

高中物理难点撈分点汇总

一、游标卡尺

1、原理

(1) 设计目的：更加精确的测定小于 1mm 的长度。

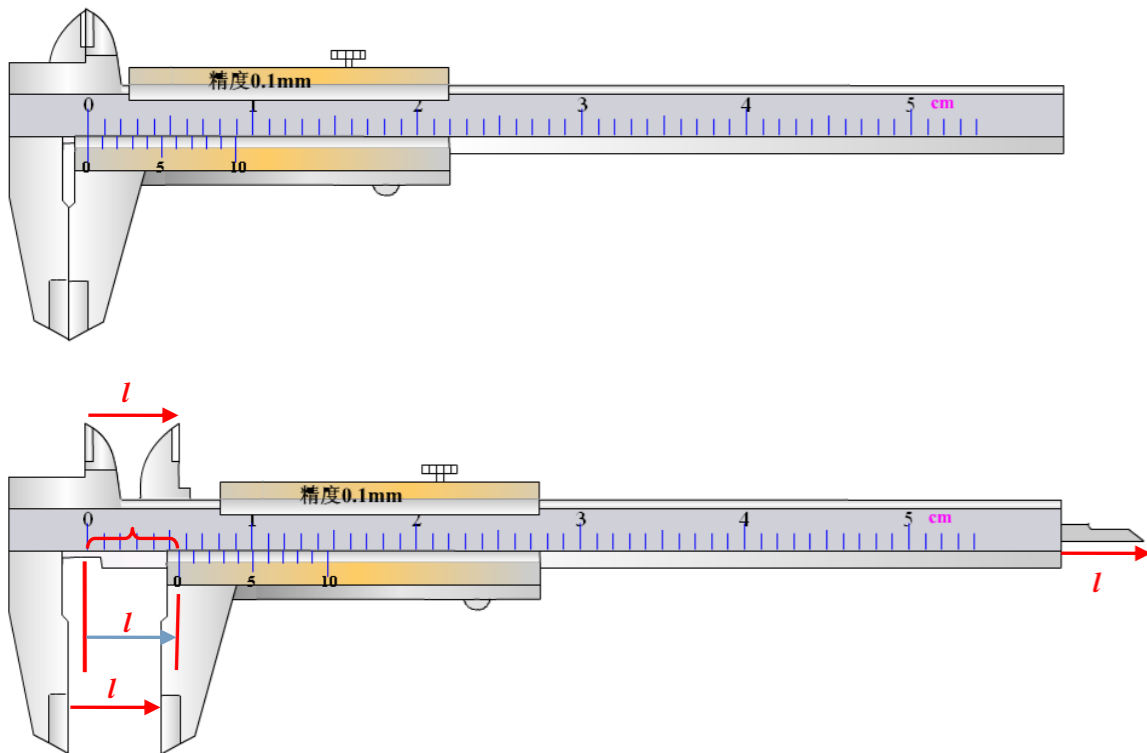
(2) 设计结构：主尺—— cm 单位，最小分度值 1mm ，就是一把毫米刻度尺

游标尺——常见三种规格，如下表

	10 分度	20 分度	50 分度
游标尺长度	9mm	19mm	49mm
游标尺格数	10	20	50
标注数字	0, 5, 0	0, 5, 10, 15, 0	0, 1, 2, …, 9, 0
最小分度值	0.9mm	0.95mm	0.98mm
与主尺最小分度值的差值 Δl	0.1mm	0.05mm	0.02mm

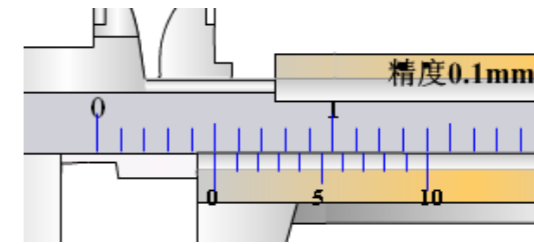
(3) 测量原理：

①校零：未测量时，游标尺零刻线与主尺零刻线对齐，同时游标尺最后一根刻度线也与主尺 9mm \ 19mm \ 49mm 刻度线对齐。

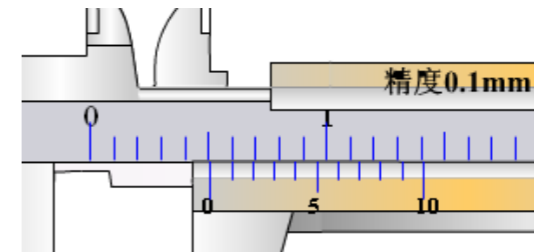


②测量的是什么：待测物体长度，就是游标尺零刻线与主尺零刻线之间的距离；该距离可直接从主尺读出——游标尺零刻线正对的主尺读数，但这样就要估读，读数误差大；为了更准确读取 1mm 以下的长度，则从游标尺读数。

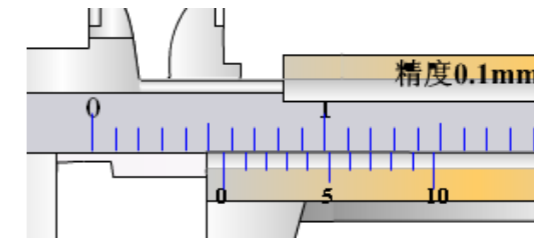
③读数原理：



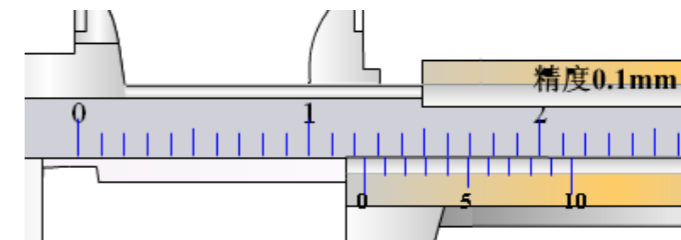
a、游标尺零刻线对齐主尺 5mm 刻度线，读作 $l=5\text{mm}$



b、游标尺 1 刻线对齐主尺刻度线，零刻线相对主尺 5mm 刻度线后移 0.1mm ，故游标尺零刻线左侧读数为 $l=5\text{mm}+0.1\text{mm}=5.1\text{mm}$



c、游标尺 7 刻线对齐主尺刻度线，零刻线相对主尺 5mm 刻度线后移 $7 \times 0.1\text{mm}$ ，故游标尺零刻线左侧读数为 $l=5\text{mm}+7 \times 0.1\text{mm}=5.7\text{mm}$



d、游标尺零刻线左侧整数倍毫米数为 12mm ，此时 4 刻线对齐主尺刻度线，即零刻线相对主尺 12mm 刻度线后移 $4 \times 0.1\text{mm}$ ，故游标尺零刻线左侧读数为 $l=12\text{mm}+4 \times 0.1\text{mm}=12.4\text{mm}$

(4) 读数规则：整数倍毫米数由主尺读出（游标尺零刻线左侧）为 l_0 ，小于 1mm 的部分由游标尺读出，且第 n 条刻线与主尺刻线对齐，则读作 $n \times \Delta l$ ，这里 Δl 指游标尺最小分度值与主尺最小分度值的差值——即精度，公式为： $l = l_0 + n \times \Delta l$

2、易错提醒

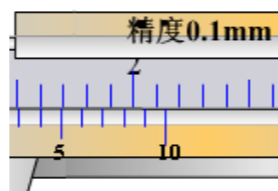
(1) 分度识别：根据前表识别出是多少分度的游标卡尺，进而读数时乘以相应的精度 Δl 。

(2) 游标尺零刻线相关问题：游标尺左边沿线和零刻线同时出现时，要注意读取游标尺零刻线左侧长度，而不是游标尺左边沿线左侧长度；整数倍毫米数 l_0 应先以 mm 作单位带进公式计算。

(3) 特殊读数:

若遇到如右图所示情况, 则首先搞清楚游标尺上几号刻线与主尺上多少 mm 刻线对齐了——本图中是游标尺上 4 号刻线与主尺上 16mm 刻线对齐了; 然后分析游标尺零刻线的位置——本图中, 游标尺零刻线在主尺上 16mm 刻线左侧 4 个分度值处, 即 $4 \times 0.9\text{mm}$ 位置处, 则本题读数为:

$$l = 16\text{mm} - 4 \times 0.9\text{mm} = 12.4\text{mm}$$



二、摩擦力做功与摩擦生热

1、功和热的区别

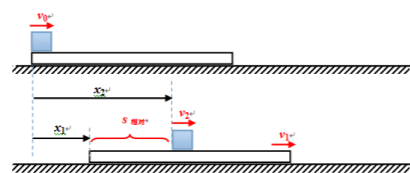
功是功——力对空间的积累效应, 热是能量——相互摩擦的两个物体内能的增加量。

2、计算式中位移/路程的区别

功的计算式 $W = Fl \cos \alpha$ 中的 l 是力直接作用在其上的 **物体对地的位移**, 而摩擦生热时产生的热量 $Q = F_f s_{\text{相对}}$ 中的 $s_{\text{相对}}$ 是两个相互接触的 **物体间相对滑动的路程**。

3、两者关系

(1) 推导过程:



如图所示, 木板 M 静止在光滑水平地面上, 其上表面粗糙, 一滑块从其左端以某一速度 v_0 向右滑上木板, 经过一段时间, 木板对地位移为 x_1 , 末速度为 v_1 , 滑块对地位移为 x_2 , 末速度为 v_2 , 则由动能定理, 有

摩擦力对木板做正功, 对应木板动能变化: $F_f x_1 = \frac{1}{2} M v_1^2 - 0$

摩擦力对滑块做负功, 对应滑块动能变化: $-F_f x_2 = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_0^2$

由能量守恒, 有该过程摩擦产生的热量为: $Q = \frac{1}{2} m v_0^2 - (\frac{1}{2} M v_1^2 + \frac{1}{2} m v_2^2)$

三式联立, 得到: $Q = F_f (x_2 - x_1) = F_f s_{\text{相对}}$, 其中 $s_{\text{相对}} = x_2 - x_1$

(2) 两者关系:

从前述推导过程可看出摩擦力的功和摩擦生热两者之间的本质性区别。

若从能量角度作一分析, 则可这样分析, 即: 摩擦力对滑块做负功, 将能量“拿来”, 使滑块动能减少; 摩擦力对木板做正功, 将能量“送走”, 使木板动能增加; 但是由于 $x_2 > x_1$, 所以“拿来”的能量多于“送走”的能量——这没有送走的部分就是两者共有的内能增量——热量。

4、相关结论

(1) 一对滑动摩擦力做的总功为负功:

$$W_{\text{总}} = W_1 + W_2 = F_f x_1 + (-F_f x_2) = -F_f (x_2 - x_1) = -F_f s_{\text{相对}} = -Q$$

(2) 水平传送带匀速运动, 将物块无初速度放到传送带上, 则物块动能增加量数值等于该过程的摩擦生热:

物块位移为 $x_1 = \frac{v}{2} t$, 摩擦力对物块做的功等于物块动能增加: $F_f x_1 = \frac{1}{2} m v^2 - 0$

传送带位移为 $x_2 = vt = 2x_1$, 则摩擦生热 $Q = F_f s_{\text{相对}} = F_f (x_2 - x_1) = F_f x_1 = \frac{1}{2} m v^2$

(3) 相对滑动路程的计算: 如果两物体的相对运动是单向直线运动, 则可直接用两物体的位移求差; 如果相对运动是往返运动, 则必须分段求解相对滑动位移, 然后绝对值相加。

三、能量-位移图象 ($E-x$ 图象)

1、功和能

(1) 功的计算式为: $W = Fl \cos \alpha = F \cdot l_F = F_l \cdot l$, 其中 l_F 为物体在力的方向的分位移, F_l 为在物体位移方向上的分力。

(2) 功与能量变化的关系: 功是能量变化的量度—— $W = \Delta E$; 高中物理涉及到的有五大功能关系——合力功与动能, 保守力的功与势能, 除重力之外其他力的功与机械能, 摩擦生热, 安培力的功与电能等。

2、能量-位移图象 ($E-x$ 图象) 的斜率

将力分解到位移 x 和垂直位移方向上来, 就得到 $k = \frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{W}{\Delta x} = \frac{F_x \cdot \Delta x}{\Delta x} = F_x$, 即 $E-x$ 图象的斜率是该能量对应那个力在 x 方向的分量。

高中物理中常见的几种 $E-x$ 图象的斜率:

能量	动能	势能			机械能
		重力势能	弹性势能	电势能	
功能关系	$F_{\text{合}} \cdot \Delta x = \Delta E_k$	$G \cdot \Delta x = \Delta E_p$	$F_{\text{弹}} \cdot \Delta x = \Delta E_p$	$qE \cdot \Delta x = \Delta E_p$	$F_{G\text{外}} \cdot \Delta x = \Delta E_{\text{机}}$
$E-x$ 图象斜率意义	合力 $F_{\text{合}}$, 或者合力在 x 方向分量 $F_{\text{合}x}$	重力 G , 或者重力在 x 方向分量 G_x	弹力 $F_{\text{弹}}$, 或者弹力在 x 方向分量 $F_{\text{弹}x}$	电场力 qE , 或者电场力在 x 方向分量 qE_x	除重力之外其他力 $F_{G\text{外}}$, 或者除重力之外其他力在 x 方向分量 $F_{G\text{外}x}$

说明: 当力就在 x 方向时, $E-x$ 图象的斜率就是对应的力; 当力不在 x 方向时, 则需将力正交分解到垂直和平行 x 方向, $E-x$ 图象的斜率就是对应的力在 x 方向的分量。

3、举例说明

【例 1】(2015 武汉市二月调考 17) 如图 1 所示, 固定的粗糙斜面长为 10m, 一小滑块自斜面顶端由静止开始沿斜面下滑的过程中, 小滑块的动能 E_k 随位移 x 的变化规律如图 2 所示, 取斜面底端为重力势能的参考平面, 小滑块的重力势能 E_p 随位移 x 的变化规律如图 3 所示, 重力加速度 $g=10\text{m/s}^2$ 。根据上述信息可以求出 (D)

A、斜面的倾角

B、小滑块与斜面之间的动摩擦因数

C、小滑块下滑的加速度的大小

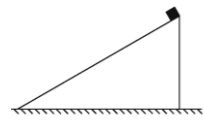


图1

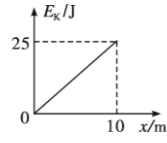


图2

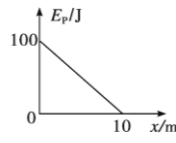
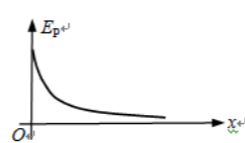


图3



D、小滑块受到的滑动摩擦力的大小

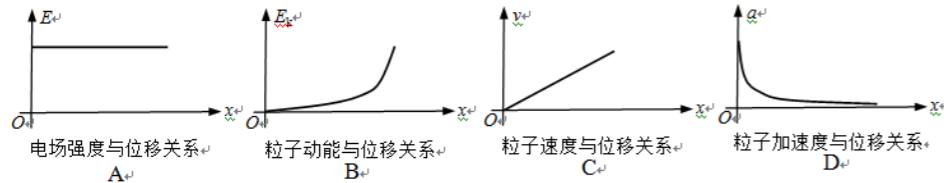
【解析】本题中，图2是动能-位移图象（ E_k-x 图象），其斜率是物体所受合外力

$F_{\text{合}}=mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta$ ，由图可知： $F_{\text{合}}=mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta=2.5\text{N}$ ；图3是重力势能-位移

图象（ E_p-x 图象），其斜率的绝对值是物体重力沿斜面的分量 $G_x=mg \sin \theta$ ，由图可知：

$G_x=mg \sin \theta=10\text{N}$ 。则可求出小滑块受到的滑动摩擦力的大小 $F_f=\mu mg \cos \theta=7.5\text{N}$ ，D 答案正确。

【例2】（2014 安徽卷 17）一带电粒子在电场中仅受静电力作用，做初速度为零的直线运动。取该直线为 x 轴，起始点 O 为坐标原点，其电势能 E_p 与位移 x 的关系如右图所示。下列图象中合理的是（ D ）



【解析】 E_p-x 图象的斜率的绝对值是带电粒子所受的电场力 $F=qE$ ，由图可知图象斜率——即电场力随 x 增大而减小，故可知电场强度 E 应随 x 增大而减小，粒子加速度随 x 增大而减小，A 错、D 正确； $E_k+E_p=\text{定值}$ ，可知 E_k 应随 x 增大而增大，但是电势能减小得越来越慢，所以 E_k 增大得也越来越慢，故 B 错——此处还可如此分析： E_k-x 图象的斜率就是粒子所受合力——即电场力，而由前面分析已知电场力是随 x 增大而减小的，故 B 错；若 C 成立，则 B 成立，故 C 也错。

四、卫星变轨问题

1. 卫星在圆轨道上做稳定圆周运动时， $\frac{GMm}{r^2}=m\frac{v^2}{r}=m\omega^2 r=m\frac{4\pi^2}{T^2}r$

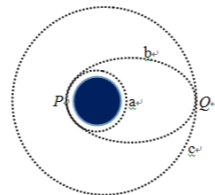
2. 卫星变轨分析

①当速度 v 增加时，根据向心力计算公式 $m\frac{v^2}{r}$ 可知卫星所需向心力变大，即万有引力不足提供

向心力，所以卫星将做离心运动，轨道半径变大，②当速度 v 变小时，所需向心力将变小，即万有引力大于所需向心力，则卫星将做近心运动，轨道半径变小。

如图所示

①速度变化问题，轨道 a 变到轨道 b，在 P 点加速，b 变到轨道 c，Q 点加速，反之，若卫星回收问题中，对应两点都减速；在轨道 b 上从 P 到 Q 点引



力做负功，速度减小，动能转化为引力势能

②速度大小问题，轨道 a 的线速度大于轨道 c 的线速度；若比较轨道 a 线速度和轨道 b 上 Q 点的速度大小，应将轨道 c 补充进来

③加速度问题，受力决定卫星的加速度，力相同则加速度相同。故 a, b 轨道 P 点加速度相同，b, c 轨道 Q 点加速度相同

五、双星系统

一般考虑为两个天体只在彼此万有引力作用下做匀速圆周运动的模型

1. 模型建立，如右图，双星间距为 L ， m_1 的轨道半径为 r_1 ， m_2 的轨道半径为 r_2
2. 基本规律

①受力规律，向心力相同 $F=G\frac{m_1m_2}{L^2}$

②运动规律，具有相同的周期和角速度，两星及圆心 O 三者始终在同一直线上

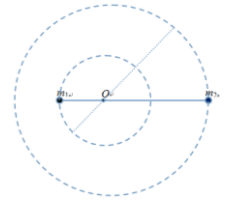
$$\frac{Gm_1m_2}{L^2}=m_1\omega^2r_1=m_2\omega^2r_2$$

则 $m_1r_1=m_2r_2$ ，即轨道半径与质量成反比

又 $v=\omega r$ ，线速度之比等于半径比

③易错点，易将两星的轨道半径视为 L

④若出现双星中一个吸收另一个的物质的问题，抓住②中基本方程以及双星质量之和为定值，轨道半径之和为两星之间的距离即可



六、卫星追击相遇问题

1. 卫星在圆轨道上做稳定圆周运动时

$\frac{GMm}{r^2}=m\omega^2 r=m\frac{4\pi^2}{T^2}r$ ，可知外层卫星的角速度小，若某时刻两卫星间距最小，则经历一定时间

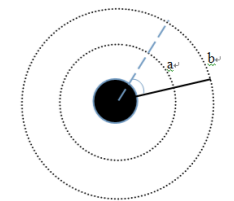
之后一定会再次出现间距最小的情形。

2. 模型建立，如图

某时刻 a, b 相距最近，到下一次再相距最近，应该是 a 比 b 多转一圈，即 a 转过的角度比 b 多 2π ，计算公式为

$$(\omega_a - \omega_b)t = 2\pi, \text{ 或者 } \left(\frac{2\pi}{T_a} - \frac{2\pi}{T_b}\right)t = 2\pi$$

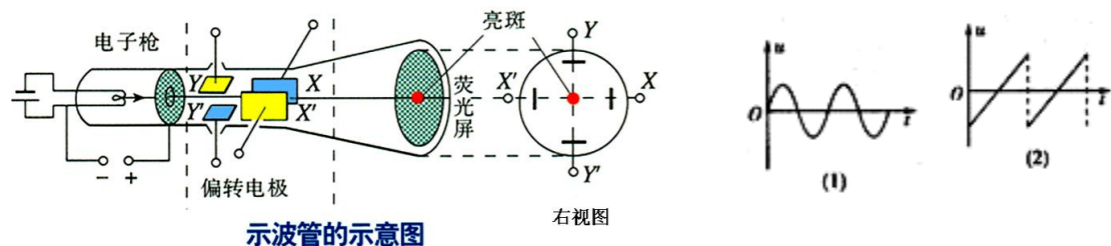
若问题仅为相距最近，则多转 n 圈



七、示波管示波问题

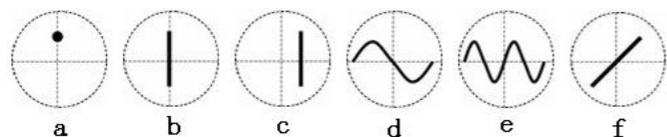
其原理图如图所示， YY' 决定电子竖直方向的偏转， XX' 决定电子水平方向的偏转，设极板 YY' 、 XX' 间距、板长均相等，设 YY' 极板间电势差为 U_y ，右边缘离屏距离为 L_y ， XX' 极板间电势差为 U_x ，右边缘离屏距离为 L_x ， U_1 为进入偏转电极前的加速电压。屏上以中心点 O 为坐标原点建立坐标 XOY ，则可推得电子打在屏上的位置坐标为：

$$x = \left(\frac{L_1+L_x}{2}\right)\frac{U_x L}{2U_1 d}, \quad Y = \left(\frac{L_2+L_y}{2}\right)\frac{U_y L}{2U_1 d}$$



根据以上表达式推测极板 YY' 、 XX' 上加不同规律电压时电子打在屏上的位置或径迹。(注意对应 X 、 Y 轴正方向在屏幕上的对应方位), 下面列举几种简单情况:

- YY' 上加正向恒定电压 (Y 极板为正), XX' 上不加电压;
- YY' 上加如图 (1) 所示的正弦交变电压, XX' 上不加电压;
- YY' 上加如图 (1) 所示的正弦交变电压, XX' 上加一恒定正向电压 (X 极板为正);
- YY' 上加如图 (1) 所示的正弦交变电压, XX' 上加如图 (2) 所示的扫描电压, 且两电压变化周期相等;
- YY' 上加如图 (1) 所示的正弦交变电压, XX' 上加如图 (2) 所示的扫描电压, 且 (2) 扫描电压变化周期是 (1) 电压变化周期的 2 倍;
- YY' 、 XX' 上都加如图 (2) 所示的电压。



【注】根据以上情况和对应在屏幕上显示的图像, 自己寻找规律, 也可以进一步推测在 XX' 和 YY' 方向加上其它不同的交变电压时在示波器屏幕上对应的图像。分析亮斑在屏上移动所形成的轨迹: 先分别分析 x 、 y 两个方向的分运动, 再根据运动的合成得到亮斑的和运动, 从而得出屏上的图像。

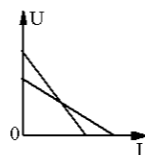
八、电源电动势、路端电压、电源内电压及电源功率问题

1. 闭合电路电动势与内外电压的关系: $E = U_{内} + U_{外}$ (如在电路的动态分析中比较不同部分 ΔU 的大小)

2. 电源工作的两种特殊状态:

① 断路: $E = U_{外}$, $U_{内} = 0$;

② 短路: $E = U_{内}$, $U_{外} = 0$



3. 电源伏安特性曲线函数关系式: $U_{外} = E - Ir$

① 图线与横轴交点的物理意义: 坐标原点电压和电流均为 0 时, 横截距表示电源的短路电流, 若坐标原点电压不为 0, 则横截距不表示短路电流。

② 与纵轴交点的物理意义: 电源电动势;

③ 图线斜率的物理意义: 斜率绝对值等于电源内阻。

4. 纯电阻闭合电路

(1) 闭合电路欧姆定律: $I = \frac{E}{R+r}$, $U = \frac{R}{R+r} E$

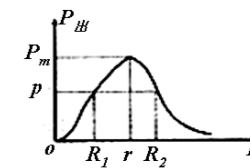
(2) 纯电阻构成的闭合电路中, 电源输出功率随外电路总电阻 R 的变化关系

① $P_{出} = \frac{E^2}{4r + \frac{(R-r)^2}{R}}$, 其图象如右图;

$$P_{出} = \frac{E^2}{4r + \frac{(R-r)^2}{R}}$$

② 当外电路总电阻 $R=r$ 时, 电源输出功率有最大值 $P_{出m} = \frac{E^2}{4r}$, 且等于此时电源总功率的一半。

③ 外电路电阻分别取 R_1 、 R_2 时, 其输出功率分别为 P_1 、 P_2 , 当满足 $R_1 R_2 = r^2$ 时, $P_1 = P_2$ 。



注意: 1) 推导此关系式时, R 是可变电阻, r 是定值电阻. 当外电阻等于内电阻, 即 $R=r$ 时,

电源输出功率最大, 最大输出功率为 $P_m = \frac{E^2}{4r}$; 若 R 与 r 不相等, 则 R 值越接近 r 的值, $P_{出}$ 越大。

2) 电源的输出功率与电源的效率是完全不同的物理量. 电源的效率

$$\eta = \frac{I^2 R}{I^2 (R+r)} = \frac{R}{R+r} = \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}$$

所以当 R 增大时, 效率 η 提高. 当 $R=r$ 时, 电源有最大输出功率, 但效率仅为 50%, 效率并不高。

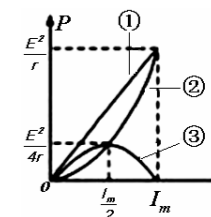
5. 对某一闭合回路, 各功率随总电流的关系图线(即 $P-I$ 图线)中

① 表示电源的总功率图线, 其斜率表示电源的电动势; $P_{总} = EI$

② 表示电源内阻的发热功率; $P_{内} = I^2 r$

③ 表示电源的输出功率; $P_{出} = EI - I^2 r$

②与③的交点表示此时外电路电阻等于电源内阻, 电源输出功率最大



九、对电阻的理解

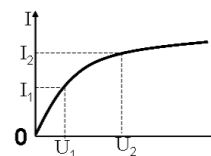
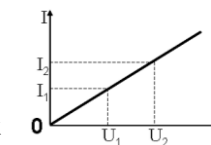
1. 定义式: $R = \frac{U}{I}$

2. 形状规则的电阻决定式: $R = \frac{\rho L}{S}$ (当然一般材料的电阻率 ρ 与温度有关)

3. 定值电阻: 电阻不随所加电压的变化而变化, 电阻值为一固定值, 其伏安特性曲线为一过原点的直线。定值电阻为线性原件, 满足下列关系:

$$R = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

4. 非定值电阻: 电阻随所加电压的变化而变化, 其伏安特性曲线为曲线。非定值电阻为非线性原件, 满足下列关系:



$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad R_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad R_1 \neq R_2 \neq \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

5. 非纯电阻元件不满足欧姆定律: $R \neq \frac{U}{I}$

【注】电学元件或用电器在工作中表现为纯电阻时均可使用公式 $R = \frac{U}{I}$, 如电动机在被卡住而没有

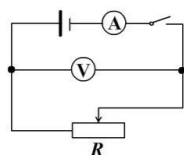
转动时其内阻 r 、所加电压 U 、流经电流 I 之间满足: $r = \frac{U}{I}$, 而当电动机正常运转时其内阻 r 、所

加电压 U 、流经电流 I 之间满足: $r < \frac{U}{I}$ 。又如在远距离输电中, 输电导线电阻的计算:

$$R \neq \frac{U_2}{I_2}, \text{ 而应是 } R = \frac{U_2 - U_3}{I_2}$$

十、等效电压源定理

该实验的理论依据的是“闭合电路的欧姆定律”, 设一个闭合电路中外电路两端的电压端电压为 U , 通过电源的电流为 I , 则有 $E = U + Ir$ 。



伏安法测电源的基本电路有两种——电流表的直接法(如图1)和电压表的直接法(如图2);

设电压表读数为 $U_{\text{测}}$, 电流表读数为 $I_{\text{测}}$, 则有方程①

$$E_{\text{测}} = U_{\text{测}} + I_{\text{测}} r_{\text{测}}$$

用同一电路作两次实验即可计算出电源电动势和内阻的实验值 $E_{\text{测}}$ 、 $r_{\text{测}}$ 。实验的系统误差来源于

$U_{\text{测}}$ 、 $I_{\text{测}}$ 与 U 、 I 的偏差。

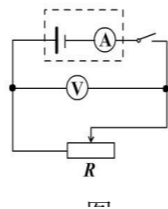
1. 电流表的直接法

(1) 误差来源分析

如图3所示, 电流表测量的是通过电源的电流, 但电压表测量的“外电路中除去电流表之外其余部分”两端的电压, 有: $I_{\text{测}} = I$ $U_{\text{测}} = U - U_A < U$

则由 $U = U_{\text{测}} + U_A$ 和 $U_A = I_{\text{测}} r_A$, 有准确方程②

$$E = (U_{\text{测}} + I_{\text{测}} r_A) + I_{\text{测}} r \quad \text{变形得:} \quad E = U_{\text{测}} + I_{\text{测}} (r_A + r)$$



对比方程①, 可看出实验测量值为 $E_{\text{测}} = E$ $r_{\text{测}} = r_A + r > r$

(2) “等效法”分析

如图3所示, 电压表实际测量的是虚线框内部分“电源、电流表”的“路端电压”, 电流表也是测量的通过该部分的电流, 则由方程组①计算出的应该是虚线框内这个“等效电源”的电动势 E' 和内阻 r' , 而对这个“等效电源”, 有

$$E' = E \quad r' = r_A + r \quad \text{故有 } E_{\text{测}} = E' = E \quad r_{\text{测}} = r' = r_A + r$$

由上述分析可看出, 用电流表的直接法测电源电动势和内阻时, 要求 $r_A \ll r$, 但实际上 r_A 很

接近 r 甚至大于 r , 故一般不用此方法, 除非 r_A 是已知的。

2. 电压表的直接法

(1) 误差来源分析

如图4所示, 电压表测量的是电源两端的电压——路端电压, 但是电流表测量的却是通过“外电路中除去电压表之外其余部分”的电流, 有

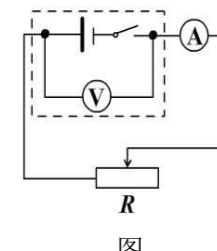
$$I_{\text{测}} = I - I_V < I \quad U_{\text{测}} = U$$

则由 $I = I_{\text{测}} + I_V$ 和 $I_V = \frac{U_{\text{测}}}{r_V}$, 有准确方程③ $E = U_{\text{测}} + (I_{\text{测}} + \frac{U_{\text{测}}}{r_V})r$

有: $E = U_{\text{测}} + \frac{r}{r_V} U_{\text{测}} + I_{\text{测}} r = \frac{r + r_V}{r_V} U_{\text{测}} + I_{\text{测}} r$

变形得: $\frac{r_V}{r + r_V} E = U_{\text{测}} + I_{\text{测}} \frac{r_V r}{r + r_V}$

对比方程①, 可看出实验测量值为 $E_{\text{测}} = \frac{r_V}{r + r_V} E < E$ $r_{\text{测}} = \frac{r_V r}{r + r_V} < r$



(2) “等效法”分析

如图4所示, 电流表也是测量的通过虚线框内部分“电源、电压表”的电流, 电压表实际测量的是该部分的“路端电压”, 则由方程组①计算出的应该是虚线框内这个“等效电源”的电动势 E' 和内阻 r' , 而对这个“等效电源”, 有

$$E' = \frac{r_V}{r + r_V} E \quad r' = \frac{r_V r}{r + r_V} \quad \text{故有 } E_{\text{测}} = E' = \frac{r_V}{r + r_V} E \quad r_{\text{测}} = r' = \frac{r_V r}{r + r_V}$$

将上式变形, 有 $E_{\text{测}} = \frac{1}{\frac{r}{r_V} + 1} E$ 和 $r_{\text{测}} = \frac{1}{\frac{r}{r_V} + 1} r$, 而 $r_V \gg r$, 故用电压表的直接法测电源电动势和内

阻的误差一般极小。

3. 小结与拓展

等效电压源定理: 一个包含电源的二端电路网络, 可看成一个等效的电压源, 等效电压源的电动势等于“二端电路网络”两端的开路电压, 内阻等于“二端电路网络”中去掉电动势后两端

间的等效电阻。

由上述分析可知，“等效法”分析“伏安法测电源电动势和内阻”实验中的系统误差，基本思想是看电流表、电压表实际测量的是哪个“等效电源”的路端电压和总电流，实验测得的就是那个“等效电源”的电动势和内阻。

如图 5、6 所示， R 为电阻箱；在图 5 所示实验中， R 相当于电压表， $U_{测} = I_{测} R$ ，该电路实际测量的是虚线框内“等效电源”，故有

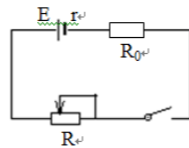
$$E_{测} = E' = E \quad r_{测} = r' = r_A + r$$

在图 6 所示实验中， R 相当于电流表， $I_{测} = \frac{U_{测}}{R}$ ，该电路实际测量的是虚线框内“等效电源”，故有

$$E_{测} = E' = \frac{r_V}{r + r_V} E \quad r_{测} = r' = \frac{r_V r}{r + r_V}$$

【例 1】如图 3 所示，电源的电动势 $E=2V$ ，内阻 $r=1\Omega$ ，定值电阻 $R_0=2\Omega$ ，变阻器 R 的阻值变化范围为 $0\sim 10\Omega$ ，求：

- (1) 变阻器 R 的阻值为多大时， R_0 消耗的功率最大？
- (2) 变阻器 R 的阻值为多大时， R 上消耗的功率最大？是多少？
- (3) 变阻器 R 的阻值为多大时，电源的输出功率最大？是多少？



【解析】(1) R_0 消耗的功率 $P_0 = \frac{U^2}{R_0}$ ，由于 R_0 是定值电阻，故 R_0 两端的电压越大， R_0 消耗的功率 P_0 越大。而路端电压随着外电阻的增大而增大，所以当 $R=10\Omega$ 时， R_0 消耗的功率最大。

(2) 可以把电源和定值电阻 R_0 合起来看作一个等效电源，等效电路图如图所示，等效电源的电动势

$$E' = \frac{R_0}{R_0 + r} E = \frac{2}{2+1} \times 2V = \frac{4}{3} V \quad \text{等效内阻 } r' = \frac{rR_0}{R_0 + r} = \frac{1 \times 2}{2+1} \Omega = \frac{2}{3} \Omega$$

$$P_{R_{max}} = \frac{E'^2}{4r'} = \frac{(\frac{4}{3})^2}{4 \times \frac{2}{3}} W = \frac{2}{3} W$$

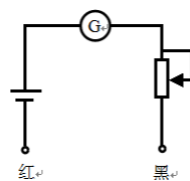
当 $R=r'$ 时，即 $R = \frac{2}{3} \Omega$ 时 R 上消耗的功率最大，

(3) 当外电路电阻与内电路电阻相等时，电源输出功率最大，即 $P_{外} = \frac{R_0 R}{R_0 + R} = r$ 时，代入数值

$$\text{得：} R=2\Omega \text{ 时，电源输出功率最大。最大输出功率 } P_{max} = \frac{E^2}{4r} = \frac{2^2}{4 \times 1} W = 1W$$

【例 2】如图所示，已知电源电动势 E ，内阻 r ， R_0 为一定值电阻，滑动变阻器最大阻值 R ， $R > R_0 + r$ 且 $R_0 < r$ 问当 $R = \underline{\hspace{2cm}}$ 时，电源的输出功率最大； $R = \underline{\hspace{2cm}}$ 时，滑动变阻器 R 消耗的功率最大； $R = \underline{\hspace{2cm}}$ 时，定值电阻 R_0 消耗的功率最大。

【解析】由上文讨论可知，电源的输出功率取最大值的条件是外电阻的阻值和电源内阻相等，



因此只要令 $R+R_0=r$ 即可，所以 $R=r-R_0$ 时电源的输出功率最大；欲求滑动变阻器消耗的功率最大值，因滑动变阻器为可变电阻， R_0 为定值电阻，可将 R_0 等效为电源内阻即可，即令 $R=R_0+r$ 即可；因 R_0 为定值电阻，只要令通过 R_0 的电流取最大值即可，所以令 $R=0$ 即可让定值电阻 R_0 消耗的功率取最大值。

十一、欧姆表原理

1、原理：闭合电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R_{内} + R_x}$

2、结构：如右图，欧姆表有内置电源，表笔（插孔）电流遵循“红进黑出”，所以黑表笔接的是内置电源正极；多用电表欧姆档测量电阻时，黑表笔电势高于红表笔。

3、操作：

(1) 选档：用欧姆表测电阻，应选择合适的倍率（档位），使得指针指在中间区域。

(2) 调零：红黑表笔短接 ($R_x=0$)，调节欧姆调零旋钮，使得表头满偏，即通过表头电流为

$$I_g, \text{ 则有：} I_g = \frac{E}{R_{内}}$$

由此公式可得欧姆表内阻为 $R_{内} = \frac{E}{I_g}$ 。

(3) 测量：断开红黑表笔，指针回到左侧零刻线，将红黑表笔接触待测电阻 R_x 两端，则有：

$$I = \frac{E}{R_{内} + R_x}$$

由此公式可知，当 $R_x = R_{内}$ 时， $I = \frac{I_g}{2}$ ，即表头指针半偏（指在中央刻度）。因此欧姆表的中

值电阻就是其内阻： $R_{中} = R_{内}$ 。

(4) 读数：从欧姆档刻度线读出相应的数据后，还应该乘以相应的倍率。

3、易错提醒：

(1) 红黑表笔电势高低关系：黑高红低；

(2) 先换挡后调零，调零的对应方程： $I_g = \frac{E}{R_{内}}$ ，以及内阻计算： $R_{内} = \frac{E}{I_g} = R_{中}$ ；

(3) 断开表笔后，测量电阻前，指针在左侧零刻线，如果将待测电阻接在两表笔之间后，指针偏转角度过小，是指从左侧向右偏转角度过小，即示数过大的意思，因此需要让指针回到中间区域（示数变小些），需要换高倍率档位；反之，指针偏转角度过大，是指从左侧向右偏转角度过大，即示数过小的意思，因此需要让指针回到中间区域（示数变大些），需要换低倍率档位。

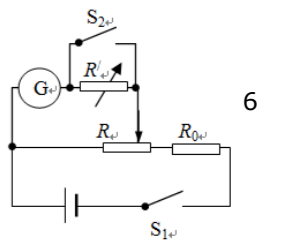
十二、半偏法测电阻

用半偏法可以测量电流表的电阻（含灵敏电流计）、电压表的电阻和未知电阻的阻值。如何设计实验电路，如何测量，怎样减少实验误差，下面分类解析。

1、用半偏法测电流表的内阻 R_g

电流表的内阻 R_g 的测量电路有图 1 和图 2 两种电路。

应用图 1 电路测量电流表的内阻：



步骤:

- (1) 先闭会开关 S_1 和 S_2 , 调节变阻器 R , 使电流表指针指向满偏;
- (2) 再断开开关 S_2 , 仅调节电阻箱 R' , 使电流表指针指向半偏;
- (3) 电流表的内阻等于电阻箱的阻值 R' .

实验仪器的基本要求: $R \ll R'$.

表流表内阻误差分析:

图 1 是串联半偏, 因为流过 R_g 和 R' 的电流相等, 应比较它们的电压 U_g 和 U_2 的大小, S_2 闭合时, 两者电压之和 $U = U_g + U_2 = U_g + 0 = U_g$, S_2 断开时, 电路的总电阻增大, 由闭合电路的欧姆定律得: 总电流减少, R 的右端电阻、 R_0 和电源内阻三者电压之和减少, 并联部分的电压 $U_{并}$ 增大, 即 $U_{并} = U_g/2 + U_2' > U_g$

所以 $U_2' > U_g/2$, $R' > R_g$. 故测量值偏大.

注: 在图 1 电路中, R' 只能用电阻箱, 而不能用滑动变阻器, 其阻值只需比灵敏电流计的电阻大一点就可以了. R 一般使用滑动变阻器, 其阻值要求较小, 要求 $R \ll R'$, 以减小因闭合 S_2 而引起总电压的变化, 从而减小误差.

应用图 2 电路测量电流表的内阻:

步骤:

- (1) 先将 R 调到最左端, 闭合 S_1 , 断开 S_2 , 调节 R 使电流表满偏;
- (2) 使 R 不变, 闭合 S_2 调节电阻箱 R' 使电流表指到满刻度的一半;
- (3) 此时电阻箱 R' 的读数即为电流表的内阻 R_g .

实验的基本要求: $R \gg R'$.

表流表内阻误差分析

图 2 是并联半偏, 在半偏法测内阻电路中, 当闭合 S_2 时, 引起总电阻减小, 总电流增大, 大于原电流表的满偏电流, 而此时电流表半偏, 所以流经 R' 的电流比电流表电流多, R' 的电阻比电流表的电阻小, 我们就把 R' 的读数当成电流表的内阻, 故测得的电流表的内阻偏小.

注: 图 2 电路中, R' 只能用电阻箱, 而不能用滑动变阻器, 其阻值只需比灵敏电流表的电阻大一点就可以了, R 一般使用滑动变阻器, 也可用电阻箱或电位器, 但其阻值要求较大, 要求 $R \gg R'$, 以减小因闭合 S_2 而引起总电流的变化, 从而减小误差.

2、用半偏法测电压表的内阻

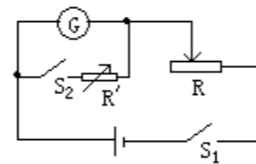
应用图 3 电路测量电压表的内阻

步骤:

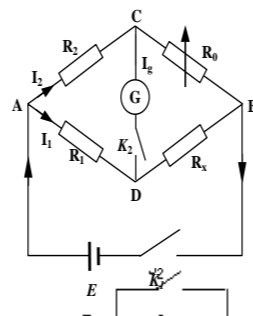
- (1) 先将 R 调到最左端, 闭合 S_1 和 S_2 , 调节 R 使电压表满偏;
- (2) 使 R 不变, 断开 S_2 调节 R' 使电压表指到满刻度的一半;
- (3) 此时电阻箱 R' 的读数即为电压表的内阻 R_V .

电压表内阻误差分析:

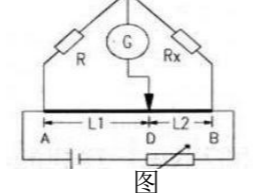
在半偏法测电压表内阻电路中, 在断开 S_2 时, 引起总电阻增大, 滑动变阻器两端分得电压将超过原电压表的满偏电压, 调节 R' 使电压表半偏时, R' 上的电压将比电



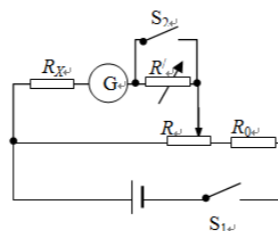
图



图



图



压表半偏电压大, 故 R' 的电阻比电压表的内阻大, 所以测得电压表内阻偏大.

注: 在图 3 电路中, R' 只能用电阻箱, 而不能用滑动变阻器, 其阻值只需比电压表的电阻大一点就可以了, R 一般使用滑动变阻器, 其阻值要求较小, 以减小因闭合 S_2 而引起总电压的变化, 从而减小误差.

3、用半偏法测未知电阻 R_x 的阻值

拓展 1: 如果已知电流表的内阻为 R_g , 将一个未知的电阻 R_x 按图 4 连接, 可以测出未知的电阻 R_x 的阻值.

步骤同图 1;

测量结果为: $R_x = R' - R_g$

误差分析如图 3;

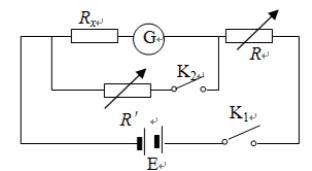
拓展 2: 如果已知电流表的内阻为 R_g , 将一个未知的电阻 R_x 按图 5 连接, 可以测出未知的电阻 R_x 的阻值.

步骤同图 2;

测量结果为: $R_x = R' - R_g$

误差分析如图 2

易错点: 操作步骤及原理



十三、电桥法测电阻

原理

如图为惠斯通电桥的原理图, 待测电阻 R_x 和 R_1 、 R_2 、 R_0 四个电阻构成电桥的四个“臂”, 检流计 G 连通的 CD 称为“桥”。当 AB 端加上直流电源时, 桥上的电流表 (检流计) 用来检测其间有无电流及比较“桥”两端 (即 CD 端) 的电位大小.

调节 R_1 、 R_2 和 R_0 , 可使 CD 两点的电位相等, 检流计 G 指针指零 (即 $I_g=0$), 此时, 电桥达到平衡. 电桥平衡时, $U_{AC}=U_{AD}$, $U_{BC}=U_{BD}$, 即 $I_1R_1=I_2R_2$, $I_xR_x=I_0R_0$. 因为 G 中无电流, 所以, $I_1=I_x$, $I_2=I_0$. 上列两式相除, 得:

$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_0} \quad (1) \quad R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 = CR_0 \quad (2)$$

式 (2) 即为电桥平衡条件.

显然, 电桥法测电阻的原理, 就是采用电压比较法. 由于电桥平衡须由检流计示零表示, 故电桥测量方法又称为示零法. 当电桥平衡时, 已知三个桥臂电阻, 就可以求得另一桥臂待测电阻值.

在实际测量中, 为了方便调整电桥平衡. 其中一个桥臂采用变阻箱或采用如右图所示的可读出长度的滑线电阻丝, 通过调节灵敏电流计 G 的滑动头 D , 使电流计中的电流为零, 则电桥达到平衡, 即可测出 AD 段和 DB 段的长度 L_1 、 L_2 由公式: $R_x = R \frac{L_2}{L_1}$ 求出待测电阻 R_x 的值.

3.特点: 利用电桥法测电阻, 结果比较精确, 只取决于已知电阻、灵敏电流计的精确度, 与电源的电动势没有关系, 因此在要求精确测电阻时采用此方法.

易错点: 电桥原理, 计算方法

十四、电表的改装

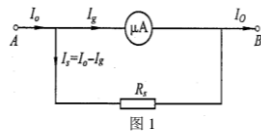
1、扩大微安表的量程

若要扩大微安表(或毫安表)的量程,只要在微安表两端并联一个低电阻 R_s , (称为分流电阻)即可,如图 1 所示。由于并联了分流电阻 R_s , 大部分电流将从 R_s 流过, 这样由分流电阻 R_s 和表头组成的整体就可以测量较大的电流了。

设微安表的量程 I_g , 内阻为 R_g , 若要把它的量程扩大为 I_0 , 分流电阻 R_s 应当多大?

当 AB 间的电流为 I_0 时, 流过微安表的电流为 I_g (这时微安表的指针刚好指到满刻度), 流过 R_s 的电流 $I_s = I_0 - I_g$, 由于并联电路两端电压相等, 故

$$(I_0 - I_g)R_s = I_g R_g \quad \therefore R_s = \frac{I_g R_g}{I_0 - I_g}$$

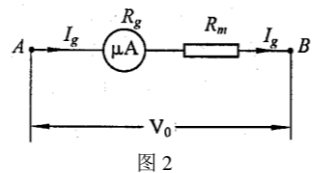


通常取 $I_0 = 10I_g, 100I_g, \dots$, 故分流电阻 R_s 一般为 $R_g/9, R_g/99, \dots$ 。

即: 要把表头的量程扩大 n 倍, 分流电阻应取 $R_s = \frac{R_g}{n-1}$

2、把微安表改装成电压表

若要把微安表改装成电压表, 只要用一个高电阻 R_m (称为分压电阻)与原微安表串联即可, 如图 2 所示。由于串联了分压电阻 R_m , 总电压的大部分降在 R_m 上, 这样由分压电阻 R_m 和表头组成的整体就可以测量较大的电压了。



设微安表的量程为 I_g , 内阻为 R_g , 若要把它改装成量程为 V_0 的电压表, 分压电阻 R_m 应取多大?

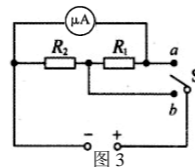
当 $A、B$ 两点间的电压为 V_0 时, 流过微安表的电流为 I_g (这时微安表的指针刚好指到满刻度。因此只要在微安表的标度盘上直接标上与该电流相应的电压, 微安表就成为电压表了), 根据欧姆定律, 得

$$V_0 = I_g (R_g + R_m) \quad \therefore R_m = \frac{V_0}{I_g} - R_g$$

设微安表的满偏电压为 V_g , 把微安表的电压量程扩大了 n 倍, 则有:

$$V_0 = nV_g, \text{ 所以有 } R_m = (n-1)R_g$$

易错点: 为了电路设计的方便往往把电流表的两个量程设计成如图 3 的形式。当开关接到 b 时相当于改装之前的电流表的内阻是 $R_g + R_1$, 满偏电流还是 I_g 。此时可知开关接 a 是小量程, 开关接 b 是大量程



十五、回旋加速器

1. 回旋加速器的加速条件: 交流电源的周期与带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的周期相同。

2. 在回旋加速器中, 带电粒子的最高能量为: $E_{km} = \frac{B^2 q^2 R^2}{2m}$

在带电粒子一定的条件下, E_{km} 取决于 D 形盒的最大半径 R 和磁感应强度 B 。

易错点: 1. 交流电源周期与运动周期关系

2. 最大动能相关因素

十六、霍尔效应

原理:

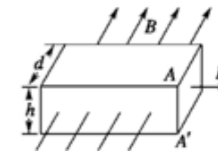
如图所示, 厚度为 h 、宽度为 d 的导体板放在垂直于它的磁感应强度为 B 的匀强磁场中, 当电流通过导体板时, 截流子 (电子) 会在洛伦兹力的作用下向 A 侧板偏转, 在导体板的上侧面 A 和下侧面 A' 之间会产生电势差, 这种现象称为霍尔效应。

稳定时有 $eBv = eE \quad E = Bv$

上下两侧电势差 $U = Eh = Bhv$, 又 $I = nesv$ S 为导体的横截面积 $s = hd$ 得 $v = \frac{1}{nqh d}$

所以 $U = Bhv = \frac{BI}{nqd} = \frac{kBI}{d}$ k 称为霍尔系数

易错点: 1. 金属导体载流子为电子 (负电荷)
2. 粒子偏转方向



十七、交变电流的有效值

有效值的定义: 让交流电和直流电通过同样阻值的电阻, 如果它们在相同时间里产生的热量相同, 这一直流电的数值就叫做该交变电流的有效值。

平均值的定义: 在一段时间内通过导线的电荷量与时间的比值。

交变电流的有效值是按电流产生焦耳热相等角度, 使变化的交变电流与不变的稳恒直流等效; 交变电流的平均值是按电流通过导线横截面的电量相等角度, 使变化的交变电流与不变的稳恒直流等效。两者都是使问题简化, 但角度不同。

所以交变电流通过电阻 R 产生的热量 (或消耗的电功率) 要用有效值计算, 且与电流的流向无关。交流电通过电阻 R 的电量要用平均值计算, 且与电流流向有关, 即如果所求时间内电流方向发生变化, 通过电阻的电量应是两个不同流向时电量的差值。**千万记住不能用交变电流的平均值计算功率, 也不能用交变电流的有效值计算电量。**

十八、电感电容在暂态电路中的作用

电路状态	电感	电容
开关闭合瞬间	相当于断路 (无穷大电阻) 原理: 线圈自感, 电流只能从原来的值 0 逐渐增加, 开关闭合, 加了电压, 电流为零, 故相当于断路	相当于短路 (电阻为零) 原理: 电容器原来不带电, 两板间电压为零; 开关闭合瞬间, 电容器充电电量还没有累积, 因此两板间电压仍然为零, 充电电流很大, 故相当于短路
稳定电路	相当于导线 (可能有电阻)	断路
开关断开瞬间	相当于电源 原理: 线圈中电流减小, 产生自感电动势, 充当电源给电路供电 (电流只能从原来的值逐渐减小), 线圈储存磁场能转化为电能。	相当于电源 原理: 电容器极板上储存有电荷, 两板间有电压, 故充当电源给电路供电 (正负极板电荷中和), 电容器储存电场能转化为电能

十九、光电效应

(一) 光电效应疑难分析

1. 金属中的电子只能吸收一个光子的能量。

从光开始照射, 到释放出光电子的过程非常快, 所需时间非常短, 金属中的电子吸收一个光子

的能量后，立即离开金属表面逸出成为光电子。如果这个电子吸收一个光子的能量后不能逸出成为光电子，那么这一能量就迅速耗散到整个金属板中，所以一个电子只能吸收一个光子的能量，而不能把几个光子的能量积累起来。特殊条件下（强激光照射时）可发生多光子光电效应。

2. 任何一种金属，都有一个极限频率。

当光照射金属时，电子吸收光子的能量后，首先应克服原子核对它束缚，才可以离开金属表面逸出成为光电子。电子克服金属原子核的引力所做的功，叫做逸出功。不同的金属的逸出功是不同的，所以它们的极限频率也是不同的。逸出功 W 和极限频率的关系写作：

$$W = h\nu_0 \quad \text{或} \quad \nu_0 = \frac{W}{h}$$

3. 爱因斯坦的光电效应方程是根据能量守恒定律得出的。

金属表面的电子从入射光中吸收一个光子的能量 $h\nu$ 时（电子吸收光子能量，不是光子与电子发生碰撞），一部分用于电子从金属表面逸出时所做的逸出功 W ，另一部分转换为光电子的最大初动能。即

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + W \quad \text{或} \quad \frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - W$$

由此公式可以看出光电子的最大初动能与入射光的频率是线性关系，而不是成正比。

4. 光强的正确概念以及逸出的光电子数与光强的关系。

光强一般是指单位时间内入射到单位面积上光子的总能量。若用 n 表示每秒钟射到每平方米上的光子数，每个光子的能量为 $h\nu$ ，则光强可写作： $E_{\text{光强}} = n \cdot h\nu$ (J/s · m²)

由公式可以看出光强是由光的频率和光子的发射率两个因素决定的，对同一色光来说，光强相等时，光子数当然相等，光强不等时，也就是说光子数不同。对不同色光来说，尽管他们的光强相等，但由于频率不同，每个光子的能量不同，单位时间内入射到单位面积上的光子数也就不同。并且和频率成反比关系。由下面关系可以看出：

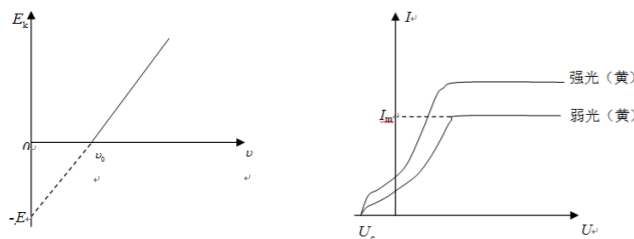
$$\text{因为} \quad E_1 = E_2 \quad n_1 h\nu_1 = n_2 h\nu_2 \quad \text{所以} \quad n_1 : n_2 = \nu_2 : \nu_1$$

某单色光使某一金属逸出光电子，是因为大量光子射到金属表面时，所谓“万箭齐发、一箭中的”，按统计规律，金属表面的电子能吸收光子的能量而逸出的光电子数目与入射的光子数成正比。若使这一单色光的强度增大一倍，由于其频率不变，发射的光子数也就增大一倍，那么逸出的光电子数也必然增多一倍。从这个意义上说，单位时间、单位面积上发射出的光电子数跟入射光频率无关，跟入射光强度成正比。

(二) 与光电效应相关的图象分析

1、最大初动能 E_k 与入射光频率 ν 的关系图线

(1) 极限频率：图线与横轴交点，(2) 逸出功：纵截距的绝对值，(3) 普朗克常量：斜率



2、颜色相同、强度不同的光，光电流与电压的关系

(1) 遏止电压：图线与横轴交点

(2) 饱和光电流

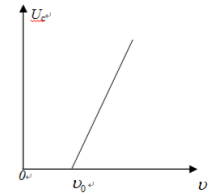
(3) 最大初动能： $E_{km} = eU_c$

3、遏止电压与入射光频率 ν 的关系图线

(1) 截止频率：图线与横轴交点

(2) 遏止电压：随入射光频率的增大而增大

(3) 普朗克常量：等于图线的斜率与电子电量的乘积



二十、碰撞可能性的判断技巧

(一) 二体对心碰撞可能性判断三个判据：一，动量守恒判据，二，能量守恒判据——碰后系统总动能小于等于碰前系统总动能，三，现实可能性判据——碰前追得上，碰后不对穿。

(二) 基本结论

所有碰撞的可能，都介于弹性碰撞和完全非弹性碰撞之间。

即：先计算弹性碰撞和完全非弹性碰撞，得出两种情况下物体碰后的速度值，则物体的速度只可能介于这两个值之间。

而：完全非弹性碰撞（碰后共速）好算，弹性碰撞（动能不变）也好算——用动量守恒和能量守恒得出的结论式 $v_1 + v_1' = v_2 + v_2'$ （即牛顿速度公式： $v_2' - v_1' = v_1 - v_2$ ），联立动量守恒即可。

(三) 结论推导

1、弹簧模型

如右图所示，光滑水平面上，物块 B 向右以速度 v_0 运动，碰上连有弹簧的物块 A 。

(1) 弹簧压缩阶段， v_B 一直大于 v_A ，对应碰撞过程的压缩阶段，这种情况下， A 、 B 不可能分开。

(2) 当 $v_A = v_B$ 时，弹簧压缩最短，对应完全非弹性碰撞。

(3) 弹簧恢复阶段， v_A 大于 v_B ，这之间任意时刻锁定弹簧，弹性势能无法全部释放出来转化为两物块动能，这对应一般碰撞。

(4) 弹簧恢复原长，这对应弹性碰撞。



从上述分析可以看出， A 、 B 动量变化（速度变化）最小的是完全非弹性碰撞， A 、 B 动量变化（速度变化）最大的是非弹性碰撞，所以先计算弹性碰撞和完全非弹性碰撞，得出两种情况下物体碰后的速度值，则物体的速度只可能介于这两个值之间。

注意，此处我假设 A 静止，若 A 有初速度，可以以“与 A 初速度相等的坐标系”为参考系，从而仍用这个模型分析，将得出相同的结论。

用此模型还可以得出所有碰撞中，完全非弹性碰撞，系统动能损失最大——弹簧弹性势能最大。

2、恢复系数

牛顿通过对大量碰撞实验的总结，提出了恢复系数的概念。

恢复系数是反映碰撞时物体变形恢复能力的参数，它只与碰撞物体的材料有关。其定义为碰撞

