

实验题目: 光学基本测量 薄透镜焦距测量

学号: 1801010101 姓名: 张 班级: 18010101 成绩: 100
 同组人: 3 实验日期、时段: 3月26日三 时段 教师签名: 张

一、实验目的与要求

1. 学习光学基本的测量方法, 掌握基本光路的调整方法 (如同轴等高)。
2. 学习测量薄透镜焦距的几种方法 (自准法、物距法)。
3. 学习描绘基本光路, 并分析其成像原理、特点和用途。

二、实验仪器

光学导轨, 光具座, 光源, 物屏, 凸透镜, 凹透镜, 平面镜, 像屏。

三、实验原理

1. 光学元件的同轴等高调节
 物、像、透镜的位置以及透镜移动的距离都是沿着主光轴计算长度的, 而长度是由光具座的刻度来读数的, 为了准确测量, 各光学元件的光轴必须同轴且应与导轨平行, 即处于高度相等, 即同轴等高。
2. 共轭法测量凸透镜焦距
 根据凸透镜成像规律, 当物距在一至二倍焦距 (焦距用 f 表示) 之间时成倒立放大实像, 像距 v 二倍焦距; 当物距 u 二倍焦距时成倒立缩小实像, 像距 v 在一至二倍焦距之间。固定物屏和像屏之间距离 L , 使 $L > 4f$, 将凸透镜在物屏和像屏之间移动, 会有两次成像, 且物、像共轭对称, 如图1所示。这种测量凸透镜焦距的方法叫共轭法。又对二次成像成等大像法, 假设两次成像透镜移动的距离为 e , 则该凸透镜的焦距为

$$f = \frac{L^2 - e^2}{4L}$$

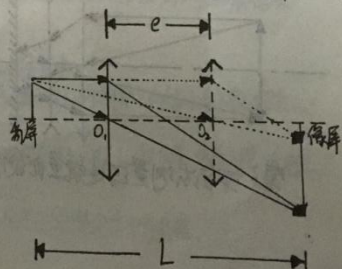


图1 共轭法测量凸透镜焦距的原理

2. 自准法测量凸透镜焦距

凸透镜焦平面上的点发出的光经过透镜后成为平行光,反之平行光经过透镜后汇聚在焦平面上。根据这一性质,当物屏放在透镜的焦平面上时,由物发出的光经过透镜后均形成平行光。如果在透镜后面放一个与透镜光轴垂直的平面反射镜,则平行光经平面镜反射,沿反方向行进经过凸透镜,并成像在物屏上,物屏与透镜之间的距离就是透镜的焦距,如图2所示。当方法是利用调节装置本身,使产生平行光,从而达到调焦的目的,所以称为自准法。

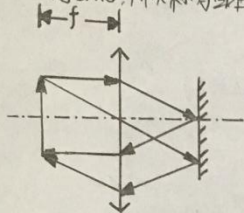


图2. 自准法测量凸透镜原理图。

4. 自准法测量凹透镜焦距

平行光经过凹透镜后发散,其反向延长线交于焦平面,反之延长线交于焦平面的光线经过凹透镜后成为平行光。根据这一性质,可用以下方法测量凹透镜的焦距。由凹透镜得到平行光,需借助凸透镜来完成。先单独使用凸透镜 L_1 使物成实像于B点,然后将凹透镜 L_2 与平面镜 M 依次放在凹透镜之后,调整 L_2 的位置,使 L_2 位于 L_1 与B之间且 L_2 的光心 O_2 与B点的距离 O_2B 等于凹透镜的焦距。此时,物上某一点发出的光线在交于B点所在的像平面,不此像平面就是凹透镜的焦平面,则光线经过凹透镜后会变成平行光,此平行光经从反射回来后经过 L_2 和 L_1 又会成像在物屏上。那么在实验中测量 O_2B 就得到凹透镜的焦距,这就是凹透镜自准法,如图3所示。

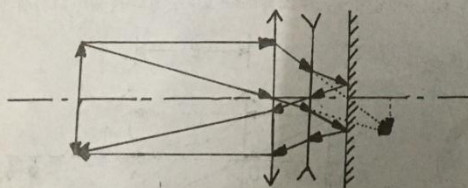


图3. 自准法测量凹透镜焦距的原理。

四、实验内容与步骤

1. 共轭法调节光学元件的同轴等高

- ①粗调。将物屏、凸透镜和像屏固定在光具座上，并依次放置在导轨上。将光具座靠紧，调节高低左右，使光源中心、物屏中心、透镜中心和像屏中心大致在同一高度和同一轴线上。
- ②细调。用共轭法原理进行调节，使物屏与像屏之间的距离 $L > 4f$ (先测定凸透镜焦距的估计值)。将凸透镜从物屏向像屏缓慢移动，此过程会在像屏上先后看到大小两个像(图1)。若所成的实像与虚像的重合，则等高共轴已调节好。若大像中心在小像中心的下方，说明凸透镜位置偏低，应将其位置调高；反之，则将凸透镜调低。同理，两个像左右偏斜的情况也依此来调节，即所谓的大像追小像。

③若有两个以上的透镜需调整，可先用上述方法调好一个凸透镜，让像中心的位置，再放入下一个透镜，使该透镜组成像，而上述透镜不动，调整后放入透镜的高低左右，使所成像的轴与像中心重合，这样就调好了。放入第三、四透镜也进行同样调节。

2. 共轭法测量凸透镜焦距

同轴等高调节完成后，便可完成共轭法测量凸透镜焦距的实验。

- ①保持物屏与像屏之间的距离 $L > 4f$ 不变。读出物屏所在位置和像屏所在位置，填入表(一)两栏相邻格上。
- ②凸透镜由物屏转向像屏，使像屏上呈现清晰的放大的倒立实像，记下此时的位置 O_1 ，继续移动凸透镜，使像屏上呈现清晰的缩小的倒立实像，记下此时的位置 O_2 ，求出 $e = |O_1 - O_2|$ 。
- ③重复上述步骤5次，得5组数据 e_1, e_2, e_3, e_4, e_5 ，计算平均值并代入公式 $f = \frac{L^2 - e^2}{4L}$ 计算焦距。

3. 自准法测量凸透镜焦距

①调节光源、物屏、凸透镜、凹透镜、平面镜和像屏的同轴等高。

②如图3所示，将物屏、凸透镜和像屏放置在导轨上，用凸

3. 自准法测量凸透镜焦距

如图2所示，在导轨上放置物屏、凸透镜和平面镜，物屏与平面镜之间的距离比所测凸透镜的焦距要大，且平面镜不要离透镜太远。记物屏的位置，前后移动凸透镜，使物屏上产生倒立、等大、清晰的实像。记下凸透镜在导轨上的位置。需要特别指出的是，检查所看到的像是不是实验所需要的像的方法是：用刻尺遮住平面镜，看像是否消失，若不消失则需继续调节。

4. 自准法测量凹透镜焦距

①首先调节光源、物屏、凸透镜、凹透镜、平面镜和像屏的同轴等高。

②如图3所示，将物屏、凸透镜和像屏放置在导轨上，用凸透镜 L_1 将物成一个缩小的实像于 B 点，记下 B 点位置。

③将凹透镜 L_2 从平面镜处依次放在凸透镜后，使 L_2 位于 L_1 与 B 之间，调整 L_2 的位置，使屏上成一个倒立的清晰的像。记下 L_2 的位置 O' ，凹透镜的焦距 $f' = 0.5$ 。

重复以上步骤，对每次测量的结果取平均值，需要特别指出的是凹透镜的焦距为负值。

五、数据记录

(一) 自准法测凸透镜焦距数据表格

单位: cm

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
物屏位置	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	
透镜位置	100.2	100.2	100.2	100.0	100.0	
焦距	19.8	19.8	19.8	20.0	20.0	19.9

(二) 共轭法测凸透镜焦距数据表格

单位: cm

测量次数	物屏位置	像屏位置	Q_1	Q_2	e	e'	L	f
1	120.0	30.0	90.2	59.9	30.3	30.3	90.0	19.9
2			90.3	60.2	30.1			
3			90.5	60.3	30.2			
4			90.0	59.4	30.6			

(三) 自准法测凹透镜焦距数据表格

单位: cm

测量次数	像 1 的位置(小像)	凹透镜的位置	焦距
1	30.0	44.3	-14.3
2	30.0	44.2	-14.2
3	30.0	44.1	-14.1

六、数据处理 (要有详细过程)

1. 凹透镜自准法:

$$\bar{f} = \frac{\sum f_i}{n} = \frac{19.8 + 19.8 + 19.8 + 20.0 + 20.0}{5} \text{ cm} = 19.9 \text{ cm}$$

$$\sigma_{fA} = t_p \sqrt{\frac{\sum (f_i - \bar{f})^2}{n(n-1)}} = 1.14 \times \sqrt{\frac{(19.8-19.9)^2 + (19.8-19.9)^2 + (19.8-19.9)^2 + (20.0-19.9)^2 + (20.0-19.9)^2}{5 \times (5-1)}} \text{ cm} = 0.057 \text{ cm}$$

$$\sigma_{fB} = \frac{\Delta f}{\sqrt{3}} = \frac{0.2 \text{ cm}}{\sqrt{3}} = 0.115 \text{ cm}$$

$$\sigma_f = \sqrt{\sigma_{fA}^2 + \sigma_{fB}^2} = \sqrt{0.057^2 + 0.115^2} = 0.1 \text{ cm} \quad E_f = \frac{\sigma_f}{\bar{f}} = \frac{0.1}{19.9} \times 100\% = 0.5\%$$

$$\begin{cases} f = \bar{f} \pm \sigma_f = (19.9 \pm 0.1) \text{ cm} \\ E_f = 0.5\% \end{cases}$$

2. 凹透镜自准法 $\bar{f} = \frac{\sum f_i}{n} = \frac{-14.3 - 14.2 - 14.1}{3} \text{ cm} = -14.2 \text{ cm}$

$$\sigma_{fA} = t_p \sqrt{\frac{\sum (f_i - \bar{f})^2}{n(n-1)}} = 1.32 \times \sqrt{\frac{[-14.3 - (-14.2)]^2 + [-14.2 - (-14.2)]^2 + [-14.1 - (-14.2)]^2}{3 \times (3-1)}} \text{ cm} = 0.076 \text{ cm}$$

$$\sigma_{fB} = \frac{\Delta f}{\sqrt{3}} = \frac{0.2 \text{ cm}}{\sqrt{3}} = 0.115 \text{ cm} \quad \sigma_f = \sqrt{\sigma_{fA}^2 + \sigma_{fB}^2} = \sqrt{0.076^2 + 0.115^2} \text{ cm} = 0.1 \text{ cm} \quad E_f = \frac{\sigma_f}{\bar{f}} = \frac{0.1}{14.2} \times 100\% = 0.7\%$$

$$\begin{cases} f = \bar{f} \pm \sigma_f = (-14.2 \pm 0.1) \text{ cm} \\ E_f = 0.7\% \end{cases}$$

3. 凹透镜共轭法:

$$\bar{L} = \frac{\sum L_i}{n} = \frac{30.3 + 30.1 + 30.2 + 30.6}{4} \text{ cm} = 30.3 \text{ cm}$$

$$\sigma_L = \frac{\Delta L}{\sqrt{3}} = \frac{0.2 \text{ cm}}{\sqrt{3}} = 0.115 \text{ cm} \approx 0.1 \text{ cm} \quad E_L = \frac{\sigma_L}{\bar{L}} = \frac{0.115}{30.3} \times 100\% = 0.38\%$$

$$\begin{cases} L = \bar{L} \pm \sigma_L = (30.3 \pm 0.1) \text{ cm} \\ E_L = 0.38\% \end{cases}$$

$$\bar{e} = \frac{\sum e_i}{n} = \frac{30.3 + 30.1 + 30.2 + 30.6}{4} \text{ cm} = 30.3 \text{ cm} \quad \sigma_{eB} = \frac{\Delta e}{\sqrt{3}} = \frac{0.2 \text{ cm}}{\sqrt{3}} = 0.115 \text{ cm}$$

$$\sigma_{eA} = t_p \sqrt{\frac{\sum (e_i - \bar{e})^2}{n(n-1)}} = 1.20 \times \sqrt{\frac{(30.3-30.3)^2 + (30.1-30.3)^2 + (30.2-30.3)^2 + (30.6-30.3)^2}{4 \times (4-1)}} \text{ cm} = 0.130 \text{ cm}$$

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{eA}^2 + \sigma_{eB}^2} = \sqrt{0.130^2 + 0.115^2} \text{ cm} = 0.17 \text{ cm} \quad E_e = \frac{\sigma_e}{\bar{e}} = \frac{0.17}{30.3} \times 100\% = 0.56\%$$

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial e}\right)^2 \sigma_e^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{4L^2}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{e}{2L}\right)^2 \sigma_e^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{4 \times 30.3^2}\right)^2 \times 0.1^2 + \left(\frac{30.3}{2 \times 30.3}\right)^2 \times 0.17^2} \text{ cm} = 0.1 \text{ cm}$$

$$E_f = \frac{\sigma_f}{\bar{f}} = \frac{0.1}{14.9} \times 100\% = 0.67\%$$

$$\begin{cases} f = \bar{f} \pm \sigma_f = (14.9 \pm 0.1) \text{ cm} \\ E_f = 0.67\% \end{cases}$$

七、实验分析

通过对薄透镜焦距测量实验,发现由于人眼对成像的清晰度分辨能力有限,所观察到像在一定范围内都清晰,加之球差的影响,清晰成像位置会偏离高斯像,为减小误差,以读数对应使用左右逼近的方法。
本实验的系统误差经前面的分析和检查可知,对测量结果影响较小,而平均值的标准偏差亦较小,所以该实验测量精度较高,平均值可以作为一组测量值中接近真值的最佳值。

八、思考题与思维拓展

- 为什么要调节光学系统共轴?调节共轴有哪些要求?怎样调节?
 - 为什么实验中常用白屏作为成像的光屏?可否用黑屏、透明平玻璃、毛玻璃,为什么?
 - 为什么用共轭法测量凸透镜焦距时要保证物屏与像屏之间的距离 $L > 4f$?
- 1.0 光学系统中有一束光轴光轴上的物点经过光学系统,其像点也在光轴上,只有保证共轴等高,才能使像清晰地呈现在光屏上。若未调到同轴,则出的像就会偏离光轴平面,使得焦距产生较大误差。
- ① 粗调和细调
3. 将物屏、凸透镜和像屏固定在光座上,并依次放在导轨上。将光座靠拢,调节高低左右,使光源中心、物屏中心、透镜中心和像屏中心大致在同一直线上。用共轭原理进行调整,使 $L > 4f$ 。将凸透镜从物屏向像屏缓慢移动,若移动过程中所成的大像、小像的中心重合,则已调节好。
2. 白屏作为底色,总容易在实验中观察到亮度变化。黑屏会吸收所有光,不能看清。透明玻璃会透光而反射,反射光不一定进入观察者的眼睛,光能透进平玻璃和毛玻璃,所以也不能看清。
3. 根据凸透镜成像公式: $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$, 凸透镜成像时,如果物距等于二倍焦距,像距也为二倍焦距;如果物距在一至二倍焦距之间,像距大于二倍焦距;如果物距大于二倍焦距,则像距位于一至二倍焦距之间。所以无论如何,物距加像距总是大于等于四倍焦距,故令物屏与像屏之间满足 $L > 4f$, 才能成像于物屏像屏上。



河北工业大学

HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

(一) 自准直法测凹透镜焦距数据表格

单位: cm

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
物屏位置	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	—
透镜位置	100.2	100.2	100.2	100.0	100.0	—
焦距	19.8	19.8	19.8	20.0	20.0	19.9

(二) 共轭法测凹透镜焦距数据表格

单位: cm

测量次数	物屏位置	像屏位置	Q_1	Q_2	e	\bar{e}	L	f
1	120.0	30.0	90.2	59.4	30.3	30.3	90.0	19.9
2			90.3	60.2	30.1			
3			90.5	60.3	30.2			
4			90.0	59.4	30.6			

(三) 自准直法测凹透镜焦距数据表格

单位: cm

测量次数	像1的位置(小像)	凹透镜的位置	焦距
1	30.0	44.3	-14.3
2	30.0	44.2	-14.2
3	30.0	44.1	-14.1

26/3