

# 透镜参数的测量

## 实验要求:

### 1. 预习阶段

- (1) 认真阅读实验讲义。
- (2) 准备预习报告。预习报告控制在 1 到 2 页纸内，不要原封不动照抄讲义，应融入自己对实验原理的理解。

### 2. 实验阶段

- (1) 维护良好的课堂秩序，在实验室内尽量保持安静。
- (2) 维护整洁的实验环境，不要将水杯等放在试验台上，不得在实验室内吃口香糖。
- (3) 爱护实验设备，轻拿轻放。在老师讲解后才能动手操作。并且在动手前应仔细阅读实验注意事项和操作说明。
- (4) 如实记录实验数据，不得篡改、抄袭。
- (5) 实验数据经指导老师签字、实验设备整理好后方可离开。

### 3. 报告撰写阶段

- (1) 本实验要求计算凸透镜焦距的不确定度。

## 注意事项:

### 1. 爱护光学元件

光学实验中使用的大部分光学元件是玻璃制成的，光学表面经过精心抛光。使用时要轻拿、轻放，避免碰撞、损坏元件。任何时候都不要用手触及光学表面（镀膜片或光在此表面反射或折射），只能拿磨砂面（光线不经过的面一般都磨成毛面，如透镜的侧面，棱镜的上下底面等），不要对着光学元件表面说话、咳嗽、打喷嚏等。

**2. 本实验用到激光，请注意安全，不要让强光射入人眼。**

**3. 注意保护白光光源，其亮度不要调得过高，否者容易过热损坏。**

透镜是使用最广泛的一种光学元件，眼球也是一种透镜，我们正是通过这一对透镜来观看周围世界的。透镜及各种透镜的组合可形成放大的或缩小的实像及虚像。人类就是利用透镜及其组合观察到遥远宇宙中星体的运行情况以及肉眼看不见的微观世界的。

透镜是用透明材料（如光学玻璃、熔石英、水晶、塑料等）制成的一种光学元件。一般它由两个或两个以上共轴的折射表面组成。仅有两个折射面的透镜称单透镜，由两个以上折射面组成的透镜称组合透镜。多数单透镜的两个折射曲面都是球面或一面是球面而另一面是平面，故称其为球面透镜，它可分为凸透镜、凹透镜两大类，每类又有双凸（凹）、平凸（凹）、弯凸（凹）三种。两个折射面有一个不是球面（也不是平面）的透镜称为非球面透镜，它包括柱面透镜、抛物面透镜等。根据厚度的差异，透镜可分为薄透镜和厚透镜两种。连接透镜两表面曲率中心的直线称为透镜的主轴。透镜两表面在其主轴上的间隔与球面的曲率半径相比不能忽略的，称为厚透镜；若可略去不计，则称其为薄透镜。实验室中常用的透镜大多为薄透镜。根据聚光性能的差异，透镜又可分为会聚透镜和发散透镜两种。

描述透镜的参数有许多，其中最重要、最常用的参数是透镜的焦距。利用不同焦距的透镜可以组合成望远镜、显微镜等。透镜将物成像，决定像的质量的一个重要参数就是像差，像差有多种，如果测得透镜的像差，就可以以一定的方法来消除像差提高成像质量。

通过本实验要求同学们了解激光的扩束系统，光源、物、像间的关系以及球差、色差产生的原因；熟练掌握扩束光源、光具座上各种光学元件的调节并且测量薄透镜的焦距和透镜的球差和色差。

## 实验原理

### 1. 光源扩束

如图 7.1.1-1 所示。当一焦距很短的凹透镜  $F_1$ （焦距为  $f_1$ ）的像方焦点和一个焦距较长的凸透镜  $F_2$ （焦距为  $f_2$ ）的物方焦点重合时，可将一光斑大小为  $r_1$  的入射平行光扩大为光斑大小为  $r_2$  的  $n$  倍的平行光

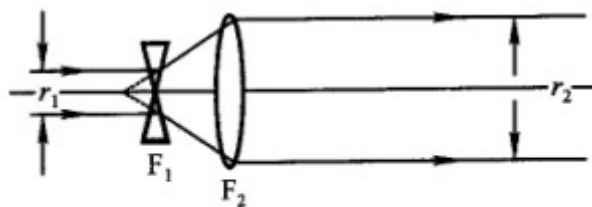


图 7.1.1-1 扩束系统示意图

$$n = \frac{f_2}{f_1} = \frac{r_2}{r_1} \quad (1)$$

光学上称其为扩束系统，常用于激光的扩束。

### 2. 直接法测焦距

平行光经凸透镜后会聚成一点，如图 7.1.1-2 所示。测得会聚点和透镜中心的位置  $x_1$ 、 $x_2$ ，就

可测得该透镜的焦距

$$f = |x_2 - x_1| \quad (2)$$

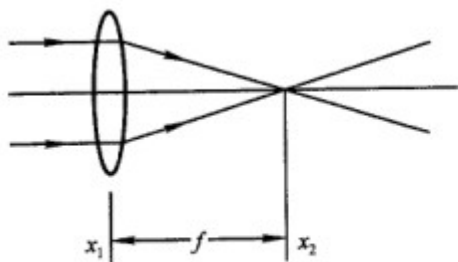


图 7.1.1-2 直接法测焦距

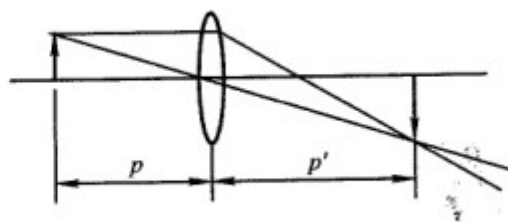


图 7.1.1-3 公式法测焦距

### 3. 公式法测焦距

固定透镜,将物放在距透镜一倍以上焦距处,在透镜的像方某处会获得一清晰的像,如图 7.1.1-3 所示,图中  $p$ 、 $p'$  分别对应物距、像距。 $p$ 、 $p'$  不仅有大小,还有正负。正负遵守符号法则,物距、像距分别为自透镜中心处至物、像间的距离,当物、像为实物、实像时,对应的符号为正,反之为负。

在近轴条件下,根据物像公式

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

可以测得透镜的焦距。

### 4. 位移法测焦距

当物距在一倍焦距和二倍焦距之间时,在像方可以获得一放大的实像,物距大于二倍焦距时,可以得到一缩小的实像。当物和屏之间的距离  $L$  大于  $4f$  时,固定物和屏,移动透镜至 C、D 处(如图 7.1.1-4),在像屏上可分别获得放大和缩小的实像。C、D 间距离为  $l$ ,通过物像公式,可得

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L} \quad (4)$$

通过 (4),只要测得  $L$ 、 $l$ ,即可获得焦距  $f$ 。

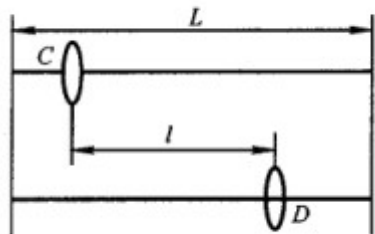


图 7.1.1-4 位移法测焦距

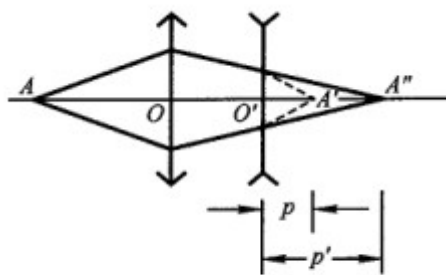


图 7.1.1-5 测凹透镜焦距

### 5. 测凹透镜的焦距

凹透镜是一发散透镜，物经其仅能成虚像，虚像不能用像屏接受，这样无法直接用物成像的方法来计算焦距，但可利用凸透镜成的像作为凹透镜的物，再产生一个实像。利用物象公式可以计算出凹透镜的焦距，注意凹透镜的物、像焦距的符号及物距、像距的符号。此时利用下式

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f'} \quad (5)$$

可以计算出凹透镜的焦距。注意凹透镜的像方焦点在物空间，物方焦点在像空间。实验中应使物距、像距均大于 0，才能用屏接收到实像，如图 7.1.1-5 所示。

## 6. 组合望远镜

简单的望远镜如图 7.1.1-6 所示。物镜像方焦点  $F'_1$  和目镜的物方焦点  $F_2$  相重合，从远物上一点  $P$  射来的平行光束经物镜后会聚于  $P'$  点；再经目镜后成为一束平行于直线  $P'O_2$  的平行光束，最后像位于无限远处。

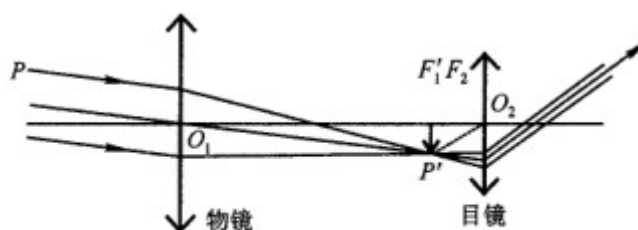


图 7.1.1-6 望远镜的示意图

望远镜的放大本领为

$$M = \frac{f_1}{f_2} \quad (6)$$

由此可见物镜的焦距  $f_1$  越长，目镜的焦距  $f_2$  越短，则望远镜的放大本领就越大。

## 7. 球差、色差

在近轴条件下，理想成像能近似成立。但在实际应用中，为了增大视场和提高像的光照度，以至于不能满足近轴光线的条件。这时近场成像与实际成像存在差距，即像差。像差一般分为单色像差和色像差。单色像差有球面像差、彗形像差、像散、畸变、像的弯曲等，透镜的大孔径引起前两种像差，透镜的大视场引起另几项像差。对于非单色光，因色散作用可能引起色像差。本实验中主要测量球差和色差。

### (1) 球面像差（球差）

在透镜孔径较大时，从轴上一物点发出的光经球面折射后不再交于轴上一点，如图 7.1.1-7 所示。球差的大小与光线的孔径有关，孔径可用孔径角或入射光线在折射面上的高度  $h$  来表示。一般定义高度为  $h$  的光线在像方与主轴交点  $A$  到近场光线与主轴交点  $B$  之间的距离为纵向球差。线段  $AB$  与光线行进方向一致时为正球差，反之为负球差。远场光线和近场光线像的高度差为横向球差。

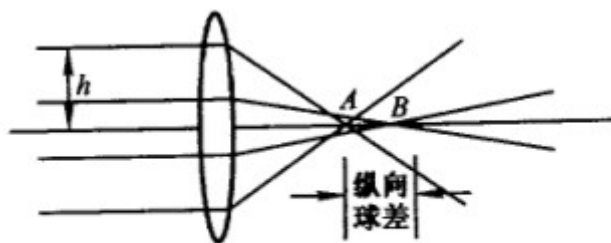


图 7.1.1-7 球差

## (2) 色差

由于透镜对不同波长的光的折射率不同,不同颜色的光所成的像的大小、位置会有所不同,不同色光成像间的高度差称为横向色差,位置差称为轴向色差,设长波长光的像点为  $Q'$ ,短波长光的像为  $Q''$ , $Q'$ 靠近透镜时为负色差, $Q''$ 靠近透镜时为正色差,如图 7.1.1-8 所示。

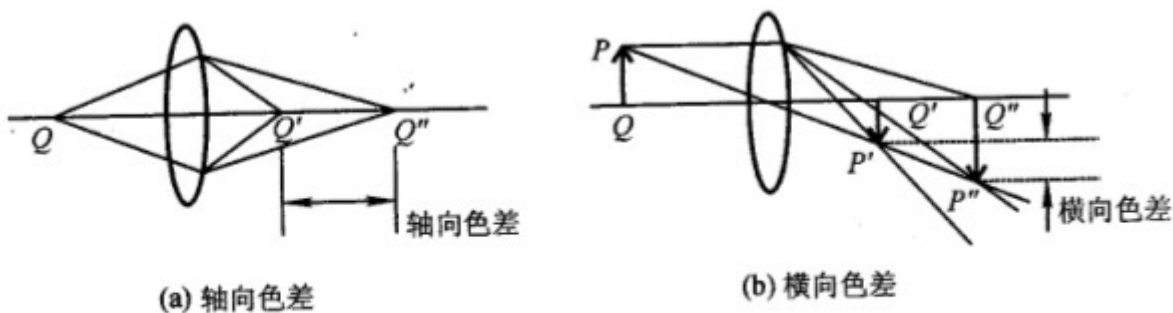


图 7.1.1-8 色差

## 实验内容

早期光学实验大都使用白光源,对环境要求较高,实验者在一个黑暗的房间操作,不利于操作者的身心健康。随着激光器成本的降低,目前,几何光学实验基本采用激光器作光源,由于激光器具有高亮度,单色性等性能,大大改善了实验的环境。

本实验使用红色半导体激光或白炽灯作为光源,由于激光光强很强且光学元件的表面大部分能反射激光,故在实验过程中,注意不要将这种红色激光反射到其他同学的眼睛以造成伤害。实验中的物可用可透过光的“1”字屏,为使实验现象更明显,在“1”字屏后可加上毛玻璃。

### 1. 共轴调节

#### 1) 粗调

目测调节。即将所用的元件靠拢,使其光心等高,光轴平行于光学平台。

#### 2) 细调

利用透镜成像规律进行调节。以位移法测单透镜焦距光路为例,使物、屏距离略大于  $4f$ ,观察小像,调像屏,使屏中十字标记与小像中心重合;观察大像,调透镜,使大像中心与屏中十字标记重合。如此反复几次,达到大、小像中心重合即实现了各元件的共轴。

注意共轴的调节要在竖、横两方向上进行,调节的方法一样。

如果光学系统由多个透镜组成,则应先调好一个透镜的共轴并保持不动,逐个加入其余透镜逐

一调节它们的光轴与原系统的光轴一致。

## 2. 测量凸透镜的焦距（结果的不确定度 $P=68.3\%$ ）

1) 粗测：利用透镜对远处光源的会聚粗略估计凸透镜的焦距。

2) 物像距法：物距单次测量，像距 6 测量取平均。

3) 位移法：物、像距离单次测量，位移量 6 测量取平均。

4) 自准直法（平面镜法）：直接测得焦距 6 次。

## 3. 测量凹透镜的焦距（以下各法均测量 3 次，结果取平均，不计算测量结果的不确定度）

1) 物像距法：需利用凸透镜辅助成像。

2) 自准直法（平面镜法）（同学设计方法）需利用凸透镜辅助成像。

## 选做实验内容：利用视差现象测量透镜焦距

### 1、视差

拿两支铅笔，将它们前后排成竖排，用一只眼睛去观察，当眼睛左右微动时，就会发现两支铅笔有相对位移，这种现象称为视差。有这样的规律：离眼近的笔其移动方向与眼睛移动方向相反，而离眼远的其移动方向与眼睛相同。光学实验中常要利用视差来判断像与参考物（针尖、叉丝）或两个像是否在同一平面上，从而进行定位或测量。

### 2、利用视差确定实像位置，测量透镜焦距

用针尖 1 做“物”，放置凸透镜，用眼睛观察凸透镜对针尖 1 所成的倒立的实像，当针尖 1、透镜、眼睛 3 者共轴时，可以看到针尖 1 倒立的实像的尖端与透镜中心是对齐的。再用一个针尖 2 放置在像屏的位置，调节针尖 1、透镜、针尖 2、眼睛 4 者共轴，观察到实像和针尖 2 尖端相对与透镜中心是对齐的，眼睛左右微动，观察视差，判断针尖 2 在实像前还是在实像后，移动针尖 2 的位置，直到无视差，此时针尖 2 的位置即针尖 1 所成实像的位置。针尖 1 到透镜即物距；针尖 2 到透镜即像距。

用消除视差的方法既可以测凸透镜的焦距，也可以测量凹透镜的焦距。

## 扩展实验内容

### 1. 测量凸透镜的球差

用扩束过的 He-Ne 光照射物体（“1”字屏），在紧靠透镜后放一可调节光圈，以调节透过光线，称动像屏。记下近场和远场光线像的位置及高度，计算纵向球差和横向球差。

### 2. 测量凸透镜的色差

用不同的光源如钠灯或汞灯加不同的滤光片（作用是仅让某一波长的光透过）以选取不同波长的光照射物体，通过调节紧挨透镜的光圈仅让近场光线通过，测得不同波长的光入射时，透镜的焦距，计算色差，作出  $f-\lambda$  的曲线图。

### 3. 设计望远镜

选两个焦距比为 10 倍以上的透镜，自己设计、调整光路，并观察室外远处物体。测量该望远镜的放大本领。

### 思考题

1. 如果在“1”字屏后不加毛玻璃，对实验会有什么影响？
2. 如果光路调节得很好，用三种方法测量的结果误差之间有何关系？如果不是这样，是什么原因造成的？
3. 平凸、双凸（不等曲率）透镜的入射面不同，球差、色差会有什么变化？