

青岛科技大学物理实验指导书

青岛科技大学物理实验教学中心

转动惯量的测定

一、实验内容:

- 1) 测量圆盘的转动惯量;
- 2) 测量圆环的转动惯量;
- 3) 验证平行轴定理。

二、实验仪器:



ZKY-ZS 转动惯量实验仪



ZKY-J1 通用记时器



实验装置图

三、实验原理:

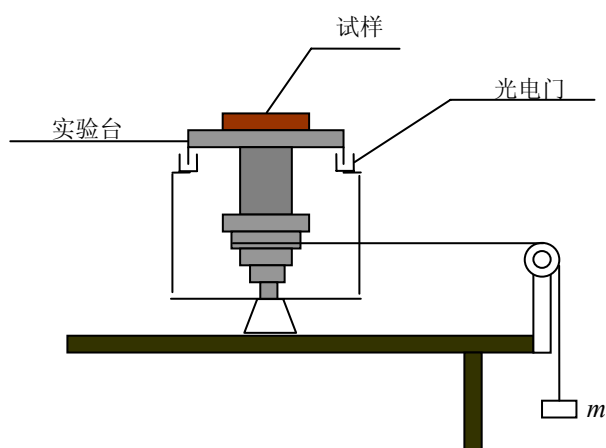


图 1 转动惯量实验仪

1. 空实验台的转动惯量 J_1 为:

$$J_1 = \frac{mR(g - R\beta_2)}{\beta_2 - \beta_1} \quad (1)$$

式中 m 、 R 分别为砝码的质量、塔轮半径, β_1 、 β_2 分别为实验台加砝码前匀减速、加砝码后匀加速运动的角加速度。

2. 加试样后实验台的转动惯量 J_2 为:

$$J_2 = \frac{mR(g - R\beta_4)}{\beta_4 - \beta_3} \quad (2)$$

β_3 、 β_4 分别为加砝码前、后实验台的角加速度。

3. 试样的转动惯量为:

$$J = J_2 - J_1 \quad (3)$$

4. 角加速度的测量表达式:

$$\beta = \frac{2\pi(k_n t_m - k_m t_n)}{t_n^2 t_m - t_m^2 t_n} \quad (4)$$

式中 k 、 t 为计数器遮挡的次数和相应的时间。

四、实验步骤:

1. 实验准备

在桌面上放置 ZKY-ZS 转动惯量实验仪, 并利用基座上的三颗调平螺钉, 将仪器调平。将滑轮支架固定在实验台面边缘, 调整滑轮高度及方位, 使滑轮槽与选取的绕线塔轮槽等高, 且其方位相互垂直, 如图 1 所示。

通用电脑计时器上 2 路光电门的开关应 1 路接通, 另 1 路断开作备用。当用于本实验时, 建议设置 1 个光电脉记数 1 次, 1 次测量记录大约 8 组数

2. 测量并计算实验台的转动惯量

1) 测量 β_1

接通电脑计时器电源开关(或按“复位”键), 进入设置状态, 不用改变默认值; 用手拨动载物台, 使实验台有一初始转速并在摩擦阻力矩作用下作匀减速运动; 按“待测 / +”键后仪器开始测量光电脉冲次数(正比于角位移)及相应的时间; 显示 8 组测量数据后再次按“待测 / +”键, 仪器进入查阅状态, 将查阅到的数据记入表 1 中。

采用逐差法处理数据，将第 1 和第 5 组，第 2 和第 6 组……，分别组成 4 组，用(4)式计算对应各组的 β_1 值，然后求其平均值作为 β_1 的测量值。

2) 测量 β_2

选择塔轮半径 R 及砝码质量，将 1 端打结的细线沿塔轮上开的细缝塞入，并且不重叠的密绕于所选定半径的轮上，细线另 1 通过滑轮扣连接砝码托上的挂钩，用于将载物台稳住；按“复位”键，进入设置状态后再按“待测 / +”键，使计时器进入工作等待状态；释放载物台，砝码重力产生的恒力矩使实验台产生匀加速转动；电脑计时器记录 8 组数据后停止测量。查阅、记录数据于表 1 中并计算 β_2 的测量值。由(1)式即可算出 J_1 的值。

3. 测量并计算实验台放上试样后的转动惯量

将待测试样放上载物台并使试样几何中心轴与转轴中心重合，按与测量 J_1 同样的方法可分别测量未加法码的角加速度 β_3 与加砝码后的角加速度 β_4 。由(2)式可计算 J_2 ，由(3)式可计算试样的转动惯量 J 。计算试样的转动惯量并与理论值比较，计算测量值的相对误差。

4. 验证平行轴定理

将两圆柱体对称插入载物台上与中心距离为 d 的圆孔中，测量并计算两圆柱体在此位置的转动惯量。将测量值与理论计算值比较，计算测量值的相对误差。

五、数据记录 and 数据处理:

1.测量实验台的角加速度

匀减速						匀加速 $R_{\text{塔轮}} = \quad \text{mm} \quad m_{\text{砝码}} = \quad \text{g}$					
k_m	1	2	3	4	平均	k_m					平均
$t_m(\text{s})$						$t_m(\text{s})$					
k_n	5	6	7	8		k_n					
$t_n(\text{s})$						$t_n(\text{s})$					
$\beta_1 (1/\text{s}^2)$						$\beta_2 (1/\text{s}^2)$					

根据 $J_1 = \frac{mR(g - R\beta_2)}{\beta_2 - \beta_1}$ ，计算空实验台的转动惯量 J_1 。

2.测量圆环的角加速度

匀减速						匀加速 $R_{\text{塔轮}} =$ mm $m_{\text{砝码}} =$ g					
k_m	1	2	3	4	平均	k_m					平均
$t_m(s)$						$t_m(s)$					
k_n	5	6	7	8		k_n					
$t_n(s)$						$t_n(s)$					
$\beta_3 (1/s^2)$						$\beta_4 (1/s^2)$					

计算 $J_2 = \frac{mR(g - R\beta_4)}{\beta_4 - \beta_3}$ ，根据 $J_{\text{环}} = J_2 - J_1$ 求圆环的转动惯量 $J_{\text{环}}$ 。

3. 测量圆柱体的角加速度

$d=105$ mm $r_{\text{圆柱体}} =$ mm $m_{\text{圆柱体}} =$ g

匀减速						匀加速 $R_{\text{塔轮}} =$ mm $m_{\text{砝码}} =$ g					
k_m	1	2	3	4	平均	k_m					平均
$t_m(s)$						$t_m(s)$					
k_n	5	6	7	8		k_n					
$t_n(s)$						$t_n(s)$					
$\beta_5 (1/s^2)$						$\beta_6 (1/s^2)$					

计算 $J_3 = \frac{mR(g - R\beta_6)}{\beta_6 - \beta_5}$ ，根据 $J_{\text{柱}} = (J_3 - J_1)/2$ 求圆环的转动惯量 $J_{\text{柱}}$ 。

再根据 $J_0 = \frac{1}{2}mr^2$ 和 平行轴定理 $J'_{\text{柱}} = J_0 + md^2$ 计算圆环的转动惯量 $J'_{\text{柱}}$ 。

比较二者并求相对误差。

六、思考题：

1. 验证平行轴定理时，为什么不用一个圆柱体而采用两个对称放置？

提示：若只用一个圆柱体，则圆盘会受到一个沿盘切向的力矩的作用，转动时间，必然会导致摩擦力的增加，一方面增大了测量误差，另一方面影响仪器的使用寿命。如果采用两个到处放置，两力矩大小相等，

方向相反，于是相互抵消了。

2.采用本实验测量方法，对测量试样的转动惯量的大小有什么要求吗？

提示：试样的测量公式为 $J = J_2 - J_1$ ，其中 J 是试样的转动惯量、 J_1 是实验台的转动惯量、 J_2 是放上试样后实验台的转动惯量，显然，当试样的转动惯量远小于实验台的转动惯量时， J 将无法测量，或者测得的 J 与 ΔJ 可比拟，导致测量的误差会很大，所以，待测实验的转动惯量不能比实验台的转动惯量小很多。

落球法测量液体的粘滞系数

一、实验内容:

熟悉斯托克斯定律，掌握用落球法测量液体的粘滞系数的原理和方法。

二、实验仪器:

落球法粘滞系数测定仪、小钢球、蓖麻油、千分尺、激光光电计时仪



三、实验原理:

如图 1，当金属小球在粘性液体中下落时，它受到三个铅直方向的力：小球的重力 mg 、液体作用于小球的浮力 $\rho g V$ （ V 为小球体积， ρ 为液体密度）和粘滞阻力 F （其方向于小球运动方向相反）。如果液体无限深广，在小球下落速度 v 较小的情况下，有：

$$F = 6\pi\eta r v \quad (1)$$

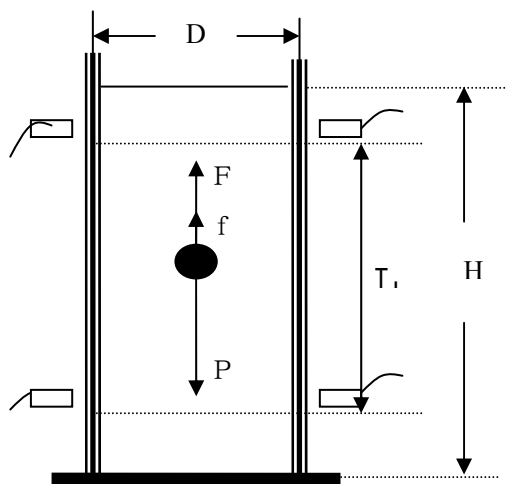


图 1 液体的粘滞系数测量装置

上式称为斯托克斯公式，式中 η 为液体的粘滞系数，单位是 $Pa \cdot s$ ， r 为小球的半径。

斯托克斯定律成立的条件有以下 5 个方面：

- 1) 媒质的不均一性与球体的大小相比是很小的；
- 2) 球体仿佛是在一望无涯的媒质中下降；
- 3) 球体是光滑且刚性的；
- 4) 媒质不会在球面上滑过；
- 5) 球体运动很慢，故运动时所遇的阻力系由媒质的粘滞性所致，而不是因球体运动所推向前行的媒质的惯性所产生。

小球开始下落时，由于速度尚小，所以阻力不大，但是随着下落速度的增大，阻力也随之增大。最后，三个力达到平衡，即：

$$mg = \rho g V + 6\pi\eta rv$$

于是小球开始作匀速直线运动，由上式可得：

$$\eta = \frac{(m - V\rho)g}{6\pi rv}$$

令小球的直径为 d ，并用 $m = \frac{\pi}{6} d^3 \rho$ ， $v = \frac{l}{t}$ ， $r = \frac{d}{2}$ 代入上式得：

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \quad (2)$$

其中 ρ' 为小球材料的密度， l 为小球匀速下落的距离， t 为小球下落 l 距离所用的时间。

实验时，待测液体盛于容器中，故不能满足无限深广的条件，实验证明上式应该进行修正。测量表达式为：

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \cdot \frac{1}{(1 + 2.4 \frac{d}{D})(1 + 1.6 \frac{d}{H})} \quad (3)$$

其中 D 为容器的内径， H 为液柱高度。

四、实验步骤：

1. 调整粘滞系数测量装置及实验仪器

- 1) 调整底盘水平，在仪器横梁中间部位放重锤部件，调节底盘旋钮，使重锤对准底盘的中心圆点。
 - 2) 将实验架上的两激光器接通电源，并进行调节，使其红色激光束平行对准锤线。
 - 3) 收回重锤部件，将盛有待测液体的量筒放置到实验架底盘中央，并在实验中保持位置不变。
 - 4) 在实验架上放上钢球导管。小球用酒精清洗干净，并用滤纸吸干。
 - 5) 将小球放入钢球导管，看其能否阻挡光线，如不能，则适当调整激光器位置。
2. 用温度计测量油温，在全部小球下落后再测一次油温，取其平均值。
 3. 测量上下两激光束之间的距离 l 。
 4. 将小球放入钢球导管，当小球落下，阻挡上面的红色激光束，秒表开始记时，到小球落到阻挡下面的红色激光束时，停止记时，读出下落时间，重复 6 次。
 5. 计算蓖麻油的粘滞系数。

五、数据记录 and 数据处理

表格一

d (mm)	l (mm)	D (mm)	H (mm)	ρ' (Kg/m ³)	ρ (Kg/m ³)
				7.90×10^3	0.958×10^3

表格二

T= °C

次	1	2	3	4	5	6
t (s)						

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i}{6}$$

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \cdot \frac{1}{(1 + 2.4\frac{d}{D})(1 + 1.6\frac{d}{H})}$$

$$\Delta\eta = |\eta - \eta_0|$$

$$E_{\eta} = \frac{\Delta\eta}{\eta_0} \times 100\%$$

η_0 为测量室温下的公认值。

六、思考题:

1) 为什么要对测量表达式(2)进行修正?

提示: 斯托克斯定律成立的条件是球体仿佛是在一望无际的媒质中下降, 而实验采用的有限的油柱,

故应进行修正。

2) 本实验中如果钢球表面粗糙对实验会有影响吗?

提示: 有。斯托克斯定律成立的条件要求球体是光滑且刚性的。

3) 激光束为什么一定要通过玻璃圆筒的中心轴?

提示: 激光束如果不通过玻璃圆筒的中心轴, 小球下落时就不会阻挡激光束, 激光计时器就得不到启动信号而不能计时。

4) 本实验中不少的同学每次测量的时间完全一样, 由此你能够对电子计时仪器提出什么要求?

5) 如何判断小球在作匀速运动?

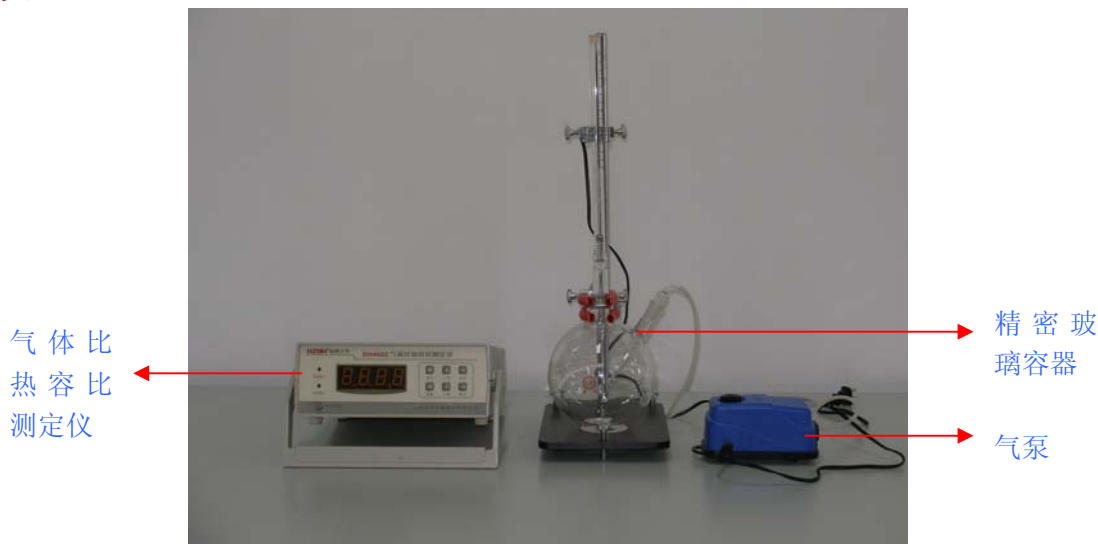
提示: 让小球贴近液面下落, 测量其经过测量区域一定距离的时间, 然后再将小球液面上面一定高度处下落, 测量通过同样距离的时间, 若两次时间相同, 则可判断小球在作匀速运动。

气体比热容比的测定

一、实验目的

1. 理解气体比热容比的物理含义
2. 掌握测定空气比热容比的原理与方法

二、实验仪器



三、实验原理

实验基本装置如图所示，振动物体小球的直径比玻璃管直径仅小 0.01~0.02mm。它能在 此精密的玻璃管中上下移动，在瓶子的壁上有一小口，并插入一根细管，通过它各种气体可以注入到烧瓶中。

钢球 A 的质量为 m ，半径为 r （直径为 d ），当瓶子内压力 P 满足下面条件时钢球 A 处于力平衡状态。这时 $P = P_L + \frac{mg}{\pi r^2}$ ，式中 P_L 为大气压强。为了补偿由于空气阻尼引起振动物体 A 振幅的衰减，通过 C 管一直注入一个小气压的气流，在精密玻璃管 B 的中央开设有一个小孔。当振动物体 A 处于小孔下方的半个振动周期时，注入气体使容器的内压力增大，引起物体 A 向上移动，而当物体 A 处于小孔上方的半个振动周期时，容器内的气体将通过小孔流出，使物体下沉。以后重复上述过程，只要适当控制注入气体的流量，物体 A 能在玻璃管 B 的小孔上下作简谐振动，振动周期可利用光电计时装置来测得。

若物体偏离平衡位置一个较小距离 x ，则容器内的压力变化 Δp ，物体的运动方程为：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \pi r^2 \Delta p \quad (1)$$

因为物体振动过程相当快，所以可以看作绝热过程，绝热方程

$$PV^\gamma = \text{常数} \quad (2)$$

将 (2) 式求导数得出：

$$\Delta p = -\frac{p\gamma \Delta V}{V}, \quad \Delta V = \pi r^2 x \quad (3)$$

将 (3) 式代入 (1) 式得

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\pi^2 r^4 p \gamma}{mV} x = 0$$

此式即为熟知的简谐振动方程，它的解为

$$\begin{aligned}\omega &= \sqrt{\frac{\pi^2 r^4 p \gamma}{mV}} = \frac{2\pi}{T} \\ \gamma &= \frac{4mV}{T^2 p r^4} = \frac{64mV}{T^2 p d^4}\end{aligned}\quad (4)$$

式中各量均可方便测得，因而可算出 γ 值。理论上得出： $\gamma = 1.40$

四、实验步骤

1. 接通电源，调节气泵上气量调节旋钮，使小球在玻璃管中以小孔为中心上下振动。注意，气流过大或过小会造成钢珠不以玻璃管上小孔为中心的上下振动，调节时需要用手挡住玻璃管上方，以免气流过大将小球冲出管外造成钢珠或瓶子损坏。
2. 打开周期计时装置，次数设置为 50 次，按下执行按钮后即可自动记录振动 50 次周期所需的时间。
3. 若不计或不停止计时，可能是光电门位置放置不正确，造成钢珠上下振动时未挡光，或者是外界光线过强，此时须适当挡光。
4. 重复以上步骤五次（本实验仪器体积约为 200ml）。

五、数据记录

P=

次数	1	2	3	4	5
t					
T					

$d=10\text{mm}$, $\Delta_d = 0.004\text{mm}$; $m=4.00\text{g}$, $\Delta_m = 0.05\text{g}$; $V=1451\text{cm}^3$

五、数据处理

在忽略容器体积 V 、大气压 p 测量误差的情况下估算空气的比热容及其不确定度 $\gamma \pm \Delta\gamma$

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i}{5} \quad \Delta T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (T_i - \bar{T})^2}{4}} \quad P = P_L + \frac{mg}{\pi r^2}$$

$$\gamma = \frac{4mV}{T^2 p r^4} = \frac{64mV}{T^2 p d^4}$$

$$E_r = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(4\frac{\Delta d}{d}\right)^2} \times 100\%$$

$$\Delta\gamma = E_r \cdot \bar{\gamma}$$

$$\gamma = \bar{\gamma} \pm \Delta\gamma$$

用电流场模拟静电场

一、实验内容:

测量同轴电缆的静电场

二、实验仪器:

EQC-2 型双层式静电场测绘仪一套, 直流稳压电源(10V, 1A), 电压表



三、实验原理:

静电场和稳恒电流场虽是两个截然不同的电场,但可以用稳恒电流场中的电位分布来模拟静电场的电位分布。对于均匀带电的长直同轴柱面的静电场可以用圆片形金属电极 A 和圆环金属电极 B 所形成的电流场来描绘。

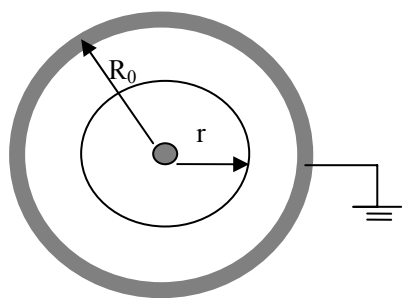


图 1 同轴电缆的静电场

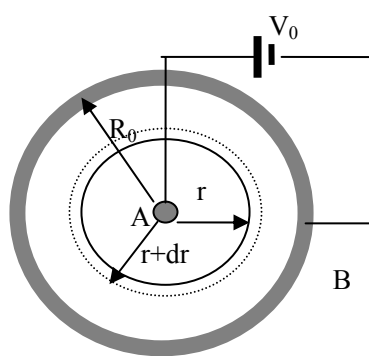


图 2 同轴电缆的电流场

下面比较两种场半径为 r 处的电势的表达式:

1. 静电场

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r}$$

$$V = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_r^{R_0} \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \cdot dr = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_0}{r}$$

设内圆柱与同轴柱面间的电势为 V_0 ，则

$$V_0 = \int_{R_0}^r \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \cdot dr = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_0}{r_0}$$

$$V = \frac{V_0}{\ln \frac{R_0}{r_0}} \cdot \ln \frac{R_0}{r} \quad (1)$$

2. 稳恒电流场

设任意处的电流密度为 j ，电阻率为 ρ ，则该处场强.

$$E = \rho j = \rho \frac{I}{2\pi r t} \quad (\text{其中 } t \text{ 为电纸厚度})$$

$$V' = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{I\rho}{2\pi t} \int_r^{R_0} \frac{dr}{r} = \frac{I\rho}{2\pi t} \ln \frac{R_0}{r}$$

设加在 A、B 两极间的电势差为 V_0' ，则

$$V_0' = \frac{I\rho}{2\pi t} \int_{r_0}^{R_0} \frac{dr}{r} = \frac{I\rho}{2\pi t} \ln \frac{R_0}{r_0}$$

则

$$V = \frac{V_0'}{\ln \frac{R_0}{r_0}} \cdot \ln \frac{R_0}{r} \quad (2)$$

比较 (1)，(2) 两式可知，在离开圆心 r 处两场电势有完全相同的表达式。故可用稳恒电流场模拟静电场。

四、实验步骤:

1. 将导电玻璃上内外两电极分别与直流稳压电源的正负极相连接，电压表正负极分别与同步探针及电源负极相连接。调节电源电压到 10.0V。
2. 移动同步探针测绘同轴电缆的等位线簇。相邻两等位线间的电位差为 1 伏，共测八条等位线，每条等位线测定出八个均匀分布的点。
3. 以每条等位线上各点到原点的平均距离为半径画出等位线的同心圆簇。然后根据电

力线与等位线正交原理，再画出电力线，标明等位线的电压大小，并指出电场强度方向，得到一张完整的电场分布图。

4. 在坐标纸上作出相对电位 $\frac{U_r}{U_0}$ 和 $\ln r$ 的关系曲线，并与理论结果比较。

五、数据记录 and 数据处理:

$$r_a = 0.50\text{cm} \quad r_b = 7.50\text{cm} \quad U_0 = 10.0\text{V}$$

U_r (V)						
U_r / U_0						
$r_{\text{测}}$						
$\ln r_{\text{测}}$						
$r_{\text{理}}$						
$\Delta_r = r_{\text{理}} - r_{\text{测}} $						
$E_r = \Delta_r / r_{\text{理}}$						

式中 $r_{\text{理}}$ 根据

$$r = r_b \left(\frac{r_b}{r_a} \right)^{\frac{U_r}{U_0}}$$

计算得出。

数据处理要求: 1) 在坐标纸上描绘同轴电缆的静电场分布;

2) 填写上表;

3) 根据表格数据在坐标纸上作 $\ln r \sim \frac{U_r}{U_0}$ 图线。

六、注意事项:

测量时，探针每次应该从外向里或者从里向外沿一个方向移动，测量一个点时不要来回移动

测量，因为探针能够小幅转动，向前或向后测量同一点会导致打孔出现偏差。

七、思考题：

1) 用电流场模拟静电场的条件是什么？

提示：几何现状完全一样；边界条件完全一样；物理表达式完全一样。

2) 如果电源电压增加一倍，等位线和电力线的形状是否发生变化？电场强度和电位分布是否发生变化？为什么？

提示：如果电源电压增加一倍，等位线仍然是系列同心圆，电力线仍然为径向辐射状，不会发生变化。

但是因为电压增加，则空间各处的电场强度会增加，电位分布会变得密集起来。

3) 测量电场产生畸变，试分析其原因。

提示：电介质的电导率不均匀；探针与导电膜接触不良；测量不是沿同一方向。

用电流场模拟静电场

一、实验内容:

测量同轴电缆的静电场

二、实验仪器:

EQC-2 型双层式静电场测绘仪一套, 直流稳压电源(10V, 1A), 电压表



三、实验原理:

静电场和稳恒电流场虽是两个截然不同的电场,但可以用稳恒电流场中的电位分布来模拟静电场的电位分布。对于均匀带电的长直同轴柱面的静电场可以用圆片形金属电极 A 和圆环金属电极 B 所形成的电流场来描绘。

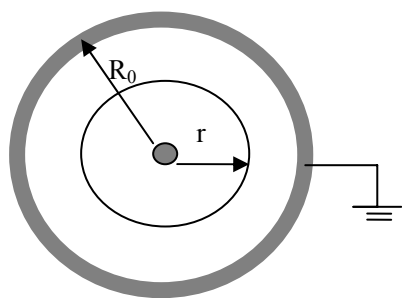


图 1 同轴电缆的静电场

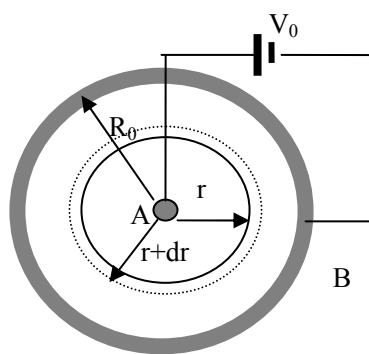


图 2 同轴电缆的电流场

下面比较两种场半径为 r 处的电势的表达式:

3. 静电场

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r}$$

$$V = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_r^{R_0} \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \cdot dr = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_0}{r}$$

设内圆柱与同轴柱面间的电势为 V_0 ，则

$$V_0 = \int_{R_0}^r \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \cdot dr = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_0}{r_0}$$

$$V = \frac{V_0}{\ln \frac{R_0}{r_0}} \cdot \ln \frac{R_0}{r} \quad (1)$$

4. 稳恒电流场

设任意处的电流密度为 j ，电阻率为 ρ ，则该处场强.

$$E = \rho j = \rho \frac{I}{2\pi r t} \quad (\text{其中 } t \text{ 为电纸厚度})$$

$$V' = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{I\rho}{2\pi t} \int_r^{R_0} \frac{dr}{r} = \frac{I\rho}{2\pi t} \ln \frac{R_0}{r}$$

设加在 A、B 两极间的电势差为 V_0' ，则

$$V_0' = \frac{I\rho}{2\pi t} \int_{r_0}^{R_0} \frac{dr}{r} = \frac{I\rho}{2\pi t} \ln \frac{R_0}{r_0}$$

则

$$V = \frac{V_0'}{\ln \frac{R_0}{r_0}} \cdot \ln \frac{R_0}{r} \quad (2)$$

比较 (1)，(2) 两式可知，在离开圆心 r 处两场电势有完全相同的表达式。故可用稳恒电流场模拟静电场。

四、实验步骤:

1. 将导电玻璃上内外两电极分别与直流稳压电源的正负极相连接，电压表正负极分别与同步探针及电源负极相连接。调节电源电压到 10.0V。
2. 移动同步探针测绘同轴电缆的等位线簇。相邻两等位线间的电位差为 1 伏，共测八条等位线，每条等位线测定出八个均匀分布的点。
3. 以每条等位线上各点到原点的平均距离为半径画出等位线的同心圆簇。然后根据电

力线与等位线正交原理，再画出电力线，标明等位线的电压大小，并指出电场强度方向，得到一张完整的电场分布图。

4. 在坐标纸上作出相对电位 $\frac{U_r}{U_0}$ 和 $\ln r$ 的关系曲线，并与理论结果比较。

五、数据记录 and 数据处理:

$$r_a = 0.50\text{cm} \quad r_b = 7.50\text{cm} \quad U_0 = 10.0\text{V}$$

U_r (V)						
U_r / U_0						
$r_{\text{测}}$						
$\ln r_{\text{测}}$						
$r_{\text{理}}$						
$\Delta_r = r_{\text{理}} - r_{\text{测}} $						
$E_r = \Delta_r / r_{\text{理}}$						

式中 $r_{\text{理}}$ 根据

$$r = r_b \left(\frac{r_b}{r_a} \right)^{\frac{U_r}{U_0}}$$

计算得出。

数据处理要求: 1) 在坐标纸上描绘同轴电缆的静电场分布;

2) 填写上表;

3) 根据表格数据在坐标纸上作 $\ln r \sim \frac{U_r}{U_0}$ 图线。

六、注意事项:

测量时，探针每次应该从外向里或者从里向外沿一个方向移动，测量一个点时不要来回移动

测量，因为探针能够小幅转动，向前或向后测量同一点会导致打孔出现偏差。

七、思考题：

4) 用电流场模拟静电场的条件是什么？

提示：几何现状完全一样；边界条件完全一样；物理表达式完全一样。

5) 如果电源电压增加一倍，等位线和电力线的形状是否发生变化？电场强度和电位分布是否发生变化？为什么？

提示：如果电源电压增加一倍，等位线仍然是系列同心圆，电力线仍然为径向辐射状，不会发生变化。

但是因为电压增加，则空间各处的电场强度会增加，电位分布会变得密集起来。

6) 测量电场产生畸变，试分析其原因。

提示：电介质的电导率不均匀；探针与导电膜接触不良；测量不是沿同一方向。

超声波传播速度的测量

一、实验内容

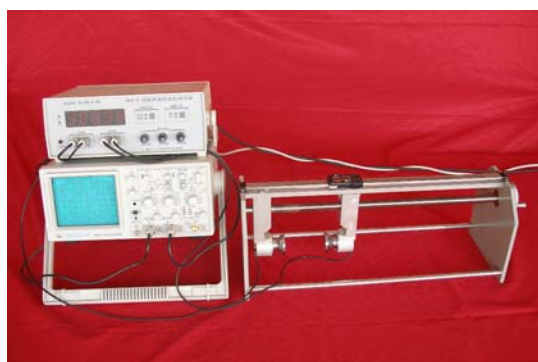
1. 用相位比较法测量声速；
2. 用共振干涉法测量声速；
3. 通过实验了解作为传感器的压电陶瓷的功能。

二、实验仪器

SVX-5 型声速测试仪信号源



SV-DH 系列声速测试仪



实验装置

三、预备知识介绍

1. 声 波

频率介于 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 的机械波振动在弹性介质中的传播就形成声波，介于 $20\text{kHz} \sim 500\text{MHz}$ 的称为超声波，超声波的传播速度就是声波的传播速度，而超声波具有波长短，易于定向发射和会聚等优点，声速实验所采用的声波频率一般都在 $20\text{kHz} \sim 60\text{kHz}$ 之间。在此频率范围内，采用压电陶瓷换能器作为声波的发射器、接收器、效果最佳。

2. 压电陶瓷换能器

压电陶瓷换能器是由压电陶瓷片和轻重两种金属组成。

压电陶瓷片是由一种多晶结构的压电材料（如石英、铅钛酸铅陶瓷等），在一定温度下经极化处理制成的。它具有压电效应，即受到与极化方向一致的应力 T 时，在极化方向上产生一定的电场强度 E 且具有线性关系： $E = g \cdot T$ ，即力 \rightarrow 电，称为**正压电效应**；当与极化方向一致的外加电压 U 加在压电材料上时，材料的伸缩形变 S 与 U 之间有简单的线性关系： $S = d \cdot U$ ，即电 \rightarrow 力，称为**逆压电效应**。其中 g 为比例系数， d 为压电常数，与材料的性质有关。由于 E 与 T ， S 与 U 之间有简单的线性关系，因此我们就可以将正弦交流电信号变成压电材料纵向的长度伸缩，使压电陶瓷片成为超声波的波源。即压电换能器可以把电能转换为声能作为超声波发生器，反过来也可以使声压变化转化为电压变化，即用压电陶瓷片作为声频信号接收器。因此，压电换能器可以把电能转换为声能作为声波发生器，也可把声能转换为电能作为声波接收器之用。

压电陶瓷换能器根据它的工作方式，可分为纵向(振动)换能器、径向(振动)换能器及弯

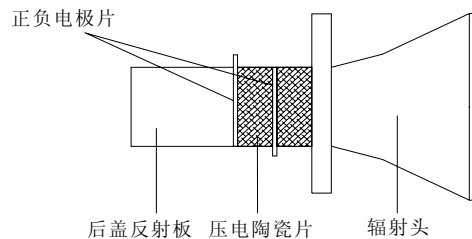


图1 纵向换能器的结构

曲振动换能器。图1所示为纵向换能器的结构简图。

四、实验原理

根据声波各参量之间的关系可知 $v = \lambda \cdot f$ ，其中 v 为波速， λ 为波长， f 为频率。

在实验中，可以通过测定声波的波长 λ 和频率 f 求声速。声波的频率 f 可以直接从低频信号发生器(信号源)上读出，而声波的波长 λ 则常用**相位比较法(行波法)**和**共振干涉法(驻波法)**来测量。

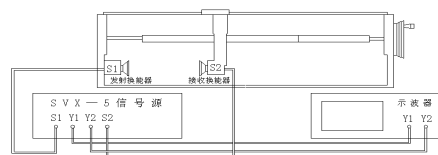


图2 实验装置

1. 相位比较法

实验装置接线如图 2 所示，置示波器功能于 X-Y 方式。当 S1 发出的平面超声波通过媒质到达接收器 S2，合成振动方程为：

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)$$

在发射波和接收波之间产生相位差：

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda}$$

见图 3，随着振动的相位差从 $0 \sim \pi$ 的变化，李萨如图形从斜率为正的直线变为椭圆，再变到斜率为负的直线。因此，每移动半个波长，就会重复出现斜率符号相反的直线，测得了波长 λ 和频率 f ，根据式 $v = \lambda \cdot f$ 即可计算出声音传播的速度。

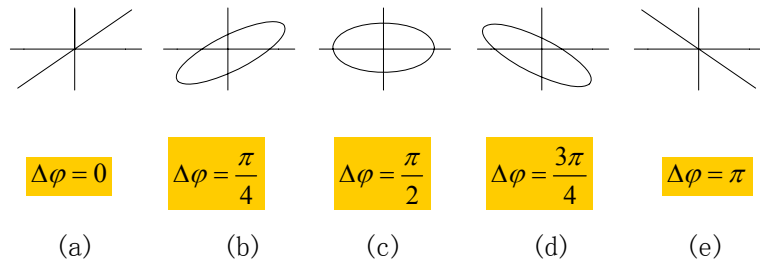


图 3 合成振动

改变 S1 和 S2 之间的距离 L ，相当于改变了发射波和接收波之间的相位差，荧光屏上的图形也随 L 不断变化。显然，当 S1、S2 之间距离改变半个波长 $\Delta L = \lambda/2$ ，则 $\Delta\varphi = \pi$ 。

2. 共振干涉(驻波)法测声速

实验装置接线仍如图 2 所示，使 S1 发出一平面波。S2 作为超声波接收头，把接收到的声压转换成交变的正弦电压信号后输入示波器观察，示波器置扫描方式。S2 在接收超声波的同时还反射一部分超声波。这样，由 S1 发出的超声波和由 S2 反射的超声波在 S1 和 S2 之间产生定域干涉。

当 S1 和 S2 之间的距离 L 恰好等于半波长的整数倍时，即

$$L = k \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, 1, 2, 3 \dots ;$$

形成**驻波共振**。任意两个相邻的共振态之间，S2 的位移为，

$$\Delta L = L_{k+1} - L_k = (k+1) \frac{\lambda}{2} - k \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}$$

所以当 S1 和 S2 之间的距离 L 连续改变时, 示波器上的信号幅度每一次周期性变化, 相当于 S1 和 S2 之间的距离改变了 $\frac{\lambda}{2}$ 。此距离 $\frac{\lambda}{2}$ 可由读数标尺测得, 频率 f 由信号发生器读得, 由 $v = \lambda \cdot f$ 即可求得声速。

五、实验步骤

1. 声速测试仪系统的连接与调试

接通电源, 信号源自动工作在连续波方式, 选择的介质为空气的初始状态, 预热 15min。声速测试仪和声速测试仪信号源及双踪示波器之间的连接如图 2 所示。

1) 测试架上的换能器与声速测试仪信号源之间的连接

信号源面板上的发射端换能器接口(S1), 用于输出相应频率的功率信号, 接至测试架左边的发射换能器(S1); 仪器面板上的接收端的换能器接口(S2), 请连接测试架右边的接收换能器(S2)。

2) 示波器与声速测试仪信号源之间的连接

信号源面板上的发射端的发射波形(Y1), 接至双踪示波器的 CH1 (X), 用于观察发射波形; 信号源面板上的接收端的接收波形(Y2), 接至双踪示波器的 CH2 (Y), 用于观察接收波形。

2. 共振频率的调试测量

只有当换能器 S1 和 S2 发射面与接收面保持平时才有较好的接收效果; 为了得到较清晰的接收波形, 应将外加的驱动信号频率调节到发射换能器 S1 谐振频率点处, 才能较好地进行声能与电能的相互转换, 提高测量精度, 以得到较好的实验效果。

超声换能器工作状态的调节方法如下: 各仪器都正常工作以后, 首先调节声速测试仪信号源输出电压(100mV~500mV 之间), 调节信号频率(在 25~45kHz), 观察频率调整时接收波的电压幅度变化, 在某一频率点处(34.5~37.5kHz 之间)电压幅度最大, 同时声速测试仪信号源的信号指示灯亮, 此频率即是压电换能器 S1、S2 相匹配的频率点, 记录频率 ν_i , 改变 S1 和 S2 之间的距离, 适当选择位置(即: 至示波器屏上呈现出最大电压波形幅度时的位置), 再微调信号频率, 如此重复调整, 再次测定工作频率, 共测 5 次, 取平均值 $\bar{\nu}_0$ 。

3. 用相位比较法(李萨如图形)测量波长

- 1) 将测试方法设置到连续波方式, 连好线路, 把声速测试仪信号源调到最佳工作频率 f 。
- 2) 调节示波器: 把“扫描时间”旋扭旋至“X-Y”方式;
- 3) 移动 S2, 依次记下示波器上波形由图 3 中(a)变为图 3 中(e)时, 读数标尺位置的读

数 L_1 、 L_2 ... 共 10 个值；

4) 记下室温 t ；

5) 用逐差法处理数据。

4. 干涉法(驻波法)测量波长

1) 按图 2 所示连接好电路；

2) 将测试方法设置到连续波方式，把声速测试仪信号源调到共振工作频率（根据共振特点观察波幅变化进行调节）。

3) 在共振频率下，将 S2 移近 S1 处，依次记下各振幅最大时的读数标尺位置 L_1 、 L_2 ... 共 10 个值；

4) 记下室温 t ；

5) 用逐差法处理数据。

六、注意事项：

1) 换能器发射端与接收端间距一般要在 5cm 以上测量数据，距离近时可把信号源面板上的发射强度减小，随着距离的增大可适当增大；

2) 示波器上图形失真时可适当减小发射强度；

3) 测试最佳工作频率时，应把接收端放在不同位置处测量 5 次，取平均值。

七、数据记录及数据处理：

1. 驻波法

$t =$ $^{\circ}\text{C}$

$v_0 = 331.45\text{m/s}$

$f =$

波幅最大位置	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
l_i (mm)					
波幅最大位置	l_6	l_7	l_8	l_9	l_{10}
l_{i+5} (mm)					
$\Delta l_i = l_{i+5} - l_i$ (mm)					

$$\Delta \bar{l} = \frac{\sum \Delta l_i}{5}$$

$$\lambda = 2 \times \frac{\Delta l}{5}$$

$$v = f \cdot \lambda$$

$$v_0 = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}$$

$$\Delta v = |v - v_0|$$

$$E_v = \frac{\Delta v}{v_0} \times 100\%$$

2. 相位法

$$t = \quad ^\circ\text{C}$$

$$v_0 = 331.45\text{m/s}$$

$$f =$$

相位变化为 π 位置	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
l_i (mm)					
相位变化为 π 位置	l_6	l_7	l_8	l_9	l_{10}
l_{i+5} (mm)					
$\Delta l_i = l_{i+5} - l_i$ (mm)					

$$\Delta \bar{l} = \frac{\sum \Delta l_i}{5}$$

$$\lambda = 2 \times \frac{\Delta l}{5}$$

$$v = f \cdot \lambda$$

$$v_0 = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}$$

$$\Delta v = |v - v_0|$$

$$E_v = \frac{\Delta v}{v_0} \times 100\%$$

八、思考题:

1) 本实验中的超声波是如何获得的?

提示: 利用压电陶瓷的逆压电效应原理将高频率的电信号转换成超声波信号。将正弦交流电信号变成压电材料纵向的长度伸缩变化, 从而产生纵向的机械振动, 从而产生超声波。

2) 超声波信号能否直接用示波器观测, 怎样实现?

提示: 不能。利用压电陶瓷的逆压电效应将电信号转换成超声波信号发射, 再利用其正压电效应将声压转换成电电压的变化用于示波器观测。

3) 用驻波共振法测量超声波声速, 如何测量其频率? 波长又如何测量?

提示: 波长: 调整接收端和发射端的距离, 使之为半波长的整数倍, 发射信号与信号相遇产生驻波,

据此测量相邻两波幅之间的距离计算得到。

频率: 调整发射信号的频率, 观察振幅, 使之最大, 由此判断发射信号与换能器产生共振, 此时发射信号的频率即为超声波的频率。

4) 发射信号接 CH₁ 通道、接受信号接 CH₂ 通道, 用驻波共振法时示波器各主要旋钮该如何调节? 用相位法时又该如何调节?

提示: 见实验步骤。

5) 固定距离, 改变频率, 以求声速。是否可行?

提示: 不行, 换能器有一个固有频率, 发射信号的频率与之相等时产生共振, 幅度最大, 若发射信号的频率偏离其固有频率, 幅度衰减很快直至幅度为零, 不利于观测。

光的干涉法

用牛顿环测透镜的曲率半径

一、实验内容:

- 1.了解读数显微镜的结构和使用方法;
- 2.理解牛顿环的干涉原理;
- 3.掌握用干涉法测透镜曲率半径的方法。

二、实验仪器

读数显微镜



实验装置

三、实验原理

牛顿环仪如图 1 所示。

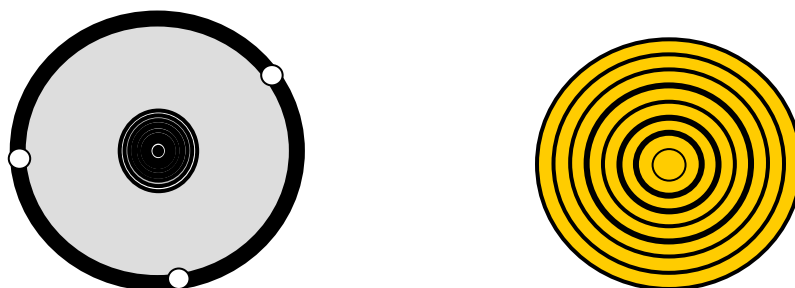


图 1 牛顿环

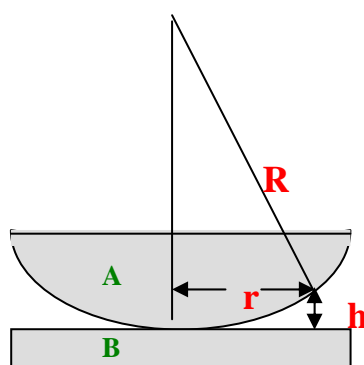


图 2 干涉原理和牛顿环

在牛顿环仪里， A 、 B 之间形成了一轴对称劈形空气薄膜。如图 2，当平行单色光垂直照射牛顿环仪时，由于透镜下表面所反射的光和平面玻璃片上表面所反射的光发生干涉，在透镜上表面将呈现干涉条纹。这些干涉条纹都是以平凸透镜和平面玻璃片的接触点 O 为中心的一系列明暗相间的同心圆环，称为牛顿环。

测量表达式：

$$R = \frac{d_m^2 - d_n^2}{4\lambda(m - n)}$$

式中 d_m 、 d_n 分别是第 m 、 n 干涉级次暗环的直径。

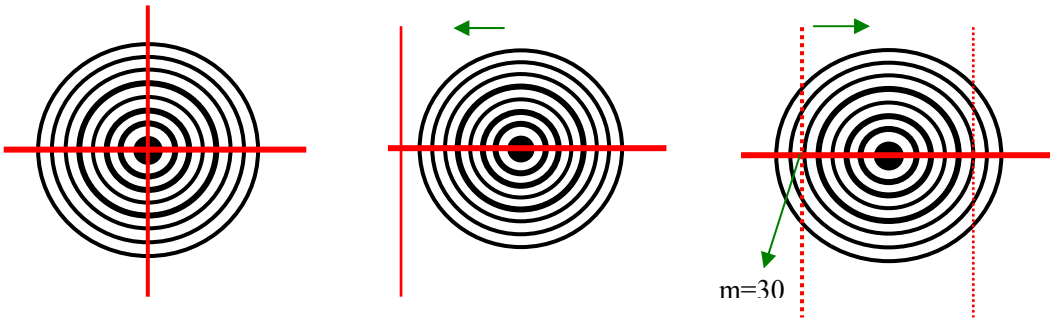
四、实验步骤

1. 调节牛顿环仪。调节牛顿环仪的三个螺丝，使牛顿环面上出现清晰细小的同心圆环且位于圆框中心。
2. 将牛顿环仪置于工作台上，使其正对着显微镜，通过转动调焦螺丝，使显微镜下降，尽量接近但不接触牛顿环仪。
3. 缓缓旋动目镜，使镜筒内的十字叉丝清晰可见。

4. 把钠灯放在显微镜正前方约 20cm 处。打开钠灯开关，预热 10 min。待发出明亮的黄光后，调节物镜下方的反光镜方向。当在读数显微镜的视场中看到一片明亮的黄光时，就表明有一束平行单色光垂直照射到牛顿环仪上。

5. 一边通过目镜观察牛顿环仪形成的牛顿环，一边缓缓转动调焦螺丝提升显微镜，使干涉条纹清晰。若看到的牛顿环中心与十字叉丝中心不重合，可轻轻移动牛顿环仪，使二者重合。

6. 转动读数鼓轮，使十字叉丝向右移动，直到十字叉丝竖线对准第 35 暗环线为止(即相切)。然后反转读数鼓轮，使十字叉丝竖线对准第 30 暗环线，开始记录位置读数。



7. 沿相同方向，继续转动读数鼓轮，使十字叉丝竖线依次对准第 29，28，27，26，25，15，14，13，12，11，10 暗环线，记录各环直径右端相应的位置读数。

8. 沿相同方向继续转动读数鼓轮，使十字叉丝通过环心后，依次对准第 10，11，12，13，14，15，25，26，27，28，29，30 暗环线的中心，读记各环直径左端的位置读数。

9. 计算出 \bar{R} 的不确定度和相对误差 E 。

五、数据记录 and 数据处理

钠黄光波长 $\lambda = 589.3\text{nm} = 5.893 \times 10^{-4}\text{mm}$ $\Delta_{(m-n)} = 0.1$

环的级数	m	30	29	28	27	26	25
环的位置	右						
mm	左						
环的直径	d _m						
环的级数	n	15	14	13	12	11	10
环的位置	右						
mm	左						

环的直径 d_n						
d_m^2/mm^2						
d_n^2/mm^2						
$D=(d_m^2 - d_n^2)/\text{mm}^2$						

$$\bar{D} = \frac{\sum D_i}{6}$$

$$\Delta_D = S_D = \sqrt{\frac{\sum (\bar{D} - D_i)^2}{6-1}}$$

$$\bar{R} = \frac{d_m^2 - d_n^2}{4\lambda(m-n)} = \frac{\bar{D}}{4 \times 20\lambda}$$

$$E_R = \sqrt{\left[\frac{\Delta_D}{\bar{D}}\right]^2 + \left[\frac{\Delta_{(m-n)}}{(m-n)}\right]^2} \times 100\%$$

$$\Delta_R = \bar{R} \cdot E_R$$

$$R = \bar{R} \pm \Delta_R$$

六、注意事项：

- 1.应尽量使叉丝对准干涉暗环的中央读数。
- 2.由于计算 R 时，只需知道环数差($m-n$)，故以哪一环为第一环可以任意选择，但一经选定，在整个测量过程中就不能改变。
- 3.注意读数不要数错，测量时应向一个方向转动，防止空程误差，否则数据全部作废。
- 4.测量过程中防止震动引起干涉条纹的变化。
- 5.实验时要将读数显微镜台下的反射镜翻转过来，不要让光从窗口经反射镜把光反射到载物台上，一面影响对暗环的观测。

七、思考题：

- 1) 读数显微镜如何正确操作？
- 2) 空程差是如何产生的，怎么消除？

提示：移动读数显微镜，使其从左右两个方向对准同一目标的两次读数，似乎应该相同，但实际上由于螺杆和螺套不可能完全密切接触，螺旋转动方向改变时它们的接触状态也将改变，两次读数将不同，由此产生的测量误差称为空程误差。为了避免空程误差，使用读数显微镜时，应沿同一方向移动读数显微镜，使叉丝对准各个目标。

3) 为什么不采用 $r_k^2 = kR\lambda$ 作为测量表达式?

提示: a) 用公式 $R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{\lambda(m-n)}$ 代替公式 $r = \sqrt{kR\lambda}$ 来测量, 可以消除牛顿环装置因变形或尘埃而产生的误差; 同时还可以消除 k 的起点确定误差

b) 用直径测量代替不易测准的半径测量, 即 $R = \frac{d_m^2 - d_n^2}{4\lambda(m-n)}$.

4) 为什么要采用单色光作为光源?

提示: 从测量公式 $R = \frac{d_m^2 - d_n^2}{4(m-n)\lambda}$ 知道, 如果 λ 有一定的宽度 Δ_λ , 会给 Δ_R 带来一个误差分量

$(\Delta_R)_\lambda = \frac{d_m^2 - d_n^2}{4(m-n)\lambda^2} \Delta_\lambda$, 显然 $\Delta_\lambda = 0$ 时, $(\Delta_R)_\lambda = 0$, 故应使用单色光。

5) 测 d_m 时, 叉丝交点未通过环的中心, 因而测量的是弦而非直径, 对实验结果有影响吗?

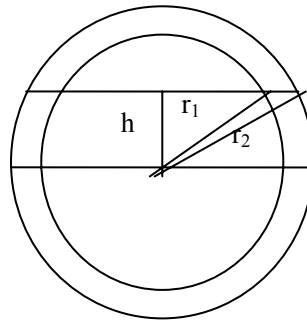
提示: 没有影响。可以证明两弦的平方差与两直径的平方差相等。

设小圆弦长 x_1 , 大圆弦长 x_2 , 则有:

$$\left(\frac{x_1}{2}\right)^2 = r_1^2 - h^2 = \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 - h^2$$

$$\left(\frac{x_2}{2}\right)^2 = r_2^2 - h^2 = \left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - h^2$$

两式相减有: $x_2^2 - x_1^2 = d_2^2 - d_1^2$



6) 牛顿环的中心是亮斑而非暗斑, 对实验结果有影响吗?

提示: 没有影响。可能的附加光程差会导致中心不是暗点而是亮斑, 但在整个测量过程中附加光程差是恒定的, 因此可以采用不同暗环逐差的方式消除, 本实验的测量公式正是如此。

分光计的调节与使用

一、实验内容：

1. 了解分光计的结构和调节方法；
2. 测量棱镜的折射率。

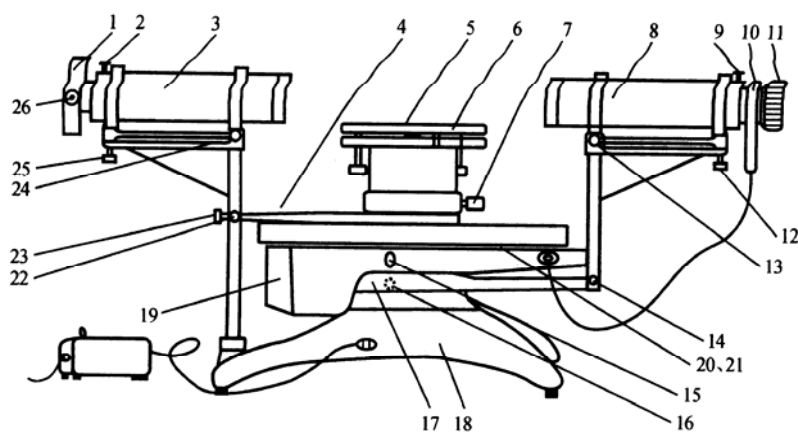
二、实验仪器：

分光计



三、实验原理：

1. 分光计的结构



分光计具备有四个主要部件：望远镜、平行光管、载物台、读数盘（刻度盘、游标盘）。

1) 望远镜(8):

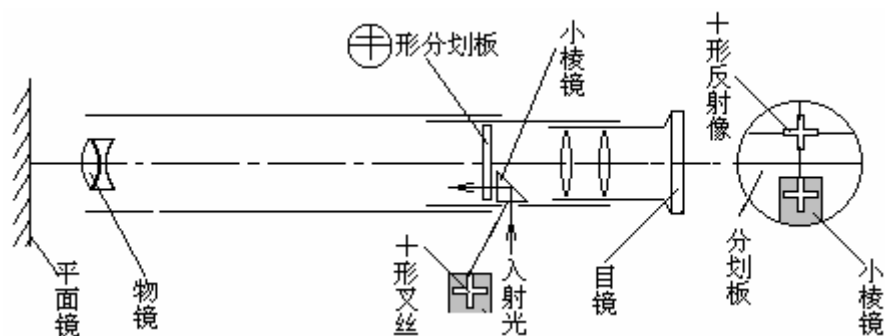


图2 自准望远镜结构

望远镜是用来观察平行光的。分光计采用的是自准直望远镜(阿贝式)。它是由目镜、叉丝分划板和物镜三部分组成，分别装在三个套筒中，这三个套筒一个比一个大，彼此可以互相滑动，以便调节聚焦。如图2所示。中间的一个套筒装有一块圆形分划板，分划板面刻有“ \oplus ”形叉丝，分划板的下方紧贴着装有一块 45° 全反射小棱镜，在与分划板相贴的小棱镜的直角面上，刻有一个“ $+$ ”形透光的叉丝。在望远镜看到的“ $+$ ”像就是这个叉丝(物)的像。叉丝套筒上正对着小棱镜的另一个直角面处开有小孔并装一小灯，小灯的光进入小孔经全反射小棱镜反射后，沿望远镜光轴方向照亮分划板，以便于调节和观测。

2) 平行光管(3):

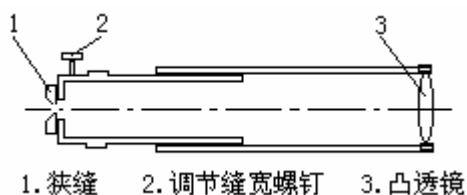


图3 平行光管结构图

平行光管是用来产生平行光的，它由狭缝和会聚透镜组成，其结构如图3所示。狭缝与透镜之间的距离可以通过伸缩狭缝套筒进行调节，当狭缝调到透镜的焦平面上时，则狭缝发出的光经透镜后就成为平行光。狭缝的宽度可由图中的2进行调节。

3) 载物平台(5):

载物平台是用来放待测物件的（如三棱镜、光栅等）。

4) 读数装置(21, 22):

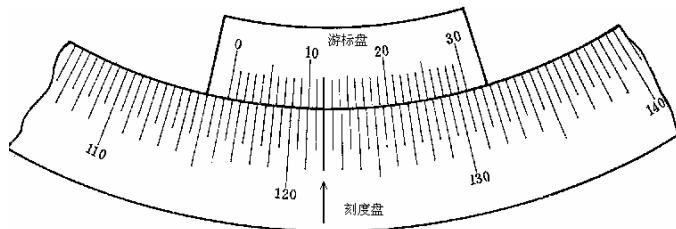


图4 分光计的游标盘

读数装置由刻度圆盘和与游标盘组成。刻度圆盘分为 360° ，每度中间有半刻度线，故刻度圆盘的最小读数为半度($30'$)，小于半度的值利用游标读出。游标上有30分格，故最小刻度为 $1'$ 。分光计

上的游标为角游标，但其原理和读数方法与游标卡尺类似。

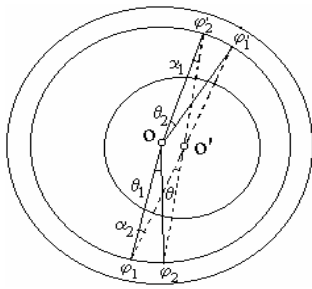


图 5 双游标消除偏心差示意图

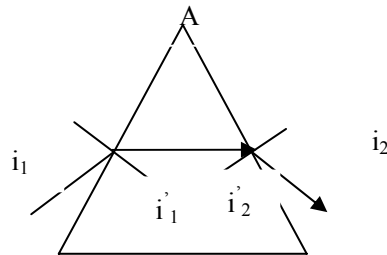
为了消除刻度圆盘与游标盘不完全同轴所引起的**偏心误差**，在刻度圆盘对径方向(相隔 180°)设有两个游标盘，测量时要同时记录两个游标的读数。如图 5 所示。

图 5 中的外圆表示刻度盘，其中心在 O；内圆表示载物台，其中心在 O'。两个游标与载物台固联，并在其直径的两端，它们与刻度盘圆弧相接触。通过 O' 的虚线表示两游标零线连线。假定载物台从 φ_1 转到 φ_2 ，实际转过的角度为 θ ，而刻度盘上的读数为 φ_1 、 φ_2 ； φ_1' 、 φ_2' 。计算得到转角 $\theta_1 = \varphi_1' - \varphi_1$ ， $\theta_2 = \varphi_2' - \varphi_2$ 。由几何定理 $\alpha_1 = \theta_1/2$ ， $\alpha_2 = \theta_2/2$ ，

而 $\theta = \alpha_1 + \alpha_2$ ，故载物台实际转过的角度：

$$\theta = \frac{1}{2} [|\varphi_1' - \varphi_1| + |\varphi_2' - \varphi_2|]$$

2. 棱镜折射率



测量公式：

$$n = \frac{\sin \frac{\delta_{\min} + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

式中 A 为顶角， n 为棱镜折射率， δ_{\min} 为最小偏向角。

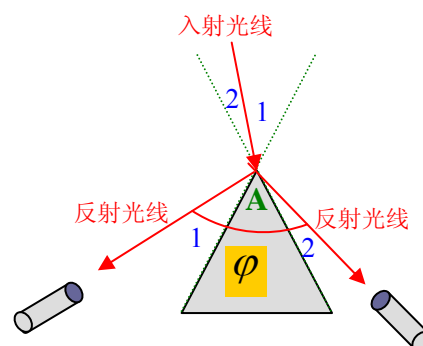
3. 棱镜顶角的测量

1) 反射法

$$\varphi = \angle A + \angle 1 + \angle 2$$

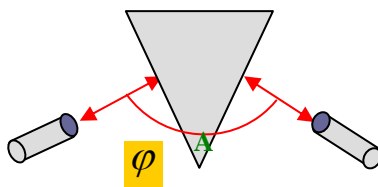
$$\angle A = \angle 1 + \angle 2$$

$$\angle A = \frac{1}{2} \varphi$$



2. 自准法

$$\angle A = \pi - \varphi$$



四、实验步骤：

1. 分光计的调节

1)、分光计的调节要求

分光计要作精密测量，它必须首先满足下述两个要求：

- ①入射光和出射光应当是平行光；
- ②入射光和出射光的方向以及反射面和出射面的法线都与分光计的刻度盘平行。

为达此目的，对分光计的调节要求是：

- a. 望远镜聚焦于无穷远；
- b. 望远镜光轴与分光计中心轴垂直；
- c. 平行光管发射平行光，且其光轴也与分光计中心轴垂直。

2)、分光计调节顺序：

(1) 目测粗调

为了便于后面的光路细调，需先目测粗调。即将分光计在实验桌上的位置摆正，使平行光管狭缝端正对着桌上的光源灯管；调节有关的倾角螺丝（载物台下三颗螺钉、望远镜与平行光管的倾仰角螺丝），使望远镜、平行光管、载物台大致水平；载物台调节到适当的高度，且其两层小圆板之间，留有适当的间隙，上层小圆板的三条半径线与下层小圆板的三个调节螺丝的位置对齐。

(2) 调望远镜聚焦于无穷远（用“自准法”）

- ①调节目镜，使得分划板为目镜焦平面：（使分划板上的叉丝“ \neq ”清晰）

望远镜里的圆形分划板上，有双叉丝线“ \neq ”，分划板的下方有个“+”形的透光窗孔，仔细转动目镜头，使分划板上的叉丝清晰。

- ②伸缩镜桶，使得分划板为物镜焦平面：（使“+”在分划板上成像清晰）

在载物台上放上小平面镜，然后松开望远镜筒上面的“叉丝筒制动螺丝”(9)，伸缩叉丝筒，直至分划板上经平面镜反射回来的“+”像清晰，且无视差。如有视差（所谓视差，就是在叉丝清晰时在不同的位置看，其位置不同。），应反复调节，予以消除。

至此，望远镜已聚焦无穷远处了，即能接收和检验平行光了。这种调节方法称为“自准法”。

[自准法]

调节目镜，使得视野中的分划板清晰；以分划板小“+”字发出的光，透过物镜，经物

镜前小平面镜反射，再透过物镜，伸缩套筒，改变分划板位置，使得通过目镜看到清晰的小“+”字像，即通过小平面镜反射后的小十字成像于分划板上。上述调节结果，分划板为目镜和物镜的公共焦平面，这种调节方法称为“自准法”。

(3) 调节望远镜光轴与分光计中心轴垂直 (“各半调节法”)

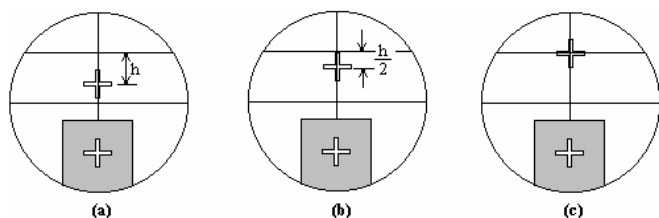


图 6 各半调节示意图

接着上步调节，见图 6，将小“+”字像先调到分划板叉丝竖线上。此时，如果“+”像与分划板最上面的一条水平线相差一段距离，则调节“望远镜倾角螺丝”(12)，使此距离减小一半，再调“载物台倾角螺丝”(6)，消除另一半差距，使“+”像与上方的水平线重合(不是中间的那条水平线)。

将刻度盘旋转 180° ，使平面镜的另一面对准望远镜，再用此法进行调节，也使“+”像与上方的水平线重合。经过几次反复调节后，在仅转动刻度盘的情况下，使望远镜先后对着平面镜的两面，都能看到“+”像与分划板上部的叉丝线重合，则望远镜的光轴即垂直分光计的中心轴了。

(4) 调节平行光管发射平行光，且其光轴垂直中心轴

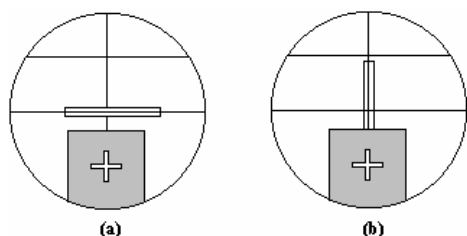


图 7 平行光管与分光计中心轴垂直调节示意图

点亮汞灯，使光束射入平行光管，以前面调好的望远镜为准来调节平行光管。

①. 调节(伸缩)平行光管的狭缝体，使从望远镜中观察的狭缝亮线最清晰时，平行光管发射的光即为平行光了。

②. 转动狭缝体，使狭缝亮线呈水平状，再调节平行光管下面的倾角螺丝，改变平行光管的俯仰，使狭缝亮线位于望远镜分划板的中央，与叉丝的水平线重合。这时平行光管的光轴与望远镜的光轴一致了，因而也垂直分光计中心轴了。此调节过程可用图见图 7 的(a)、(b)两个图表示。

分光计完全调好后，望远镜、平行光管、载物台的状态不能再改变(否则整个调节要重新进行)。接下去可以进行各种实验测量了。

2. 棱镜顶角的测量

转动望远镜，使棱镜的一个面垂直望远镜，记下两游标的读数 ϕ_1 和 ϕ_2 ，再转动望远镜，使之垂直棱镜的另一个面，记下两游标的读数 ϕ'_1 和 ϕ'_2 ，同一游标两次读数之差即是载物台转过的角度 Φ ，而 Φ 是 A 角的补角，则 $A = 180^\circ - \Phi$ 。

3. 棱镜最小偏向角的测量

- 1) 平行光管狭缝对准前方水银灯光源。
- 2) 旋松望远镜止动螺钉和游标盘止动螺钉，把载物台及望远镜转至适当的位置，再左右微微转动望远镜，找出棱镜出射的各种颜色的水银灯光谱线(各种波长的狭缝像)。
- 3) 轻轻转动载物台(改变入射角)，在望远镜中将看到谱线跟着动。改变入射角，使谱线往 δ 减小的方向移动(向顶角 A 方向移动)。望远镜要跟踪光谱线转动，直到棱镜继续转动，而谱线开始要反向移动(即偏向角反而变大)为止。这个反向移动的转折位置，就是光线以最小偏向角射出的方向。固定载物台，再使望远镜微动，使其分划板上的中心竖线对准其中的那条绿谱线(546.1nm)。记下此时两游标处的读数，取下三棱镜(载物台保持不动)，转动望远镜对准平行光管，以确定入射光的方向，再记下两游标处的读数。

五、数据记录 and 数据处理

顶角 A 的测量 $\Delta_{\text{仪}} = 1'$

次 i	入射光方位		出射光方位		$A_i = \pi - \frac{1}{2} [\varphi_{\text{左}} - \varphi'_{\text{左}} + \varphi_{\text{右}} - \varphi'_{\text{右}}]$
	$\varphi_{\text{左}}$	$\varphi_{\text{右}}$	$\varphi'_{\text{左}}$	$\varphi'_{\text{右}}$	
1					
2					
3					
4					
5					

最小偏向角 δ 的测量 $\Delta_{\text{仪}} = 1'$

次 i	入射光方位		出射光方位		$\delta_i = \frac{1}{2} [\varphi_{\text{左}} - \varphi'_{\text{左}} + \varphi_{\text{右}} - \varphi'_{\text{右}}]$
	$\varphi_{\text{左}}$	$\varphi_{\text{右}}$	$\varphi'_{\text{左}}$	$\varphi'_{\text{右}}$	
1					
2					
3					
4					
5					

$$\bar{A} = \frac{\sum A_i}{5}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (A_i - \bar{A})^2}{5-1}}$$

$$\Delta_A = \sqrt{S_A^2 + \Delta_{\text{仪}}^2}$$

$$\bar{\delta} = \frac{\sum \delta_i}{5}$$

$$S_\delta = \sqrt{\frac{\sum (\delta_i - \bar{\delta})^2}{5-1}}$$

$$\Delta_\delta = \sqrt{S_\delta^2 + \Delta_{\text{仪}}^2}$$

$$\bar{n} = \frac{\sin \frac{\bar{\delta}_{\min} + \bar{A}}{2}}{\sin \frac{\bar{A}}{2}}$$

$$(\Delta_n)_A = \left| \frac{\partial n}{\partial A} \cdot \Delta_A \right| = \frac{\frac{1}{2} \cos \frac{\bar{\delta}_{\min} + \bar{A}}{2} \cdot \sin \frac{\bar{A}}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\bar{\delta}_{\min} + \bar{A}}{2} \cdot \cos \frac{\bar{A}}{2}}{\sin^2 \frac{\bar{A}}{2}} \cdot \Delta_A$$

$$(\Delta_n)_\delta = \left| \frac{\partial n}{\partial \delta} \cdot \Delta_\delta \right| = \frac{\frac{1}{2} \cos \frac{\bar{\delta}_{\min} + \bar{A}}{2}}{\sin \frac{\bar{A}}{2}} \cdot \Delta_\delta$$

$$\Delta_n = \sqrt{(\Delta_n)_A^2 + (\Delta_n)_\delta^2}$$

$$E_n = \frac{\Delta_n}{\bar{n}} \times 100\%$$

$$n = \bar{n} \pm \Delta_n$$

(参考：棱镜折射率 $n = 1.6475$)

六、注意事项：

1. 注意过“0”点问题。
2. 当角度作为直接运算数参加四则运算时，应划成弧度值。
3. 狭缝是精密部件，为避免损伤，只有在望远镜中看到狭缝亮线像的情况下，才能调节狭缝的宽度。
4. 读数的整数部分应从游标“0”刻线算起，不能从游标的边缘算起。

七、思考题：

- 1) 分光仪的主要结构
- 2) 分光仪分划板的叉丝竖线清晰应该如何调节？要看清反射的“+”字又如何调节？

提示：调节望远镜的目镜可清晰的看见分划板上的叉丝竖线；调节望远镜的物镜可使“+”字反射像清晰

的成像在分划板上。

3) 如何调节分光仪使望远镜的主轴与载物台的中心轴垂直？

提示：“各半调节法”

4) 如何调节平行光管与望远镜共轴？

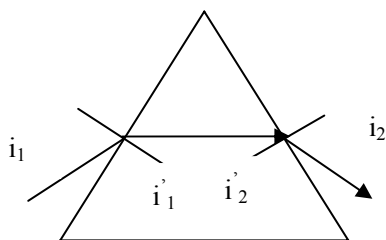
提示：转动狭缝 90° ，使狭缝亮线呈水平状，调节平行光管下面的倾角螺丝，使亮线与叉丝水平线重合即可。

5) 顶角如何测量？

提示：采用自准法，转动望远镜对准棱镜一个面，使“+”字与叉丝竖线重合，记下此时刻度盘读数 ϕ_1 ，转动望远镜对准棱镜的另一个面，使“+”字与叉丝竖线重合，记下刻度盘读数 ϕ_2 ，则顶角为

$$A = 180^\circ - |\phi_2 - \phi_1|。$$

6) 证明当 $i_1 = i_2$ 时偏向角为最小偏向角。



提示：

$$\delta = (i_1 - i_1') + (i_2 - i_2') = (i_1 + i_2) - (i_1' + i_2') \quad (1)$$

$$\alpha = i_1' + i_2' \quad (2)$$

$$\delta = (i_1 + i_2) - \alpha \quad (3)$$

$$\text{对 (2) 式两边对 } i \text{ 求导数, 有 } \frac{d\delta}{di_1} = 1 + \frac{di_2}{di_1} \quad (4)$$

$$\text{当 } \delta \text{ 有极值时有 } \frac{d\delta}{di_1} = 1 + \frac{di_2}{di_1} = 0, \quad \frac{di_2}{di_1} = -1 \quad (5)$$

$$\text{由折射定律} \quad n \sin i_1' = \sin i_1 \quad (6)$$

$$n \sin i_2' = \sin i_2 \quad (7)$$

$$\text{由 (6) 两边微分得: } (n \cos i_1') di_1' = (\cos i_1) di_1 \quad (8)$$

由 (7) 两边微分得: $(n \cos i'_2) di'_2 = (\cos i_2) di_2$ (9)

(8) 与 (9) 相除得: $\frac{di_2}{di_1} = \frac{\cos i_1 \cos i'_2}{\cos i_2 \cos i'_1} \cdot \frac{di'_2}{di'_1}$ (10)

由 (2) 两边微分得: $\frac{di'_2}{di'_1} = -1$ (11)

将 (5)、(11) 代入 (10) 得: $\frac{di_2}{di_1} = \frac{\cos i_1 \cos i'_2}{\cos i_2 \cos i'_1} \cdot (-1) = -1$

$$\frac{\cos i_1 \cos i'_2}{\cos i_2 \cos i'_1} = 1 \quad (12)$$

将 (12) 平方并代入 (6) 和 (7) 得: $(1 - n^2)(\sin^2 i_1 - \sin^2 i_2) = 0$

于是有 :

$$i_1 = i_2$$

7) 如何确定最小偏向角的出射方位?

提示: 轻轻转动载物台改变入射角, 使谱线往 δ 减小的方向移动 (向顶角 A 方向移动)。望远镜跟踪光谱线转动, 直到棱镜继续转动, 而谱线开始要反向移动 (即偏向角反而变大) 为止。这个反向移动的转折位置, 就是光线以最小偏向角射出的方向。

光栅衍射测量

一、实验内容：

- 1) 测定光栅常数 d ；
- 2) 测定紫光或者黄光波长。

二、实验仪器：

分光计(JJY 型)，平面镜，光栅，汞灯，放大镜。

三、实验原理：

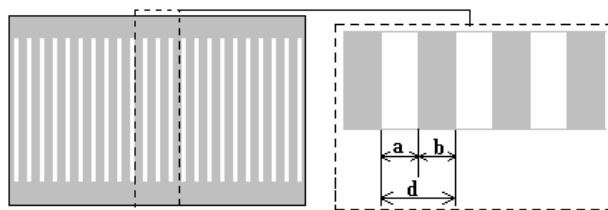


图 1 光栅片示意图

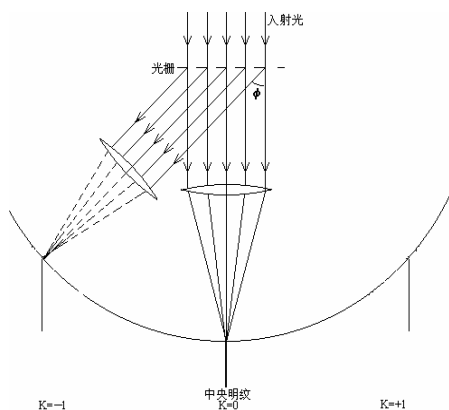


图 2 单色光光栅衍射光谱示意图

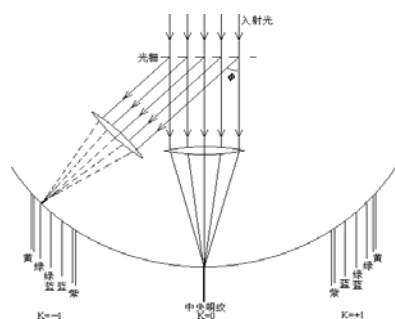


图 3 复合光光栅衍射光谱示意图

设平面单色光波垂直入射到光栅（图 1）表面上，衍射光通过透镜聚焦在焦平面上，于是在观察屏上就出现衍射图样，如图 2 所示。

光栅方程：
$$d \sin \phi = k\lambda \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

当入射光为复合光时，在相同的 d 和相同级别 k 时，衍射角 ϕ 随波长增大而增大，这样复合光就可以分解成各种单色光。（如图 3 所示）根据光栅方程，若已知光栅常数，条纹

级别能数出来，我们可以根据衍射角测量某光的波长。

波长测量表达式为：

$$\lambda = \frac{d \sin \phi}{k}$$

或已知波长，可以根据衍射角测量光栅常数 d 。

光栅常数 d 测量表达式为：

$$d = \frac{k\lambda}{\sin \phi}$$

四、实验步骤：

1. 望远镜调节：

(1) 调望远镜聚焦于无穷远主要是用“自准法”，通过调节望远镜的目镜物镜等，使小“+”像在分划板上清晰即可。

(2) 调望远镜光轴垂直仪器轴的方法主要是用“各半调节法”，通过调节望远镜的倾斜度螺丝及平台的调平螺丝，使小“+”像处在分划板上方叉丝的交点上。

(3) 调平行光管的方法主要是以调好的望远镜为准，调平行光管发射的是平行光，平行光管的光轴也垂直仪器轴。

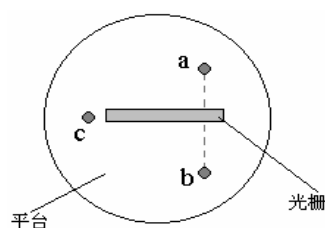


图 4 光栅安放方式

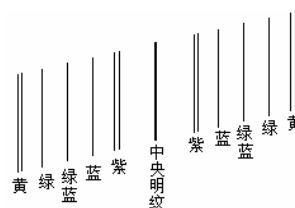


图 5 光栅刻线与分光计主轴不平时，观察到谱线

2. 光栅的调节

1) 将光栅架按图 4 放置于已调好的分光计的载物台上。图中 a , b , c 是载物台下面三个调节载物台倾斜度的螺丝，上面的活动小圆盘上有三条半径线，转动这个小圆盘，使三条半径线与三个螺丝的位置对齐，然后将光栅片按图中位置放好。

2) 调节光栅平面与入射光线垂直

调节光栅平面与入射光垂直也就是调节光栅平面与分光计平行光管的光轴垂直。其调节方法是：先用眼睛直接观察，转动刻度盘带动载物台，使光栅面与平行光管垂直；然后转动望远镜，使其分划板上竖线与平行光管射过来的狭缝亮线相重合，此时，望远镜的光轴与平行光管的光轴一致了，随之拧紧“望远镜固定螺丝”（底座右边）将望远镜的位置固定，再仔细转动刻度盘带动载物台，并结合调节载物台的两个螺丝 a 或 b ，直到光栅面反射回来的

小绿“+”字像位于分化板上方叉丝交点上。此时，入射光即垂直光栅面了。随即拧紧载物台固定螺丝，以保持光栅的位置不动。

3) 调节光栅刻线与分光计主轴平行

在调节前可先作一定性观察。如果光栅刻线与分光计主轴不平行，将会发现左右衍射光线是倾斜的，如图 5 所示。为此，可通过调节平台下面的倾角螺丝 C 使左右衍射光线在水平方向高度一致。

3. 谱线测量

转动望远镜使叉丝竖线接近待测谱线时，应用望远镜微调螺丝仔细调节对准谱线，采用此法分别对准±1 级绿光、±1 级紫光和±1 级黄光谱线，将刻度盘左右游标读数记如表格。

五、数据记录 and 数据处理:

1. $i = 0$ 时，测定光栅常数 d

$$\lambda = 546.1nm \text{ (绿光)} \quad \Delta_{\text{仪}} = 1'$$

次	+1		-1		$\varphi = \frac{1}{4} [\varphi_{\text{左}} - \varphi'_{\text{左}} + \varphi_{\text{右}} - \varphi'_{\text{右}}]$	$\overline{\varphi}$
	$\varphi_{\text{左}}$	$\varphi_{\text{右}}$	$\varphi'_{\text{左}}$	$\varphi'_{\text{右}}$		
1						
2						
3						
4						
5						

2. $i = 0$ 时，测定紫光或者黄光波长

$$\Delta_{\text{仪}} = 1'$$

次	+1		-1		$\varphi = \frac{1}{4} [\varphi_{\text{左}} - \varphi'_{\text{左}} + \varphi_{\text{右}} - \varphi'_{\text{右}}]$	$\overline{\varphi}$
	$\varphi_{\text{左}}$	$\varphi_{\text{右}}$	$\varphi'_{\text{左}}$	$\varphi'_{\text{右}}$		
1						
2						
3						

4						
5						

1. 测光栅常数

$$d \sin \phi = k\lambda \quad \text{其中: } \lambda_{\text{绿}} = 546.1\text{nm} \quad k=1 \quad \phi = \overline{\phi_{\text{绿}}}$$

$$\Delta_{\phi} = \sqrt{\frac{\sum (\overline{\phi} - \phi_i)^2}{5-1}}$$

$$\overline{d} = \frac{\lambda}{\sin \phi}$$

$$\Delta_d = \frac{\lambda \cos \phi}{\sin^2 \phi} \Delta_{\phi} \quad (\text{注意: 根据量纲 } \Delta_{\phi} \text{ 应该化成弧度制, 以下同})$$

$$E_d = \frac{\Delta_d}{\overline{d}} \times 100\%$$

$$d = (\overline{d} \pm \Delta_d)$$

2. 求黄光的波长

$$\Delta_{\phi} = \sqrt{\frac{\sum (\overline{\phi} - \phi_i)^2}{5-1}}$$

$$\overline{\lambda}_{\text{黄}} = \frac{d \sin \overline{\phi}_{\text{黄}}}{k}$$

$$\Delta_{\lambda_{\text{黄}}} = \sqrt{\sin^2 \overline{\phi} \cdot \Delta_d^2 + \overline{d}^2 \cos^2 \overline{\phi} \cdot \Delta_{\phi}^2}$$

$$E_{\lambda_{\text{黄}}} = \frac{\Delta_{\lambda_{\text{黄}}}}{\overline{\lambda}_{\text{黄}}} \times 100\%$$

$$\lambda_{\text{黄}} = \overline{\lambda}_{\text{黄}} \pm \Delta_{\lambda_{\text{黄}}}$$

3. 求紫光的波长

同黄光 (略)

六、注意事项:

1. 光学元件(光栅、三棱镜、平面镜等)易损易碎, 必须轻拿轻放, 严禁用手触摸拿捏光学面, 只能拿支架或非光学面, 以免弄脏或损坏。
2. 汞灯的紫外线很强, 不可直视, 以免灼伤眼睛。
3. 本实验中只测量衍射的第 1 级次。

七、思考题:

- 1) 光栅衍射测量的条件?

提示: (1) 入射光线必须垂直光栅, 即入射角 $i=0$; (2) 入射光必须是平行光。

- 2) 在计算角度时有时为什么要加 360° ?

提示: 计算衍射角式中, 如果同级的两个读数之差超过 180° 就有过“0”点问题。例如, $\phi_{+k}=348^\circ 2'$, $\phi_{-k}=26^\circ 18'$, 如果两个读数直接相减超过了 180° 。应该这样处理: $(360^\circ - 348^\circ 2') + 26^\circ 18' = 11^\circ 58' + 26^\circ 18' = 38^\circ 16'$ 。一般情况可以表示为

$$\phi = (360^\circ - \phi_{\text{大}}) + \phi_{\text{小}}$$

式中 ϕ 为望远镜转过的实际角度， $\phi_{\text{大}}$ 为较大的一个游标读数， $\phi_{\text{小}}$ 为较小的一个游标读数。

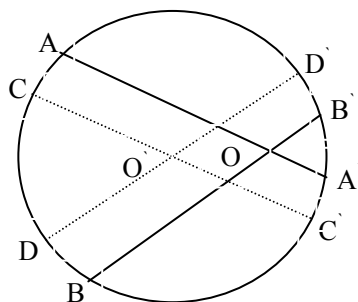
3) 测量衍射角为什么要测量衍射光 ± 1 级光线间的夹角?

提示: 采用这种方法可以消除由于光栅平面不垂直平行光的轴线而使得正负方向衍射角不对称引起的系统误差; 通过测量 2φ , 求衍射角 φ , 即测量宽度延展了一倍, 将使 Δ_{φ} 减小一半。

4) 刻度盘上为什么设置两个游标?

提示: 刻度盘绕中心轴转动, 因工艺的原因, 中心轴不可能正好在盘的中心, 因此转动测量时会产生一个所谓的偏心差, 在盘的一直径两端对称设置两个游标, 读数求平均即可消除偏心差。见下图。

$$\frac{1}{2}(AB + A'B') = CD = C'D'$$



用霍尔效应测量磁场

一、实验内容:

1. 了解霍尔电压产生的机制;
2. 学会用霍尔元件测量磁场的基本方法

二、实验仪器:

螺线管磁场测试仪、长直螺线管磁场装置、双刀换向开关



三、实验原理:

1. 霍尔效应

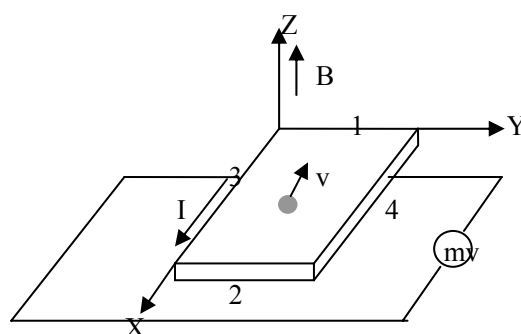


图1 霍尔效应

如图(1)所示,霍尔元件是均匀的N型半导体材料制成的矩形薄片,长为L,宽为b,厚为d。当在1、2两端加上电压,同时有一个磁场B垂直穿过元件的宽面时,在3、4两端产生电位差(V_H),这种现象为**霍尔效应**。

霍尔片内定向运动的载流子所受洛伦兹力 f_B 和静电作用力 f_E 相等时,3、4两面将建立起一稳定的电位差,即**霍尔电压** V_H :

$$V_H = K_H I_H B \quad (1)$$

K_H 是霍尔元件的灵敏度。

2. 附加电压

- 1) 不等位电势差 V_0 : 与磁场B换向无关,随电流 I_H 换向而换向;

- 2) 厄廷好森 (Etinghausen) 效应温差电势差 V_0 : 随磁场 B 和电流 I_H 换向而换向;
- 3) 能斯脱 (Nernst) 效应热流电势差 V_p : 随磁场 B 换向而换向, 与电流 I_H 换向无关;
- 4) 里纪-勒杜克 (Righi-leduc) 效应附加温差电势差 V_s : 随磁场 B 换向而换向, 与电流 I_H 换向无关;

3. 附加电压的消除

根据附加电压随磁场 B 和电流 I_H 换向而各自呈现的特点加以消除。

$$(+I_H, +B) \quad V_1 = +V_H + V_0 + V_t + V_p + V_s$$

$$(-I_H, +B) \quad V_2 = -V_H - V_0 - V_t + V_p + V_s$$

$$(-I_H, -B) \quad V_3 = +V_H - V_0 + V_t - V_p - V_s$$

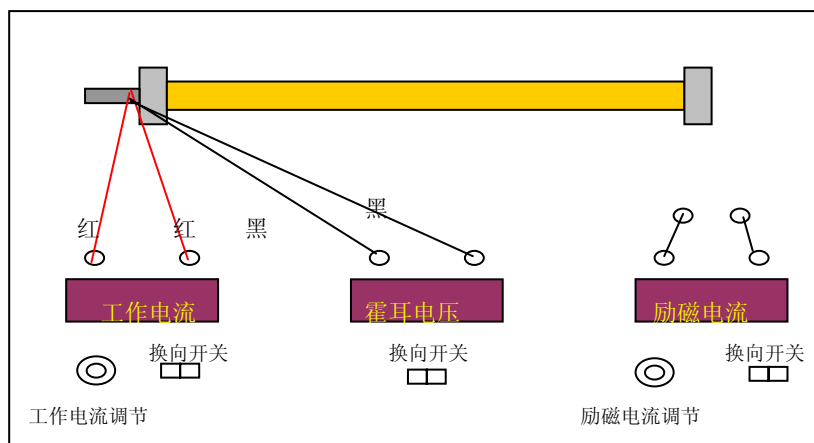
$$(+I_H, -B) \quad V_4 = -V_H + V_0 - V_t - V_p - V_s$$

测量表达式:
$$V_H = \frac{1}{4}(V_1 - V_2 + V_3 - V_4) \quad (2)$$

四、实验步骤:

1. 仪器连接

将螺线管磁场装置与螺线管磁场测试仪电路连接好:



2. 调节螺线管的励磁电流 I_M (或 I_H)、调节霍尔元件的工作电流 I_S (或 I_H)

测试仪在通电前, 应将“ I_S (或 I_H) 调节”和“ I_M 调节”两个旋钮置于零位(即逆时针旋到底)。

实验中调节“励磁电流调节”旋钮使励磁电流显示为 1.000A; 调节“工作电流调节”

旋钮，使工作电流显示为 5.00mA。

3. 测量螺线管轴线的磁场分布

1) 以相距螺线管两端口等远的中心位置为坐标原点，探头离中心位置 $x=12.5-x_1-x_2$ ，轻轻转动螺线管底座上的标尺旋钮，使测距尺读数 $x_1=x_2=0.0\text{cm}$ 。

先调节 x_1 旋钮，保持 $x_2=0.0\text{cm}$ ，使 x_1 停留在 0.0、0.5、1.0、2.0、4.5、7.0、10.0、12.5cm 等读数处，再调节 x_2 旋钮，保持 $x_1=12.5\text{cm}$ ，使 x_2 停留在 1.0、3.0、5.0、7.0、9.0、11.0、11.5、12.5cm 等读数处，按对称测量的方法测出相应的 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 值。

2) 记下 K_H 的值，由(2)式及(1)式得此点的 V_H 与 B 。

4. 绘制出螺线管内的 B-X 磁场分布曲线。

根据上述测量结果，绘制螺线管内的 B-X 磁场分布曲线。

五、数据记录 and 数据处理：

$K_H=0.5\text{mV}/(\text{mA}\cdot\text{T})$ $L=25.0\text{cm}$ $r=2.50\text{cm}$ $N=2500$ 匝 $I_M=1000\text{mA}$

X (cm)	$V_1(\text{mv})$ ($+I_S, +B$)	$V_2(\text{mv})$ ($+I_S, -B$)	$V_3(\text{mv})$ ($-I_S, -B$)	$V_4(\text{mv})$ ($-I_S, +B$)	$V_H(\text{mv})$	B(T)

数据处理要求：1) 计算螺线管中点的磁场强度 B ，并与理论值比较求相对误差；

$$B_0 = \frac{\mu \cdot N \cdot I_M}{\sqrt{L^2 + 4r_0^2}}$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} / \text{A}$$

2) 在坐标纸上绘制螺线管内的 B~X 磁场分布曲线。

六、注意事项:

1. 绝不允许将测试仪上的励磁电流“ I_M 输出”错接到“工作电流”出,也不可错接到“霍尔电压”处,否则,一旦通电,霍尔元件立即烧毁。
2. 霍尔元件质脆,引线的接头细小,容易损坏,旋进旋出时,操作动作要轻缓。
3. V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 本身还含有“+”、“-”号,测量记录时不要忘记。
4. 仪器开机前应将两个电流调节旋钮逆时针旋到底,使其输出电流趋于最小状态,然后开机。
5. 关机前,应将两个电流调节旋钮逆时针旋到底,使其输出电流趋于最小状态,然后关机。

七、思考题:

- 1) 产生霍尔效应的机理?
- 2) 消除霍尔效应副效应的方法?

提示: 根据每一种附加电压随磁场 B 和电流 I_H 换向而变化的特点加以消除。

- 3) 若磁场的法线不是恰好与霍尔元件的法线一致,对测量结果会有何影响? 如何用实验的方法判断 B 与元件法线是否一致?

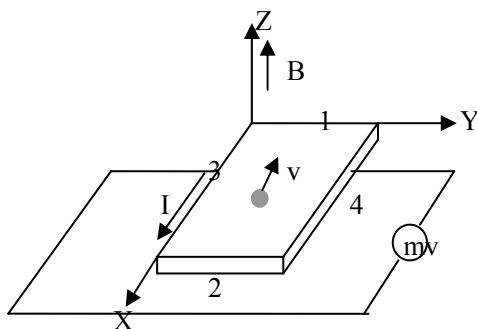
提示: 若磁场的法线不是恰好与霍尔元件的法线一致,则霍尔电压 $V_H = K_H I_H B$ 中的磁场 B 的只是外磁场在霍尔元件的法线方向上的分量,因而会导致测量结果偏小。显然,缓慢变化霍尔元件的方向,观察其输出电压,电压最大时说明两者方向一致,否则,方向不一致。

- 4) 能否用霍尔元件片测量交变磁场?

提示: 由于霍尔电压建立的时间很短(约 $10^{-12} - 10^{-14} \text{s}$),故加在霍尔元件上的电流也可以是交变的,产生的霍尔电压 V_H 也是交变,此时上式仍成立,只是式中的 I_H 、 V_H 应是有效值。

- 5) 根据磁场 B 的方向,工作电流 I 的方向及霍尔电压 V_H 的正负,如何判断所用霍尔元件是 N 型(载流子为电子)还是 P 型(载流子为空穴)半导体?

提示: 电流、磁场方向如图所示。根据 $\vec{f}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ 来判断。若霍尔元件是 N 型(载流子为电子)半导体,则 4 面为正,3 面为负,霍尔电压 V_H 为正;若是 P 型(载流子为空穴)半导体,则 4 面为负,3 面为正,霍尔电压 V_H 为负。



霍耳位置传感器法测杨氏模量

一、实验内容:

1. 了解霍耳效应及霍耳位置传感器的原理
2. 学会使用霍耳位置传感器法测杨氏模量

二、实验仪器:

杨氏模量测试仪、千分尺、游标卡尺



三、实验原理:

1. 霍耳元件置于磁感应强度为 B 的磁场中，在垂直于磁场方向通以电流 I ，则与这二者平面垂直的方向上产生霍耳电势差:

$$U_H = K \cdot I \cdot B \quad (1)$$

上式中 K 为元件的霍耳灵敏度。如果保持霍耳元件的电流 I 不变，而使其在一均匀梯度的磁场中移动时，则输出的霍耳电势差变化量为:

$$\Delta U_H = K \cdot I \cdot \frac{dB}{dZ} \cdot \Delta Z \quad (2)$$

上式中 ΔZ 为位移量，此式说明若 $\frac{dB}{dZ}$ 为常数时， ΔU_H 与 ΔZ 成正比。

2. 一段固体棒，在其两端沿轴发现施加大小相等、方向相反的外力 F ，其长度 L 发生改变 ΔL ，以 S 表示横截面面积，称 F/S 为胁强，相对长变 $\Delta L/L$ 为胁变。在弹性限度内，由胡克定律有：

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

E 称为杨氏模量，其数值与材料性质有关。

在横梁受力弯曲的情况下，杨氏模量 E 得测量表达式为：

$$E = \frac{d^3 \cdot Mg}{4a^3 \cdot b \cdot \Delta Z} \quad (3)$$

其中： d 为两刀口之间的距离； M 为所加砝码的质量； a 为梁的厚度； b 为梁的宽度； ΔZ 为梁中心由于外力作用而下降的距离； g 为重力加速度。

四、实验步骤：

1. 调节三维调节架的上下前后位置的调节螺丝，使传感器探测元件处于磁铁中间位置。
2. 用水准器观察是否在平衡位置，若偏离可用底座螺丝调节到水平位置。
3. 调节霍耳位置传感器的毫伏表。磁铁盒可上下调节调节螺丝使磁铁上下移动，当毫伏表读数很小时，停止调节并固定螺丝，最后调节零电位器使毫伏表读数为零。
4. 调节读数显微镜，使眼睛观察十字线及分划板刻度线和数字清晰。然后移动读数显微镜前后位置，使能清晰看到铜刀上的基线。转动读数显微镜的鼓轮使刀口架上的基线与读数显微镜内十字刻度线重合，记下初始读数值。
5. 逐次增加砝码，每次增加 10.00g，相应从读数显微镜读出梁中心的位置 Z_i (mm) 及毫伏表的读数 U_i (mv)。然后依次减少砝码，每次减少 10.00g，做同样的记录。
6. 测量横梁两刀口间的距离 d (一次测量)；宽度 b (一次测量)；在横梁不同的位置测量其厚度 a (6 次测量)。

7. 用逐差法按公式 (3) 进行计算，求得样品的杨氏模量，并且求出霍耳位置传感器的灵敏度

$$k = \frac{\Delta U}{\Delta Z}。$$

五、数据记录 and 数据处理:

表格一

$\Delta_{\text{游}} = 0.02 \text{ mm}$

$\Delta_{\text{钢尺}} = 0.5 \text{ mm}$

M (g)	d (mm)	b (mm)
50.00		

表格二 厚度 a 的测量 (单位: mm)

$\Delta_{\text{千}} = 0.004 \text{ mm}$

1	2	3	4	5	6	\bar{a} (mm)

表格三 表中 Z 的单位为: mm U 的单位为: mv

次 i	m_i (g)	增加砝码		$\Delta Z_i = Z_{i+5} - Z_i$	$\Delta U_i = U_{i+5} - U_i$
		Z_i	U_i		
1	10.00				
2	20.00				
3	30.00				
4	40.00				
5	50.00				
6	60.00				
7	70.00				
8	80.00				
9	90.00				
10	100.00				

数据处理要求:

- 1) 利用实验装置测量钢片的杨氏模量;

采用逐差法，M=50.0g

$$\Delta_d = \Delta_{\text{钢尺}}$$

$$\Delta_b = \Delta_{\text{游}}$$

$$\bar{a} = \frac{\sum a_i}{6}$$

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum (a_i - \bar{a})^2}{6-1}}$$

$$\Delta_a = \sqrt{S_a^2 + \Delta_{\text{千}}^2}$$

$$\overline{\Delta z} = \frac{\sum (\Delta z_i)}{5}$$

$$\Delta_{(\Delta z)} = S_{(\Delta z)} = \sqrt{\frac{\sum [(\Delta z_i) - \overline{\Delta z}]^2}{5-1}}$$

$$\bar{E} = \frac{d^3 \cdot Mg}{4\bar{a}^3 \cdot b \cdot \overline{\Delta z}}$$

$$E_E = \sqrt{\left(3 \frac{\Delta_d}{d}\right)^2 + \left(3 \frac{\Delta_a}{\bar{a}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{(\Delta z)}}{\overline{\Delta z}}\right)^2}$$

$$\Delta_E = \bar{E} \cdot E_E$$

$$E = \bar{E} \pm \Delta_E$$

2) 利用钢片的测量数据对传感器进行定标。

$$\overline{\Delta U} = \frac{\sum (\Delta U_i)}{5}$$

$$\Delta_{(\Delta U)} = S_{(\Delta U)} = \sqrt{\frac{\sum [(\Delta U_i) - \overline{\Delta U}]^2}{5-1}}$$

$$\bar{K} = \frac{\overline{\Delta U}}{\overline{\Delta z}}$$

$$E_K = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{(\Delta U)}}{\overline{\Delta U}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{(\Delta z)}}{\overline{\Delta z}}\right)^2}$$

$$\Delta_K = \bar{K} \cdot E_K$$

$$K = \bar{K} \pm \Delta_K$$

六、注意事项：

1. 加放砝码时动作一定要轻，千万不能碰动铜刀架。
2. 用读数显微镜测量时，刀口架不能晃动。

七、思考题：

1) 试述霍耳位置传感器测量位移的原理和优点？

$$\text{提示: } U_H = K \cdot I \cdot B \Rightarrow \Delta U_H = K \cdot I \cdot \frac{dB}{dZ} \cdot \Delta Z \Rightarrow \Delta z = K \cdot I \cdot \frac{dB}{dZ} \cdot \Delta U_H$$

将一个微小位移量转换成了一个电学量，可直接读出。

2) 本实验中你是否考虑过霍耳片移动的距离就是钢片弯曲下降的位移 ΔZ ? 进一步思考该实验装置的有何缺陷?

提示: 霍耳片到铜杠杆支点的距离和铜刀在杠杆上的固定点的距离必须相等, 霍耳片移动的距离就是钢片弯曲下降的位移 ΔZ 。否则会产生误差。

3) 本实验中, 磁铁盒的中心磁感应强度为零, 利用逐差法处理本实验数据时, 调节中是否一定得使霍耳传感器处于该中心方可进行测量? 说明理由。

提示: 不一定。因为数据处理采用的方法是逐差法, 起点读数为多少无关紧要。

4) 如何利用实验数据, 采用作图法求杨氏模量?

提示: $E = \frac{d^3 \cdot Mg}{4a^3 \cdot b \cdot \Delta Z} \Rightarrow \Delta Z = \frac{gd^3}{4a^3 \cdot b \cdot E} \cdot M$, 令 $k = \frac{gd^3}{4a^3 \cdot b \cdot E}$,

则 $\Delta Z = k \cdot M$, 其中 $E = \frac{gd^3}{4a^3 \cdot b \cdot k}$ 。

显然, ΔZ 与 M 呈线性关系。根据实验数据列 ΔZ 与 M 的关系表如下:

次数 i	1	2	3	...	7	8	9	10
m_i (Kg)								
Z_i (mm)								
$M_i = m_i - m_1$								
$\Delta Z_i = Z_i - Z_1$								

以 M 为横坐标, ΔZ 为纵坐标作图, 为一直线。在直线两端分别取点 A 和 B, 根据其坐标值计算直线斜

率 k , 将各参数和 k 值代入 $E = \frac{gd^3}{4a^3 \cdot b \cdot k}$ 即可得到杨氏模量 E 。

稳态法测量不良导体的导热系数

一. 实验目的

1. 掌握用稳态法测量不良导体(橡皮样品)的导热系数
2. 学习用物体散热速率求传导速率的实验方法。

二. 实验原理

设稳态时，在 Δt 时间内通过样品的热量 ΔQ 满足下式：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \frac{\theta_1 - \theta_2}{h_B} S \quad (1)$$

$$\text{即} \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \frac{\theta_1 - \theta_2}{4h_B} \pi d_B^2 \quad (2)$$

散热盘 P 在 θ_2 时的散热速率为：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = mc \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \bigg|_{\theta=\theta_2} \quad (3)$$

稳态时铜盘 P 的散热速率的表达式应作面积修正：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = mc \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \bigg|_{\theta=\theta_2} \frac{(\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)}{(2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)} \quad (4)$$

由 (2) 式和 (4) 式可得：

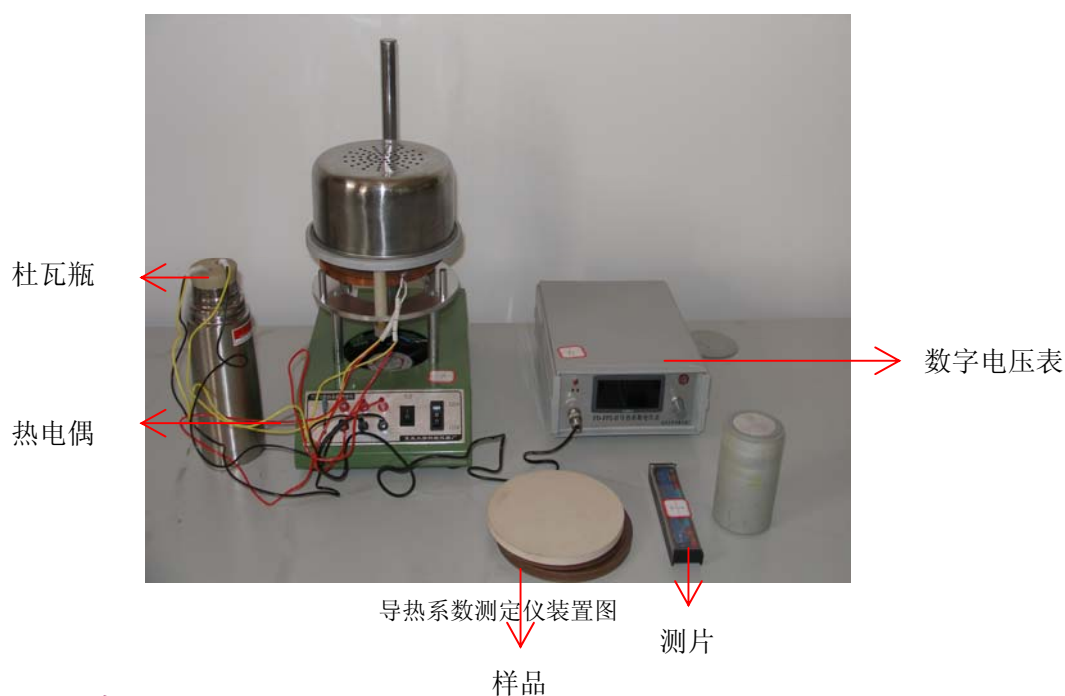
$$\lambda \frac{\theta_1 - \theta_2}{4h_B} \pi d_B^2 = mc \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \bigg|_{\theta=\theta_2} \frac{(\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)}{(2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)} \quad (5)$$

所以样品的导热系数 λ 为：

$$\lambda = mc \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \bigg|_{\theta=\theta_2} \frac{(R_p + 2h_p)}{(2R_p + 2h_p)} \frac{4h_B}{(\theta_1 - \theta_2)} \frac{1}{\pi d_B^2} \quad (6)$$

三. 实验仪器

FD-TC-B 型导热系数测定仪装置如图 1 所示，它由电加热器、铜加热盘 C ，橡皮样品圆盘 B ，铜散热盘 P 、支架及调节螺丝、温度传感器以及控温与测温器组成。



四. 实验步骤

- (1) 取下固定螺丝，将橡皮样品放在加热盘与散热盘中间，橡皮样品要求与加热盘、散热盘完全对准；要求上下绝热薄板对准加热和散热盘。调节底部的三个微调螺丝，使样品与加热盘、散热盘接触良好，但注意不宜过紧或过松；
- (2) 按照图 1 所示，插好加热盘的电源插头；再将 2 根连接线的一端与机壳相连，另一有传感器端插在加热盘和散热盘小孔中，要求传感器完全插入小孔中，并在传感器上抹一些硅油或者导热硅脂，以确保传感器与加热盘和散热盘接触良好。在安放加热盘和散热盘时，还应注意使放置传感器的小孔上下对齐。（**注意：**加热盘和散热盘两个传感器要一一对应，不可互换。）
- (3) 接上导热系数测定仪的电源，开启电源后，加热盘即开始加热，“加热”、“散热”选择开关在数字电压表上显示散热盘的当时温度（电压值）。
- (4) 加热盘的温度上升到一定温度值时（约 3.40mV 左右），开始记录散热盘的温度，可每隔一分钟记录一次，待在 10 分钟或更长的时间内加热盘和散热盘的温度值基本不变，可以认为已经达到稳定状态了。记下散热盘温度值 θ_2 。
- (5) 停止加热，取走样品，调节三个螺栓使加热盘和散热盘接触良好，接通加热，使散热盘温度上升到高于稳态时的 θ_2 值 20°C （查表得出相应的电压值）左右即可。
- (6) 移去加热盘，让散热圆盘在风扇作用下冷却，每隔 30 秒记录一次散热盘的温度示值，根据记录数据做冷却曲线，用镜尺法作曲线在 θ_2 点的切线，根据切线斜率计算冷却速率。
- (7) 根据测量得到的稳态时的温度值 θ_1 和 θ_2 ，以及在温度 θ_2 时的冷却速率，由公式

$$\lambda = mc \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \bigg|_{\theta=\theta_2} \frac{(R_p + 2h_p)}{(2R_p + 2h_p)(\theta_1 - \theta_2)} \frac{4h_B}{\pi d_B^2} \frac{1}{\pi d_B^2} \text{ 计算不良导体样品的导热系数。}$$

五. 注意事项

1. 为了准确测定加热盘和散热盘的温度，实验中应该在两个传感器上涂些导热硅脂或者硅油，以使传感器和加热盘、散热盘充分接触；另外，加热橡皮样品的时候，为达到稳定的传热，调节底部的三个微调螺丝，使样品与加热盘、散热盘紧密接触，注意不要中间有空气隙；也不要将螺丝旋太紧，以免影响样品的厚度。
2. 导热系数测定仪铜盘下方的风扇做强迫对流换热用，减小样品侧面与底面的放热比，增加样品内部的温度梯度，从而减小实验误差，所以实验过程中，风扇一定要打开。

六. 数据记录与数据处理

样品：橡皮；

室温: $^{\circ}\text{C}$;

散热盘比热容 (紫铜): $C=385 J/(Kg \cdot K)$;

散热盘质量: $m = 891.42\text{g}$;

	厚度/mm	直径/mm
散热盘		
橡皮样品		
绝缘样品		

稳态时, 样品上表面的温度 $\theta_1 =$, 下表面的温度 $\theta_2 =$

散热盘自然冷却时温度记录

$\theta / ^\circ C$							
$\theta / ^\circ C$							

1. 作冷却曲线:

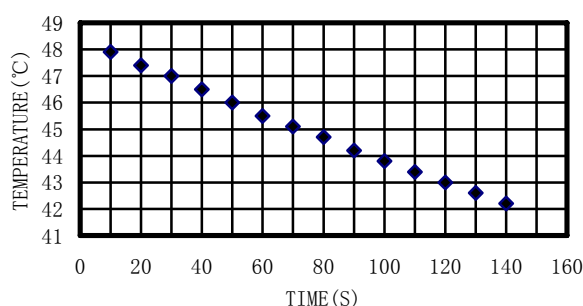
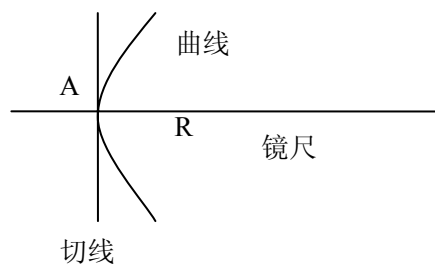


图 2 散热盘冷却曲线

2. 用镜尺法求出冷却速率。将镜子制成的直尺通过 A 点, 然后以 A 点为圆心转动此镜尺, 直到镜子中靠近镜子一端曲线的像与原来曲线成一直线, 此时直尺的方向即为该曲线在 A 点的曲率半径方向, 沿镜尺画一直线, 然后过 A 点画出与此线垂直的直线, 此直线即是曲线在 A 点的切线。
3. 计算样品的导热系数。



七. 思考题

1. 应用稳态法是否可以测量良导体的导热系数？如可以，对实验样品有什么要求？实验方法与测不良导体有什么区别？
2. 什么是镜尺法？镜尺法画切线利用了什麼原理？

冷却法测量金属的比热容

一. 实验目的

1. 掌握冷却法测定金属比热容的方法；
2. 了解金属的冷却速率与环境之间的温差关系，以及进行测量的实验条件。

二. 实验原理

将质量为 M_1 的金属样品加热后，放到较低温度的介质中，样品将逐渐冷却。其单位时间的热量损失 ($\Delta Q/\Delta t$) 与温度下降的速率成正比：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = c_1 M_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t} \quad (1)$$

根据冷却定律有：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \alpha_1 S_1 (\theta_1 - \theta_0)^m \quad (2)$$

$$c_1 M_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t} = \alpha_1 S_1 (\theta_1 - \theta_0)^m \quad (3)$$

同理，对质量为 M_2 ，比热容为 C_2 的另一种金属样品，可有同样的表达式：

$$c_2 M_2 \frac{\Delta \theta_2}{\Delta t} = \alpha_2 S_2 (\theta_2 - \theta_0)^m \quad (4)$$

由式 (3) 和 (4)，可得：

$$\frac{c_2 M_2 \frac{\Delta \theta_2}{\Delta t}}{c_1 M_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t}} = \frac{\alpha_2 S_2 (\theta_2 - \theta_0)^m}{\alpha_1 S_1 (\theta_1 - \theta_0)^m}$$

所以

$$c_2 = c_1 \frac{M_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t}}{M_2 \frac{\Delta \theta_2}{\Delta t}} \frac{\alpha_2 S_2 (\theta_2 - \theta_0)^m}{\alpha_1 S_1 (\theta_1 - \theta_0)^m}$$

假设两样品的形状尺寸都相同，即 $S_1=S_2$ ；两样品的表面状况也相同，而周围介质（空气）的性质当然也不变，则有 $\alpha_1 = \alpha_2$ 。于是当周围介质温度不变（即室温 θ_0 恒定），两样品又处于相同温度 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ 时，上式可以简化为：

$$c_2 = c_1 \frac{M_1 \left(\frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right)_1}{M_2 \left(\frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right)_2} \quad (5)$$

三. 实验仪器

金属比热容测量仪，样品（铜、铁、铝）



冷却法金属比热容测量仪
样品 热电偶 数字电压表

四. 实验步骤

开机前先连接好加热仪和测试仪，共有加热四芯线和热电偶线两组线。

1、选取长度、直径、表面光洁度尽可能相同的三种金属样品（铜、铁、铝）用物理天平或电子天平称出它们的质量 M_0 。再根据 $M_{Cu} > M_{Fe} > M_{Al}$ 这一特点，把它们区别开来。

2、使热电偶端的铜导线与数字表的正端相连；冷端铜导线与数字表的负端相连。当样品加热到 150°C （此时热电势显示约为 6.1mV ）时，切断电源移去加热源，样品继续安放在与外界基本隔绝的有机玻璃圆筒内自然冷却（筒口须盖上盖子），记录样品的冷却速率 $(\frac{\Delta\theta}{\Delta t})_{\theta=100^{\circ}\text{C}}$ 。具体做法是记录数字电压表上示值约从 $E_1 = 4.20\text{mV}$ 降到 $E_2 = 4.00\text{mV}$ 所

需的时间 Δt （因为数字电压表上的值显示数字是跳跃性的，所以 E_1 、 E_2 只能取附近的值），

从而计算 $(\frac{\Delta E}{\Delta t})_{E=4.00\text{mV}}$ 。按铁、铜、铝的次序，分别测量其温度下降速度，每一样品应重复测量 6 次。因为热电偶的热电动势与温度的关系在同一小温差范围内可以看成线性关系，即

$$\frac{(\frac{\Delta\theta}{\Delta t})_1}{(\frac{\Delta\theta}{\Delta t})_2} = \frac{(\frac{\Delta E}{\Delta t})_1}{(\frac{\Delta E}{\Delta t})_2}, \text{ 式 (5) 可以简化为:}$$

$$c_2 = c_1 \frac{M_1 (\Delta t)_2}{M_2 (\Delta t)_1}$$

3、仪器的加热指示灯亮，表示正在加热；如果连接线未连好或加热温度过高（超过 200

℃) 导致自动保护时, 指示灯不亮。升到指定温度后, 应切断加热电源。

五. 注意事项

1、加热装置向下移动时, 动作要慢, 应注意要使被测样品垂直放置, 以使加热装置能完全套入被测样品。

2、测量降温时间时, 按“计时”或“暂停”按钮应迅速、准确, 以减小人为计时误差。

六. 数据记录与数据处理

$M_{\text{cu}} =$ g; $M_{\text{Fe}} =$ g; $M_{\text{Al}} =$ g。铜比热容 $C_1 = C_{\text{Cu}} = 0.0940 \text{ cal/ (g}^\circ\text{C)}$

$\Delta_{\text{天}} = 0.5g$

热电偶冷端温度: 0°C

样品由 4.20mV 下降到 4.00mV 所需时间 (单位为 S)

$\Delta_{\text{Fe}} = \Delta_{M_{\text{Cu}}} = \Delta_{\text{Al}} = 0.05g$

次数 样品	1	2	3	4	5	6	平均值 t
$t_{\text{Fe}}(\text{s})$							
$t_{\text{Cu}}(\text{s})$							
$t_{\text{Al}}(\text{s})$							

$$c_{\text{Fe}} = c_{\text{cu}} \frac{M_{\text{cu}} t_{\text{Fe}}}{M_{\text{Fe}} t_{\text{cu}}} = \quad \text{Cal/ (g}^\circ\text{C)}$$

$$S_{t_{\text{Fe}}} = \quad \Delta t_{\text{Fe}} =$$

$$S_{t_{\text{cu}}} = \quad \Delta t_{\text{cu}} =$$

$$E_{C_{\text{Fe}}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{M_{\text{Fe}}}}{M_{\text{Fe}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{t_{\text{Fe}}}}{t_{\text{Fe}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{M_{\text{cu}}}}{M_{\text{cu}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{t_{\text{cu}}}}{t_{\text{cu}}}\right)^2} \quad \Delta C_{\text{Fe}} = E_{C_{\text{Fe}}} \cdot \bar{C}_{\text{Fe}} =$$

$$c_{\text{Fe}} = \bar{C}_{\text{Fe}} \pm \Delta C_{\text{Fe}}$$

$$c_{\text{Al}} = c_{\text{cu}} \frac{M_{\text{cu}} t_{\text{Al}}}{M_{\text{Al}} t_{\text{cu}}} = \quad \text{Cal/ (g}^\circ\text{C)}$$

$$E_{C_{\text{Al}}} = \quad \Delta C_{\text{Al}} =$$

七. 思考题

1. 为什么实验应该在防风筒 (即样品室) 中进行?
2. 测量三种金属的冷却速率, 并在图纸上绘出冷却曲线, 如何求出它们在同一温度点的冷却速率?

密立根油滴实验测电子电荷

一、实验内容：

- 1.观察带电油滴在电场中的运动；
- 2.测量电子电荷。

二、实验仪器：

MOD—5 型密立根油滴仪、监视器、喷雾器。



三、实验原理（平衡法）：

1.库仑力与重力平衡（若不计空气浮力）

用喷雾器将油喷入两块相距为 d 的水平放置的平行极板之间。油在喷射撕裂成油滴时，一般都是带电的（有正负之分）。设油滴的质量为 m ，所带的电荷为 q ，两极板间的电压为 V ，则油滴在平行极板间将同时受到重力 mg 和静电力 qE 的作用。如图 1 所示。若某一电荷恰好在电压 V 下达到平衡，即

$$mg = qE = q \frac{V}{d} \quad \Rightarrow \quad q = mgd / V$$

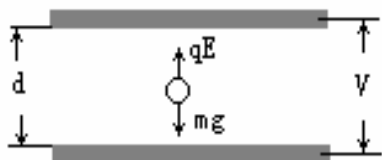


图 1 库仑力与重力平衡

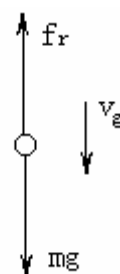


图 2 空气阻力与重力平衡

2. 空气阻力与重力平衡

让两平行极板短路，油滴受重力作用而加速下降，但受空气阻力 f_r 的作用（空气阻力与物体运动速度成正比），下降一段距离达到某一速度 v_g 后，阻力 f_r 与重力 mg 平衡，如图 2 所示（空气浮力忽略不计），油滴将匀速下降，根据斯托克斯定律，油滴匀速下降时：

$$f_r = 6\pi a \eta v_g = mg$$

式中 η 是空气的粘滞系数， a 是油滴的半径（由于表面张力的原因，油滴总是呈小球状）。

设油滴的密度为 ρ ，油滴的质量 m ，考虑到油滴的半径在 10^{-6} 米左右，油滴的大小空气的间隙只相差几个数量级，空气的粘滞系数 η 应作如下修正：

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pa}}$$

式中 b 为修正常数（ $b = 6.17 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{cmHg}$ ）， p 为大气压强。测量表达式为：

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta v_g}{(1 + \frac{b}{pa})} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{V}$$

在第二种平衡中，设油滴匀速下降的距离为 l ，时间为 t_g ，则：

$$v_g = \frac{l}{t_g}$$

最终测量公式：

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{t_g (1 + \frac{b}{3p} \sqrt{\frac{2\rho g t_g}{\eta l}})} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{V}$$

式中， V 为油滴处于平衡状态时的平衡电压，可从油滴仪的电压表上直接读出；油滴匀速下降距离 l 所用的时间 t_g ，也可从油滴仪上的秒表测定； $\rho, g, \eta, p, b, d, l$ 都是与实验条件和仪器有关的或设定的参数。

四、实验步骤：

1. 调整仪器

将仪器放平稳，调节仪器底部两只调平螺丝，使水准仪气泡处于中央位置，这时平行板处于水平，从而保证电场和重力场相平行，然后接通电源。

2. 练习测量

练习控制油滴：用平衡法实验时，在平行极板上加平衡电压 50~400V，驱走不需要的油滴，直到剩下几颗缓慢运动的为止。跟踪其中的某一颗，仔细调节平衡电压，使这颗油滴静止不动。然后去掉平衡电压，让它匀速下降，下降一段距离后再加上平衡电压和升降电压，使油滴静止或上升。如此反复多次地进行练习，以掌握控制油滴的方法。

练习测量油滴运动的时间：任意选择几颗运动速度快慢不同的油滴，测出它们上升或下降一段距离所需要的时间。如此反复多练几次，以掌握测量油滴运动时间的方法。

练习选择油滴：要做好本实验，很重要的一点是选择合适的油滴。选的油滴体积不能太大或太小，通常可以选择平衡电压在 200V 左右，在 20~30 秒时间内匀速下降 2mm 的油滴，其大小和带电量都比较合适。

3.正式测量

平衡电压 V 的测定：将功能控制开关选择 “工作” “平衡” 档，注视选定的一颗油滴，仔细调节平衡电压旋钮，并将油滴置于分划板上某条横线附近以便准确判断出这颗油滴是否静止平衡。

当平衡电压 V 测出后，保持电压不变，将功能控制开关选择 “工作” “提升” 档，将油滴移至略超出分划板最高横刻线处，然后将功能控制开关选择 “0V” 档，去掉平衡电压 V，待油滴下降一段距离，当其经过分划板 “0” 刻度线时按 “开始”，经过 “1.6” 刻度线时按 “结束”，再按 “确认”。

对同一颗油滴应进行 5 次测量，如果油滴变得模糊，要微调测量显微镜跟踪油滴。

按上述步骤重新选择油滴进行测量，将实验数据填入自拟表格内，求得电荷带电量，

五、数据记录 and 数据处理：

油的密度： $\rho = 981 \text{Kg} / \text{m}^3$

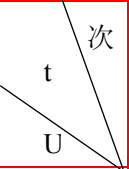
大气压强： $P = 1.013 \times 10^5 P_a$

极板间距： $d = 5.00 \times 10^{-3} \text{m}$

油滴匀速下降的距离取： $s = 1.60 \times 10^{-3} \text{m}$

空气粘滞系数： $\eta = 1.83 \times 10^{-5} P_a \cdot s$

重力加速度： $g = 9.79 \text{m} / \text{s}^2$

油滴		1	2	3	4	5	\bar{U}	$\bar{t}(s)$	$Q_i(\text{库仑})$
1									
2									
3									
4									
5									

数据处理要求：

1) 根据电荷测量表达式分别求出每油滴的电量 Q_i ；

2) 求 Q_i/q_0 ($q_0 = 1.602 \times 10^{-19}$ 库仑) 并取整数 N_i ；

3) 求 $q_i = Q_i/N_i$ ；求 $\bar{q} = \frac{\sum q_i}{n}$

4) $\Delta_q = |\bar{q} - q_0|$ 和 $E_q = \frac{\Delta_q}{q_0} \times 100\%$

六、注意事项：

1. 用喷雾器将油从喷雾口喷入油雾室后，推上油雾孔挡板，以免空气流动而使油滴乱漂移，实验时应该尽量避免油滴仪周围空气流动。微调显微镜的调焦手轮，当监视器上出现大量清晰的油滴，如夜空繁星，说明显微镜已调好。如果视场较暗和油滴不够明亮，调节监视器的“●”旋钮。

2. 在测量时还是要调节 CCD 的位置，一边寻找合适的带电微粒。

3. 喷油雾时喷雾器应该竖拿，食指堵住出气孔，喷雾器对准油雾室的喷雾口，轻轻喷入少许油滴即可。切勿将喷雾器插入油雾室，甚至将油倒出来，否则会弄脏油滴盒，甚至堵塞落油孔。

七、思考题：

1) 为什么不能选择太大或者太小的油滴？

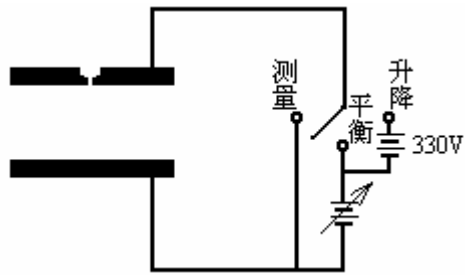
提示：太大的油滴必然质量大，所带电荷也多，因此匀速下降时间很短，增大了测量误差，给数据处理带来困难；过小的油滴观察困难，布朗运动明显，会引入较大的测量误差。

2) 电容器两极板不平行对测量有影响吗？

提示：有。电容器两极板不平行，电场不均匀，导致油滴做不了匀速运动；同时会有一个水平分量，导致油滴水平运动，无法完成多次测量。

3) 电容器两极板加的是什么电压？各起什么作用？请你画出两极板间电路的原理图。

提示：



4) 油滴实验仪装置不水平对测量有影响吗？

提示：有。油滴实验仪装置不水平，极板间的电场会有一个水平分量，一方面使得实际平衡电压偏大，另一方面导致油滴水平运动，无法完成多次测量。

非平衡直流电桥

一、实验内容：

1. 直流单臂电桥(惠斯登电桥)测量电阻的基本原理和操作方法；
2. 非平衡直流电桥电压输出方法（卧式电桥）测量电阻的基本原理和操作方法；
3. 用直流单臂电桥测量室温铜电阻；
4. 用非平衡直流电桥电压输出方法（卧式电桥）测量各温度铜电阻及电阻温度系数。

二、实验仪器：

FQJ-III型教学用非平衡直流电桥



FQJ 非平衡电桥加热实验装置



实验装置

三、实验原理：

1.单桥的原理（惠斯登电桥）

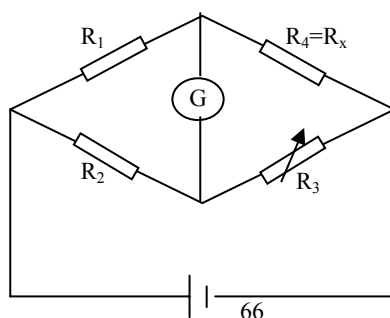


图 1 惠斯登电桥原理

图 1 中，通电后调节 R_3 若检流计无电流流过，电桥平衡，有测量公式：

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3$$

2. 非平衡电桥原理（卧式电压电桥）

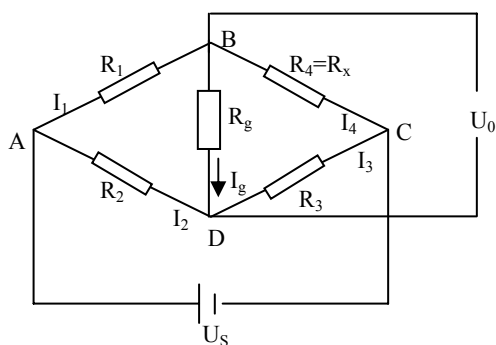


图 2 非平衡电桥原理

对于电压表而言，其内阻 R_g 很大，可认为 $R_g \rightarrow \infty$ ，于是 $I_g = 0$ ，有：

$$U_0 = \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_4)(R_3 + R_3)} \cdot U_s$$

对于 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ ， $U_0 = 0$ ，固定 R_1 、 R_2 、 R_3 ，取 $R_4 \rightarrow R_4 + \Delta R$ ，上式变为：

$$U_0 = \frac{R_2 R_4 + R_2 \Delta R - R_1 R_3}{(R_1 + R_4)(R_3 + R_3) + \Delta R(R_2 + R_3)} \cdot U_s$$

对于卧式电桥 $R_1 = R_4 = R$ ， $R_2 = R_3 = R'$ ， $R \neq R'$ ，上式变为：

$$U_0 = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}}$$

于是测量表达式为：

$$\Delta R = \frac{4U_0}{U_s - 2U_0} \cdot R$$

四、实验步骤：

1. 用直流单臂电桥测量室温铜电阻

1) 将“双桥量程倍率选择”开关置于“单桥”位置，“功能、电压选择”开关置于“单桥(5V)”或“单桥 15V”，并接通电源。

2) 在“ R_x ”与 R_{x1} 之间接上被测电阻， R_3 测量盘打到与被测电阻相应的数字，按下 G、B 按钮，调节 R_3 ，使电桥平衡(电流表为 0)。

3) 记录 R_3 和室温。

2. 用卧式电桥测量各温度铜电阻及电阻温度系数

1) 确定各桥臂电阻值。设定室温时之铜电阻值为 R_0 (由步骤 1 测得)使 $R=R_1=R_4=R_0$ ，选择 $R'_2=R_2=R_3=30\Omega$ (供参考，可自行设计)

2) 预调平衡，将待测电阻接至 R_x ， R_2 ， R_3 调至 30Ω ， R_1 调至 R_0 ，功能转换开关转至电压输出，G、B 按钮按下，微调 R_1 使电压 $U_0=0$ 。

3) 开始升温，每 5°C 测量 1 个点，同时读取温度 t 和输出 $U_0(t)$ 。

五、数据记录 and 数据处理:

1. 直流单臂电桥测量室温铜电阻

室温 $t(^{\circ}\text{C})$	$R_3(\Omega)$	$R_x(\Omega)$

2. 卧式电桥测量各温度铜电阻

$U_s =$ R_0 (室温) =

$t(^{\circ}\text{C})$								
$U_0(mV)$								
$\Delta R(\Omega)$								
$R(t) = R_0 + \Delta R(\Omega)$								

注: $\Delta R(\Omega)$ 根据测量表达式计算，式中 $R = R_0$

在坐标纸上以 $t(^{\circ}\text{C})$ 为横坐标、 $R(t)$ 为纵坐标作图，根据所作直线求斜率 k 和截距，截距即

为 0°C 时铜的电阻 R'_0 ，铜的电阻温度系数 α 可由 $\alpha = \frac{1}{R'_0} \cdot k$ 求出。由此写出关系表达式

$$R(t) = R'_0(1 + \alpha t)$$

六、注意事项：

1. 实验开始前，所有导线，特别是加热炉与温控仪之间的信号输入线应连接可靠。
2. 传热铜块与传感器组件，出厂时已由厂家调节好，不得随意拆卸。
3. 转动“PID 调节”及“调定调节”旋钮时，应用力轻微，以免损坏电位器。
4. 装置在加热时，应注意并闭风扇电源。
5. 实验完毕后，应切断电源。
6. 由于热敏电阻耐高温的局限，设定加温的上限值不能超过 120°C 。

七、思考题：

- 1) 如何正确使用加热装置（PID 调节）？

提示：参考 FQJ-2 型非平衡直流电桥加热装置使用说明。

- 2) 不进行 PID 调节，预设温度与实际温度相同吗？

提示：不相同。

- 3) 有人这样进行测量：先将温度设置为 70°C ，然后持续通电加热，此时铜的温度必然连续上升，于是他开始观察温度指示值，从室温开始每隔 5°C 记录一次装置上显示的电压值。请问这样的操作方式正确吗？请说明理由。

提示：不正确。由温度传感器显示的温度值在持续的加热过程中反映的只是电阻局部的温度，同时，温度传感器还有一个滞后效应，所以，此时温度显示值并不是电阻的平衡温度。

正确的操作方法是每个温度点的测量都必须单独设置，并且要等到温度显示值完全稳定才能记录电压显示值。

偏振光实验

一、实验目的

- 1、观察偏振波的传播性质；
- 2、了解波片的作用。

二、实验原理

(一) 起偏与检偏

将非偏振光变成偏振光的过程称为起偏，起偏的装置称为起偏器。本实验用到的是晶体起偏器。将偏振片用于检偏时称为检偏器。

按照马吕斯定律，强度为 I_0 的线偏振光通过检偏器后，透射光的强度为

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

式中 θ 为入射光偏振方向与检偏器偏振轴之间的夹角。显然，当以光线传播方向为轴转动检偏器时，透射光强度 I 将发生周期性变化。当 $\theta = 0^\circ$ 时，透射光强度最大；当 $\theta = 90^\circ$ 时，透射光强度最小（消光状态）；当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时，透射光强度介于最大值和最小之间。因此，根据透射光强度变化的情况，可以区别光的不同偏振状态。

(二) 波晶片

波晶片是从单轴晶体中切割下来的平行平板，其表面平行于光轴。

当一束单色平行自然光正入射到波晶片上时，光在晶体内部便分解为 o 光与 e 光。o 光电矢量垂直于光轴；e 光电矢量平行于光轴。而 o 光和 e 光的传播方向不变，仍都与表面垂直。但 o 光在晶体内的速度为 v_o ，e 光的为 v_e ，即相应的折射率 n_o 、 n_e 不同。

设晶片的厚度为 l ，则两束光通过晶体后就有位相差

$$\sigma = \frac{\pi}{\lambda} (n_o - n_e) l$$

式中 λ 为光波在真空中的波长。 $\sigma = 2k\pi$ 的晶片，称为全波片； $\sigma = 2k\pi \pm \pi$ 的称为半波片（ $\lambda/2$ 波片）； $\sigma = 2k\pi \pm \frac{\pi}{2}$ 为 $\lambda/4$ 片，上面的 k 都是任意整数。不论全波片，半波片或 $\lambda/4$ 片都是对一定波长而言。

以下直角坐标系的选择，是以 e 光振动方向为横轴，o 光振动方向为纵轴。沿任意方向振动的光，正入射到波晶片的表面，其振动便按此坐标系分解为 e 分量和 o 分量。

平行光垂直入射到波晶片后，分解为 e 分量和 o 分量，透过晶片，二者间产生一附加位相差 σ 。离开晶片时合成光波的偏振性质，决定于 σ 及入射光的性质。

1、偏振态不变的情形

(1) 自然光通过波晶片，仍为自然光。

(2) 若入射光为线偏振光，其电矢量 E 平行 e 轴（或 o 轴），则任何波长片对它都不起作用，出射光仍为原来的线偏振光。

2、 $\lambda/2$ 片与偏振光

(1) 若入射光为线偏振光，且与晶片光轴成 θ 角，则出射光仍为线偏振光，但与光轴成 $-\theta$ 角。即线偏振光经 $\lambda/2$ 片电矢量振动方向转过了 2θ 角。

(2) 若入射光为椭圆偏振光，则半波片既改变椭圆偏振光长（短）轴的取向，也改变椭圆偏振光（圆偏振光）的旋转方向。

3、 $\lambda/4$ 片与偏振光

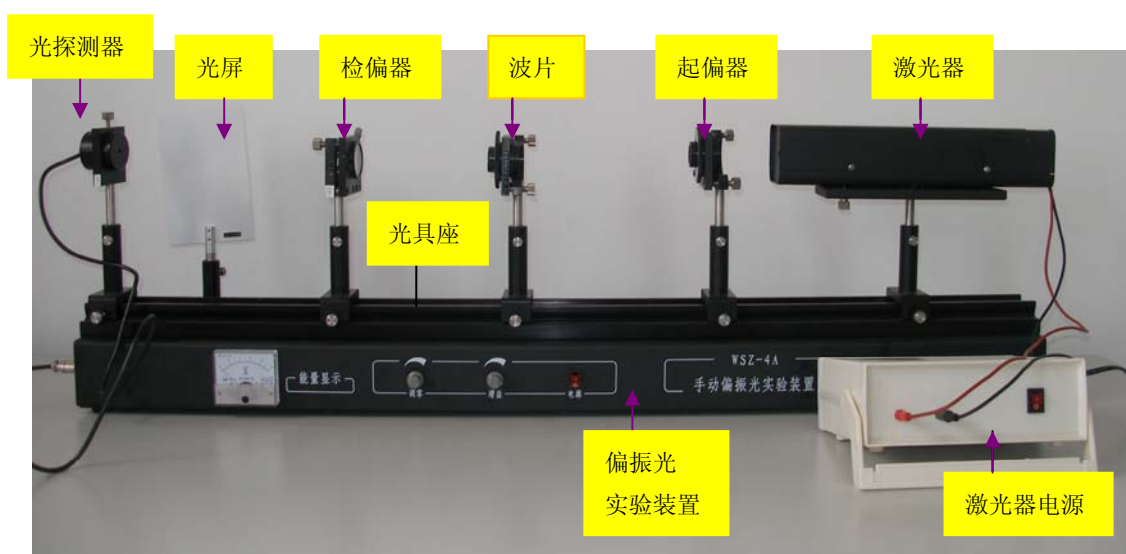
(1) 若入射为线偏振光，则出射光为椭圆偏振光。

(2) 若入射为圆偏振光，则出射光为线偏振光。

(3) 若入射为椭圆偏振光，则出射光一般仍为椭圆偏振光。

三、实验仪器

WSZ 系列偏振光试验系统。



四、实验步骤

1. 定偏振片光轴: 把所有器件按原理图的顺序摆放在平台上，调至共轴。旋转第二个偏振片，使起偏器的偏振轴与检偏器的偏振轴相互垂直，观察消光现象。

2. 考察平面偏振光通过 $\lambda/2$ 波片时的现象:

(1) 在两块偏振片之间插入 $\lambda/2$ 波片，把 X 轴旋转二维架转动 360 度，观察消光的次数并解释这现象。

(2) 将 $\lambda/2$ 波片转任意角度，这时消光现象被破坏。把检偏器转动 360 度，观察发生的现象并作出解释。

(3) 仍使起偏器和检偏器处于正交（即处于消光现象时），插入 $\lambda/2$ 波片，使消光，再将转 15 度，破坏其消光。转动检偏器至消光位置，并记录检偏器所转动的角度。

(4) 继续将 $\lambda/2$ 波片转 15 度（即总转动角为 30 度），记录检偏器达到消光所转总角度。依次使 $\lambda/2$ 波片总转角为 45 度，60 度，75 度，90 度，记录检偏器消光时所转总角度。

3. 用波片产生圆偏振光和椭圆偏振光

(1) 按图 5 使起偏器和检偏器正交，用 $\lambda/4$ 波片代替 $\lambda/2$ 波片，转动 $\lambda/4$ 波片使消光。

(2) 再将 $\lambda/4$ 波片转动 15 度，然后将检偏器转动 360 度，观察现象，并分析这时从 $\lambda/4$ 波片出来光的偏振状态。

(3) 依次将转动总角度为 30 度，45 度，60 度，75 度，90 度，每次将检偏器转动，记录所

观察到的现象。

五、数据记录和处理

表 1

半波片转动角度	检偏器转动角度
15 度	
30 度	
45 度	
60 度	
75 度	
90 度	

从以上数据能得出规律。

表 2

$\lambda/4$ 波片转动的角度	检偏器转动 360 度观察到的现象	光的偏振性质
15 度		
30 度		
45 度		
60 度		
75 度		
90 度		

六、思考题

1. 在透振方向互相垂直的起偏和检偏两片偏振片中插入 $1/2$ 波片，使光轴和起偏器的透振方向平行，那么透过检偏的光是亮还是暗？为什么？将检偏器旋转 90 度，透出的光亮暗是否有变化？
2. 能否设计一个试验方案，把圆偏振光、自然光、圆偏振光与自然光的混合光检验出来？
3. 三块外形相同的偏振片、 $1/2$ 波片、 $1/4$ 波片被弄混了，能否把它们区分开来？需要借助什么工具？

光强分布

一、实验目的

1. 观察单缝衍射现象，加深对衍射理论的理解。
2. 会用光电元件测量单缝衍射的相对光强分布，掌握其分布规律。
3. 学会用衍射法测量微小量。
4. 验证马吕斯定律。

二、实验原理

如图 1 所示，

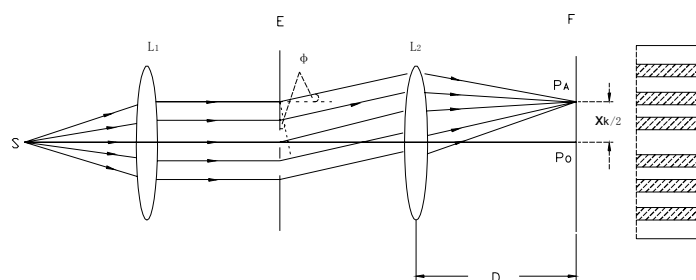


图 1 夫琅禾费单缝衍射光路图

与狭缝 E 垂直的衍射光束会聚于屏上 P_0 处，是中央明纹的中心，光强最大，设为 I_0 ，与光轴方向成 ϕ 角的衍射光束会聚于屏上 P_A 处， P_A 的光强由计算可得：

$$I_A = I_0 \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \quad (\beta = \frac{\pi b \sin \phi}{\lambda})$$

$$\sin \phi = K \frac{\lambda}{b}$$

式中， b 为狭缝的宽度， λ 为单色光的波长，当 $\beta = 0$ 时，光强最大，称为主极大，主极大的强度决定于光强的强度和缝的宽度。

当 $\beta = k\pi$ ，即：

$$(K = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

时，出现暗条纹。

除了主极大之外，两相邻暗纹之间都有一个次极大，由数学计算可得出出现这些次极大的位置在 $\beta = \pm 1.43\pi, \pm 2.46\pi, \pm 3.47\pi, \dots$ ，这些次极大的相对光强 I/I_0 依次为 0.047, 0.017, 0.008, \dots

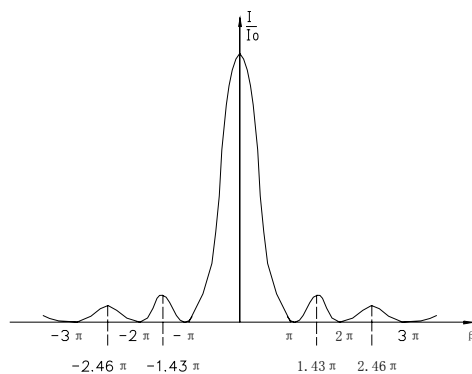


图2 夫琅禾费衍射的光强分布

夫琅禾费衍射的光强分布如图2所示。

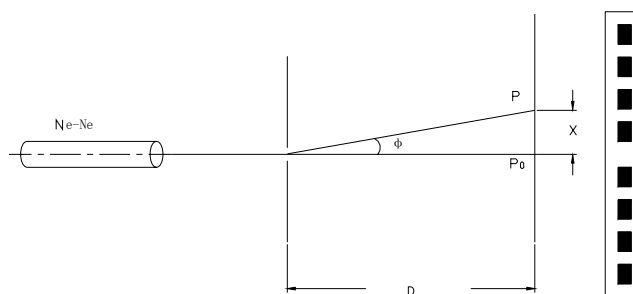


图3 夫琅禾费单缝衍射的简化装置

用氦氖激光器作光源，则由于激光束的方向性好，能量集中，且缝的宽度 b 一般很小，这样就可以不用透镜 L_1 ，若观察屏（接受器）距离狭缝也较远（即 D 远大于 b ）则透镜 L_2 也可以不用，这样夫琅禾费单缝衍射装置就简化为图3，这时，

$$\sin \phi \approx \tan \phi = x/D$$

由上二式可得

$$b = K\lambda D/x$$

三、实验装置

激光器座、半导体激光器、导轨、二维调节架、一维光强测试装置、分划板、可调狭缝、平行光管、起偏检偏装置、光电探头、小孔屏、数字式检流计、专用测量线等。

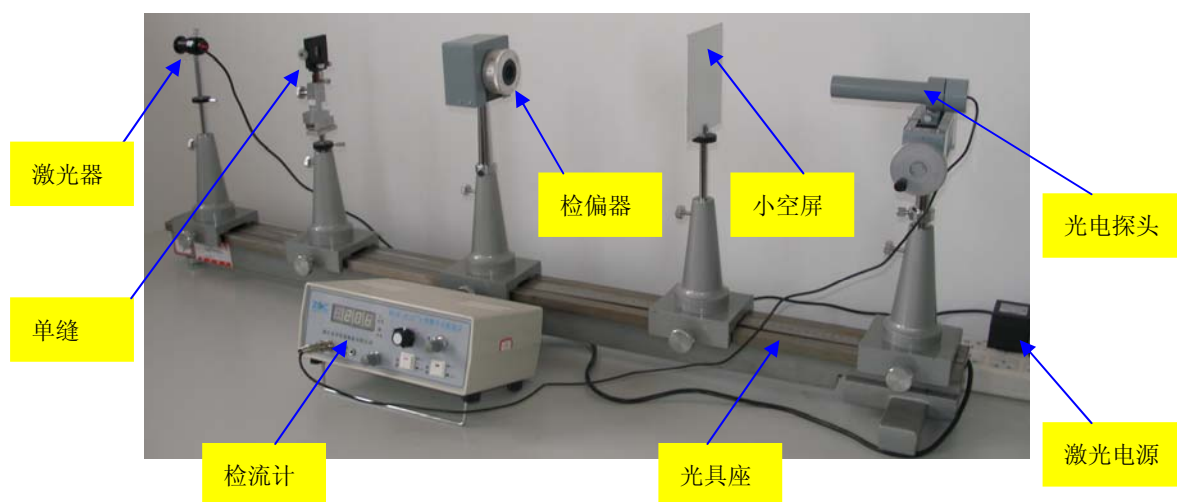


图 4 衍射、干涉等一维光强分布的测试

四、实验步骤

1. 接上电源（要求交流稳压 220V \pm 11V，频率 50HZ 输出），开机预热 15 分钟；
2. 量程选择开关置于“1”档，衰减旋钮顺时针置底，调节调零旋钮，使数据显示为一.000；

（一）单缝衍射一维光强分布的测试

- 1、按图 4 搭好实验装置。此前应将激光管装入仪器的激光器座上，并接好电源；
- 2、打开激光器，用小孔屏调整光路，使出射的激光束与导轨平行；
- 3、打开检流计电源，预热及调零，并将测量线连接其输入孔与光电探头；
- 4、调节二维调节架，选择所需要的单缝、双缝、可调狭缝等，对准激光束中心，使之在小孔屏上形成良好的衍射光斑；
- 5、移去小孔屏，调整一维光强测量装置，使光电探头中心与激光束高低一致，移动方向与激光束垂直，起始位置适当；
- 6、开始测量，转动手轮，使光电探头沿衍射图样展开方向（x 轴）单向平移，以等间隔的位移（0.5mm）对衍射图样的光强进行逐点测量，记录位置坐标 x 和对应的检流计（置适当量程）所指示的光电流值读数 I，**要特别注意衍射光强的极大值和极小值所对应的坐标的测量；**
- 7、测量单缝到光电池的距离 D，测取相应移动座间的距离即可；
- 8、绘制衍射光的相对强度 I/I_0 与位置坐标 x 的关系曲线。

（二）偏振光现象的观察与测试

- 1、按图 4 搭好实验装置；
- 2、同（一），打开激光电源，调好光路，使在平行光管后的小孔屏上可见一较均匀圆光斑；

- 3、同（一），打开检流计，预热及调零；
- 4、旋去光电探头前的遮光筒，把探头旋接在起检偏装置上，然后连好测量线；
- 5、将起偏检偏器置于平行光管后并紧帖平行光管，使光斑完全入射起检偏器；
- 6、转动刻度手轮（连起偏器），在检流计上观察光强变化，以验证马吕斯定律。
- 7、置起偏器读数鼓轮于“0”位置，开始测量。转动分度盘（连检偏器） 5° ，从检流计（置适当量程）上读取一个数值，逐点记录下来，测量一周。

五、数据记录及数据处理

1. 单缝衍射记录（从 $K = -3$ 测到 $K = 3$ ，要特别注意衍射光强的极大值和极小值所对应的坐标的测量）

$$I_0 = \quad \quad \quad \lambda = \quad \quad \quad \Delta = 0.004mm$$

x (mm)										
I										
I/I_0										
x (mm)										
I										
x (mm)										
I										
I/I_0										

- （1）选取中央最大光强处为坐标原点，把测得的数据作归一化处理：即把在不同位置上测得的检流计光强读数 I 除以中央最大的光强读数 I_0 ，然后在毫米方格（坐标）纸上

做出 $\frac{I}{I_0} - x$ 衍射相对光强分布曲线。

- （2）根据分布曲线测量出各级最暗处距离明纹中心的距离 x_K ，利用公式 $b = K\lambda D/x$ 计算不同级次下的 b_K ，然后求 \bar{b} 。

2. 偏振光强记录

$$I_0 =$$

θ (度)															
I															
$\cos^2 \theta$															

I/I_0															
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

作 $\frac{I}{I_0} - \cos^2 \theta$ 图，若为直线则验证了马吕斯定律

六、思考题

1. 缝宽的变化对衍射条纹有什么影响？

提示：从 $b = K\lambda D/x$ 可以看出， b 变大，对于同一级次而言， x 要变小，也就是说亮条纹变窄；从 $\sin \phi = K\lambda/b$ 可以看出， b 变大，对于同一级次而言， ϕ 要变小，也就是说亮条纹要向中心收缩。

2. 硅光电池前的狭缝光阑的宽度对实验结果有什么影响？

提示：本实验要求精确测量各点的光强，所以硅光电池前的狭缝光阑的宽度越小越好。缝太大，测量的将是一定宽度的平均光强，会丢失暗条纹的位置，因而会导致测量误差。

3. 若在单缝到观察屏的空间区域内，充满着折射率为 n 的某种透明媒质，此时单缝衍射图样与不充媒质时有何区别？

提示：如果充满着折射率为 n 的某种透明媒质，则出现暗条纹的公式可写为 $\sin \phi = nK\lambda/b$ ，显然，对于同一级次， ϕ 要变大，也就是说亮条纹变宽，可见条纹级数变少。

4. 用白光光源做光源观察单缝的夫琅禾费衍射，衍射图样将如何？

提示：将是一列彩色条纹。

5. 夫琅和费衍射应符合什么条件？

提示：夫琅和费衍射为远场衍射，要实现夫琅禾费衍射，必须保证光源至单缝的距离和单缝到衍射屏的距离均为无限远（或相当于无限远），即要求照射到单缝上的入射光、衍射光都为平行光，屏应放到相当远处。

6. 如果激光器输出的单色光照射在一根头发丝上，将会产生怎样的衍射花样？可用本实验的哪种方法测量头发丝的直径？

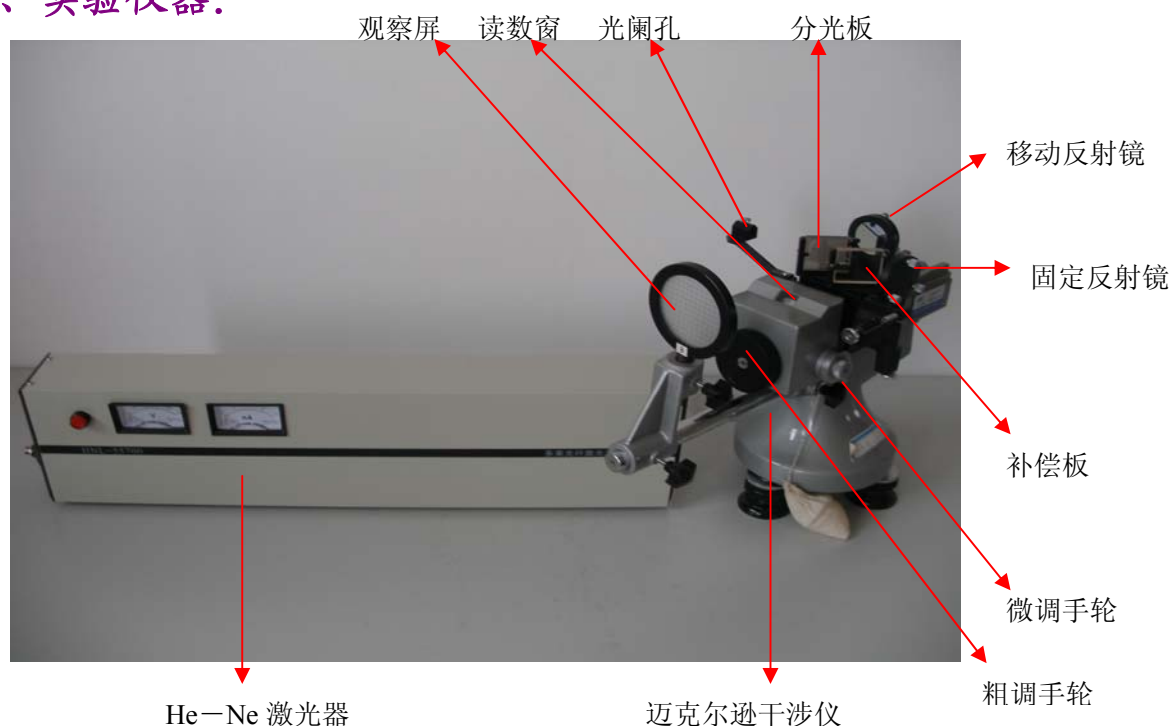
提示：根据巴比涅原理，一个细丝的衍射场与一个宽度相等的单缝衍射光场是互补的，即它们光场的位相差 180° ，从而光强分布相同，衍射条纹是明暗相同的，条纹宽度是一致的。因此，只要测得细丝夫琅和费衍射光强的第 k 级极小的位置，在已知光源波长和细丝到接收屏距离的条件下，即可求得细丝的直径。

迈克尔逊干涉仪的调整和使用

一、实验目的：

- (1) 了解迈克尔逊干涉仪的原理结构，学习调节和使用方法。
- (2) 观察等倾,等厚干涉现象。
- (3) 测量 He-Ne 激光波长。

二、实验仪器：



三、实验原理：

图 1 是迈克尔逊干涉仪的光路原理图。光源上一点发出的光线射到半透明层 K 上被分为两部分光线“1”和“2”。光线“2”射到 M_2 上被反射回来后，透过 G_1 到达 E 处；光线“1”透过 G_2 射到 M_1 ，被 M_1 反射回来后再透过 G_2 射到 K 上，反射到达 E 处。这两条光线是由一条光线分出来的，故它们是相干光。光线“1”也可看作是从 M_1 在半透明层中的虚像 M_1' 反射来的。在研究干涉时， M_1' 与 M_1 是等效的。调整迈克尔逊干涉仪，使之产生的干涉现象可以等效为 M_1' 与 M_2 之间的空气薄膜产生的薄膜干涉。

用凸透镜会聚的激光束是一个很好的点光源，它向空间发射球面波，从 M_1 和 M_2 反射后可看成由两个光源 S_1' 和 S_2 发出的（见图 2）， S_1' (或 S_2) 至屏的距离分别为点光源 S 从 G_1 和 M_1 (或 M_2 和 G_1) 反射至屏的光程， S_1' 和 S_2 的距离为 M_1' 和 M_2 之间距离 d 的二倍，

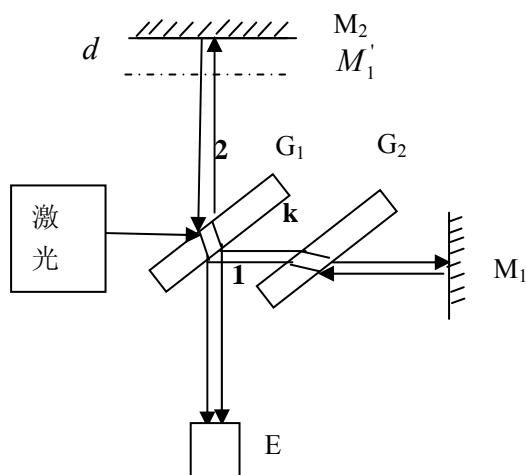


图1 迈克尔逊干涉仪

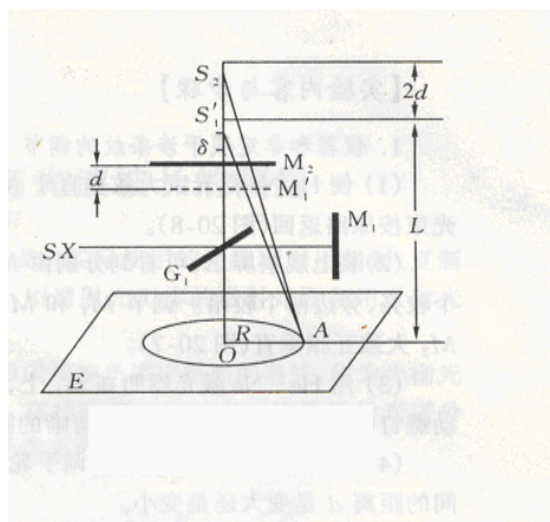


图2 非定域干涉

即 $2d$ 。虚光源 S_1' 和 S_2 发出的球面波在它们相遇的空间处处相干，这种干涉是非定域干涉。如果把屏垂直于 S_1' 和 S_2 的连线放置，则我们可以看到一组同心圆，圆心就是 S_1' 和 S_2 连线与屏的交点。如图 2，由 $S_1' S_2$ 到屏上的任一点 A，两光线的程差 L 可得：

$$L = 2d \cos \delta \quad (1)$$

由式 (1) 可知：

(1) 当 $\delta = 0$ 时程差最大，即圆心 E 点所对应的干涉级别最高。

当移动 $M_1 M_2$ 的距离 d 增大时，圆心干涉级数越来越高，我们就可以看到圆条纹一个一个从中心“冒”出来，反之当 d 减小时，圆条纹一个一个地向中心“缩”进去。每当“冒出”或“缩”进一条条纹时， d 就增加或减小 $\lambda/2$ ，所以测出“冒出”或“缩进”的条纹数目 ΔN ，由已知波长 λ 就可求得 M_1 移动的距离，这就是利用干涉测长法；反之，若已知 M_1 移动的距离，则就可求得波长，它们的关系为：

$$\Delta d = \Delta N \lambda / 2 \quad (2)$$

$$\text{即 } \lambda = 2\Delta d / \Delta N \quad (3)$$

(2) d 增大时，程差 L 每改变一个波长 λ 所需的 δ 的变化值减小，即两亮环（或两暗环）之间的间隔变小。看上去条纹变细变密。反之 d 减小，条纹变粗变稀。

四、实验步骤：

1. 仪器的调节

(1) 使 He-Ne 激光束大致垂直于 M_1 ，即调节 He-Ne 激光器高低左右位置，使反射回来的光束按原路返回。

(2) 装上观察屏 E，可看到分别由 M_1 和 M_2 反射至屏的两排光点，每排四个光点，中间两个比较亮，旁边两个比较暗。调节 M_1 和 M_2 背面的三个螺钉，使两排光点一一重合，这时 M_1 与 M_2 大致互相垂直。

(3) 用 He-Ne 激光器照在 G_1 上，此时一般在屏上会出现干涉条纹，再调节细调拉簧微动螺钉，使能看到位置适中、清晰的圆环状非定域干涉条纹。观察条纹变化。转动粗调手轮，可看到条纹的“冒出”或“缩进”。判别 M_1 与 M_2 之间的距离 d 是变大还是变小。

2. 测量 He-Ne 激光波长

仔细转动微调鼓轮，使条纹的变化处于“缩进”，当圆形条纹中间的一条缩为一暗点时，记录读数 d ；再向同一方向转动微调鼓轮，同时读取条纹变化的数目，每次数到 50 记录一次读数，共测量 10 组数据。每次测量时，也都使中间的一条暗纹刚好缩为一暗点时，再记录读数。应用逐差法加以处理，求出每冒出 Δk 条条纹时所对应的 Δd 的值，代入式(3)计算 λ ，写出结果表达式。

五、数据记录:

$$\lambda = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\Delta k} = 50\text{nm}$$

i	圈数 N	位置 d_i	$\Delta d_i = d_{i+5} - d_i $
1	0		
2	50		
3	100		
4	150		
5	200		
6	250		$\overline{\Delta d} =$
7	300		
8	350		
9	400		
10	450		

六、数据处理:

(1) 求 $\overline{\lambda}$ 。

$$\bar{\lambda} = 2\bar{\Delta d} / \Delta N$$

(2) 求 $\Delta\lambda$ 。

$$S_{\Delta d} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\bar{\Delta d} - \Delta d_i)^2}{5-1}}$$

$$\Delta_{(\Delta d)} = \sqrt{S_{(\Delta d)}^2 + \Delta_{\text{仪}}^2}$$

$$\Delta_{\lambda} = \sqrt{\Delta_{(\Delta d)}^2 + \Delta_{(\Delta N)}^2}$$

$$E_{\lambda} = \frac{\Delta_{\lambda}}{\bar{\lambda}} \times 100\%$$

结果表达式: $\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda$

七、注意事项:

1. 转动微动鼓轮时, 手轮随着转动, 但转动手轮时, 鼓轮并不随着转动。因此在读数前应先调整零点, 方法如下: 将鼓轮 15 沿某一方向(例如顺时针方向)旋转至零, 然后以同方向转动手轮 13 使之对齐某一刻度。这以后, 在测量时只能仍以同方向转动鼓轮使 C 镜移动, 这样才能使手轮与鼓轮二者读数相互配合。

2. 为了使测量结果正确, 必须避免引入空程, 也就是说, 在调整好零点以后, 应将鼓轮按原方向转几圈, 直到干涉条纹开始移动以后, 才可开始读数测量。为了消除螺距差(空程差), 调节中, 粗调手轮和微调鼓轮要向同一方向转动; 测量读数时, 微调鼓轮也要向一个方向转动, 中途不得倒退。这里所谓“同一方向”, 是指始终顺时针, 或始终逆时针旋转。

3. 迈克耳逊干涉仪是精密的光学仪器, 必须小心爱护。 G_1 , G_2 , M_1 , M_2 的表面不能用手触摸, 不能任意擦揩, 表面不清洁时应请指导老师处理。实验操作前, 对各个螺丝的作用及调节方法, 一定要弄清楚, 然后才能动手操作。调节时动作一定要轻缓。

4. 测量调节中, 有时会出现“空转”现象, 即转动微调鼓轮而干涉图像不变的情况, 这是由于微调鼓轮和粗调手轮没有同步, 没有带动反射镜 M_2 (动镜) 移动所致。此时, 将粗调手轮转动一下, 再向同一方向转动微调鼓轮即可。

5. 做本实验时, 要特别注意保持安静, 不得大声喧哗, 不得随意离开座位来回走动, 以免引起振动影响本人及其他同学实验。

八、思考题:

1) 迈克尔逊干涉仪中的 G_1 和 G_2 各起什么作用?

提示： G_1 分光，产生两束频率相同、振动方向相同、初相位相同的相干光； G_2 起补偿作用，补偿第一束光线因在 G_1 板中往返两次所多走的光程，使干涉仪对不同波长的光可同时满足等光程的要求。

2) 在迈克尔逊干涉仪的一臂中，垂直插入折射率为 1.45 的透明薄膜，此时视场中观察到 15 个条纹移动，若所用照明光波长为 500nm，求该薄膜的厚度。

提示：垂直插入折射率 $n=1.45$ 的透明薄膜后，光程差改变： $\Delta\delta = 2(n - n_0)d$ ，这个改变与移动的条纹以及波长关系： $\delta = k\lambda$ ， $\Delta\delta = \Delta k \cdot \lambda$ ，所以： $d = \frac{\Delta k \cdot \lambda}{2(n - n_0)}$ 。

3) 为什么 M_1 和 M_2 没有严格垂直时，眼睛移动干涉条纹会“冒出”或“缩入”？

提示：若 M_1 和 M_2 严格垂直，眼睛上下左右移动时， M_1' 和 M_2 之间的距离 d 不变，即其光程差固定不变，图形稳定，不会看到“冒出”或“缩入”现象。若 M_1 和 M_2 没有严格垂直，则 M_1' 和 M_2 之间每一处的距离 d 是不相同的，自然眼睛移动的时候，就会因为 d 的相对变化引起光程差的改变，故而会看到干涉条纹“冒出”或“缩入”。

光电效应和普朗克常数的测定

一、实验内容:

- 1.通过实验加深对光的量子性了解;
- 2.通过光电效应实验,测定普朗克常数;
- 3.测量光电管的伏安特性曲线。

二、实验仪器:

汞灯、干涉滤光片(365nm, 405nm, 436nm, 546nm, 577nm)、光电管、光电效应测试仪,示波器



三、实验原理:

1.光电效应

图 1 所示的是研究光电效应的一种简单的实验装置。在光电管的阴极 K 和阳极 A 之间加上直流电压 U, 当用单色光照射阴极 K 时, 阴极上就会有光电子逸出, 即为光电效应。

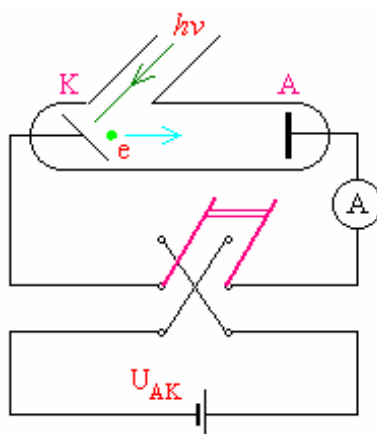


图 1 光电效应实验装置

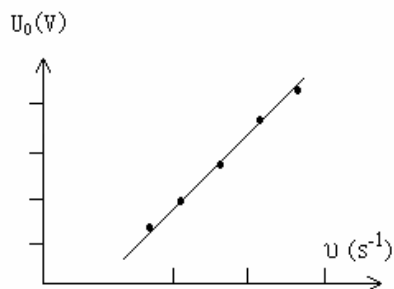


图 2 截止电压与入射光频率的关系图

爱因斯坦方程：

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + W \quad (1)$$

其中 m 和 v_m 是光电子的质量和最大速度， W 为金属的逸出功， $\frac{1}{2}mv_m^2$ 是光电子逸出表面后所具有的最大动能。

截至电压与最大动能的关系：

$$eU_0 = \frac{1}{2}mv_m^2 \quad (2)$$

光电子的最大出动能与入射光光强无关。

当入射光频率 ν 逐渐增大时，截至电压 U_0 将随之线性增加。由 (1) 式和 (2) 式可知

$$U_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e} \quad (3)$$

对于每一种金属，只有当入射光频率 ν 大于一定的红限频率 ν_0 时，才会产生光电效应。

光电效应是瞬时发生的。实验发现，只要入射光频率 $\nu > \nu_0$ ，无论光多么弱，从光照射阴极到光电子逸出这段时间不超过 10^{-9}s 。

2. 普朗克常数测定

根据 (3) 式可知，测量不同频率的光截止电压，寻求频率 ν 与截止电压 U_0 的线性关系 h/e ，见图 2，从而求得普朗克常数 h 。

四、实验步骤：

1. 测量准备

- (1) 将测试仪及汞灯电源打开，预热 20 分钟。——汞灯及光电管的暗箱用遮光罩罩住
- (2) 调整光电管与汞灯的距离，约为 40 厘米。并保持不变。
- (3) 用专用电缆将光电管暗箱电压输入端与测试仪电压输出端连接起来。
- (4) 将“电流量程”选择开关置于所选档位（截止电压测试为 10^{-13} ，伏安特性测试为 10^{-10} ）。
- (5) 调零：将光电管暗箱电流输出端 k 与测试仪微电流输入端断开，调节电压，使电

流表指示为 000.0。

(6) 确认调零。按“调零确认/系统清零”按钮。

(7) 选取“截至电压”测量，“手动”模式。

2. 测量截至电压

- (1) 撤去光电管入口遮光罩，将 2mm 的光阑放入光电管入口处；
- (2) 撤去汞灯灯罩；
- (3) 将波长为 365nm 的滤波片套在光电管入口处，此时仪表所显示的就是对应波长的光电管电压与电流值；
- (4) 轻点“电压调整”周围的“<”和“>”以及“ ”和“ ”来改变电压，观察电流的变化，当电流指示约为“000.0”，此时的电压表指示就是该波长光所对应的截止电压。
- (5) 将 365nm 滤光片依次换成 405nm、436nm、546nm、577nm 的滤光片，重复 3~4 步骤。分别记录各自的截止电压。

3. 光电管伏安特性测试

- (1) 按“系统清零/调零确认”按钮，重复 1 中步骤 (4) ~ (6)；
- (2) 选取“伏安特性”测量，“手动”模式（或“自动”模式）。
- (3) 将某一波长的滤光片套在光电管入口处，改变电压，从 -1v 开始增加，最高电压为 50v，分别记录各电压下所对应的光电流。
- (4) 将电压为横坐标，光电流为纵坐标，在图中描绘出曲线，即为该波长伏安特性曲线。

注意：在“自动”模式下，系统默认电压范围为“-1.0V~35V”。

五、数据记录 and 数据处理：

1. 测量截至电压记录表格：

波长 (nm)		365	405	436	546	577
频率 ($\times 10^{14}\text{hz}$)		8.214	7.408	6.879	5.490	5.196
截止电压 (v)	手动					
	自动					

2. 光电管伏安特性测试记录表格：选择 $\lambda = 365\text{nm}$

电压 (V)	-1.0	-0.5	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0
电 流 ($\times 10^{-10}\text{A}$)											

数据处理要求：1) 根据表 1 的数据在坐标纸上作 $U_0 \sim \nu$ 直线，得出直线的斜率后求普朗克常数 h ，与公认值 h_0 比较求相对误差。同时求红限频率。

2) 根据表 2 的数据在坐标纸上作 $U_{AK} \sim I$ 关系曲线。

六、注意事项：

1.在“自动”模式下，其自动电压扫描范围分别为

波长 (nm)	365	405	436	546	577
频 率 ($\times 10^{14}\text{Hz}$)	8.214	7.408	6.879	5.490	5.196
电压范围 (v)	-1.90~-1.50	-1.60~-1.20	-1.35~-0.95	-0.80~-0.40	-0.65~-0.25

2.滤光片切勿用手去摸。

七、思考题：

1) 何谓光电效应？如果一种物质逸出功为 2.0eV ，那么它做成光电管阴极时能探测的波长红限是多少？

提示：当一定频率的光照射金属表面时有电子可以从金属中逸出现象。 $h\nu = \frac{hc}{\lambda} = W$

2) 金属的截止频率（红限）是什么？

提示：产生光电效应的光子最低频率称为截止频率。当光的频率小于截止频率时，不管光强如何，都没有光电子产生。

3) 光电子的能量随光强变化吗？

提示：光电子的能量与光强无关，只与光频率有关，由爱因斯坦光电方程决定。当光的频率小于截止频率时，不管光强如何，都没有光电子产生。

4) 光电流的大小随光强变化吗？

提示：光电流与光强有关，光强越大，产生的光电子越多，光电流越大。

6) 何谓截止电压？

提示：当光电流等于零时光电管所加的反向电压。

7) 光电管的反向电流是如何产生的？

提示：光电管阳极被污染，沾上了少许阴极材料，入射光照射阳极或者入射光从阴极反射到阳极之后都会造成阳极光电子发射，形成反向电流。

8) 光电管的暗电流是如何产生的？

提示：热激发射的电子形成的电流。

9) 光电管的本底电流是如何产生的？

提示：杂散光照射光电管产生的光电流。

夫兰克—赫兹 (F—H) 实验

一、实验内容:

测定氩元素的第一激发电位，证明原子能级是量子化的。

二、实验仪器:

夫兰克—赫兹实验仪器



三、实验原理:

设 E_2 和 E_1 分别为原子的第一激发态和基态能量。初动能为零的电子在电位差 U_0 的电场作用下获得能量 eU_0 ，如果

$$eU_0 = \frac{1}{2} m_e v^2 = E_2 - E_1$$

那么当电子与原子发生碰撞时，原子将从电子攫取能量而从基态跃迁到第一激发态。相应的电位差就称为**原子的第一激发电位**。

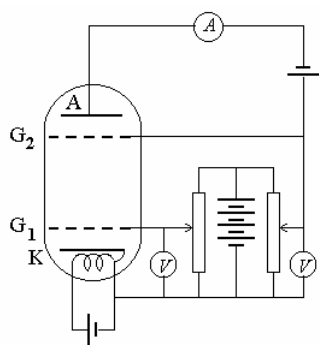


图 1 夫兰克-赫兹实验装置

夫兰克-赫兹实验仪器如图 1 所示。在玻璃器中充入要测量气体（本实验充氩气）。电子由热阴极 K 发出。在 K 与栅极 G_2 之间加电场使电子加速。在 G_2 与接收极 A 之间有一反电压。当电子通过 KG_2 空间，进入 G_2A 空间时，如果仍有较大能量，就能冲过反电场而达到电极 A，成为通过电流计的电流。如果电子在 KG 空间与原子碰撞，把自己一部分的能量给

了原子，使后者被激发。电子剩余的能量就可能很小，以致过栅极 G_2 后已不足以克服反电势，那就达不到 A，因而也不流过电流计。如果发生这样情况的电子很多，电流计中的电流就要显著地降低。为了消除空间电荷对阴极电子发射的影响，在阴极附近再增加一栅极 G_1 ，构成四极管。

把 KG_2 间的电压逐渐增加，观察电流计的电流。这样就得到 A 极电流 I_p 随 KG 间电压的变化情况，如图 2 所示。

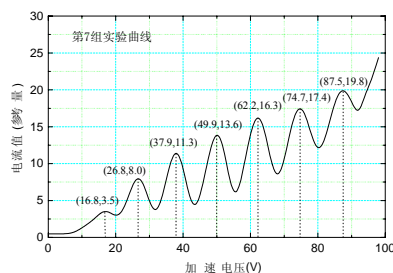


图 2 $I_p \sim U_{G2K}$ 曲线

电子在加速运动过程中，必然要与氩原子发生碰撞。如果碰撞前电子的能量小于原子的第一激发电位 U_0 （对氩原子 $U_0=11.8$ 伏），那么他们之间的碰撞是弹性的。（这类碰撞过程中电子能量损失是很小的，约 10^{-5} 倍）。然而如果电子的能量 U 达到 U_0 （实验中 $U>U_0$ ），那么电子与原子之间将发生非弹性碰撞。在碰撞过程中，电子的能量传递给氩原子。假设这种碰撞发生在栅极附近，那些因碰撞而损失了能量的电子在穿过栅极之后将无力克服减速电压 U_{G2A} 而到不了 A 极板，因此这时板流 I_p 是很小的。

随着 U_{G2K} 的增加，电子与原子的非弹性碰撞区域将向阴极方向移动。经碰撞而损失能量的电子在奔向栅极的剩余路程上又得到加速，以致在穿过栅极之后有足够的能量来克服减速电压 U_{G2A} 而达到板极 A。此时，板流 I_p 又将随 U_{G2K} 增加而升高。若 U_{G2K} 的增加使电子在到达栅极前其能量又达到 U_0 ，则电子与氩原子将再次发生非弹性碰撞，即 I_p 又一次下降。在 U_{G2K} 较高的情况下，电子在向栅极飞奔的路程上，将与氩原子多次发生非弹性碰撞。每当 $U_{G2K}=nU_0$ （ $n=1, 2, \dots$ ），就发生这种碰撞。（在实验中，可看出，由于仪器的接触电势的存在，每次 I_p 达到极小值时，所对应的 U_{G2K} 并不是落在外加电压 nU_0 处。）即在 $I_p \sim U_{G2K}$ 曲线上出现 I_p 的多次下降。对于氩， I_p 的每两个相邻峰值的 U_{G2K} 差值（即为第一激发电位）均约为 11.8 伏，即氩的第一激发电位为 11.8 伏。

四、实验步骤：

1. 插上电源，拨动电源开关，指示灯亮。
2. 将“手动—自动”切换开关选择“手动”档，“灯丝电压”、“ U_{G1K} ”、“ U_{G2A} ”按仪器提供参数进行设置。
3. “微电流倍程”开关置于 $1 \mu A$ 档。
4. 预热 10 分钟。

5.按“启动”开始测量。

按下“ U_{G_2K} ”键，再按调整按键区的增加按键逐步增加 U_{G_2K} ，用示波器观察 $I_p-U_{G_2K}$ 曲线并且记录 U_{G_2K} 和对应的 I_p 的起伏变化。

U_{G_2K} 从0.0V开始增加，步长0.5V，一直加到80V左右，出现6个峰为止。

五、数据记录 and 数据处理:

$U_f =$

$U_{G1K} =$

$U_{G2A} =$

次数	1	2	3	4	5	6
U_{G2K}							
I_p							

数据处理要求: 1) 在坐标纸上作 $I_p-U_{G_2K}$ 曲线

2) 记录峰值对应的 U_{G_2K} 值 U_i ，填入下表格:

峰 i	1	2	3	4	5	6
U_i						
$\Delta U_i = U_{i+3} - U_i$						

根据式子 $U_{Ar} = \frac{\sum \Delta U_i}{3} \cdot \frac{1}{3}$ 计算氩 (A_r) 原子的第一激发电位 U_{Ar} ，并与其公认值 11.8V 进行比较。

六、注意事项:

1、实验中(“手动”模式)电压加到75.0V以后，要注意电流输出指示，当电流表指示突然骤增，应缓慢增加电压，并且注意观察示波器的波形显示，等到第6个峰一旦出现下滑立即停止增加电压，以免管子击穿损坏。

2、可在不同的灯丝电压下重复实验。如发现波形上端切顶，则阳极输出电流过大，引起放大器失真，应减小灯丝电压。灯丝电压太大太小都不好，太小了参加碰撞的电子数少，反映不出非弹性碰撞的能量传递，造成 $I_p-U_{G_2K}$ 曲线峰谷很弱，甚至得不到峰谷；反之则易使微电流放大器饱和，引起 $I_p-U_{G_2K}$ 曲线的阻塞。

3、如果 $I_p-U_{G_2K}$ 曲线峰谷差值小，可以适当调节 U_{G_2A} (拒斥电压)，因为 U_{G_2A} 偏大或偏小，峰谷差都小。 U_{G_2A} 偏小时，起不到对非弹性碰撞后失去能量的电子进行筛选作用，

峰谷差小； U_{G2A} 偏大时，许多电子又因能量小而不能到达极板形成板流 I_p ，所以峰谷差仍然小。

七、思考题：

1) 灯丝电压的 U_f 大小对 I_p-U_{G2K} 曲线有何影响？

提示：参看 **注意事项 2**

2) 拒斥电压 U_{G2A} 对 I_p 如何影响？

提示：参看 **注意事项 3**

3) 为什么 I_p-U_{G2K} 呈周期性的变化？

提示：在 U_{G2K} 较高的情况下，电子在向栅极飞奔的路程上，将与氩原子多次发生非弹性碰撞。每当 $U_{G2K}=nU_0$ ($n=1, 2, \dots$)，就发生这种碰撞。

4) 为什么 I_p-U_{G2K} 曲线峰值越来越高？

提示：这是因为电子与氩原子碰撞有一定概率。一部分电子与氩原子发生非弹性碰撞损失能量后，不能克服反向拒斥电压到达极板而造成板流下降，而另一部分电子则因“逃避”了碰撞，能够到达极板而形成板流，又因电子能量越大，碰撞概率越小，能够到达极板而形成板流的概率也越大，因此，“谷”的极小值随着加速压 (U_{G2K}) 增大而增大。

核磁共振实验

一、实验目的

1. 了解核磁共振的基本原理
2. 学习利用核磁共振校准磁场和测量 g 因子的方法

二、实验原理

自旋角动量不为零的原子核具有与之相联系的核自旋磁矩，其大小为

$$\mu = g \frac{e}{2M} p \quad (1)$$

其中 e 为质子的电荷， M 为质子的质量， g 是一个由原子核结构决定的因子，对不同种类的原子核 g 的数值不同， g 称为原子核的 g 因子，值得注意的是 g 可能是正数，也可能是负数，因此，核磁矩的方向可能与核自旋角动量方向相同，也可能相反。

当不存在磁场时，每一个原子核的能量相同，所有原子处在同一能级，但是，当施加一个外磁场 B 后，情况发生变化，为了方便起见，通常把 B 的方向规定为 z 方向，由于外磁场 B 与磁矩的相互作用能为

$$E = -\mu \cdot B = -\mu_z B = -\gamma p_z B = -\gamma m \hbar B \quad (2)$$

因此量子 m 取值不同的核磁矩的能量也就不同，从而原来简并的同一能级分裂为 $(2I+1)$ 个子能级，由于在外磁场中各个子能级的能量与量子数间隔 $\Delta E = \gamma \hbar B$ 全是一样的。

当施加外磁场 B 以后，原子核在不同能级上的分布服从玻尔兹曼分布，显然处在下能级的粒子数要比上能级的多，其数量由 ΔE 大小、系统的温度和系统总粒子数决定。若再在与 B 垂直的方向上再施加一个高频电磁场（通常为射频场），当射频场的频率满足 $h\nu = \Delta E$ 时会引起原子核在上下能级之间跃迁，但由于一开始处在下能级的核比在上能级的核要多，因此净效果是上跃迁的比下跃迁的多，从而使系统的总能量增加，这相当于系统从射频场中吸收了能量。

我们把 $h\nu = \Delta E$ 时引起的上述跃迁称为共振跃迁，简称为共振。显然共振要求 $h\nu = \Delta E$ ，从而要求射频场频率满足共振条件：

$$h\nu = \Delta E = \mu \cdot B = 2\mu_z B = 2\gamma p_z B = \gamma \hbar B \quad (3)$$

如果用圆频率 $\omega = 2\pi\nu$ 表示，共振条件可写成：

$$\omega = \gamma B \quad (4)$$

对于温度为 25 摄氏度球形容器中水样品的质子， $\frac{\gamma}{2\pi} = 42.576375 \text{ MHz/T}$ ，本实验可采用这个数值作为很好的近似值，通过测量质子在磁场 B 中的共振频率 ν_N 可实现对磁场的校准，即

$$B = \frac{\nu_N}{\gamma/2\pi} \quad (7)$$

反之，若 B 已经校准，通过测量未知原子核的共振频率 ν 便可求出待测原子核 γ 值（通常用 $\frac{\gamma}{2\pi}$ 值表征）或 g 因子：

$$\frac{\gamma}{2\pi} = \frac{\nu}{B} \quad (8)$$

$$g = \frac{\nu/B}{\mu_N/h} \quad (9)$$

其中 $\frac{\mu_N}{h} = 7.6225914 \text{ MHz/T}$ 。

三、仪器



四、实验步骤

1. 校准永久磁铁中心的磁场 B_0

把样品为水（掺有三氯化铁）的探头下端的样品盒插入到磁铁中心，并使电路盒水平放置在磁铁上方的机座上，左右移动电路盒使它大致处于机座的中间位置，将电路盒背面的“频率测试”和“共振信号”分别与频率计和示波器连接，把示波器的扫描速度旋钮放在 5ms/格位置，纵向放大旋钮放在 0.1V/格或 0.2V/格位置，打开频率计，示波器和边限振荡器的电源开关，这时频率计应有读数，接通可调变阻器电流到中间位置，缓慢调节边限振荡器的频率旋钮，改变振荡频率（由小到大或由大到小）同时监视示波器，搜索共振信号。

由共振条件，即式（6）可知，只有 $\frac{\omega}{\gamma} = B$ 才会发生共振。总磁场为

$$B = B_0 + B' \cos \omega' t \quad (10)$$

其中 B' 是交变磁场的幅度， ω' 是市电的圆周频率，总磁场在 $(B_0 - B')$ 到 $(B_0 + B')$ 的范围内按图 4 的正弦曲线随时间变化，只有 $\frac{\omega}{\gamma}$ 落在这个范围内才能发生共振，为了容易找到共振信号，要加大 B' （即把可调变阻器的输出调到较大数值），使可能发生共振的磁场变化范围增大；另一方面要调节射频场的频率，使 $\frac{\omega}{\gamma}$ 落在这个范围，一旦 $\frac{\omega}{\gamma}$ 落在这个范围，在磁场变化的某些时刻的总磁场 $B = \frac{\omega}{\gamma}$ ，在这些时刻就能观察到共振信号，如图 4 所示；共振发生在数值为 $\frac{\omega}{\gamma}$ 的水平虚线与代表总磁场变化的正弦曲线交点对应的时刻。水的共振信号将出现尾波振荡，而且磁场越均匀尾波中的振荡次数越多。因此一旦观察到共振信号以后，应进

一步仔细调节电路盒在木座上的左右位置，使尾波中振荡的次数最多，即使探头处在磁铁中磁场最均匀的位置，并利用木座上的标尺记下此时电路盒边缘的位置。

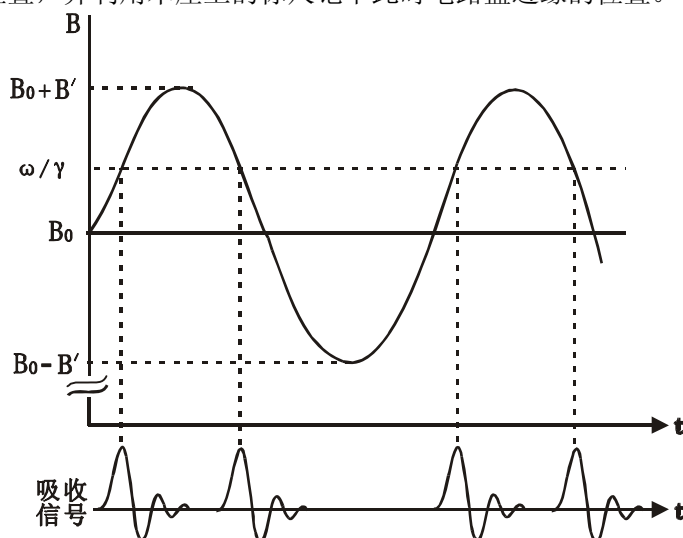


图 4

由图 4 可知，只要 $\frac{\omega}{\gamma}$ 落在 $(B_0 - B') \sim (B_0 + B')$ 范围内就能观察到共振信号，但这时 $\frac{\omega}{\gamma}$ 未必正好等于 B_0 ，从图上可以看出：当 $\frac{\omega}{\gamma} \neq B_0$ 时，各个共振信号发生的时间间隔并不相等，共振信号在示波器上的排列不均匀，只有当 $\frac{\omega}{\gamma} = B_0$ 时，它们才均匀排列，这时共振发生在交变磁场过零时刻，而且从示波器的时间标尺可测出它们的时间间隔为 10ms，当然，当 $\frac{\omega}{\gamma} = B_0 - B'$ 或 $\frac{\omega}{\gamma} = B_0 + B'$ 时，在示波器上也能观察到匀排的共振信号，但它们的时间间隔不是 10ms，而是 20ms，因此，只有当共振信号均匀排列而且间隔为 10ms 时才有 $\frac{\omega}{\gamma} = B_0$ ，这时

频率计的读数才是与 B_0 对应的质子的共振频率。

作为定量测量，我们除了要求出待测量的数值外，还关心如何减小测量误差并力图对误差的大小作出定量估计从而确定测量结果的有效数字，从图 4 可以看出，一旦观察到共振信号， B_0 的误差不会超过扫场的幅度 B' ，因此，为了减小估计误差，在找到共振信号之后应逐渐减小扫场的幅度 B' ，并相应地调节射频场的频率使共振信号保持间隔为 10ms 的均匀排列，在能观察到和分辨出共振信号的前提下，力图把 B' 减小到最小程度，记下 B' 达到最小而且共振信号保持间隔为 10ms 均匀排列时的频率 ν_N ，利用水中质子的 $\frac{\gamma}{2\pi}$ 值和公式 (7) 求出磁场中待测区域的 B_0 值。

为了定量估计 B_0 的测量误差 ΔB_0 ，首先必须测出 B' 的大小，可采用以下步骤：保持这时扫场的幅度不变，调节射频场的频率，使共振发生在 $(B_0 + B')$ 与 $(B_0 - B')$ 处，这时图 4 中与 $\frac{\omega}{\gamma}$ 对应的水平虚线将分别与正弦波的峰顶和谷底相切，即共振分别发生在正弦波的峰顶和谷底附近，这时从示波器看到的共振信号均匀排列，但时间间隔为 20ms，记下这两次的共振频率 ν'_N 和 ν''_N ，利用公式

$$B' = \frac{(\nu'_N - \nu''_N) / 2}{\gamma / 2\pi} \quad (11)$$

可求出扫场的幅度。

现象观察：适当增大 B' ，观察到尽可能多的尾波振荡，然后向左（或向右）逐渐移动电路盒在木座上的左右位置，使下端的探头从磁铁中心逐渐移动到边缘，同时观察移动过程中共振信号波形的变化并加以解释。

2. 测量 F^{19} 的 g 因子

把样品为水的探头换为样品为聚四氟乙烯的探头，并把电路盒放在相同的位置，示波器的纵向放大旋钮调节到 50mV/格或 20mV/格，用与校准磁场过程相同的方法和步骤测量聚四氟乙烯中 F^{19} 与 B_0 对应的共振频率 ν_N 。以及在峰顶及谷底附近的共振频率 ν'_F 及 ν''_F ，利用 ν_F 和公式（9）求出 F^{19} 的 g 因子，根据公式（9）， g 因子的相对误差为

$$\frac{\Delta g}{g} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \nu_F}{\nu_F}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B_0}{B_0}\right)^2} \quad (13)$$

式中 B_0 和 ΔB_0 为校准磁场得到的结果。

求出 $\Delta g/g$ 之后可利用已算出的 g 因子求出绝对误差 Δg ， Δg 也只保留一位有效数字并由它确定 g 的有效数字，最后给出 g 因子测量结果的完整表达式。

观测聚四氟乙烯中氟的共振信号时，比较它与掺有三氯化铁的水样品中质子的共振信号波形的差别。

五、数据表格

$(\gamma/2\pi)_N$ (MHz/T)	ν_N (MHz)	ν'_N (MHz)	ν''_N (MHz)
42.576375			
μ_N/h (MHz/T)	ν_F (MHz)	ν'_F (MHz)	ν''_F (MHz)
7.6225914			

六、数据处理和要求

$$\bar{B}_0 = \frac{\nu_N}{(\gamma/2\pi)_N}, \quad \Delta_{B_0} = \frac{(\nu'_N - \nu''_N)/20}{(\gamma/2\pi)_N}, \quad B_0 = \bar{B}_0 \pm \Delta_{B_0}, \quad E_{B_0} = \frac{\Delta_{B_0}}{\bar{B}_0} \times 100\%.$$

$$\bar{g} = \frac{\nu_F/\bar{B}_0}{\mu_N/h}, \quad \Delta_{\nu_F} = \frac{\nu'_F - \nu''_F}{20}, \quad E_g = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\nu_F}}{\nu_F}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{B_0}}{\bar{B}_0}\right)^2} \times 100\%,$$

$$\Delta_g = E_g \cdot \bar{g}, \quad g = \bar{g} \pm \Delta_g.$$

七、注意事项

- 1、变压器上的电压值应调在 100V 左右。
- 2、样品应放在永磁铁的中心位置。

八、思考题

- (1) 如何确定对应于磁场为 B_0 时核磁共振的共振频率 ν_0 ？

(2) 试述如何调节出共振信号？

(3) 不加扫场电压能否观察到共振信号？

非线性电路混沌

一、实验内容:

1. 了解混沌的一些基本概念;
2. 测量有源非线性电阻的伏安特性;
3. 通过研究一个简单的非线性电路, 了解混沌现象和产生混沌的原因。

二、实验仪器:

电源, 非线性混沌电路板, 数字万用表, 非线性电阻, 电容、电感和电阻箱, 双踪示波器等。



三、实验原理:

实验电路原理图如图 1 所示。电路中的 R 是非线性元件, 是一个分段线性的电阻, 整体呈现出非线性。它的伏安特性如图 2 所示。

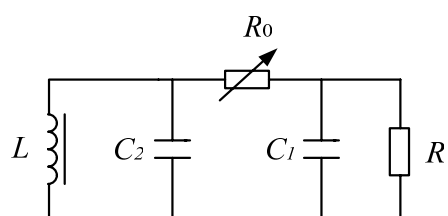


图 1 电路原理图

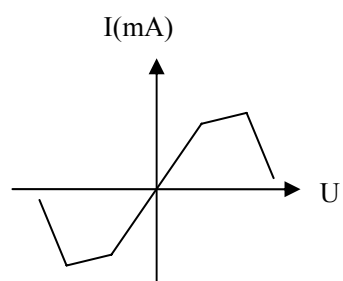


图 2 非线性元件 R 的 $U - I$ 特性

电路的非线性动力学方程为:

$$\begin{aligned} C_2 \frac{dU_{C_2}}{dt} &= G(U_{C_1} - U_{C_2}) + i_L \\ C_1 \frac{dU_{C_1}}{dt} &= G(U_{C_2} - U_{C_1}) - gU_{C_1} \\ L \frac{di_L}{dt} &= -U_{C_2} \end{aligned}$$

其中 U_{C1} 、 U_{C2} 是电容 C_1 、 C_2 上的电压， i_L 是电感 L 上的电流， $G = 1/R_0$

是电导， g 为 R 的伏安特性函数。如果 R 是线性的， g 是常数。

实验电路如图 3 所示。

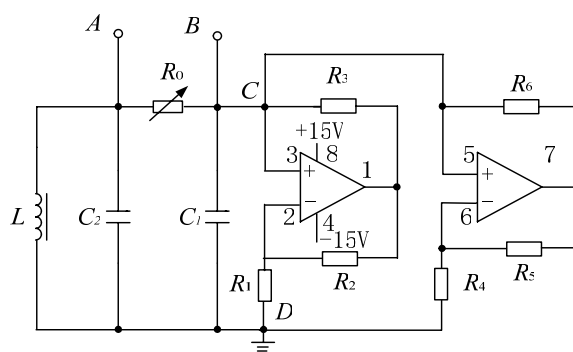


图 3 实验电路

四、实验步骤：

1. 倍周期现象的观察、记录

按图 3 连好线路。将电容 C_1 、 C_2 上的电压输入到示波器的 X (CH1)，Y (CH2) 轴，先把 R_0 调到最小，示波器屏上可观察到一条直线，调节 R_0 ，直线变成椭圆。增大示波器的倍率，反向微调 R_0 ，可见曲线作倍周期变化，曲线由一周期 (P) 增为二周期 (2P)，由二周期倍增至四周 (4P)。

记录 2P、4P 倍周期时的相图及相应的 CH1、CH2 输出波形图。

2. 单吸引子和双吸引子的观察、记录

在步骤 1 的基础上，继续调节 R_0 直至出现一系列难以计数的无首尾的环状曲线，这是一个单涡旋吸引子集。再细微调节 R_0 ，单吸引子突然变成了双吸引子，只见环状曲线在两个向外涡旋的吸引子之间不断填充与跳跃，这就是混沌研究文献中所描述的“蝴蝶”图像，也是一种奇怪吸引子，它的特点是整体上的稳定性和局域上的不稳定性同时存在。

记录单吸引子和双吸引子的相图相应的 CH1、CH2 输出波形图。

3. 周期性窗口的观察、记录

仔细调节 R_0 ，有时原先的混沌吸引子不是倍周期变化，却突然出现了一个三周期图像，再微调 R_0 ，又出现混沌吸引子，这一现象称为出现了周期性窗口。

观察并记录三周期（3P）时的相图相应的 CH1、CH2 输出波形图和 R_0 的值。

4. 测量有源非线性电阻的伏安特性

电路图如图 4。伏特表并联在非线性电阻两端，再和安培表、电阻箱串在一起构成回路。因为非线性电阻是含源的，此回路中始终有电流流过。 R_{P3} 的作用是改变非线性元件的对外输出。调节其阻值，测得一系列 U 、 I 值。

尽量多测数据点。

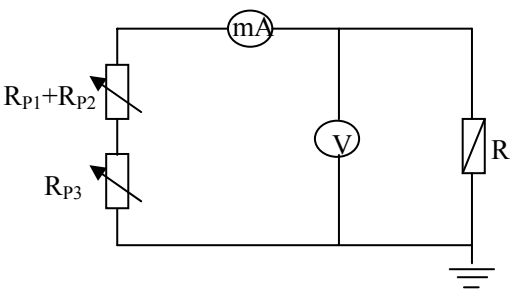


图 4 测伏安特性

五、数据记录 and 数据处理:

1. 倍周期、单吸引子、双吸引子、周期性窗口的观察、记录

	相图	CH1 波形	CH2 波形
2P			
4P			
单吸引子			
双吸引子			
3P			

2. 有源非线性

电阻的伏安特性

III	2	U	-8.000	-7.000	-6.000	-5.000	-4.000	-3.000
	1	U	-12.200	-12.000	-11.500	-11.000	-10.500	-10.000
	段	I						
	段	i						
	3	U	-2.000	-1.600	-1.200	-1.000	-0.800	-0.400

	段	I							在坐标纸上画出伏安特性曲线图。
I 象 限	4	U	2.000	1.800	1.700	1.600	1.500	1.000	
		I							
	5	U	10.000	9.000	8.000	7.000	6.000	5.000	
		I							
	6	U	12.800	12.500	12.000	11.800	11.500	11.300	
		I							

六、思考题

1. 什么是混沌现象？产生混沌现象的根本原因是什么？

提示：“混沌”表征一个动力系统的特征，是该系统所表现的随机行为的总称。它的根源在于非线性的相互作用。

2. 非线性的特点是什么？

提示：①线性是简单的比例关系，而非线性是对这种关系的偏离。

②线性关系是互不相干的独立贡献，而非线性则是相互作用。

③线性关系保持频率成分不变，而非线性使频率结构发生变化。

④非线性是引起行为突变的原因。

3. 什么是倍周期分岔？

提示：在一簇系统中，当一个参数值从某一临界值以下变到该临界值以上时，系统长期行为的一个突然变化。

4. 为什么要采用 RC 移相器，并且用相图来观测倍周期分岔等现象？

提示：RC 移相器的作用是使 A, B 两处输入示波器的信号产生位相差，而可得到 x, y 两个信号的合成图形。该相位差与 R 和 C 上的电压有关，R 和 C 上的电压又是跟随电路中参数的变化而改变的。显然，如果没有 RC 移相器，则 A, B 两处输入示波器的信号的位相差为 0，示波器上始终只能观测一条直线，而观察不到系统因参数改变而引起的各种现象发生。

倍周期分岔等现象的发生的根本原因是非线性引起的相互作用，而相图正好能够反映两信号之间相互作用的结果，其实质是两者相位差的变化。

光纤位移传感器的应用

近年来由于低损耗光导纤维的问世以及检测用特殊光纤的开发,在光纤应用领域继光纤通信技术之后又出现了一门崭新的光纤传感器工程技术。光纤传感器有功能型和传输型两大类。反射式光纤位移传感器是一种传输型光纤传感器。

【预习重点】

(1) 反射式光纤位移传感器的结构与工作原理。

(2) 反射式光纤传感器的输出特性曲线。

一、实验仪器

本实验所用部件包括:光纤位移传感器、振动台、光电变换器、低频振荡器、直流稳压电源、反射板、测微头、小电机、电压 / 频率表等、双踪示波器。

二、实验原理

1) 光导纤维与光纤传感器的一般原理

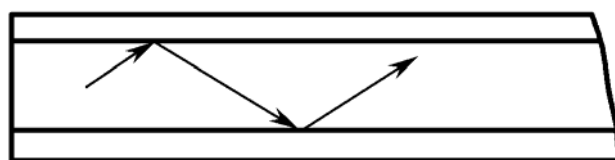


图 1 光纤的基本结构

光导纤维是利用光的完全内反射原理传输光波的一种介质。如图 1 所示,它是由高折射率的纤芯和包层所组成。包层的折射率小于纤芯的折射率,直径大致为 $0.1\text{ mm} \sim 0.2\text{ mm}$ 。当光线通过端面透入纤芯,在到达与包层的交界面时,由于光线的完全内反射,光线反射回纤芯层。这样经过不断的反射,光线就能沿着纤芯向前传播。

由于外界因素(如温度、压力、电场、磁场、振动等)对光纤的作用,引起光波特性参量(如振幅、相位、偏振态等)发生变化。因此人们只要测出这些参量随外界因素的变化关

系，就可以通过光特性参量的变化来检测外界因素的变化，这就是光纤传感器的基本工作原理。

2) 反射式位移传感器的结构原理

反射式光纤位移传感器是一种传输型光纤传感器。其原理如图 2 所示：光纤采用 Y 型结构，两束光纤一端合并在一起组成光纤探头，另一端分为两支，分别作为光源光纤和接收光纤。光从光源耦合到光源光纤，通过光纤传输，射向反射片，再被反射到接收光纤，最后由光电转换器接收，转换器接受到的光源与反射体表面性质、反射体到光纤探头距离有关。当反射表面位置确定后，接收到的反射光光强随光纤探头到反射体的距离的变化而变化。显然，当光纤探头紧贴反射片时，接收器接收到的光强为零。随着光纤探头离反射面距离的增加，接收到的光强逐渐增加，到达最大值后又随两者的距离增加而减小。图 3 所示就是反射式光纤位移传感器的输出特性曲线，利用这条特性曲线可以通过对光强的检测得到位移量。反射式光纤位移传感器是一种非接触式测量，具有探头小，响应速度快，测量线性化（在小位移范围内）等优点，可在小位移范围内进行高速位移检测。

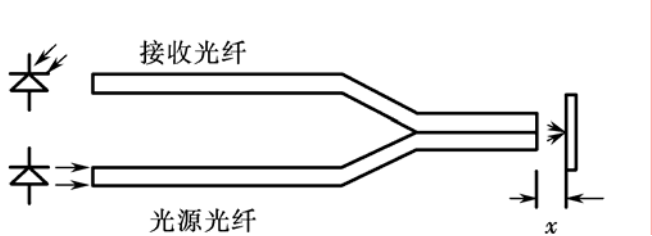


图 2 反射式位移传感器原理

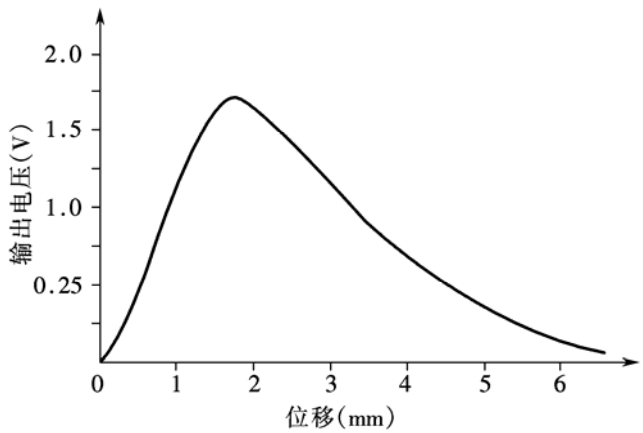


图 3 反射式光纤位移传感器的输出特性

三、实验步骤

(1) 连接、调节装置。在仪器支架上安装光纤探头，探头对准反射板，调节光纤探头端面与反射板平行，距离适中；将光纤传感器光电转换装置与光电变换器相连接，接通电源预热数分钟。

(2) 作反射式光纤传感器输出特性曲线。转动测微头，使光纤探头端面离开反射板，调节差动放大器的调零，光纤变换器输出电压为零。然后旋动测微器，使反射板离开探头，每隔 0.25 mm 读出一输出电压 U 值，填入数据表，作 $U \sim z$ 曲线，求得线性范围的灵敏度 $\Delta U / \Delta z$ 。

(3) 测量微小振动的振幅与频率。移开测微头，使光纤探头与反射板保持适当距离（取线性区中间位置）。接通低频振荡器，使振动台保持适当振幅（不要碰到光纤探头），将输出信号接入示波器，测出振动台振动的振幅与频率。

(4) 测量电机转速。将光纤探头转一角度置于电机上方，调节探头位置，使探头端面距转盘 1 mm 左右，离转盘边缘 3 mm。光电变换器 F_0 端分别接电压 / 频率表 2 kHz 挡和示波器 DC 挡。开启电源开关，调节电机转速，观察波形，测出信号频率。

四、实验数据记录

1. 光纤传感器输出特性曲线测量记录

Xmm	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
V											
Xmm	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	
V											

位移距离如再加大，就可观察到光纤传感器输出特性曲线的前坡与后坡波形，作出 $V-X$ 曲线，通常测量用的是线性较好的前坡范围。

2. 电机转速测量

记录示波器波形，求其频率

电机转速为频率值 $\div 2$

五、注意事项

1. 电机叶片转动时 V_O 输出电压峰值之差是比较小的，而且要特别注意背景光的影响。
2. 光纤探头在电机叶片上方安装后须用手转动叶片确认无碰擦后方可开启电机，否则极易擦伤光纤端面。
3. 光纤请勿成锐角曲折，以免造成内部断裂，端面尤要注意保护，否则会光通量衰耗加大造成灵敏度下降。
4. 双支光纤三端面均经过精密光学抛光,其端面的光洁度直接会影响光源损耗的大小,需仔细保护。禁止使用硬物、尖锐物体碰触，遇脏可用镜头纸擦拭。如非必要，最好不要自行拆卸，观察光纤结构一定要在实验老师的指导下进行。

六、思考题

1. 如何利用光纤传感器位移测试的原理，设计一个光纤传感器压力测试单元？

提示：压力致使物体产生形变。

2. 能否根据光纤传感器位移测试的原理做一个光纤测温实验装置？

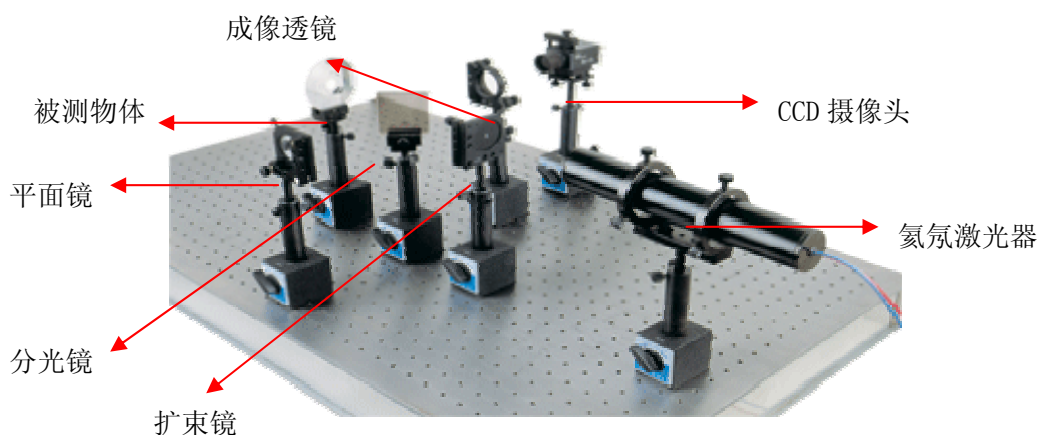
提示：将器件在温度场中感受到的温度变化量转化为光纤探头反射面间距变化。

电子散斑

一、实验内容:

1. 了解电子散斑干涉原理;
2. 掌握干涉光路及图像处理软件;
3. 学会使用本系统来测量三维离面位移。

二、实验仪器:



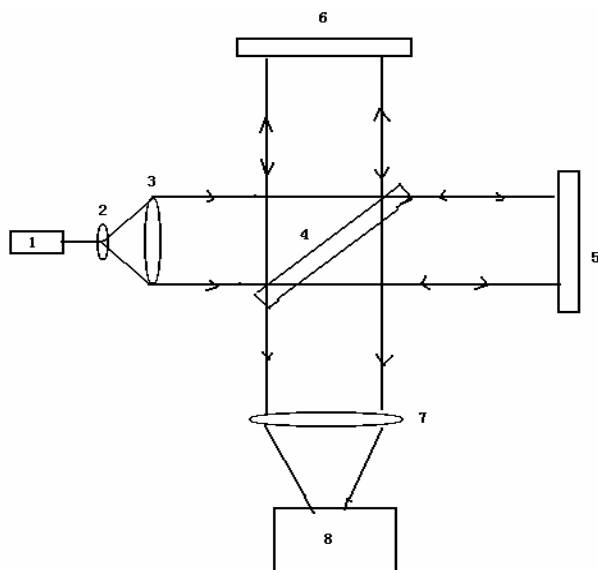
图一 XGS-1 电子散斑干涉 (ESPI) 实验系统

三、实验原理：

电子散斑干涉法是用激光光束直接照射到测试表面，再用电子摄像机采集其变形前后表面散斑颗粒干涉形成的条纹，以测定其离面位移的一种新型、先进的测试技术，其光路如下图所示，图二为测量离面位移（即前后沿 Z 轴方向的位移 W ）的光路，由激光器 1 发出的激光束，经扩束镜 2 及准直镜 3 形成光斑放大的准直光，再经分光镜 4 分成两束，一束照射到反射镜 5 再返回，另一束照射到被测物 6 的表面再返回，两束返回的光束干涉形成干涉条纹，也就是一系列等位移线 N ，则离面位移为

$$W = \lambda N / 2$$

式中 λ 为测试光的波长， N 为条纹的级数。



图二 光路图

四、实验步骤:

- 1、把平台摆放好，并调平。
- 2、各个实验仪器的位置参看图一，先把各个仪器的中心高度调至共轴。
- 3、使激光器发出的光束平行于工作平台的工作面。分别放入扩束镜和准直镜，调节准直镜，使通过它的被扩束的激光变成平行光，平行光束应通过放入光路中（分光镜、被测物品、反光镜等）的部件的中心且平行于平台。扩束镜前放入偏振片以调节亮度，以防损坏 CCD 摄像机。
- 4、放入被测物品和 CCD 摄像机，调节分光镜上二维调整台的微调旋钮，使被物品反射的光的中心照射到 CCD 摄像机接收表面上。
- 5、而后放入平面反射镜，要使平面反射镜到分光镜的距离和被测物品到分光镜的距离相同，且调节其被反射的光束的中心也入射到 CCD 摄像机接收表面上，这时便可以在采集图像的软件上看到干涉条纹。最后在放入聚焦透镜，调节透镜与 CCD 的距离，使屏幕上得到最清晰、最完整的像。调节反光镜上的二维调整架的微调旋钮，使得到的图像的干涉条纹最清晰且为中心位置。
- 6、这时就可以给物品加压，调节物品架上的旋钮给物品加压，随着旋钮的调节，电脑的屏幕上出现的干涉条纹越来越多，且为同心圆环。给物品加上适当压力，并拍摄下其变形后的干涉条纹。
- 7、利用利用电子散斑干涉的处理软件对其图像处理。

五、数据记录和数据处理:

利用电子散斑干涉的处理软件对处理后的图片进行三维点阵重构，并绘出 W-X，W-Y，W-X-Y 图。

六、注意事项:

1. 眼睛不可正面直视激光束，以免造成伤害。
2. 请勿用手触摸光学元件的表面。
3. 在运行控制程序前，请关闭其它应用程序。
4. 在采集图象的过程中，同一组名的图象会不予提示地覆盖以前的图象，所以在采集新图时，建议更改组图名称；
5. 防止触电。

七、思考题:

如果本实验采用平行光照明，从理论上测试精度将有何变化，光路应做何调整？

晶体电光效应

一、实验目的

- 1、测量 LN 晶体的半波电压；
- 2、观察电光调制器的工作性质。

二、实验原理

电场施加在晶体上，会使晶体的折射率发生变化，这种现象称之为电光效应。下图为晶体电光调制原理示意图。

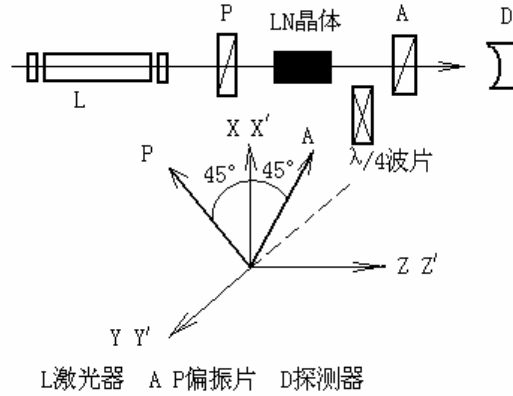


图2 横向电光调制器示意图

图中起偏器 P 偏振化方向平行于晶体的 x 轴，且与检偏器正交，波长为 λ 的光束沿 z 轴(光轴)入射，电场方向平行于 x 轴， x' 、 y' 为晶体的感应轴，与 x、y 轴成 $\pi/4$ 角。当光束通过长为 l 的晶体后，偏振光 x' 、 y' 两分量间产生位相差 φ ，

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{x'} - n_{y'}) l = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{22} V \frac{l}{d} \quad (1)$$

式中 n_o , r_{22} 和 d 分别为晶体的 O 光折射率，电光系数及厚度， V 为施加的直流电压。当 $\delta = \pi$ 时，施加的电压称为半波电压 V_π ，因此时偏振光 x' 、 y' 两分量间产生的光程差为 $\lambda/2$ 。由式 (1)

$$V_\pi = (\lambda / 2 n_o^3 \gamma_{22}) \frac{d}{l} \quad (2)$$

则位相差 φ 可表为

$$\varphi = \pi \frac{V}{V_\pi} \quad (3)$$

偏振光 x' 、 y' 两分量复振幅可分别写为

$$\begin{cases} E_{x'}(l) = A \\ E_{y'}(l) = A e^{-i\varphi} \end{cases} \quad (4)$$

通过检偏器的出射光，是此两分量在 y 轴上投影之和

$$(E_y)_o = (A/\sqrt{2})(e^{-i\varphi} - 1) \quad (5)$$

相应的输出光强 I 可写成

$$I_o \propto (E_y)_o^* (E_y)_o = \left(\frac{A^2}{2}\right) [(e^{-i\varphi} - 1)(e^{i\varphi} - 1)] = 2A^2 \sin^2 \varphi / 2 \quad (6)$$

光强透过率

$$\frac{I_o}{I_i} = \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \sin^2\left(\frac{\pi V}{2V_\pi}\right)。$$

由上式知透过率与电压的关系是非线性的。为了进行线性调制，在调制光路中加入一个 $\frac{\lambda}{4}$ 波片，使其光轴与 OP 成 45° ，则

$$\frac{I_o}{I_i} = \sin^2\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi V}{V_\pi}\right)\right] = \frac{1}{2}\left[1 + \sin\left(\frac{\pi V}{V_\pi}\right)\right] \quad (7)$$

式中为 V_0 直流偏压， $V_m \sin \omega t$ 为交流调制信号。从上式可知，改变 V_0 或 V_m ，输出特性将随之变化。当 $V_0 = V_\pi/2$ ，且 $V_m \ll V_\pi$ 时，式 (7) 可近似为

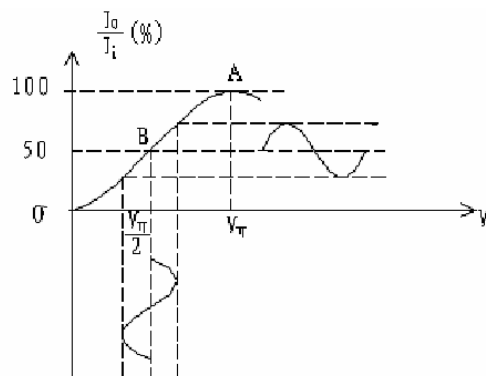


图3 透过率与电压的关系曲线

3. 调节 LN 晶体的感应主轴 x' 和 y' 与 P 和 A 的偏振方向成 45° 夹角。调节方法可参考如下步骤：首先在晶体上加上直流电压（约 50V），然后使 P 和 A 向同一方向转过同样的角度，直到通过 A 的光强为最小时为止，记下此时 P 和 A 度盘上的角度值。这时外加电压的变化不能改变透过 A 的光强。这样 P 和 A 的方向与 x' 和 y' 轴平行。然后当需要测量半波电压时，就使 P 和 A 向同一方向转过 45° ，这样就调节完了。

4. 将 $\lambda/4$ 波片加入光路，在 P 和 A 的方向与 X' 和 Y' 轴平行的状态下，当晶体上不加电压时，旋转 $\lambda/4$ 波片，使透过 A 的光强最小，此时波片的光轴与 P 平行或者成 90° 。记下此时波片刻度盘上的角度值。

5. 当需要将调制器的工作点放在如图 3 中的 B 点处，就将 $\lambda/4$ 波片旋转 45° 。

2、测 LN 晶体的半波电压。

(1) 在光路调好的前提下，将光电探测器接于④→光电输入端，开关指向光功率。

(2) 将 LN 接于②→输出端。

(3) 打开电源开关①，则②③④数显表亮。

(4) 调节直流电压从 0 伏到约 300V，每步间隔 10V，记录每步光功率 I_0 （显示）及 V （直流电压）数据。根据此组数据画出 LN 晶体 I_0-V 曲线图，由图确定 LN 晶体的半波电压。

2. 观察电光调制器的工作性质。

(1) 将②→输出端直流电压调为零，再将 LN 接于③→输出端。

(2) 将示波器连接于④→监测端，开关指向调解。

(3) 将 $\lambda/4$ 波片加入光路，调节交变电压，在示波器上观察被交变电压调制的光强波形，看一看在什么情况下会发生畸变，畸变波形的特点是什么？

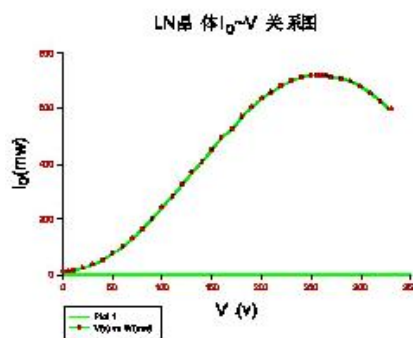
(4) 调节交变电压至一合适值，分别将工作点调到图 3 中的 B 点和 O 点处，在不同工作点上观察输出光强的波形。看看会发生什么现象？

3. 语音信号传递

(1) 将③→输出端交流电压调为零，再将 LN 接于⑤→输出端。

(2) 将示波器连接于④→监测端，同时将开关置“解调、喇叭”位置。

(3) 调制信号⑤→信号源开关置“内”位置，就可在示波器上看到语音信号的波形，同时听到语音信号。



将⑤→信号源开关置“外”位置，从⑤→外接信号端输入自备的音频信号（收音机或录音机信号）。就可在示波器上看到音频信号的波形，同时听到自备的音频信号。

五、数据表格

电压(V)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
光强 I_o										
电压(V)	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
光强 I_o										
电压(V)	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
光强 I_o										

六、数据处理方法和要求

根据数据，以 V 为横坐标、 I_o 为纵坐标作图，依次读出峰值与谷值对应的电压值 V_1, V_2, \dots ，则相邻值的差即为半波电压。用逐差法处理，求半波电压。

七、注意事项

- 1、开机、关机前及更换 LN 晶体所加电压时，均应将②和③中的电压调节旋钮逆时针旋到底，使②和③的数显表指示为零，避免触电。
- 2、连接晶体的电缆线两夹头不允许短接，避免造成仪器短路。
- 3、220V, 50Hz 电源应稳定，如果有较大的波动，需配置交流稳压器及房间内不能有强空气对流，否则会引起氦氖激光器输出功率的波动，对测量半波电压不利。

八、思考题

- 1、从加直流电压前后屏上显现的晶体出射光强的变化，可判定晶体产生电光效应，其理由何在。
- 2、电光晶体调制器应满足什么条件方能使输出波形不失真。

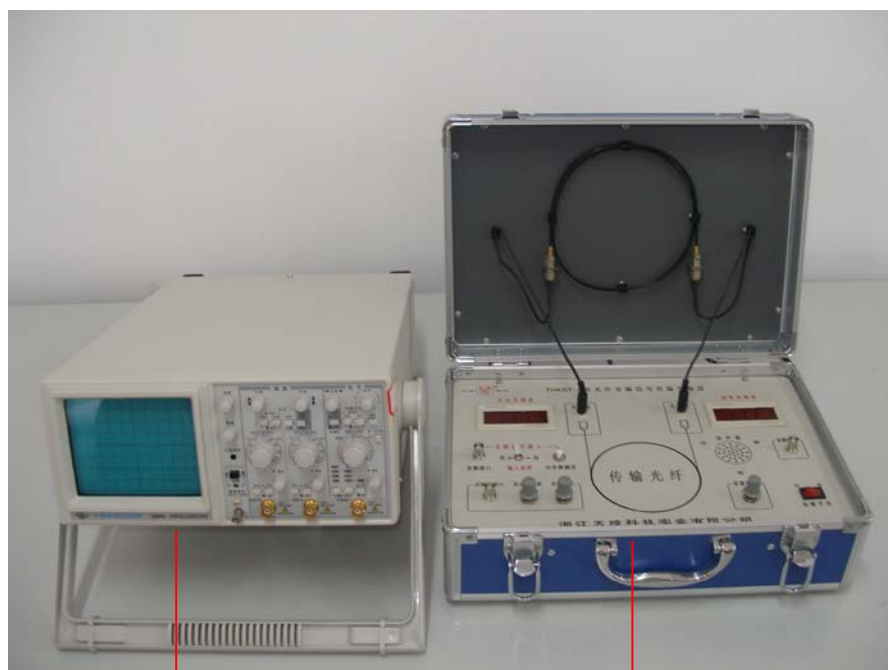
光纤信号传输实验

一、实验目的

1. 学习光纤信号传输系统的基本结构及各部件选配原则；
2. 熟悉光纤传输系统中电光/光电转换器件的基本性能；

3. 训练如何在光纤传输系统中获得较好信号传输质量。

二. 实验仪器

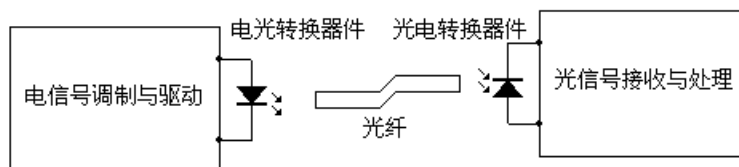


双踪示波器

光纤信号传输实验仪

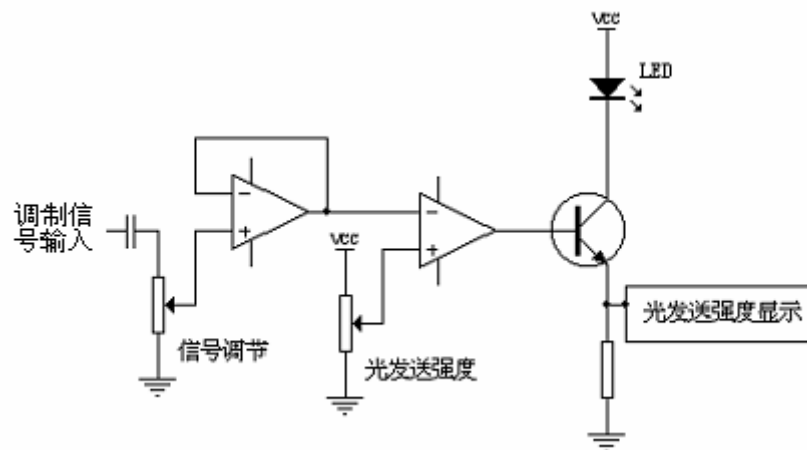
三. 实验原理

光纤传输系统如图一所示一般由三部分组成：光信号发送端；用于传送光信号的光纤；光信号接收端。光信号发送端的功能是将待传输的电信号经电光转换器件转换为光信号，光纤的功能是将发送端光信号以尽可能小的衰减和失真传送到光信号接收端，目前光纤一般采用在近红外波段 $0.84\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ 有良好透过率的多模或单模石英光纤。光信号接收端的功能是将光信号经光电转换器件还原为相应的电信号，光电转换器件一般采用半导体光电二极管或雪崩光电二极管。组成光纤传输系统光源的发光波长必须与传输光纤呈现低损耗窗口的波段、光电检测器件的峰值响应波段匹配。



2. 光信号发送端的工作原理

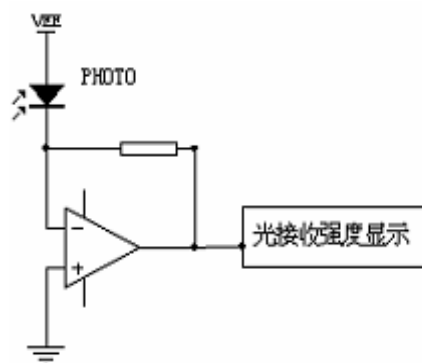
系统采用的发光二极管的驱动和调制电路如图二所示，信号调制采用光强度调制的方法，发送光强度调节电位器用以调节流过LED的静态驱动电流，从而相应改变发光二极管的发射光功率。



图（二）

3. 光信号接收端的工作原理

图四是光信号接收端的工作原理图，传输光纤把从发送端发出的光信号通过光纤耦合器将光信号耦合到光电转换器件光电二极管，光电二极管把光信号转变为与之成正比的电流信号，光电二极管使用时应反偏压，经运放的电流电压转换把光电流信号转换成与之成正比的电压信号。光电二极管的频响一般较高，系统的高频响应主要取决于运放等的响应频率。

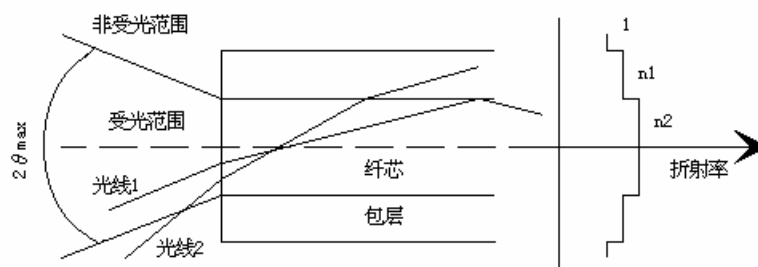


图（三）

4. 传输光纤的工作原理

目前用于光通讯的光纤一般采用石英光纤，它是在折射率 n_2 较大的纤芯内部，覆上一层折射率 n_1 较小的包层，光在纤芯与包层的界面上发生全发射而被限制在纤芯内传播，如图五所示。石英光纤的主要技术指标有衰减特性，数值孔径和色散等。

图（四）



四. 实验步骤

1. 光纤传输系统静态电光/光电传输特性测定

分别打开光发送端电源和光接收端电源，面板上两个三位半数字表头分别显示发送光驱动强度和接收光强度。调节发送光强度电位器，每隔100单位（相当于改变发光管驱动电流1ma）分别记录发送光驱动强度数据与接收光强度数据，在坐标纸上绘制静态电光/光电传输特性曲线。

2. 光纤传输系统频响的测定

将在调制信号输入接口上从信号发生器输入正弦波，将双踪示波器的通道1和通道2分别接到输入正弦信号和信号接收端，保持输入信号的幅度不变，调节信号发生器频率，记录信号变化时输出端信号幅度的变化，分别测定系统的低频和高频截止频率。

3. LED偏置电流与无失真最大信号调制幅度关系测定

将从信号发生器输入的正弦波频率设定在1kHz，输入信号幅度调节电位器置于最大位置，然后在LED偏置电流为5、10ma两种情况下，调节信号源输出幅度，使其从零开始增加，同时在接收端信号输出处观察波型变化，直到波型出现截止现象时，记录下电压波型的峰-峰值，由此确定LED在不同偏置电流下光功率的最大调制幅度。

4. 多种波型光纤传输实验

将输入选择开关打到“外”，在音频信号输入接口上分别从函数信号发生器输入方波信号和三角波信号，将双踪示波器的通道1和通道2分别接到发送端示波器接口和接收端音频信号输出接口，保持输入信号的幅度不变，调节函数信号发生器输出频率，从接收端通过示波器观察输出波形变化情况，记录输入信号频率变化时输出信号幅度的变化，分别测定系统的低频和高频截止频率。

在数字光纤传输系统中往往采用方波来传输数字信号。

5. 音频信号光纤传输实验

将输入选择打到“内”，按下内音频信号触发按钮，通过调节发送光强度电位器改变发送端LED的静态偏置电流，收听在接收端发出的语音片音乐声，考察当LED的静态偏置电流小于多少时，音频传输信号产生明显失真，分析原因，并同时通过示波器观察分析语音信号波形变化情况。

五、数据记录

1. 光纤传输系统静态电光/光电传输特性测定

接收光 驱动 强度 (mA)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
发送光 强度										

2. 光纤传输系统频响的测定

- (1) 低频截止频率: f_1
- (2) 高频截止频率: f_2
- 3. LED偏置电流与无失真最大信号调制幅度关系测定
 - (1) LED偏置电流为5MA 信号源输出电压波型的峰-峰值 : V_{p-p}
 - (2) LED偏置电流为10MA 信号源输出电压波型的峰-峰值 : V_{p-p}
- 4. 多种波型光纤传输实验
 - (1) 函数信号发生器输入方波信号 低频截止频率: f_1
高频截止频率: f_2
 - (2) 函数信号发生器输入方波信号 低频截止频率: f_1
高频截止频率: f_2
- 5. 音频信号光纤传输实验
音频传输信号产生明显失真时, LED的静态偏置电流 : $I = \quad \text{MA}$

六、数据处理

- (1) 在坐标纸上绘制静态电光/光电传输特性曲线。
- (2) 当LED的静态偏置电流小于I时, 音频传输信号产生明显失真, 分析原因, 并同时通过示波器观察分析语音信号波形变化情况。

七、思考题

- 1. 本实验中LED偏置电流是如何影响信号传输质量?
- 2. 本实验中光传输系统那几个环节引起光信号的衰减?
- 3. 光传输系统中如何合理选择光源与探测器?
- 4. 光电二极管在工作时应正偏压还是负偏压, 为什么?

RLC 电路特性的研究

一、实验内容:

- 1) RC 串联电路的暂态特性
- 2) RLC 串联电路的稳态特性: 幅频特性、相频特性

二、实验仪器:

FB318 型 RLC 电路实验仪、双踪示波器



三、预备知识:

1. 正弦电流电路中的电容的容抗和电感的感抗

电容的容抗: $X_C = \frac{1}{\omega C}$, $Z_C = -jX_C = -j\frac{1}{\omega C}$

电感的感抗: $X_L = \omega L$, $Z_L = jX_L = j\omega L$

2. 在交流电路中, RLC串联电路具有的作用

在交流电路中, 电阻值和频率无关, RLC串联电路的电流与电阻电压是同相位; 电容具有“通高频、阻低频”的特性; 电感具有“通低频, 阻高频”的特性。

RLC 串联电路具有特殊的幅频特性和相频特性, 有选频和滤波作用。

3. 交流电路中, 电压和电流的大小和相位的变化的表示

交流电路的电压和电流有大小和相位的变化, 通常用复数法及其矢量图解法来研究。

RLC 串联电路如图 1 所示, 交流电源电压为 \dot{U}_s , 则

$$\dot{U}_s = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$$

RLC 电路的复阻抗 $Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$

回路电流 $\dot{I} = \frac{\dot{U}_s}{Z} = \frac{\dot{U}_s}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$

电流大小 $I = \frac{U_s}{|Z|} = \frac{U_s}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$

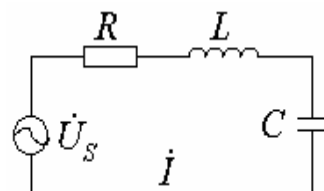


图 1 RLC 串联电路

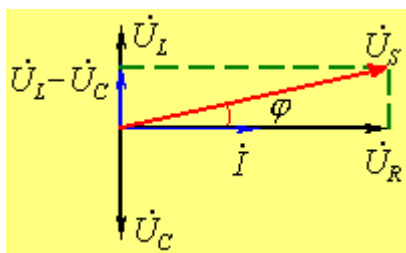


图 2 RLC 串联电压矢量图

矢量图解法如图 2 所示, 总电压 \dot{U}_s 与电流 \dot{I} 之间的相位 (或 \dot{U}_s 与电阻电压 \dot{U}_R 的相位)

为 $\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$, 可见, RLC 串联回路相位 φ 与电源频率 f ($\omega = 2\pi f$) 有关。

四、实验原理:

1. RLC 串联电路

1) RLC 串联谐振

RLC 串联电路中, 当信号的频率 f 为 **谐振频率** $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, 即感抗与容抗相等 ($\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$) 时, 电路的阻抗有最小值 ($Z=R$), 电流有最大值 $I_0 = \frac{U_s}{|Z|} = \frac{U_s}{R}$, 电路为纯电阻, 这种现象称为 **RLC 串联谐振**。

2) RLC 串联电路的幅频特性曲线

RLC 串联回路电流 I 与电源的频率 f ($\omega=2\pi f$) 有关, RLC 串联电路的 $I-f$ 的关系曲线称为 RLC 串联电路的 **幅频特性曲线**, 如图 3 所示。

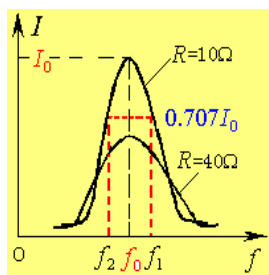


图 3 RLC 串联幅频曲线

3) 回路品质因数

谐振时, 回路的感抗 (或容抗) 与回路的电阻之比称为回路品质因数, 以 Q 表示,

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} \quad \text{或} \quad Q = \frac{1}{\omega_0 C R}$$

4) RLC 回路的通频带

RLC 串联幅频曲线如图 3 所示, 将电流 $I=0.707I_0$ 的两点频率 f_1 、 f_2 的间距定义为 RLC 回路的 **通频带** $\Delta f_{0.7}$,

$$2\Delta f_{0.7} = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q}$$

当 RLC 电路中 L 、 C 不变时, 根据 $2\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q}$ 和 $Q = \frac{\omega_0 L}{R}$, 电阻 R 越大, 则品质因数 Q 越小, 通频带 $2\Delta f_{0.7}$ 越宽, 滤波性能就越差 (如图 3 所示)。

5) 电路谐振时, 电感、电容的电压与品质因数 Q 的关系

谐振时，电感与电容的电压有最大值，是电源电压的 Q 倍，即

$$U_{L0} = I_0 \omega_0 L = \frac{U_s}{R} \omega_0 L = QU_s$$

$$U_{C0} = I_0 \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{U_s}{R \omega_0 C} = QU_s$$

谐振时，电容和电感两端的电压比信号源电压 U_s 大 Q 倍，有电压放大作用，要注意元件的耐压。

6) RLC 串联电路的相频特性

RLC 串联电路的 $\varphi - f$ 的关系曲线称为 RLC 串联电路的相频特性曲线，如图 4 所示。

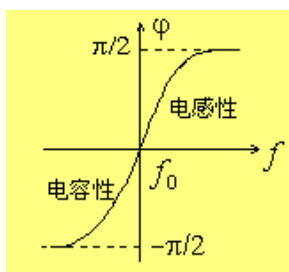


图 4 RLC 串联相频曲线

2.RC 串联电路的暂态

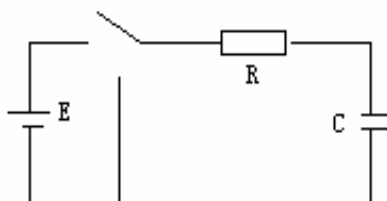


图 5 RC 串联电路

1) 充电方程: $\frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{RC} U_C = \frac{E}{RC} \Rightarrow U_C = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ 和 $U_R = E \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$

2) 放电方程: $\frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{RC} U_C = 0 \Rightarrow U_C = E \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$ 和 $U_R = -E \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$

令 $\tau = RC$ ， τ 称为 RC 电路的时间常数。

五、实验步骤:

1. RC 串联电路的暂态特性

选择方波作为信号源进行实验，以便用普通示波器进行观测。由于采用了功率信号输出，故应防止短路。

1) 选择合适的 R 和 C 值, 根据时间常数 τ , 选择合适的方波频率, 一般要求方波的周期 $T > 10\tau$, 这样能较完整地反映暂态过程, 并且选用合适的示波器扫描速度, 以完整地显示暂态过程。

2) 改变 R 值或 C 值, 观测 U_R 或 U_C 的变化规律, 记录下不同 RC 值时的波形情况, 并分别测量时间常数 τ 。

3) 改变方波频率, 观察波形的变化情况, 分析相同的 τ 值在不同频率时的波形变化情况。

2. RLC 串联电路的稳态特性

自选合适的 L 值、C 值和 R 值, 用示波器的两个通道测信号源电压 U 和电阻电压 U_R , 必须注意两通道的公共线是相通的, 接入电路中应在同一点上, 否则会造成短路。

1、幅频特性

保持信号源电压 U 不变(可取 $U_{pp}=5V$), 根据所选的 L、C 值, 估算谐振频率, 以选择合适的正弦波频率范围。从低到高调节频率, 当 U_R 的电压为最大时的频率即为谐振频率, 记录下不同频率时的 U_R 大小。

2、相频特性

用示波的双通道观测 U 的相位差, U_R 的相位与电路中电流的相位相同, 观测在不同频率上的相位变化, 记录下相应的相位差值。

六、数据记录 and 数据处理:

1.RC 暂态曲线 ($f=100Hz$, $R=1000\Omega$, $C=0.1\mu F$)

U_C										
d										
k_s										
$t = k_s d$										

k_s : 扫描时间因数 (s / DIV), d 、 t 分别为电压幅度 U_C 所对应的格数和时间

2.RLC 串联电路的幅频特性、相频特性

L=10mH

C=0.1 μF

R=10000 Ω

f (Hz)	50	100	150	...	500	f_0	1000	1500	2000	...	4000
$U_R(V)$											
$t(s)$											
ϕ											

式中 ϕ 为 U_R （电流 I ）与信号源 U 的相位差， $\phi = \omega t = 2\pi f t$ ，采用弧度制

相位差的测量方法：两同频率正弦信号分别接入“X 输入”和“Y 输入”，按下“CH1”和“CH1”按钮，然后选择“断续”，“扫描频率旋钮”选择扫描方式。记录两个波形在水平轴上的交点间的间隔时间 t ，若正弦信号的频率为 f ，则它们的相位差为 $\Delta\phi = 2\pi f t$ 。

数据处理要求：1) 作 RC 串联电路的暂态特性波形图，根据波形求 RC 的时间常数 τ ，并且根据 R、C 的参数求常数 τ 的理论值，比较二者，求误差；

2) 作 RLC 串联电路的幅频特性和相频特性图，根据幅频特性求出电路的谐振频率 $f_{0\text{测}}$ ，与理论值 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 进行比较，求误差；同时根据幅频特性图求 $Q_{\text{测}}$ 值，并由 L、C 的参数值计算电路 Q 的理论值 ($Q_0 = \frac{2\pi f_0 L}{R}$)，比较两者，求误差。

七、注意事项：

使用双踪示波器要正确接线，注意两通道的接地点应该位于线路的同一点，否则会引起部分电路短路。

测量 RLC 串联特性改变频率时，注意随时调整输出幅度，要保证输出幅度的恒定。

八、思考题：

(1) 在实验中如何判断 RLC 电路发生了谐振？为什么？

提示：逐渐改变信号频率，用示波器的 CH2 通道观察 R 上电压波形的幅度，当幅度最大时，RLC 电路发生了谐振。因为谐振时，电路阻抗最小，呈现纯电阻，电流达到最大值，此时 R 上电压幅度最大。

(2) 如何利用测量数据求得 RLC 串联电路品质因数 Q？

提示：利用 RLC 串联电路的幅频特性曲线图，在 $0.707 U_m$ 处作一直线与曲线交两点，两点的横坐标

分别为 f_1 、 f_2 ，顶点横坐标（即谐振频率）为 f_0 ，则 RLC 串联电路品质因数 Q 为：
$$Q = \frac{f_0}{|f_2 - f_1|}$$

(3) 改变 R 是否影响 RLC 串联电路谐振频率？改变 C 是否影响谐振频率？

提示：RLC 串联电路的电流表达式为：
$$i = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$
，从该式可以看出，谐振时，

$\omega L = \frac{1}{\omega C}$ ， $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。显然谐振频率与 R 无关而与 L 和 C 有关。

(4) RLC 串联电路在 $f < f_0$ 或 $f > f_0$ 时各呈现什么性质？

提示：RLC 串联电路的阻抗为：

$$Z = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = R + j\frac{1}{\omega C}(\omega^2 LC - 1) = R + j\frac{1}{\omega C}(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1)$$

显然， $f < f_0$ 时，电路呈电容性； $f > f_0$ 时，电路呈电感性。

(5) 研究 RC 暂态过程，如何利用记录的波形测量 RC 串联电路的时间常数？

提示：根据 $\tau = RC$ ，式子 $U_C = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ 可写为 $U_C = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ ，当 $t = \tau$ 时， $U_C = (1 - e^{-1})E = 0.632E$ 。所以在 $U_C \sim t$ 波形图上，从最大幅度降到 0.632 倍的最大幅度处所对应的时间就是时间常数 τ 。

数字万用表设计性实验

一、实验内容：

- 1) 制作量程 200mA 的微安表（表头）；
- 2) 设计制作多量程直流电压表；
- 3) 设计制作多量程直流电流表；

二、实验仪器：

WS-I 数字万用表设计性实验仪 三位半数字万用表



三、实验原理

1. 数字万用表的组成

数字万用表的组成见图 1。

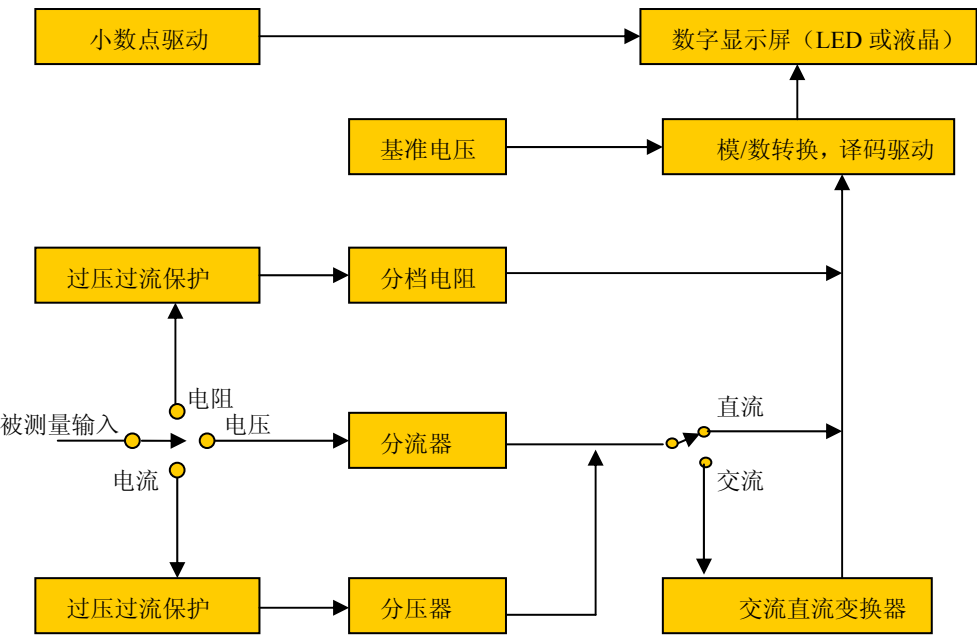


图 1 数字万用表的组成

数字万用表其核心是一个三位半数字表头，它由数字表专用 A/D 转换译码驱动集成电路和外围元件、LED 数码管构成。该表头有 7 个输入端，包括 2 个测量电压输入端(IN+、IN-)、2 个基准电压输入端(V_{REF+} 、 V_{REF-})和 3 个小数点驱动输入端。

2. 直流数字电压表头

“三位半数字表头”电路单元的功能:将输入的两个模拟电压转换成数字，并将两数字进行比较，将结果在显示屏上显示出来。利用这个功能，将其中的一个电压输入作为公认的基准，另一个作为待测量电压，这样就 and 所有量具或仪器的测量原理一样，能够对电压进行测量了。见图 2。

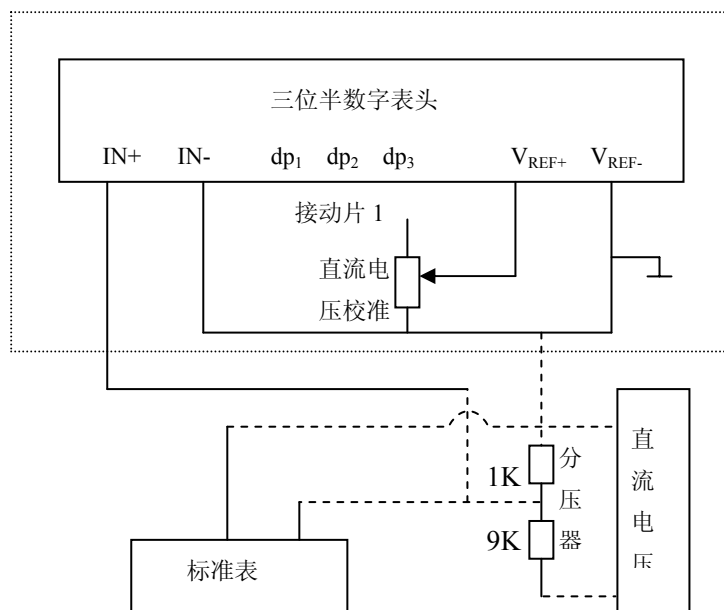


图 1 200mV(199.9mV)直流数字电压表头及校准电路

3. 多量程直流数字电压表

在数字电压表头前面加一级分压电路(分压器)，可以扩展直流电压测量的量程。如图 3 所示， U_0 为电压表头的量程(如 200mV)， r 为其内阻(如 $10M\Omega$)， r_1 、 r_2 为分压电阻， U_{i0} 为扩展后的量程。

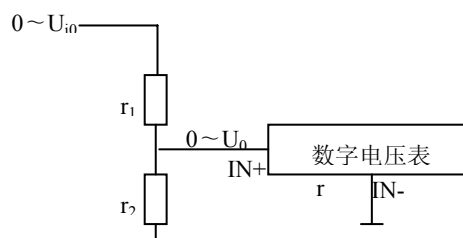


图 3 分压电路原理

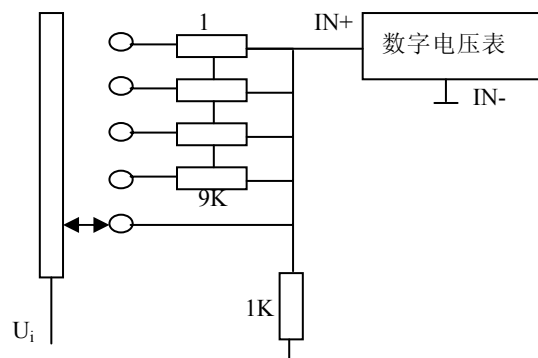


图 4 多量程分压器原理电路

多量程分压器原理电路见图 4。

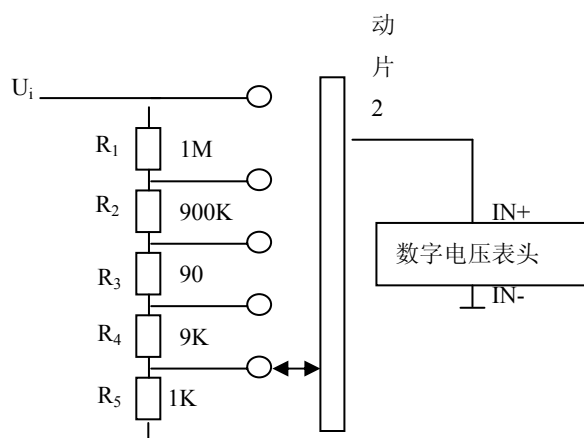


图 5 实用分压器电路

采用图 4 的分压电路虽然可以扩展电压表的量程,但在小量程档明显降低了电压表的输入阻抗,这在实际使用中是不希望的。所以,实际数字万用表的直流电压档电路为图 5 所示,它能在不降低输入阻抗的情况下,达到同样的分压效果。

4. 多量程直流数字电流表

测量电流的原理是:根据欧姆定律,用合适的取样电阻把待测电流转换为相应的电压,再进行测量。如图 6。由于 $r \gg R$, 取样电阻 R 上的电压降为 $U_i = RI_i$ 即被测电流为 $I_i = U_i / R$, 多量程分流器电路原理见图 7。

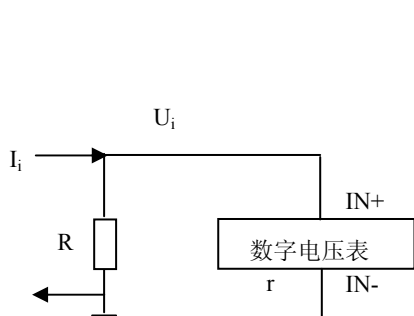


图 6 电流测量原理

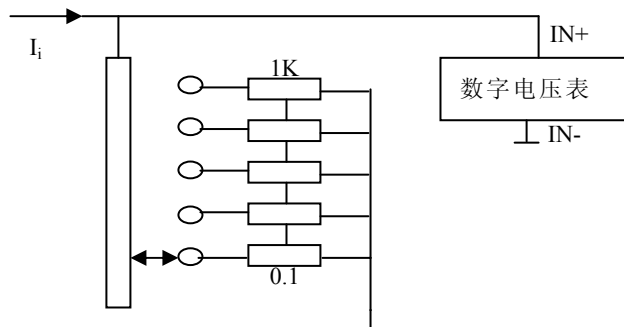


图 7 多量程分流器电路

图 7 中的分流器在实际使用中有一个缺点,就是当换档开关接触不良时,被测电路的电压可能使数字表头过载,所以,实际数字万用表的直流电流档电路为图 8 所示。

图中的 BX 是 2A 保险丝管,电流过大时会快速熔断,超过流保护作用。两只反向连接且与分流电阻并联的二极管 D_1 、 D_2 为塑封硅整流二极管,它们起双向限幅过压保护作用。正常测量时,输入电压小于硅二极管的正向导通压降,二极管截止,对测量毫无影响。一旦输入电压大于 0.7V,二极管立即导通,两端电压被限制住(小于 0.7V),保护仪表不被损坏。用 2A 档测量时,若发现电流大于 1A 时,应不使测量时间超过 20 秒,以避免大电流引起的较高温升影响测量精度甚至损坏电表。

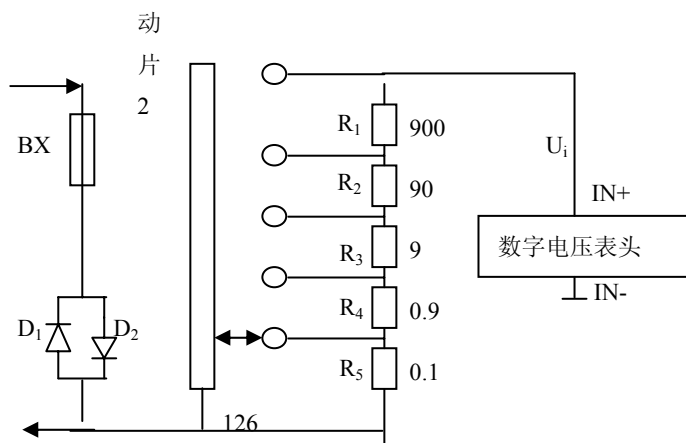


图 8 实用分压器电路

四、实验步骤

1. 制作 200mV(199.9mV)直流数字电压表头并校准

使用电路单元：三位半数字表头，直流电压校准，直流电压电流，分压器。

按图 2 接线，参考电压 V_{REF} 输入端接直流电压校准电位器，左数第三位小数点 dp3 接到多量程直流数字电压表的小数点控制电路量程转换单元的“动片 1”插孔以获得一位小数显示。利用待测直流电压源和分压电阻获得 150mV 左右的校准电压，把一只成品数字万用表(称为标准表)置于直流电压 200mV 档与表头输入端并联，调整“直流电压校准”旋钮使表头读数与标准表读数一致(允许误差 $\pm 0.5mV$)。然后保留虚线框内的线路，拆去其余部分即可。

2. 制作多量程直流数字电压表

- (1) 扩展电压表头成为多量程直流电压表。

按图 5 接线，“动片 2”作为量程转换开关，“动片 1”作为控制小数点显示的开关。
- (2) 用自制电压表测直流电压

测量 WS-1 实验仪上的待测直流电压：调节“直流电压电流”单元的电位器，可以改变直流电压 $U_{改装}$ 的大小和极性，分别测出对应的标准电压 $U_{标准}$ ，数据填入记录表格。

3. 制作多量程直流数字电流表

- (1) 制成多量程直流数字电流表

使用电路单元：三位半数字表头，直流电压校准，分流器 1 或分流器 2，电流档保护电路，量程转换与测量输入。按图 8 接线，“动片 2”作为量程转换开关，“动片 1”作为控制小数点显示的开关。
- (2) 用自制电流表测直流电流

测 LED 的电流：将自制电流表和标准电流表串接在待测直流电流 I 电路中，调节电位器可观察到电流 $I_{改装}$ 的大小、极性的变化以及 LED 发光情况的相应变化，改变 $I_{改装}$ (从-5.00mA 到+5.00mA，每隔 1.00mA 测一次)，分别测出 $I_{标准}$ 。数据填入表格。

五、数据记录及数据处理

1. 测直流电压

$U_{改}$									
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

U _标									
ΔU									

以 $U_{\text{改}}$ 为横轴， $\Delta U = U_{\text{改}} - U_{\text{标}}$ 为纵轴，在坐标纸上作校正曲线(注意：校正曲线为折线，即将相邻两点用直线连接)。

2. 测直流电流

I _改									
I _标									
ΔI									

以 $I_{\text{改}}$ 为横轴， $\Delta I = I_{\text{改}} - I_{\text{标}}$ 为纵轴，在坐标纸上作校正曲线。

六、注意事项

1. 实验时应当“先接线，再加电；先断电，再拆线”，加电前应确认接线无误，避免短路。
2. 即使加有保护电路，也应注意不要用电流档或电阻档测量电压，以免造成不必要的损失。
3. 当数字表头最高位显示“1”(或“1”)而其余位都不亮时，表明输入信号过大，即超量程。此时应尽快换大量程档或减小(断开)输入信号，避免长时间超量程。
4. 自锁紧插头插入时不必太用力就可接触良好，拔出时应手捏插头旋转一下就可轻易拔出，避免硬拔硬拽导线，拽断线芯。

5. 特别要注意低电位的接地。

七、思考题：

- 1) 直流数字电压表头如何制作？

提示：见教材

- 2) 试述实用分流电路中 BX 、 D_1 、 D_2 的作用。

提示：见教材

- 3) 本实验中 $dp1$ 、 $dp2$ 、 $dp3$ 的选择对实际电压或者电流是否有影响？

提示：无影响。 $dp1$ 、 $dp2$ 、 $dp3$ 的选择只是用来配合量程获取小数点的位置。

- 4) 制作多量程直流电压表，需用到哪些电路单元？

提示：见教材

5) 制作多量程直流电流表，需用到哪些电路单元？

提示：见教材

6) 以电流表的改装为例说明校正曲线的物理意义。

提示：在改装电流表的校正试验中，不可能不间断地测量连续的点，而只能进行有限个点的测量，相邻的两点之间近似认为按线性变化，因此校正曲线是一条折线。