

基础物理实验

透镜焦距的测量



物理国家级实验教学示范中心（复旦大学）



欢迎大家修读本课程，请注意以下事项：

1. 课程有班级群，请注意加群，以便跟老师联系；
2. 本课程为必修课，若没通过，没有补考，只有重修；
3. 课程评分由平时成绩和期末成绩组成，请出席每一次实验课并提交报告，如特殊原因无法出席，请务必请假并联系老师申请补做；
4. 实验前认真预习并完成预习报告，没有预习报告，不允许做实验；
5. 诚实守信，不允许篡改、伪造或抄袭别人的数据，不允许带着别人的实验报告来实验室做实验，一经发现，该实验为 0 分。

透镜焦距的测量

日常生活中我们离不开透镜。比如，用照相机或手机拍照时，都用到了透镜。此外，用放大镜观察微小字体（或地图）；用望远镜观察远处景物（比如观看足球比赛或演唱会）；通过门镜上透镜观察门外情况……，这些都离不开透镜。实际上配戴眼镜同学天天与眼镜片（凹透镜）接触。人眼也可简化地看作一个凸透镜。透镜中最常用的是凸透镜与凹透镜；透镜最主要的参数就是焦距，通常用字母 f 表示。

用几块不同的透镜组合成的透镜组成像有很好的成像效果，可以消除像差等因素对成像的影响。所以大多数光学仪器都是用很多透镜组成光学系统。高级照相机变焦镜头就是用很多透镜等光学元件组成；世界上第一台天文望远镜伽利略望远镜就是用凹透镜与凸透镜组成；而开普勒望远镜用几块凸透镜组成。

透镜焦距测量实验是几何光学实验，它是光线为基础来研究光的传播和成像规律的实验。通过实验学会基本的光路调节方法；了解透镜焦距的各种测量方法；了解测量时所需用的基本仪器和可能达到的准确度；比较各种测量方法优缺点；学会计算测量结果的不确定度。

拍照时，为了不影响拍摄效果，特别注意照相机镜头不受污染。同样，在做实验时也应保持透镜清洁，手不要直接接触透镜表面。

实验目的

- 1.用多种方法测量凸透镜的焦距；
- 2.用组合透镜方法测量凹透镜焦距；
- 3.学会光路的调节方法，特别是光学系统共轴调节方法；
- 4.学会如何对测量结果进行不确定度评定的方法。

实验原理

为什么能看到物体，就是因为物体发出的光线到达眼睛，观察者才可以确定物体的存在。在光学中，把自发光或能散射光的物体称为实物。而光线汇聚成的“物”称为虚物，也就是说前面透镜成的像作为后面透镜成像时的物。物体发出光线经光学系统反射或折射后会聚成与原物相似的像，称为实像。而如果光线为发散光线，则光线的反向延长线（虚光线）相交后的像称为虚像。如图 1。在光学中，实像也可以看作虚物，比如，在很多透镜组成的光学系统中，前面透镜成的实像可以作为后面透镜成像时的虚物。判断方法见图 9（供参考）

光心是指透镜光轴上的一个特殊点 O 。对于厚透镜来说：当光线通过此点时，入射光与出射光相互平行，但有平行位移。对于薄透镜来说：入射光与出射光可近似看作无平行位移。

如图 2 所示，在近轴条件下，薄透镜的成像公式为

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

式 (1) 中 u 为物距（物到透镜光心的距离），实物 u 为正；虚物 u 为负。 v 为像距（像到透镜光心的距离），实像 v 为正；虚像 v 为负。 f 为透镜的焦距，凸透镜的焦距为正；凹透镜的焦距为负。如果已知物距 u 与像距 v ，则由式 (1) 可知透镜的焦距。

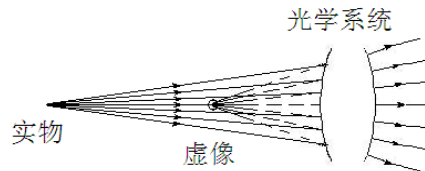
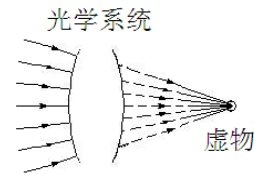
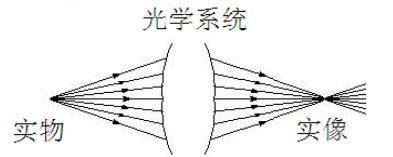


图 1 实（虚）物与实（虚）像

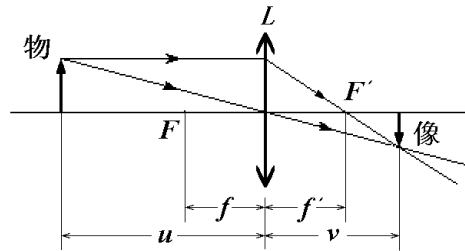


图 2 薄透镜的成像示意图

$$f = \frac{vu}{v+u} \quad (2)$$

当凸透镜成实像时，物的放大倍数 K 为

$$K = \frac{v}{u} \quad (3)$$

1. 粗测法

当物体放在无穷远的位置时， $u=\infty$ ，根据式(1)得 $v=f$ ，无穷远的物体成像在焦平面上。但是通常物体离凸透镜都有一定的距离，所以测得焦距为近似值。最后一位读到毫米，毫米以下不估读。粗测法虽然不够精确，但方法简单，测量时间短，常用作挑选凸透镜时的判断依据。

2. 二次成像法（贝塞耳法）

如图 3，保持物屏与像屏之间的距离 D 不变，且 $D>4f$ 。沿光轴方向移动凸透镜，可以在像屏上观察到两次成像：一次成倒立缩小实像，一次成倒立放大实像。设两次成像时，凸透镜移动的距离（凸透镜位置 d_1 与位置 d_2 之间距离）为 d ，则凸透镜的焦距为

$$f_1 = \frac{D^2 - d^2}{4D} \quad (4)$$

3. 自准直法

如图 4，当物体放在透镜的焦平面上，从物上 A 处发出的任意方向上的光线（比如光线 1 与光线 2）经过凸透镜后必成平行光。平行光以入射角 θ 照射在反射镜上，经反射镜反射后，所有反射角 θ 的平行光线再经过凸透镜后一定聚集在焦平面上（像的 A' 处）。实际上 A' 处发出的光也会聚集在 A 处（光可逆）。 θ 不相同，会聚点不相同。所以会聚点与入射角 θ 有关，入射角 θ 与物上某一点的位置有关。

同理可得，物上其他点 B 处发出光对应聚集在像的 B' 处（此时入射角 θ 为零）。自准直法中成的像是与原物大小相等的倒立实像。

4. 凹透镜的焦距测量（组合透镜法）

测量凹透镜的焦距时不能用以上三种方法，所以需要用一个凸透镜先成一个缩小的实像，如图 5。凹透镜以这个实像为虚物再通过凹透镜成实像，如图 6。设凹透镜到虚物的距离为 S_1 ，凹透镜到凹透镜成的实像的距离为 S_2 。则根据薄透镜的成像焦距测量公式(2)得凹透镜的焦距为

$$f_2 = \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2} \quad (5)$$

注意：公式中的 S_1 与 S_2 代入的数字的正负号。正负号与什么有关？

日常生活中常用眼镜的度数数值表示该眼镜镜片的焦距。眼镜的度数等于眼镜镜片的焦距（以米为单位）的倒数乘以 100。例如焦距为 -0.5m 的凹透镜所对应的度数为 -200 度。

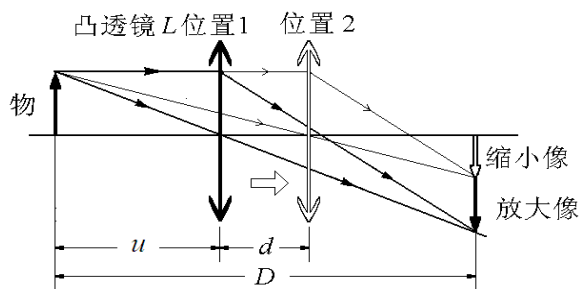


图 3 二次成像法测焦距示意图

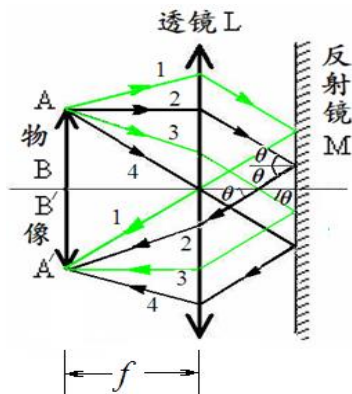


图 4 自准直法测焦距示意图

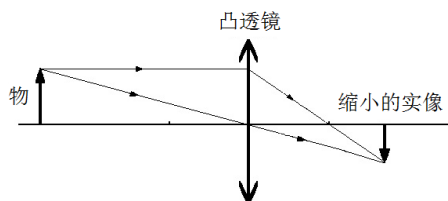


图 5 凸透镜成一个缩小的实像

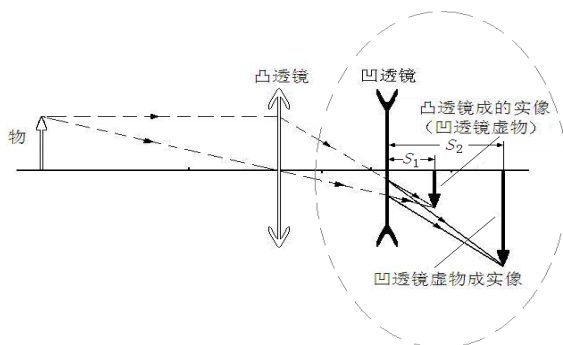


图 6 凹透镜虚物成实像

实验前应回答的问题（本实验报告不需要写实验原理，只需回答下列问题）

- 1.薄透镜的成像公式是什么？
- 2.放大倍数 K 公式是什么？
- 3.凸透镜的成像的光路图？
- 4.二次成像法中，测量透镜焦距公式是什么？
- 5.凹透镜的焦距测量公式？使用公式计算时要注意什么？

实验仪器（预习报告中不用细述）

实验仪器如图 7 所示

光具座上有金属导轨，导轨上贴有刻度尺。基座放在导轨上，基座可在导轨上来回移动。基座底部一侧有一个箭头对准导轨上的刻度尺，用来确定基座位置。基座上的夹具用来夹住透镜（架）、像屏（架）、带有三叶孔的物屏（架）、光源（架）。透镜（架）上有透镜固定螺丝。

光具座上带有激光测距辅助测量装置或游标尺辅助测量装置。



图 7 透镜焦距测量的实验装置

实验内容

1.粗测凸透镜的焦距

把凸透镜架对准远处的“无穷远”的实物。比如窗外建筑物。也可以把 5 米之外台灯或窗户近似作为“无穷远”的实物，使凸透镜在像屏上成清晰的像。此时像屏也可以用墙壁或书本取代。用钢尺测量出凸透镜与像屏之间的距离，这个距离就是凸透镜的焦距。焦距数值最后一位读到毫米，即毫米以下不估读，**不要求计算不确定度。**

2. 用二次成像法测量凸透镜的焦距

物屏靠近光源放置。

粗调（光学系统共轴调节）：物屏架，像屏架，凸透镜架放在光具座上的夹具中，并靠近放置。调节凸透镜高低，使物屏（三叶孔中心），像屏中心，凸透镜中心（光心）位置等高。

细调（光学系统共轴调节）：物屏不动，像屏向后移动到光具座一端。移动凸透镜，使物在屏上分别成一个放大像与缩小像。反复上下调节凸透镜的高低，使放大像与缩小像中心在屏上位置相同。

物屏与像屏距离 D 略大于凸透镜的焦距 f_1 的 4 倍，且放大像与缩小像大小之比为 3:1 左右。通过激光测距装置分别记录物经过凸透镜成的放大像与缩小像时凸透镜在光具座上的位置（测 5 次），物屏的位置与像屏的位置（测 1 次）。注意在整个测量过程中物屏位置与高低始终不变，**不要求计算不确定度。**

光学系统共轴如何调节？如何判断光学系统共轴？二次成像法测量凸透镜的焦距实验中对物屏与像屏距离 D 有什么要求？

3. 用自准直法测量凸透镜的焦距

保持凸透镜原来高度不变，在反射镜与物（像）屏之间放上凸透镜。凸透镜与物屏距离约 1 倍焦距，反射镜尽量靠近凸透镜放置。调节反射镜高低使透过凸透镜光大致照在反射镜中间位置。慢慢前后移动凸透镜使物屏上三叶孔清晰地成像在物屏上。调节反射镜架上的调节螺丝，使物屏上三叶孔与三叶孔的倒立实像“拼接”成一个“圆”如图 8。

记录此时凸透镜的位置（测 5 次）。凸透镜架旋转 180 度（凸透镜架高低如何调节？），重复以上实验（测 5 次）。注意整个实验过程中物屏位置与凸透镜高度始终不变。最后记录物屏的位置（测 1 次）。要求计算不确定度。

自准直法测量凸透镜的焦距中，物（像）屏与凸透镜距离取多少最佳？为什么反射镜尽量靠近凸透镜放置？凸透镜架旋转 180 度后，为什么凸透镜的高度要保持不变？

4.用组合透镜法测量凹透镜的焦距

在基座上放上凸透镜，在像屏上先成一个缩小像。注意缩小像不能太小（判断方法：移动凸透镜，放大像与缩小像大小之比 3:1 左右为最佳）。记下此时像屏位置。把像屏移到光具座顶端，记下此时像屏位置。在凸透镜与像屏之间放上凹透镜。前后移动凹透镜，当像屏上出现清晰像时，记下凹透镜的位置。测 1 次，有时间可多次测量，不要求计算不确定度。

测量凹透镜的焦距时，固定像屏，移动凹透镜；还是固定凹透镜，移动像屏？

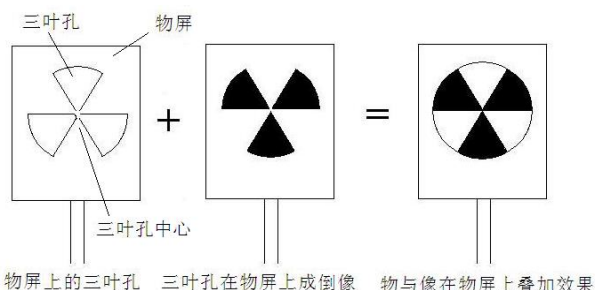


图 8 自准直法中物在物屏上成的实像

用 CMOS 光 (图像)传感器代替像屏做二次成像法测量透镜的焦距的实验。（选做实验，供做过牛顿环实验或光的衍射实验的学生选做）

参考文献

- [1] 贾玉润, 王公治, 凌佩玲. 大学物理实验. 上海: 复旦大学出版社. 1987.
- [2] 沈元华, 陆申龙. 基础物理实验. 北京: 高等教育出版社. 2003.
- [3] 赵凯华, 钟锡华. 光学 (下册). 北京: 北京大学出版社. 1984.

附:

- 1.实物, 虚物, 实像与虚像判断方法见图9 (供参考)
- 2.凸透镜成像规律: $u < f$, 成正立虚像 (放大镜成像); $u = f$, 不成像; $f < u < 2f$, 成倒立放大实像 (投影仪成像); $u = 2f$ 成倒立等大的实像; $u > 2f$, 成倒立缩小实像 (照相机成像), 如图10.

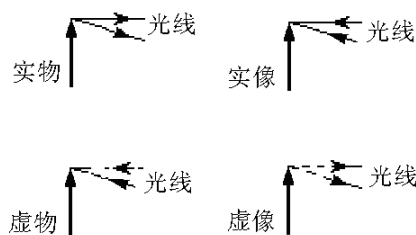


图 9 判断方法示意图

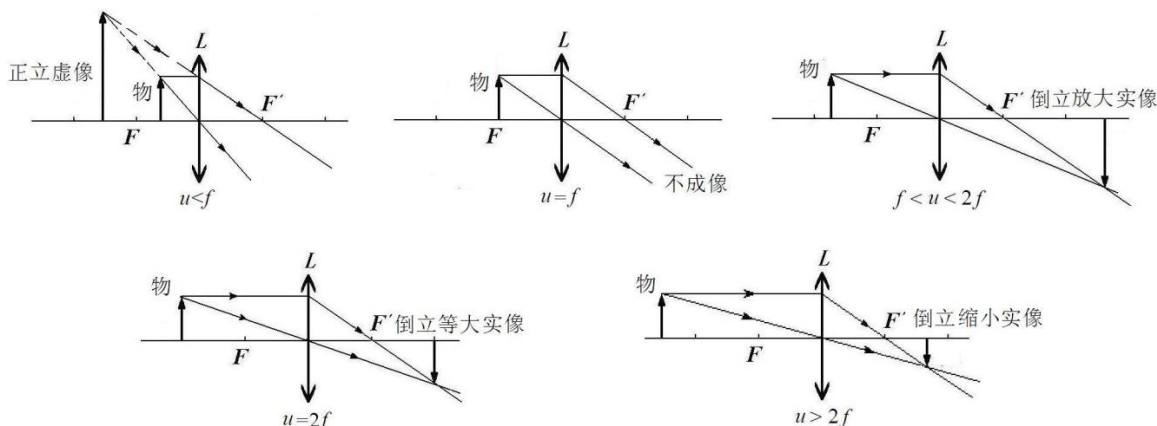


图 10 凸透镜成像规律示意图

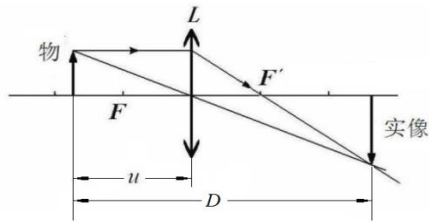


图 11 两次成像测透镜的示意图

3. 如图11, 关于二次成像法 u 与 D 的关系式如下

$$D = u + v = u + \frac{uf}{u-f} = \frac{u^2}{u-f}$$

$$\text{放大倍数} \quad K = \frac{v}{u}$$

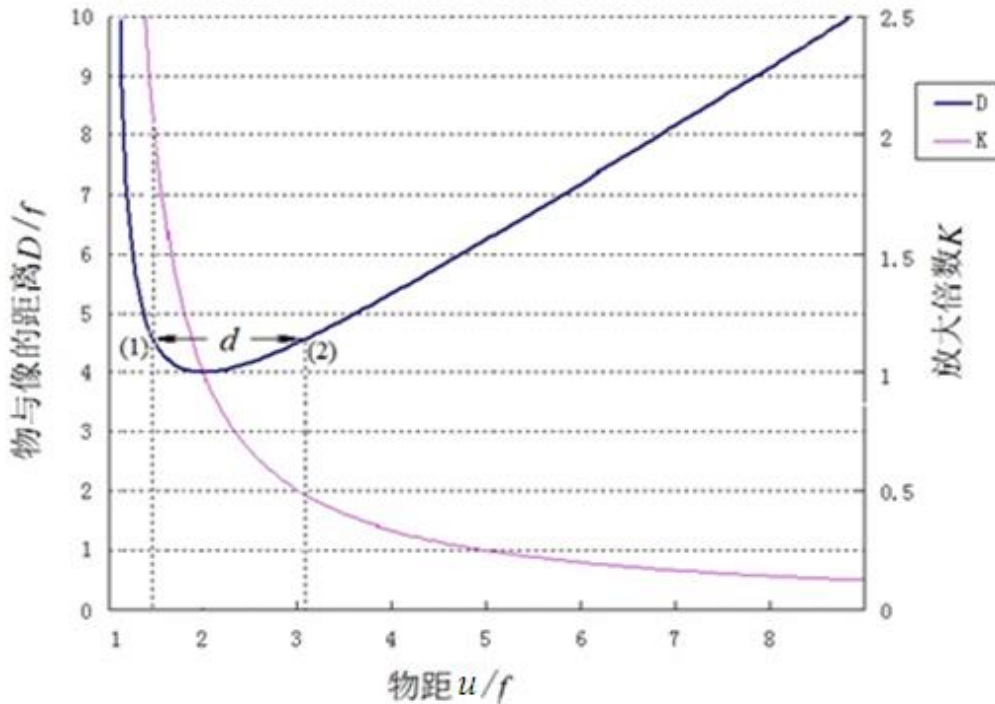


图 12 二次成像法中 u 与 D 关系

图12是 D 与 u 的关系图(可结合图11或图3分析)。图12中 d 是透镜从位置1(成放大像, 放大倍数 K_1)到位置2(成缩小像, 放大倍数 K_2)移动的距离。从图中可以看出: 当 d 很大时, K_1 与 K_2 之比增大, 造成二次成像法中成的缩小像很小, 看不清; 但是如果 K_1 与 K_2 接近时, 会造成 d 很小。所以实验时, 要根据两次成的放大像与缩小像的大小之比选择合适大小的 d 。

4. 图像清晰度的光(图像)传感器的判断:

透镜焦距测量的误差有很多种情况下产生的, 其中图像清晰度的判断不准是一个会引起较大误差的原因。用肉眼来判断, 通常通过看成像的边缘层次(亮暗)分明程度来判断。但由于用肉眼来判断, 各人判断有明显的差异, 判断结果各不相同。所以最好判断方法是借助电子仪器来判断。图 13 是细长条的实物成的实像的图像。由 CMOS 光(图像)传感器获得成像的图像。用传感器做二次成像法测透镜的焦距实验装置示意图如图 14。

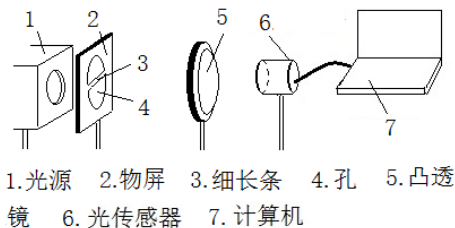
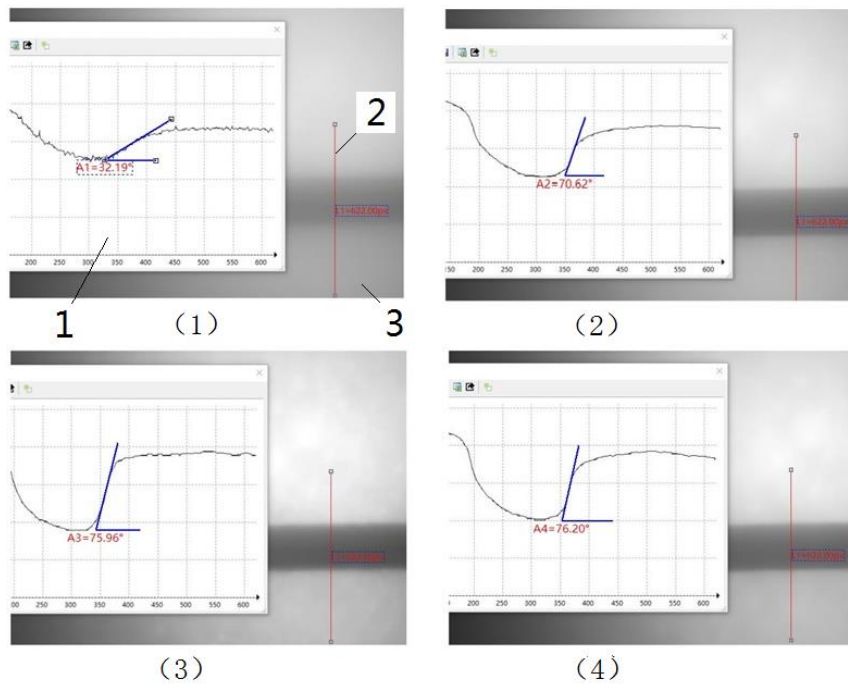


图 14 利用光(图像)传感器测量透镜焦距

图像清晰度, 是指影像上各细部影纹及其边界的清晰程度。图像清晰度评价方面很多。最常用方法是梯度函数。梯度函数是最简单的梯度评价函数, 就是计算相邻两个像素灰度差的平方。即边界(缘)梯度值(对比度)的大小, 陡峭(变化)程度。这些都与图像的清晰度有关。

图 15 是凸透镜在移动过程，实物分别成的不同的像。图 15 中的每个分图中右面是成像图，左面是光强分布图。其中图 15 (2)，图 15 (3)，图 15 (4) 中图像边界（缘）陡峭程度大。但图 3 梯度值（黑白对比度）大。所以图 3 图像清晰度更好。



1. 光强分布图 2. 成像图 3. 剖面线

图 15 改变物距时实物分别成的不同的像的光强变化图

透镜焦距的测量告示牌

注意事项:

1. 本告示牌供实验者阅读参考, 所以不要在上面写字, 更不能带出实验室。
2. 不要用手直接接触透镜表面。
3. 不用的透镜请放在实验台上的透镜架座上, 不要直接放在实验台上。
4. 激光测距中使用的激光功率很低, 且照射在挡光片的黑胶布上, 十分安全。但实验时也要注意不要让激光照射在其他物体上, 防止引起的散射光。

实验步骤

<进入实验室, 请先根据告示牌上的表格画上实验数据表格>

1. 粗测凸透镜的焦距 (不计算不确定度)

- a) 将远处的物体 (如窗户外景物或室内大于 5 米远的点亮的台灯) 清晰地成像在像屏, 前后移动透镜,
- b) 用钢尺测出凸透镜到像屏的距离, 此即为透镜的焦距。读到毫米。1 毫米以下不估读。

2. 用二次成像法测量凸透镜焦距 (估读 1/2 mm, 不计算不确定度)

- a) 光具座上放上物屏与像屏, 物屏与像屏之间距离大于 4 倍透镜焦距。
- b) 保持物屏与像屏之间距离不变, 移动凸透镜, 分别记录在像屏上清晰地成放大像与缩小像时所对应的凸透镜位置。
- c) 多次测量, 计算凸透镜的焦距。(实验完成后计算一下焦距, 并写在表格中, 不要计算过程)

3. 用自准直法测量凸透镜焦距 (人工读数: 不确定度限值 0.1mm, 估读 1/2 分度值 (mm); 激光测距: 不确定度限值 0.2mm, 最小示值 1mm, 没有估读)

- a) 在光具座上依次放上光源、物屏、凸透镜和反射镜。移动凸透镜直到在物屏上看到清晰的像。(如何判断这就是自准直像? 实验前物屏、凸透镜和反射镜距离多少如何决定) 记录物屏与凸透镜的位置。
- b) 将凸透镜绕支架旋转 180°, 重复上述测量。(为什么要旋转?)
- c) 计算凸透镜焦距与不确定度。(实验完成后计算一下焦距, 并写在表格中, 不要计算过程。不确定度离开实验室后回去计算)

4. 用测得的凸透镜焦距值测量凹透镜的焦距 (不计算不确定度)

- a) 放凸透镜, 移动像屏, 在像屏上看到清晰的缩小像。记录此时像屏的位置。
- b) 像屏放在光具座的另一 (顶) 端。在凸透镜与像屏之间放上凹透镜, 组成组合透镜。移动凹透镜, 直到在像屏上能够清晰地成像。记录此时像屏与凹透镜的位置。(移动凹透镜和移动像屏有何不同? 哪种方法更好些?)
- d) 多次测量 (根据实验时间选择多次测量), 计算凹透镜的焦距 (实验完成后计算一下焦距, 并写在表格中, 不要计算过程)

注意: 离开实验室后的数据处理除了完整不确定度计算过程外, 还要有二次成像法, 自准直法测凸透镜焦距, 组合透镜法测凹透镜焦距完整计算过程。(公式, 数值代入, 结果)

自准直法测量凸透镜焦距与不确定度计算公式 (供参考):

凸透镜绕支架旋转 180° 前

$$\bar{f}_1 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 f_i \quad u_A(\bar{f}_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (f_{1i} - \bar{f}_1)^2}{5(5-1)}} \quad u_B(\bar{f}_1) = \frac{a}{\sqrt{3}} u(f_1) = \sqrt{u_A^2(\bar{f}_1) + u_B^2(\bar{f}_1)}$$

凸透镜绕支架旋转 180° 后

$$\bar{f}_2 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 f_i \quad u_A(\bar{f}_2) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (f_{2i} - \bar{f}_2)^2}{5(5-1)}} \quad u_B(\bar{f}_2) = \frac{a}{\sqrt{3}} u(\bar{f}_2) = \sqrt{u_A^2(\bar{f}_2) + u_B^2(\bar{f}_2)}$$

$$f = \frac{\bar{f}_1 + \bar{f}_2}{2} \quad u(f) = \frac{\sqrt{u^2(\bar{f}_1) + u^2(\bar{f}_2)}}{2} \quad \text{凸透镜焦距 } f \pm u(f) =$$

挡光片黑胶布面朝激光测距仪，并按图 2 所示嵌入调节架底座凹槽内。按住激光测距仪上“开”，如图 1，听到“都”声立刻放手。这时在面板上会显示温度与湿度，同时激光照射在挡光片上。再按“开”，测距仪就会测出激光测距仪到挡光片之间的距离。测距仪有自动关闭功能。

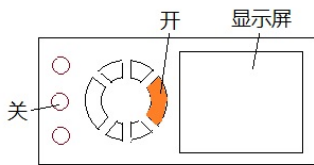


图 1 激光测距仪面板简图

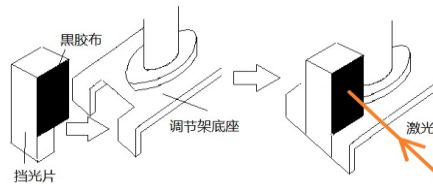


图 2 挡光片正确放法示意图

附：透镜焦距的测量记录（供参考）

1. 粗测凸透镜的焦距： $f = \text{mm}$

2. 用二次成像法测量凸透镜的焦距

表 1-1 用二次成像法测量凸透镜的焦距

序号	透镜位置 d_1/mm	透镜位置 d_2/mm	d/mm	d 平均值/ mm	焦距 f/mm
1	*****	*****	*****	***** 5 个单次测量 平均值	***** 不要在告示牌上面 写字！数据记录在实 验报告纸上。
2	*****	*****	*****		
3	*****	*****	*****		
4	*****	*****	*****		
5	*****	*****	*****		

表 1-2 用二次成像法测量凸透镜的焦距

物屏位置 D_1/mm	像屏位置 D_2/mm	间距 D/mm
*****	*****	*****

3. 用自准直法测量远视眼镜片（凸透镜）的焦距（计算不确定度）

表 2-1 自准直法测量凸透镜的焦距（凸透镜转 180° 前）

序号	物屏位置/ mm	透镜位置/ mm	物屏与透镜间距（焦距 f_1 ）/ mm	f_1/mm
1	不要在告示牌上记 录数据！	*****	*****	多次测 量平均值 *****
2		*****	*****	
3		*****	*****	
4		*****	*****	
5		*****	*****	

表 2-2 自准直法测量凸透镜的焦距（凸透镜转 180° 后）

序号	物屏位置/mm	透镜位置/mm	物屏与透镜间距（焦距 f_2 ）/mm	f_2 /mm
1	不要在告示牌上记录数据！	*****	*****	多次测量平均值 *****
2		*****	*****	
3		*****	*****	
4		*****	*****	
5		*****	*****	

4. 测量凹透镜的焦距

表 3 测量凹透镜焦距

序号	凹透镜位置/mm	组合透镜成像位置/mm	凸透镜成像位置/mm	S_1 /mm	S_2 /mm	焦距 $f_{凹}$ /mm	焦距平均值 $f_{凹}$ /mm
1	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
...	

注意:1) 测得 S_1 与 S_2 的正负号, 它们与什么有关?

2) 是否多次测量视实验时间而定

