

## 实验题目：光学基本测量 薄透镜焦距测量

学号: [REDACTED] 姓名: [REDACTED] 班级: [REDACTED] 成绩: [REDACTED]  
同组人: [REDACTED] 实验日期、时段: 3月26日三时段 教师签名: [REDACTED] 36

### 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、卡尺法等）。
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、光具夹、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光轴计算长度的，而长度是由光具座的刻度来读取的。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，即处处高度相等，即同轴等高。

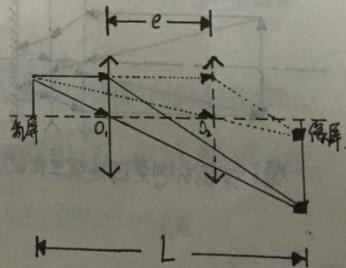
#### 2. 卡尺法测量凸透镜焦距

根据凸透镜成像规律，当物距在一至二倍焦距（焦距用e表示）之间时成倒立放大实像，像距在一倍焦距；当物距大于二倍焦距时成倒立缩小实像，像距在一至二倍焦距之间。固定物屏和像屏之间距离L，使L>4f，利用凸透镜在物屏和像屏之间来回移动，会看到两次成像且物、像大体相对称，如图1所示。这种测量凸透镜焦距的方法叫共轭法。

又叫二次成像法或共轭法等，假设两次成像透镜移动的距离为l，则该透镜的焦距为

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

图1 卡尺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构成平行光。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，并成像于物屏上，物屏与透镜之间的距离就是透镜的焦距。如图2所示。这种方法是利用调节实验装置本身，使产生平行光，从而达到调焦的目的，所以称为自准法。

$$\rightarrow -f \rightarrow$$

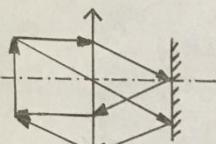


图2. 自准法测量凸透镜原理图。

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，可用自准法测量凹透镜的焦距。为了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<sub>1</sub>使物屏成像于B点，然后将凹透镜L<sub>2</sub>与凸透镜L<sub>1</sub>依次放在凹透镜之后。调整L<sub>2</sub>的位置，使L<sub>2</sub>位于L<sub>1</sub>与B之间，且L<sub>2</sub>的光心O'与B间的距离OB等于凹透镜的焦距。此时，物上某一点发出的光束应交于B点所在的位置平面，而此像平面就是凹透镜的焦平面，即光线通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<sub>2</sub>和L<sub>1</sub>又会聚成像在物屏上，那么实像中测量OB就得到凹透镜的焦距。这就是凹透镜的自准法，如图3所示。

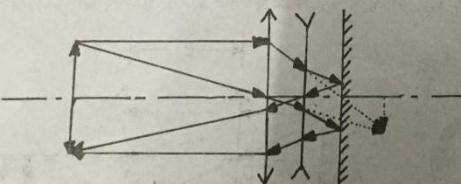


图3. 自准法测量凹透镜焦距的原理。

**四、实验内容与步骤****1. 共轭法调节光学元件的同轴共高**

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。将光具座靠拢，调节滑块左右，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直线上。

②细调。用共轭原理进行调整，使物屏与像屏之间的距离  $L > 4f$ （实验室中一般透镜焦距的倍数）。

③将凸透镜从物屏向像屏缓慢移动，此过程中在像屏上出现大小两个像（图1）。若所成的像与小像的中心重合，用高脚架调节好；若大像中心在小像中心的下方，说明凸透镜位置偏低，应将凸透镜调高；反之，则将凸透镜调低。同理，对像左右偏移的情况也依此法调节，即所测的大像到底。

④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，对像中心的位置，再放入下一个透镜，使该透镜组成像，而透镜不动，调整后放入透镜的后面左右，使所成像的中心与原像中心重合，这样就调节好了。放入第三、四透镜也进行同样调节。

**2. 单轨法测量凸透镜焦距**

同轴共高调节完成后便完成单轨法测量凸透镜焦距的要点。

①保持物屏与像屏之间的距离  $L > 4f$  不变。测出物屏所在位置和像屏所在位置，记下来（一），两位置相距得  $L$ 。

②凸透镜由物屏移向像屏，使像屏上呈现清晰的倒立实像，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  $f = |O_2 - O_1|$ 。

重复上述步骤5次，得五组数据  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5$ ，计算平均值并代入公式  $f = \frac{L^2 - \bar{e}^2}{4\bar{e}}$  计算焦距。

**3. 双轨法测量凸透镜焦距**

①在光具座上放物屏、凸透镜、平面镜、像屏和高脚架的高脚架。

②如图所示，将物屏、凸透镜和像屏放在导轨上，用凸透镜  $L$  将物成一个缩小的像于已知。

**4. 单位法测量凸透镜焦距**

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。记下物屏的位置，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。需要注意的是，检测的条件是成像是否是完整的需要的像的方法是用纸片遮住平面镜，看像是是否消长，若不消长则需继续调节。

重复以上步骤5次，反向判断成像是否清晰，在图2中记录物屏及透镜所在的位置，两位置相减得透镜的焦距  $f$ 。计算附子的平均值。

**4. 白准法测量凸透镜焦距**

①首先调节光源、物屏、凸透镜、平面镜和像屏的同轴共高。

②如图3所示，将物屏、凸透镜和像屏位置放置在导轨上，用凸透镜  $L$  将物成一个缩小的像于已知，记下  $B$  点位置。

③将凸透镜  $L$  和平面镜从依次放在凸透镜后，使  $L$  位于  $A$  与  $B$  之间，调整  $L$  的位置，使屏上成一个倒立的放大的清晰的像。记下  $L_2$  的位置  $O'$ ，凸透镜的焦距  $f' = 0.5$ 。

重复以上步骤，对每次测量的结果取平均值。需要注意指出的是凸透镜的焦距为负值。

## 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. 凸透镜单摆法:

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

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

$$\sigma_{\bar{f}_{13}} = \frac{\Delta f}{\sqrt{3}} = \frac{0.2 \text{ cm}}{\sqrt{3}} = 0.115 \text{ cm}$$

$$\sigma_{\bar{f}} = \sqrt{\sigma_{\bar{f}_A}^2 + \sigma_{\bar{f}_{13}}^2} = \sqrt{0.057^2 + 0.115^2} = 0.1 \text{ cm}$$

$$\begin{cases} \bar{f} = \bar{f} \pm \sigma_{\bar{f}} = (19.9 \pm 0.1) \text{ cm} \\ E_f = \frac{\sigma_{\bar{f}}}{\bar{f}} = \frac{0.1}{19.9} \times 100\% = 0.5\% \end{cases}$$

$$2. 四缝屏单摆法 \quad \bar{f} = \frac{\bar{e}_i}{n} = \frac{-14.3 - (-14.2 - 14)}{3} \text{ cm} = -14.2 \text{ cm}$$

$$\sigma_{\bar{f}_A} = t_p \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{f}_i - \bar{f})^2}{n(n-1)}} = 1.32 \times \sqrt{\frac{[-14.3] - [-14.2]^2 + [(-14.2) - (-14.2)]^2 + [(-14.1) - (-14.2)]^2}{3 \times (3-1)}} \text{ cm} = 0.07 \text{ cm}$$

$$\sigma_{\bar{f}_{13}} = \frac{\Delta f}{\sqrt{3}} = \frac{0.2 \text{ cm}}{\sqrt{3}} = 0.115 \text{ cm} \quad \sigma_{\bar{f}} = \sqrt{\sigma_{\bar{f}_A}^2 + \sigma_{\bar{f}_{13}}^2} = \sqrt{0.07^2 + 0.115^2} \text{ cm} = 0.1 \text{ cm} \quad E_f = \frac{\sigma_{\bar{f}}}{\bar{f}} = \frac{0.1}{-14.2} \times 100\% = 0.7\%$$

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

3. 凸透镜共轭法.

~~$$\sigma_{\bar{L}} = \frac{\Delta f}{\sqrt{3}} = \frac{0.2 \text{ cm}}{\sqrt{3}} = 0.115 \text{ cm} = \frac{\bar{f}}{2} = \frac{-14.3}{2} = -7.15 \text{ cm}$$~~

$$\sigma_{\bar{L}} = \sigma_{\bar{L}_{13}} = \frac{\Delta f}{\sqrt{3}} = \frac{0.2 \text{ cm}}{\sqrt{3}} = 0.115 \text{ cm} \approx 0.1 \text{ cm} \quad E_L = \frac{\sigma_{\bar{L}}}{\bar{L}} = \frac{0.115}{30.0} \times 100\% = 0.13\%$$

$$\begin{cases} \bar{L} = \bar{L} \pm \sigma_{\bar{L}} = (30.0 \pm 0.1) \text{ cm} \\ E_L = 0.13\% \end{cases}$$

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

$$\sigma_{\bar{e}_A} = t_p \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{e}_i - \bar{e})^2}{n(n-1)}} = 1.20 \times \sqrt{\frac{(30.3 - 30.3)^2 + (30.1 - 30.3)^2 + (30.2 - 30.3)^2 + (30.6 - 30.3)^2}{4 \times (4-1)}} \text{ cm} = 0.130 \text{ cm.}$$

$$\sigma_{\bar{e}} = \sqrt{\sigma_{\bar{e}_A}^2 + \sigma_{\bar{e}_B}^2} = \sqrt{0.130^2 + 0.115^2} \text{ cm} = 0.17 \text{ cm} \quad E_e = \frac{\sigma_{\bar{e}}}{\bar{e}} = \frac{0.17}{30.3} \times 100\% = 0.5\% \quad \begin{cases} \bar{e} = \bar{e} \pm \sigma_{\bar{e}} = (30.3 \pm 0.2) \text{ cm} \\ E_e = 0.7\% \end{cases}$$

$$\sigma_{\bar{f}} = \sqrt{\frac{\partial f}{\partial L}^2 \cdot \sigma_L^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial e}\right)^2 \cdot \sigma_e^2} = \sqrt{\left(\frac{L^2 + \bar{e}^2}{4L^2}\right)^2 \cdot \sigma_L^2 + \left(\frac{\bar{e}}{2L}\right)^2 \cdot \sigma_e^2} = \sqrt{\left(\frac{90.0^2 + 30.3^2}{4 \times 90.0^2}\right)^2 \times 0.1^2 + \left(\frac{30.3}{2 \times 90.0}\right)^2 \times 0.2^2} \text{ cm} = 0.1 \text{ cm}$$

$$E_f = \frac{\sigma_{\bar{f}}}{\bar{f}} = \frac{0.1}{19.3} \times 100\% = 0.5\%$$

$$\begin{cases} \bar{f} = \bar{f} \pm \sigma_{\bar{f}} = (19.3 \pm 0.1) \text{ cm} \\ E_f = 0.5\% \end{cases}$$

## 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，所观察到的像在一定范围内清晰，加之球差的影响，清晰成像位置会偏离高斯像。

为了减小误差，计算数据时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较小，所以该实验精度较高，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

1. 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？

2. 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？

3. 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光路系统中有一条光轴，光轴上的物点经过光学系统，其像点也在光轴上。只有保证共轴共高，才能使像清晰地呈现在光屏上。若未调到同轴，则测出的像就会偏离光轴平面，使得焦距产生较大误差。

②粗调和细调

③将物屏、凸透镜和像屏固定在光具座上，并依次放置在单上。将光具座靠拢，调节高低左右，使光源中心、物屏中心和像屏中心大致在同一高度上。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，在所成大像与小像的中心重合时已调节好。

2. 白屏作为底色，很容易在实验室中观察到颜色变化。黑屏会吸收所有光，不能看清。透明玻璃会发生镜面反射，反射光不一定进入观看者的眼睛，光能透过玻璃和毛玻璃，所以也不能看清。

3. 根据凸透镜成像公式： $\frac{1}{物距} + \frac{1}{像距} = \frac{1}{焦距}$ ，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，像距小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
物距位置	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	物距	像距	$Q_1$	$Q_2$	e	$\bar{e}$	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) 固准法测凹透镜焦距数据表格

单位: cm

测量次数	像的位置(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

3  
26/3