

# 大学物理实验指导 (手机版 2.4)



扫描二维码下载本文

华中农业大学理学院物理系  
二〇一六年四月

# 目 录

一 密度测量 .....	1
二 比较法测量液体粘度 .....	6
三 扭摆法测量物体转动惯量 .....	10
四 气体比热容比的测定 .....	13
五 示波器的使用 .....	16
六 声速的测定 .....	18
七 弗兰克-赫兹实验 .....	21
八 用迈克耳逊干涉仪测量光源波长 .....	28
九 测量平凸透镜的曲率半径 .....	31
十 分光计的调节 .....	34
十一 用分光计测量介质折射率 .....	40
十二 用分光计测量光栅常数 .....	44
十三 分压电路特性曲线的测定 .....	47
十四 用霍尔元件测量螺线管轴向磁场 .....	49
十五 电路故障的分析诊断 .....	51
十六 全息摄影 .....	55
十七 数码摄影 .....	58
十八 用数字成像处理技术测光栅常数 .....	60
附录 1 测量误差与不确定度 .....	63
1 测量误差及其分类 .....	63
1.1 误差的定义 .....	63
1.2 误差的分类 .....	63
2 误差的基本性质与处理 .....	64
2.1 测量值与随机误差的统计规律 .....	64
2.2 有限次测量与抽样统计 .....	65
2.3 系统误差与仪器误差的处理 .....	68
3 测量不确定度 .....	69

3.1	直接测量的标准不确定度 .....	70
3.2	直接测量的展伸不确定度 .....	70
3.3	间接测量的标准不确定度 .....	71
3.4	间接测量的展伸不确定度 .....	73
4	展伸不确定度的简化计算 .....	74
4.1	直接测量的展伸不确定度 .....	74
4.2	间接测量的展伸不确定度 .....	74

## 一 密度测量

### 实验目的:

- 1、测量铜柱体的密度 $\rho$ 。
- 2、掌握长度、质量等基本量的测量工具的使用。

### 实验仪器:

铜圆柱体、物理天平、螺旋测微器、游标卡尺。

### 实验原理:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi d^2 h}$$

### 数据记录及处理:

- 1、铜圆柱体的质量:  $m = \underline{\hspace{2cm}}$  g;

$m$  是单次测量量, 只计算 B 类不确定度。所用物理天平 (TW-1B) 示值变动性小于 0.1g, 同时忽略天平不等臂误差和砝码误差等, 可认为仪器最大误差为: 0.1g, 则质量  $m$  的不确定度:  $\Delta_m = \Delta_B = \Delta_{\text{仪}} = 0.1\text{g}$ 。

- 2、铜圆柱体的直径  $d$  和高度  $h$ , 考虑到铜圆柱体不是绝对规则, 要在不同位置做多次测量。

螺旋测微器的零点读数为  $d_0 = \underline{\hspace{2cm}}$  mm。

游标卡尺的零点读数为  $h_0 = \underline{\hspace{2cm}}$  mm。

测量次序 $i$	1	2	3	4	5
直径的测量读数 $d_i'/\text{mm}$					
直径的校正值 $d_i = (d_i' - d_0)/\text{mm}$					
高的测量读数 $h_i'/\text{mm}$					
高的校正值 $h_i = (h_i' - h_0)/\text{mm}$					

- 3、 $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \underline{\hspace{2cm}}$  mm;  $d$  的 A 类不确定度:

$$\Delta_A = \frac{S_d}{\sqrt{n}} t_{0.95}(n-1) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mm},$$

螺旋测微器的误差  $\Delta_{\text{仪}} = 0.004\text{mm}$ ， $d$  的 B 类不确定度来源于直接测量量  $d_0$ 、 $d'$ ，易得：

$$\Delta_B = \sqrt{2\Delta_{\text{仪}}^2} = \sqrt{2} \times 0.004\text{mm}，\text{合成不确定度：}$$

$$\Delta_d = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \text{_____ mm}。$$

4、 $\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i = \text{_____ mm}$ ； $h$  的 A 类不确定度：

$$\Delta_A = \frac{S_h}{\sqrt{n}} t_{0.95}(n-1) = \text{_____ mm}，$$

游标卡尺的误差  $\Delta_{\text{仪}} = 0.02\text{mm}$ ， $h$  的 B 类不确定度来源于直接测量量  $h_0$ 、 $h'$ ，易得：

$$\Delta_B = \sqrt{2\Delta_{\text{仪}}^2} = \sqrt{2} \times 0.02\text{mm}，\text{合成不确定度：}$$

$$\Delta_h = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \text{_____ mm}。$$

5、铜圆柱体密度的测量平均值：

$$\bar{\rho} = 4m/\pi\bar{d}^2\bar{h} = \text{_____ g/cm}^3。$$

6、密度的合成不确定度：

$$\Delta_{\rho} = \bar{\rho} \sqrt{\left(\frac{\Delta_m}{\bar{m}}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta_d}{\bar{d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_h}{\bar{h}}\right)^2} = \text{_____ g/cm}^3。$$

7、密度的测量结果： $\rho = \bar{\rho} \pm \Delta_{\rho}$ ， $p \geq 0.95$ 。

### 思考题：

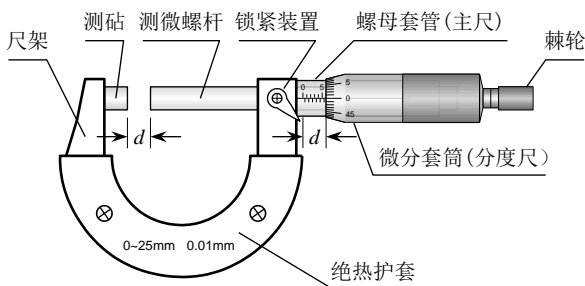
- 1、与游标卡尺读数原理相似的仪器还有哪些？
- 2、测量数据中，铜圆柱体的直径  $d$  和高度  $h$  的不确定性主要来源是什么？

### 实验讨论：

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等，还可以谈谈实验的心得体会。

## 附录：长度、质量测量的基本仪器

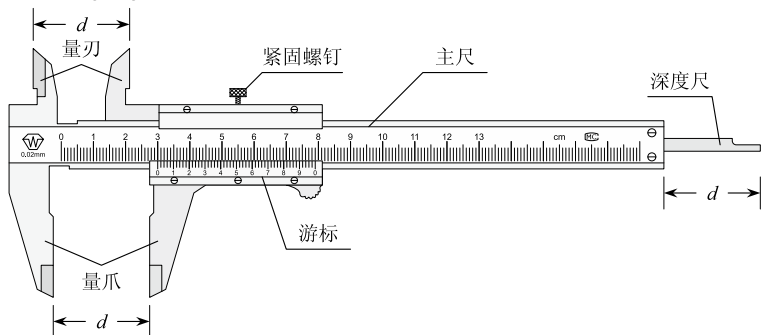
### 1、螺旋测微器 (千分尺)



操作要点：

- (1) 测量前确保测砧和测微螺杆的测量面洁净。
- (2) 被测物或测量面被夹紧前一定要转棘轮旋进，以免损坏测微螺杆。
- (3) 测量前要记录零点读数，因为  $d=0$  时，读数不一定为零。一般，读数为正值，若微分套筒（分度尺）的 0 刻度线在主尺线上方，读数为负值，即  $-0.5\text{mm} + \text{分度尺正读数}$ （负+正后总体是负）。被测物的读数减零点读数才是其实际长度。
- (4) 测量完毕，不要夹紧测量面，应留有缝隙，以免受热膨胀损坏测量面和测微螺杆。

### 2、游标卡尺



操作要点：

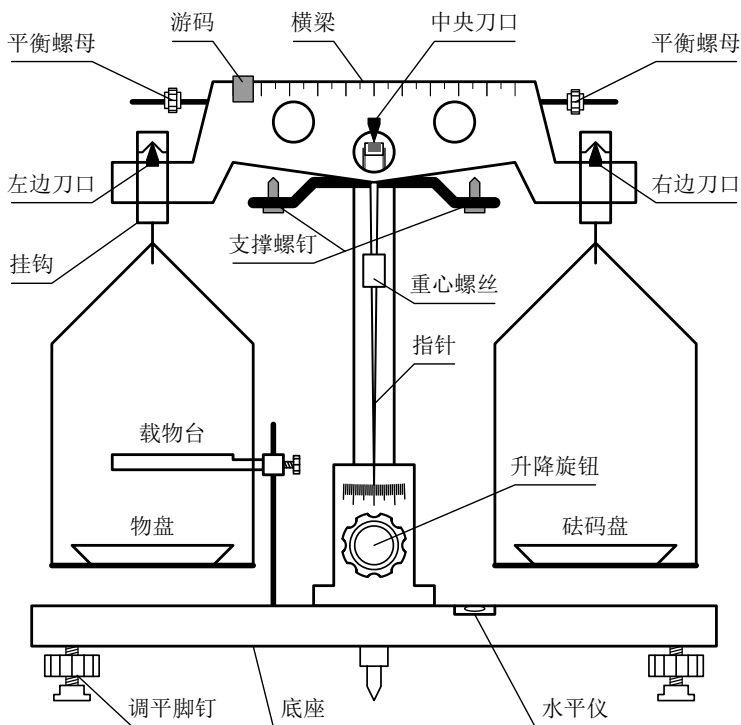
- (1) 测量前确保测量面（或刀口）洁净。

(2) 测量前要记录零点读数，因为  $d=0$  时，读数不一定为零。一般，读数为正值，若游标 0 刻度在主尺 0mm 刻度左边，读数为负值，即  $-1\text{mm} + \text{游标正读数}$ 。被测物的读数减零点读数才是其实际长度。

(3) 读数时，毫米以上，看游标 0 刻度停在主尺多少毫米；毫米以下，看游标第几条刻线和主尺刻线对齐，就读几倍  $0.02\text{mm}$ （此处  $0.02\text{mm}$  为最小分度，即游标刻线间距比主尺刻线间距少  $0.02\text{mm}$ ）。

(4) 用量爪测外径(长)，量刃测内径(长)。

### 3、物理天平



#### 操作要点：

(1) 水平调节。在天平底座上装有气泡水平仪，调节底座脚钉，使气泡位于水平仪中心。有的天平利用铅垂线来调节水平。

(2) 平衡调节。天平止动时，天平横梁被两个螺钉支撑，比较稳定。先将托盘挂钩挂到两边刀口上，拨动游标至零刻线。旋转升降旋钮，天平被启动，观察天平横梁是否平衡，指针是否指向零点（或平衡位置）。若不指零，反向旋转升降旋钮，天平被止动，调节平衡螺母。再次启动天平，观察横梁或指针，反复调节。若天平不能静止下来，只要指针左右摆幅近似相等，便可认为天平达到平衡。

(3) 称量。止动天平，将被测物体放入左盘，合适的砝码放入右盘，启动天平，观察横梁或指针。止动天平，增减砝码使天平平衡（注意，为了避免天平刀口受到冲击，在取、放砝码时，都必须使天平止动）。如果天平还未平衡，就要使用游码，移动游码也要使天平止动。当天平达到平衡时，止动天平，记录砝码和游码的总质量，即被测物体的质量。

(4) 还原天平。将托盘挂钩从两边刀口取下，取回被测物体和砝码，游码归零。



## 二 比较法测量液体粘度

### 实验目的:

- 1、测量酒精的粘度。
- 2、掌握泊肃叶公式及其应用。

### 实验仪器:

奥斯特瓦尔德粘度计、支架、烧杯、容量瓶、量筒、滴管、天平、秒表、温度计。

### 实验原理:

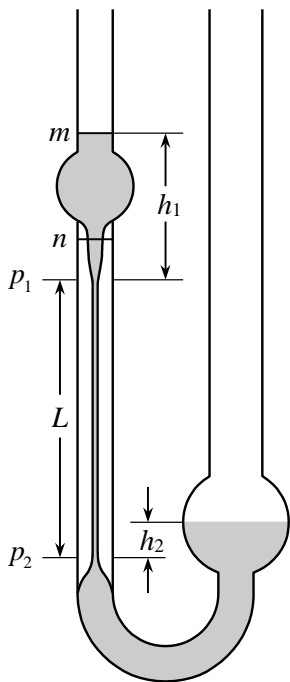
奥斯特瓦尔德粘度计为一 U 型玻璃管，左边管口较小较短，管口下有一小玻璃泡，右边管口较大较长，靠底部有一大玻璃泡，两玻璃泡之间由毛细直管和粗弯管连通。

实验中，先用洗耳球将液面吹（吸）至  $m$  刻线以上，待液面降至  $m$  处开始计时，降至  $n$  处停止计时。由于两边玻璃泡的作用，液面升降速度很慢，毛细管上下端的压强差 ( $p_1 - p_2$ ) 可用流体静压强计算。若液体密度为  $\rho$ ，两边液面距毛细管上下端点的高度分别是  $h_1$ 、 $h_2$ ，则：

$$p_1 - p_2 = \rho g(h_1 - h_2) \quad (1)$$

若液面从  $m$  降至  $n$  所需时间为  $t_{\text{液}}$ ，粘度计  $m$ 、 $n$  之间的容积为  $V$ ，根据泊肃叶公式：

$$V = \int_0^{t_{\text{液}}} \frac{\pi r^4 \rho g (L + h_1 - h_2)}{8\eta L} dt \quad (2)$$



式中  $\eta$  为液体的粘度,  $r$  为毛细管的半径。

如果用相同体积的酒精和水先、后注入粘度计中, 分别测出下降时间, 由(2)得:

$$V = \int_0^{t_{\text{酒精}}} \frac{\pi r^4 \rho_{\text{酒精}} g (L + h_1 - h_2)}{8 \eta_{\text{酒精}} L} dt \quad (3)$$

$$V = \int_0^{t_{\text{水}}} \frac{\pi r^4 \rho_{\text{水}} g (L + h_1 - h_2)}{8 \eta_{\text{水}} L} dt \quad (4)$$

实验中虽然  $h_1$ 、 $h_2$  不断变化, 但对于这两种液体, 变化情况完全相同, 因此, 由(3)、(4)可得:

$$\frac{\rho_{\text{酒精}}}{\eta_{\text{酒精}}} t_{\text{酒精}} = \frac{\rho_{\text{水}}}{\eta_{\text{水}}} t_{\text{水}} \quad (5)$$

即:

$$\eta_{\text{酒精}} = \eta_{\text{水}} \frac{\rho_{\text{酒精}}}{\rho_{\text{水}}} \cdot \frac{t_{\text{酒精}}}{t_{\text{水}}} \quad (6)$$

对于相同体积的两种液体, 可以用质量比代替密度比。

即:

$$\eta_{\text{酒精}} = \eta_{\text{水}} \frac{m_{\text{酒精}}}{m_{\text{水}}} \cdot \frac{t_{\text{酒精}}}{t_{\text{水}}} \quad (7)$$

## 数据记录及处理:

### 1、质量(g)的测量 (用电子天平测量):

(10ml) 水的质量 $m_{\text{水}}$	
(10ml) 酒精的质量 $m_{\text{酒精}}$	
电子天平的仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$	

水和酒精质量的不确定度:  $\Delta_{m_{\text{水}}} = \Delta_{m_{\text{酒精}}} = \Delta_{\text{仪}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ g}$ 。

### 2、液面从刻线 $m$ 下降到刻线 $n$ 的时间(s):

测量次序 $i$	1	2	3	4	5
$t_{\text{水}}$					
$t_{\text{酒精}}$					

3、 $\bar{t}_{\text{水}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{\text{水}i} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ s}$ ;  $t_{\text{水}}$  的 A 类不确定度:

$$\Delta_A = \frac{S_{t_{\text{水}}}}{\sqrt{n}} t_{0.95}(n-1) = \quad \text{s},$$

B 类不确定度等于秒表的最小分度:  $\Delta_B = \quad \text{s}$ ,

$$\Delta_{t_{\text{水}}} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \quad \text{s}。$$

4、 $\bar{t}_{\text{酒精}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{\text{酒精}i} = \quad \text{s}$ ;  $t_{\text{酒精}}$  的 A 类不确定度:

$$\Delta_A = \frac{S_{t_{\text{酒精}}}}{\sqrt{n}} t_{0.95}(n-1) = \quad \text{s},$$

B 类不确定度等于秒表的最小分度:  $\Delta_B = \quad \text{s}$ ,

$$\Delta_{t_{\text{酒精}}} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \quad \text{s}。$$

5、水温:  $\quad ^\circ\text{C}$ , 该温度下水的粘度  $\eta_{\text{水}} = \quad \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

6、酒精粘度的平均值:

$$\bar{\eta}_{\text{酒精}} = \eta_{\text{水}} \frac{m_{\text{酒精}}}{m_{\text{水}}} \cdot \frac{\bar{t}_{\text{酒精}}}{\bar{t}_{\text{水}}} = \quad \mu\text{Pa} \cdot \text{s}。$$

$$\begin{aligned} 7、\Delta_{\eta_{\text{酒精}}} &= \bar{\eta}_{\text{酒精}} \sqrt{\left(\frac{\Delta_{m_{\text{酒精}}}}{\bar{m}_{\text{酒精}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{t_{\text{酒精}}}}{\bar{t}_{\text{酒精}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{m_{\text{水}}}}{\bar{m}_{\text{水}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{t_{\text{水}}}}{\bar{t}_{\text{水}}}\right)^2} \\ &= \quad \mu\text{Pa} \cdot \text{s}。 \end{aligned}$$

8、酒精粘度的测量结果:

$$\eta_{\text{酒精}} = \bar{\eta}_{\text{酒精}} \pm \Delta_{\eta_{\text{酒精}}}, \quad p \geq 0.95。$$

### 思考题:

- 1、液体在粘度计的毛细管部分作什么运动?
- 2、实验过程中粘度计倾斜了影响测量结果吗?
- 3、实验中如何更准确地测量液面下降时间?

### 实验讨论:

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释, 分析实验误差的主要来源, 对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等, 还可以谈谈实验的心得体会。

附表 1：水的粘度

温度/°C	$\eta/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	温度/°C	$\eta/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	温度/°C	$\eta/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	温度/°C	$\eta/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
0	1792.1	10	1307.7	20	1005.0	30	800.7
1	1731.3	11	1271.3	21	981.0	31	784.0
2	1672.8	12	1236.3	22	957.9	32	767.9
3	1619.1	13	1202.8	23	935.8	33	752.8
4	1567.4	14	1170.9	24	914.2	34	737.1
5	1518.8	15	1140.4	25	893.7	35	722.5
6	1472.8	16	1111.1	26	873.7	40	654.0
7	1428.4	17	1082.8	27	854.5	50	549.0
8	1386.0	18	1055.9	28	836.0	60	470.0
9	1346.2	19	1029.9	29	818.0	70	407.0

附表 2：酒精的粘度

温度/°C	$\eta/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	温度/°C	$\eta/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	温度/°C	$\eta/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
0	1843				
5	1630				
10	1525				
14	1330	21	1179	28	1039
15	1308	22	1158	29	1021
16	1286	23	1137	30	1003
17	1264	24	1116	31	985
18	1242	25	1096	32	967
19	1221	26	1076	33	949
20	1200	27	1057	34	931

附表 3：酒精的水溶液粘度  $\eta/(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$ 

$t/^\circ\text{C}$	Percentage of alcohol by weight.										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0	1.792	3.311	5.319	6.940	7.140	6.580	5.750	4.762	3.690	2.732	1.773
10	1.308	2.179	3.165	4.050	4.390	4.180	3.770	3.268	2.710	2.101	1.466
20	1.005	1.538	2.183	2.710	2.910	2.870	2.670	2.370	2.008	1.610	1.200
30	0.801	1.160	1.553	1.870	2.020	2.020	1.930	1.767	1.531	1.279	1.003
40	0.656	0.907	1.160	1.368	1.482	1.499	1.447	1.344	1.203	1.035	0.834
50	0.549	0.734	0.907	1.050	1.132	1.155	1.127	1.062	0.968	0.848	0.702
60	0.469	0.609	0.736	0.834	0.893	0.913	0.902	0.856	0.789	0.704	0.592
70	0.406	0.514	0.608	0.683	0.727	0.740	0.729	0.695	0.650	0.589	0.504
80	0.356	0.430	0.505	0.567	0.601	0.612	0.604	-	-	-	-

### 三 扭摆法测量物体转动惯量

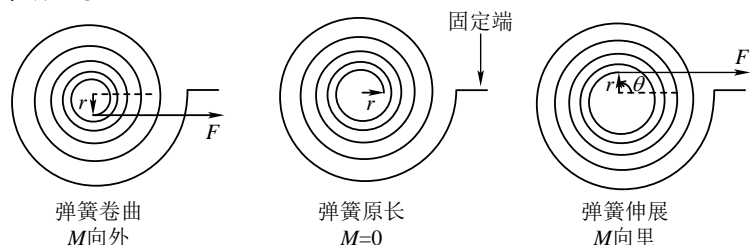
#### 实验目的:

- 1、熟悉扭摆的结构和转动惯量测试仪的使用方法。
- 2、测量不同形状刚体模具的转动惯量  $J$  和弹簧的扭转系数  $K$ 。

#### 实验仪器:

刚体模具、转动惯量测试仪、游标卡尺。

#### 实验原理:



扭摆的螺旋弹簧部分如上图所示，其外圈端点固定不动，内圈端点与转轴连接。 $r$  为转轴的半径， $F$  为弹簧因扭转而产生的回复力， $F$  的作用点在内圈端点与转轴连接处， $M$  为  $F$  产生的回复力矩。转轴上的物体在  $M$  的作用下，可以绕转轴作简谐摆动。根据胡克定律，回复力矩  $M$  与弹簧扭转的角度  $\theta$  成正比，即：

$$M = -K\theta \quad (1)$$

(1)式中， $K$  为弹簧的扭转系数，根据转动定律：

$$M = J\alpha = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2)$$

(2)式中， $J$  为转轴上的物体绕转轴的转动惯量， $\alpha$  为角加速度，令：

$$\omega^2 = \frac{K}{J} \quad (3)$$

忽略轴承的摩擦力矩，由(1)、(2)、(3)得：

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega^2\theta = 0 \quad (4)$$

(4)的解是:  $\theta = A\cos(\omega t + \varphi)$  (5)

摆动周期:  $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{J}{K}}$  (6)

测量金属载物转盘空载时的摆动周期  $T_0$ , 由(6)得其转动惯量为:

$$J_0 = \frac{T_0^2 K}{4\pi^2} \quad (7)$$

将塑料圆柱体安放在转盘上, 测量摆动周期  $T_1$ , 总转动惯量为:

$$J_0 + J_{\text{柱}} = \frac{T_1^2 K}{4\pi^2} \quad (8)$$

塑料圆柱体转动惯量理论值为:  $J_{\text{柱}} = \frac{1}{8}mD^2$  (9)

联立 (7)、(8)、(9), 求出:  $J_0$ 、 $K$ 。

如果将其它刚体模具安放在转盘上, 测出摆动周期  $T_x$ , 则模具转动惯量为:

$$J_x = \frac{T_x^2 K}{4\pi^2} - J_0 \quad (10)$$

**数据记录及处理:**

刚体 模具 名称	质量 $m/g$	(外、 内) 直 径/mm		周 期 $T_i/s$	转动惯量 实验值 $J_x/(g \cdot cm^2)$	转动惯量 理论值 $J_{\text{理论}}/(g \cdot cm^2)$	相 对 误 差
金属 载物 转盘							
塑料 圆柱 体							
金属 圆筒							

金属圆筒转动惯量理论值：

$$J_{\text{筒}} = \frac{1}{8}m(D_{\text{外}}^2 + D_{\text{内}}^2) \quad (11)$$

**思考题：**

- 1、 实验中为什么要测量  $J_0$ 、 $K$ ？
- 2、 实验中如何更准确地测量刚体模具的几何尺寸？

**实验讨论：**

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等，还可以谈谈实验的心得体会。

## 四 气体比热容比的测定

### 实验目的:

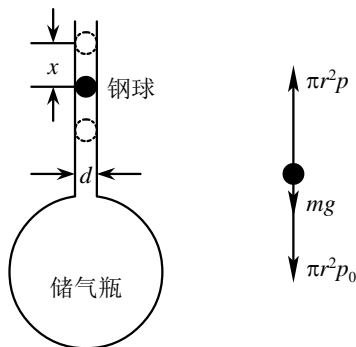
- 1、测定空气的比热容比。
- 2、理解振动法测量原理。

### 实验仪器:

FB212 型气体比热容比测定仪、电子天平、螺旋测微器。

### 实验原理:

热容是物质的重要参量,在研究物质结构、确定相变、鉴定物质纯度等方面起着重要的作用。气体的定压摩尔热容  $C_p$  与定容摩尔热容  $C_v$  之比称为比热容比  $\gamma$ ,它在热力学过程特别是绝热过程中是一个很重要的参数。 $\gamma$  的测定方法有多种,本实验通过测定物体在特定容器中的振动周期来计算  $\gamma$  值。



实验装置示意图

如图所示,储气瓶的柱形玻璃管中悬浮着一个光滑的钢球,钢球直径等于玻璃管内径,管壁铅直,钢球可以在玻璃管中上下无摩擦运动。设钢球的质量为  $m$ ,半径为  $r$ ,当瓶内气压  $p$  满足:

$$p = p_0 + \frac{mg}{\pi r^2} \quad (1)$$



时 (式中  $p_0$  为大气压强), 钢球处于受力平衡状态。若钢球偏离平衡位置一个较小位移  $x$ , 瓶内气压也会有一个微变  $dp$ , 钢球所受合外力  $f$  不再为零, 由牛顿第二定律可得:

$$f = \pi r^2 dp = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (2)$$

因为钢球运动过程相当快, 气体来不及传热, 若忽略漏气、摩擦等损耗, 此过程可以看作理想气体的绝热过程, 即:

$$pV^\gamma = \text{常数} \quad (3)$$

对(3)式求导得:

$$dp = -\frac{p\gamma}{V} dV = \frac{p\gamma}{V} \pi r^2 x \quad (4)$$

将(4)式代入(2)式得:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\pi^2 r^4 p\gamma}{mV} x = 0 \quad (5)$$

求解(5)式得钢球振动的位移方程:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

其中:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{\pi^2 r^4 p\gamma}{mV}} \quad (7)$$

则:

$$\gamma = \frac{4mV}{T^2 p r^4} = \frac{64mV}{T^2 p d^4} \quad (8)$$

## 数据记录及处理:

钢球直径和振动周期

测量次序 $i$	1	2	3	4	5	平均值
钢球直径 $d_i/\text{m}$						
振动周期 $T_i/\text{s}$						

钢球质量  $m =$  \_\_\_\_\_ kg

储气瓶容积  $V =$  \_\_\_\_\_  $\text{m}^3$

大气压  $p_0 =$  \_\_\_\_\_ Pa

$$\text{比热容比 } \gamma = \frac{64\pi m V}{\bar{T}^2 (\pi p_0 \bar{d}^4 + 4mg\bar{d}^2)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

### 思考题：

- 1、若振动过程中气体有少量吸热放热，在  $p$ - $V$  图上画出等温线、绝热线和过程曲线示意图。
- 2、实验中哪个物理量的测量对比热容比的计算误差影响较大？

### 实验讨论：

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等，还可以谈谈实验的心得体会。

## 五 示波器的使用

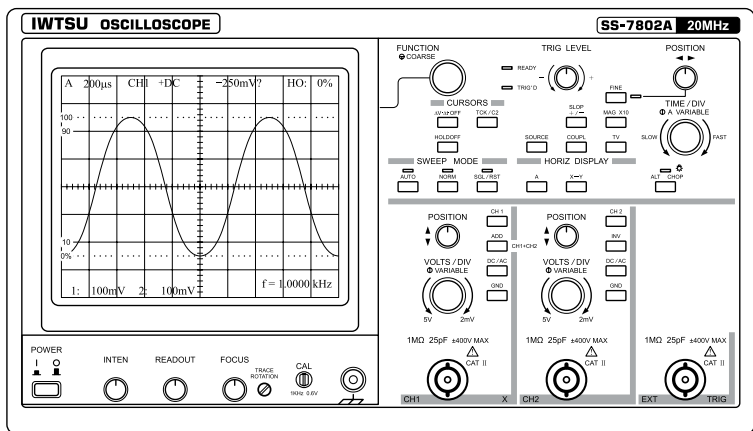
### 实验目的：

- 1、了解示波器的原理。
- 2、掌握示波器和信号发生器的使用方法。

### 实验仪器：

示波器、信号发生器。

### 实验原理：



### 数据记录及处理：

- 1、熟悉示波器的面板功能和基本使用方法。  
参考示波器操作手册 (Oscilloscope SS-7802A Instruction Manual) section 1、section 2。
- 2、观察李萨如图形(Lissajous waveforms)。参考 section 2.8 Horizontal Display。

李萨如图形 (画出示波器 显示的图形)			
$f_x / \text{Hz}$			
$f_y / \text{Hz}$			
$f_x / f_y$			

## 3、光标测量和频率计，参考 section 3。

示波器毫伏表读数 $V/V$		示波器频率计读数 $f/\text{Hz}$	
信号发生器读数 $V_0/V$		信号发生器读数 $f_0/\text{Hz}$	
$E_v = \frac{ V - V_0 }{V_0} \times 100\%$		$E_f = \frac{ f - f_0 }{f_0} \times 100\%$	

**思考题：**

- 1、若显示屏上波形垂直方向幅度太大，如何调节？
- 2、若显示荧光屏上波形的周期数太多，如何调节？
- 3、请查阅相关资料，谈谈什么是同步电路？

**实验讨论：**

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等，还可以谈谈实验的心得体会。

## 六 声速的测定

### 实验目的:

- 1、了解超声波的产生和接收的原理。
- 2、学会用几种方法测量声波在空气中的传播速度  $u$ 。
- 3、学习用逐差法处理数据。

### 实验仪器:

SV-DH-5A 声测试仪、SVX-5 声速测试仪信号源、示波器、温度计等。

### 实验原理:

声波传播的速度  $u$  和其波长  $\lambda$  以及频率  $f$  之间的关系为:  $u = \lambda \cdot f$ ;

时差法测量声速:  $u = \Delta x / \Delta t$ 。

### 数据记录及处理:

- 1、空气中的声速理论值。

室温  $t = \underline{\hspace{1cm}}$  °C; 该温度下水的饱和蒸汽压

$e = \underline{\hspace{1cm}}$  Pa; 室内空气的相对湿度  $H = \underline{\hspace{1cm}}$  %;

$$u_{\text{理论}} = 331.45 \sqrt{1 + \frac{t/^{\circ}\text{C}}{273.15}} \cdot \sqrt{1 + \frac{0.3192eH}{1.013 \times 10^5 \text{ Pa}}} \text{ m/s} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

- 2、调节声速测试仪到最佳工作频率  $f = \underline{\hspace{1cm}}$  Hz。

先按振幅极值法连接线路, 再移动接收面  $S_2$  到刚好接触发射面  $S_1$ , 但不要相互挤压, 然后调节发射频率, 直到接收波形的振幅最大, 此时的发射频率就是压电陶瓷换能器的谐振频率, 即最佳工作频率  $f$ 。

- 3、振幅极值法, 接收波形为振幅极大即逐差为  $\lambda/2$  时, 接收面  $S_2$  的位置  $x_i/\text{mm}$ 。

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$

$$\frac{\bar{\lambda}}{2} = \frac{1}{10} \times \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} |x_{10+i} - x_i| = \quad \text{mm},$$

$$\bar{u} = \bar{\lambda} \cdot f = \quad \text{m/s}, \quad \frac{\bar{u} - u_{\text{理论}}}{u_{\text{理论}}} \times 100\% = \quad \text{。}$$

4、相位比较法, 示波器上出现相同的左斜线 / 即逐差为  $\lambda$  时, 接收面  $S_2$  的位置  $x_i/\text{mm}$ 。

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{10} \times \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} |x_{10+i} - x_i| = \quad \text{mm},$$

$$\bar{u} = \bar{\lambda} \cdot f = \quad \text{m/s}, \quad \frac{\bar{u} - u_{\text{理论}}}{u_{\text{理论}}} \times 100\% = \quad \text{。}$$

5、时差法, 设置声速测试仪信号源的测试方式为脉冲波, 信号源显示的是接收时间  $t$ 。

$S_2$ 的位置 $x_i/\text{mm}$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
接收时间 $t_i/\mu\text{s}$	$t_0$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$

$$\bar{u} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} v_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \frac{x_i - x_0}{t_i - t_0} = \quad \text{m/s},$$

$$\frac{\bar{u} - u_{\text{理论}}}{u_{\text{理论}}} \times 100\% = \quad \text{。}$$

### 思考题:

- 1、固定  $S_1$  和  $S_2$  之间的距离, 改变发射频率, 以此来测量声速, 是否可行?
- 2、比较这三种测量方法, 那种测量方法误差小?

### 实验讨论:

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释, 分析实验误差的主要来源, 对实验仪器和方法的建议以及本

实验在其它方面的应用等，还可以谈谈实验的心得体会。

**附表：水的饱和蒸汽压**

温度/°C	$e/\text{kPa}$	温度/°C	$e/\text{kPa}$	温度/°C	$e/\text{kPa}$	温度/°C	$e/\text{kPa}$
0	0.6105	10	1.2278	20	2.3378	30	4.2428
1	0.6567	11	1.3124	21	2.4865	31	4.4923
2	0.7058	12	1.4023	22	2.6434	32	4.7547
3	0.7579	13	1.4973	23	2.8088	33	5.0301
4	0.8134	14	1.5981	24	2.9833	34	5.3193
5	0.8723	15	1.7049	25	3.1672	35	5.4895
6	0.9350	16	1.8177	26	3.3609	36	5.9412
7	1.0016	17	1.9372	27	3.5649	37	6.2751
8	1.0726	18	2.0634	28	3.7795	38	6.6250
9	1.1478	19	2.1967	29	4.0054	39	6.9877

## 七 弗兰克-赫兹实验

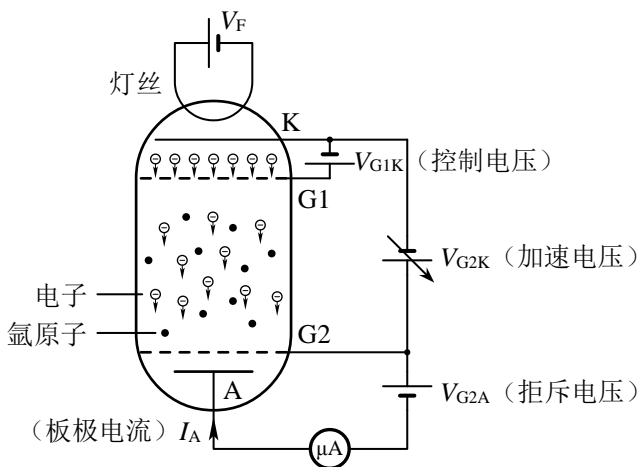
### 实验目的：

- 1、测量气体元素的第一激发电势。
- 2、判断弗兰克-赫兹管中的气体为何种气体。

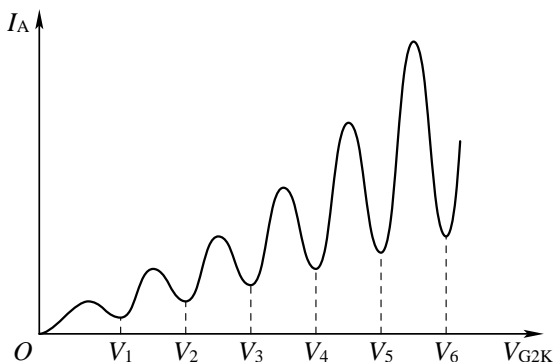
### 实验仪器：

FH-2 智能弗兰克-赫兹实验仪、示波器

### 实验原理：



弗兰克-赫兹管示意图

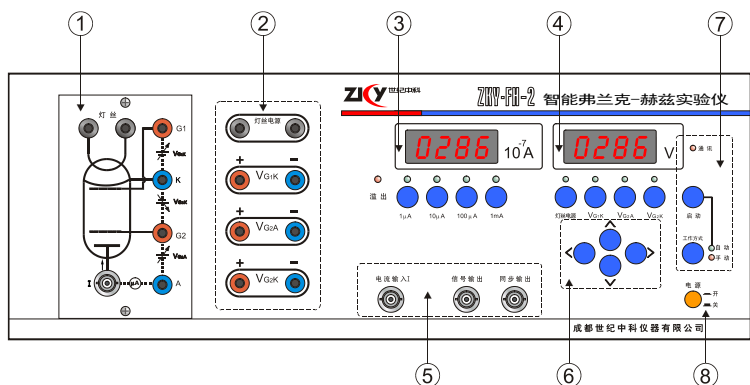


弗兰克-赫兹管  $I_A \sim V_{GK2}$  曲线



## 实验仪面板简介及操作说明

1、弗兰克-赫兹实验仪前面板如下图所示，以功能划分为八个区：



区〈1〉是弗兰克-赫兹管各输入电压连接插孔和板极电流输出插座；

区〈2〉是弗兰克-赫兹管所需激励电压的输出连接插孔，其中左侧输出孔为正极，右侧为负极；

区〈3〉是测试电流指示区：

四位七段数码管指示电流值；

四个电流量程档位选择按键用于选择不同的最大电流量程档；每一个量程选择同时备有一个选择指示灯指示当前电流量程档位；

区〈4〉是测试电压指示区：

四位七段数码管指示当前选择电压源的电压值；

四个电压源选择按键用于选择不同的电压源；每一个电压源选择都备有一个选择指示灯指示当前选择的电压源；

区〈5〉是测试信号输入输出区：

电流输入插座输入弗兰克-赫兹管板极电流；

信号输出和同步输出插座可将信号送示波器显示；

区〈6〉是调整按键区，用于：

改变当前电压源电压设定值；

设置查询电压点；

区〈7〉是工作状态指示区：

通信指示灯指示实验仪与计算机的通信状态；

启动按键与工作方式按键共同完成多种操作；

区〈8〉是电源开关：

## 2、弗兰克－赫兹实验仪后面板说明

弗兰克－赫兹实验仪后面板上有交流电源插座，插座上自带有保险管座；

如果实验仪已升级为微机型，则通信插座可联计算机，否则，该插座不可使用。

## 实验内容及步骤

### 1、准备

#### 1.1 熟悉实验仪使用方法

1.2 按照面板标示连接弗兰克赫兹管各组工作电源线，检查无误后开机。

开机后的初始状态如下：

●实验仪的“1mA”电流档位指示灯亮，表明此时电流的量程为1mA档；电流显示值为  $0000. \times 10^{-7} \text{A}$ ；

●实验仪的“灯丝电压”档位指示灯亮，表明此时修改的电压为灯丝电压；电压显示值为 000.0V；最后一位在闪动，表明现在修改位为最后一位；

●“手动”指示灯亮。表明仪器工作正常。

### 2、氩元素的第一激发电势测量

#### 2.1 手动测试

a、设置仪器为“手动”工作状态，按“手动/自动”键，“手动”指示灯亮。

b、设定电流量程（电流量程可参考机箱盖上提供的数据）按下相应电流量程键，对应的量程指示灯点亮。

c、设定电压源的电压值（设定值可参考机箱盖上提供

的数据)，用  $\uparrow / \downarrow$ ， $\leftarrow / \rightarrow$  键完成，需设定的电压源有：灯丝电压  $V_F$ 、第一加速电压  $V_{G1K}$ 、拒斥电压  $V_{G2A}$ 。  
d、按下“启动”键，实验开始。用  $\uparrow / \downarrow$ ， $\leftarrow / \rightarrow$  键完成  $V_{G2K}$  电压值的调节，从 0.0V 起，按步长 1V（或 0.5V）的电压值调节电压源  $V_{G2K}$ ，同步记录  $V_{G2K}$  值和对应的  $I_A$  值，同时仔细观察弗兰克-赫兹管的板极电流值  $I_A$  的变化（可用示波器观察）。切记为保证实验数据的唯一性  $V_{G2K}$  电压必须从小到大单向调节，不可在过程中反复；记录完成最后一组数据后，立即将  $V_{G2K}$  电压快速归零。

e、重新启动，在手动测试的过程中，按下启动按键， $V_{G2K}$  的电压值将被设置为零，内部存储的测试数据被清除，示波器上显示的波形被清除，但  $V_F$ 、 $V_{G1K}$ 、 $V_{G2A}$ 、电流档位等的状态不发生改变。这时，操作者可以在该状态下重新进行测试，或修改状态后再进行测试。

**建议：手动测试  $I_A$ - $V_{G2K}$ ，进行一次或修改  $V_F$  值再进行一次。**

## 2.2 自动测试

智能弗兰克-赫兹实验仪除可以进行手动测试外，还可以进行自动测试。进行自动测试时，实验仪将自动产生  $V_{G2K}$  扫描电压，完成整个测试过程；将示波器与实验仪相连接，在示波器上可看到弗兰克-赫兹管板极电流随  $V_{G2K}$  电压变化的波形。

### a、自动测试状态设置

自动测试时  $V_F$ 、 $V_{G1K}$ 、 $V_{G2A}$  及电流档位等状态设置的操作过程，弗兰克-赫兹管的连线操作过程与手动测试操作过程一样。

### b、 $V_{G2K}$ 扫描终止电压的设定

进行自动测试时，实验仪将自动产生  $V_{G2K}$  扫描电压。实验仪默认  $V_{G2K}$  扫描电压的初始值为零， $V_{G2K}$  扫

描电压大约每 0.4 秒递增 0.2V。直到扫描终止电压。

要进行自动测试，必须设置电压  $V_{G2K}$  的扫描终止电压。首先，将“手动 / 自动”测试键按下，自动测试指示灯亮；按下  $V_{G2K}$  电压源选择键， $V_{G2K}$  电压源选择指示灯亮；用  $\uparrow / \downarrow$ ， $\leftarrow / \rightarrow$  键完成  $V_{G2K}$  电压值的具体设定。 $V_{G2K}$  设定终止值建议以不超过 80V 为好。

### c、自动测试启动

将电压源选择选为  $V_{G2K}$ ，再按面板上的“启动”键，自动测试开始。在自动测试过程中，观察扫描电压  $V_{G2K}$  与弗兰克—赫兹管板极电流的相关变化情况。

（可通过示波器观察弗兰克—赫兹管板极电流  $I_A$  随扫描电压  $V_{G2K}$  变化的输出波形）在自动测试过程中，为避免面板按键误操作，导致自动测试失败，面板上除“手动 / 自动”按键外的所有按键都被屏蔽禁止。

### d、自动测试过程正常结束

当扫描电压  $V_{G2K}$  的电压值大于设定的测试终止电压值后，实验仪将自动结束本次自动测试过程，进入数据查询工作状态。

测试数据保留在实验仪主机的存贮器中，供数据查询过程使用，所以，示波器仍可观测到本次测试数据所形成的波形。直到下次测试开始时才刷新存贮器的内容。

### e、自动测试后的数据查询

自动测试过程正常结束后，实验仪进入数据查询工作状态。这时面板按键除测试电流指示区外，其他都已开启。自动测试指示灯亮，电流量程指示灯指示于本次测试的电流量程选择档位；各电压源选择按键可选择各电压源的电压值指示，其中  $V_F$ 、 $V_{G1K}$ 、 $V_{G2A}$  三电压源只能显示原设定电压值，不能通过按键改变相应的电压值。用  $\uparrow / \downarrow$ ， $\leftarrow / \rightarrow$  键改变电压源  $V_{G2K}$  的指示值，

就可查阅到在本次测试过程中, 电压源  $V_{G2K}$  的扫描电压值为当前显示值时, 对应的弗兰克-赫兹管板极电流值  $I_A$  的大小, 记录  $I_A$  的峰、谷值和对应的  $V_{G2K}$  值 (为便于作图, 在  $I_A$  的峰、谷值附近需多取几点)。

#### f、中断自动测试过程

在自动测试过程中, 只要按下“手动 / 自动键”, 手动测试指示灯亮, 实验仪就中断了自动测试过程, 回复到开机初始状态。所有按键都被再次开启工作。这时可进行下一次的测试准备工作。本次测试的数据依然保留在实验仪主机的存储器中, 直到下次测试开始时才被清除。所以, 示波器仍会观测到部分波形。

#### g、结束查询过程回复初始状态

当需要结束查询过程时, 只要按下“手动 / 自动”键, 手动测试指示灯亮, 查询过程结束, 面板按键再次全部开启。原设置的电压状态被清除, 实验仪存储的测试数据被清除, 实验仪回复到初始状态。

**建议:**“自动测试”应变化两次  $V_F$  值, 测量两组  $I_A$ - $V_{G2K}$  数据。若实验时间允许, 还可变化  $V_{G1K}$ 、 $V_{G2A}$  进行多次  $I_A$ - $V_{G2K}$  测试。

3、用示波器观察电流  $I_A$  随扫描电压  $V_{G2K}$  变化的输出波形。将信号输出接入示波器通道 (CH1), 将同步输出接入示波器外部同步通道 (EXT TRIG), 开启时域模式 (A), 观察波形。

#### 数据记录及处理:

- 1、在坐标纸上描绘各组  $I_A$ - $V_{G2K}$  数据对应曲线。
- 2、计算每两个相邻峰或谷所对应的  $V_{G2K}$  之差值  $\Delta V_{G2K}$ , 并求出其平均值  $\bar{U}_0$ , 将实验值  $\bar{U}_0$  与氩的第一激发电势  $U_0 = 11.61V$  比较, 计算相对误差, 并写出结果表达式。
- 3、请对不同工作条件下的各组曲线和对应的第一激

发电势进行比较, 分析哪些量发生了变化, 哪些量基本不变, 为什么?

### 思考题:

- 1、 弗兰克-赫兹管中的  $V_F$ 、 $V_{G2K}$ 、 $V_{G2K}$ 、 $V_{G2A}$  分别起什么作用?
- 2、 实验中, 第一谷值电压为何不等于第一激发电势?

### 实验讨论:

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释, 分析实验误差的主要来源, 对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等, 还可以谈谈实验的心得体会。

## 八 用迈克耳逊干涉仪测量光源波长

### 实验目的:

- 3、用迈克耳逊干涉仪观察干涉条纹。
- 4、测量激光源波长 $\lambda$ 。

### 实验仪器:

SGM-1 型迈克耳逊干涉仪。

### 实验原理:

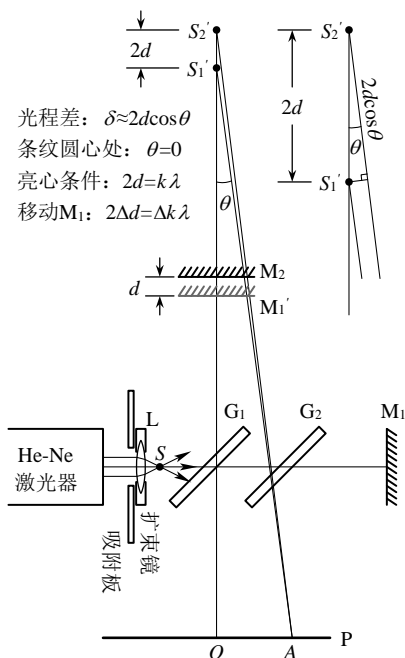
取 $n_{\text{空气}} = 1$ ,

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{\Delta k} = \frac{2\Delta x}{20\Delta k}, \text{ 注意}$$

$M_1$  移动距离  $\Delta d$  是  $M_1$  位置读数差  $\Delta x$  的 1/20。

### 仪器操作方法:

- 1、挪开扩束镜 L, 开启激光器, 调节激光器高度及水平, 使激光束两次穿过铜柱体小孔后, 投射到平面镜  $M_1$ 。
- 2、转动平面镜  $M_1$  和  $M_2$  背面的两个倾角调节螺钉, 直到光屏 P 上最亮的两组光斑完全重合。:::→:::
- 3、调节扩束镜 L, 使激光束穿过扩束镜 L 后, 投射到平面镜  $M_1$ 、 $M_2$  中部, 则激光和干涉图样也会落在光屏中部。若看不到干涉图样, 先挪开扩束镜 L, 再返回到 2。



- 4、微调平面镜  $M_1$  或者  $M_2$  背面的倾角调节螺钉, 使干涉圆环的环心落在光屏中部。
- 5、为了防止出现**回程误差**, 必须朝一个方向转动  $M_1$  位置调节手轮, 同时观察干涉圆环的变化。每冒出 (缩进) 50 个干涉圆环, 记录一次  $M_1$  位置读数, 直到第 450 环为止。

### 数据记录及处理:

冒出(缩进)干涉圆环数	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
$M_1$ 位置读数 $x/\text{mm}$										

- 4、 $x$  是单次测量量, 只计算 B 类不确定度, 由读数装置的误差得  $\Delta_x = \Delta_B = 0.004\text{mm}$ 。
- 5、 $\Delta k = 250$  时, 对应的  $M_1$  位置读数差  $\Delta x$  的平均值:

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta x_i$$

$$= \frac{1}{5} (|x_{250} - x_0| + |x_{300} - x_{50}| + |x_{350} - x_{100}| + |x_{400} - x_{150}| + |x_{450} - x_{200}|)$$

$$\Delta x \text{ 的 A 类不确定度: } \Delta_A = \frac{S_{\Delta x}}{\sqrt{n}} t_{0.95}(n-1);$$

$\Delta x$  的 B 类不确定度来原于  $x$ , 且:

$$\Delta_B = \sqrt{2\Delta_x^2} = \sqrt{2} \times 0.004\text{mm};$$

$$\Delta x \text{ 的合成不确定度: } \Delta_{\Delta x} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}。$$

6、 $\bar{\lambda} = \frac{2\overline{\Delta x}}{20\Delta k} = \quad \text{nm},$

$$\Delta_{\lambda} = \frac{d(\lambda)}{d(\Delta x)} \Delta_{\Delta x} = \frac{2}{20\Delta k} \Delta_{\Delta x} = \frac{2}{20 \times 250} \Delta_{\Delta x} = \quad \text{nm}。$$

7、波长:  $\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta_{\lambda}, \quad p \geq 0.95。$

### 思考题:

- 3、光屏上干涉条纹的最高级次在哪里?
- 4、朝一个方向转动  $M_1$  调节手轮, 发现干涉圆环一直



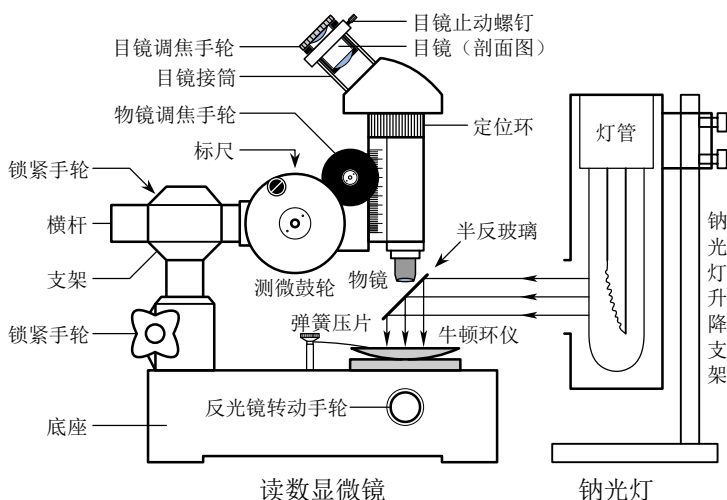
缩进突然变成不断冒出，解释原因。

5、测量数据中， $M_1$  位置读数差  $\Delta x$  的不确定性主要来源是什么？

### 实验讨论：

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等，还可以谈谈实验的心得体会。

## 九 测量平凸透镜的曲率半径



### 实验目的:

- 1、观察光的等厚干涉现象，了解干涉条纹特点。
- 2、测量牛顿环仪中平凸透镜的曲率半径  $R$ 。

### 实验仪器:

牛顿环仪、读数显微镜、钠光灯。

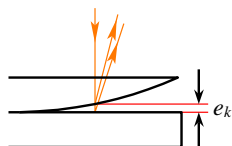
### 实验原理:

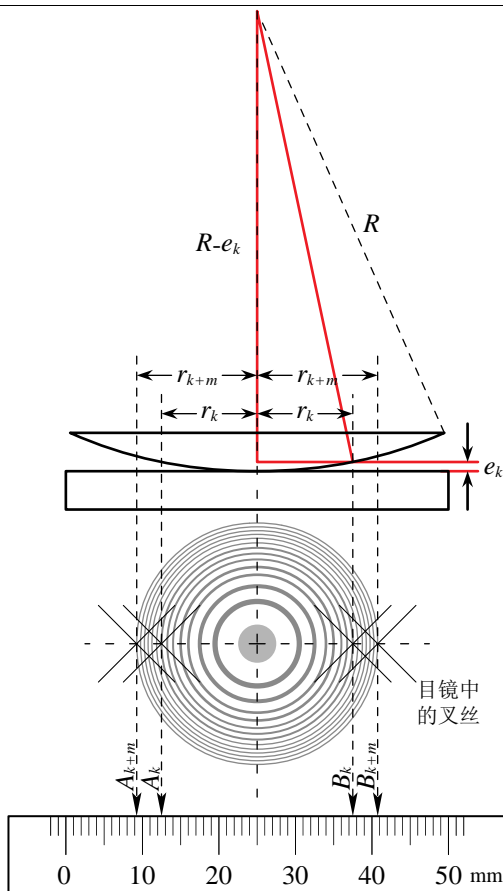
牛顿环仪中空气膜上下表面两次反射光的光程差  $\delta$  与干涉极值条件:

$$\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & k = 1, 2, 3, \dots, \text{明纹} \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & k = 0, 1, 2, 3, \dots, \text{暗纹} \end{cases}$$

根据等厚干涉原理，干涉条纹为同心圆环，称为牛顿环，各级牛顿环对应的空气膜厚度为:

$$e_k = \begin{cases} \frac{\lambda}{2n} \left(k - \frac{1}{2}\right) & k = 1, 2, 3, \dots, \text{明纹} \\ \frac{k\lambda}{2n} & k = 0, 1, 2, 3, \dots, \text{暗纹} \end{cases}$$





设平凸透镜的曲率半径为  $R$ ，牛顿环半径为  $r_k$ ，则：

$$R^2 = r_k^2 + (R - e)^2, \quad r_k^2 + e^2 = 2Re$$

$$r_k \approx \sqrt{2Re_k} = \begin{cases} \sqrt{\frac{(2k-1)R\lambda}{2n}} & k=1,2,3,\dots, \text{明纹} \\ \sqrt{\frac{kR\lambda}{n}} & k=0,1,2,3,\dots, \text{暗纹} \end{cases}$$

则， $r_{k+m}^2 - r_k^2 = \frac{mR\lambda}{n}$ ；取空气折射率  $n=1$ ，则：

$$R = \frac{r_{k+m}^2 - r_k^2}{m\lambda} = \frac{(r_{k+m} + r_k)(r_{k+m} - r_k)}{m\lambda}$$

上图中  $A$ 、 $B$  表示叉丝交点与各级暗环**重合**时的刻度，则：

$$R = \frac{(A_{k+m} - B_k)(A_{k+m} - A_k)}{m\lambda} = \frac{(B_{k+m} - A_k)(B_{k+m} - B_k)}{m\lambda}$$

### 实验数据记录及处理：

为了防止出现**回程误差**，要一趟（鼓轮旋转方向不变）测完所有数据（ $A_{41} \rightarrow A_{40} \rightarrow A_{26} \rightarrow B_{26} \rightarrow B_{40}$ ）表：叉丝交点与各级暗环重合时的刻度和  $R_i$ ，单位：mm。

$A_{40}$	$A_{39}$	$A_{38}$	$A_{37}$	$A_{36}$	$A_{30}$	$A_{29}$	$A_{28}$	$A_{27}$	$A_{26}$	$R_{1\dots}$
										...
$B_{26}$	$B_{27}$	$B_{28}$	$B_{29}$	$B_{30}$	$B_{36}$	$B_{37}$	$B_{38}$	$B_{39}$	$B_{40}$	$R_{6\dots}$
										...

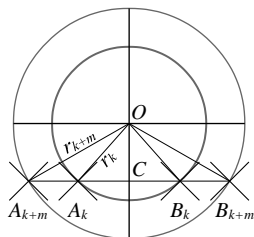
钠光的平均波长： $\lambda=589.3\text{nm}$ ；取  $m=10$  分别计算  $R_i[R_1(A_{40}、A_{30}、B_{30})\dots R_6(B_{40}、B_{30}、A_{30})\dots]$ ； $R_i$  是对同一个物理量的多次测量，可以计算 A 类不确定度；同时， $R_i$  是间接测量量，其 B 类不确定度来源于  $A_{k+m}$ 、 $A_k$ 、 $B_{k+m}$ 、 $B_k$ ，但是比 A 类不确定度小很多，可以忽略。

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i = \underline{\hspace{1cm}} \text{mm}; \quad \Delta_R \approx \Delta_A = \frac{S_R}{\sqrt{n}} t_{0.95}(n-1) = \underline{\hspace{1cm}} \text{mm}。$$

曲率半径： $R = \bar{R} \pm \Delta_R$ ， $p \approx 0.95$ 。

### 思考题：

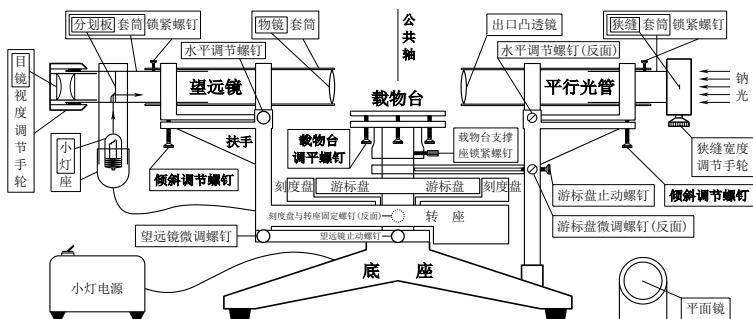
- 1、证明：叉丝交点不过环心，不影响曲率半径  $R$  的计算结果。
- 2、测量数据中， $R$  的不确定性主要来源是什么？与牛顿环仪上三颗螺钉的松紧有关吗？



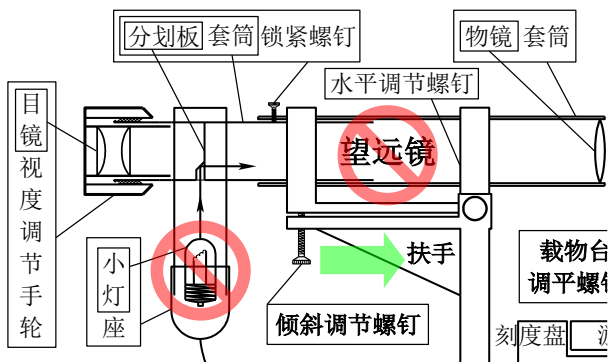
### 实验讨论：

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等，还可以谈谈实验的心得体会。

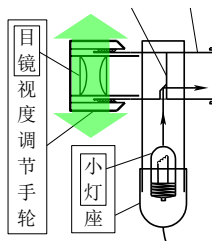
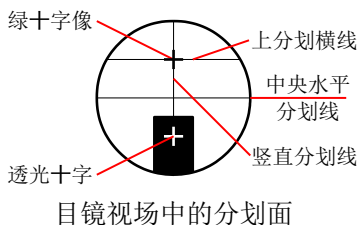
## 十 分光计的调节



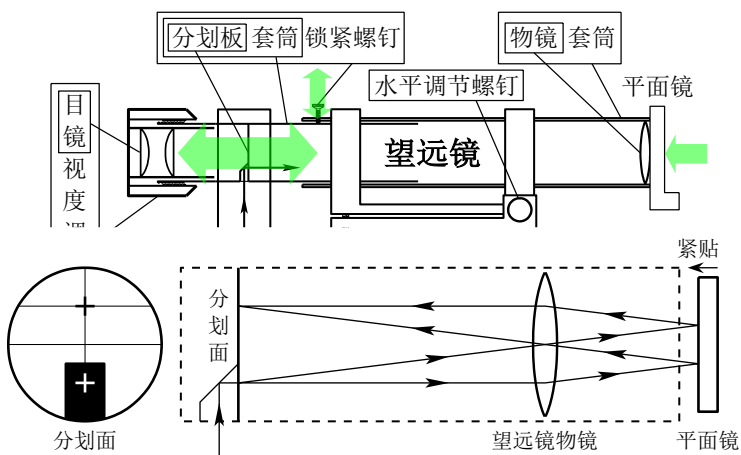
### 一 望远镜的调节 (必须手持扶手去转动望远镜, 不要抓小灯座或镜筒去转动望远镜!):



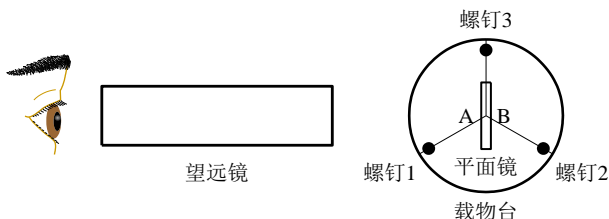
- 1、屈光度调节: 转动目镜视度调节手轮, 即调节目镜到分划板的距离, 当看到的分划线是最清晰的即可, 以后不要再转动此手轮。分划板上刻有分划线的一面称为分划面。



- 2、将分划面移至物镜焦平面：开小灯，手握平面镜紧贴物镜口，松开分划板套筒锁紧螺钉，推拉套筒，直到目镜中的绿十字像最清晰且与分划面无视差，然后锁紧套筒。如下图所示，透光十字是刻在分划面上，当分划面在物镜焦平面，透光十字发出的光线经过物镜射出是平行光束，再由平面镜反射回来还是平行光束，射入物镜后又清晰聚焦于焦平面（分划面）。

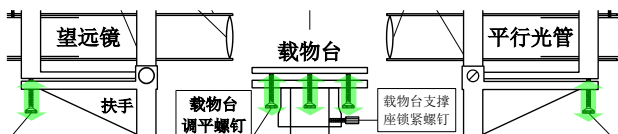


- 3、将平面镜按下图所示放置在载物台中心，载物台上的3条分划线必须对齐下面3颗螺钉，平面镜底边和螺钉3对应的分划线重合。



- 4、粗调望远镜和平行光管的光轴、载物台，使它们垂直于分光计的公共轴：俯身目测，需要调节的螺钉是望远镜和平行光管的倾斜调节螺钉、载物台下面

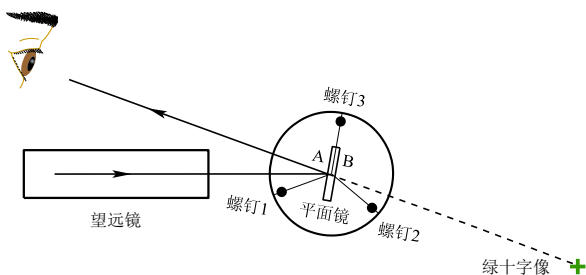
### 3 颗调平螺钉。



### 5、细调望远镜的光轴垂直于公共轴：

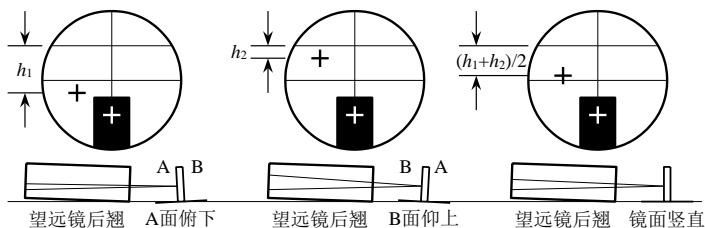


(1) 在平面镜两面同时找到绿十字像：**转动游标盘**（使载物台跟着一起转动，**不要直接转动载物台**），当平面镜 A、B 两面分别正对望远镜时，在目镜中找到绿十字像。若看不到绿十字像，请返回第 4 步重新做粗调。**若还是看不到**，按下图所示，稍微转动游标盘，使平面镜不正对望远镜，直接用眼睛从平面镜里找到绿十字像，这时眼睛高度可能比目镜中心高度偏高（偏低），则绿十字像偏低（偏高）。转动望远镜倾斜调节螺钉和载物台下面螺钉 1（**分半调节**），使得绿十字像上移（下移），同时跟踪绿十字像，直到眼睛与目镜中心等高，再使平面镜正对望远镜，就可以在目镜中看到绿十字像。转动游标盘  $180^\circ$ ，用同样的办法在平面镜 B 面也找到绿十字像。

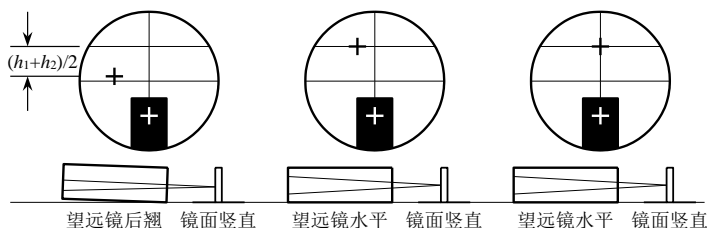


(2) 调节载物台，使平面镜镜面平行于公共轴：若平面

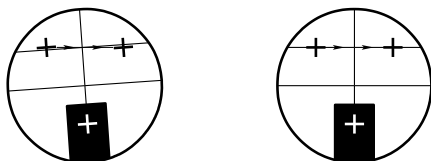
镜 A 面正对望远镜时绿十字像和上分划横线高度差为  $h_1$ , B 面正对望远镜时此高度差为  $h_2$ 。调节载物台下面的螺钉 1 或 2, 使一面正对望远镜时此高度差为  $(h_1+h_2)/2$ , 则另一面自然变为  $(h_1+h_2)/2$ 。



(3) 调节望远镜光轴垂直于公共轴：只转动望远镜倾斜调节螺钉, 使绿十字像与上分划横线重合, 再微调游标盘, 绿十字像会沿着上分划横线平移到和分划线上交点重合。此时透光十字 (物) 和绿十字 (像) 关于望远镜的光轴对称, 则望远镜光轴垂直于平面镜镜面和公共轴。



(4) 调节分划面的竖直分划线平行于公共轴：左右转动游标盘时 (平面镜跟着转动), 绿十字像紧贴上分划横线平移, 则竖直分划线平行于公共轴。否则, 需要松开分划板套筒锁紧螺钉, 稍微转动一下分划板套筒, 使得左右转动游标盘时绿十字像紧贴上分划横线平移, 然后锁紧套筒。

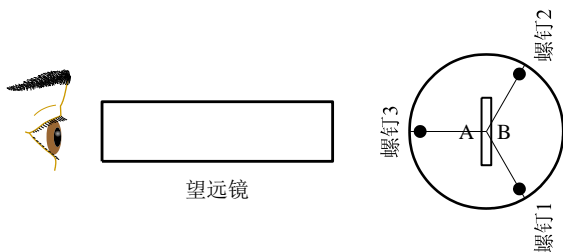




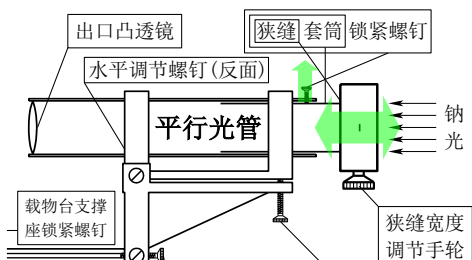
## 二 调节三棱镜两个光学面的法线或载物台垂直于公共轴 (以调好的望远镜为参照):

方法 1: 利用三棱镜调节, 适用于暗室环境 (略)。

方法 2: 利用平面镜调节 (设平面镜的镜面垂直于载物台台面): 在【一-5-(2)】中, 使平面镜镜面平行于公共轴, 只是把螺钉 1 和 2 调到等高了。螺钉 3 可能和 1、2 不等高, 虽然不影响前面的调节和观测结果, 但是会影响载物台的水平。转动游标盘, 使螺钉 3 正对望远镜, 同时放置平面镜正对望远镜, 粗调螺钉 3, 使载物台垂直于分光计的公共轴; 左右转动游标盘, 找到绿十字像, 然后细调螺钉 3, 使绿十字像与上分划横线重合。

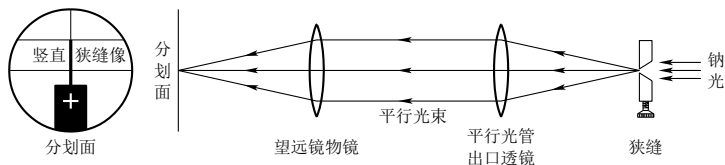


## 三 平行光管的调节 (以调好的望远镜为参照, 不要再调节望远镜的目镜、分划板套筒和倾斜调节螺钉等, 但可以绕公共轴转动):

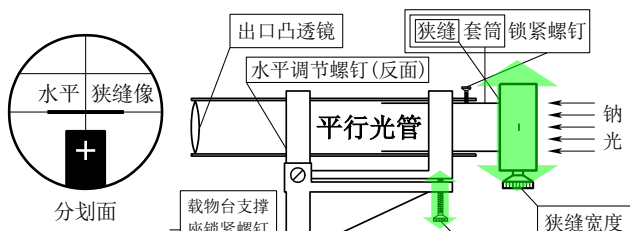


- 1、调节平行光管产生平行光束 (调节原理是将平行光管的进光狭缝移至出口凸透镜的焦平面): 打开钠光灯, 照亮狭缝。将望远镜转至正对平行光管就可

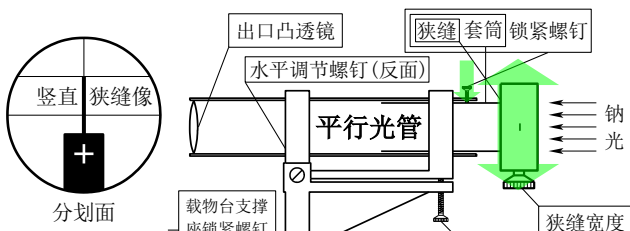
以看到狭缝像 (黄线), 松开狭缝套筒锁紧螺钉, 推拉套筒, 直到狭缝像最清晰且与分划面无视差 (平行光射入物镜后清晰聚焦于分划面), 然后转动狭缝宽度调节手轮, 使狭缝像宽度看起来约为 1mm。



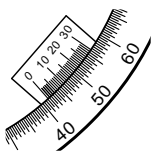
- 2、调节平行光管的光轴垂直于公共轴: 转动狭缝套筒使狭缝像呈水平状态, 转动平行光管倾斜调节螺钉, 使狭缝像和分划面中央水平分划线重合。可以证明, 此时平行光管的光轴就垂直于公共轴。



- 3、将狭缝转至竖直状态, 转动望远镜使竖直分划线平移到和狭缝像重合, 再锁紧狭缝套筒。



#### 四 分光计的读数



分光计的读数原理和游标卡尺相同, 为了消除偏心误差, 需要读取两个游标位置, 左图为其中一个游标, 其读数为  $41.5^{\circ}$ 。

# 十一 用分光计测量介质折射率

## 实验目的:

- 1、用最小偏向角法测量三棱镜的折射率  $n$ 。
- 2、掌握分光计的使用方法。

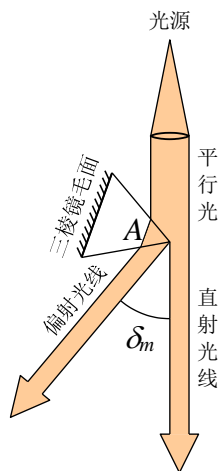
## 实验仪器:

三棱镜、分光计、钠光灯或汞灯。

## 实验原理:

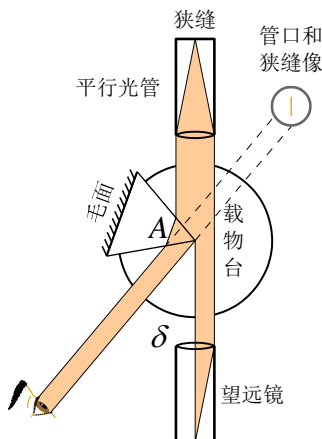
当一束平行光射入三棱镜的顶角一边时, 由于折射, 从顶角另一边射出的光线 (**偏射光线**) 会偏离原平行光 (**直射光线**) 的方向。定义偏射光线与直射光线之间的夹角为**偏向角**  $\delta$ , 旋转三棱镜以改变入射角, 可使  $\delta$  达到最小值  $\delta_m$ , 若棱镜的顶角为  $A$ , 折射率为  $n$ , 则:

$$n = \frac{\sin \frac{A + \delta_m}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

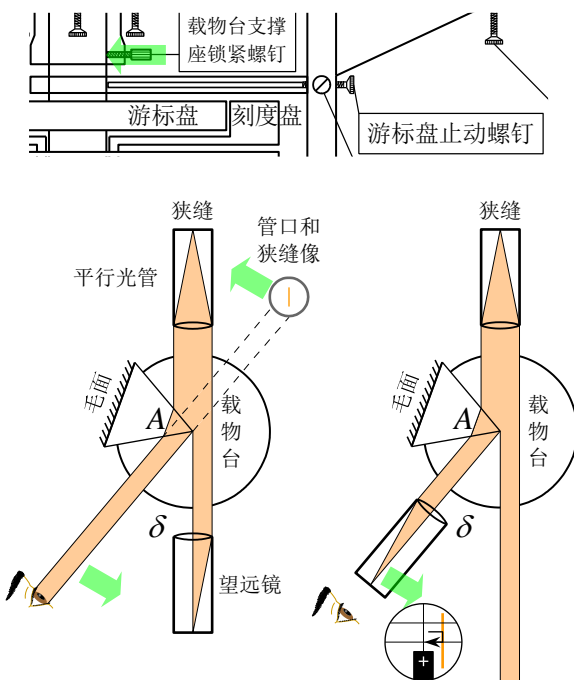


## 最小偏向角的测量如下:

- 1、**调节好分光计:** 调节分划面的竖直分划线和狭缝平行于公共轴。
- 2、**放置好三棱镜:** 按右图所示将三棱镜平放在载物台左半部位, 则狭缝平行光部分经过、部分越过三棱镜, 分别形成偏射光线和直射光线。



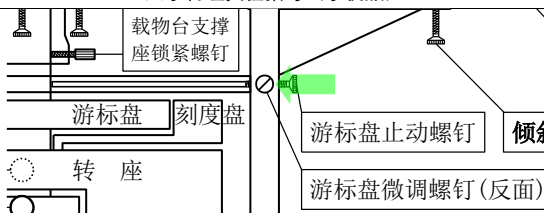
- 3、**用肉眼粗略寻找最小偏向位置**：如图所示，直接用肉眼观察三棱镜的出射光面，首先在光面中找到平行光管的**圆形管口像**和其内**狭缝像（黄线）**，然后转动游标盘（使三棱镜跟着一起转动以改变入射角），若狭缝像左移则偏向角 $\delta$ 减小，继续转动游标盘，使狭缝像平移到**极左**，则狭缝像位于最小偏向位置，固定游标盘，将望远镜转至眼前，用目镜观察狭缝像。



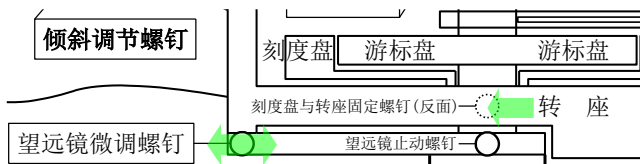
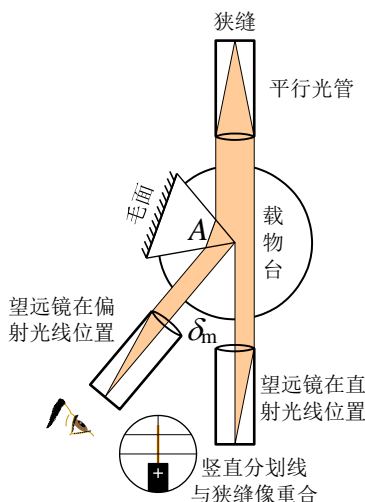
用肉眼粗略寻找

用望远镜精确寻找

- 4、**用望远镜精确寻找最小偏向位置**：由透镜成像原理可知，通过目镜与直接透过三棱镜看到的现象是反的，即狭缝像右移时偏向角 $\delta$ 减小。转动游标盘，使狭缝像平移到**极右**，立即**锁紧游标盘**，然后用游标盘微调螺钉精确找到移向改变的位置。



- 5、**测量最小偏向角 $\delta_m$** ：转动望远镜（使刻度盘跟着一起转动），使竖直分划线与最小偏向位置的狭缝像重合（先大致重合、再锁紧望远镜、然后微调以精确重合），同时记录两游标读数（ $\theta_{偏}$ 、 $\theta_{偏}'$ ）；将望远镜转至和平行光管正对，再使竖直分划线与狭缝像重合（先...、再...、然后...），同时记录两游标读数（ $\theta_{直}$ 、 $\theta_{直}'$ ）；然后计算 $\delta_m$ 。



- 6、单独转动一下**刻度盘**，再和**转座**固定在一起；重复 5（或 2~5），测量下一组数据。

**数据记录及处理：** ( $1^\circ=60'$ ,  $1'=60''$ , 刻度盘最小分度为  $0.5^\circ$ , 游标最小分度为  $1'$ 。)

测量次序	第一组		第二组		第三组		第四组	
望远镜在 <b>偏</b> 射光线位置	$\theta_{\text{偏}}$	$\theta'_{\text{偏}}$						
望远镜在 <b>直</b> 射光线位置	$\theta_{\text{直}}$	$\theta'_{\text{直}}$						
$\delta_m=( \theta_{\text{偏}}-\theta_{\text{直}} + \theta'_{\text{偏}}-\theta'_{\text{直}} )/2$								

1、 $\theta$  是单次测量量，只计算 B 类不确定度，由分光计的仪器误差得： $\Delta_\theta = \Delta_B = \Delta_{\text{仪}} = 1'$ 。

2、 $\bar{\delta}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{mi}$ ； $\delta_m$  是间接测量量，多次测量的 A 类

不确定度： $\Delta_A = \frac{S_{\delta_m}}{\sqrt{n}} t_{0.95}(n-1)$ ，

B 类不确定度来源于  $\theta$ ，且  $\Delta_\theta = \frac{1}{2} \sqrt{4\Delta_\theta^2} = \Delta_\theta = 1'$ ，

$\Delta_{\delta_m} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$  (以弧度作单位)。

3、三棱镜顶角  $A = 60^\circ$ ， $\bar{n} = \frac{\sin(30^\circ + 0.5\bar{\delta}_m)}{\sin 30^\circ}$ ，

$\Delta_n = \left| \frac{dn}{d\delta_m} \right| \Delta_{\delta_m} = \frac{\cos(30^\circ + 0.5\bar{\delta}_m)}{2\sin 30^\circ} \Delta_{\delta_m}$ 。

4、三棱镜的折射率： $n = \bar{n} \pm \Delta_n$ ， $p \geq 0.95$ 。

### 思考题：

1、实验中三棱镜没有被放在载物台中心影响测量吗？(入射光为平行光束)

2、测量数据中，最小偏向角  $\delta_m$  的不确定性主要来源是什么？

### 实验讨论：

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等，还可以谈谈实验的心得体会。

## 十二 用分光计测量光栅常数

### 实验目的：

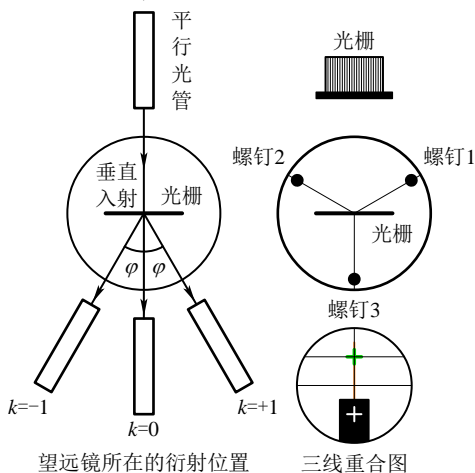
- 1、测量光栅常数，表示为 1mm 内的刻痕条数  $n$ 。
- 2、掌握分光计的使用方法。

### 实验仪器：

光栅、分光计、钠光灯或汞灯。

### 实验原理：

$$1\text{mm}/n = d = k\lambda/\sin\varphi, \quad k=0, \pm 1, \pm 2, \dots。$$



- 1、**调节好分光计：**注意调节分划面的竖直分划线和狭缝平行于公共轴；参考分光计的调节一-5-(4)、三-3。
- 2、**调节望远镜的光轴和平行光管的光轴平行：**调节竖直分划线和狭缝像重合即可（先大致重合，再锁紧望远镜，然后微调以精确重合）。
- 3、**调节光栅平面垂直于平行光管的光轴：**将光栅如图所示放置在载物台上，并且让镀膜面向着平行光管，光滑面向着望远镜。先转动游标盘，当光滑面正对望远镜时，反射的绿十字像就会落在竖直分划线附近，再锁紧游标盘，然后微调游标盘和载物台

下的螺钉 3, 使绿十字像和分划线上交点精确重合, 此时, 十字线、分划线、狭缝线**三线重合**。

- 4、**调节光栅的刻痕平行于公共轴**: 左右转动望远镜, 观察狭缝光的各级衍射谱线的高度是否变化, 可以调节螺钉 1 或 2, 使各级衍射谱线的高度不变, 则刻痕平行于公共轴。
- 5、左右转动望远镜 (使刻度盘跟着一起转动), 寻找各级衍射谱线, 测量它们的衍射角  $\varphi$ 。
- 6、单独转动一下**刻度盘**, 再和**转座**固定在一起; 重复 5, 测量下一组数据。

**数据记录及处理**: ( $1^\circ=60'$ ,  $1'=60''$ , 刻度盘最小分度为  $0.5^\circ$ , 游标最小分度为  $1'$ 。) 光源波长  $\lambda = \underline{\hspace{2cm}}$  nm。

测量次序 $i$	第一组			第二组			第三组		
衍射级次 $k$	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
游标 1 读数 $\theta_k$ , 格式: $^\circ\#'$									
游标 2 读数 $\theta'_k$ , 格式: $^\circ\#'$									
$\varphi_i = \frac{1}{2}( \theta_{\pm 1} - \theta_0  +  \theta'_{\pm 1} - \theta'_0 )$	$\varphi_1$		$\varphi_2$	$\varphi_3$		$\varphi_4$	$\varphi_5$		$\varphi_6$

- 1、 $\theta$  是单次测量量, 只计算 B 类不确定度, 由分光计的仪器误差得:  $\Delta_\theta = \Delta_B = \Delta_{\text{仪}} = 1'$ 。

- 2、 $\bar{\varphi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i$ ;  $\varphi$  是间接测量量, 多次测量的 A 类不

确定度:  $\Delta_A = \frac{S_\varphi}{\sqrt{n}} t_{0.95}(n-1)$ ,

B 类不确定度来源于  $\theta$ , 且  $\Delta_B = \frac{1}{2} \sqrt{4\Delta_\theta^2} = \Delta_\theta$ ,

$\Delta_\varphi = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$  (以弧度作单位)。

- 3、 $\bar{n} = \frac{\sin \bar{\varphi}}{|\pm 1| \lambda} \times 1\text{mm} = \frac{1\text{mm}}{\lambda} \cdot \sin \bar{\varphi} = \underline{\hspace{2cm}}$  条;

$\Delta_n = \frac{1\text{mm}}{\lambda} \cdot (\cos \bar{\varphi}) \cdot \Delta_\varphi = \underline{\hspace{2cm}}$  条。



4、光栅 1mm 内的刻痕条数:  $n = \bar{n} \pm \Delta_n$ ,  $p \geq 0.95$ 。

### 思考题:

- 1、光栅平面不垂直于平行光管的光轴, 是否影响光栅常数的测量结果?
- 2、测量数据中, 衍射角  $\varphi$  的不确定性主要来源是什么?

### 实验讨论:

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释, 分析实验误差的主要来源, 对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等, 还可以谈谈实验的心得体会。

## 十三 分压电路特性曲线的测定

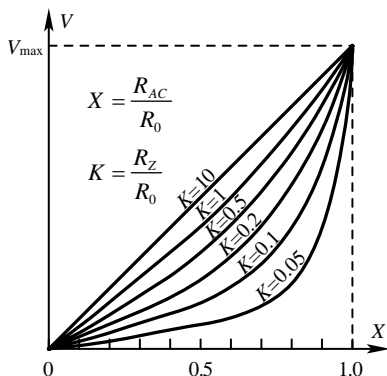
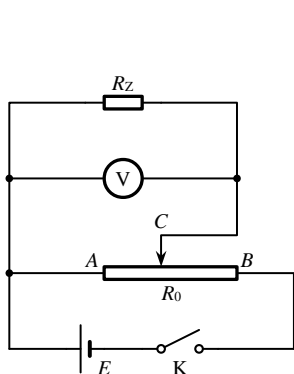
### 实验目的：

- 1、分压电路的特性研究。
- 2、选择合适的分压电阻参数  $K$ 。

### 实验仪器：

电阻箱、滑线变阻器、伏特表、可调稳压电源（实验中电压的读数以伏特表为准）。

### 实验原理：



### 数据记录及处理：

- 1、滑线变阻器的电阻值  $R_0=2000\Omega$ ，电源输出电压  $E$  不超过 10V，实验中要卧放伏特表（避免重力矩影响指针的偏转），通电前要旋转零点校正螺丝，使指针指零。

测量不同  $K$ 、 $X$  值下  $R_Z$  两端的电压值  $V$  (伏特)。

$R_Z/\Omega$	$X/K$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
500	0.25											
1k	0.5											
2k	1											
4k	2											
10k	5											

2、在坐标纸上画出分压电路特性曲线。

### 思考题：

- 1、滑线变阻器一共有几个接线柱，本实验中要用到几个？
- 2、在作分压电路特性曲线时对于不同  $K$  值的曲线  $V_{\max}$  取 10V，实验过程中电源输出电压  $E$  是否需要改变？

### 实验讨论：

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等，还可以谈谈实验的心得体会。

## 十四 用霍尔元件测量螺线管轴向磁场

### 实验目的:

- 1、掌握霍尔器件测磁场的原理和方法。
- 2、学习电流反向法消除副效应(除霍尔效应以外的一些电磁效应)的影响。

### 实验仪器:

FD-ICH-II 型螺线管磁场测定组合仪。

### 实验原理:

$$B = \frac{V_H}{K_H I_S}, \quad B_0 = \mu_0 \frac{N}{\sqrt{L^2 + \bar{D}^2}} I_M$$

### 数据记录及处理:

- 1、利用螺线管中点位置磁感应强度理论值  $B_0$  和被测霍尔电压  $V_H$ , 计算霍尔传感器的灵敏度  $K_H$  和工作电流  $I_S$  的乘积( $K_H I_S$ )。本实验中螺线管参数: 螺线管长度  $L = 260\text{mm}$ , 线圈匝数  $N = 300$ , 螺线管截面平均直径  $\bar{D} = 35\text{mm}$ ,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。固定霍尔器件在螺线管中心位置, 即标尺刻度  $x \approx 16\text{cm}$ 。

测量次序 $i$	1	2	3	...	8
$I_{Mi}/\text{mA}$	0	50	100	...	350
$I_M$ 正向时, $V_{Hi}^+/\text{mV}$				...	
$I_M$ 反向时, $V_{Hi}^-/\text{mV}$				...	
$V_H = \frac{1}{2}  V_{Hi}^+ - V_{Hi}^- /\text{mV}$				...	

$$\overline{\Delta V_H} = \frac{1}{4} \times \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |V_{H(4+i)} - V_{Hi}| = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mV},$$

$$K_H I_S = \frac{\overline{\Delta V_H}}{\Delta B_0} = \frac{\overline{\Delta V_H}}{\mu_0 \frac{N}{\sqrt{L^2 + \bar{D}^2}} \Delta I_M} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V/T}.$$

在坐标纸上画出  $K_H I_S$  的定标曲线。

2、测量螺线管轴向磁场分布 (设定  $I_M = \underline{\hspace{2cm}}$  mA)。

标尺刻度 $x/\text{cm}$	0	1	2	...	29	30
$I_M$ 正向时, $V_{Hi}^+/\text{mV}$				...		
$I_M$ 反向时, $V_{Hi}^-/\text{mV}$				...		
$V_H = \frac{1}{2}  V_{Hi}^+ - V_{Hi}^- /\text{mV}$				...		
$B = \frac{V_H}{K_H I_S} / \text{mT}$				...		

在坐标纸上画出螺线管轴向磁场分布  $B-x$  曲线。

### 思考题:

- 1、实验中为什么要加 2.5V 的补偿电压?
- 2、实验中为什么要改变励磁电流  $I_M$  的方向?
- 3、霍尔器件在螺线管中发生转动或者偏移轴线对测量有影响吗, 试根据  $B-x$  曲线分析。

### 实验讨论:

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释, 分析实验误差的主要来源, 对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等, 还可以谈谈实验的心得体会。

## 十五 电路故障的分析诊断

### 实验目的：

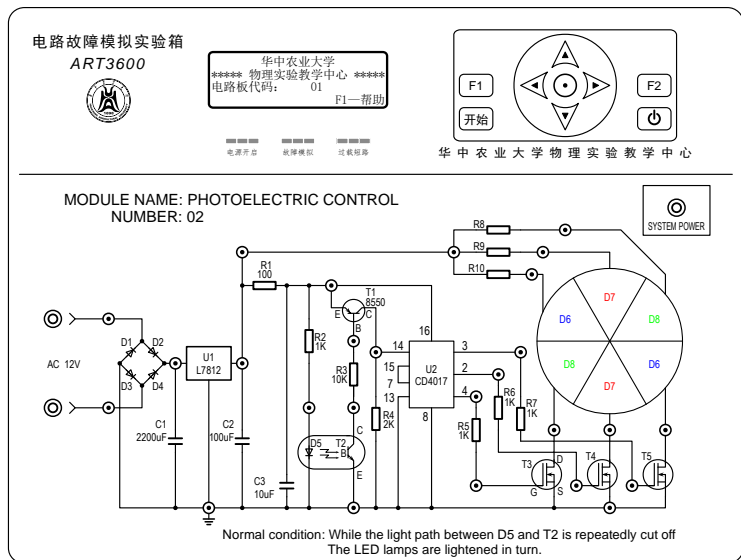
- 1、学习数字万用表的使用。
- 2、用万用表检查电路并分析诊断电路故障。

### 实验仪器：

ART-3600 型电路故障模拟实验箱、数字万用表。

### 实验原理：

本实验采用 ART-3600 型电路故障模拟实验箱，每次实验中对工作电路随机设置一种电路故障（短路或断路）供实验者检测，并根据实验者反馈的故障判断和找到正确故障所用的时间，对其给予评分。

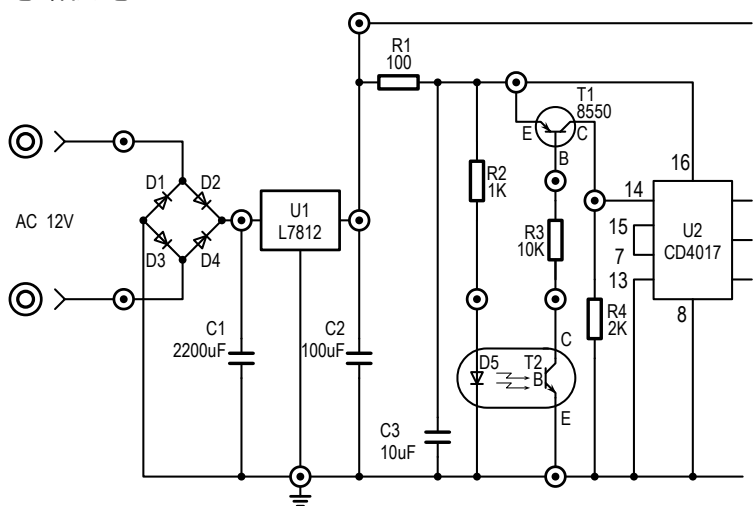


- 1、电路板的正常功能简介：先打开实验箱后方总电源开关，再按 键打开电路板电源，则“电源开启”指示灯亮，电路板处于正常工作状态，LED 盘中的三组 LED 灯组 D6~D8 会有一组发光。每当 D5 和 T2 之间的光路被遮挡一次，发光 LED 灯组会循环跳至下一组，

且颜色按照蓝-红-绿依次变化。

2、该电路是一个以 CD4017 十进制脉冲计数器为核心的 LED 发光控制电路，其各部分的工作原理如下：

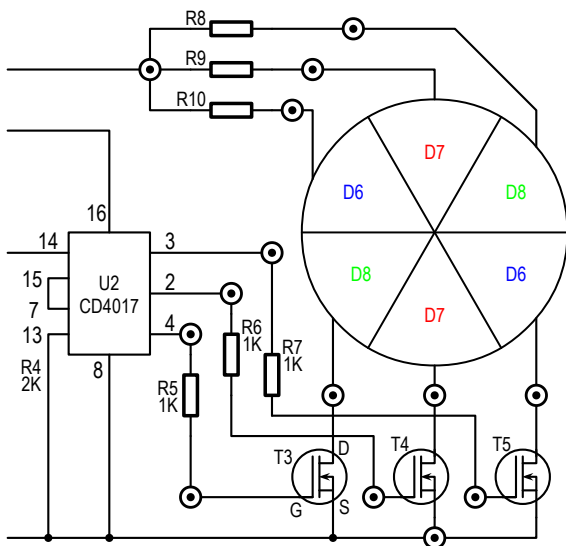
(1) 电源部分：最左端的两点为电源变压器（不包括在本电路板中）的输出端（同时即为桥式整流电路的输入端），提供一个 12~13V 的交流电源。经二极管 D1~D4 组成的桥式整流电路整流，并经电容 C1、C2 滤波和 L7812 集成稳压电路（即 U1）稳压后，形成约 12V 的直流电源（下端公共线为地，即电源负极），为后续电路供电。



(2) 光电传感器：图中发光二极管 D5 和光电三极管 T2 共同组成了一个光电传感器组件。当光路被切断时，T2 无法感应 D5 发出的红外辐射，使之处于截止状态，T2 集电极电压 ( $V_{CE}$ ) 为高，则 PNP 型三极管 T1 的基极电压 ( $V_{BE}$ ) 为 0，处于截止状态，则 U2 的 Pin14 管脚为低电平。光路导通恢复后，T2 能够感应 D5 发出的红外辐射，进入导通状态，T2 集电极电压 ( $V_{CE}$ ) 为 0，则三极管 T1 的基极电压 ( $V_{BE}$ ) 为高 (PNP 型三极管的  $V_{BE}$  负值为高)，使 T1 进入导通状态，则 U2 的 Pin14

管脚 (时钟输入端) 为高电平。Pin14 产生从低电平跳变成高电平的脉冲信号, 触发计数器加 1。








(3) LED 灯盘: 实验板右侧的圆盘上一共安置了 36 个 LED, 按对角均分为三组, 即 D6、D7 和 D8, 其中 D6 灯组为蓝色 LED, D7 灯组为红色 LED, D8 灯组为绿色 LED。场效应管 T3、T4 和 T5 (属于电压控制元件, 栅极 G 电流几乎为 0, 所以栅极 G 的串联电阻压降很小, 可以忽略) 分别控制点亮 D8、D7 和 D6 三组 LED。当 U2 的 Pin4 管脚输出高电平时, T3 的栅极 G 电压为高, T3 导通, 漏极 D 电压被拉低, D8 组 LED 灯点亮, 同理 T4 导通点亮 D7, T5 导通点亮 D6。



(4) 计数器控制电路: U2 的 Pin15 管脚为复位端, 高电平有效。Pin7 管脚为 “3” 译码输出, 将其与 Pin15 复位端短接, 即当输出 “3” 时, 对计数器复位, 输出跳为 “0”。则在功能上等效于三进制计数器, 计数器输出从 “0” 计到 “2” 之后再回到 “0”。将 “0”、“1”、“2” 的三个译码输出端分别控制点亮三组不同颜色的 LED, 则可以使 LED 灯盘循环点亮。



## 实验内容：

- 1、了解电路板的正常功能。先打开实验箱后方总电源开关，再按键打开电路板电源，则“电源开启”指示灯亮，电路板处于正常工作状态，实验者可对其正常功能进行观察测试。
- 2、按下开始键，启动故障模拟。控制系统将立即对电路板随机设置一个故障，同时故障模拟指示灯亮。然后按键，打开电路板电源。
- 3、观察、检测电路故障。遮挡 D5 和 T2 之间的光路，观察 LED 灯组变化情况与 1 中的正常状态有何不同，分析电路哪里出了故障，并用“万用表”检测故障。
- 4、将故障判断结果由键盘输入到系统，并确认( 键切换故障器件编号， 键切换器件种类和故障类别，中心键确认故障判断)。若判断正确，会显示排障成功，电路也会恢复正常状态。

## 数据记录及处理：

故障现象	
检测过程及测量参数	
故障判断结果	

## 思考题：

- 1、电路的短路是指？请举例说明检测方法。
- 2、电路的断路是指？请举例说明检测方法。

## 实验讨论：

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等，还可以谈谈实验的心得体会。

## 十六 全息摄影

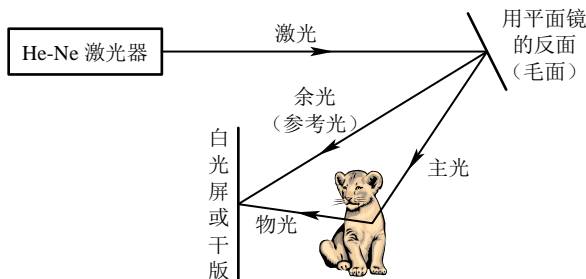
### 实验目的：

- 1、了解全息摄影记录和再现的原理。
- 2、掌握漫反射全息干版的摄制方法。

### 实验仪器：

全息台、He-Ne 激光器、曝光定时器及快门、反面是毛面的平面镜、半透明宠物模型、白光屏、干版、可调支架和磁性底座；主要试剂：D19 型显影液、F5 型定影液、漂液。

### 实验原理：



布置光路（毛玻璃散射法）：让激光直接照射平面镜的反面（相当于毛玻璃面），大部分光线透过平面镜的毛面后再由镀膜面反射，然后由毛面散射出来。散射的结果是对光源进行分束与扩束。让主要散射光（主光）照亮被摄物体，较弱的散射光（余光）直接照射在白光屏上。这样，物光（物体上漫反射的光线）和参考光（直接照射到白光屏的光线）的光强比才能合适。它们在白光屏上相遇形成干涉图样，将白光屏换成干版，就可以记录干涉图样。

光路优点：毛玻璃散射比扩束透镜更容易得到均匀的扩束光，而且不怕器件表面的灰尘、污渍影响；光路简单，更利于操控和整个系统的稳定性。光路缺点：散

射光角度调节余地小，宠物模型一侧不能照亮，可以用半透明模型或者结合其它拍摄光路解决。

## 实验步骤：

实验中需要由一名同学来喊口令（参考口令：下列步骤中的**粗体字**部分），一名同学协助分发干版，其它同学要严格听从口令操作，本实验是培养学生协作精神的典范。为了提高实验的成功率和拍摄效果，请将下列**1~5**步多做几次演习，演习时使用拍摄过的干版。

- 1、按照上图**布置光路**，调节毛玻璃角度，让主要散射光照亮宠物模型，余光照在白光屏上。
- 2、**关手机、关空调、关排气扇**等发声源，**关门、关灯、关窗帘**等发光源，**关激光**。
- 3、**分发干版**，取下白光屏、**安装干版**。注意干版覆盖有卤化银乳胶的一面摸起来没有玻璃表面光滑，将乳胶面朝向激光安装。（每组同学安装好干版，要报告：**安装完毕**。）
- 4、**安静一分钟**左右，让全息实验台安稳下来，注意身体任何部位都不要接触全息实验台。
- 5、**曝光**：**开激光**，5~30 秒钟左右后**关激光**。（具体曝光时间要根据干版上的实际光强、干版型号和暗室温度等条件确定，这一步要避开下课时间，其间务必保持安静。）
- 6、**冲洗**：（每组同学取下干版准备冲洗时，要报告：**准备完毕**。）冲洗过程中干版乳胶面均朝上。  
**显影**用 D19 型显影液，注意避免干版重叠影响显影，显影时间约 3 分钟；  
**水洗**，停影，且防止残留显影液和定影液混合；  
**定影**用 F5 型定影液，定影时间约 5 分钟；  
**水洗**，防止残留定影液和漂液混合；  
**漂白**，开门再开灯观看漂白进度，待全息干版的黑

色完全退去且呈蓝白色（半透明）；

**长时间水洗**，让水流洗去干版上残留的漂液。

7、风干：用吹风机吹干干版。

8、重现：将干版安装到原光路，移去宠物模型，透过干版在原物体位置寻找全息像。

### 思考题：

1、全息摄影与普通摄影的区别有哪些？

2、设计另一种全息摄影光路图。

### 实验讨论：

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等，还可以谈谈实验的心得体会。

## 十七 数码摄影

### 实验目的：

- 1、了解数码摄影的基本过程
- 2、初步掌握数码摄影的基本知识和摄影技巧。
- 3、初步掌握图像编辑方法。

### 实验仪器：




数码相机 Canon PowerShot SX50 HS、三脚架、计算机（内装 Photoshop 软件）。

### 实验内容：

#### 1、准备工作

- (1) 阅读相机使用者指南，熟悉数码相机的基本使用方法。
- (2) 删除相机中现有的全部图像。（设置**模式开关**为播放，按 **MENU** 键，再按下**移**键选择全部删除，然后按 **FUNC./SET** 确认，按**右移**键选择 **OK**，再次按 **FUNC./SET** 确认。）

#### 2、拍摄照片

- (1) 选择 **AUTO\P\Tv\Av\M** 等拍摄模式拍摄同一场景，试着改变光圈快门等参数，取得最好的拍摄效果。
- (2) 用微距模式（) 拍摄花卉或小物体等，可以利用长焦和大光圈（即减小光圈系数）来虚化背景、突出主题。
- (3) 选择 **AUTO** 和 **Av** 两种模式拍摄暗处同一静物。将数码相机安装到三脚架上，在 **Av** 模式中关闭闪光灯（)、设置驱动模式为**自拍延时两秒**（)、设置感光度 **ISO** 值为最低。

#### 3、编辑照片

参照相机使用者指南，将照片下载到计算机，查看

照片及其属性（右击照片>属性>摘要>高级），根据拍摄结果选择下列必要的步骤对照片进行编辑处理，不用处理的照片根据拍摄内容重新命名即可。

(1) 启动 Photoshop。单击**开始>所有程序>Adobe Photoshop CS**。

(2) 打开照片。单击菜单栏的**文件>打开>找到照片后双击它**。

(3) 确定照片水平。单击菜单栏的**图像>旋转画布>任意角度**，输入适当的角度后确认。

(4) 裁切图像。对于旋转后的照片以及为了突出照片主体，可以适当裁切多余的画面。首先选择要保留的图像区域，方法是：单击工具箱的**裁切工具**，按住左键在照片上拖动建立矩形选区；然后在选区双击即可。

(5) 用自动色阶调整颜色。其功能是将画面上好像色罩的轻微偏色除去，方法是：单击**图像>调整>自动色阶**。

(6) 调节对比度。在阴天或光线较差的环境下拍摄的照片，如果反差不理想，可以单击**图像>调整>自动对比度**。

(7) 调节色彩平衡。单击**图像>调整>色彩平衡**，然后移动滑块来调节色彩。

(8) 保存图像。单击**文件>存储为**，填写合适的文件名，注意在格式一栏选择 JPEG 格式。

### 思考题：

- 1、什么是景深，如何利用景深来表现图像特点？
- 2、在光线较暗的环境下拍摄，如何提高照片画质？

### 实验讨论：

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等，还可以谈谈实验的心得体会。

## 十八 用数字成像处理技术测光栅常数

### 实验目的：

- 1、初步掌握数码摄影的基本知识和摄影技巧。
- 2、利用数字成像处理技术测量光栅常数。

### 实验仪器：

光栅、He-Ne 激光器、滑轨、偏振片、坐标纸、可调支架、数码相机、三脚架等。

### 实验原理：

$$1\text{mm}/n = d = k\lambda/\sin\varphi,$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots。$$

### 实验内容：

#### 1、布置光路

(1) 按光路摆放各实验装置，光栅镀膜面应向着光屏。

(2) 调节光栅到光屏之间的距离  $L$ ，使该距离尽量大的同时，能观察到  $\pm 1$  级衍射光斑。

(3) 调节激光平行于光具座，光栅平面和光屏垂直于光具座。此时， $\pm 1$  级衍射光斑到中央亮斑的距离相等。

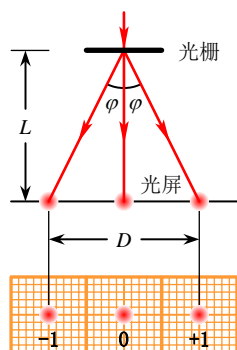
#### 2、拍摄照片

(1) 将数码相机安装到三脚架上，并连接电源适配器。

(9) 旋转模式转盘到 **P** 档；设置感光度 **ISO** 值为最低；驱动模式为自拍延时两秒 (📷)；关闭闪光灯 (🔇)；若相机离光屏太近不能清晰聚焦，要打开微距模式 (🌸)。

(2) 调节镜头焦距到中等位置，调节三脚架高度及位置，使相机与衍射光斑平齐，拍摄画面略宽于  $\pm 1$  级衍射光斑的间距，半按快门完成聚焦，全按快门拍摄照片。

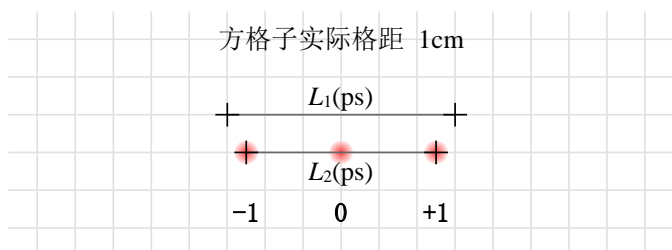
(3) 改变镜头焦距和三脚架位置，再次拍摄照片。



### 3、测量数据

(1) 测量光栅到光屏之间的距离  $L$ : 请单眼垂直向下观察光栅 (光屏) 平面对齐哪个刻度。

(2) 测量  $\pm 1$  级衍射光斑的间距  $D$ : 用 Photoshop 打开刚才拍摄的照片, 按住吸管工具可以更换为度量工具, 用度量工具测量衍射光斑附近 (几个) 格子之间的距离 (像素), 然后测量  $\pm 1$  级衍射光斑之间的距离 (像素), 通过比例换算, 可得  $\pm 1$  级衍射光斑的实际间距  $D$ 。



$$\frac{L_1(\text{ps})}{L_2(\text{ps})} = \frac{L_1 \text{实际长度}(\text{cm})}{D}$$

#### 数据记录及处理:

1、 $L = \underline{\hspace{2cm}}$  mm。  $L$  是单次测量量, 只计算 B 类不确定度, 主要来源于光具座上的两次读数的误差:

$$\Delta_L = \Delta_B = \sqrt{2\Delta_{\text{仪}}^2} = \sqrt{2} \times 1\text{mm}。$$

2、  $\pm 1$  级衍射光斑的间距  $D$ :

测量次序 $i$	1	2	3	4	5
$D_i/\text{mm}$					

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad \underline{\hspace{2cm}} \text{ mm}; D \text{ 的 A 类不确定度:}$$

$$\Delta_A = \frac{S_D}{\sqrt{n}} t_{0.95}(n-1); \text{ B 类不确定度主要来源镜头成}$$

像的畸变 (可以在 Photoshop 中作一定的修正)、坐标纸的误差 (约为 0.1mm) 等, 为简化计算可以设

$$\Delta_B = 0.1\text{mm}; \Delta_D = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}。$$



3、  $\bar{\varphi} = \arctan \frac{\bar{D}}{2L}$  , 同时  $\varphi \approx \frac{D}{2L}$  ,  $\Delta_{\varphi} = \bar{\varphi} \sqrt{(\frac{\Delta_D}{D})^2 + (\frac{\Delta_L}{L})^2}$   
(以弧度作单位)。

4、  $\bar{n} = \frac{\sin \bar{\varphi}}{|\pm 1| \lambda} \times 1\text{mm} = \frac{1\text{mm}}{632.8\text{nm}} \cdot \sin \bar{\varphi} = \underline{\hspace{2cm}}$  条 ;

$\Delta_n = \frac{1\text{mm}}{\lambda} \cdot (\cos \bar{\varphi}) \cdot \Delta_{\varphi} = \underline{\hspace{2cm}}$  条。

5、 光栅 1mm 内的刻痕条数:  $n = \bar{n} \pm \Delta_n$  ,  $p \geq 0.95$  。

### 思考题:

- 1、 实验中偏振片起什么作用, 查一查感光元件的宽容度是指什么?
- 2、 如何准确测量光栅到光屏之间的距离?

### 实验讨论:

描述实验中观察到的异常现象及可能的解释, 分析实验误差的主要来源, 对实验仪器和方法的建议以及本实验在其它方面的应用等, 还可以谈谈实验的心得体会。

# 附录1 测量误差与不确定度

## 1 测量误差及其分类

### 1.1 误差的定义

物理实验是以测量为基础的, 测量分直接测量和间接测量, 被测量的真值是客观存在的, 但测量结果  $x$  和真值  $\mu$  之间总是存在一定的偏差, 这种偏差叫测量误差, 简称为误差。

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

即: 
$$\Delta x = x - \mu \quad (1-1)$$

测量误差也可以用相对误差来表示, 相对应把上面的误差称为绝对误差。

$$\text{相对误差} = \frac{(\text{绝对}) \text{误差}}{\text{真值}} \approx \frac{(\text{绝对}) \text{误差}}{\text{测量值}}$$

即: 
$$E = \frac{\Delta x}{\mu} \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-2)$$

### 1.2 误差的分类

#### 1.2.1 系统误差

定义: 在同一条件下, 多次测量同一值时, 绝对值和符号不变, 或在条件改变时, 按一定规律变化的误差。按对误差掌握的程度, 又可分为已定系统误差和未定系统误差。对于已定系统误差可以在测量值上加以修正, 如螺旋测微器的零点修正; 对于未定系统误差往往只能估计其误差范围, 如仪器最大允差。

来源: 固定不变或按确定规律变化的因素, 如仪器固有缺陷、实验方法不完善、环境影响、实验者的不规范操作。

处理方法: 从误差的根源上消除或减小误差; 数值修正; 不变系统误差的消除; 仪器误差的处理。

## 1.2.2 随机误差 (偶然误差)

定义：在同一条件下，多次测量同一值时，绝对值和符号以不可预定方式变化的误差。

来源：各种因素的微小变动，如实验装置调整操作的变动性、仪表指示数值的变动性、实验者估计读数的变动性。

处理方法：多次测量，利用统计学方法处理。

## 2 误差的基本性质与处理

### 2.1 测量值与随机误差的统计规律

由于随机误差的存在，同条件下的测量值是一个随机变量  $X$ ，假设实验已经消除系统误差， $X$  通常服从正态分布，简记为  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ，正态分布的概率密度函数为：

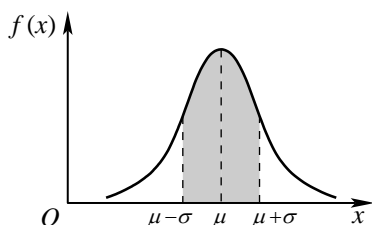


图 2-1

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad x \in \mathbb{R} \quad (2-1)$$

对随机变量  $X$  的无穷多个测量值的集合称为测量值总体。测量值总体的平均值就等于物理量真值，(2-1) 式中两个特征量分别是：

总体均值：

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2-2)$$

总体标准偏差：

$$\sigma = \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}, \quad (\sigma^2 \text{ 称为总体方差}) \quad (2-3)$$

总体标准偏差  $\sigma$  不是一个具体的测量误差值，而是一个统计量，它表示测量值的随机误差  $(X_i - \mu)$  出现的

概率分布情况。如图 2-1 阴影部分的面积就是随机误差分布在  $\pm\sigma$  范围内的概率，即测量值  $X$  落在  $(\mu-\sigma, \mu+\sigma)$  区间的概率，由定积分计算得此概率为：

$$P\{\mu-\sigma < X < \mu+\sigma\} = \int_{\mu-\sigma}^{\mu+\sigma} f(x)dx = 68.26\% \quad (2-4)$$

令  $Z = (X - \mu) / \sigma$ ，代入 (2-1) 可得  $Z$  服从标准正态分布，即：

$$\frac{X - \mu}{\sigma} \sim N(0,1) \quad (2-5)$$

## 2.2 有限次测量与抽样统计

### 2.2.1 样本均值与样本标准偏差

由于时间限制、环境变化等因素，我们只能进行有限( $n$ )次的等精度测量，即从测量值总体中抽取容量为  $n$  的一个随机样本 ( $X_1$ 、 $X_2$ 、...、 $X_n$ )，因此无法精确计算出真值，也无法计算总体标准偏差。根据数理统计原理，我们把样本算术平均值（样本均值） $\bar{X}$  作为物理量真值  $\mu$  的最佳估计值；把随机样本偏离真值程度的统计量（样本标准偏差） $S_x$  作为总体标准偏差的最佳估计值。

样本均值：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2-6)$$

样本方差：

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 \quad (2-7)$$

变换 (2-7) 式可得：

$$\begin{aligned} nS_x^2 &= \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X} + \bar{X} - \mu)^2 \\ &= \sum_{i=1}^n [(X_i - \bar{X})^2 + 2(X_i - \bar{X})(\bar{X} - \mu) + (\bar{X} - \mu)^2] \end{aligned} \quad (2-8)$$

其中交叉项：

$$\sum_{i=1}^n 2(X_i - \bar{X})(\bar{X} - \mu) = 2(\bar{X} - \mu) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) = 0$$

因此：

$$nS_X^2 = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 + \sum_{i=1}^n (\bar{X} - \mu)^2 \quad (2-9)$$

其中后一项：

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (\bar{X} - \mu)^2 &= n \left( \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} - \mu \right)^2 = \frac{1}{n} \left( \left( \sum_{i=1}^n X_i \right) - n\mu \right)^2 \\ &= \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n (X_i - \mu) \right)^2 = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j}^n (X_i - \mu)(X_j - \mu) \right) \end{aligned}$$

$(X_i - \mu)$ 、 $(X_j - \mu)$  各项互不相干、时正时负，当  $n$  足够大时， $2 \sum_{1 \leq i < j}^n (X_i - \mu)(X_j - \mu) \rightarrow 0$

所以：

$$\sum_{i=1}^n (\bar{X} - \mu)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 = S_X^2 \quad (2-10)$$

将 (2-10) 代入 (2-9) 得：

$$nS_X^2 = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 + S_X^2 \quad (2-11)$$

由 (2-11) 得样本标准偏差：

$$S_X = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2-12)$$

### 2.2.2 样本均值的标准偏差

在实际工作中，人们往往关心的不是每个测量值的数据分散特性，而是测量结果与真值的偏离程度即**样本均值的标准偏差**。考虑到  $m$  组数据的统计（每组数据包含  $n$  次测量值），每组均值  $\bar{X}$  也是一个随机变量，也服从正态分布，由 (2-10) 可得：

**样本均值的方差：**

$$S_{\bar{X}}^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\bar{X}_m - \mu)^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{S_X^2}{n} = \frac{S_X^2}{n} \quad (2-13)$$

$$\text{样本均值的标准偏差: } S_{\bar{X}} = \frac{S_X}{\sqrt{n}} \quad (2-14)$$

$$\text{当每组测量次数 } n \text{ 足够大时 } S_{\bar{X}} = \frac{S_X}{\sqrt{n}} \rightarrow \frac{\sigma_X}{\sqrt{n}} \quad (2-15)$$

比较 (2-4) 可得

$$P\{\mu - \sigma_X / \sqrt{n} < \bar{X} < \mu + \sigma_X / \sqrt{n}\} = 68.26\% \quad (2-16)$$

$$\text{比较 (2-5) 可得: } \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma_X / \sqrt{n}} \sim N(0,1) \quad (2-17)$$

对 (2-16) 进行不等式变换可得:

$$P\{\bar{X} - \sigma_X / \sqrt{n} < \mu < \bar{X} + \sigma_X / \sqrt{n}\} = 68.26\% \quad (2-18)$$

上式表示真值落在  $n$  次测量平均值  $\pm \sigma_X / \sqrt{n}$  左右范围内的概率为 68.26%。一般实验中  $n \leq 20$ , 甚至  $\leq 5$ , 因此, 无法由 (2-15) 确定  $X$  的标准偏差  $\sigma_X$ , 真值  $\mu$  所在范围及概率也就不能用 (2-18) 来确定。

### 2.2.3 $t$ 分布与真值的区间估计。

$$\text{令随机变量 } t = \frac{\bar{X} - \mu}{S_X / \sqrt{n}},$$

变量  $t$  符合  $t(\nu)$  分布, 如图 2-2

所示, 其中  $\nu = n - 1$ , 称为  $t$  分布的自由度。比较 (2-17)

可知, 当  $n \rightarrow \infty$  时,  $t$  分布曲线无限接近于标准正态分布

$N(0,1)$  的曲线。 $t$  分布的概率

密度函数为:

$$f(t) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sqrt{\nu\pi}\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left(1 + \frac{t^2}{\nu}\right)^{-\frac{\nu+1}{2}}, \quad t \in \mathbb{R} \quad (2-19)$$

$$P\{-t_p(\nu) < t < t_p(\nu)\} = \int_{-t_p(\nu)}^{t_p(\nu)} f(t) dt = p \quad (2-20)$$

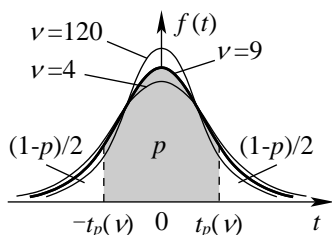


图 2-2

上式表示随机变量  $t$  落在  $(-t_p(\nu), t_p(\nu))$  区间的概率或置信水平为  $p$ , 其中  $t_p(\nu)$  称为  $t$  分布的分位数,  $t_p(\nu)$  可以通过积分计算出来, 也可以直接查表得到。

表 2-1  $t$  分布的分位数  $t_p(\nu)$  值

$\begin{matrix} p \\ \nu \end{matrix}$	0.6826	0.95	0.99	备注
1	1.8367	12.7062	63.6574	分位数 $t_p(\nu)$ 是关于 $p$ 和 $\nu$ 的函数, 当测量次数为 $n$ 时, $t$ 分布的自由度 $\nu=n-1$ , 随机变量 $t$ 落在 $(-t_p(\nu), t_p(\nu))$ 区间的概率为 $p$ . 例: 某物理量测量次数 $n=5$ , $t$ 分布的自由度 $\nu=n-1=4$ , 取置信水平 $p=0.95$ , $t_p(\nu)=t_p(n-1)=t_{0.95}(4)=2.7764$ .
2	1.3210	4.3207	9.9248	
3	1.1966	3.1824	5.8409	
4	1.1414	2.7764	4.6041	
5	1.1103	2.5706	4.0322	
6	1.0903	2.4469	3.7074	
7	1.0765	2.3646	3.4995	
8	1.0663	2.3060	3.3554	
9	1.0585	2.2622	3.2498	

用  $\frac{\bar{X} - \mu}{S_X / \sqrt{n}}$  替换 (2-20) 中的  $t$  得:

$$P\left\{-t_p(n-1) < \frac{\bar{X} - \mu}{S_X / \sqrt{n}} < t_p(n-1)\right\} = p, \text{ 即:}$$

$$P\left\{\bar{X} - \frac{S_X}{\sqrt{n}} t_p(n-1) < \mu < \bar{X} + \frac{S_X}{\sqrt{n}} t_p(n-1)\right\} = p \quad (2-21)$$

上式表示真值  $\mu$  落在区间

$$\left(\bar{X} - \frac{S_X}{\sqrt{n}} t_p(n-1), \bar{X} + \frac{S_X}{\sqrt{n}} t_p(n-1)\right) \text{ 的置信水平为 } p.$$

### 2.3 系统误差与仪器误差的处理

以上讨论的仅仅是随机误差, 我们还必须考虑系统误差对测量的影响。系统误差的来源有多种, 为了简化计算, 仅考虑仪器误差。实验中用到的某个仪器误差值往往是未知的, 生产厂家一般只给出同一批仪器产品的最大允许误差值, 一般用  $\Delta_{\text{仪}}$  表示, 有时由实验室结合

具体测量条件约定 $\Delta_{\text{仪}}$ 值。因此,可以把 $\Delta_{\text{仪}}$ 作为系统误差的极大值。

表 2-2 常用仪器的主要技术性能和最大允差

名称	量程	最小分度值	最大允差( $\Delta_{\text{仪}}$ )
米尺		1mm	0.5mm
游标卡尺	125mm	0.02mm	0.02mm
螺旋测微器 (千分尺)	25mm	0.01mm	0.004mm
读数显微镜	50mm	0.01mm	0.005mm
分光计		1'	1'
记时器			仪器最小分度
水银温度计			仪器最小分度
模拟电学仪表 (级别 $K$ )	$M$		$M K \%$
各类数字仪表			仪器最小分度

同一个物理量多次测量的系统误差值一般不具有抵偿性,因此,平均值 $\bar{X}$ 的系统误差极大值也可以用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示。若仅考虑仪器误差,真值 $\mu$ 落在 $(\bar{X} - \Delta_{\text{仪}}, \bar{X} + \Delta_{\text{仪}})$ 区间的置信水平 $p = 1$ 。

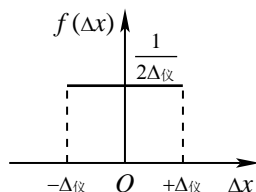


图 2-3

仪器本身的误差( $\Delta x$ )多数服从平均分布,如图 2-3 所示,由此计算仪器的标准偏差:

$$\sigma_{\text{仪}} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \Delta x^2 f(\Delta x) d(\Delta x)} = \sqrt{\int_{-\Delta_{\text{仪}}}^{+\Delta_{\text{仪}}} \Delta x^2 \frac{1}{2\Delta_{\text{仪}}} d(\Delta x)} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (2-22)$$

### 3 测量不确定度

利用误差来表征测量结果可信程度,是利用了“测量值”和“真值”间的偏差程度,但“真值”是无法正确测量的,它只是一个理想值或约定值。为了更确切的表征实验测量数据,我们引入了不确定度作为实验测量结果接近真实情况的量度。表征合理的赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系参数,称为测量不确定



度。这是 JJF 1001—1998《通用计量术语及定义》中，对其所作的最新定义。测量不确定度是独立而又密切与测量结果相联系的、表明测量结果分散性的一个参数。在测量的完整的表示中，应该包括测量不确定度。测量不确定度用均值的标准偏差表示时称为标准不确定度，如用说明了置信水准的区间的半宽度的表示方法则称为展伸不确定度（或扩展不确定度）。不确定度是在误差理论的基础上发展起来的。不确定度和误差是两个不同的概念，它们有着根本的区别，但又是相互联系的，都是由测量过程中的不完善性造成的。

### 3.1 直接测量的标准不确定度

不确定度一般包含有多个分量，按其数值的评定方法可归并为 A、B 两类：

**A 类不确定度：**在同一条件下多次重复测量时，由一系列观测结果用统计分析评定的不确定度，用  $u_A$  表示。

**A 类标准不确定度：**

$$u_A = S_{\bar{X}} = \frac{S_X}{\sqrt{n}} \quad (3-1)$$

**B 类不确定度：**用其它方法(非统计分析)评定的不确定度，用  $u_B$  表示。

**B 类标准不确定度：**

$$u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{C} \quad (\text{一般取平均分布, } C = \sqrt{3}) \quad (3-2)$$

$X$  的总标准不确定度由两类不确定度的“方、和、根”合成，即**合成标准不确定度**：

$$u_X = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (3-3)$$

### 3.2 直接测量的展伸不确定度

合成标准不确定度所表示的测量结果  $(\bar{X} \pm u_X)$ ，包含被测量真值的概率约为 68%。在要求较高的场合，需

要测量结果区间包含被测量真值的置信概率较大, 为此需要用展伸不确定度表示测量结果。

展伸不确定度由合成标准不确定度  $u_X$  乘以包含因子  $t_p(\nu_X)$  得到, 记为  $U_X$ , 即:

$$U_X = t_p(\nu_X)u_X \quad (3-4)$$

式中  $\nu_X$  为合成标准不确定度的自由度, 可由 A 类自由度  $\nu_A$  和 B 类自由度  $\nu_B$  计算

$$\nu_X = \frac{u_X^4}{\frac{u_A^4}{\nu_A} + \frac{u_B^4}{\nu_B}} \quad (3-5)$$

$$\nu_A = n-1; \quad \nu_B = \frac{1}{2\left(\frac{\sigma_{u_B}}{u_B}\right)^2}, \quad \frac{\sigma_{u_B}}{u_B} \text{ 为评定 } u_B \text{ 的相对标准}$$

差,  $\frac{\sigma_{u_B}}{u_B}$  越小对  $u_B$  的评定越可靠。

### 3.3 间接测量的标准不确定度

#### 3.3.1 $N=ax+by$ 的标准不确定度计算

设间接测量量  $N$  与直接测量量  $x$ 、 $y$  的函数关系式为:  $N=ax+by$

如果同时对  $x$ 、 $y$  测量了  $n$  次, 相当于对  $N$  也测量了  $n$  次, 即:

$$N_i = ax_i + by_i \quad i \in [1, n] \quad (3-6)$$

求某次测量的误差有:

$$N_i - N = a(x_i - x) + b(y_i - y),$$

$N$ 、 $x$ 、 $y$  分别表示各测量量的真值, 即:

$$\Delta N_i = a\Delta x_i + b\Delta y_i \quad (3-7)$$

(3-7) 表示某一次测量中直接测量与间接测量量的误差传递关系, 然而我们要评价的是多次测量数据的好坏, 所以要用这一组测量数据的不确定度来评价。

对 (3-7) 取平方再对所有测量数据求和有:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta N_i)^2 = \sum_{i=1}^n (a\Delta x_i)^2 + \sum_{i=1}^n (b\Delta y_i)^2 + 2\sum_{i=1}^n (ab\Delta x_i\Delta y_i)$$

$2\sum_{i=1}^n (ab\Delta x_i\Delta y_i)$  项中  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  各项互不相干、时正时负,

当测量次数足够多时, 求和结果趋近于零, 去掉这一项得:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta N_i)^2 = \sum_{i=1}^n (a\Delta x_i)^2 + \sum_{i=1}^n (b\Delta y_i)^2 \quad (3-8)$$

对 (3-8) 求平均值有:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta N_i)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a\Delta x_i)^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (b\Delta y_i)^2 \quad (3-9)$$

当  $n \rightarrow \infty$  时, 即得直接测量量与间接测量量的方差传递公式:

$$\sigma_N^2 = a^2 \sigma_x^2 + b^2 \sigma_y^2 = \left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 \quad (3-10)$$

直接测量量与间接测量量的标准偏差传递公式:

$$\sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2} \quad (3-11)$$

直接测量量与间接测量量的标准不确定度传递公式:

$$u_N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^2 u_y^2} \quad (3-12)$$

### 3.3.2 $N=x^a y^b$ 的标准不确定度计算

设间接测量量  $N$  与直接测量量  $x$ 、 $y$  的函数关系式为:  $N = x^a y^b$

我们可以仿照上面的方式来求解, 即先把积商形式变成和差形式, 对函数关系式两边求对数可得:

$$\ln N = a \ln x + b \ln y \quad (3-13)$$

同理有: 
$$\ln N_i = a \ln x_i + b \ln y_i \quad (3-14)$$

对 (3-14) 求微分, 并且近似认为测量误差相对于真值是一个无穷小量, 则有:

$$\frac{\Delta N_i}{N} = \left(\frac{\partial \ln N}{\partial x}\right) \Delta x_i + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial y}\right) \Delta y_i \quad (3-15)$$

比较 (3-7)、(3-12), 即得直接测量量与间接测量量的标准不确定度传递公式:

$$\frac{u_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln N}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial y}\right)^2 u_y^2} \quad (3-16)$$

### 3.3.3 标准不确定度传递公式

设间接测量量  $N$  与直接测量量  $x, y, z, \dots$  的函数关系式为  $N = f(x, y, z, \dots)$ , 对 (3-12)、(3-16) 进行推广, 得到一般函数的标准不确定度传递公式:

(1)  $f$  是和差形式的函数

$$u_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \dots} \quad (3-17)$$

(2)  $f$  是积商形式的函数

$$u_N = \bar{N} \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \dots},$$

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (3-18)$$

测量结果一般写成:  $N = \bar{N} \pm \Delta_N$  (3-19)

### 3.4 间接测量的展伸不确定度

间接测量量展伸不确定度的自由度传递公式:

(1)  $f$  是和差形式的函数

$$\nu_N = \frac{u_N^4}{\frac{(\frac{\partial f}{\partial x} u_x)^4}{\nu_x} + \frac{(\frac{\partial f}{\partial y} u_y)^4}{\nu_y} + \frac{(\frac{\partial f}{\partial z} u_z)^4}{\nu_z} + \dots} \quad (3-20)$$

(2)  $f$  是积商形式的函数

$$\nu_N = \frac{1}{N^4} \cdot \frac{u_N^4}{\frac{(\frac{\partial \ln f}{\partial x} u_x)^4}{\nu_x} + \frac{(\frac{\partial \ln f}{\partial y} u_y)^4}{\nu_y} + \frac{(\frac{\partial \ln f}{\partial z} u_z)^4}{\nu_z} + \dots} \quad (3-21)$$

间接测量量的展伸不确定度:  $U_N = t_p(\nu_N)u_N$  (3-22)

测量结果一般写成:  $N = \bar{N} \pm U_N$  (3-23)

上式表示该物理量的真值  $N$  落在区间  $(\bar{N} - U_N, \bar{N} + U_N)$  的置信水平为  $p$ 。

## 4 展伸不确定度的简化计算

### 4.1 直接测量的展伸不确定度

**A 类展伸不确定度:**

$$(\bar{N} - U_N, \bar{N} + U_N) \quad (\text{一般取 } p = 0.95) \quad (4-1)$$

**B 类展伸不确定度:**

$$\Delta_B = \Delta_{\text{仪}} \quad (p = 1) \quad (4-2)$$

$X$  的总展伸不确定度由两类不确定度的“方、和、根”合成, 即合成展伸不确定度:

$$\Delta_X = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (4-3)$$

该物理量的真值  $\mu$  落在区间  $(\bar{X} - \Delta_X, \bar{X} + \Delta_X)$  的置信水平  $p \geq 0.95$ 。

### 4.2 间接测量的展伸不确定度

设间接测量量  $N$  与直接测量量  $x, y, z, \dots$  的函数关系式为  $N = f(x, y, z, \dots)$ 。

(1)  $f$  是和差形式的函数

$$\Delta_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta_x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \Delta_y\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \Delta_z\right)^2 + \dots} \quad (4-4)$$

(2)  $f$  是积商形式的函数

$$\Delta_N = \bar{N} \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x} \Delta_x\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y} \Delta_y\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z} \Delta_z\right)^2 + \dots},$$

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (4-5)$$

$$\text{测量结果一般写成: } N = \bar{N} \pm \Delta_N, \quad p \geq 0.95. \quad (4-6)$$

上式表示该物理量的真值  $N$  落在区间  $(\bar{N} - \Delta_N, \bar{N} + \Delta_N)$  的置信水平  $p \geq 0.95$ 。

**【例题】** 推导下列函数的不确定度传递公式。

$$(1) \quad d = d' - d_0$$

$$\Delta_d = \sqrt{(\Delta_{d'})^2 + (\Delta_{d_0})^2} = \sqrt{(\Delta_A(d'))^2 + (\Delta_B(d'))^2 + (\Delta_A(d_0))^2 + (\Delta_B(d_0))^2}$$

注意,  $d$  的 A 类不确定度, 也可以直接用多个  $d$  值来计

$$\text{算: } \Delta_A(d) = \frac{S_d}{\sqrt{n}} t_{0.95}(n-1)$$

$d$  的 B 类不确定度, 必须根据不确定度传递公式计算:

$$\Delta_B(d) = \sqrt{(\Delta_B(d'))^2 + (\Delta_B(d_0))^2} = \sqrt{(\Delta_{\text{仪}}(d'))^2 + (\Delta_{\text{仪}}(d_0))^2} = \sqrt{2} \Delta_{\text{仪}}$$

$$\Delta_d = \sqrt{(\Delta_A(d))^2 + (\Delta_B(d))^2} = \sqrt{\left(\frac{S_d}{\sqrt{n}} t_{0.95}(n-1)\right)^2 + (\sqrt{2} \Delta_{\text{仪}})^2}$$

$$(2) \quad \rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$$

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h} = \frac{4}{\pi} m^1 d^{-2} h^{-1}, \quad \ln \rho = \ln\left(\frac{4}{\pi}\right) + \ln m - 2 \ln d - \ln h$$

$$\begin{aligned} \Delta_\rho &= \bar{\rho} \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial m} \Delta_m\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial d} \Delta_d\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial h} \Delta_h\right)^2} \\ &= \bar{\rho} \sqrt{\left(\frac{1}{m} \Delta_m\right)^2 + \left(\frac{2}{d} \Delta_d\right)^2 + \left(\frac{1}{h} \Delta_h\right)^2} \end{aligned}$$