



北京航空航天大学 实验报告

实验名称: 透镜焦距测量

一. 实验目的.

1. 掌握凸透镜的成像规律.
2. 掌握“大像追小像”的等高共轴调节方法
3. 学习几种常用测量薄透镜焦距的方法 (共轭法, 自准直法, 物距像距法等)

二. 预习要点.

1. 薄透镜成像公式: $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$, u 为物距, v 为像距, f 为焦距.

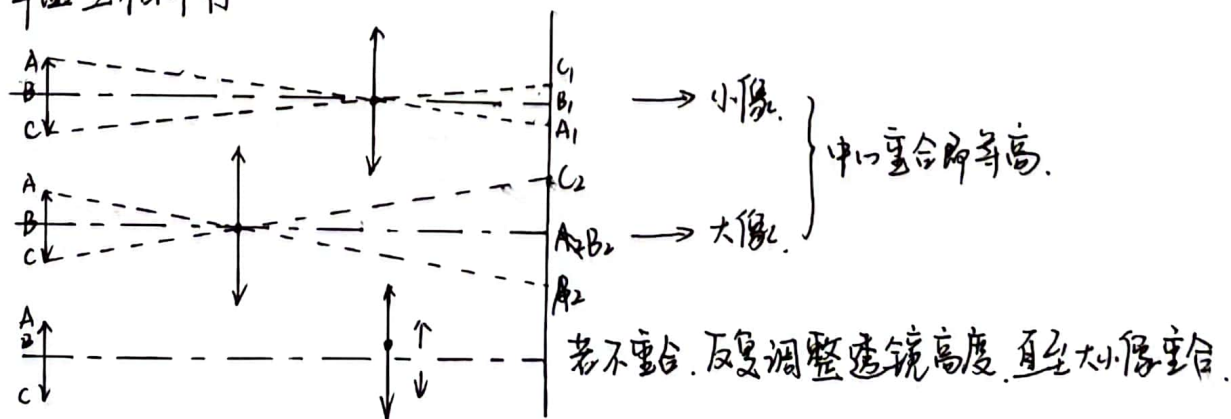
使用条件: (1). 薄透镜: 透镜的中心厚度 d 远小于其焦距 f 的透镜.

(2). 近轴光线: 通过透镜中心部分并与主光轴夹角很小的光线. 为满足此条件, 常在透镜前后加光阑, 以挡住边缘光线.

(3). 选用小物体, 并做等高共轴调节.

2. 使用“大像追小像”方法调节等高共轴.

(1) 目测粗调: 把光源、物屏、透镜和像屏依次装好. 先将它们靠拢, 使各元件中心在等高的一条直线上, 并使物屏、透镜、像屏的平面互相平行.



1.2. 细调: 利用共轭法调整, 固定物屏和像屏的位置, 使 $u > 4f$, 在物屏和像屏间移动凸透镜, 可得一大一小两次成像。若两个像的中心重合, 即表示已经共轴。若不重合, 可先在小像中心作一记号, 调节透镜高度使大像中心与小像中心重合, 如此反复调节透镜高度, 使大像的中心趋向小像的中心, 直至完全重合。

3. 测读法: 将透镜自左向右移动找到清晰像, 记下位置 x , 再将透镜自左向右移动, 找到清晰像, 记下位置 x' , 取两位置的中心 $x = \frac{x+x'}{2}$ 作为透镜成像位置。

目的: 减少系统误差。

4. 自准直法测透镜焦距时, 采用对称测量法, 将透镜反转 180° , 重复以上测量, 然后取两者平均值, 可减少由于透镜中心与支架刻度线位置不重合引起的系统误差。

5. 共轭法测数据表格:

成放大像时凸透镜位置		成缩小像时凸透镜位置		屏位置 x_3/mm	物(光源)位置 x/mm
从左靠近 x_1/mm	从右靠近 x_2/mm	从左靠近 x_1/mm	从右靠近 x_2/mm		

三. 实验原理

(一) 共轭法测凸透镜焦距

设凸透镜焦距为 f , 使物与屏的距离 $L > 4f$ 并保持不变。如图所示, 移动透镜至 x_1 处, 在屏上成放大像, 再移至 x_2 处, 成缩小像。令 x_1 和 x_2 间

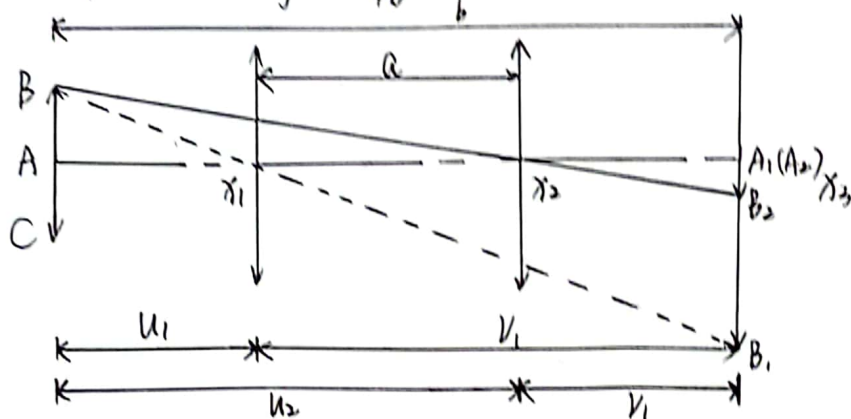


北京航空航天大学 实验报告

实验名称: 透镜焦距测量

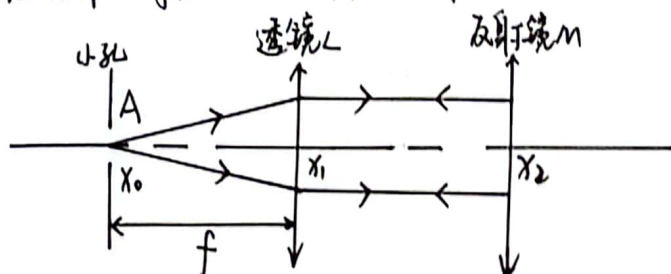
的距离为 a , 物到像屏的距离为 b . 根据其共轭关系有 $u \geq f$, $v \geq f$, 由

图式可得, $f = \frac{b^2 - a^2}{4b}$



(一). 自准直法测凸透镜焦距.

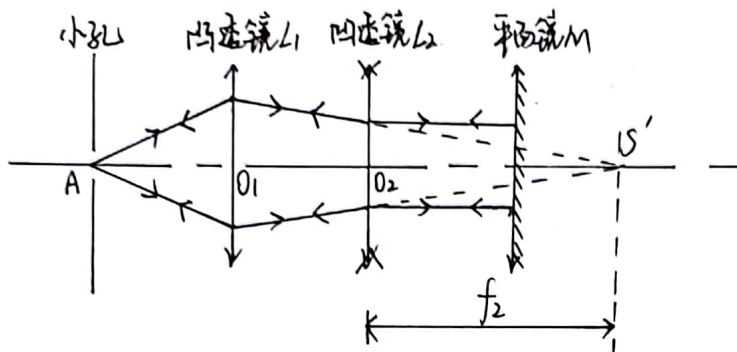
如图, 当小孔 A 处于透镜 L 的前焦点时, 光经过透镜成为平行光, 在此平行光经过的光路上放一个与透镜光轴垂直的平面反射镜 M, 其反射光将沿原光路返回至小孔. 小孔的像与小孔反向等大, 孔与透镜的距离即为透镜焦距 f . 这种利用调节装置本身使之产生平行光束调焦的法称为自准直法.



(三). 自准直法测凹透镜焦距 (选做实验)

如图, 先由凸透镜 L_1 将小孔 A 成像于 S' 处, 然后将待测凹透镜 L_2 和平面镜 M 置于凹透镜 L_1 和像 S' 之间, 若 L_1 光心 O_1 与 S' 间距 $O_1S' > |f_2|$, 则

当移动 L_2 , 使 L_2 的光心 O_2 到 S 的距离 $O_2S' = |f_2|$ 时, 由小孔 A 发出的光束经过 L_1, L_2 后变成平行光, 通过平面反射镜 M 的反射, 又在小孔处成一清晰的实像, 通过平面反射镜 M 的反射, 又在小孔处成一清晰实像. 于是确定了像与凹透镜光心的水平距离, 即可测得凹透镜的焦距 f_2 .



四. 实验器材.

光具座(导轨), 凹透镜, 凹透镜, 光源, 屏, 小孔, 凸面镜, 凹面镜, 平面反光镜.

五. 实验内容

(一). 观察并记录凹透镜的成像规律.

在 $u < f$, $u = f$, $f < u < 2f$, $u = 2f$, $u > 2f$ 处观察并记录像的位置, 像的大小, 像的虚实, 并绘制表格记录现象.

(二). 利用“大像追小像”方法调节等高共轴.

首先确认 $b > 4f$, 完成目测粗调, 再进行细调. 光透镜成小像时, 调节屏的高低左右, 记录小像中心的位置, 当透镜成大像时, 调节透镜的高低, 左右位置, 使大像中心与此前重合, 重复这一过程, 使各元件中心点逐渐逼近, 达到等高共轴.

(三). 共轭法测凹透镜焦距.

记录 x_0, x_1, x_2, x_3 的原始刻度位置. 固定物屏位置, 用测读法重复测量 5



北京航空航天大学 实验报告

实验名称: 透镜焦距测量

组数据, 根据所推导的公式求出焦距并计算不确定度, 其中由于透镜的清晰度存在一定范围, 可将其自左向右移动找到像, 记为 $x_{左}$, 再将其自右向左移动找到清晰像, 记为 $x_{右}$, 将 $x_{左}$ 与 $x_{右}$ 取平均值, 做为透镜位置.

(四) 自准直法测量凸透镜焦距.

利用调节装置本身使之产生平行光来测量焦距, 采用对称测量法消除透镜中心与支架刻线位置不重合的系统误差. 平移改变发光物的位置重复测量5次, 计算5组焦距.

(五) 自准直法测量凹透镜焦距.

先令凸透镜成实像, 用测读法确定像的位置, 再用对称测量法确定凹透镜满足实验所需时所在的位置. 重复进行5次测量, 计算这5组焦距.

六. 数据处理

(一) 凸透镜成像规律.

物距	像的位置	像的大小	像的虚实
$u < f$	同侧	正立放大	虚像
$u = f$	无	无	无
$f < u < 2f$	异侧	倒立放大	实像
$u = 2f$	异侧	倒立等大	实像
$u > 2f$	异侧	倒立缩小	实像

(二). 共扼法测量凸透镜焦距.

1. 原始数据记录. 修正值 $\delta = 8.5 \text{ mm}$, 单位: mm, 其中 $b = |\bar{x}_3 - \bar{x}_0| - \delta$, $f = \frac{b^2 - a^2}{4b}$

组数	\bar{x}_0	$\bar{x}_{1左}$	$\bar{x}_{1右}$	\bar{x}_1	$\bar{x}_{2左}$	$\bar{x}_{2右}$	\bar{x}_2	$a = \bar{x}_2 - \bar{x}_1 $	\bar{x}_3	b	f
1	400.0	524.9	526.1	525.5	868.3	871.9	870.1	344.6	1000.0	591.5	97.685
2		523.1	525.1	524.1	865.0	872.0	868.5	344.4			97.743
3		522.0	526.1	524.05	866.3	872.2	869.25	345.2			97.510
4		523.3	526.2	524.75	865.6	871.8	868.7	343.95			97.874
5		522.2	525.0	523.6	864.2	873.4	868.8	345.2			97.510

2. 数据处理.

(1). 求出 \bar{a} , \bar{b} 并代入 $f = \frac{b^2 - a^2}{4b}$ 求出 \bar{f}

$$\bar{a} = \frac{\sum a}{5} = \frac{344.6 + 344.4 + 345.2 + 343.95 + 345.2}{5} = 344.67 \text{ mm}$$

$$\bar{b} = 591.5. \text{ 代入得 } \bar{f} = \frac{591.5^2 - 344.67^2}{4 \times 591.5} = 97.6648 \text{ mm}.$$

(2) 不确定度的计算.

① a 的不确定度.

$$u_a(a) = \sqrt{\frac{\sum (\bar{a} - a_i)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{1}{5 \times 4} \times [(344.67 - 344.6)^2 + (344.67 - 344.4)^2 + (344.67 - 345.2)^2 + (344.67 - 343.95)^2 + (344.67 - 345.2)^2]} = 0.2406 \text{ mm}$$

$$u_b(a) = \frac{\Delta \bar{x}}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.2887 \text{ mm}$$

$$u(a) = \sqrt{u_a^2(a) + u_b^2(a)} = \sqrt{0.2406^2 + 0.2887^2} = 0.3758 \text{ mm}$$

② b 的不确定度.

$$u_b(b) = \frac{\Delta \bar{x}}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.2887 \text{ mm}$$

$$\text{无 } u_a(b). \text{ 故 } u(b) = \sqrt{u_b^2(b)} = 0.2887 \text{ mm}$$

③ 合成 f 的不确定度.

$$\text{由 } f = \frac{b^2 - a^2}{4b} \text{ 得 } \frac{\partial f}{\partial a} = -\frac{a}{2b}, \frac{\partial f}{\partial b} = \frac{a^2}{4b^2} + \frac{1}{4}.$$



北京航空航天大学

实验报告

实验名称: 透镜焦距测量

$$\text{代入得 } \frac{\partial f}{\partial a} = -\frac{a}{2b} = -\frac{344.67}{2 \times 591.5} = -0.2914 \text{ mm}$$

$$\frac{\partial f}{\partial b} = \frac{a^2}{4b^2} + \frac{1}{4} = \frac{344.67^2}{4 \times 591.5^2} + \frac{1}{4} = 0.3349 \text{ mm}$$

$$\text{故 } u(f) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 u(a)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 u(b)^2} = \sqrt{(-0.2914)^2 \times 0.3758^2 + 0.3349^2 \times 0.2887^2} = 0.1461 \text{ mm}$$

3. 最终结果的表述.

共轭法测得的凸透镜焦距 $f \pm u(f) = (97.7 \pm 0.2) \text{ mm}$.

(三). 自准直法测量凸透镜焦距.

1. 原始数据记录: 修正值 $\delta = 8.5 \text{ mm}$, 单位 mm.

组数	x_A	$x_{L正}$	$x_{L反}$	x_L	$f = x_L - (x_A + \delta) $
1	400.0	499.1	503.0	501.05	92.55
2		499.3	502.4	500.85	92.35
3		500.1	504.3	502.2	93.7
4		498.9	503.9	501.4	92.9
5		499.6	503.8	501.7	93.2

2. 数据处理.

(1). 求出 \bar{x}_A , \bar{x}_L , \bar{f} .

$$\bar{x}_A = x_A = 400.0 \text{ mm} \quad \bar{x}_L = \frac{\sum x_L}{5} = \frac{1}{5} \times (501.05 + 500.85 + 502.2 + 501.4 + 501.7) = 501.44 \text{ mm}$$

$$\bar{f} = |501.44 - (400 + 8.5)| = 92.94 \text{ mm}$$

(2). 不确定度的计算.

① x_L 的不确定度.

$$u_A(x_L) = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x}_L - x_{Li})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{1}{5 \times 4} \times [(501.44 - 501.05)^2 + (501.44 - 500.85)^2 + \dots + (501.44 - 501.7)^2]} = 0.2395 \text{ mm}$$

$$u_b(x_L) = \frac{\Delta f_L}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.2887 \text{ mm}$$

$$u(x_L) = \sqrt{u_A^2(x_L) + u_b^2(x_L)} = \sqrt{0.2395^2 + 0.2887^2} = 0.3751 \text{ mm}$$

② x_A 的不确定度

$$u(x_A) = \sqrt{u_b^2(x_A)} = \frac{\Delta f_A}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.2887 \text{ mm}$$

③ 合成 f 的不确定度

$$u(f) = \sqrt{u^2(x_L) + u^2(x_A)} = \sqrt{0.3751^2 + 0.2887^2} = 0.4733 \text{ mm}$$

3. 最终结果的表述

自准直法测得的凸透镜焦距 $f \pm u(f) = (92.9 \pm 0.5) \text{ mm}$

(四) 自准直法测量凹透镜的焦距 (选做)

1. 原始数据记录: 单位 mm

组数	x_A' 左	x_A' 右	x_A'	x_{L2} 正	x_{L2} 反	x_{L2}	$f = - x_{L2} - x_A' $
1	796.9	802.1	799.5	702.8	706.3	704.55	-94.95
2	796.0	803.0	799.5	703.0	707.1	705.05	-94.45
3	797.9	806.1	802.0	703.4	707.9	705.65	-96.35
4	796.9	804.1	800.5	703.3	707.2	705.25	-95.25
5	797.4	804.3	800.85	703.5	706.9	705.2	-95.65

2. 数据处理

(1). 求出 \bar{x}_A' , \bar{x}_{L2} , \bar{f}

$$\bar{x}_A' = \frac{\sum x_{Ai}'}{5} = \frac{1}{5} \times (800.85 + 800.5 + 802.0 + 799.5 + 799.5) = 800.47 \text{ mm}$$

$$\bar{x}_{L2} = \frac{\sum x_{L2i}}{5} = \frac{1}{5} \times (704.55 + 705.05 + 705.65 + 705.25 + 705.2) = 705.14 \text{ mm}$$

$$\bar{f} = -|\bar{x}_{L2} - \bar{x}_A'| = -(705.14 - 800.47) = -95.33 \text{ mm}$$

(2). 不确定度的计算



北京航空航天大学 实验报告

实验名称: 透镜焦距测量

① λ_A 的不确定度.

$$u_A(\lambda_A) = \sqrt{\frac{\sum (\bar{\lambda}_A - \lambda_{Ai})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{1}{5 \times 4} \times [(800.47 - 799.5)^2 + \dots + (800.47 - 800.85)^2]} = 0.4673 \text{ mm}$$

$$u_b(\lambda_A) = \frac{\Delta \lambda}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.2887 \text{ mm}.$$

$$u(\lambda_A) = \sqrt{u_A^2(\lambda_A) + u_b^2(\lambda_A)} = \sqrt{0.4673^2 + 0.2887^2} = 0.5493 \text{ mm}.$$

② λ_{L2} 的不确定度.

$$u_A(\lambda_{L2}) = \sqrt{\frac{\sum (\bar{\lambda}_{L2} - \lambda_{L2i})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{1}{5 \times 4} \times [(705.14 - 704.55)^2 + \dots + (705.14 - 705.2)^2]} = 0.1778 \text{ mm}$$

$$u_b(\lambda_{L2}) = \frac{\Delta \lambda}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.2887 \text{ mm}.$$

$$u(\lambda_{L2}) = \sqrt{u_A^2(\lambda_{L2}) + u_b^2(\lambda_{L2})} = \sqrt{0.1778^2 + 0.2887^2} = 0.3391 \text{ mm}$$

③ 合成 f 的不确定度.

$$u(f) = \sqrt{u^2(\lambda_A) + u^2(\lambda_{L2})} = \sqrt{0.5493^2 + 0.3391^2} = 0.6455 \text{ mm}.$$

3. 最终结果的表述.

自准直法测得的凹透镜焦距 $f \pm u(f) = (-95.3 \pm 0.7) \text{ mm}$.

七. 思考题

1. 需要用像距更大的像, 成因是除自准直法产生了一个像以外, 凹透镜背对小孔的凹面会像凹面反射镜一样成一个倒立的实像, 但这个像的像距小于凹透镜的焦距.
2. 如放大镜, 投影机, 眼镜, 望远镜, 照相机, 门镜, 显微镜等

北京航空航天大学

BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

原始数据.

1. 凸透镜 $f \sim 100\text{mm}$ 成像规律.

	像的位置.	像的大小	像的虚实.
$u < f$	同侧	正立放大	虚像.
$u = f$		不成像.	
$f < u < 2f$	异侧	倒立放大.	实像.
$u = 2f$	异侧	倒立等大	实像.
$u > 2f$	异侧.	倒立缩小.	实像.

2. 共轭法测凸透镜焦距. $\delta = 8.5\text{mm}$ $b = |x_3 - x_1| - \delta$ 单位: mm

次数 \ 项目	x_0	$x_{左}$	$x_{右}$	x_1	$x_{左}$	$x_{右}$	x_2	$a = x_2 - x_1 $	x_3	b	f
1		524.9	526.1	525.5	868.3	871.9	870.1	344.6			97.685
2		523.1	525.1	524.1	865.0	872.0	868.5	344.4			97.743
3	400.0	522.0	526.1	524.5	866.3	872.2	869.25	345.2	1000.0	591.5	97.510
4		523.3	526.2	524.75	865.6	871.8	868.7	343.95			97.874
5.		522.2	525.0	523.6	864.2	873.4	868.8	345.2			97.510

估计. $\bar{f} = \frac{97.685 + 97.743 + 97.510 + 97.874 + 97.510}{5} = 97.6644\text{mm}.$

北京航空航天大学

BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

原始数据.

3. 自准直法测凹透镜焦距. $\delta = 8.5 \text{ mm}$. 单位: mm.

次数	χ_A	$\chi_{2正}$	$\chi_{2反}$	$\bar{\chi}_2$	$f = \bar{\chi}_2 - (\chi_A + \delta) $
1	400.0	499.1	503.0	501.05	92.55
2	400.0	502.4 ^{499.3}	502.4	500.85	92.35
3	400.0	500.1	504.3	502.2	93.7
4	400.0	498.9	503.9	501.4	92.9
5	400.0	499.6	503.8	501.7	93.2

估计 $\bar{f} = \frac{\sum f}{5} = 92.94 \text{ mm}$

93.2 ✓ 对

4. 自准直法测凹透镜焦距.

单位: mm

次数	$\chi'_{左}$	$\chi'_{右}$	χ'_A	$\chi_{2正}$	$\chi_{2反}$	χ_{22}	$f = - \chi_{22} - (\chi'_A + \delta) $
1	802.1 ^{796.9}	802.1	799.5	702.8	706.3	704.55	102.45 -94.95
2	796.0	803.0	799.5	707.0	707.1	705.05	102.95 -94.45
3	797.9	806.1	802.0	703.4	707.9	705.65	104.85 -96.35
4	796.9	804.1	800.5	703.3	707.2	705.25	103.75 -95.25
5	797.4	804.3	800.85	702.5	706.9	705.2	103.75 -95.65

估计 $\bar{f} = \frac{\sum f}{5} = \frac{-475.05}{5} = -95.01 \text{ mm}$