

期末考试必考实验：

实验3.1——三线摆

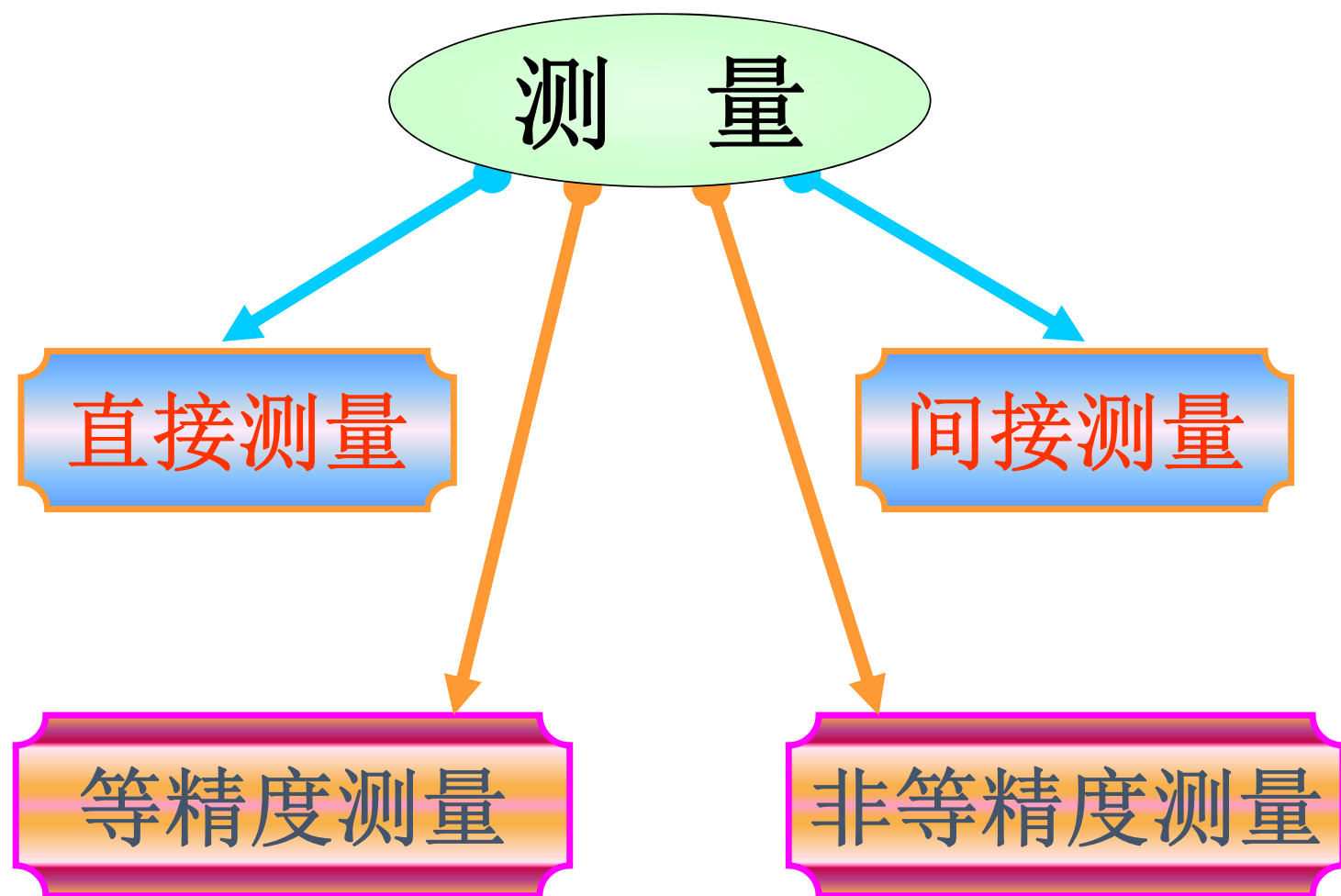
实验3.10——补偿法

实验3.11——伏安法

实验3.13——示波器

实验4.17——金属电子逸出功

以及第一章理论课内容（1.1-1.5）。



1. 系统误差

对同一物理量进行多次等精度测量的过程中，保持恒定或以可预知方式变化的测量误差分量。

- 理论（方法）因素：实验方法或理论的不完善；
- 仪器因素：测量仪器本身固有缺陷或使用不当；
- 环境因素：周围环境变化（如温度、湿度、压强的变化）；
- 人员因素：测量者的主观因素和操作技术。

2. 随机误差

定义：在对同一物理量进行多次等精度测量的过程中，绝对值和符号以**不可预知的方式变化**的误差分量。

(1) 最佳值：多次测量的算术平均值，可以用来近似表示真值

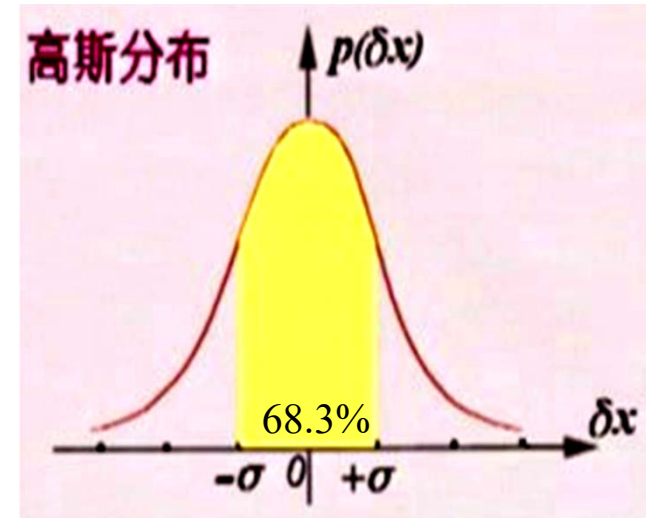
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

(2) 标准偏差：用来描述测量值 x_i 对其平均值 \bar{x} 分散程度的参数

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

标准偏差 σ 的统计意义

任一次测量值 x_i 与平均值 \bar{x} 之差落在区间:



$[-\infty, +\infty]$ 的概率为1, 归一化条件。

$[-\sigma, +\sigma]$ 的概率为0.683, 记为**P=68.3%**。

$[-2\sigma, +2\sigma]$ 的概率为0.954, 记为**P=95.4%**。

$[-3\sigma, +3\sigma]$ 的概率为0.997, 记为**P=99.7%**。

注: $[-k\sigma, +k\sigma]$:置信区间

P:置信概率

$\pm 3\sigma$: 极限误差

(3) 算术平均值的标准偏差

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

u_A 的统计意义：真值落在

$[\bar{x}-u_A, \bar{x}+u_A]$ 的概率为68.3%。

$[\bar{x}-2u_A, \bar{x}+2u_A]$ 的概率为95.4%。

$[\bar{x}-3u_A, \bar{x}+3u_A]$ 的概率为99.7%。

1、不确定度的定义

对某一物理量进行测量，我们只能知道测量值与真值之差的绝对值以一定概率分布在 $-U \sim +U$ 之间，用公式表示为：

$$|x - X| \leq U \quad (\text{置信概率为} P)$$

其中， U 值可以通过一定的方法进行估算，称为不确定度。

不确定度的表征：真值以某置信概率存在的范围，是对测量结果不确定性的量度。

在测量结果 $\bar{x} \pm U$ 中，若 $U = \sqrt{\sigma^2 + \Delta_{INS}^2}$ ，则被测量的真值位于区间 $[\bar{x} - U, \bar{x} + U]$ 内的置信概率约等于或大于95%。

测量的不确定度分为：

A类不确定度 Δ_A

$$\Delta_A = u_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \approx \sigma$$

B类不确定度 Δ_B :

$$\Delta_B = \Delta_{INS}$$

重点看书上例题1.2和1.3。

电表

$$\Delta_{INS} = \text{量程} \times k\%$$

电阻箱

$$\Delta_{INS} = R \times k\%$$

测量结果表示式:

$$\begin{cases} X = \bar{x} \pm U \text{ (单位)} \\ U_r = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases}$$

间接测量量 N 的合成不确定度

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} U_i \right)^2}$$

间接测量量 N 的相对不确定度

$$U_r = \frac{U}{\bar{N}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} U_i \right)^2}$$



特别强调

➤ 不确定度值和相对不确定度值的有效数字一般取一位至两位

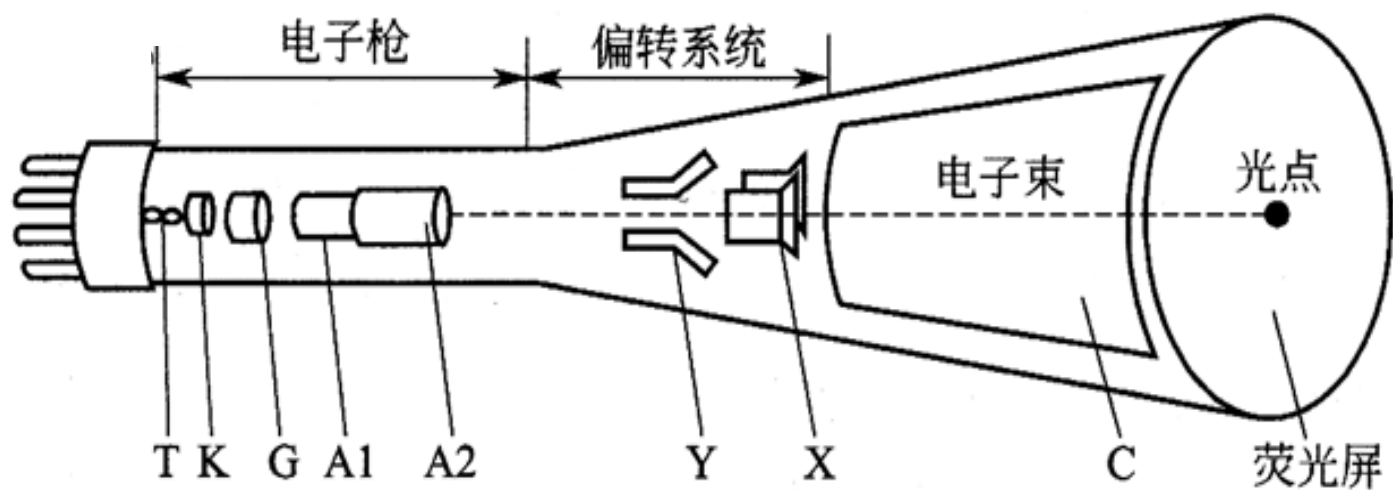
{
✓ 首位非零数 ≥ 3 时，一般取1位
✓ 首位非零数 < 3 时，保留2位

➤ 表达测量结果的有效数字，最佳值尾数与不确定度值尾数应对齐（与末位位置高者对齐）。

示波器的原理及使用

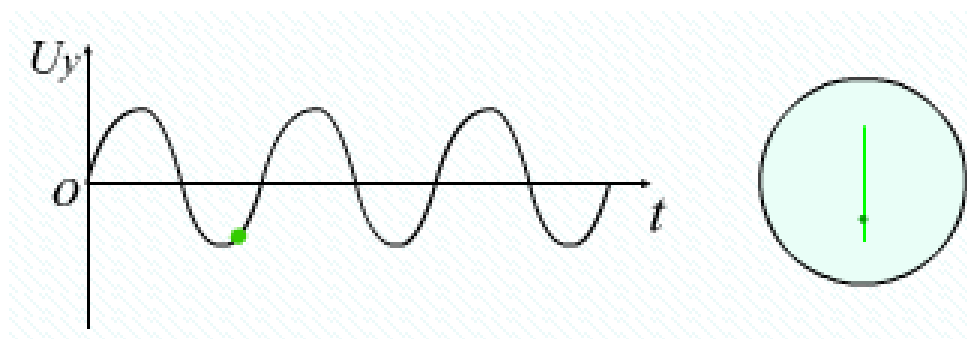
示波器是一种用途广泛的电子测量仪器，用它能直接观察电信号的波形，也能测定电信号的幅度、周期和频率等参数。

阴极射线示波管结构简介

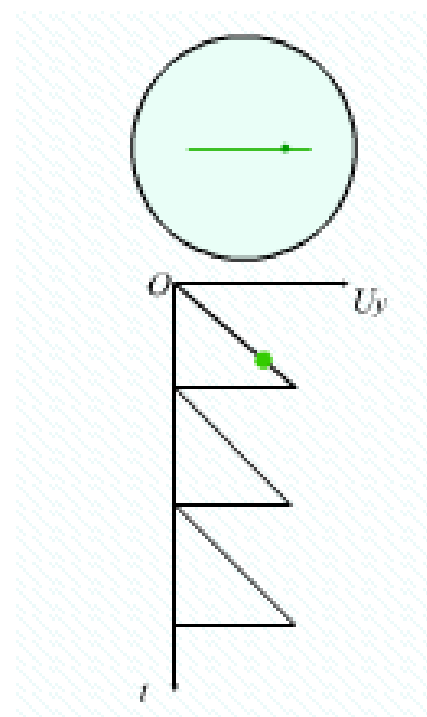


电子枪、偏转系统、荧光屏

◆ **扫描原理：** 将待测信号施加在垂直方向偏转板上，水平方向偏转板上施加与时间成正比例的电压信号，即扫描电压或锯齿波电压。



只在竖直偏转板上加正弦电压的情形



只在水平偏转板上加一锯齿波电压的情形

◆ 示波器的波形是怎样形成的？

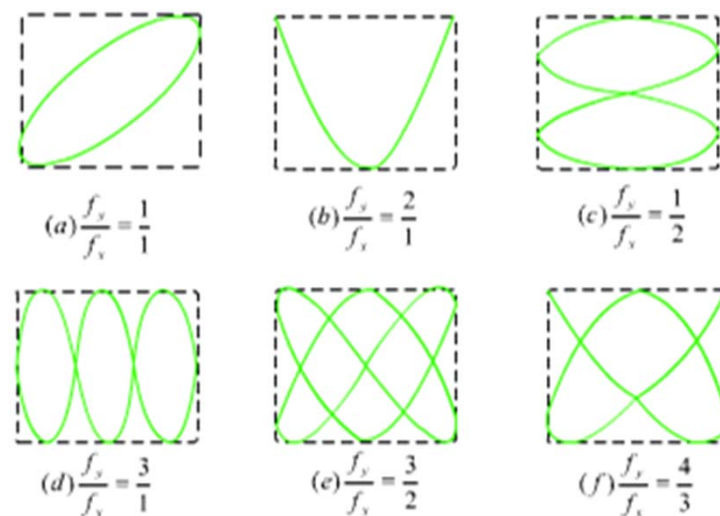
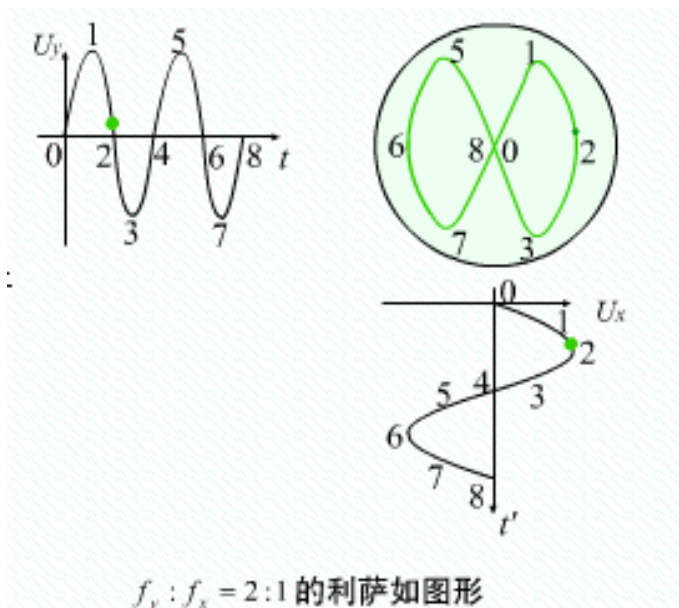
在水平偏转板上施加频率可变的锯齿波电压，使光点在水平方向连续左右往复运动；垂直偏转板上施加待观察的波形信号，电子束光点同时受到水平和垂直两个方向的电场力的作用，其合成的结果就将波形在荧光屏上显示出来的。

李萨如图形

如果示波器的X和Y轴都输入频率相同或成简单整数比的两个正弦电压，则屏上将呈现特殊形状的光点轨迹，这种轨迹图称李萨如图形。

左下图所示 $f_y:f_x=2:1$ 的李萨如图形。

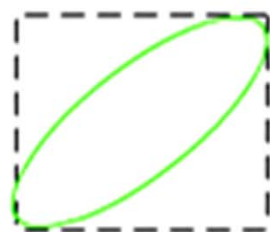
右下图所示的是频率比成简单整数比值的几组李萨如图形。



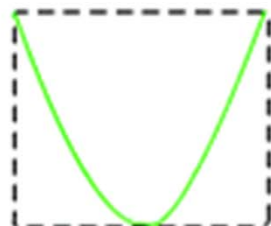
$f_y:f_x=n_x:n_y$ 的几种利萨如图形

利用李萨如图形能方便地比较两正弦信号的频率 $\frac{f_y}{f_x} = \frac{n_x}{n_y}$ 。

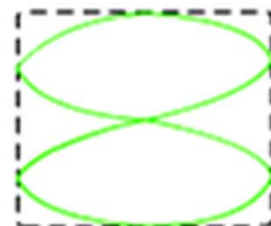
若已知其中一个信号的频率，数出图上的交点 n_x 和 n_y ，便可算出另一待测信号的频率。



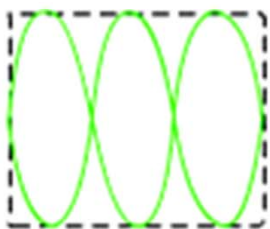
$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{1}{1}$$



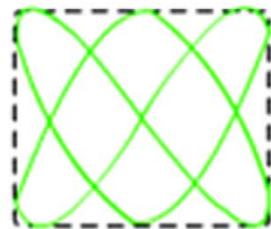
$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{2}{1}$$



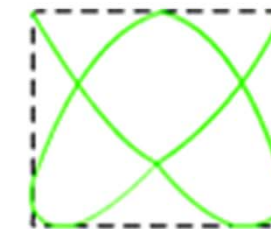
$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{1}{2}$$



$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{3}{1}$$



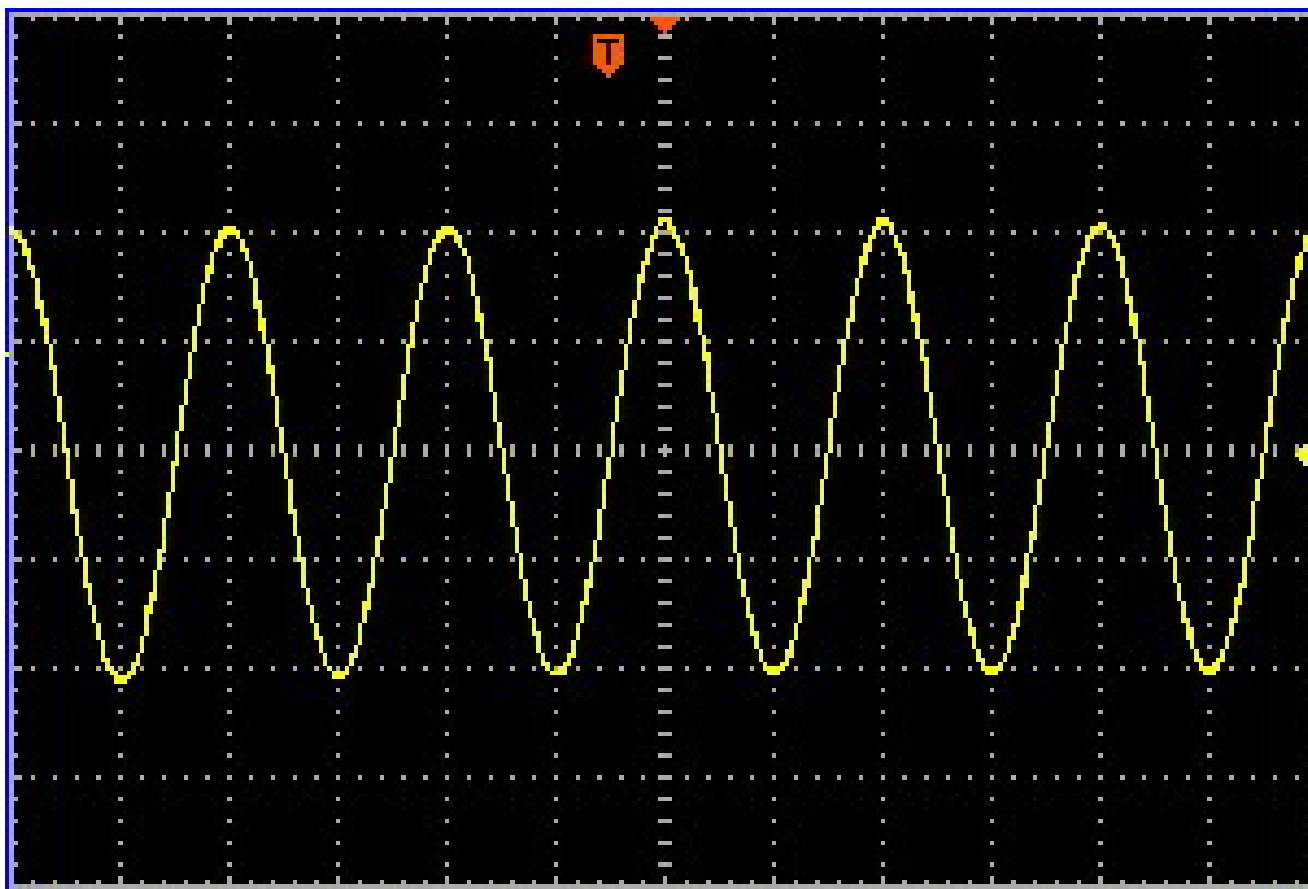
$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{3}{2}$$



$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{4}{3}$$

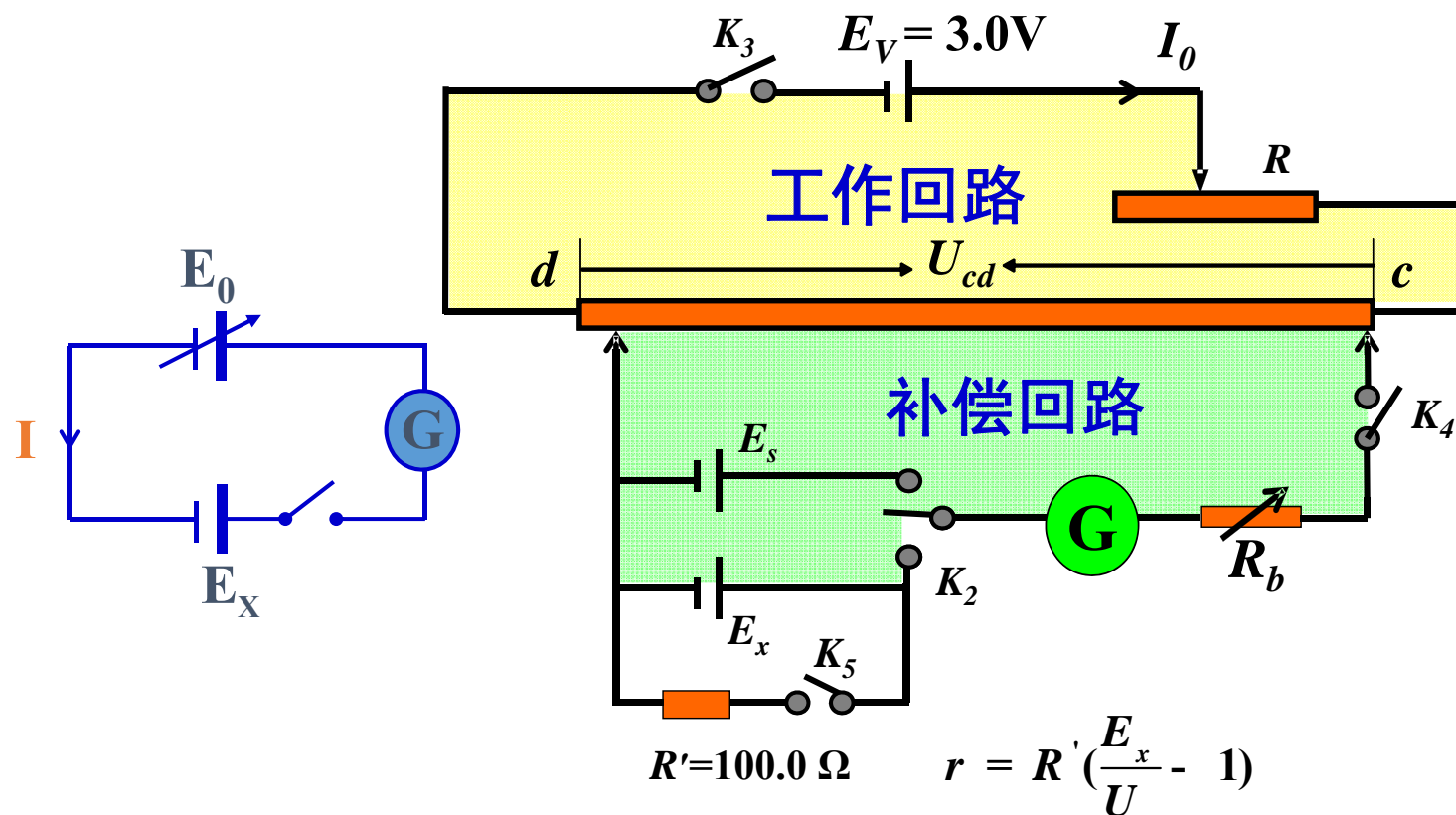
$f_y : f_x = n_x : n_y$ 的几种利萨如图形

示波器输入正弦波信号如图。旋钮TIME / DIV置于2.0ms，旋钮VOLTS / DIV置于0.3 V，并都已校准。请测出正弦波的峰峰值电压 U_{pp} 、周期 T 和频率 f 。



用补偿法测电源电动势和内阻

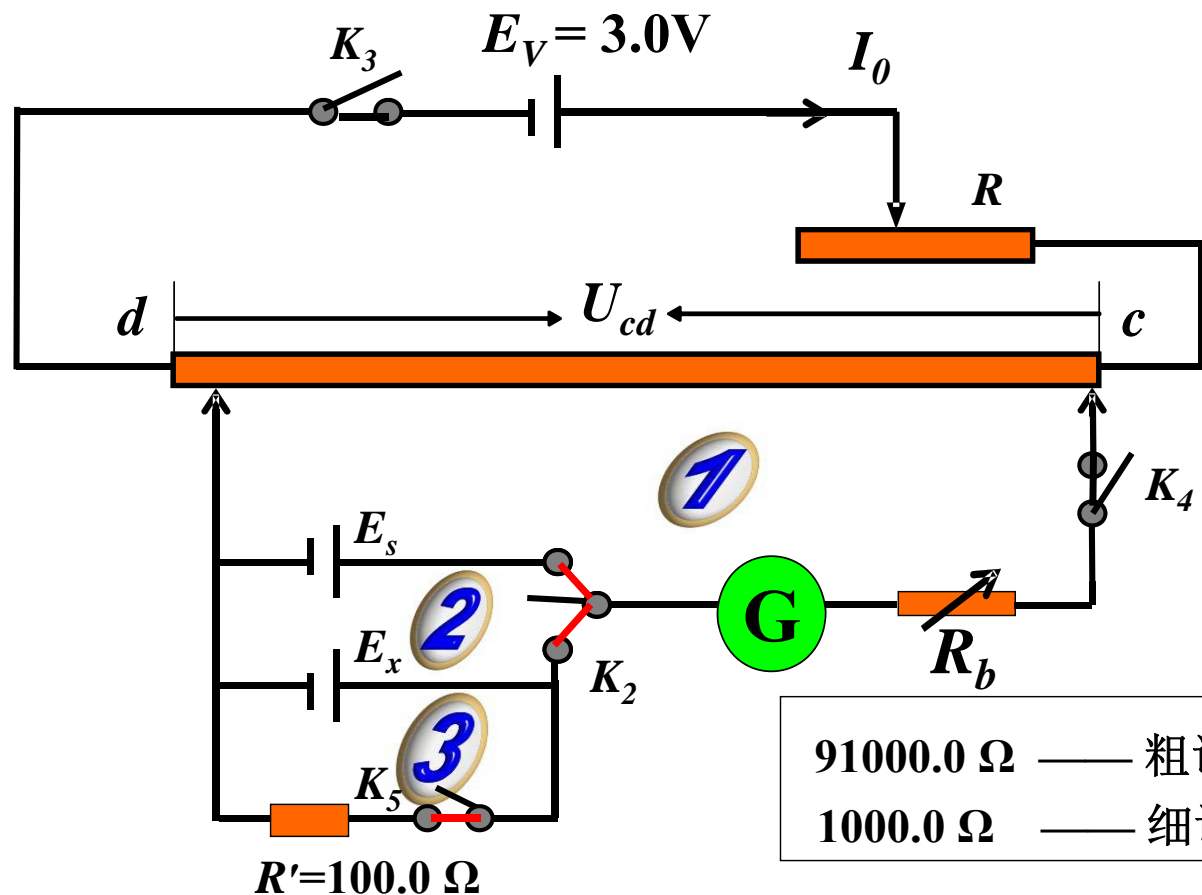
补偿法测电源电动势和内阻电路原理图



实验步骤

- 1 校准工作电流 I_0 ,
- 2 测量电源电动势 E_x ,
- 3 测量内阻 r ,

$$r = R' \left(\frac{E_x}{U} - 1 \right)$$



补偿法实验数据处理

实验数据表格

表 3.10-1 测量数据

$$R' \pm U_{R'} = 100.0 \pm 0.1 \Omega, \quad E_S(20^\circ \text{C}) = 1.01863 \text{ V (BC9 型标准电池)}$$

$$t = \underline{25.9}^\circ \text{C}, \quad E_S(t) = \underline{1.01836} \text{ V}$$

i	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
E_X/N	1.51850	1.50830	1.50510	1.50340	1.51800	1.50920	1.50610	1.50390	1.509062
U/N	1.42330	1.41530	1.41120	1.40950	1.42290	1.42120	1.41290	1.41050	1.415850

数据处理要求

1. 求出电源电动势

$$\overline{E_x} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 E_{x_i} = 1.509062 \text{ V}$$

$$\sigma_{E_x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (E_{x_i} - \overline{E_x})^2}{8-1}} = 0.005 \text{ V} \quad \Delta_{E_x} = 0.00005 \text{ V}$$

$$U_{E_x} = \sqrt{\sigma_{E_x}^2 + \Delta_{E_x}^2} = 0.005 \text{ V}$$

$$\begin{cases} \overline{E_x} \pm U_{E_x} = 1.509 \pm 0.005 \text{ V} \\ U_{r(E_x)} = \frac{U_{E_x}}{\overline{E_x}} \times 100\% = \frac{0.005}{1.509} \times 100\% = 0.3\% \end{cases}$$

2. 求出端电压

$$\overline{U} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_i = 1.415850 \text{ V}$$

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (U_i - \overline{U})^2}{8-1}} = 0.005 \text{ V} \quad \Delta_U = 0.00005 \text{ V}$$

$$U_U = \sqrt{\sigma_U^2 + \Delta_U^2} = 0.005 \text{ V}$$

$$\begin{cases} \overline{U} \pm U_U = 1.416 \pm 0.005 \text{ V} \\ U_{r(U)} = \frac{U_U}{\overline{U}} \times 100\% = \frac{0.005}{1.416} \times 100\% = 0.3\% \end{cases}$$

3. 求出内阻r

$$r = R \left(\frac{E_x}{U} - 1 \right) = 100.0 \times \left(\frac{1.509062}{1.415850} - 1 \right) = 6.583 \Omega$$

$$U_r = \sqrt{\left(\frac{\overline{E_x}}{\overline{U}} - 1 \right)^2 U_{R'}^2 + \left(\frac{R'}{\overline{U}} \right)^2 U_{E_x}^2 + \left(\frac{R' \overline{E_x}}{\overline{U}^2} \right)^2 U_U^2} = 0.29 \Omega$$

$$\begin{cases} \overline{r} \pm U_r = 6.58 \pm 0.29 \Omega \\ U_{r(r)} = \frac{U_r}{\overline{r}} \times 100\% = \frac{0.29}{6.583} \times 100\% = 4\% \end{cases}$$

三线摆实验——数据处理

1.实验数据

下盘质量 $m_0 = 1037\text{g}$ 待测圆环质量 $m = 366\text{g}$ 圆柱体质量 $m' = 138\text{g}$

两圆盘之间的垂直距离 $H = 44.06\text{cm}$ $g = 9.8011\text{m/s}^2$

表 1：有关长度测量的记录表

项目 次数	上盘悬孔间距 a (cm)	下盘悬孔间距 b (cm)	待测圆环		小圆柱体直径 2R _x (cm)
			内直径 2R ₁ (cm)	外直径 2R ₂ (cm)	
1	7.552	16.018	10.020	14.960	2.990

下盘上一侧 5 个孔，小圆柱体需对称放置（学生选 3 号孔放置）

项目 次数	放置小圆柱体两小孔间距 2x (cm)
1	3 号小孔 13.042

表 2：累积法测周期的数据记录表

摆动 30 个 周期 所需 时间 (s)	下盘		下盘加圆环		下盘加两圆柱	
	1	41.09	1	40.70	1	41.22
2	2	40.96	2	40.62	2	41.06
3	3	40.85	3	40.63	3	41.03
4	4	41.12	4	40.51	4	41.01
5	5	41.06	5	40.88	5	41.25
平均	平均	41.016	平均	40.668	平均	41.114
周期 (s)	$T_0 = 1.3672$		$T_1 = 1.3556$		$T_3 = 1.3705$	

说明：三线摆实验重点看
实验中存在哪些系统误差，
如何尽量减小或消除系统
误差？参考实验指导书48
页，课后问题1.

三线摆实验——数据处理

2. 数据处理

$$r = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{7.550}{1.7320} = 4.359 \text{ cm}, \quad R = \frac{b}{\sqrt{3}} = \frac{16.020}{1.73205} = 9.2492 \text{ cm}$$

(1) 圆环:

$$I_0 = \frac{m_0 g R r}{4\pi^2 H} T_0^2 = \frac{1037 \times 10^{-3} \times 9.8011 \times 9.2492 \times 10^{-2} \times 4.3590 \times 10^{-2}}{4 \times 3.1416^2 \times 44.06 \times 10^{-2}} \times 1.3672^2 = 4.404 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_1 = \frac{(m_0 + m) g R r}{4\pi^2 H} T_1^2 = \frac{(1037 + 366) \times 10^{-3} \times 9.8011 \times 9.2492 \times 10^{-2} \times 4.3590 \times 10^{-2}}{4 \times 3.1416^2 \times 44.06 \times 10^{-2}} \times 1.3556^2 = 5.857 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I = I_1 - I_0 = (5.857 - 4.404) \times 10^{-3} = 1.453 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I' = \frac{m}{2} (R_1^2 + R_2^2) = \frac{366 \times 10^{-3}}{2} \times (5.0600^2 + 7.4850^2) \times 10^{-4} = \frac{366 \times 10^{-3}}{2} \times 81.629 \times 10^{-4} = 1.494 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$E = \frac{|I - I'|}{I'} \times 100\% = \frac{|1.453 - 1.494|}{1.494} \times 100\% = 2.7\%$$

(2) 圆柱 (验证平行轴定理):

放在 3 号小孔中

$$I_2 = \frac{(m_0 + 2m') g R r}{4\pi^2 H} T_3^2 = \frac{(1037 + 2 \times 138.0) \times 10^{-3} \times 9.8011 \times 9.2492 \times 10^{-2} \times 4.3590 \times 10^{-2}}{4 \times 3.1416^2 \times 44.06 \times 10^{-2}} \times 1.3705^2 = 5.603 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_3 = \frac{1}{2} (I_2 - I_0) = \frac{1}{2} \times (5.603 - 4.404) \times 10^{-3} = 5.995 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I'_3 = m' x^2 + \frac{1}{2} m' R_x^2 = 138 \times 10^{-3} \times 6.5230^2 \times 10^{-4} + \frac{1}{2} \times 138 \times 10^{-3} \times 1.5000^2 \times 10^{-4} = (5.872 + 0.1552) \times 10^{-4} = 6.027 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$E_x = \frac{|I_3 - I'_3|}{I'_3} \times 100\% = \frac{|5.995 - 6.027|}{6.027} \times 100\% = 0.5\%$$

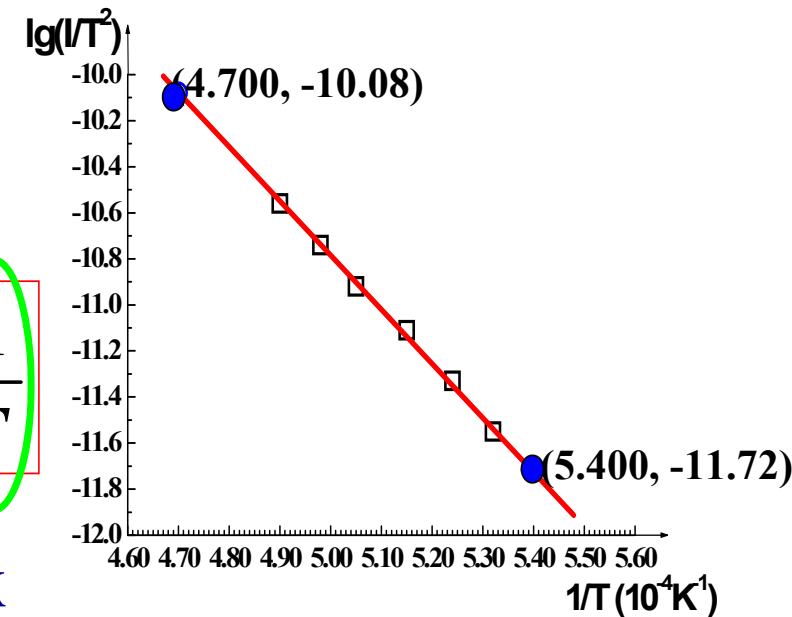
金属电子逸出功

Richardson Straight-Line Method (里查逊直线法)

$$I = AST^2 \exp(-e\phi / kT)$$

$$\lg \frac{I}{T^2} = \lg AS - \frac{e\phi}{2.30kT} = \lg AS - 5.04 \times 10^3 \phi \frac{1}{T}$$

$y = b + kx$



Plot the straight line

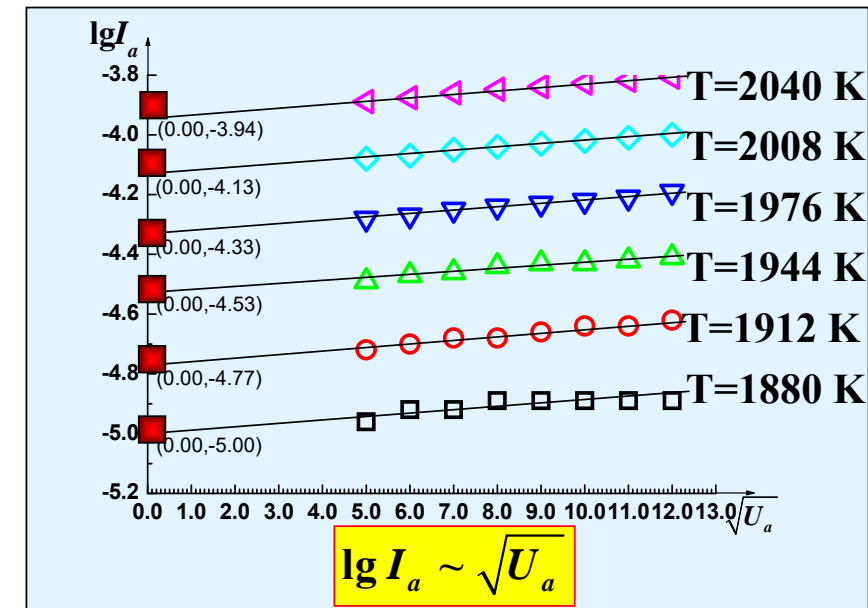
$$\lg(I / T^2) \sim 1 / T$$

斜率 k

Extension Method to get Zero Field Current I (外延法得到零场电流 I)

$$\lg I_a = \lg I + \frac{0.439}{2.30T} \frac{1}{\sqrt{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}} \sqrt{U_a}$$

$y = b + kx$



Plot the straight line

$$\lg I_a \sim \sqrt{U_a}$$

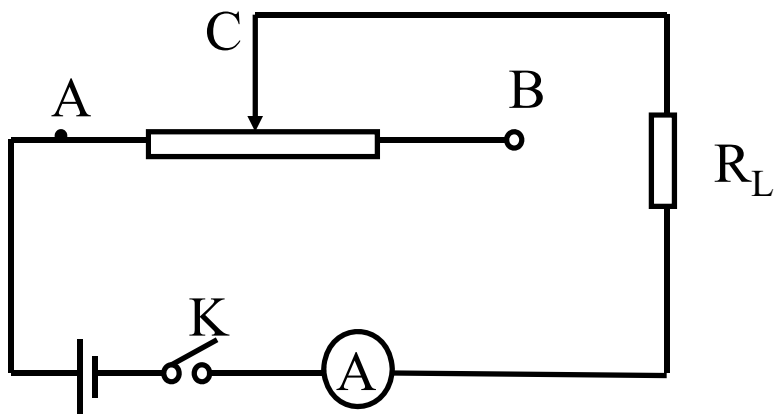
截距 b

产生误差的一个重要原因：肖脱基效应

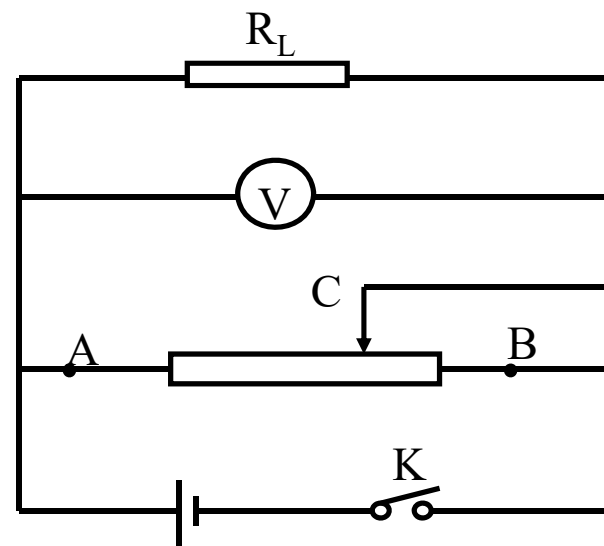
伏安法测电阻

滑线变阻器的两种常用方法

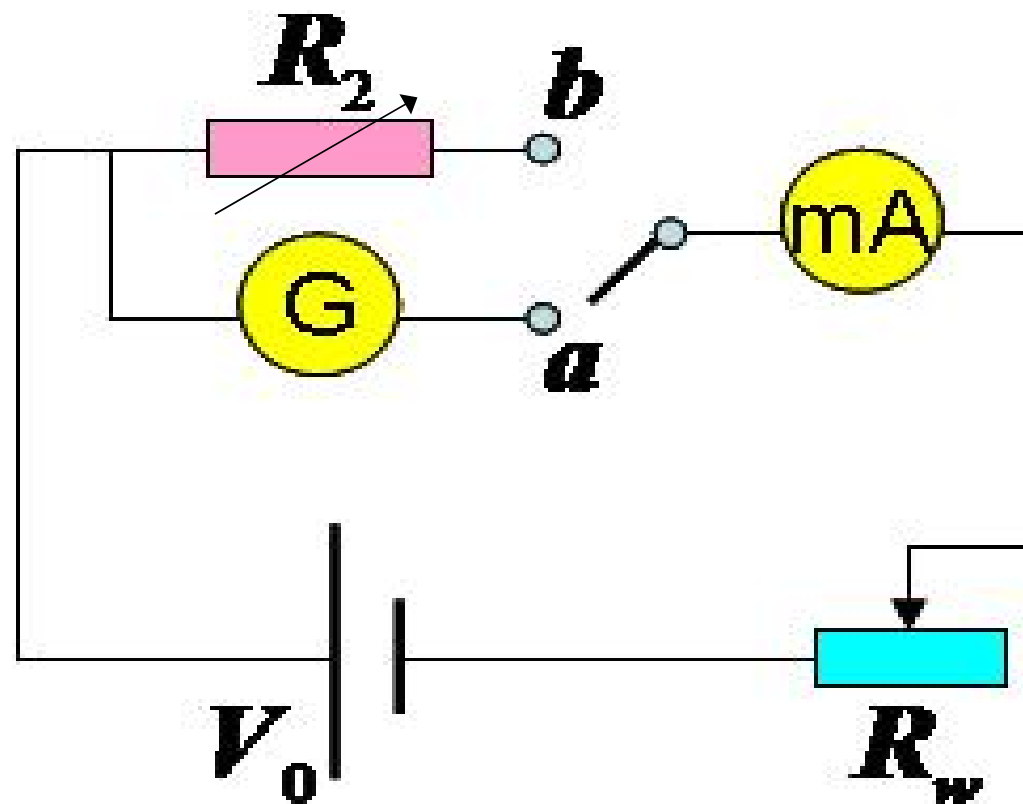
① 制流电路



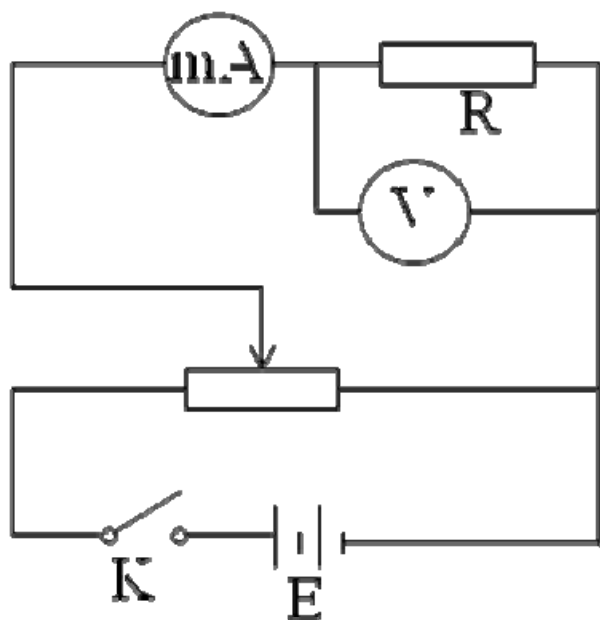
② 分压电路



③ 替代法测量电流表内阻



设计一个测标称值为 50Ω 的电阻的电路图（用伏安法）。指出哪个表的内阻将造成系统误差，它将使测量结果偏大还是偏小？



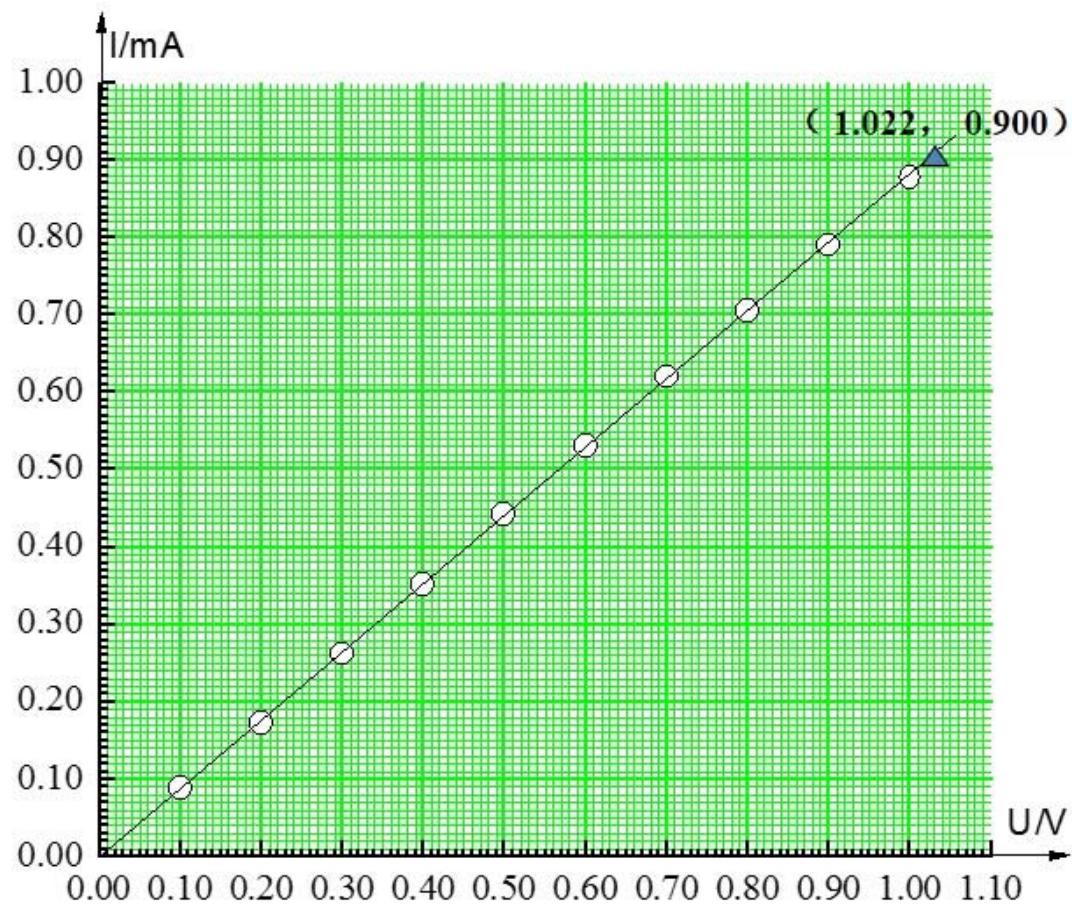
步骤：

- 1、测量，记录电压 U 。
- 2、测量，记录电流 I 。
- 3、根据欧姆定律 $U=IR$ ，计算电阻 R 。
- 4、测量伏特表内阻，对 R 的测量值进行修正。

U/V	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
I/mA	0.089	0.173	0.262	0.352	0.442	0.531	0.620	0.705	0.790	0.878

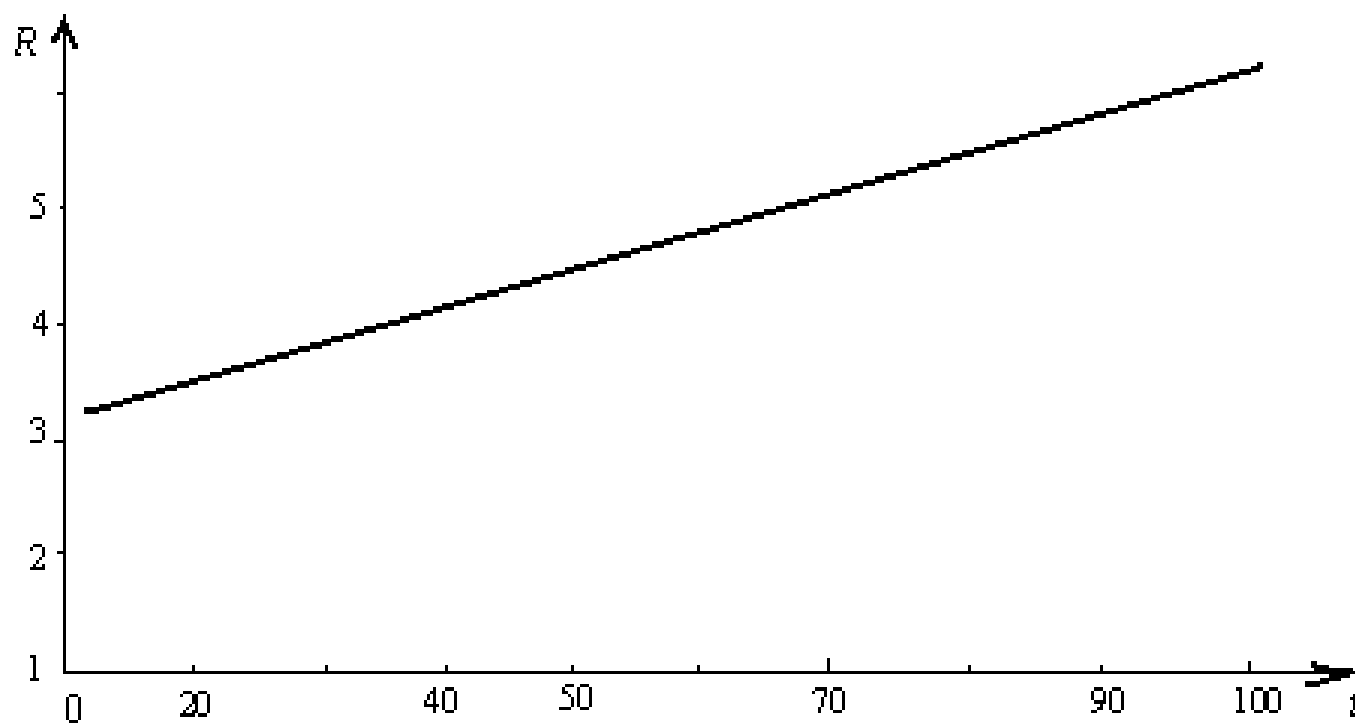
$$\begin{aligned}
 R &= \frac{U}{I} \\
 &= \frac{1.022}{0.900 \times 10^{-3}} \\
 &= 1.14 \times 10^3 \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_x &= R - R_A \\
 &= 1.14 \times 10^3 - 156.0 \\
 &= 9.9 \times 10^2 \Omega
 \end{aligned}$$

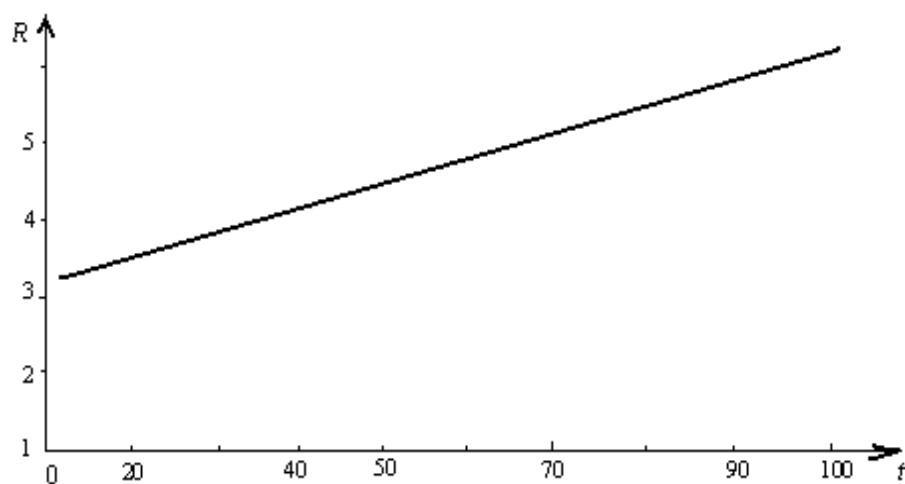


$I \sim U$ 关系曲线

下面是某种金属的电阻阻值随温度变化的关系曲线图，请指出图中的错误与不足。



下面是某种金属的电阻阻值随温度变化的关系曲线图，请指出图中的错误与不足。



- 1、坐标轴不完整，没有标明物理量的单位
- 2、横坐标不是等间隔标度
- 3、纵坐标的分度值标的不合理，应该标到最后
一个准确位，应该标位1.0、2.0、3.0
- 4、没有实验点
- 5、没有图名