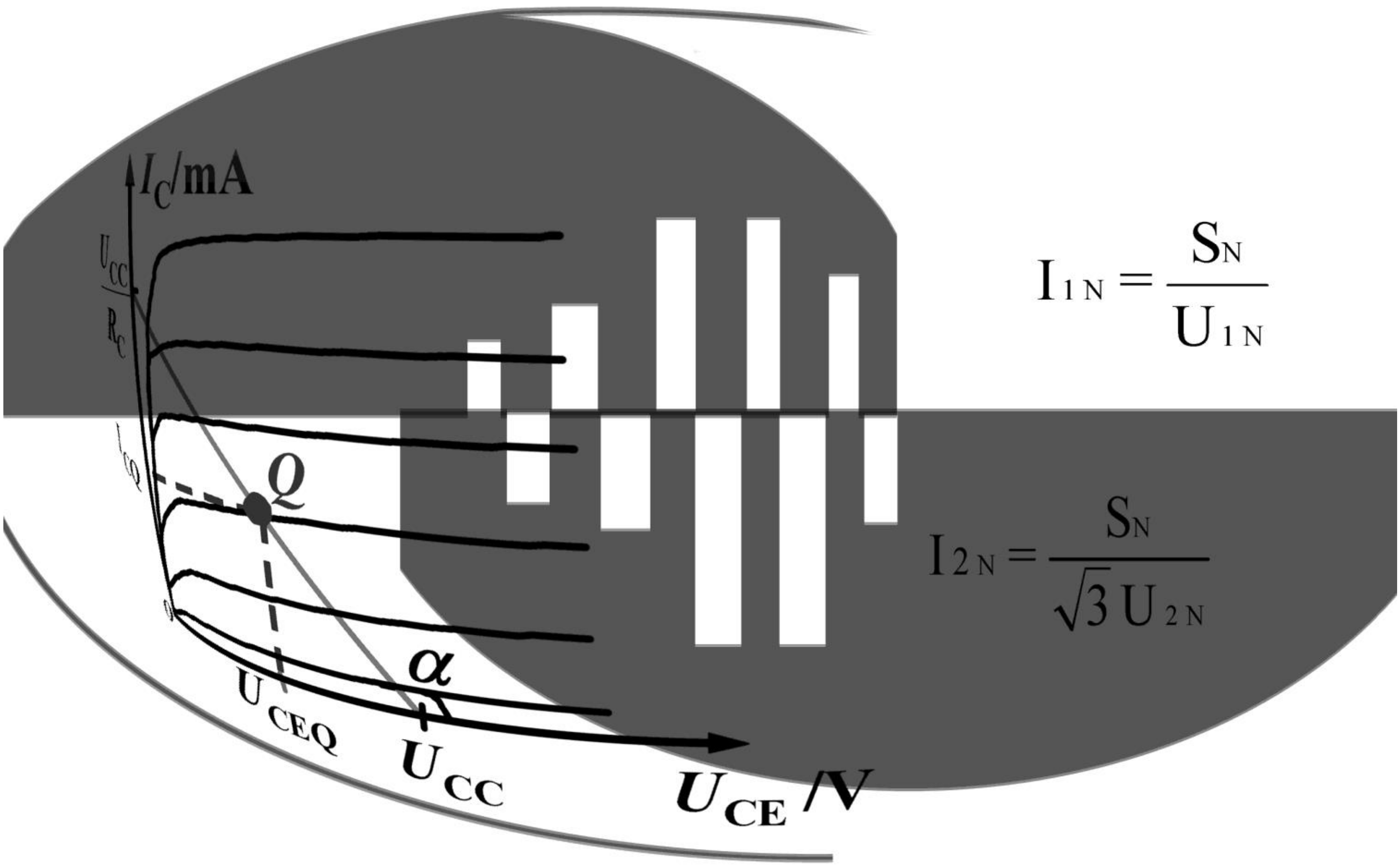
SMEA X007系列学习丛书

基础物理实验

学习指导〈上册〉



机械工程及自动化学院

第九届分团委学生会学习部编著

前言

本书由机械工程及自动化学院（SMEA）分团委学生会学习部搜集、整理，目的是为大二同学提供基础物理实验的学习资料。

根据往年情况，为了让同学们在物理实验上取得优异成绩，机械学院学习部决定重新整理出版《基础物理实验学习指导》。根据 2004 级同学使用该资料后反馈的信息，我们对《基础物理实验学习指导》进行了详细的审查订正。另外，我们增加了 2001 级和 2002 级基础物理实验的期末试题，以及附加了三份基础物理实验报告。供同学们参考，希望能给大二同学提供一些帮助。

《物理实验经典试题选编》收录 94 年至 2002 年有参考价值的物理实验试题和解答，以及《基础物理实验》第一章的答案。

《实验后思考题选解》收录了大部分实验的思考题参考解答。建议大家经过自己的思考后再看答案，不要盲目照抄。

《不确定度与数据处理》汇总了基础物理实验数据处理的方法和要点，是物理实验期中期末考试必考查的知识。

《物理实验样板》提供了三份较为标准的实验报告，但决不希望大家盲目抄袭。

由于时间紧迫，录入工作繁重，其中存在一些错误之处，望读者原谅。对于错误之处，希望大家及时转告学委，反馈到学习部，以便改进。

此书由机械学院学习部的 2004、2005 级干事共同努力完成，他们为此付出了很大努力，衷心感谢他们的工作！

机械学院学习部

2006 年 10 月

编　　辑:机械工程及自动化学院分团委学生会学习部

策划编辑:陈　帅、刘　琛

责任编辑:李　峥、邱文旺

封面设计:刘秀成

责任绘图:李　峥、陈　帅

责任校对:邱文旺

排　　版:陈　帅

CONTENTS

第一部分　物理实验经典试题选编

94 级物理实验试题

1．计算器得出 $\cos 30°3' = 0.86558874$,根据不确定度传递的一般原则,应有几位有效数字？

解： $y = \cos x = \cos 30°3' = 0.865588741$

$$dy = -\sin x dx, \Delta y = -\sin x \Delta x$$

$$\Delta x = 1' = \frac{1°}{60} = \frac{1}{60} \times \frac{\pi}{180} = 0.00029$$

$$\Delta y = -\sin x \Delta x = -\sin 30°3' \cdot 0.00029 = -0.000145$$

$$y = 0.8656 \pm 0.0001$$

有四位有效数字。

（注意：角度的计算题求不确定度时要化为弧度）

2．分别用米尺（钢板尺），最小分度 $0.05mm$ 游标卡尺和千分尺测量同一长度，如果示值都是 $5mm$,写出这三个结果（不要求写出不确定度）：米尺 $\underline{5.0mm}$,游标卡尺 $\underline{5.00mm}$，千分尺 $\underline{5.000mm}$.

3．精密度高表示测量结果的<u>**随机**</u>误差小，正确度高表示测量结果的<u>**系统**</u>误差小，准确度高表示测量结果与<u>**真值**</u>相符合的程度高。

4．甲乙两个同学用最小分度为 $1mm$ 的米尺测同一圆柱的直径 D，各测 5 次，得其平均值均为 $5.00cm$，但随机误差引起的不确定度（标准差）不相同，甲为 $0.07mm$,乙为 $0.4mm$,则甲的测量结果是________________________，乙的测量结果是________________________。

甲 $u_a(L) = 0.07mm, u_b(L) = \dfrac{0.5mm}{\sqrt{3}} = 0.2889mm$

$$U(L) = \sqrt{u_a^2(L) + u_b^2(L)} = 0.0297cm$$

测量结果：$5.00 \pm 0.0297cm$，修约 $5.00 \pm 0.03cm$

乙 $u_a(L) = 0.4mm \quad u_b(L) = \dfrac{0.5mm}{\sqrt{3}} = 0.2887mm$

$$u(L)=\sqrt{u_a^2(L)+u_b^2(L)}=0.493mm$$

测量结果：$5.00\pm0.0493cm=5.00\pm0.05cm$

5. 用千分尺测量金属球的直径一次,得 $D=5.002mm$,若千分尺的仪器误差按最小分度的一半计算,则直径的相对不确定度 $u(D)/D=$____________,其体积的相对不确定度 $u(V)/V=$ _________

解：

$$u(D)=\frac{0.005mm}{\sqrt{3}}=0.002886mm$$

相对不确定度

$$\frac{u(D)}{D}=0.058\%$$

(相对不确定度保留两位有效数字)

$$V=\frac{4\pi}{3}(\frac{D}{2})^3=\frac{\pi D^3}{6} \qquad \ln V=\ln\frac{\pi}{6}+3\ln D$$

求全微分:

$$\frac{dV}{V}=\frac{3dD}{D}$$

$$\frac{u(V)}{V}=\frac{3u(D)}{D}=0.17\%$$

95 级物理实验试题

1. 按有效数字运算法则, $75000\div(17.00-1.0)=$ $\underline{4.69\times10^3}$。

2. 一量 $H=xy^2$ 测得 $x=15.0cm, y=10.0cm$, x 与 y 的相对不确定度均为 1%，则测得结果 $H\pm u(H)$ =________

$$H=xy^2 \quad\Rightarrow\quad LnH=Lnx+2Lny \quad\Rightarrow\quad \frac{dH}{H}=\frac{dx}{x}+\frac{2dy}{y} \quad\Rightarrow$$

$$\frac{u(H)}{h}=\sqrt{\frac{u^2(x)}{x^2}+\frac{4u^2(y)}{y^2}}$$

$$4.75\cdot\frac{u(H)}{1500}=\sqrt{(0.01)^2+4(0.01)^2}\Rightarrow u(H)=33.54$$

$$H\pm u(H)=(1.50+0.03)\times10^3cm^3$$

（要求用误差传递公式计算最大不确定度ΔH）

3．一量$Y=2A-B$，A，B为独立测量量，则Y的最大不确定度为
$\varepsilon=\Delta Y/Y=2\Delta A/A+\Delta B/B$是否正确?

答:肯定不正确,因为$\varepsilon=\sqrt{(\frac{2\Delta A}{A})^2+(\frac{\Delta B}{B})^2}$。

（求不确定度和相对不确定度的公式很重要，希望大家熟记!）

96级物理实验试题

1．甲、乙、丙二人用同一千分尺测同一物长度一次，其结果$H\pm u(H)$为

甲：$(1.383\pm0.002)cm$　乙：$(1.382\pm0.002)cm$　丙：$(1.383\pm0.0002)cm$

你的意见如何？

A、甲正确　B、乙正确　C、丙正确　D、三人都不正确

答；都不正确!

$\Delta_{仪}=0.0005\text{cm}$，$u(H)=0.0005/\sqrt{3}=0.0003$，$H\pm u(H)=1.3830\pm0.0003$。

（区分仪器误差限和b类不确定度，不是一个概念！$\text{ub}=\Delta\text{b}/\sqrt{3}$）

2．根据有效数字运算法则，下面运算中哪个结果是错误的？

A、$60.4+120.32=180.7$　B、$60.40-58.30=2.10$

C、$80.00\times1.20=96.00$　D、$4000\div100=40.0$

答；C，正确解为$80.00\times1.20=96.0$。

3．根据一组测量数据x_i　y_i ($i=1,2......k$),按最小二乘原理求出的最佳直线　$y=a+bx$

应满足$\sum_{i=1}^{k}\left[Y_j-(a+bX_j)\right]^2$为最小。

4．一计算式$Y=1+a/b$,其中“1”为常数，$a=1.000cm,b=20cm$，若要求Y有五位有效数字，按有效数字运算法则，b应有__3__位有效数字。

反推法：$a/b=0.05,Y=1+a/b=1.05$,有五位有效数字是1.0500，那么$a/b=0.0500$应该有三位有效数字，a已有四位，b应是三位。

5．用计算器得出 $e^{0.0024}=1.0024029$,根据不确定度合成的一般原则，有效数字最多可写成 $e^{0.0024}=1.0024$ 是否正确？为什么？

正确，过程自己推导。

6．一同学自组电桥电路测电阻 R_x，所用另外三个电阻 R_i，R_b ，R_n 中，R_n 为准确度等级 $a=0.1$ 的电阻箱，可作为标准电阻使用，另两个电阻 R_i , R_b 不知其准确值，调节 R_n，当 $R_n=100.2\Omega$ 时电桥达到平衡，交换 R_x 和 R_n 位置，再调 R_n 为 100.4Ω时电桥重新平衡，又测得该电桥灵敏度 S=2 格/Ω，已知电阻箱仪器误差 $\Delta_{仪}(R_n)=a\%\cdot R_n$,求 $R_x \pm u(R_x)=?$

解：此题参照第四章的数据处理示例中电桥实验。

7．金属电阻随温度变化的关系在温度不太高时是 $R=R_0(1+at)$,已测得某材料温度 t 变化的实验数据如下表示。实验中的测量误差满足 $\Delta R << \Delta t$ 。要说明如何用归纳法求出电阻温度系数 a 和 0℃时的电阻值。（只要求说明方法，不要求给出线形回归的计算方式和结果）

t ℃	77.0	72.0	67.0	62.0	57.0	52.0	47.0
R(Ω)	0.3616	0.3530	0.3490	0.3440	0.3380	0.3325	(　　)

答：由于测量误差满足 $\Delta R << \Delta t$，故选与 R 有关的量为 x ,与 t 有关的量为 y，$R=R_0(1+at)$ 变成 $t=\dfrac{R}{\alpha R_0}-\dfrac{1}{\alpha}$ ，令 $y=t, x=R$ ，由 $y=bx+a$ 可得：$b=\dfrac{1}{\varepsilon R_0}, a=-\dfrac{1}{\alpha}$ 。用一元线性回归公式 $b=\dfrac{\bar{x}\cdot\bar{y}-\overline{xy}}{\bar{x}^2-\overline{x^2}}, a=\bar{y}-b\bar{x}$ 计算出 a 、b 后，$\alpha=-\dfrac{1}{a}$，$R_0=-\dfrac{b}{a}$ 。

8．有一只 0.5 级电压表，当量程选为 $7.5V$，读数为 $7.00V$ 时，其测量结果的不准确度为_____。

A、 $\Delta U=0.035V$　　B、$u(U)=0.02V$　　C、$\Delta U=0.04V$　　D、$u(U)=0.022V$

选 C 。因为 $\Delta_{仪}=N_m\times a\%=7.5\times0.5\%=0.0375V$ ，故 $u(U)=\Delta_{仪}/\sqrt{3}$

$=0.0216\approx0.02V$ 。

9. 已知t有三位有效数字,C_0有四位有效数字,$d_0=16.50cm$，$d_1=10.45cm$,按有效数字运算法则，$R_x=t/[(C_0\ln(d_1/d_0)]$有几位有效数字？

由 $Y=\ln(d_1/d_0)=\ln d_1-\ln d_0=-0.456758$

有 $\mathrm{d}y=\sqrt{(\frac{\mathrm{d}d_1}{d_1})^2+(\frac{\mathrm{d}d_0}{d_0})^2}=\sqrt{(\frac{0.01}{16.50})^2+(\frac{0.01}{10.45})^2}=0.00113$

故 $y\pm u(y)=-0.457\pm0.001$

10. 在声速测量实验中，接受换能器连续读出 10 个振幅极大的位置（单位：cm)：3.900，4.456，4.904，5.426，5.930，6.450，6.978，7.502，8.026，8.526。请你用逐差法算出空气中的声波的波长λ。

解：距离为 L,声波个数为 n,则有$L=\frac{n\lambda}{2}+L_0$，令$n=x,L=y$,比较$y=bx+a$，有

$\frac{\lambda}{2}=b,\lambda=2b$；用公式$b=\frac{1}{n}\sum_1^n\frac{y_{n+j}-y_n}{x_{n+j}-x_j}$ (n 取 5)。

11. ZX-21 电阻箱的铭牌如下表所示，若选用的电阻值$R=78.5k\Omega$,其结果应表述为$R\pm u(R)=$ _____选用电阻值为78.5Ω时，其结果又应表述为_____。

×10000	×1000	×100	×10	×1	×0.1
1000	1000	1000	2000	5000	5000×10^{-5}

（1） $\Delta_{仪}(R)=78.5k\Omega\times0.1\%=0.0785k\Omega$

$u(R)=\Delta_{仪}(R)/\sqrt{3}=0.0453k\Omega$

$R\pm u(R)=(78.50\pm0.05)k\Omega$

（2） $\Delta_{仪}(R)=70\times0.2\%+8\times0.5\%+0.5\times5\%=0.205\Omega$

$u(R)=\Delta_{仪}(R)/\sqrt{3}=0.018\Omega$

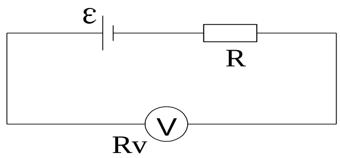
$R\pm u(R)=(78.5\pm0.1)\Omega$

99 级物理实验试题

1．测量电压表内阻 R_V 的线路如图所示。R 为电阻箱，E 为稳压电源，其内阻可忽略不计。实验测得一组不同 R 值时的电压表读数 v（见下表）。试用一元线性归纳法（不要求计算相关系数和不确定度）求出 R_V。

R	20.0	50.0	100.0	200.0	300.0	400.0
v/V	2.80	2.72	2.60	2.38	2.20	2.04

(一元线性回归的计算公式为： $b=\dfrac{\bar{x}\bar{y}-\overline{xy}}{\bar{x}^2-\overline{x^2}}$)



解：$a=\bar{y}-b\bar{x}$

$$v=E\times\frac{R_V}{R_V+R_x}\Rightarrow\frac{1}{v}=\frac{R_V+R_x}{E\cdot R_V}=\frac{R_x}{E\cdot R_V}+\frac{1}{E}$$

$y=a+bx$ 令 $y=1/v$，则 $x=R_x$（由于 R_x 的有效数字多，精度高，故 R_x 用做 x）

$a=1/E$，$b=1/E\cdot R_V$ ，$R_V=a/b$。

i	1	2	3	4	5	6	平均
v	2.8	2.72	2.6	2.33	2.2	2.04	2.448333
y	0.357143	0.367647	0.384615	0.429185	0.454545	0.490196	0.413889
x	20	50	100	200	300	400	178.3333
xy	7.142857	18.38235	38.46154	85.83691	136.3636	196.0784	80.37762
x^2	400	2500	10000	40000	90000	160000	50483.33

$$b=\frac{\bar{x}\bar{y}-\overline{xy}}{\bar{x}^2-\overline{x^2}}=0.000352\ ,$$

$$a=\bar{y}-b\bar{x}=0.351192\ ,$$

$$R_V=a/b=997.7\Omega\ 。$$

（用各种处理方法时，大家一定要参照书上数据处理的实例，注意注意该列表的一定要列出；画图时曲线的性质一定要正确，试验点一定要用符号标出，具体方法参照书本！）

2．用 mm 分度的钢卷尺测得某距离的长度 h 为$126.38cm$。其不确定度由两个分量合成：一是来自仪器误差，一是来自测量的误差。已知后者带入的不确定度 $u(h)=0.03cm$，若仪器误差限按最小分度的一半，试写出结果的正确表述？

解：

$$\Delta_{仪}(h)=0.05cm \Rightarrow u_b(h)=\frac{0.05}{\sqrt{3}}=0.02887cm$$

$$U(h)=\sqrt{U_a^2(h)+U_b^2(h)}=0.0416cm$$

$$h\pm u(h)=126.38\pm0.04cm$$

3．对下列数据

$m_1=3147.226g,$ $u(m_1)=0.312g,$ $m_2=100.4211g,$

$u(m_2)/m_2=0.015\%,$

$m_3=1.326g,$ $u(m_3)=0.0044g,$ $m_4=604.279g$ ，

$u(m_4)/m_4=1/5000$：

（1） 按不确定度和有效数字的关系，其测量结果的正确表达应写成：

$\underline{(3147.2\pm0.3)g}$ ； $\underline{(100.42\pm0.02)g}$ ； $\underline{(1.326\pm0.004)g}$ ；

$\underline{(604.3\pm0.1)g}$。

（2） 按精度的高低列出次序为：$\underline{m_3<m_4<m_2<m_1}$

相对不确定度越小，精度越高。

4． $Y=\ln d, d=12.35cm,$ 按有效数字运算法则，Y 有____有效数字；若

$Y=\ln d, u(d)=0.05cm$,Y 有____有效数字。

（A）5 位　　（B）4 位　　（C）3 位　　（D）2 位

解:（1）$Y=\ln d=2.513656$,则 $\mathrm{d}\,y=\frac{\mathrm{d}\,d}{d}$， $u(Y)=\frac{u(d)}{d}0.01/12.35=0.0008097$

$Y\pm u(Y)=2.513656\pm0.0008097=2.5137\pm0.0008$，Y 有 5 位有效数字

（2）$Y=\ln d=2.513656$， $u(Y)=u(d)/d=0.05/12.35=0.00405$

$Y\pm u(Y)=2.513656\pm0.00405=2.514\pm0.004$，Y 有 4 位有效数字

5. （判断题） DT9923 型数字三用表测量电压的准确度可表示为

$\Delta U = 0.05\% N_x + 3字$。若电压表的读数为31.72V ,则其不确定度为

$u（U）= 0.05\% \times 99.99 + 3 \times 0.01 = 0.08V$。(99.99V 是电压表的满度值，0.01V 是电压表的最小量化单位）

解： $\Delta_{仪}(U) = 0.05\% \times 31.72 + 3 \times 0.01 = 0.045V$

$u(U) = \Delta_{仪}(U)/\sqrt{3} \approx 0.02V$

6. （判断题） 已知$V = 3.14L(D_1 + D_2)(D_1 - D_2)/4$，测得$L = (10.00 \pm 0.05)cm$，

$D_1 = (3.00 \pm 0.01)cm$，$D_2 = (2.00 \pm 0.01)cm$。其中 L 的测量结果对 V 的精度影响最大。 （×）（对 V 全微分，求各不确定度分量的系数）

7. 某试验中观察到的干涉条纹是一组等间距的平行线段，测微目镜连续读出 10 个条纹位置的结果是（单位：毫米）1.488,1.659,1.904,2.170,2.385,2.551,2.800,3.060,3.470。试计算条纹间距。

解：设 10 个条纹间距的位置为 h,即 $h = 10L$

有 $s = ih + S_0$ 设 $s = y, i = x$， 则 b=h, $i = S_0$

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	平均
x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	5
y	1.488	1.639	1.904	2.17	2.385	2.551	2.8	3.06	3.47	2.3852
xy	1.488	3.278	5.712	8.68	11.925	15.306	19.6	24.48	31.23	13.522
x^2	1	4	9	16	25	36	49	64	81	31.667

$$b = \frac{\bar{x} \cdot \bar{y} - \overline{xy}}{\bar{x}^2 - \overline{x^2}} = \frac{11.926 - 13.522}{25 - 31.667} = 0.239mm$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} ....h = b.........a = S_0$$

$$l = h/10 = b/10 = 0.0239mm$$

2001 级物理实实验验试题(期末)

1. $\tan 45°1'$ 有_____位有效数字；20 $\lg 1585$（20 是准确数字）有______位有效数字。

（A）2 位 （B）3 位 （C）4 位 （D）5 位

2．有量程为 7.5v，1.5 级的电压表和 $\Delta=1.0\%Nx+2$ 字，量程为 20v 的数字电压表测量某电压，读数均为 5.08v，它们的不确定度应分别写成 $u(V)=$_____v 和_____v。

（A）0.04　　（B）0.05　　（C）0.06　　（D）0.07

3．已知 $f=\ln R$，R=36.01±0.01，则 $\frac{u(f)}{f}$=______，若 $f=\frac{E}{V}-1$，且 E=（3.000±0.002）v,$V=(2.954\pm0.002)$ v.则 $f\pm u(f)$=______.

4．铜棒长工度随漫度的变化关系如下表所示。为了用作图法其线膨胀系数，画图最少应当在_________的方格纸一进行;为了把图形充分展开,可把它画在 $8\times16cm$ 的方格纸上,这时应取 1 mm 代表_______;如果在拟合直线的两头,读出两个点的坐标是 $(t_1,l_1),(t_2,l_2)$,则 a=___________.铜棒长度 $l_t=l_0(1+at)$.

t/℃	10.0	20.0	25.0	30.0	40.0	45.0	50.0
l/mm	2000.36	3000.72	2000.80	2001.07	2001.48	2001.60	2001.80

5．气体的状态方程 $PV=\frac{M}{u}RT$，M=110g，T=318.15K 的某种气体。已知气体常数 $R=8.31\times10^{-2}\ pa\cdot L/mol\cdot K$,按逐差法法的计算公式和结果分别是

u=___________,___________

i	1	2	3	4	5	6
P_i/大气压	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00
V_i/L	25.3	19.8	16.5	14.5	12.4	11.2

6．双棱镜测波长的计算公式为 $\lambda=\frac{\Delta x\sqrt{bb'}}{S+S'}$，对实验数据进行处理的计算结果如下表所示。

$\Delta x=0.28144mm$	$b=5.9325mm$	$b'=0.7855mm$	$S=27.65cm$	$S'=75.90cm$
$u(\Delta x)=2.010\times10^{-4}mm$	$\Delta_1(b)/b=0.025$	$\Delta_1(b')/b'=0.025$	$\Delta_1(S)=0.5cm$	$\Delta_1(S')=0.5cm$
	$\Delta_2(b)=0.005mm$	$\Delta_1(b')=0.005mm$	$\Delta_s(S)=0.05cm$	$\Delta_s(S')=0.05cm$

注：下标 1 来自自方法误差，下标 2 来自仪器误差。

要求：

（1）给出测量结果的正确表达（包括必要的计算公式）。

（2）定量讨论各不确定度的分量中，哪些是主要的，哪些是次要的，哪些是可以忽略的？如果略去次要因素和可以忽略项的贡献，不确定度的计算将怎样简化？结果如何？

7．热敏电阻随温度的变化满足关系 $R_t = Be^{A/T}$，其中 A，B 是待定系数，T 是绝对温度。实验测得 $R_t - t$（摄氏温度）的关系如下表所示。试用一元线性回归方法求出 $t = 50$ ℃时的电阻值。不要求提供回归系数的计算公式和数值结果，但必须给出具体的过程说明和其它的计算公式。

t/℃	21.28	28.08	36.07	47.97	56.44	64.95	75.41	81.46	87.79
R_t/Ω	4599.9	3700.0	2865.9	1977.9	1557.9	1224.9	914.90	790.60	670.60

2002 级《基础物理实验》　期末试题

一．　　选择填空（ 必做，每题 4 分，共 16 分）

1．$1+\dfrac{0.005}{\pi}$ 有_____位有效数字（1 是准确数字）；20lg200 有_____位有效数字（lg 为以 10 为底的常用对数，20 是准确数字）。

A、3；　　B、4；　　C、5；　　D、6

2．用准确度 $\dfrac{\Delta R}{R}=5\%$ 的金属膜电阻构成一个 200 的电阻，如用两个 100 的电阻串联组成，则其相对不确定度 $\dfrac{u(R)}{R}$=_____；如用一个 200 的电阻来充当，则其相对不确定度 $\dfrac{u(R)}{R}$=_____。

A 、10％　　B、 5.8％　　C 、5.0％　　D、4.1％　　E、2.9％　　F 、2.0％

3．用测微目镜测量干涉条纹宽度（d≈0. 1mm)，如果读取的是 10 个条纹的间距，则 $\dfrac{u(d)}{d}$ ≈____，如果只测一个条纹间距，则 $\dfrac{u(d)}{d}$ ≈____。

A 、0.0005　　B、0.005　　C、0.05　　D、0.0029　　E、0.029　　F、0.29

4．某物理量的计算公式 $Y=\dfrac{A}{A-B}$，A 和 B 是独立观测量。则 Y 的不确定度计算式中____是正确的。

A、 $\dfrac{u(Y)}{Y}=\sqrt{[\dfrac{1}{A}+\dfrac{1}{A-B}]^2 u^2(A)+\dfrac{u^2(B)}{(A-B)^2}}$　　B、$u(Y)=\dfrac{\sqrt{B^2u^2(a)+A^2u^2(B)}}{(A-B)^2}$

C、$\dfrac{u(Y)}{Y}=\dfrac{u(A)}{|A|}+\dfrac{u(A)}{|A-B|}+\dfrac{u(B)}{|A-B|}$ D、$\dfrac{u(Y)}{Y}=\sqrt{\left[\dfrac{1}{A^2}+\dfrac{1}{(A-B)^2}\right]u^2(A)+\dfrac{u^2(B)}{(A-B)^2}}$

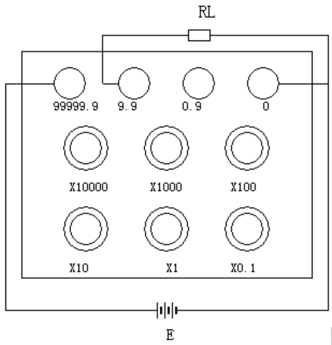
E、没有一个

二． 判断正误与改错（就各题划线部分的内容作出判断，在空格处重复或改写划线部分，使之与原文字构成完整的叙述，改写其他部分不给分。必做，每题 5 分，共 15 分）

5． 用 1.5V0.5 级的电压表去测量～0.5V 的电压,通常应有 4 位有效数字；而用 1.5V2.5 级的电压表去测，则有 3 位有效数字。

（答） __________________;__________________

6． 电阻箱的仪器误差限 $\Delta_{仪}=\sum(\alpha_i\% * R_i)+R_0$，具体数值如下表（铭牌）所示。



×10000	×1000	×100	×10	×1	×0.1
1000	1000	1000	2000	5000	50000 $\times 10^{-6}$

$R_0=(20\pm 5)\mathrm{m}\Omega$

用它的 9.9Ω 的抽头可以构成分压电路。以下两种方式(一是×100 挡位和×1 挡位置 1，其余置 0；一是×10 挡位和×0.1 挡位置 1，其余置 0）获得的分压比相同，但前者的准确度要比后者略高一点。

（答） __________________;__________________

7． X=L-$\frac{1}{2}D^3$ 其相对不确定度的计算公式为；$\frac{u(X)}{X}=\sqrt{\left[\frac{u(L)}{L}\right]^2+\left[\frac{3u(D)}{D}\right]^2}$,Y=$\frac{1}{5}ab^3$

则其不确定度:u(Y)=$\frac{1}{5}\sqrt{u^2(a)+9u^2(b)}$

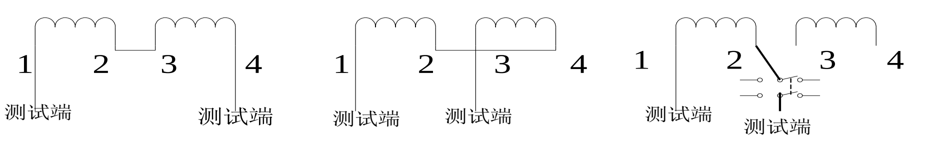
（答） __________________;__________________

三． 填空题（必做，每题 5 分，共 15 分）

8． 视差是指观察远近不同的物 A 和 B 时，随观察者视线的移动将观察到______________________的现象。若眼睛向一侧移动时，A 亦向相对于 B 运动，说明距离观察着___________.

9． 在师零电路中，为了避免电流计受大电流的冲击，可以采用两种保护电路。请你画出它们的原理图，并说明相应元件的取值原则。

10． 用双刀双掷开关可以实现两个线圈的顺接与反接的电感测量。请你按照图示要求在右测补线完成换接功能。



四. 问答题（必做，共 18 分）

11. （本题 6 分）质 m=(137.57±0.02) g 的小球，测得其直径 d=(30.89±0.04) mm。试给出其密度的测量结果。

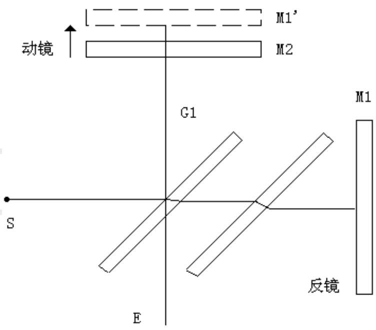
12. （本题 12 分）

（1）已知函数 Y=bX, X 的测量误差远小于 Y，对它们进行等精度测量的结果是 $(X_1,Y_1;X_2,Y_2;\ldots\ldots X_K,Y_K)$，试用最小二乘法证明 b 的最佳拟合值是：$b=\dfrac{\sum_i X_iY_i}{\sum_i X_i^2}$

（2）氢原子光谱的巴尔末系遵循规律，$\dfrac{1}{\lambda}=R_H(\dfrac{1}{2^2}-\dfrac{1}{n^2})$ 式中 n=3, 4, 5, 6；称为里德伯常数。实验测得对应的波长分别为 656.0，485.5，436.0 和 410.2nm。试利用前题的结果，按最小二乘法计算出的拟合值（不要求计算相关系数和不确定度）

五. 选做题（8 题中任选 6 题。每题 6 分，满分 36 分。若多做，按前 6 题给分）

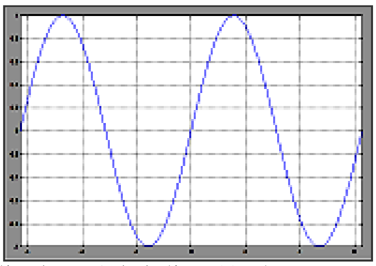
13. （选择填空）用迈克尔逊干涉仪观察点光源的非定域干涉条纹。当动镜 M_2 靠近 M_1' 并超过时，下述说法中，____和____是正确的。



A、条纹一直吐出　B、条纹一直吞进　C、条纹由吐出＝＞吞进
D、条纹由吞进＝＞吐出
E、随着动镜与定镜距离的缩小，条纹越来越密集
F、随着动镜与定镜距离的缩小，条纹越来越粗疏。

14. （填空）在分光仪上对望远镜做自准调节时，如果视野中黑十字的叉丝像不清楚，应当调节____；如果叉丝像清楚，但反射回来的绿十字不清楚，应当调节__________________，如果两者不共面，一般应当调节__________________。

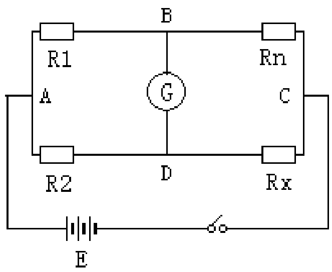
15. （填空）用示波器进行读数时，微调旋钮应处于__________________。如果此时的 X 轴取 10s/div, Y 轴取 5mV/div, 则右图所示的波形是一个频率 f≈-__________________Hz, 振幅 A≈____的正弦波。



16. （判断正误并改错）在菲涅尔双棱镜实验中，调节同轴等高时，如发现白屏远离激光束时，光点位置向上移动。这时应当将光源向下平移；观察双缝像时，如发现只能看到缩小像看不到放大像，这时应当将测微目镜向后推移，以增加它与光源的距离。

__________________；__________________

17. （问答）自组电桥实验的检流计始终不偏转。如果连线是正确的，请你指出因操作不当或断路故障的三种典型原因（要求指出具体的支路位置或开关旋钮）；

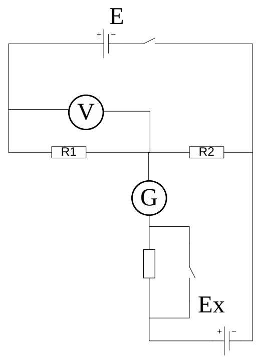


（1）

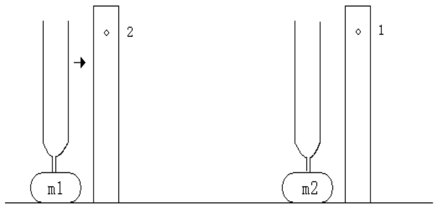
（2）

（3）

18. （问答）某人设计的补偿法测干电池电动势的电路如右图示，当检流计示零时，$E_X = \frac{V}{R_1} R_2$ 这样做有什么缺点？定量给出由此造成的相对误差（设电压表内阻为 Rv）。



19. （填空）滑块 m_1 自左向右运动经过光电门 2 后与静止滑块 m_2 发生碰撞（$m_1 > m_2$），用数字毫秒计 $\triangle t_1$ 的档测量 m_1 与 m_2 碰撞前后的运动速度。若滑块上 U 型挡光杆的距离为△l，数字毫秒计给出的挡光时间为，$p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}$ 则碰撞 m_1 发生前滑块的运动速度 v_1 =__________________；碰撞发生后 m_1 的运动速度 v_1' =_________________； m_2 的运动速度 v_2' =__________________。



20. （问答）透镜的中心和其支架刻线位置不重合会给透镜焦距的测量造成系统的误差。为了减少这种误差，自准法中采取了什么措施？共轭法呢？

附：《基础物理》第一章练习题答案

一、 1、未定系统误差。

2、可定系统误差。

3、随机误差。

4、相差。

5、随机误差。

二、$\Delta_{仪}=1\%V+5字=1\%\times1.315+0.005=0.01815V\approx0.018V$

$$v=\frac{\pi}{4}L(D_1^2-D_2^2)$$

三、$dv=\frac{\pi}{4}(D_1^2-D_2^2)dL+\frac{\pi}{2}LD_1dD_1-\frac{\pi}{2}LD_2dD_2$

$$U(v)=\frac{\pi}{2}\sqrt{(\frac{D_1^2-D_2^2}{2})^2u^2(L)+(LD_1)^2u^2(D_1)+(LD_2)^2u^2(D_2)}$$

L 的系数：$\frac{\pi}{4}(D_1^2-D_2^2)=\frac{\pi}{4}(9-4)=\frac{5\pi}{4}$

D_1 的系数：$\frac{\pi}{2}\times10\times3=15\pi$

D_2 的系数：$\frac{\pi}{2}LD=\frac{\pi}{2}\times10\times2=10\pi$

∴外径 D_1 的测量误差对结果影响大。

五、$\Delta=e\sin\theta$

七、刻度盘 $4\mu A/d\,i\,\backslash$

$$\Delta_{仪}=a\%\cdot N_m=2.5\%\times100\mu A=2.5\mu A$$

$$u(I)=\Delta_{仪}/\sqrt{3}=1.44\mu A$$

$$I=19.2div\times4\mu A/div=76.8\mu A$$

$$I\pm u(I)=(77\pm1)\mu A$$

八、都不正确,$x\pm u(x)$ 只能表示真值落到($x-u(x)$, $x+u(x)$)之间的可能性校大。

九、不正确，系统误差不可能随着测量次数的增加而减小。

十、$\bar{t}=0.13325s$

$$u_a(\bar{t})=\sqrt{\frac{\sum(x_i-\bar{x})^2}{k(k-1)}}=0.000905s$$

电子毫秒计 $u_b(\bar{t}) = \Delta_b(\bar{t}) = 0.001s/\sqrt{3}$

$u(\bar{t}) = \sqrt{u_a^2(\bar{t}) + u_b^2(\bar{t})} = 0.00107s$

$\bar{t} \pm u(\bar{t}) = 0.1332 \pm 0.00107 = (0.133 \pm 0.001)s$

$\frac{u(\bar{t})}{t} = 1.0\%$ ————————（相对不确定度保留两位小数）

十一、(1) $L = (10.8 \pm 0.2)cm$；　(2) $L = (2.8 \pm 0.8) \times 10^4 mm$

（3）$L = (35.00 \pm 0.01)cm$　（4）$28cm = 2.8 \times 10^2 mm$

（5）$2500 = 2.500 \times 10^3$　（6）$0.0221 \times 0.0221 = 0.000488$

（7）$\frac{400 \times 1500}{12.60 - 11.6} = 6.0 \times 10^5$　（8）$a \times b = 3.0 \times 10^{-4} cm^2; a + b = 0.12cm$

十二、(1) $N = x - y$　$u(N) = \sqrt{u^2(x) + u^2(y)}$；

(2) $N = x/y$

$\ln N = \ln x - \ln y$，$\frac{\mathrm{d}N}{N} = \frac{\mathrm{d}x}{x} - \frac{\mathrm{d}y}{y}$，$\frac{u(N)}{N} = \sqrt{[(\frac{u(x)}{x})]^2 + [(\frac{u(y)}{y})]^2}$；

(3) $N = x^m y^n / z^l$

$\ln N = m\ln x + n\ln y - l\ln z$，$\frac{\ln N}{N} = \frac{m\ln x}{x} + \frac{n\ln y}{y} - \frac{l\ln z}{z}$，

$\frac{u(N)}{N} = \sqrt{[(\frac{mu(x)}{x})]^2 + [(\frac{nu(y)}{y})]^2 + [(\frac{lu(z)}{z})]^2}$；

(4) $N = x^{l/k}$　$\ln N = \frac{l}{k} \cdot \ln x$，　$\frac{\mathrm{d}N}{N} = \frac{l}{k} \cdot \frac{\mathrm{d}x}{x} \Rightarrow \frac{u(N)}{N} = \frac{l}{k} \cdot \frac{u(x)}{x}$；

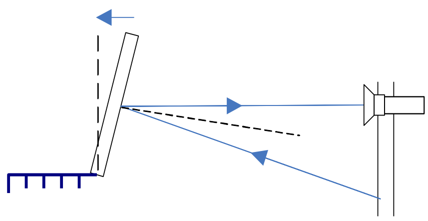
(5) $N = \ln x$　$\mathrm{d}N = \frac{\mathrm{d}x}{x} \Rightarrow u(N) = u(x)/x$；

(6) $N = \sin x$　$\mathrm{d}N = \cos x\,\mathrm{d}x$，$u(N) = \cos x \cdot u(x)$。

第二部分　实验后思考题选解

§5-1 光杆法测弹性模量

1. 如果在望远镜中看到水平叉丝对准的标尺读数是 20cm，而从外部观察望远镜光轴在标尺上的读数不是 20cm，例如是 10cm，若望远镜光轴已基本水平，此时应如何调节平面镜的方位？画出光路图说明。（提示：实际标尺是倒立放置的）



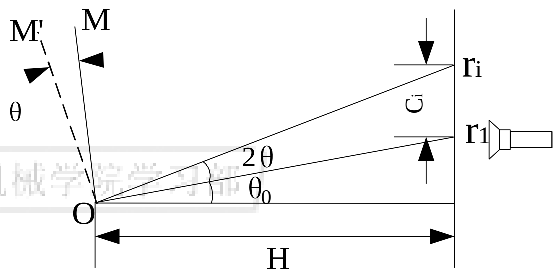
（答）：说明光杆镜面不竖直，应使之上仰（见图）。注意到“望远镜光轴已基本水平”，因此不考虑调整望远镜俯仰。

2. 如果实验中未调至镜面与水平平台垂直，初试如射光线 Or_1 与水平面有可察觉的 θ_0 夹角，如图 5-7 所示。设镜面偏转 θ，试证（θ_0 不作为小量处理）：

（1）此时弹性模量的真实值应为

$$E'=\frac{8FLH}{\pi D^2 RC_I\cos^2\theta_0}$$

（2）如果采用式（5-5）计算，所产生的相对误差为 $-\sin^2\theta_0$。



（答）：设光杆镜面因钢丝伸长转过的角度为 θ，则钢丝伸长 $\delta L=\theta R$。

由图知

$C_i=H[tg(\theta_0+2\theta)-tg\theta_0]=H\left[\frac{dtgX}{dX}\right]_{X=\theta_0}2\theta=\frac{2H\theta}{c^2\theta_0}\Rightarrow \delta L=R\theta=\frac{RC_i}{2H}c^2\theta_0$。如果未按上式进行修正，仍按 $\delta L=R\theta=\frac{RC_i}{2H}$ 处理，将使 δL 偏大，E 的测量值变小。由此带入的误差为：

$$\frac{\Delta E}{E'}=\frac{E-E'}{E'}=\left(\frac{1}{\delta L_{测量}}-\frac{1}{\delta L_{真}}\right)/\frac{1}{\delta L_{真}}=\frac{\delta L_{真}}{\delta L_{测量}}-1=\cos^2\theta_0-1=-\sin^2\theta_0。$$

3. 利用 §4-3 示例一的实验数据，分析在本实验条件下，那些量的测量对实验准确度的影响最大？实验中采取了什么措施？（提示：从相对不确定度出发，分别计算各分量的贡献）

（答）：按教材示例，得：

<table>
<tr><td rowspan="2">$u(L)/L$</td><td rowspan="2">$u(H)/H$</td><td colspan="2">$2u(D)/D$</td><td rowspan="2">$u(R)/R$</td><td colspan="2">$u(C)/C$</td></tr>
<tr></tr>
<tr><td rowspan="2">3.57×10^{-3}</td><td rowspan="2">2.45×10^{-3}</td><td>$2u_A(D)/D$</td><td>$2u_B(D)/D$</td><td rowspan="2">1.16×10^{-3}</td><td>$u_A(C)/C$</td><td>$u_B(C)/C$</td></tr>
<tr><td>8.32×10^{-3}</td><td>1.91×10^{-2}</td><td>6.63×10^{-3}</td><td>2.60×10^{-2}</td></tr>
</table>

可见，$u(C)$ 和 $u(D)$ 的影响最大，他们分别来自 $u_B(C)/C$ 和 $2u_B(D)/D$。实际上只计及这两项的方差合成就达 3.2 %，和 $u(E)/E=3.4\%$ 相差无几。上述不确定度分量主要来自仪器误差，因此很难再通过改善测量方法来提高准确度。反过来也说明本实验在测量方法上的安排上是合理的，C、D 的测量中采取了多次测量的措施，没有给 E 带入新的误差。

§5-2 扭摆法测转动惯量

1. 测塑料球和细长杆的转动惯量是在一个金属制作上进行的，它会引起误差吗？计算塑料球和细长杆转动惯量的理论值时，是否应该加上其支座（金属块）的质量？合理的修正应当怎样进行？

（答）：支座的转动惯量是对塑料（木）球和细长杆的转动惯量的测量结果会有影响，属于系统误差（正误差）。但其量级一般不会超过其他 带入的不确定度。该系统误差的修正可以这样进行：在测得球（或杆）的周期T后，取走球（或杆）留下支架，单测其摆动周期T$_{支架}$。并按公式进行修正：$J_{修正}=\dfrac{K(T^2-T_{支架}^2)}{4\pi^2}$ 。

下面给出塑料（木）球转动惯量的典型数据。$K=\dfrac{4\pi^2 J_{柱}}{T_{柱}^2-T_0^2}=2912\times10^{-2}N\cdot m, T=1.463s, T_{支架}=0.172s$，不考虑支架的影响，$J_{测}=\dfrac{KT^2}{4\pi^2}=1.578\times10^{-3}kg\cdot m^2$；考虑支架的影响，$J_{修正}=\dfrac{K(T^2-T_{支架}^2)}{4\pi^2}=1.556\times10^{-3}kg\cdot m^2$，两者差 1.4%。

需要指出的是支架的转动惯量对细长杆和球的影响较小；但其质量与杆和球的质量相比，影响却很大（约为杆和球质量的 60%与 5%），因此在称衡金属细长杆与塑料（木）球的质量时，必须将支架取下，否则会带来极大误差。

2. 根据实验中的具体情况，对你的设计的实验次数加以说明。

（答）：略。

3. 由测量结果算出小滑块绕过质心且平行其端面的对称轴的转动惯量，并与理论值对比从中体会小结所述原则。

（答）：典型数据：小滑块绕过质心且平行其端面的转动惯量的理论计算和测量结果分别为：$J_{块}=\dfrac{M(D_{外}^2+D_{内}^2)}{16}+\dfrac{Ml^2}{12}=4.096\times10^{-5}kg\cdot m^2$

$$J_{块测}=\frac{J_{总测}-J_{杆测}-2M_{块}X^2}{2}=3.586\times10^{-5}kg\cdot m^2$$

百分差达 12%。原因是测量计算公式虽然无误差，但由于$J_{块测}$是大数相减获得，造成误差很大。本例中，$J_{总测}=5.36608\times10^{-3}kgm^2$; $J_{杆测}+2M_{块}X^2=4.09129\times10^{-3}+1.20308\times10^{-3}$，两式相减得 $0.7171\times10^{-4}kg\cdot m^2$，前面的 2 位数都减去了（有效数字减少了两位）。

§5-3 测定冰的熔解热

1．定性说明下列各种情况将使测出的冰的熔解热偏大还是偏小？

1) 测 T2 前没有搅拌；

2) 测 T2 后到投入冰相隔了一定时间；

3) 搅拌过程中把水溅到量热器的盖子上；

4) 冰中含水或冰没有擦干就投入；

5) 水蒸发，在量热器绝缘盖上结成露滴。

（答）：利用公式 $L=\dfrac{1}{M}(c_0m+c_1m_1+c_2m_2+\delta m)(T_2-T_3)-c_0T_3+c_1T_1$ 进行讨论。

误差来源	L 测量的变化	说明
测 T2 前没有搅拌	偏大	测 T2 前没有搅拌→ T2 测量偏大
测 T2 到投入冰相隔了一定时间	偏大	计算 L 时使用了偏大的 T2
搅拌中把水溅到量热器的盖子上	偏大	水溅出→剩余的水 T3 偏小
冰中含水或冰没有擦干就投入	偏小	计算 L 是使用了偏大的 M
水蒸发在量热器盖上结成露滴	偏大	水蒸发带走热量→T3 偏小

2．结合测量数据说明，如果不作散热修正，会给熔解热 L 测量带来多大的误差？

（答）：按具体数据进行讨论，通常 L 偏小。

3．如果冰块中含有少量的水，且水的质量与整个冰块的质量之比为 x，试证明：

$\dfrac{\Delta^*L}{L}=-x$ 其中 Δ^*L 为测量值 L 的可以修正的系统误差，负号表示冰中含水

使L值减小。

（答）：设M由M'克的冰和ΔM克的水组成：$M=M'+\Delta M$ 。测量公式为

$c_1M(T_0-T_1)+ML+c_0M(T_3-T_0)=(c_0m+c_1m_1+c_2m_2+\delta m)(T_2-T_3)=C\Delta T$，而实际上 $c_1M'(T_0-T_1)+M'L_{真}+c_0(M'+\Delta M)(T_3-T_0)=C\Delta T$ 故 $c_1M'(T_0-T_1)+M'L_{真}+c_0(M'+\Delta M)(T_3-T_0)=c_1M(T_0-T_1)+ML+c_0M(T_3-T_0)$，整理后得 $M'(L-L_{真})+\Delta M\left[L+c_1(T_0-T_1)\right]=0$，考虑到 L 甚大于$c_1(T_0-T_1)$，略去后者的贡献，我们有$\frac{\Delta L}{L}=\frac{L-L_{真}}{L}=-\frac{\Delta M}{M'}=-x$。

§5-4 电量热法和焦耳热功当量实验

1． 如果不作散热修正，J=?

（答）：如果不作散热修正，$J=\frac{V^2t}{RCm\Delta\theta}$。式中 R 是加热器的电阻值，Cm 是系统的总热容，t 为加热器通电时间，$\Delta\theta=(\theta-\theta_0)$为经过该时间后系统的温度变化。如果已用一元线性回归方法处理数据，$J_{不做散热修正}$也可由$J=\frac{V^2t}{RCm\overline{y}}$求出，式中$\overline{y}$是因变量$y_i\equiv(\theta_{i+1}-\theta_i)/\Delta t$的平均值。

2． 以下几种因素将对 J 的测量带来什么影响？

（1）实验中功率电阻因热效应带来阻值变化；
（2）功率电阻所加电压因电源不稳定而下降；
（3）工作媒介水因搅拌而溢出；
（4）搅拌器作功。

（答）：由公式$J=\frac{V^2t}{RCm\Delta\theta}$进行讨论。

误差来源	$J_{测量}$的变	说明
实验中功率电阻因热效应带来阻值变化	偏大	功率电阻因热效应上升，计算公式中使用的 R 偏小→$J_{测量}$偏大
功率电阻所加电压因电源不稳定而下降	偏大	计算$J_{测量}$时使用了偏大的 V
工作媒质水因搅拌而溢出	偏小	水溅出→剩余的水$\Delta\theta$偏大
搅拌器作功	偏小	计算$J_{测量}$时没有加上搅拌器作功的贡献

3． 本系统中散热系数 K=?

（答）: 由 $\dfrac{d\theta}{dt}=\dfrac{V^2}{JRCm}-K(\vartheta-\vartheta_{环})$，知一元线性回归系数 $a=\dfrac{V^2}{JRCm}$，b=-K，式中 Cm 是系统的总热容。因此可以直接算出散热系数 K=-b。本实验中 $K\sim1\times10^{-4}/秒$。

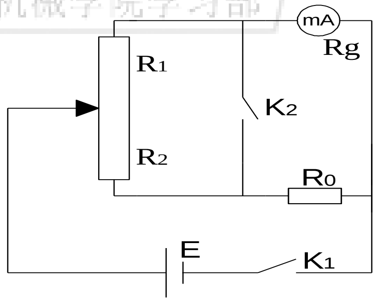
§5-9 电桥的自组和使用

1. 设接线时混入一根断线，如果这根断线接在桥臂上，操作中检流计有什么现象？若断线在电源 E 回路，又会怎样？如果已经分析出电路中有一根断线，但无三用表或多余的好导线，用什么简便方法查处这根断线的位置？（提示：将可能是断的导线与肯定是好的导线在电路的位置交换，视检流计的状态变化判定。）

（答）: 如断线处在任何一个断臂上，检流计所在的桥上将始终有电流通过，这时检流计剧烈偏转。如断线处在电源所在的支路，电桥无电源供电，检流计中无电流通过。

如已知只有一根断线，识别的办法是在不损坏检流计的前提下，把怀疑是断线的导线与电源或桥上的电线对换，如这时检流计由剧烈偏转➞不偏转，即可肯定桥臂上的这根导线是断线；类似的，可以把怀疑是断线的电源或桥上的导线与桥臂上的导线对换，当检流计由不偏转剧烈➞偏转时即可确认。

2. 用滑线变阻器一个，电阻箱一个，待测毫安表，～1.5V 的甲电池一个，开关两个自组电桥测一毫安表的内阻（～30Ω，量程 3mA），要求画出电路图并说明测量原理与步骤。



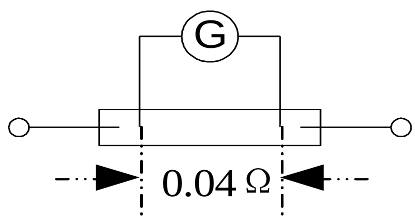
（答）: 如图接好电路，其中滑线变阻器的滑动端置于变阻器的中央，它把变阻器分成近似相等的两部分 R_1 和 R_2；R_0 是电阻箱。粗调 $R_0=30\Omega$，确认毫安表偏转正常后，通断 K_2，按照毫安表的偏转变化调整，直至接通与断开 K_2，毫安表偏转不发生变化为止。这表明电桥已平衡（K_2 接通时，桥上无电流通过）。再互换 R_0 和毫安表，重复上述过程，当 $R_0\to R_0'$ 重新平衡。则毫安表内阻 $Rg=\sqrt{R_0R_0'}$。为保证毫安表有正常偏转，应满足 $E/(Rg+R_2)\sim3\times10^{-3}A$，即 $R_2\sim\dfrac{E}{Ig}-Rg=\dfrac{1.5}{3\times10^{-3}}-30=470\Omega$。滑线变阻器总阻值应大于 940Ω，可取 1000Ω。

3. 有一种说法，选配检流计的原则是灵敏度误差不应超过测量仪器允许基本误差的 1/3。这是基于什么原则的考虑？本实验选配的检流计符合上述原则吗？

（答）： 如果$\frac{\Delta_{灵}}{\Delta_{仪}}=\frac{1}{3},\frac{\Delta_{灵}^2}{\Delta_{仪}^2}=\frac{1}{9}$，按方差合成公式，灵敏度误差与仪器误差对合成不确定度的贡献差不多一个数量级。这样做前者的贡献相对于仪器误差通常可以略去。可以保证系统的准确度不会因检流计使用不当而受影响。在本实验中只要 E 不要太小（例如 E⩾1.5V），选配的检流计符合上述原则。

§5-10 双电桥测低电阻

1． 将一量程$I_g=50\mu A$，内阻$R_g=4.00\times10^3\Omega$的表头改装为一个量程为 5A 的安培表，并联的分流电阻是多少？应如何正确连接？



（答）： 分流电阻$R=\frac{IgRg}{I-Ig}=4.00\times10^{-2}\Omega, R为0.04\Omega$的低阻，必须采用四端 7 纽连接方式（见图）

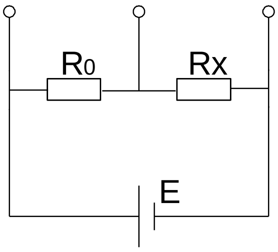
2． 如果R_n、R_x与“3”“4”“7”“8”连接的四根导线中，有一根是断线，电桥能否调节平衡？若能调节平衡，Rx 的测量值是否正确？为什么？

（答）： 3、8 断，桥路被破坏，检流计中始终有电流通过，故不能“平衡”。4、7 断，双桥变为单桥。虽可以平衡，但不可能获得正确结果。以断 4 为例。此时的单桥桥臂$R_N\to R_N+\Delta R$，其中$\Delta R=R_x$右端的附加电阻+跨线电阻$R+R_N$左侧的附加电阻。单桥平衡是$R_x=\frac{\Delta R+R_N}{R_1}R_3$，因为$\Delta R$相对$R_N$不能忽略，$R_x$的测量结果将明显偏离真值。

§5-11 补偿法和电位差计

1． 如何用电位差计测量电流或电阻，没有标准电池行不行？

（答）： 电位差计是测电压的仪器。测量电流、电阻的关键是如何把它们转换为电压的测量。测电流可以通过测量待测支路中某个已知电阻R_0上的电压降V_0，即可推算出$I_0=V_0/R_0$。

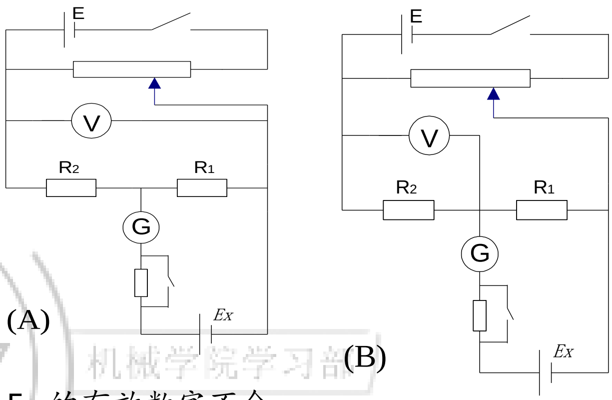


测电阻的办法如图示。R_0是已知电阻，R_X是待测电阻，用电位差计分别测出R_0和R_X上的电压降V_0，V_X，即可求得$R_X=R_0V_X/V_0$。测电阻时可以没有标准电池，测电流则不能。

2. 根据给出的仪器，采用补偿法测出干电池的电动势，使测量结果至少有 3 位有效数字，画出原理图并做必要说明。

仪器：直流电压表（0.5 级，量程 1.5-3.0-7.5-15V）,AC5 指针式检流计，电阻箱（0.1 级，0～99999.9Ω）两个，电源（1A,3V）， 开关两个，导线若干。

（答）： 测量电路如图所示，其中 R_1和R_2 为电阻箱。当检流计 G=0 时，R1 上的电压降 V1 与 Ex 相等：$Ex=V_1=\dfrac{VR_1}{R_1+R_2}$。V 是电压表读数。



(A)　(B)

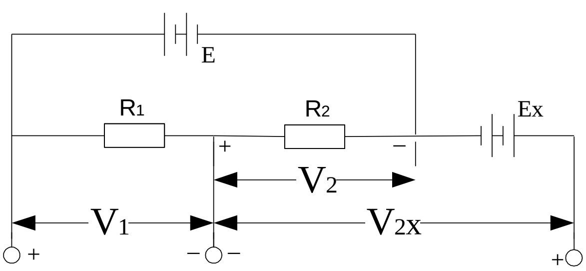
说明：（1）补偿原理使 Ex 的测量不会因测量电路而带来新的接入误差。

（2）V 取 3V 档，△V=0.5%×3V=0.015，其有效数字不会少于 3；电阻箱为 0.1 级，只要取值不太小，例如在 1KΩ以上，即可保证有 5 位有效数字。因此按有效数字的运算法则，Ex 的有效数字。因此按有效数字的运算法则，Ex 的有效数字不会少于 3 位。

（3）本题中的电压表还可以有其它接法。但不能采用题图（B）的接法。

3. 怎样用 UJ25 型电位差计去测一个 4.5V 的电源电动势？画出线路图，说明测量方法。

（答）： 4.5V 超过了 UJ25 的量程$(\sim 1.9V)$，为此可采用图中所示的办法，其中 R1 和 R2 是电阻箱，E 是辅助电源。适当选择 E，R1 和 R2，使 $\left|Ex-V_2\right|=\left|Ex-\dfrac{V_1}{R_1}R_2\right|\le 1.9V$ 即可用电位差计进行测量。$Ex=V_{2x}+V_1R_2/R_1$。



说明：（1）实际操作时可取 E≈4.5V，$R_1=1k\Omega$，$R_2=2k\Omega$。这时V_1≈1.5V，V_2≈3V，V_{2X}≈1.5V，V_1和V_{2X}均在 UJ25 的测量范围内。

（2）该操作方案中 Ex 不处于充、放电状态，从而其电动势可以得到严格测定。

（3）必须注意被测电压的正负极性（参见图中标示）。

§5-12 声速测量和示波器的使用

1. 在双踪示波器上同时显示出两个相同频率的正弦信号（图 5-56），请你确定两者的相位差。

（答）：信号的周期可由 A 读出，信号的相位差可由 B 读出，图中 A ≈6.0div，B ≈ 1.2div 。故两者的相位差 $\Delta\phi = 2\pi B/A \approx 0.4\pi = 72^{\circ}$。即信号 P 比 P' 超前 72°。

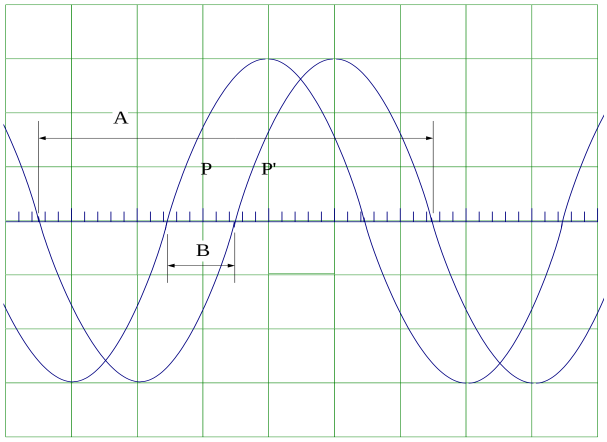


图5-56　实验思考题1图

2. 定量讨论以下几种因素给声速测量带来的误差或不确定度。

（1）发送、接收换能器端面平行，但和卡尺行程有 5° 的倾斜。

（2）实验中温度变化≈$1^{\circ}C$。

（3）振幅极大值位置的判断有≈0.1mm 的不确定度。

（答）：（1）将给声速测量带来正误差：

$$\frac{c_{测}-c_{真}}{c_{真}} = \frac{I_{测}-I_{真}}{I_{真}} = \frac{I_{测}-I_{测}\cos\theta}{I_{测}\cos\theta} = \frac{1}{\cos\theta}-1 = 3.8\times10^{-3}。$$

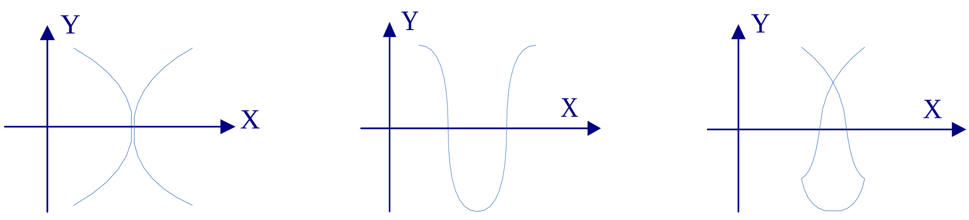
（2）将给声速测量带来的不确定度为

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{1}{2}\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{2}\frac{\Delta t}{273.15+t} = 1.7\times10^{-3}。$$

（3）将给声速测量带来的不确定度为

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta_b \delta x}{\delta x} = \frac{0.1\times10^{-3}}{150\times10^{-3}} = 6.7\times10^{-4}。$$

3. 在示波器的 Y 轴输入频率为 f_y 的正弦信号，X 轴输入频率为 f_x 的锯齿波扫描信号，荧光屏上分别测到（a）（b）（c）三种图形（图 5-57），试给出它们的频率比 f_y ： f_x 。



（答）： 1：2 ； 1：1 ； 1：3。

§5-13 动态法测弹性模量

1． 由于不能把支点防在试样棒的节点上，将会给测量造成多大的误差或不确定度？能否找到一种能更精确测定 f 的办法？

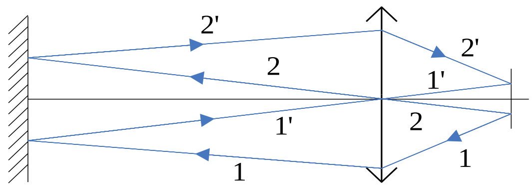
（答）： 可以有目的地改变悬挂的位置，测出共振频率与相应悬线位置的关系曲线，从而拟合出悬线在节点处的共振频率。这也是修正系统误差的一种方法。

2． 能否用李萨如图来测得共振频率？如果可以，请提供测量方案。

（答）： 在强迫力的作用下，弹簧振子受迫振动与强迫力之间存在相位差 β。当强迫力的频率小于弹簧振子固有频率时，$\beta<\pi/2$；当强迫力的频率大于强迫力的频率时，$\beta>\pi/2$；当强迫力的频率等于强迫力的频率时，$\beta=\pi/2$。该关系可用于 f 的测量。方法如下：把激励信号和输出信号分别接示波器的 X 轴和 Y 轴，仔细调节信号发生器的输出频率，当在某频率左右两侧出现椭圆的旋转方向相反时，该频率即为共振频率。

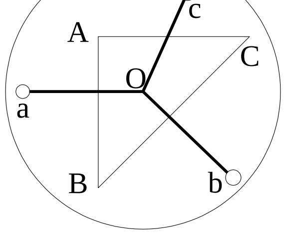
§5-14 分光仪的调整和三棱镜顶角测量

1． 为什么当绿“十”字对准上叉丝中心时，望远镜光轴必和平面镜镜面垂直？（作光路图说明）



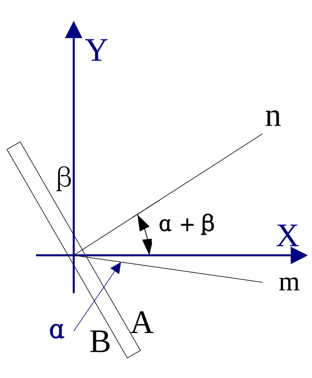
（答）： 叉丝位于望远镜物镜的焦面上，下（方）叉丝经物镜向平面镜出射绿色的平行光。该平行光经平面镜反射后，又聚焦在望远镜的叉丝面上，此即望远镜视野中看到的绿“十”字。只有当望远镜的光轴与平面镜垂直时，下叉丝反射像成像在上叉丝位置处（以中心叉丝为对称轴）；如望远镜的光轴与平面镜不垂直，反射像不能成像在上叉丝位置上。因此可有绿“十”字（下叉丝的反射像）位置判断望远镜光轴是否与平面镜垂直。

2． 在调好望远镜基础上，欲测定直角三棱镜的直角顶角，应如何放置和调整此三棱镜？（作图表示并说明方法）



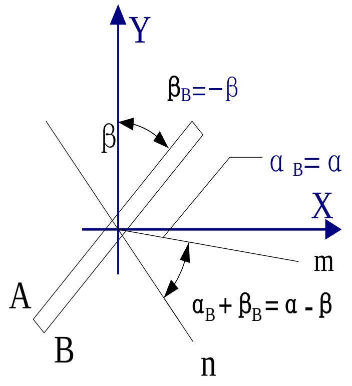
（答）： 让被测三棱镜的一个光学面（例如 AC）与平台的某个径线（例如 aa）平行，这是，调节 a 螺钉将不会影响 AC 面与主轴的平行关系。因此，调整可以这样进行：先用望远镜对准 AC 面，调整螺钉 b 或 c，使绿十字与上叉丝重合；再让望远镜对准 AB 面，调螺钉 a，使绿十字与上叉丝重合。

3． 用半调法调整望远镜光轴与仪器主轴垂直时，若每次调整量严格为 1/2 偏离量（实际上做不到），问反转平面镜正反各几次，就可以使望远镜光轴垂直仪器主轴？



（答）： 设望远镜期望的光轴方向为 X，实际的光轴方向为 m，

平面镜期望的镜面（镀膜面）方向为 Y，实际的法线方向为 n，开始时望远镜光轴m 与X的夹角为α（顺时针为+），平面镜镜面与Y的夹角为β（逆时针为+）。m与n 夹角为$\alpha+\beta$（设为A面），这时如把平面镜转过１８０°，m与n 夹角为$\alpha-\beta$（设为B面）。当$\alpha+\beta=0$时，A处望远镜与当前镜面A垂直。先在A面运用半调法：



$$\alpha_A=\alpha\to\alpha_A'=\alpha-\frac{\alpha+\beta}{2}=\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\beta_A=\beta\to\beta_A'=\beta-\frac{\alpha+\beta}{2}=\frac{\beta-\alpha}{2}$$

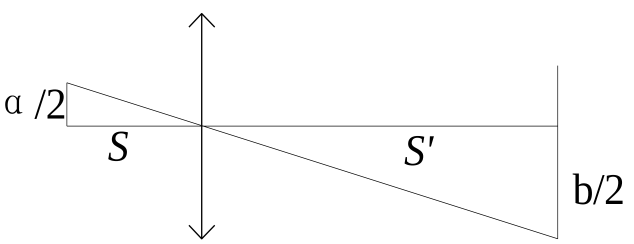
这时，$\alpha_A+\beta_A=0$，说明对A，望远镜与平面镜垂直。

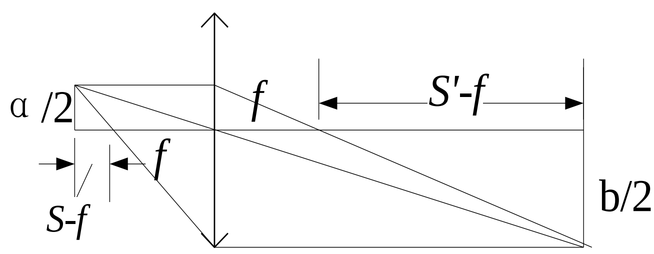
再将平面镜转过180°（B面）：$\alpha_B'=\alpha_A'=\dfrac{\alpha-\beta}{2}$，$\beta_B'=-\beta_A'=\dfrac{\alpha-\beta}{2}$，$\alpha_B'+\beta_B'=\alpha-\beta$，说明对B，望远镜与平面镜的相对关系不变，即绿十字位置不动，只要在B面再用一次半调法，系统就调好了。

（半调法的最大优点是，严格的“半调”不会改变平面镜转过 180°后望远镜视野中的绿十字位置，也就是说可以把两个相关的调整“孤立”起来处理。）

§5-15　斐涅尔双棱镜干涉测波长

1．已知透镜距$f\approx20cm$，设测S时位置判断不准的最大偏差$\Delta S=0.5mm$. 试计算由此引起b 测量的最大相对偏差$\dfrac{\Delta(b)}{b}$是多少？（提示：在整个测量过程中始终满足$D=S+S'\geq4f$）





（答）： 由于透镜成像在某个物距范围（△S）内像质好坏难以分辨，会给 b 的测量造成误差。即由△S→ △b。如图（左图），

$$\frac{a}{S}=\frac{b}{S'}=\frac{b}{D-S}\qquad b=\frac{a(D-S)}{S}=\frac{aD}{S}-a\Rightarrow\Delta b=\frac{aD\Delta S}{S^2}$$

$$\frac{\Delta b}{b}=\frac{aD\Delta S}{S^2}\cdot\frac{S}{a(D-S)}=\frac{D\Delta S}{S(D-S)}=\frac{\Delta S}{f}=\frac{0.5}{20}=0.025\text{。}$$

说明：由△S 导出△b 有三中可能。除上述途径外，也可以由（右图）$\frac{a}{S-f}=\frac{b}{f}\Rightarrow\Delta b=\frac{af\Delta S}{(S-f)^2}$ 或 $\frac{f}{a}=\frac{S'-f}{b}=\frac{D-S-f}{b}\Rightarrow\Delta b=\frac{a\Delta S}{f}$，当 $D=4f$ 时，上述结果一致。

2．扩束镜的焦距为 f，如何计算 S 和 S'？实验中使用的是 100 倍的扩束镜，又如何计算 S 和 S'？

（答）： 扩束镜实际就是一个焦距很短的凸透镜，激光束可视作平行光如射。计算 S 和 S' 时应考虑扩束镜对虚光源位置的修正，即虚光源前方 f 处（扩束镜的后焦面）。（视角）放大率 M 与焦距 f 的关系为：$M=S_0/f$，式中 $S_0=25cm$ 为人眼的明视距离，若 $M=100$，则 $f=2.5mm$。

3．按照你的测量数据，定量讨论哪个（些）量的测量对结果准确度的影响最大？原因何在？

（答）： 略（此题可仿照§5-1 光杠杆法测量弹性模量的第 3 题讨论，这里不再赘述。）

§5-16 圆孔衍射实验

1．已知地球与月亮的距离约为 38 万公里，按照瑞利判据（当一个圆斑像的中心刚好落在另一个圆斑像的一级暗像上时，两个像刚刚能够分辨），用口径为 1m 的天文望远镜能分辨月球表面两点的最小距离是多少。可见光的平均波长取 550nm。

（答）： 地球与月球的距离 $L=3.8\times10^8m$；望远镜口径 $2a=1m$；设距离为 S 的两点刚能够分辨，则 $1.22\lambda=2aS/L, S=1.22\lambda L/2a=255m$。

说明：衍射效应给光学仪器分辨本领的限制，是不能用提高放大率的办法来克服的。对望远镜来说，为了提高分辨率的本领必须加大物镜的直径；而近代电子显微镜由于电子的小，最小分辨距离比光学显微镜大大提高。

2．在圆孔衍射中，只有当衍射屏到观察屏的距离足够大时，才可以按远场即夫琅和费衍射处理。请你用斐涅耳半波带理论，给出远场区的定量判据。（提示：圆孔夫琅和费衍射的中心为 0 级亮斑；而按斐涅耳半波带理论，圆孔中心和边

缘到衍射图样中心的光程差$z-z_0 \le \lambda/2$时，中心始终为 0 级亮斑。）

（答）：圆孔中心到衍射中心的光程为 z0，则边缘到衍射中心的光程为 $\sqrt{a^2+z_0^2}$，由

$$\sqrt{a^2+z_0^2}-z_0 \le \frac{\lambda}{2} \xrightarrow{a/Z_0<<1} z_0\left[1+\frac{1}{2}(\frac{a}{z_0})^2\right]-z_0 \le \frac{\lambda}{2} \to z_0 \ge \frac{a^2}{\lambda}$$

。

§5-17 牛顿环干涉测曲率半径

1. 在实验中若遇到下列情况，对实验结果是否有影响？为什么？
（1）牛顿环中心是亮斑而非暗斑。

（2）测D_m 和D_n时，叉丝交点未通过圆环的中心，因而测量的是弦长，而非是真§5-16 正的直径（参见图 5-75)。

（答）：均无影响。从一元线性回归的数据特点来说，(1)(2) 只影响拟合直线的截距（回归系数 a ）不影响直线的斜率（回归系数 b）。以（2）为例。

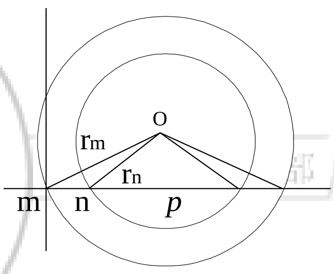


图5-75 思考题2图

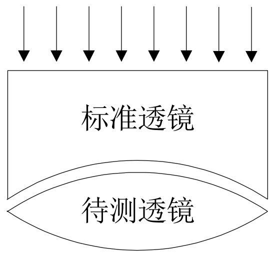


图5-76 思考题2图

$D_m^2=x_m^2+4h^2, D_n^2=x_n^2+4h^2,\cdots\cdots$，式中 x_i 是相应的波长，h 是圆心到该弦长的垂直距离。于是式（5−70）

$$D^2=4k\lambda R \to x^2=4k\lambda R-4h^2 \quad k=0,1,2,\cdots$$

2. 牛顿环法常被工厂用于产品表面曲率的检验，方法是把一块标准曲率的透镜放在被检透镜上（如图 5-76)，观察干涉条纹数目及轻轻加压时条纹的移动。试问如果被检凸透镜曲率的半径偏小，将观察到什么现象？为什么？
（答）：如被测透镜曲率半径偏小，条纹将向外扩大。因为透镜间的距离变小了。

§5-18 迈克尔逊干涉仪的调整和波长测量

1. 如果用一束平面光波代替点光源所产生的球面光波照射到干涉仪上，在观察屏处将得到怎样的干涉条纹？
（答）：当 M1＇和 M2 严格平行时，将无条纹，随 M1＇和 M2 的距离变化，光场呈明暗变化。通常 M1＇和 M2 总会有微小的夹角，这时将形成直条纹（劈尖干涉），夹角越小，距离越大。

说明：也可以这样来帮助理解：平面波相当于电光源离观测者→∞，
这时条纹间距→∞。

2. 当 M1 不严格垂直 M2 时会观察到什么现象？为什么？

（答）：M1 不严格垂直 M2 时，将观察到椭圆，甚至只观察到其中的局部。相当于教材图 5-78 的虚光源位置发生偏斜，观察屏与其连线不严格垂直。

3. 迈克尔逊干涉仪常被用来测量空气的折射率。方法是在其中一臂的光路上，插入厚度为 t 的透明密封气室，开始将气室抽成真空，然后对气室缓慢冲气到大气压，同时观察条纹的变化。请说明测量原理并到处计算公式。

（答）：光程差变化了 2t(n-1)，观察到 N 个条纹变化。

$2t(n-1)=N\lambda, n=1+N\lambda/(2t)$。

(其中有些实验在下学期的考试实验中会用到，特别是像三棱镜、迈克尔逊、补偿法等几个实验。大家一定要认真做，不要紧张，遇到不会的，多想一想书中所讲的原理，再加上老师的提示应该没什么问题。)

第三部分　不确定度与数据处理

一、误差与不确定度

1．误差与不确定度的关系

（1）误差：测量结果与客观真值之差　　$\Delta x = x - A$

其中 A 称为真值，一般不可能准确知道，常用约定真值代替：

$$\begin{cases} \text{公认值} - \text{如物理常数等} \\ \text{标准值} - \text{更高精度仪器测量结果} \\ \text{理论值} - \text{理论公式计算结果} \end{cases}$$

对一个测量过程，真值 A 的最佳估计值是平均值 $\bar{x}$ 。

在上述误差公式中， 由于 A 不可知，显然 Δx 也不可知，对误差的最佳估计值是不确定度 $u(x)$ 。

（2）不确定度：对误差情况的定量估计，反映对被测量值不能肯定的程度。

通常所说“误差”一般均为“不确定度”含义。

不确定度分为 A 、B 两个分量，其中 A 类分量是可用统计方法估计的分量，它的主要成分是随机误差。

2．**随机误差：**多数随机误差服从正态分布。定量描述随机误差的物理量叫标准差。

（1）标准差与标准偏差

标准差 $\sigma = \sqrt{\lim\limits_{k\to\infty} \dfrac{\sum (x_i - A)^2}{k}}$

由于真值 A 不可知，且测量次数 k 为有限次 ，故 σ 实际上也不可知，于是用标准偏差 S 代替标准差 σ ：$S(x) = \sqrt{\dfrac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{k-1}}$ ——单次测量的标准偏差

结果表述：　　$x_i \pm S(x)$　　（置信概率 68.3%）

真值的估计值　　**单次测量标准差最佳估计值**

$S(x)$ 的物理意义：在有限次测量中，每个测量值平均所具有的标准偏差。（并不是只做一次测量）

通常不严格区分标准差与标准偏差，统称为标准差。

（2）平均值的标准差

真值的最佳估计值是平均值，故结果应表述为：

$$\bar{x} \pm S(\bar{x})$$ （置信概率 68.3%）

真值的最佳估计值　　　　平均值的标准差最佳估计值

其中 $S(\bar{x}) = \sqrt{\dfrac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{k(k-1)}}$ ——平均值的标准偏差

例 1：某观察量的独立测量的结果是 $X_1, X_2, \cdots, X_n$。试用方差合成公式证明平均值的标准偏差是样本标准偏差的 $\dfrac{1}{\sqrt{n}}$，即 $S(\overline{X}) = \dfrac{S(X)}{\sqrt{n}}$。

解：$\overline{X} = \dfrac{\sum X_i}{n}$ 由题知 X_i 相互独立，则根据方差合成公式有 $u(\overline{X}) = \dfrac{\sqrt{\sum u^2(X_i)}}{n}$

利用样本标准偏差的定义，可知 $u(X_i) = S(X) \quad i = 1,2,\cdots,n$

故 $$u(\overline{X}) = S(\overline{X}) = \frac{\sqrt{\sum S^2(X)}}{n} = \frac{S(X)}{n}$$

不确定度的 B 类分量是用非统计方法估计的分量，它主要取决于未定系统误差。

3. 系统误差与仪器误差（限）

（1）系统误差：在同一被测量的多次测量过程中，保持恒定或以可以预知方式变化的那一部分误差称为系统误差。已被确切掌握了其大小和符号的系统误差，称为可定系统误差；对大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可以在测量过程中采取措施予以消除或在测量中进行修正；而后者一般难以作出修正，只能估计出它的取值范围。

（在物理实验中，对未定系统误差的估计常常利用仪器误差限来进行简化处理）

（2）仪器误差（限）：由国家技术标准或检定规程规定的计量器具的允许误差或允许基本误差，经过适当简化称为仪器误差限，用以代表常规使用中仪器示值和（作用在仪器上的）被测真值之间可能产生的最大误差。

常用仪器的仪器误差（限）：

①长度测量仪器：游标卡尺的仪器误差限按其分度值估计；钢板尺、螺旋测微计的仪器误差限按其最小分度的 $1/2$ 计算。

②指针式仪表：　$\Delta_{仪} = a\% \cdot N_m$　　式中 N_m 是电表的量程，a 是准确度等级。

数字仪表：　$\Delta_{仪} = a\% N_x + b\% N_m$ 或　$\Delta_{仪} = a\% N_x + n$ 字

式中 a 是数字式电表的准确度等级，N_x 是显示的读数，b 是误差的绝对项系数，N_m 是仪表的满度值，n 代表仪器固定项误差，相当于最小量化单位的倍数。

③电阻箱： $\Delta_{仪} = \sum_i a_i\% \cdot R_i + R_0$

式中 R_0 是残余电阻，R_i 是第 i 个度盘的示值，a_i 是相应电阻度盘的准确度级别。

④直流电位差计： $\Delta_{仪} = a\%(U_x + \frac{U_0}{10})$

式中 a 是电位差计的准确度级别，U_x 是标度盘示值，U_0 是有效量程的基准值，规定为该量程中最大的 10 的整数幂。

⑤直流电桥： $\Delta_{仪} = a\%(R_x + \frac{R_0}{10})$

式中 R_x 是电桥标度盘示值，a 是电桥的准确度级别，R_0 是有效量程的基准值，意义同上。

（3）B 类不确定度的处理

在物理实验中，B 类不确定度的来源通常包括以下三种：仪器误差 $\Delta_{仪}$、灵敏度误差 $\Delta_{灵}$ 和估计误差 $\Delta_{估}$。其中灵敏度误差可表示为 $\Delta_{灵} = \frac{0.2}{S} = \frac{0.2}{\Delta n/\Delta x}$。

B 类不确定度与各种误差限之间的关系为 $u_b = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}$。

4. 不确定度的合成

（1）直接测量 x： $u_a(x), u_b(x)$

则 $u(x) = \sqrt{u_a^2(x) + u_b^2(x)}$ （称为合成不确定度）

（2）间接测量 $y = f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 其中 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为相互独立的直接测量量

则 $u(y) = \sqrt{\sum_i (\frac{\partial f}{\partial x_i})^2 u^2(x_i)}$ 或 $\frac{u(y)}{y} = \sqrt{\sum_i (\frac{\partial \ln f}{\partial x_i})^2 u^2(x_i)}$

（3）最终结果表述形式: $N \pm u(N) =$ ________（单位）

（4）有效数字的确定原则:

① 不确定度 $u(N)$ 只保留一位有效数字；

② 测量结果 N 与不确定度 $u(N)$ 小数位数对齐。

例 2：用分光计测棱镜材料的折射率公式为 $n=\dfrac{\sin\frac{A+\delta}{2}}{\sin\frac{A}{2}}$ 。已测得 $A=60°0'\pm2'$，黄光（汞灯光源）所对应的 $\delta=50°58'\pm3'$，则黄光所对应的折射率 $n\pm\Delta n=\underline{1.6479\pm0.0007}$。

解：
$$n=\frac{\sin\frac{A+\delta}{2}}{\sin\frac{A}{2}}=\frac{\sin\frac{60°0'+50°58'}{2}}{\sin\frac{60°0'}{2}}=1.6479$$

$$\ln n=\ln\sin\frac{A+\delta}{2}-\ln\sin\frac{A}{2}$$

$$\frac{dn}{n}=\frac{\cos\frac{A+\delta}{2}(\frac{1}{2}dA+\frac{1}{2}d\delta)\cos\frac{A}{2}\cdot\frac{1}{2}dA}{\sin\frac{A+\delta}{2}\sin\frac{A}{2}}=\frac{1}{2}(ctg\frac{A+\delta}{2}-ctg\frac{A}{2})dA+\frac{1}{2}ctg\frac{A+\delta}{2}d\delta$$

$$\frac{\Delta n}{n}=\sqrt{\frac{1}{4}(ctg\frac{A+\delta}{2}-ctg\frac{A}{2})^2\Delta^2(A)+\frac{1}{4}ctg^2\frac{A+\delta}{2}\Delta^2(\delta)}$$

$$=\sqrt{\frac{1}{4}(ctg\frac{60°0'+50°58'}{2}-ctg\frac{60°0'}{2})^2(\frac{2}{60}\times\frac{180}{\pi})^2}=0.000426$$

$$\Delta n=n\cdot\frac{\Delta n}{n}=1.6479\times0.000426=0.0007\qquad\therefore n\pm\Delta n=1.6479\pm0.0007$$

5．有效数字及其运算法则

（1）有效数字：由若干位可靠数字加一们可疑数字构成。

在不计算不确定度的情况下，结果的有效数字由运算法则决定。

（2）运算法则

①加减法：以参加运算各量中有效数字最末一位位数最高的为准并与之取齐。

$N=A+B-C-D$，则 $u(N)=\sqrt{u^2(A)+u^2(B)+u^2(C)+u^2(D)}$

取决于 $u(A)$、$u(B)$、$u(C)$、$u(D)$ 中位数最高者，最后结果与之对齐。

②乘除法：以参加运算各量中有效数字最少的为准，结果的有效数字个数与该量相同。

$$N=\frac{AB}{CD},\text{则}\frac{u(N)}{N}=\sqrt{\left[\frac{u(A)}{A}\right]^2+\left[\frac{u(B)}{B}\right]^2+\left[\frac{u(C)}{C}\right]^2+\left[\frac{u(D)}{D}\right]^2}$$

取决于其中不确定度最大者，即有效数字个数最少者。

③混合四则运算按以上原则按部就班执行。

例 3：某物理量的计算公式为$Y=\dfrac{k}{1+1.6d/H}$，其中k为常数，1.6 为准确数，$H\approx 16cm$，$d=0.1500cm$ 。若Y的表示式中分母的值具有 4 位有效数字，正确测H的方法是：（ d ）.

（a）用游标卡尺估读到 cm 千分位　　（b）用米尺估读到 cm 百分位

（c）用米尺只读到 mm 位　　（d）用米尺只读到 cm 位

解：$\dfrac{1.6d}{H}\approx\dfrac{1.6\times 0.1500}{16}=0.015$　　分母 $1+\dfrac{1.6d}{H}\approx 1.015$ 为 4 位有效数字

即只需 2 位有效数字即可，故应选（d）。

④特殊函数的有效数字：根据不确定度决定有效数字的原则，从不丢失有效位数的前提出发，通过微分关系传播处理。

例 4：$tg45°2'=1.00116423$ 最多可取几位有效数字?

解：令 $y=tgx$，其中 $x=45°2'$　取 $\Delta x=1'=\dfrac{1}{60}\dfrac{\pi}{180}=0.00029(rad)$

则 $\Delta y=\dfrac{1}{\cos^2 x}\Delta x=\dfrac{1}{\cos^2 45°2'}\times 0.00029=0.00058$

即小数点后第四位产生误差

$\therefore tg45°2'=1.0012$，有五位有效数字。

例 5：双棱镜测波长的计算公式为$\lambda=\dfrac{\Delta x\sqrt{bb'}}{S+S'}$，对实验数据进行处理的计算结果如下表所示。

$\Delta x=0.28144mm$	$b=5.9325mm$	$b'=0.7855mm$	$S=27.65cm$	$S'=75.90cm$
$u(\Delta x)=2.010\times 10^{-4}mm$	$\Delta_1(b)/b=0.025$	$\Delta_1(b')/b'=0.025$	$\Delta_1(S)=0.5cm$	$\Delta_1(S')=0.5cm$
	$\Delta_2(b)=0.005mm$	$\Delta_2(b')=0.005mm$	$\Delta_2(S)=0.05cm$	$\Delta_1(S')=0.5cm$

注：下标 1 代表来自方法误差，下标 2 代表来自仪器误差。

要求：（1）给出测量结果的正确表述（包括必要的计算公式）。

（2）定量讨论各不确定度的分量中，哪些是主要的，哪些是次要的，哪些是可以忽略的？如果略去次要因素和可以忽略项的贡献，不确定度的计算将怎样简化？结果如何？

解：（1）$\lambda=\dfrac{\Delta x\sqrt{bb'}}{S+S'}=\dfrac{0.28144\times\sqrt{5.9325\times 0.7855}}{(276.5+759.0)}=5.86716\times 10^{-4}mm$

$$\ln\lambda=\ln\Delta x+\frac{1}{2}\ln b+\frac{1}{2}\ln b'-\ln(S+S')$$

$$\frac{d\lambda}{\lambda}=\frac{d(\Delta x)}{\Delta x}+\frac{db}{2b}+\frac{db'}{2b'}-\frac{dS}{S+S'}-\frac{dS'}{S+S'}$$

$$\frac{u(\lambda)}{\lambda}=\sqrt{\left[\frac{u(\Delta x)}{\Delta x}\right]^2+\left[\frac{u(b)}{2b}\right]^2+\left[\frac{u(b')}{2b'}\right]^2+\left[\frac{u(S)}{S+S'}\right]^2+\left[\frac{u(S')}{S+S'}\right]^2}$$

其中 $\frac{u(\Delta x)}{\Delta x}=0.000714$

$$\frac{u_1(b)}{2b}=0.00722 \quad ,\ \frac{u_2(b)}{2b}=0.000243\rightarrow\left[\frac{u(b)}{2b}\right]^2=\left[\frac{u_1(b)}{2b}\right]^2+\left[\frac{u_2(b)}{2b}\right]^2$$

$$\frac{u_1(b')}{2b'}=0.0072 \quad ,\ \frac{u_2(b')}{2b'}=0.00184\rightarrow\left[\frac{u(b')}{2b'}\right]^2=\left[\frac{u_1(b')}{2b'}\right]^2+\left[\frac{u_2(b')}{2b'}\right]^2$$

$$\frac{u_1(S)}{S+S'}=0.0027 \quad ,\ \frac{u_2(S)}{S+S'}=0.000279\rightarrow\left[\frac{u(S)}{S+S'}\right]^2=\left[\frac{u_1(S)}{S+S'}\right]^2+\left[\frac{u_2(S)}{S+S'}\right]^2$$

$$\frac{u_1(S')}{S+S'}=0.0027 \quad ,\ \frac{u_2(S')}{S+S'}=0.000279\rightarrow\left[\frac{u(S')}{S+S'}\right]^2=\left[\frac{u_1(S')}{S+S'}\right]^2+\left[\frac{u_2(S')}{S+S'}\right]^2$$

于是得 $u(\lambda)=6.53\times10^{-6}mm$，$\lambda\pm u(\lambda)=(587\pm7)nm$。

（2）由前面的计算可知，不确定度主要来自$\frac{u_1(b)}{2b}$和$\frac{u_1(b')}{2b'}$，次要因素是$\frac{u_2(b')}{2b'}$、$\frac{u_1(S)}{S+S'}$和$\frac{u_1(S')}{S+S'}$，可以忽略的因素是$\frac{u(\Delta x)}{\Delta x}$、$\frac{u_2(b)}{2b}$、$\frac{u_2(S)}{S+S'}$和$\frac{u_2(S')}{S+S'}$。

若只考虑主要项的贡献：$$\frac{u(\lambda)}{\lambda}=\sqrt{\left[\frac{u_1(b)}{2b}\right]^2+\left[\frac{u_1(b')}{2b'}\right]^2}=\frac{\Delta_1(b)}{\sqrt{6}b}=0.102$$

$u(\lambda)=6nm$ ， $\lambda\pm u(\lambda)=(587\pm6)nm$，比严格计算的结果稍小但相差无几。

二、数据处理方法

1． **列表法：**按一定规律把数据列成表格。

列表原则：

（3） 表格的标题栏中注明物理量的名称、符号和单位；
（4） 记录原始数据（如记录刻度数，而不是记录长度）；
（5） 简单处理结果（如算出长度）或函数关系；
（6） 参数和说明（如表格名称、仪器规格、环境参数、常量以及公用单位等）。

如：热功当量实验数据记录

$c_0 = 1卡/克\cdot°C$ $c_1 = 0.0883卡/克\cdot°C$ $c_2 = 0.170卡/克\cdot°C$ $R =$ ____Ω

$V =$ ___V

环境温度 $\theta_{环}(°C)$			$M_0 + M_1(g)$			$M_1(g)$	$M_0(g)$	$M_2(g)$
实验前	实验后	平均	实验前	实验后	平均			

$t(\text{min})$	0	1	2	3	4	5	6	7
$V_\theta(V)$								
$\theta(°C)$								

2．**作图法：**把实验数据用自量和因变量的关系作成曲线，以便反映它们之间的变化规律或函数关系。

作图要点：

⑴ 原始数据列表表示——见列表法；

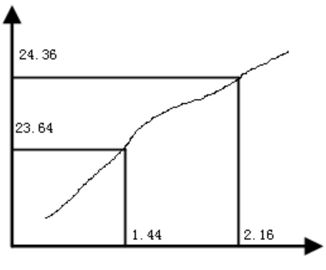
⑵ 坐标纸作图，图纸大小以不损失有效数字和能包括所有点为最低要求，因此至少应保证坐标纸的最小分格（通常为 1mm）以下的估计位与实验数据中最后一位数字对应；

⑶ 选好坐标轴并标明有关物理量的名称（或符号）、单位和坐标分度值。其中分度比例一般取 1、2、5、10……较好，以便于换算和推点；

⑷ 实验数据点以一、×、□、⊙、△等符号标出，一般不用细圆点“• ”标示实验点；光滑连接曲线并使实验点匀称地分布于曲线两侧（起平均的作用）；

⑸ 图解法求直线斜率和截距时，应：在线上取点（不能使用实验点）；所取两点要相距足够远（以提高精度）；在图上要注明所取点的坐标。

例 6：拉伸法测弹性模量的载荷——伸长曲线如图所示，图上至少有 5 处绘制错误或不规范。它们是<u> 坐标轴应标注物理量和单位 </u>，<u>轴上缺少分度值 </u>，<u> 实验点应以醒目标记标出 </u>，<u> 曲线应光滑连接 </u>，<u> 计算点坐标标注不规范 </u>。



3．**最小二乘法与一元线性回归法**

（1）**最小二乘法**：对等精密度测量若存在一条最佳的拟合曲线，那么各测量值与这条曲线上对应点之差的平方和应取极小值。

例 7：试用最小二乘原理推导直线方程 $y = kx$ 中回归系数 k 的计算公式。

解：根据最小二乘原理应有 $\sum_{i=1}^{n}(y_i - kx_i)^2 = \min$

即 $\frac{\partial}{\partial k}\sum_{i=1}^{n}(y_i - kx_i)^2 = 0 \to \sum_{i=1}^{n}2(y_i - kx_i)(-x_i) = 0 \to \sum_{i=1}^{n}x_i y_i - k\sum_{i=1}^{n}x_i^2 = 0$

于是得 $k = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2} = \frac{\overline{xy}}{\overline{x^2}}$

（2）**一元线性回归法**：设直线方程 $y = a + bx$，其中自变量 x 的误差可略。由最小二乘原理，应有 $\sum_{i=1}^{k}\left[y_i - (a + bx_i)\right]^2 = \min$

即 $\begin{cases}\frac{\partial}{\partial a}\sum_{i=1}^{k}\left[y_i - (a+bx_i)\right]^2 = 0 \\ \frac{\partial}{\partial b}\sum_{i=1}^{k}\left[y_i - (a+bx_i)\right]^2 = 0\end{cases} \to \begin{cases}\sum_{i=1}^{k}2\left[y_i - (a+bx_i)\right](-1) = 0 \\ \sum_{i=1}^{k}2\left[y_i - (a+bx_i)\right](-x_i) = 0\end{cases} \to$

$$\begin{cases}ak + b\sum_{i=1}^{k}x_i = \sum_{i=1}^{k}y_i \\ a\sum_{i=1}^{k}x_i + b\sum_{i=1}^{k}x_i^2 = \sum_{i=1}^{k}x_i y_i\end{cases}$$

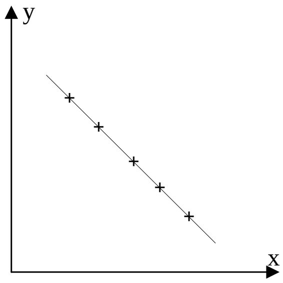
解之得 $\begin{cases}b = \frac{\sum x_i \sum y_i - k\sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - k\sum x_i^2} = \frac{\bar{x}\bar{y} - \overline{xy}}{\bar{x}^2 - \overline{x^2}} \\ a = \frac{\sum x_i y_i \sum x_i - \sum y_i y_{x_i^2}}{(\sum x_i)^2 - k\sum x_i^2} = \bar{y} - b\bar{x}\end{cases}$

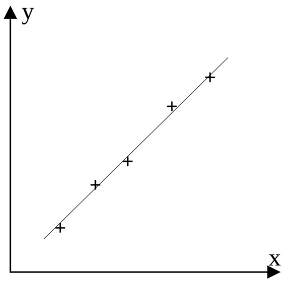
（3）**相关系数 r**：用于检验 x 和 y 之间是否存在线性关系。$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\sqrt{(\overline{x^2} - \bar{x}^2)(\overline{y^2} - \bar{y}^2)}}$

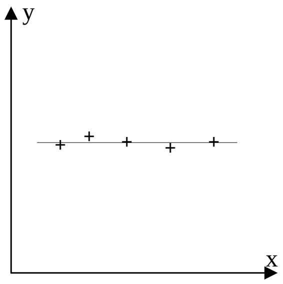
r 物理意义 $\begin{cases}|r| = 1; y = a + bx\text{通过全部实验点} \\ |r| \approx 1; x_i, y_i\text{之间线性相关强烈} \\ r > 0; y_i\text{随}x_i\text{增加而增加} \\ r < 0; y_i\text{随}x_i\text{增加而减小} \\ r \approx 0; x_i, y_i\text{之间无线性关系} \to \text{拟合直线为与}x\text{轴平行的直线}\end{cases}$

例 8：根据所给相关系数 r 作出实验点分布草图：

①$r = -1$　　②$r = 0.9993$　　③$r = 0.015$







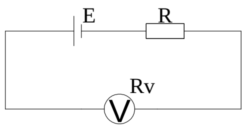
（4）回归法使用要点：

①自变量 x 测量误差可略，即应选择测量精度较高的物理量作自变量；

②因变量 y 为等精度测量或近似等精度测量，即 $u(y_i)$ 近似相等；

③作线性关系的检验：利用物理规律或作图等其它方法确认线性关系的存在；或检验相关系数是否满足 $|r|\approx 1$。

例 9：实验线路及测量数据如下，用一元线性回归法计算电压表内阻 R_V（写出计算公式即可）。



$R(\Omega)$	20．0	50．0	100．0	200．0	300．0	400．0
$V(V)$	2．80	2．72	2．60	2．38	2．20	2．04

$$R+R_V=\frac{ER_V}{V}$$

计算 $R,\frac{1}{V}$ 精度：$\begin{cases}\dfrac{u(R)}{R}\sim\left[\dfrac{0.1}{20.0},\dfrac{0.1}{400.0}\right]=[0.005,0.00025]\\ \dfrac{u(1/V)}{1/V}=\dfrac{u(V)}{V}\sim\left[\dfrac{0.01}{2.80},\dfrac{0.01}{2.04}\right]=[0.0036,0.005]\end{cases}$ 可知 R 的精度较高

故将公式变形为 $$\frac{1}{V}=\frac{1}{ER_V}R+\frac{1}{E}$$

令 $\frac{1}{V}\equiv y, R\equiv x$ 并设直线方程 $y=a+bx$

则有 $a=\frac{1}{E}$ $b=\frac{1}{ER_V}=\frac{a}{R_V}$ $\therefore R_V=\frac{a}{b}$

4．逐差法

（1）测量次为偶数的逐差法

设自变量和因变量之间存在线性关系 $y=a+bx$，并有一组实验数据：$\begin{cases}x_1,\cdots,x_n,x_{n+1},\cdots x_{2n}\\ y_1,\cdots,y_k,y_{n+1},\cdots y_{2n}\end{cases}$；隔 n 项逐差，可得到 $b_1=\frac{y_{n+1}-y_1}{x_{n+1}-x_1},\cdots,b_n=\frac{y_{2n}-y_n}{x_{2n}-x_n}$ 取平均值 $\bar{b}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}b_i=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{y_{n+i}-y_i}{x_{n+i}-x_i}$。对于自变量 x 等隔分布的情况，有 $x_{n+i}-x_i=\Delta_n x$，于是 $\bar{b}=\frac{1}{n\Delta_n x}\sum_{i=1}^{n}(y_{n+i}-y_i)$，求得 $\bar{b}$ 后，可由公式 $\sum y_i=a+b\sum x_i$ 求出 $\bar{a}=\sum y_i-\bar{b}\sum x_i$

例 10: 已知 $R=R_0(1+\alpha t)$,实验数据如下，用逐差法求电阻温度系数 α （不要求计算不确定度）。

$t(°C)$	85.0	80.0	75.0	70.0	65.0	60.0	55.0	50.0
$R(\Omega)$	0.3622	0.3565	0.3499	0.3437	0.3380	0.3324	0.3270	0.3215

解: $R=R_0+R_0\alpha t$ 并设 $y=a+bx$ 则有 $a=R_0$ $b=R_0\alpha=a\alpha$

即 $\alpha=\frac{b}{a}$ 而利用逐差法可得:

i	1	2	3	4	平均
$\Delta t=t_{i+4}-t_i(°C)$	20．0	20．0	20．0	20．0	20．0
$\Delta R=R_{i+4}-R_i(\Omega)$	0．0242	0．0241	0．0229	0．0222	0．02335

于是有 $b=\frac{\overline{\Delta R}}{\overline{\Delta t}}=\frac{0.02335}{20.0}=0.0011675$

$$a=\frac{1}{n}(\sum R-b\sum t)=\frac{1}{8}(2.7312-0.0011675\times 540.0)=0.2626$$

故 $\alpha=\frac{b}{a}=\frac{0.0011675}{0.2626}=4.45\times 10^{-3}(1/°C)$

例 11: 迈克尔逊干涉仪实验数据处理

条纹吞吐 n	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
M_2 镜位置 $X(mm)$	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9

解法一：　　由逐差法可得

i	1	2	3	4	5	平均
$N=n_{i+5}-n_i$	500	500	500	500	500	500
$d_{500}=X_{i+5}-X_i(mm)$	X_5-X_0	X_6-X_1	X_7-X_2	X_8-X_3	X_9-X_4	$\overline{d_{500}}$

$$\lambda=\frac{2d_{500}}{N}=\frac{2\overline{d_{500}}}{500} \qquad \frac{u(\lambda)}{\lambda}=\sqrt{\left[\frac{u(d_{500})}{d_{500}}\right]^2+\left[\frac{u(N)}{N}\right]^2}$$

其中
$$\begin{cases} u(d_{500})=\sqrt{u_a^2(d_{500})+u_b^2(d_{500})}\begin{cases} u_a(d_{500})=\sqrt{\dfrac{\sum(d_i-\overline{d_{500}})^2}{5\times4}} \\ u_b(d_{500})=\dfrac{0.00005}{\sqrt{3}}(mm)\end{cases} \\ u(N)=u_b(N)=\dfrac{0.5\times5}{\sqrt{3}}\end{cases}$$

于是
$$u(\lambda)=\lambda\sqrt{\left[\frac{u(d_{500})}{d_{500}}\right]^2+\left[\frac{u(N)}{N}\right]^2}=\lambda\sqrt{\frac{u_a^2(d_{500})}{d_{500}^2}+\frac{0.00005^2}{d_{500}^2\times3}+\frac{(0.5\times5)^2}{500^2\times3}}$$

i	1	2	3	4	5	平均
$N=(n_{i+5}-n_i)/5$	100	100	100	100	100	100
$d_{500}=(X_{i+5}-X_i)/5(mm)$	$(X_5-X_0)/5$	$(X_6-X_1)/5$	$(X_7-X_2)/5$	$(X_8-X_3)/5$	$(X_9-X_4)/5$	$\overline{d_{100}}$

解法二：　　由逐差法可得

$$\lambda=\frac{2d_{100}}{N'}=\frac{2\overline{d_{100}}}{100} \qquad \frac{u(\lambda)}{\lambda}=\sqrt{\left[\frac{u(d_{100})}{d_{100}}\right]^2+\left[\frac{u(N')}{N'}\right]^2}$$

其中
$$\begin{cases} u(d_{100})=\sqrt{u_a^2(d_{100})+u_b^2(d_{100})},\begin{cases} u_a(d_{100})=\sqrt{\dfrac{\sum(d_i-\overline{d_{100}})^2}{5\times4}} \\ u_b(d_{100})=\dfrac{0.00005}{5\sqrt{3}}(mm)\end{cases} \\ u(N')=u_b(N')=\dfrac{0.5}{\sqrt{3}}\end{cases}$$

于是
$$u(\lambda)=\lambda\sqrt{\left[\frac{u(d_{100})}{d_{100}}\right]^2+\left[\frac{u(N')}{N'}\right]^2}=\lambda\sqrt{\frac{u_a^2(d_{100})}{d_{100}^2}+\frac{0.00005^2}{d_{100}^2\times5^2\times3}+\frac{0.5^2}{100^2\times3}}\text{。}$$

（2）测量次数为奇数的逐差法

处理原则：去掉中间的数据。

例 12： 重新处理迈克尔逊干涉仪实验数据

条纹吞吐 n	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
M_2 镜位置 $X(mm)$	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}

解：　　去掉中间的数据后为

条纹吞吐 n	0	100	200	300	400	600	700	800	900	1000
M_2 镜位置 $X(mm)$	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}

由逐差法可得

i	1	2	3	4	5	平均
$N=n_{i+6}-n_i$	500	500	500	500	500	500
$d_{600}=X_{i+5}-X_i(mm)$	X_6-X_0	X_7-X_1	X_8-X_2	X_9-X_3	$X_{10}-X_4$	$\overline{d_{600}}$

$$\lambda=\frac{2d_{600}}{N}=\frac{2\overline{d_{600}}}{600}\qquad \frac{u(\lambda)}{\lambda}=\sqrt{\left[\frac{u(d_{600})}{d_{600}}\right]^2+\left[\frac{u(N)}{N}\right]^2}$$

其中
$$\begin{cases} u(d_{600})=\sqrt{u_a^2(d_{600})+u_b^2(d_{600})}\begin{cases} u_a(d_{600})=\sqrt{\dfrac{\sum(d_i-\overline{d_{600}})^2}{5\times4}} \\ u_b(d_{600})=\dfrac{0.00005}{\sqrt{3}}(mm) \end{cases} \\ u(N)=u_b(N)=\dfrac{0.5\times6}{\sqrt{3}} \end{cases}$$

于是
$$u(\lambda)=\lambda\sqrt{\left[\frac{u(d_{600})}{d_{600}}\right]^2+\left[\frac{u(N)}{N}\right]^2}=\lambda\sqrt{\frac{u_a^2(d_{600})}{d_{600}^2}+\frac{0.00005^2}{d_{600}^2\times3}+\frac{(0.5\times6)^2}{600^2\times3}}$$

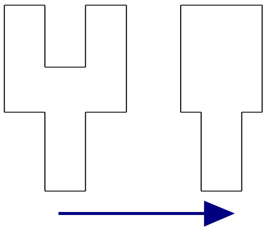
（3）逐差法说明

①逐差法多用在自变量等间隔测量且其测量误差可略去的情况，这样可简化计算。

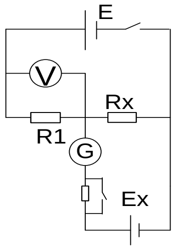
②使用逐差法要隔项进行，不应逐项逐差，后者一方面使测量精度降低，另一方面不能均匀使用实验数据。

13、（选择填空）两种挡光杆如图所示（箭头表示滑块第一次接近光电门时的运动方向），测弹簧振子的速度时，第一次挡光发生在______处，第二次挡光发生在_____处，运动速度为___________的距离除以挡光时间；测弹簧振子的周期时，第一次挡光发生在______处，

第二次挡光发生在_____处，第三次挡光发生在______处。



题15 档光杆



题16 补偿法测电动势

14、(判断正误）利用补偿原理测量干电池 Ex 的电路如图所示，R_1 和 Rx 为阻值可调的电阻箱，V 为电压表，G 为检流计。它正确吗？如正确，请给出计算公式。如不正确，请说明原因并画出正确的电路图。

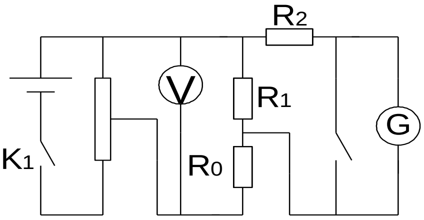
15、(填空）用自准法测薄透镜焦距时，要把透镜反转 180 度进行测量，其原因是____，但在共轭法测透镜焦距时，又不需要把透镜反转 180 度进行测量，其原因又是____。

16、(问答）拉伸法测弹性模量的计算公式为 $E = 32mgLH/(\pi D^2 RC)$，用千分尺在钢丝不同位置测量直径 d 的 5 次测量结果是：$0.319mm, 0.319mm, 0.305mm, 0.308mm, 0.304mm$。

（1）给出 d 的测量结果 $d \pm u(d)$；

（2）若其它的测量结果分别是 $H \pm u(H) = (117.65 \pm 0.29)cm$，$L \pm u(L) = (48.80 \pm 0.17)cm$，$R \pm u(R) = (9.830 \pm 0.012)cm$，$C \pm u(C) = (1.116 \pm 0.008)cm$，这 5 个量中哪一个对 E 的测量精度影响最大？哪一个影响最小？（要求提供定量的说明）

17、用半偏法测灵敏检流计的内阻 r_g 并确定 G 的电流常数 $K(A/div)$，电路如图所示。其中 R_2 由电阻箱充当；R_1、R_0



也由电阻箱构成，R_1来自电阻箱的低阻抽头，$R_1 << R_0$和r_g；V为电压表。

请导出r_g及K的测量公式，并说明测量的简要步骤。

18、用冲击检流计测压电陶瓷的介电常数。可供仪器包括：冲击检流计、电容器（电容值已知）、直流稳压电源、双刀双掷开关各 1 个，单刀双掷开关 2 个，导线若干。要求

（1）给出电路图，简述测量原理及计算公式；

（2）根据下述的典型数据简述测量步骤和相关条件（要求冲击计偏转10 —$15cm$并讨论所需的电源电压等）；冲击检流计（安装后）的冲击常数$\approx 10\times10^{-4}C/mm$；已知电容值$\approx 0.22\mu F$;直流稳压电源$2A$，$0--30V$可调；被测压电陶瓷样品为薄圆片，直径$\phi\times$厚度$h\approx 30mm\times 0.2mm$， 介电常数$\approx 2300\varepsilon_0$，$\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12}C^2/(N\cdot m^2)$为真空介电常数。

第四部分　实验报告稿样板

申明：下列实验报告只是提供一个样板，并不是实验报告的标准“答案”，同学们在今后的实验中，可以参照这些报告做好数据处理。其中有些实验是大家不需进行的试验，不想让大家养成抄袭的习惯，否则有违出此指导书的本意。希望大家在今后认认真真做好每一项试验，取得优异成绩!

§1 声速测量与示波器的使用

一、　实验预习报告

1．本实验存在两个共振，他们分别是什么共振？这两个共振是一回事吗？
答：本实验中存在两个共振分别为：由于同一个波的反射而引起的驻波共振这是两个波峰间距离是 $\lambda/2$，另一个共振是换能器上的共振是换能器上的共振是声波与敏感元件压电陶瓷间频率相同引起的共振，两个共振不是一回事。
2．在振幅法测量中，应当如何使用示波器？要求具体指出有关功能开关的档位，并简要说明其作用（1）示波器通道信号的连接和相应功能开关的设置（2）扫描方式和触发方式的选择（屏上能观察到 2—5 个周期的振荡波形）包括“sec/div”“sorce/x mode”“coupling”和“level/slope”的设置或调整。
答：接线接在 CH2 方式开关打到 CH2 档。“VDHS/DIV”从最小的档开始逐步过渡到合适位置的档，触发源选择 CH2 档。TIME/DIV 从最小的档开始逐步过渡到可以使屏上出现 2—5 个周期的位置（题中所提出的其他键未在面板上找到）。
3．在相位法中,又应如何联线并正确使用这些功能开关?
答：接线应分别接在 CH_1 和 CH_2 上，并选用“双踪”、按 F“X—Y”，触发源调至“CH_1”，同时调节“VOLTS/DiV”至适当位置。

二、　实验报告

1、原始数据列表

（1）、振幅法　　　　　　　　　　　　　　　　　　t=18.5℃

测量次序 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 Ci (cm)	13.6049	13.1160	12.6271	12.1481	11.6708	11.1932	10.7128	10.2243	9.7641	9.2869

测量次序 i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
测量值 Ci (cm)	8.8148	8.3345	7.8515	7.3781	6.8928	6.4154	5.9430	5.4601	4.9785	4.4969

共振频率：f1=36.075KHZ　　f2=36.102KHZ

（2）、相位法（一个波长）

测量次序 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 Ci /cm	20.4018	19.4115	18.4561	17.5545	16.5481	15.5771	14.6222	13.6715	12.7008	11.7351

测量次序 i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
测量值 Ci (cm)	10.7621	9.8109	8.8543	7.8935	6.7309	5.9727	5.0040	4.0377	3.0758	2.2395

共振频率：f’1=36.068KHZ　　f’2=36.075KHZ

（3）、脉冲法

短棒		长棒	
标尺读数 (cm)	时间间隔 (cm)	标尺读数 (cm)	时间间隔 (cm)
9.9315	65	14.9461	97

2、数据处理

（1）振幅法

（i）声速计算

下标 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值 C
$A_i=C_i+C_{i+10}$	4.7901	4.7815	4.7756	4.7700	4.7780	4.7778	4.7698	4.7642	4.7856	4.7900	4.77828

$$\bar{f}=\frac{f1+f2}{2}=\frac{36.075+36.102}{2}\times10^3=36.0885\times10^3\ (HZ)$$

$$V=\lambda f=\frac{2c}{10}\times\bar{f}=\frac{2\times4.77828}{10}\times10^{-2}\times36.0885\times10^3=344.12(m/s)$$

（ii）计算不确定度

$$U_{a(\lambda)}=\sqrt{\sum_{i=1}^{10}\frac{(Ai-\bar{A})^2}{10\times9}}=0.00895$$

仪器误差限带入的 B 类误差分量：

$$U_{b(\lambda)}=\frac{\Delta 仪}{\sqrt{3}}=\frac{0.005}{\sqrt{3}}=0.0029(cm)$$

位置判断不准而产生的 B 类分量：

$$U_{b2(\lambda)}=\frac{\Delta 位}{\sqrt{3}}=\frac{0.1}{\sqrt{3}}=0.0577(cm)$$

$$U(\bar{f})=Ua(\bar{f})=\sqrt{\frac{(f1-\bar{f})^2+(f2-\bar{f})^2}{2\times1}}=0.0135(KHZ)$$

由

$$V=\frac{c\bar{f}}{s}\Rightarrow \ln v=\ln c+\ln\bar{f}-\ln 5\Rightarrow\frac{dv}{v}=\frac{dc}{c}+\frac{d\bar{f}}{\bar{f}}\Rightarrow\frac{U(v)}{v}=\sqrt{(\frac{U(c)}{c})^2+(\frac{U(\bar{f})}{\bar{f}})^2}$$ 其中

$$U(c)=\sqrt{U_{a(\lambda)}{}^2+U_{b1(\lambda)}{}^2+U_{b2(\lambda)}{}^2}=0.011(cm)$$

则 $U(v)=v\sqrt{(\frac{U(c)}{c})^2+(\frac{U(\bar{f})}{\bar{f}})^2}=0.8(m/s)$

则 $v\pm U(v)=(344.1\pm.8)m/s$

（2）相位法

（i）声速计算

下标 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均 λ(cm)
λi= ci-c(i+10)（cm）	9.6406	9.6006	9.6018	9.6610	9.8172	9.6044	9.6182	9.6338	9.6250	9.4956	9.62991

$$\bar{f}_1=\frac{f_1{}'+f_2{}'}{2}=\frac{36.068+36.075}{2}=36.0715(KHZ)$$

$$V=f\lambda=\frac{\lambda}{10}\bar{f}_1=\frac{9.62991}{10}\times10^{-2}\times36.0715\times10^3=345.36(m/s)$$

$$\bar{f}=\frac{f1+f2}{2}=\frac{36.068+36.075}{2}\times10^3=36.0715\times10^3\text{（HZ）}$$

$$V=\lambda f=\frac{9.62991}{10}\times10^{-2}\times36.0715\times10^3=345.36(m/s)$$

(ii)不确定度的计算

$$Ua(\lambda)=\sqrt{\sum_{i=1}^{10}\frac{(Ai-\bar{A})^2}{10\times9}}=0.0793(cm)$$

仪器误差限带来的 B 类分量

$$Ub(\lambda)=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}=0.0029(cm)$$

仪器判断不准而产生的 B 类分量

$$Ub2(\lambda)=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}=0.0577(cm)$$

$$U(f)=\sqrt{\frac{(f1-\bar{f})^2+(f2-\bar{f})^2}{2\times 1}}=0.0035$$

又 $\frac{U(v)}{v}=\sqrt{(\frac{U(c)}{c})^2+(\frac{U(\bar{f})}{\bar{f}})^2}$ 且 U（λ）$=\sqrt{{U_{a(\lambda)}}^2+{U_{b1(\lambda)}}^2+{U_{b2(\lambda)}}^2}$ =0.07951（cm）

则 U（V）=V $\sqrt{(\frac{U(c)}{c})^2+(\frac{U(\bar{f_1})}{\bar{f_1}})^2}=1.2(m/s)$

则 $v\pm U(v)=(345\pm 1)m/s$

(3)脉冲法

$$\Delta L=14.9461-9.9315=5.0146(cm)$$

$$\Delta t=97-65=32(\mu s)$$

$$V_{固}=\frac{\Delta L}{\Delta t}=1.5\times 10^3(m/s)$$

$\frac{U_{固}}{V_{固}}=\sqrt{(\frac{U_{(\Delta L)}}{\Delta L})^2+(\frac{U_{(\Delta t)}}{\Delta t})^2}$ 而 $U_{(\Delta L)}=U_{b(\Delta L)}=0.00029(cm)$

$$U_{(\Delta t)}=U_{b(\Delta t)}=0.289(\mu s)$$

则 $U_{(V_{固})}=V_{固}\sqrt{(\frac{U(\Delta L)}{\Delta L})^2+(\frac{U(\Delta t)}{\Delta t})^2}=14(m/s)$

则 $V_{固}\pm U_{(V_{固})}=(1.50\pm 0.01)\times 10^3(m/s)$

（4）与理论值比较（空气中声速）

$$V_{理}=331.45\sqrt{1+\frac{t}{273.15}}=342.5(m/s)$$

（i）对于振幅法

相对误差 $\delta=\frac{V_{测}-V_{理}}{V_{理}}=\frac{344.1-342.5}{342.5}=0.47\%$

（ii）对于相位法

$$\delta=\frac{V_{测}-V_{理}}{V_{理}}=\frac{345.4-342.5}{342.5}=0.84\%$$

三、 实验后思考题（略）

§2 电桥的自组和使用

一、实验预习报告

1、什么是回路接线法？什么是安全位置？什么叫瞬态试验和“宏观”粗测？

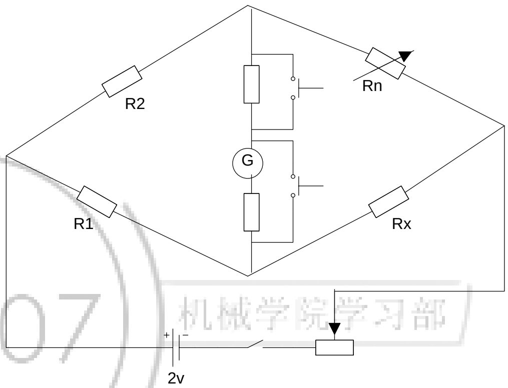
答：布置好仪器后经线路图分解为若干回路，这样一个回路一个回路地接线称作回路接线法。

安全位置即指：电键处于开位，滑线变阻器滑动端处于使电路中电流最小或电压最低位置电阻值处于预估位置，电表量程合适等。

瞬态试验是指在相信接线无误后，先跃接电源开关并密切关注线路情况。若有异常立即断电。

“宏观”粗测是指电路接通后，粗调控制电路宏观全面地观测测量仪器的变化。待心中有数后再仔细调节至实验的最佳状态进行数据测量。

2、设计自组电桥的实验线路，为了保护检流计，其中应具备“粗”调和“细”调功能。



3、设计测电阻分别约为15Ω,200Ω，150Ω，问如何选取 QJ45 型电桥比率 c？

答：C1≤$\frac{15}{1000}$ = 0.15 则 C2≤ $\frac{200}{1000}$ = 0.2

所以 C2 选取用“0.1”。 C3≤ $\frac{150\times10^3}{1000}$=150,所以 C3 选用“100” （结果未必准确）

4、什么是电桥的灵敏度？实验中如何确定？测量 QJ45 型电桥灵敏度时应按下电计 G 的哪个按钮？

答：在电桥平衡后将 R_X 稍改变 ΔR_X，电桥将失衡，检流计指针将有Δn 格的偏转，称

S=$\frac{\Delta n}{\Delta R_X}$为电桥绝对灵敏度，实验中取Δn=5 格，再记录$\Delta R_N$去求得。如果$R_1=R_2$

时 S=$\frac{\Delta N}{\Delta R_N}$其它情况则用 S=$\frac{\Delta n R_2}{\Delta R_N R_1}$。在测量 QJ45 型电桥灵敏度的实验时应按下 G 的“1”按钮。

二、实验数据处理

1、自组电桥。计算待测电阻阻值及其不确定度。

（1） 由实验原始记录有，R_1=183.90Ω,将待测电阻与电阻箱调换得R_2=182.0Ω, 则

电阻阻值 $R_X=\sqrt{R_1 * R_2}$ =182.90Ω （$R_X=\sqrt{R_1 * R_2}$）

（2） 计算不确定度:由于只进行了一次测量，R_X 的不确定度只有 B 类分量.计算如下,各示值盘的准确度等级为 X100 电阻盘为 0.1 级,X10 电阻盘为 0.2 级,X0.1 电阻盘为 0.5 级,X0.1 电阻盘为 5.0 级

则 $\Delta_{仪}(R_1)$=0.1%×100+0.2%×80+0.5%×3+5%×0.8+0.02=0.315Ω

$\Delta_{仪}(R_2)$=0.1%×100+0.2%80+0.5%×2+5%×0+0.02=0.29Ω

$U_{仪}(R_1)=\dfrac{\Delta_{仪}(R_1)}{\sqrt{3}}$=0.182Ω

$U_{仪}(R_2)=\dfrac{\Delta_{仪}(R_2)}{\sqrt{3}}$=0.17Ω

由于 $R_X=\sqrt{R_1*R_2}$ $\quad \ln R_X=\dfrac{1}{2}(\ln R_1+\ln R_2)$

$$\frac{U_{仪}(R_x)}{U_x}=\frac{1}{2}\sqrt{\left[\frac{U_{仪}(R_1)}{R_1}\right]^2+\left[\frac{U_{仪}(R_2)}{R_2}\right]^2}=0.068\%$$

则 $U_{仪}(R_X)=0.068\%$×182.90=0.124

由原始数据 $\Delta n=5.0$ 格 $\Delta Rn=1.5\Omega$

我们所用的比率为 1，故有 $S=\dfrac{\Delta N}{\Delta R_N}=\dfrac{5.0}{1.5}$=3.3 格/Ω。

$$U_{仪}(R_x)=\frac{\Delta_{仪}(R_x)}{\sqrt{3}}=\frac{\frac{0.2}{S}}{\sqrt{3}}=0.0350(\Omega)$$

由以上数据可得不确定度 $U(R_x)=\sqrt{U(R_x)^2+U_{灵}(R_x)}=0.129\Omega$

则 Rx± $U(R_X)$=（182.9±0.1）Ω

2、 QJ45 型箱式电桥

（1）所选用的 C≤$\dfrac{180}{1000}$=0.18 故 c=0.1

测量值 R_X=RC=1831×0.1=183.1(Ω)

（2）计算不确定度

有效量程基准值为 10110。所选比率为 0.1 测量值为 0.1×10110=1.011×10^3

故，$R_0=10^3\Omega$ $\quad R_x=183.1\Omega$

$\Delta_{仪}(R_1)=\partial\%(R_X+\dfrac{R_0}{10})$=0.1%（183.1+$\dfrac{1000}{10}$）=0.2831(Ω)

由，$U_{仪}(R_x)=\dfrac{\Delta_{仪}(\mathrm{R_x})}{\sqrt{3}}$=0.1634(Ω)

由眼睛及灵敏度产生的误差

$$S=\frac{\Delta N}{\Delta R_X}=\frac{5.9}{4}=1.48\text{ 格}/\Omega$$

$$U'(R_X)=\frac{0.2}{S\sqrt{3}}=\frac{0.2}{1.48\times\sqrt{3}}=0.0780(\Omega)$$

则 $U(R_X)=\sqrt{U_{仪}^2(R_x)+U'(R_x)}=0.181(\Omega)$

则测量结果 Rx ± $U(R_X)$ =（183.1 ± 0.2）Ω

3、计算相对误差

$$\frac{R_{测}-\mathrm{R}_{理}}{\mathrm{R}_{理}}\times100\%=\frac{182.9-183.1}{183.1}\times100\%=0.1\%$$

三、有关问题的讨论

1、 电源电压的改变影响什么?为什么?

答：电源电压的改变会影响测量的精度，电源电压越高（在允许的范围内）测量精度就会越高。反之亦然。这是因为，提高电源电压会使装有检流计那一支路的两端电压升高，在这一支路上电阻不变的情况下，支路内电流也随之增大。当电流很小时，由于检流计的精度和人眼的分辨率可能路端即使有电压差但检流计仍然“无反应”。当提高电源电压后，使支路电流增大，使检流计的反应更加明显，也就提高了精度。

2、 $\dfrac{R_1}{R_3}$变得很到会影响什么？

答：若$\dfrac{R_1}{R_3}$变得很大则 C 变得很大，当改变电阻器电阻时，每改变一格就会使检流器指针偏转至较远的地方，产生了大的偏角。很可能无法使检流计指针指到中心位置。即无法达到电桥平衡，这样就根本无法测量。(当然也不能把 C 设的太小，那样会使测量范围无法包括被测电阻的阻值)。

3、 多次测量可以吗？为什么只测一次？什么情况下只测一次？

答：如果多次测量就会发现每次测量结果是完全相同的，即，没有产生随机误差。所以只测量一次就可以了。如果所用的测量系统和被测量是完全相同的，这时就可以只测量一次。如果不同就应多次测量了。例如测铜丝直径就应选择几个测量点进行测量，用电子天秤测量质量就可以只测一次。

四、关于本实验的一些想法

1、 在测量检流计的灵敏度时，我所测得的灵敏度较低，而所用的电源电压同样是 2V。这是怎么回事呢？后来我发现，原来滑动变阻器的滑片被我放在中间位置，造成检流

计的两端电压过低，因而降低了灵敏度。后来我提高了电压，果然灵敏度升高了。

2、 关于测检流计内阻。我想可以这样，将检流计和电阻箱并联再用 QJ45 测量并联电阻 R，首先让变阻箱阻值为 0，而后再慢慢增加阻值。使检流计指针有偏转但未必满偏。

再用公式 $\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$ 算有测流计内阻。

§3 分光仪调整和三棱镜顶角测量

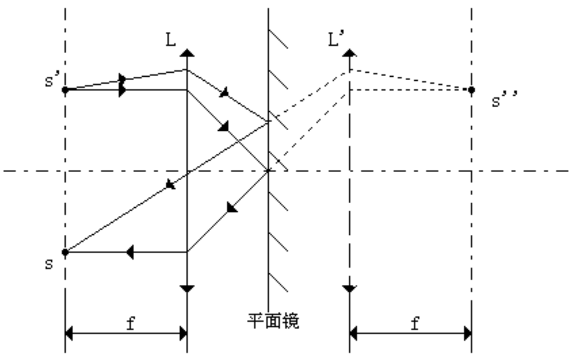
一、实验预习报告

1. 分光仪调整好后应满足的条件是什么？

答：（1）平面镜反射回来的绿色“+”字与叉丝无视差（2）平面镜正反两面反射回来的绿色“+”字均与上叉丝重合，且转动平台过程中绿色“+”字与沿上叉丝移动（3）狭缝像与叉丝无视差且其中点与中心叉丝等离。

2. 望远镜聚焦于无穷远依据的原理是什么？其判别标志是什么？若未达到要求应调整什么部位？

答：原理：如右图所示，可假想将平面镜拿去，镜面两侧将会对称地分布在各个器件若叉丝位于焦平面时其上光源 s 发出的光线经 L 折射后壁平行的射在 L’上，经 L’折射后必成像在 L’的焦平面上的 S’点，即叉丝与小“+”字反射像共面，其判别标志是绿“+”字与叉丝无视差。若未达到要求应前后伸缩叉丝分划板套筒，改变叉丝与物镜间距离，如果仍无法看到，则须重调望远镜光轴与平面镜镜面垂直，调目镜至看清分划板，划线，调物镜距离直至达到要求。



3. 望远镜光轴与主轴垂直的标志是什么？为什么正反两面的绿“+”字‘要与上叉丝重合，而不是与中心叉丝重合？未达到要求时采用什么方法进行调解？

答：垂直的标志是：平面镜反转 180 度后，绿“+”仍与上叉丝重合，绿“+”字仍与上叉丝重合是因为由（图一）的光路图可知，光源 s 与像 s‘是对称地分布在中心叉丝两侧的，是这好似望远镜光轴才与平面镜镜面垂直。因此，绿“+”字应与上叉丝重合。当未达到要求时，调解载物台调平螺钉是绿色小“+”向上叉丝移近 1/2 偏离距离才调解望远镜俯仰，调节螺钉是绿色小叉丝与上叉丝重合，在激昂平面镜反转 180 度，绿色小“+”字始终都落在叉丝中心为止。

4. 三棱镜放置的原则是什么？调好的标志是什么？此时是否可用半调法？

答：三棱镜静的放置要遵循，调整第二个面的方位时不改变第一个面的方位的原则，调好的标志为径三棱镜某两个面反射绿色小“+”字与叉丝上叉丝重合。这时一定不能用半调法。因为这时望远镜光轴已与主轴垂直。如果用半调法将改变望远镜光轴方位破坏垂直，所以不能用半调法。

二、实验报告

1.原始数据

测量次数	1		2		3		4		5	
主标盘左侧数据读取	130º 4´	250º 2´	22º 22´	262º 25´	56º 36´	176º 34´	108º 40´	348º 39´	267º 10´	27º 12´
主标盘右侧数据读取	310º 3´	70º 4´	202º 22´	82º 24´	236º 34´	356º 30´	288º 38´	168º 40´	87º 12´	207º 13´

2.数据处理

分别计算每次读数所得到的来两个偏转角 θ_1，θ_2。再根据 θ_1，θ_2 利用公式 θ=（$\theta_1+\theta_2$）/2 计算出各个 θ 值，最后根据 θ 值利用公式 A=θ/2 计算出 Ai

测量次数	1	2	3	4	5
左侧测得角 θ1i	119°58´	119°57´	119°58´	120°1´	120°2´
右侧测得角 θ2i	120°1´	119°58´	119°56´	119°58´	120°1´
θi=(θ1i+θ2i)/2	119°57´	119°57´	119°57´	119°59´	120°1´
Ai=θi/2	60°0´	59°59´	59°58´	60°0´	60°1´

则：

$\bar{A}=(A_1+A_2+A_3+A_4+A_5)/5=$（60°0´ +59°59´ +59°58´ +60°0´ +60°1´）/5=60°0´

3.计算不确定度

$$A=\frac{\theta}{2}=\frac{\theta_1+\theta_2}{4}\Rightarrow dA=\frac{d\theta_1+d\theta_2}{4}\Rightarrow U_{(A)}=\frac{\sqrt{U_{(\theta 1)}{}^2+U_{(\theta 2)}{}^2}}{4}$$

（1）计算 θ_1 的不确定度

$$\bar{\theta}_1=\frac{\sum_{n=1}^{5}\theta_i}{5}=\frac{119°58'+119°57'+119°58'+120°1'+120°2'}{5}=119°59'$$

$$U_{a(\theta 1)}=\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{5}(\theta_1-\theta_2)^2}{5\times 4}}=\sqrt{\frac{1'^2+2'^2+1'^2+2'^2+3'^2}{5\times 4}}=0.87'$$

标盘的系统误差为 1’，即△仪=1’

$$U_{b(\theta 1)}=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}=0.58'$$

$$则U_{(\theta 1)}=\sqrt{U_{a(\theta 1)}{}^2+U_{b(\theta 2)}{}^2}=1.05'$$

计算θ_2的不确定度

$$\bar{\theta}_2=\frac{\sum_{i=1}^{5}\theta_{2i}}{5}=\frac{120°1'+119°58'+119°56'+119°58'+120°1'}{5}=119°59'$$

$$Ua(\theta_2)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{5}(\theta_{2i}-\bar{\theta}_2)^2}{}}=1.10'$$

$$U_{b(\theta2)}=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}=0.58'$$

则$U_{(\theta2)}=\sqrt{U_{a(\theta2)}{}^2+U_{b(\theta2)}{}^2}=1.24'$

则$U（A）=\frac{\sqrt{U_{（\theta1）}{}^2+U_{(\theta2)}{}^2}}{4}=25''$

（3）最终表示

$A\pm U(A)=60°0'\pm25''(60°0'\pm0.4')$

最好再将最后结果换算成度数或者换算成弧度。

三、实验后思考题（略）