**实验 光学像差的观察**

光学系统所成的实际像与理想像（即在近轴区以单色光所成的像）的差异称为像差。但实际的光学系统均需对有一定大小的物体以一定的宽光束进行成像，故此时的像已不具备理想成像的条件及特性，即像并不完善。可见，像差是由球面本身的特性所决定的，即使透镜的折射率非常均匀，球面加工得非常完美，像差仍会存在。

几何像差一般分两大类：色像差和单色像差。透镜材料的折射率是波长的函数，由不同波长的色光（即复色光）产生的像差称为色像差，简称色差，可分为位置色差和倍率色差两种。非近轴的高度单色光也会产生像差，称为单色像差；按其产生的效果，分成使像模糊和使像变形两类，前者有球差、慧差和像散，后者有场曲和畸变。

本实验主要观察其中几种像差：色差、球差和慧差，并在球差部分同时介绍景深的概念。

**【实验目的】**

1. 观察色差、球差、慧差等像差的形成，了解球差和景深的相互关系。
2. 掌握各种几何像差产生的条件及成像规律。
3. 掌握光学系统等高共轴的调节方法，并用左右逼近法记录数据。

**【实验仪器】**

F-JH1050型几何光学实验仪。

**【仪器介绍】**

F-JH1050型几何光学实验仪，包含光学导轨、白光源、“品”字屏、凸透镜（3个）、白屏、球差屏（2个）、滤色镜（3个）、可变光阑、光具座若干。

**【实验原理】**

1. 色差

光学材料对不同波长的色光有不同的折射率，因此同一孔径不同色光的光线经光学系统后与光轴有不同的交点；不同孔径、不同色光的光线与光轴的交点也不相同。因此在任何像面位置，物点的像都是一个彩色的弥散斑。各种色光之间成像位置和成像大小的差异称为色差，如图1所示。



图1 色差

色差是透镜成像的一个严重缺陷，简单来说就是颜色的差别，发生在以多色光为光源的情况下。不同波长的光将以不同的程度色散，白光被色散为紫外波段、可见波段和红外波段范围的各种波长的光，其中可见光的波长范围大约为400nm~700nm，不同波长的光，颜色各不相同，其通过透镜时的折射率也各不相同，因而所成的像便带有彩色边缘，这样物方一个点，在像方可形成一个色斑。

色差分为两种：

① 位置色差 轴上点两种色光成像位置的差异称为位置色差，又称轴向色差或纵向色差。它与物高无关，即不同波长的光线经由光学系统后会聚在不同的焦点，使得像在任何位置观察，都带有色斑或是晕环，像模糊不清。

② 倍率色差 对轴外物点，由于不同色光的垂轴放大率不同，因而轴外物点发出的不同色光的主光线在理想像面上的交点存在高度差，从而形成一条小光谱，即倍率色差，又称垂轴色差或横向色差。当系统存在较大的倍率色差时，成像会呈现彩色的边缘。

1. 球差和景深

一般情况下，单色光线在进入球面镜片后到焦平面时，其边缘部分比中央部分容易产生严重的折射与弯曲，轴上物点发出的同心光束，经球面透镜以后，不再是同心光束（即不再交于一点）；与光轴夹不同角度（即不同入射高度）的光线交光轴于不同位置，相对近轴像点（即理想像点）有不同程度的偏离：远离光轴位置进入透镜的光线（即边缘光线、远轴光线），入射角大，折射强，在光轴上离透镜近处形成焦点；而离光轴近处进入透镜的光线（即中心光线、近轴光线），入射角小，折射弱，在光轴上离透镜远处形成焦点。这种偏离称为轴向球差或纵向球差，简称球差。由于球差的存在，在理想像面上的像点已不是一个点，而是一个圆形的弥散斑（简称弥散圆），其半径用表示，称为垂轴球差或横向球差，如图2所示。



图2 球差

在现实当中，观赏拍摄的影像是以某种方式（比如投影、放大成照片等等）来观察的，人的肉眼所感受到的影像与放大倍率、投影距离及观看距离有很大的关系，如果弥散圆的直径小于人眼的鉴别能力，在一定范围内实际影像产生的模糊是不能辨认的。这个不能辨认的弥散圆就称为容许弥散圆。由图2可知，在理想像面的前后，各有一个容许弥散圆。（因此，实验操作中，在寻找成像清晰点时所使用的左右逼近法，其左边值和右边值大约就是两个容许弥散圆的位置。）

在镜头前方有一段一定长度的空间，当被摄物体位于这段空间内时，其在底片上的成像恰位于这两个弥散圆之间，被摄体所在的这段空间的长度，就叫景深。换言之，在这段空间内的被摄体，其呈现在底片上的影像模糊度，都在容许弥散圆的限定范围内，这段空间的长度就是景深。景深随着镜头的光圈、焦距和拍摄距离的变化而变化。对于固定的焦距和拍摄距离，使用的光圈越小，两个容许弥散圆之间的距离*d*就越大，因而景深也越深，如图3所示。综合以上分析也可看出，缩小光圈也可减小球差对成像的影响。



图3 景深与光圈

1. 慧差

由轴外物点发出的单色大孔径光束，通过透镜后，在像平面上不再相交于一点，会形成不对称的弥散光斑，其形状呈彗星形，由中心到边缘拖着一个尾巴，其首端明亮、清晰，尾端宽大、暗淡、模糊，这样的像差称为慧差，如图4所示。若光学系统存在较大慧差，将影响轴外像点的清晰程度。通常，慧差出现在大光圈下，且位于像场边缘处，可以通过适当缩小光圈来改善慧差现象。此外，也有部分镜头采用对称结构，特殊玻璃材料，或是通过改变镜片的球面曲率半径等措施来改善慧差。



图4 慧差

**【实验内容】**

1. 光学系统的等高共轴调节
2. 粗调在光学导轨上从左到右依次放置白光源、“品”字屏、凸透镜和白屏。其中，“品”字屏和白屏应完全插入光具座，白光源应与“品”字屏上的圆形玻璃对齐；俯视各元件及导轨，绕铅直轴旋转各元件，使各元件互相平行，并与导轨互相垂直，拧紧固定螺钉。此时，各元件的主光轴与导轨平行。
3. 细调利用透镜二次成像法来判断是否等高共轴，并进一步调至等高共轴。

移动白屏，使它和“品”字屏之间的距离大于凸透镜的四倍焦距，然后固定白屏。再沿着导轨移动凸透镜，则在白屏上必能观察到两次大小不同的实像。反复调节凸透镜的高低和水平位置，当两个像的中心都与白屏的中心**重合**时，表明已经达到等高共轴。调节时，**像的移动方向与凸透镜的移动方向一致**，若像在白屏中心的下方（上方），说明凸透镜的位置偏低（偏高），应升高（降低）凸透镜；水平调节类似于上述情形。

实际操作中，由于各光学元件和光具座本身的误差，大像和小像的中心不一定会与白屏的中心重合，只要大像和小像的中心重合，且接近白屏的中心即可。

在做接下来的每一个实验前，都应先调节光学系统的等高共轴。需另外加入的圆形光学元件，如滤色镜、可变光阑等，应与光源和凸透镜保持平行，且光轴高度一致。

1. 色差的观察与测量
2. 光学导轨上从左到右依次为：白光源、“品”字屏、凸透镜（*f*=100mm）、白屏；其中，白光源和“品”字屏的光具座分别对准30.0mm和100.0mm，拧紧固定螺钉；调节光学系统的等高共轴。
3. 移动凸透镜，使物距为250.0mm，拧紧固定螺钉；沿着导轨移动白屏，直到白屏上出现倒立的实像。在此成像位置附近，采用“左右逼近法”寻找清晰成像的范围，记录此范围的左边值和右边值（即白屏在导轨上的坐标位置和），填入表1。
4. 分别将蓝色、绿色和红色滤色镜，放在白光源和“品”字屏之间，紧靠“品”字屏（若紧靠光源，则更容易发烫）；沿着导轨移动白屏，采用“左右逼近法”，分别记录不同滤色片时，清晰成像范围的左边值和右边值（即和），填入表1。
5. 球差的观察与测量
6. 光学导轨上从左到右依次为：白光源、“品”字屏、凸透镜（*f*=60mm）、白屏；其中，白光源和“品”字屏的光具座分别对准30.0mm和100.0mm，拧紧固定螺钉；调节光学系统的等高共轴。
7. 移动凸透镜，使物距为150.0mm，拧紧固定螺钉。
8. 沿着导轨移动白屏，直到白屏上出现倒立的实像。在此成像位置附近，采用“左右逼近法”寻找清晰成像的范围，记录此范围的左边值和右边值（即白屏在导轨上的坐标位置和）。分别在紧靠凸透镜的左侧放入环形球差屏和圆孔球差屏，注意球差屏应与凸透镜等高共轴；沿着导轨移动白屏，采用“左右逼近法”，分别记录不同球差屏时，清晰成像范围的左边值和右边值（即和），填入表2-1。
9. 保持物距为150.0mm，撤下*f*=60mm的凸透镜，插入*f*=100mm的凸透镜；重复步骤（3），分别记录三种状态下清晰成像的范围，填入表2-1。
10. 将物距改为350.0mm，分别使用*f*=100mm和*f*=200mm的凸透镜，重复步骤（3），分别记录三种状态下清晰成像的范围，填入表2-2。
11. 景深的观察与测量
12. 光学导轨上从左到右依次为：白光源、“品”字屏、可变光阑、凸透镜（*f*=100mm）、白屏；其中，白光源和“品”字屏的光具座分别对准30.0mm和100.0mm，拧紧固定螺钉；调节光学系统的等高共轴。
13. 移动凸透镜，使物距为200.0mm，拧紧固定螺钉；改变光阑孔径，使光阑分别为全开、打开1/2和收缩到接近最小（若光阑收缩到最小，则孔径太小，成像很暗不易观察；因此，将手柄拨到最下方后再略微往回拨一点，使小孔直径大约为1.5mm~2.0mm）的三种状态，如图5所示，沿着导轨移动白屏，直到白屏上出现倒立的实像。在此成像位置附近，采用“左右逼近法”寻找清晰成像的范围，分别记录不同光阑孔径下，此范围的左边值和右边值（即白屏在导轨上的坐标位置和）填入表3。



图5 可变光阑的三种状态

1. 慧差的观察
2. 光学导轨上从左到右依次为：白光源、红色（或绿色）滤色镜、可变光阑（收缩到最小）、凸透镜（*f*=60mm）、白屏；其中，白光源和可变光阑的光具座分别对准30.0mm和100.0mm，滤色镜靠近光阑，拧紧固定螺钉；调节光学系统的等高共轴。
3. 移动凸透镜，使物距略微大于凸透镜的两倍焦距，拧紧固定螺钉；移动白屏，直到出现清晰的缩小的像点。
4. 使用两种方法观察慧差：

方法一：将凸透镜转动一个角度（相当于改变了主光轴的位置，可变光阑上的小孔就成了轴外物点），略微移动白屏，观察凸透镜旋转不同角度时，像点的变化。

方法二：俯视仪器，使凸透镜与导轨相互垂直；手持光阑贴近滤色镜，移动光阑，使其小孔的位置分别位于滤色镜的上边缘、下边缘、左边缘和右边缘或其它非中央的位置（此时主光轴的位置不变，小孔相当于是轴外物点），略微移动白屏，观察小孔处于不同位置时，像点的变化。

**【注意事项】**

1. 实验开始前，不得随意触碰仪器；实验时，不得用手触摸透镜、滤色镜的光学面，玻璃制品易碎，应轻拿轻放，暂时不需要使用的光学元件，应插在架子上，避免跌落等造成损坏；实验结束后，将光学元件插回光具架，光具座从光学导轨上取下，整齐地摆放在桌面上。
2. 在记录成像位置时，都必须使用左右逼近法来寻找成像清晰的范围，具体如下：

从左往右移动白屏，当像清晰时，记录白屏在导轨上的坐标位置即左边值；同理，从右往左移动白屏，当像清晰时，记录右边值。

1. 为减少光学实验对眼睛的伤害，本实验全部为单次测量，在寻找清晰的像时，应尽可能准确。
2. 光学导轨的最小分度值为1mm，读数时以mm为单位，估读到0.1mm。

**【数据表格】**

见专用数据表格

**【数据处理】**

利用高斯公式求出实验中所有像距的理论值；计算所有表格中的成像范围、左右逼近法的平均值以及像距的测量值。

**【思考题】**

1. 根据色差的实验数据完成以下空格：观察色差时，不同色光的成像位置不同，从左到右依次为\_\_\_\_\_\_\_\_色（波长范围\_\_\_\_\_\_\_\_~\_\_\_\_\_\_\_\_nm）、\_\_\_\_\_\_\_\_色（波长范围\_\_\_\_\_\_\_\_~\_\_\_\_\_\_\_\_nm）和\_\_\_\_\_\_\_\_色（波长范围\_\_\_\_\_\_\_\_~\_\_\_\_\_\_\_\_nm）；其中，\_\_\_\_\_\_\_\_色光与白色光的清晰成像位置差别最大。波长越短，成像位置越\_\_\_\_\_\_\_\_（填“远”或“近”），折射率越\_\_\_\_\_\_\_\_（填“大”或“小”）。
2. 根据球差的实验数据完成以下空格：观察球差时，放置环形、圆形球差屏与无球差屏时，成像位置不同，从左到右依次为\_\_\_\_\_\_\_\_球差屏、\_\_\_\_\_\_\_\_球差屏和\_\_\_\_\_\_\_\_球差屏，其中，清晰成像范围最大的是\_\_\_\_\_\_\_\_球差屏。透镜的焦距越大，折射率越\_\_\_\_\_\_\_\_，球差越\_\_\_\_\_\_\_\_（以上两空均填“大”或“小”）。
3. 根据景深的实验数据完成以下空格：观察景深时，在固定焦距和物距的情况下，光圈越小，景深越\_\_\_\_\_\_\_\_（填“深”或“浅”）。在实际拍摄中，若要得到清晰的主体和模糊的背景，应设置\_\_\_\_\_\_\_\_（填“大”或“小”）光圈得到\_\_\_\_\_\_\_\_（填“深”或“浅”）景深。
4. 用文字说明凸透镜和凹透镜的三条特殊光线，并分别作出光路图。
5. 请描述观察慧差时，你所看到的实验现象。