大学物理实验：绪论、示波器、分光计

一、绪论

§1.测量

1.1 测量四要素

1.1.1 被测对象：

1.1.2 测量程序：

1.1.3 测量准确度：

1.1.4 计量单位：

1.2 直接测量与间接测量

1.2.1 直接测量：可直接从测量仪器（或量具）上读出待测量的值

1.2.2 间接测量：由直接测量获得数据，再用已知函数关系运算得到的待测量值

1.2.3精度测量：相同的测量条件下对同一物理量进行重复测量：x1，x2，…xn

注意游标卡尺下面的可对要对应上面的49㎜(50分度的

螺旋测微计(千分计)上下相差0.5㎜ 转一圈是50格所以精度是0.01㎜要估读到千

§2.误差——任何测量都存在误差——是小量

2.1 误差概念：测量值-真值。

2.1.1 绝对误差=测量值−真值(理论值)

2.1.2 相对误差=**|测量值−真值|/真值 通常小数点后两位，是向上取大值**

2.1.3 标准误差=$\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}|绝对误差|^2}$ 样本标准差对应的是有限次测量

2.2 误差分类

2.2.1 系统误差：理论公式不完善；同等条件下不变。

2.2.2 随机误差（偶然误差）：相对于真值无规律的涨落；多次测量减小其影响。

2.2.3 粗大误差（过失误差）：明显超出规定条件下预期；抉择后剔除异常数据。

2.3 测量误差分布

2.3.1 正态分布：

（1）概率密度函数：$\mathrm{f(x)}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}},-\infty<x<+\infty$

（2）P{−σ≤x≤σ}=0.683；P{−2σ≤x≤2σ}=0.955；P{−3σ≤x≤3σ}=0.997。

（3）标准偏差$s=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^2}$

2.3.2 均匀分布：

（1）概率密度函数：$\mathrm{f(x)}=K,-a<x<+a$

（2）标准偏差：$\sigma=\frac{a}{\sqrt{3}}$

2.4 测量结果表达式 $\mathbf{X}=\overline{\mathbf{X}}\pm\boldsymbol{\mu}$**（单位）** 包含测得值（$\overline{\mathrm{X}}$）、不确定度μ、单位。

2.5 精密度、准确度和正确度

2.5.1 精密度：一般以标准偏差表示。

2.5.2 准确度：最大绝对误差=量程×准确度等级%

2.5.3 正确度：测定值平均值与参考量的一致程度。

★2.6 实例

【例1】用一把米尺来测量长度分别为50cm和5cm的两物体，分析其绝对误差和相对误差。

解：对一般人来说，视觉误差在最小刻度的0.2倍左右。所以，取一起上最小刻度的0.2倍作为人的视力带来的绝对误差，即0.2mm。

$$L_1=50cm,\Delta L_1=0.2mm,E_1=\frac{0.02}{50}=0.04\%$$

$$L_2=5cm,\Delta L_1=0.2mm,E_1=\frac{0.02}{5}=0.4\%$$

【例2】已知电压表量程为100mV，等级0.5，求电压表仪器示值误差。

解：$\Delta V=100\times0.5\%mV=0.5mV.$

【例3】测1.5V电压，要求测量结果相对误差不大于1.5%，应选下面哪种仪器：0.5级量程5V；1.0级量程2V；2.5级量程1.5V.

解：相对误差最小为2V×1.0%÷1.5V=1.33%，所以选用规格1.0级量程2V。

【例4】用50分度的游标卡尺测某一圆棒长度L，6次测量结果如下（单位mm）：250.08，250.14，250.06, 250.10, 250.06, 250.10

解：测得值的最佳估计值为$L=\bar{L}=250.09mm$

测量列的标准偏差为$S_L=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(L_i-\bar{L})^2}{n-1}}=0.03mm$

平均值的标准偏差为$S_{\bar{L}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(L_i-\bar{L})^2}{n(n-1)}}=0.02mm$

§4.不确定度

4.1 **标准不确定度的 *A* 类分量评定** $u_A=\frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}=\sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}$

4.2 **标准不确定度的 *B* 类分量评定** $\Delta_{仪}=k_{100}u_B\rightarrow u_B=\Delta_{仪}/\sqrt{3}$

4.3 合成标准不确定度的评定

4.3.1 和差形式的函数$u_c^2(y)=\sum_{i=1}^{N}(\frac{\partial f}{\partial x_i})^2u_{x_i}^2$,其中$u_{x_i}$既可按 *A* 类也可按 *B* 类评定。

4.3.2 积商形式的函数$(\frac{u_c(y)}{y})^2=\sum_{i=1}^{N}(\frac{\partial lnf}{\partial x_i})^2u_{x_i}^2$

4.3.3 直接测量量的合成不确定度$u_c^2(y)=u_A^2+u_B^2$

★*4.4* 实例

【例 *1*】求函数$y=\frac{x_1^k x_2^m}{x_3^n}$的不确定度传递公式*.*

解：$(\frac{u_c(y)}{y})^2=\sum_{i=1}^{N}(\frac{\partial lnf}{\partial x_i})^2u_{x_i}^2=(\frac{k}{x_1})^2u_{x_1}^2+(\frac{m}{x_2})^2u_{x_2}^2+(-\frac{n}{x_3})^2u_{x_3}^2$

【例 *2*】用螺旋测微计测量一微小长度，重复测量 *6* 次。螺旋测微计的零点误差为 *−0.005mm*，螺旋测微计的仪器误差为 *0.004mm*，求该长度。

n	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
l/mm	*2.567*	*2.565*	*2.569*	*2.570*	*2.571*	*2.568*

解：算术平均值$\bar{l}=\frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}l_i=2.568mm$

最佳估计值$l_0=[2.5683-(-0.005)]mm=2.573mm$

A 类分量$u_A=\frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}=\sqrt{\frac{1}{6(6-1)}\sum_{i=1}^{6}(l_i-\bar{l})^2}=0.001mm$

B 类分量$u_B=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}=0.003mm$

合成标准不确定度$u_c(y)=\sqrt{u_A^2+u_B^2}=0.004mm$

测量结果 *l=(2.573 ± 0.004)mm*

【例 *3*】已知圆柱体质量 *m=(76.18 ± 0.04)g*，直径 *D=19.84 ± 0.02mm*，高 *h=31.24 ± 0.02mm*，计算圆柱体的密度及其不确定度。

解：$\rho=\frac{m}{\pi(\frac{D}{2})^2h}=7887.8kg/m^3$

$$\frac{u_\rho}{\rho}=\sqrt{(\frac{\partial ln\rho}{\partial m})^2u_m^2+(\frac{\partial ln\rho}{\partial D})^2u_D^2+(\frac{\partial ln\rho}{\partial h})^2u_h^2}=\sqrt{(\frac{1}{m})^2u_m^2+(-\frac{2}{D})^2u_D^2+(-\frac{1}{h})^2u_h^2}$$

$$\approx 0.0022$$

可得$u_\rho=17kg/m^3$

测量结果$\rho=(7888\pm 17)kg/m^3$

【例 *4*】用螺旋测微计测某一钢丝的直径，*6* 次测量值 y_i分别为：*0.249,0.250, 0.247, 0.251, 0.253, 0.250*；同时读得螺旋测微计的零位 x_0为：*0.004 mm*，已知螺旋测微计的仪器误差为Δ仪*=0.004mm*，请给出完整的测量结果。

解：测得值的最佳估计值为$x=\bar{x}-x_0=0.250-0.004=0.246mm$

测量列的标准偏差$s(x)=\sqrt{\frac{1}{6-1}[\sum_{k=1}^{6}(x_k-\bar{x})^2]}=0.002mm$

测量次数 *n=6*，近似有$u=\sqrt{u_A^2+u_B^2}\approx\sqrt{s(\bar{x})^2+\Delta_{仪}^2}\approx 0.004mm$

则：测量结果为 *X=(0.246±0.004)mm*

【例 *5*】设有一圆环，其外径为ϕ外*=9.800±0.005mm*，内径为ϕ内*=4.500±0.005mm*，高度 *h=5.000±0.005mm*，求环的体积 *V* 和不确定度。

解：环体积为$V=\frac{\pi}{4}\left(\varphi_{外}^2-\varphi_{内}^2\right)h=\frac{\pi}{4}(9.800^2-4.500^2)\times 5.000=\ 2.976\times 10^2 mm^3$

$$\frac{\partial \ln f}{\partial \varphi_{外}}=\frac{2\varphi_{外}}{\varphi_{外}^2-\varphi_{内}^2}=\frac{2\times 9.800}{9.800^2-4.500^2},$$

$$\frac{\partial \ln f}{\partial \varphi_{内}}=-\frac{2\varphi_{内}}{\varphi_{外}^2-\varphi_{内}^2}=-\frac{2\times 4.500}{9.800^2-4.500^2},$$

$$\frac{\partial \ln f}{\partial h}=\frac{1}{h}=\frac{1}{5.000}$$

$$\frac{\Delta V}{V}=\sqrt{(\frac{2\varphi_{外}\Delta\varphi_{外}}{\varphi_{外}^2-\varphi_{内}^2})^2+(\frac{2\varphi_{内}\Delta\varphi_{内}}{\varphi_{外}^2-\varphi_{内}^2})^2+(\frac{\Delta h}{h})^2}$$

$$=\sqrt{(\frac{2\times 9.800\times 0.005}{9.800^2-4.500^2})^2+(\frac{2\times 4.500\times 0.005}{9.800^2-4.500^2})^2+(\frac{0.005}{5.000})^2}=0.0055$$

$$=0.55\%$$

$\Delta V=V\times\Delta V/V=2.976\times 10^2\times 0.55\%\approx 2$

因此，环的体积为 $V=(2.98\pm 0.02)\times 10^2\ mm^3$

§5.有效数字

5.1 有效数字特点

可靠数字：通过直接获得的准确数字； 存疑数字：通过估读得到的数字

测量值的可靠数字加上一位存疑数字称为有效数字，总共的位数称为有效位数

（1）测量值只能写到也应该写到开始有误差的那一位到两位。

（2）有效数字的位数多少直接反映测量的准确度。有效位数越多，表明测量的准确度越高。

（3）有效数值书写时应注意：有效数值的位数与小数点位置无关。也不因使用的单位不同而改变。

【例】重力加速度某人测量值为 $980cm/s^2$，改写单位为 m/s^2,仍为三位有效数字，即 $9.80m/s^2$($\neq 9.8m/s^2$)(0 不可随意添减)。

5.2 有效数字修约原则

测量值只能写到也应该写到开始有误差的那一位到两位。其后的数字按"**四舍六进五凑双**"法则（即后面的数字是四及以下就舍掉，是六及以上就进一，遇五若前面是奇数就进一，最后一位就变成是偶数，若前面已是偶数，则舍掉）取舍。

【例】将下列数字保留两位有效数字：*2.2499，2.1501，2.1500，2.2500→2.2*

【例】取四位有效数字：*3.14159→3.142*（入）；*2.71729→2.717*（舍）；*5.165501→5.166*（入）；*4.510500→4.510*（凑偶）；*4.511500→4.512*（凑偶）

5.3 函数值的有效位数表示法

1.三角函数计算结果与角度的有效数字位数相同。例：$\sin(30.2)=0.503019=0.503$

2.对数运算结果其尾数与真数的有效数字位数相同。例：$\lg 3.27=0.514$

3.其他函数的有效位数表示法

将自变量的可疑位上下变动一个单位，观察函数结果在哪一位上变动，结果的可疑位就取在该位上。

【例】求$\sqrt[20]{3.25}$。

解：$\sqrt[20]{3.24}=1.0605405$；$\sqrt[20]{3.25}=1.0607039$；$\sqrt[20]{3.26}=1.0608669$。所以 $\sqrt[20]{3.25}=1.0607$

4.测量结果的科学表示方法

【例】$1.5kg$ 应写成 1.5×10^3g，不能写成 $1500g$；

$(5234\pm 1)km$ 应写成$(5.234\pm 0.001)\times 10^6m$；

$(0.000456\pm 0.000003)s$ 应写成$(4.56\pm 0.03)\times 10^{-4}s$

5.4 测量不确定度的有效位数：取一位或两位

1.第一位非零有效数字是 1 和 2 时可取两位；3 以上只能取一位。

2.预保留的最低位后的数字为零时舍去，不为零时进位。

3.测量结果的有效位数由测量不确定度来决定。

【例】m 测量结果 $100.02144550g$，不确定度 $0.0001775g$。则 m 的测量结果为 $100.02145g$。解：保留两位有效数。

【例】改错$(9.80\pm 0.034)cm\to(9.80\pm 0.03)cm$；$(2.804\pm 0.03)cm\to(2.80\pm 0.03)cm$

5.5 有效位数与换算单位

1.十进制单位变换不影响有效数字位数。

2.非十进制单位变换后误差所在位仍为有效数字末位。

【例】将 φ =93.5° 用弧度表示。

粗略判断其误差不小于 0.1°，$0.1\times\pi\div 180=0.002rad$，故 $93.5\times\pi\div 180=1.632rad$

5.6 有效数字的运算法则

1.加减运算的结果以参与运算的末位最高的数为准;

【例】12.4+0.571=13.0; 12.34+2.3574=14.70

2.乘除则以有效数字最少的数为准，有时可比其多取一位。

【例】$3600\times8=2.9\times10^4$; $2.3574\times12.3=29.0$

3.函数运算的取位方法通过函数计算来确定

【例】已知 $x=56.7$，$y=\ln x$，求 y

解：$u_x=0.1, u_y=|y'|u_x=0.002, y=\ln56.7=4.038$

§6.数据处理

6.1 数据计算

求解平均值、标准偏差、实验标准差（A 类不确定度）、B 类不确定度、合成不确定度、测量结果。

6.2 数据整理的重要步骤——列表法

在原始数据记录以及整理数据时，都要进行正规列表。将各量的关系有序地排列成表格形式。既有利于一目了然地表示各物理量之间的关系，又便于发现实验中的问题。

6.3 作图法

1、选择合适的坐标分度值，确定坐标纸的大小：坐标分度值的选取应能反映测量值的有效位数，一般以 1～2mm 对应于测量仪表的最小分度值或对应于测量值的次末位数）。

2、标明坐标轴：用粗实线画坐标轴，用箭头标轴方向，标坐标轴的名称或符号、单位,再按顺序标出坐标轴整分格上的量值。

3、标实验点：实验点可用“+”、“*”、“。”等符号标出（同一坐标系下不同曲线用不同的符号）。

4、连成图线：用直尺、曲线板等把点连成直线、光滑曲线。一般不强求直线或曲线通过每个实验点，应使图线两边的实验点与图线最为接近且分布大体均匀。图线正穿过实验点时可以在点处断开。

5、标出图线特征：在图上空白位置标明实验条件或从图上得出的某些参数。利用所绘直线可给出被测电阻 R 大小：从所绘直线上读取两点 A、B 的坐标就可求出 R 值。

6、标出图名：在图线下方或空白位置写出图线的名称及某些必要的说明。

6.4 最小二乘法

设此两物理量 x、y 满足线性关系，且假定实验误差主要出现在 y_i上，设拟合直线公式为 $y=f(x)=a+bx$，当所测各 y_i值与拟合直线上各估计值 $f(x_i)=a+bx_i$之间偏差的平方和最小，即$s=\sum[y_i-f(x_i)]^2=\sum[y_i-(a+bx_i)]^2\longrightarrow min$时，所得拟合公式即为最佳经验公式。

据此有$\frac{\partial s}{\partial a}=-2\sum(y_i-a-bx_i)=0\ \frac{\partial s}{\partial b}=-2\sum(y_i-a-bx_i)x_i=0$

$a=\frac{\sum x_iy_i\sum x_i-\sum y_i\sum x_i^2}{(\sum x_i)^2-n\sum x_i^2}$，$b=\frac{\sum x_i\sum y_i-n\sum x_iy_i}{(\sum x_i)^2-n\sum x_i^2}$

6.5 数据处理的表格法——逐差法

在有些实验中，我们连续取得一些数据。如果依次相减，就会发现中间许多数据并未发挥作用，而影响到实验的可靠性。例如：金属杨氏弹性模量实验和等厚干涉的牛顿环实验等。

二、示波器

§1.实验目的

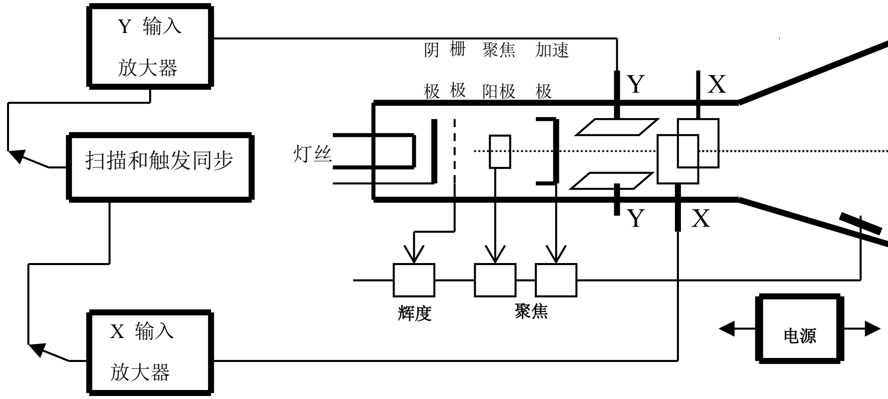
1、通过示波器的实验，可以了解示波器的结构与原理，熟悉示波器面板旋钮的功能，进而掌握示波器的调节和使用方法。

2、学习用示波器观察信号波形，并测量其幅度及周期与频率。

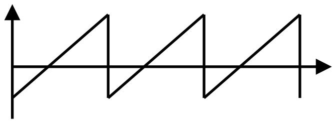
3、观察李萨如图形，掌握一种测量频率的方法。

§2.工作原理

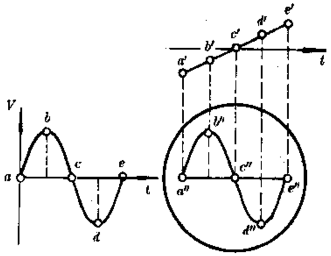
1、示波器的基本结构——示波管、放大器（包括 X 轴放大和 Y 轴放大）、扫描和触发同步系统、电源四个基本部分组成。



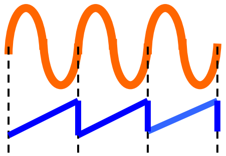
2、扫描——示波器工作时，需在 X 轴偏转板（水平偏转板）上加锯齿波形的电压，称为扫描电压。

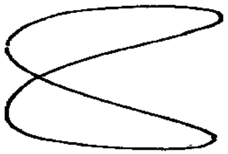


在 X 轴上加有扫描电压的同时，如果在 Y 轴上加上待测的正弦变化电压 U,就可以使 U。沿水平轴展开。此时，屏上显示的图形如图,当正弦电压的周期 Ty 与锯齿波电压的周期 Tx 恰好相等时，则正弦电压上 a,b,c,d,e 各点分别对应扫描信号上的 a′,b′,c′,d′,e′,则正弦电压变化一周，光点正好扫描一次. 以后各次扫描所得到的图形位置与第一次完全重叠，显示清晰、稳定的图形。



3、同步$f_y = nf_x$，n 为正整数时显示稳定的波形

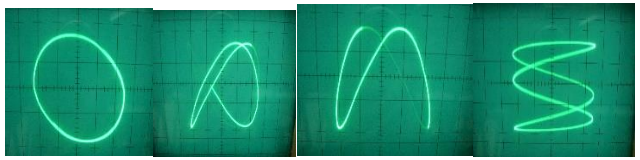




4、李萨如图形满足$\boldsymbol{f_y * N_y = f_x * N_x}$

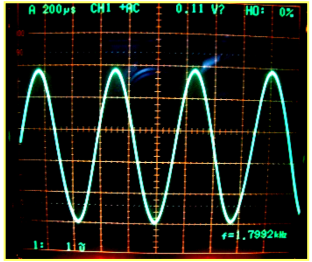
李萨如图形相交的交点数示例 Ny=4，Nx=2

5、频率比与示图



§ 3.实验内容

1、电压 V_{P-P} 测量



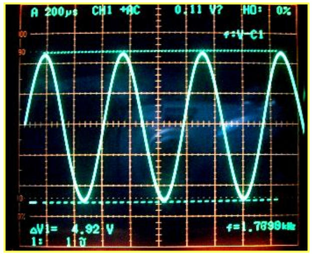
A、直读法$V_{P-P} = D * h$

V_{P-P}：被测电压的峰-峰值

D：示波器的偏转灵敏度

h：被测电压波形高度，即格数

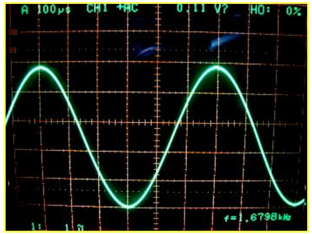
B、光标法



按下ΔV–Δt–OFF 选择 ΔV，这时会在屏上出现上下平行的两条水平光标，如图。

按下 TCK/C，选择两条水平光标中的任一条（在前面会出现小亮线），调节 CH1 或 CH2 的上下位置移动旋钮，使光标到达所需位置。

再按下 TCK/C 选择两条水平光标中的另一条，到达所需的另一位置。



2、周期 T 与频率 f 的测量

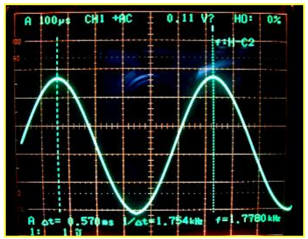
A、直读法$T_X = Q * x$

T_X：测量周期

Q：表示时基因素

X：一个周期信号占有的格数

B、光标法



按下ΔV–Δt–OFF 选择 ΔT,这时会在屏上出现左右平行的两条垂直光标，如图 6。

按下 TCK/C，选择两条水平光标中的任一条（在

前面会出现小亮线），调节 CH1 或 CH2 的上下位置移动旋钮，使光标到达所需位置。

再按下 TCK/C 选择两条水平光标中的另一条，到达所需的另一位置。

3、用比较法测定示波器的扫描频率验证$f_y = nf_x$

具体方法可以首先调节 TIME/DIV 扫描时基信号，比如选择 0.5ms/dit（500μS），按 10 格求出水平扫描频率 200HZ，然后细心调节信号发生器，使示波器全屏显示1只，2 只… 波形，相应地从信号发生器上读出各种情况下的信号频率，对应验证 。将数字填入下表：

4、用李萨如图形测量未知信号的频率：

（1）可从信号发生器的左边输出 50HZ 的标准信号作为被测信号输入到示波器的 CH2”轴。定为 fy 信号.

（2）信号发生器发出的信号输入到示波器的“CH1 ”轴。作为 fx 信号.

（3）示波器工作于“X---Y”状态。

（4）改变信号输出为 25，50，75，100,150HZ 左右，细心调节直到出现相对缓慢变化的稳定的图形。由公式 2 计算出 fy 频率，记录数据于表.

（5）由测量的结果，求出最佳实验值。

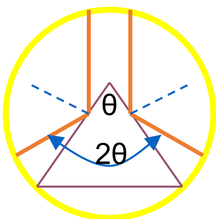
三、分光计

§1.实验目的

1.学会分光计的结构。

2.学会正确的分光计调节和使用方法。

3.利用分光计测量三棱镜的顶角。



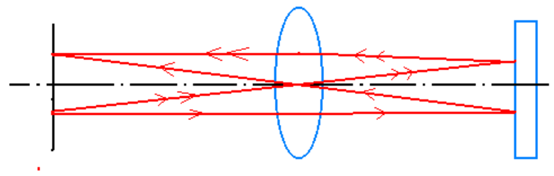
§2.实验原理

1.反射法测量三棱镜棱角

$\theta = (|\theta_{右A} - \theta_{左A}| + |\theta_{右B} - \theta_{左B}|)/4$

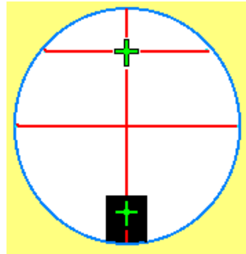
2.自准直法

当发光点（物）处在凸透镜的焦平面时，它发出的光线通过透镜后将为一束平行光，若与光抽垂直的平面镜将此平行光反射回去，反射光再次通过透镜后仍会聚于透镜的焦平面上，其会聚点将在发光点相对于光轴的对称位置上。



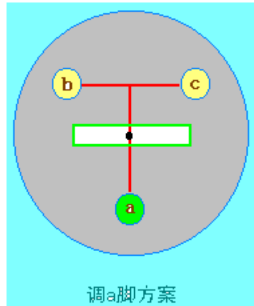
§3.实验内容

1. 分光计调整

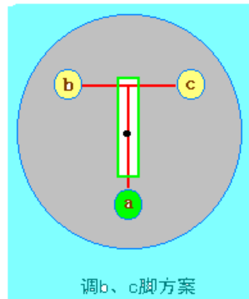


（1）调节目镜套筒进出，使**叉丝**最清晰为止。

（2）调节物镜套筒，使**亮绿十字**最清晰为止，从而达到物象最清晰的目的。



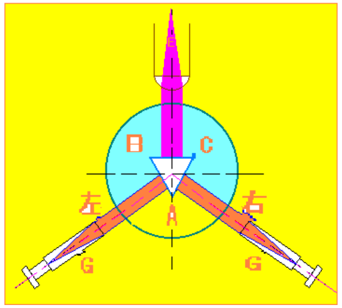
（3）置反射镜平行于 b、c 脚的连线。预调十字于上横叉丝的上方，当载物台转过 180 度时，若十字出现在上横叉丝的下方，则调节 a 脚使十字向上横叉丝靠拢；否则调节望远镜倾角使十字向上横叉丝靠拢。用逐次逼进法，重复上述两步骤，直到任意旋转载物台都能看到十字在上横叉丝处。



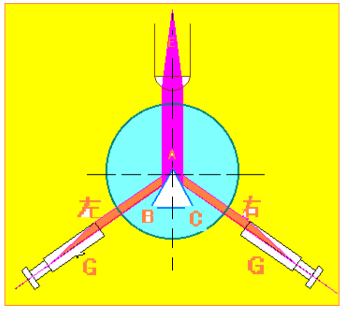
（4）置反射镜垂直于 b、c 脚的连线。预调十字于上横叉丝的上方，当载物台转过 180 度时，若十字出现在上横叉丝的下方，则调节 b 或 c 脚使十字向上横叉丝靠拢；否则调节望远镜倾角使十字向上横叉丝靠拢。用逐次逼进法，重复上述两步骤，直到任意旋转载物台都能看到十字在上横叉丝处。

（5）调节平行光管倾角，使亮狭缝平行且重叠在下横叉丝处。调节狭缝器进出（调焦），使亮狭缝最清晰为止。旋转狭缝器使亮狭缝平行且重叠于竖叉丝处。最后调节亮狭缝的大小约目视大小 1–2mm。

2. 两种棱镜角测量方法

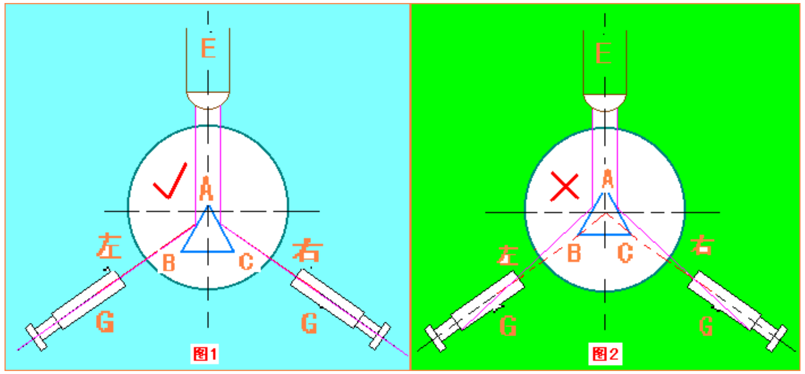


自准直法

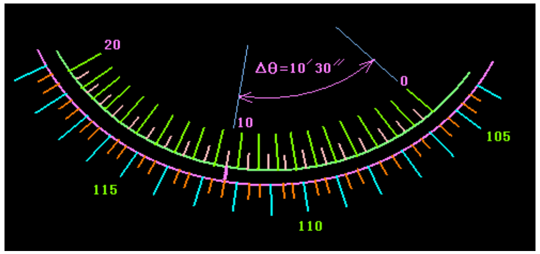


棱脊分束法

3. 两种三棱镜位置分析



4. 读角度方法

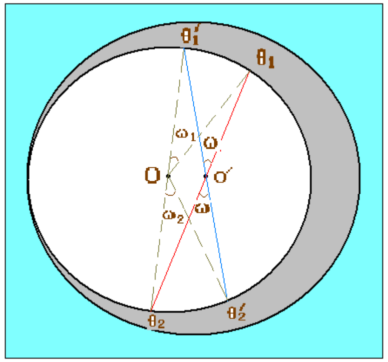


主尺读游标零刻度线对齐处。游标读亮光线对齐处角度值。105°30′30″

5. 消偏心差

$\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$;

$\omega = [(\theta_1' - \theta_1) + (\theta_2' - \theta_2)]/2$



§4.思考题

1、怎样解决视差?

答：通过调节物镜镜筒使十字最清晰的方法，直到在 任何方位看到的十字和叉丝都不发生位移为止。

2、为什么用左右窗读数?

答：为了消除圆刻度盘的偏心差。

3、试画出十字成像光路图?

答：见下图。