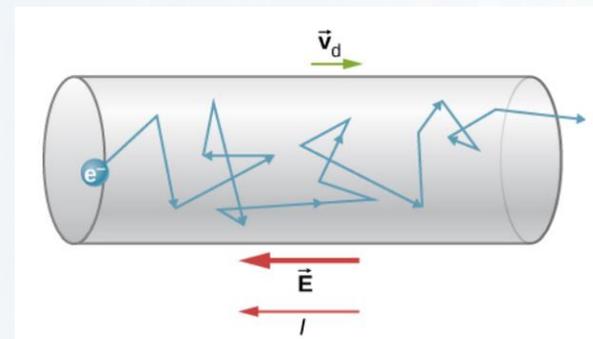
q 为一颗自由电荷持有的电量。

设自由电子定向移动的速率 / 漂移速度 (drift speed) 为 v_d ，则 $\Delta x = v_d t$

因此，

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{n(A\Delta x)q}{t} = \frac{nA(v_d t)q}{t} = nqAv_d$$

漂移速度 \ll 传递电能的速度 (光速 = 3×10^8 m/s)



例：某个电线内的材料，每米立方有 8×10^{28} 个自由电子。若在 3.2 ns 内有 20 千万个自由电子经过面积为 $9 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 的横截面，求

- (a) 所产生的电流； (b) 电子的漂移速度。

解：

(a)
$$I = \frac{Ne}{t} = \frac{20 \times 10^7 \times 1.6 \times 10^{-19}}{3.2 \times 10^{-9}} = 0.01 \text{ A}$$

(b)
$$I = nqAv$$
$$0.01 = 8 \times 10^{28} (1.6 \times 10^{-19})(9 \times 10^{-6})v$$
$$v = 8.6 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

某个电线内的材料，每米立方有 1.7×10^{29} 个自由电子。若电线横截面积为 $9 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ，电线内的电流为 3 A ，求

- (a) 每秒经过某个横截面的自由电子数量；
(b) 电子的漂移速度。

电功率

- 功率 (power) (P): 单位时间内所做的功。

单位: 瓦特 (W, Watt)

$$P = \frac{W}{t} \quad W: \text{在时间段 } t \text{ 内所做的功}$$

- 电能 (electrical energy): 电所做的功 = 电场力对电荷所做的功 = 电位能变化

- 设一段电路两端的电压为 V , 通过的电流为 I 。

在时间 t 内通过这段电路任一横截面的电荷量为 $q = It$

电场力对电量 q 所作的功 W 为

$$W = QV = (It)V = VIt$$

- 因此，在这段时间内电场力所做的功率，亦称为电功率 (electric power) P_E 为

$$P_E = \frac{VI t}{t} = VI$$

- 在电气工程，通常功率 (在 SI 公制单位) 的大小为 kW (1 kW = 1000 W)。

- 在日常生活中，测量电能的单位为 kWh (千瓦小时)。

$$1 \text{ kWh} = (1000 \text{ W})(3600 \text{ s}) = (1000 \text{ J/s})(3600 \text{ s}) = 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 1 \text{ 度电}$$

- 功率的英制单位为马力 (horsepower, hp)。

$$1 \text{ hp} = 745.7 \text{ W} \approx 0.746 \text{ kW}$$



例：一位大学生租借一间宿舍，每个月他使用的电器所对应的平均电压和电流如下表所示。
设每度电的消耗造成的电费为 RM 0.22，求这位大学生每个月 (30 天) 需缴付的电费。

解：平均每个月所消耗的电功率

$$\begin{aligned} &= V_1 I_1 + V_2 I_2 + V_3 I_3 \\ &= 50(250 \times 10^{-3}) + 220(200 \times 10^{-3}) + 5(1000 \times 10^{-3}) \\ &= 61.5 \text{ W} \end{aligned}$$

电器	电压 (V)	电流 (mA)
天花板灯	50	250
电风扇	220	200
充电器	5	1000

$$\begin{aligned} \text{每个月所消耗的电能} &= 61.5 \text{ J/s} (30 \text{ 天})(24 \text{ 小时 / 天})(3600 \text{ s/小时}) = 1.594 \times 10^8 \text{ J} \\ &= 1.594 \times 10^8 \text{ J} (1 \text{ 度电} / 3.6 \times 10^6 \text{ J}) = 44.28 \text{ 度电} \end{aligned}$$

$$\text{每个月的电费} = (\text{RM } 0.22 / 1 \text{ 度电}) (44.28 \text{ 度电}) = \text{RM } 9.74$$

损失与效率

- 在现实中，能量无法百分之百地从一个形态转换成另一个在某个应用中所需要的形态。
例：电源提供电能（初形态）给电动机，由于磁场能与热损失，这个电能无法百分之百的转换成动能（最后所需要的形态）。



- 根据能量守恒定律，若提供的能量为 E_{in} ，最后能量转换得到的有效能量为 E_{out} ，则在此转换的能量损失 E_{loss} 为 $E_{loss} = E_{in} - E_{out}$
- 因此，就功率而言，若提供的功率为 P_{in} ，最后能量转换得到的有效功率为 P_{out} ，则在此转换的功率损失 P_{loss} 为 $P_{loss} = P_{in} - P_{out}$

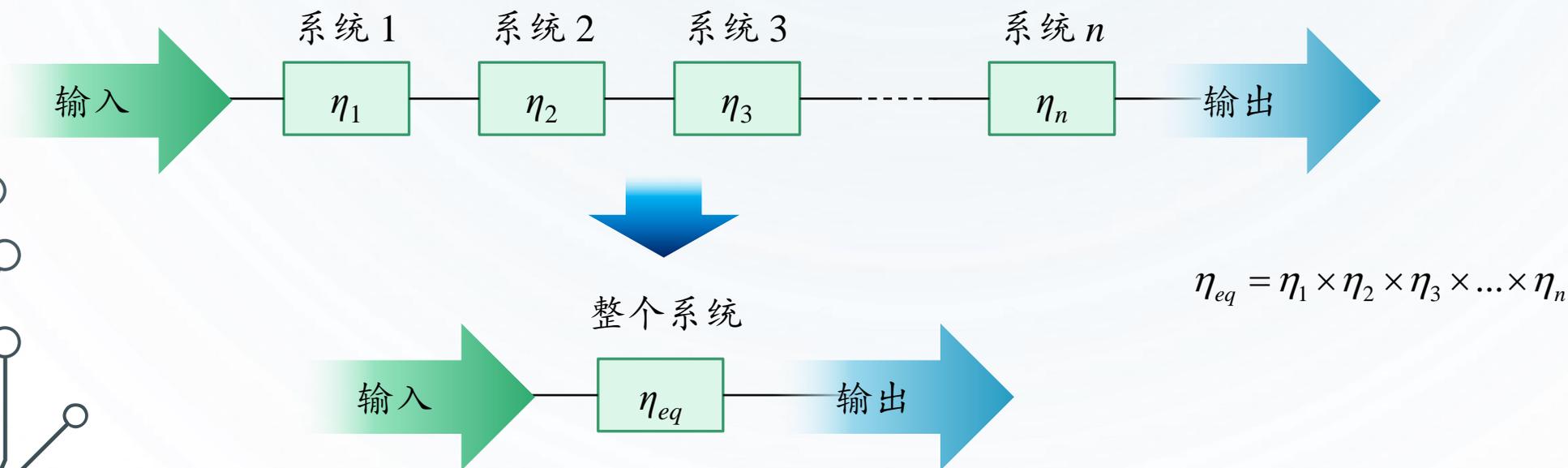
- 若损失越小，从能量转换最后所得到有用能量越多，说明了这个转换会比较有效。

- 效率 (efficiency) 是用来表达这个能量转换的有效程度。

因此，若能量转换过程的效率为 η ，则

$$\eta = \frac{W_{\text{out}}}{W_{\text{in}}} \times 100\% \quad \text{或} \quad \eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\%$$

- 若一个系统是由数个系统串联而成，整个系统的效率为各个系统效率的乘积。



例：一 1.5 kW 的感应电动机与 120 V, 10 A 的电源连接。若在此时的功率为最大值，求此电动机的效率。

解： $P_{\text{in}} = VI = 120(10) = 1200 \text{ W}$

$$P_{\text{out}} = 1.5 \text{ kW} = 1.5 \text{ kW} (1000 \text{ W} / 1 \text{ kW}) = 1500 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% = \frac{1200}{1500} \times 100\% = 80\%$$

例：某工厂有三架电动机串联并与电源连接。若其中两架电动机的效率分别为 75% 和 82%，最后电动机系统提供的效率为 60%，求

(a) 最后一架电动机的效率；

(b) 电动机系统的总损失巴仙率。

解：

(a) $\eta_{\text{eq}} = \eta_1 \eta_2 \eta_3$

$$0.6 = 0.75(0.82)\eta_3$$

$$\eta_3 = 0.976 = 97.6\%$$

(b) $\eta_{\text{eq}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\%$

$$60\% = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\%$$

$$P_{\text{out}} = 0.6P_{\text{in}}$$

$$\begin{aligned} \text{总损失巴仙率} &= \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% = \frac{P_{\text{in}} - P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \\ &= \frac{P_{\text{in}} - 0.6P_{\text{in}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% = 40\% \end{aligned}$$

1. 某家的冰箱与 120 V, 3 A 的电源连接, 其效率为 55%。已知电费收法为 RM 0.30/kWh, 求

(a) 电源提供给冰箱的电功率;

(b) 在 30 天内冰箱所转换的有效总能量 (以焦耳表示);

(c) 30 天后的总电费。

2. 某系统是由 3 个子系统串联组成。每个子系统的效率分别为 57%, 75% 和 60%。

(a) 求此系统的等效效率。

(b) 若将此系统与第四个子系统串联, 造成整个系统能量损失的巴仙率为 80%, 求第四个子系统的效率。