**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）、滤色片（3个）、滤色镜框、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. 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；移动白屏，直到出现清晰的像，记录成像位置。
4. 在滤色镜框上分别装上红色、绿色和蓝色的滤色片，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），注意其高度应和光源的高度一致；移动白屏，分别记录不同滤色片时，清晰成像的位置。
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. 移动白屏，直到出现清晰的像，记录成像位置；然后，紧靠凸透镜的左侧放入环形球差屏，移动白屏，记录清晰成像的位置；再将环形球差屏换成圆孔球差屏，移动白屏，记录清晰成像的位置。
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位置。
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位置。
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；紧靠凸透镜的左侧放入可变光阑，注意其高度应和凸透镜一致；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，分别移动白屏，观察像的清晰范围，记录成像位置。



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，滤色镜放在光源和光阑之间，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。

1. 实验注意事项
2. 实验开始前，不得随意触碰仪器；实验时，不得用手触摸透镜的光学面，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，将白光源以外的光学元件全部插在架子上，所有光具座留在光学导轨上。
3. 每进行一项实验，在摆放好光学元件后，都应利用透镜的二次成像法调节系统的等高共轴，具体如下：

使白屏和物屏之间的距离稍大于凸透镜的4倍焦距，固定白屏；移动凸透镜，在白屏上可出现两次大小不同的实像：物距较小时出现倒立放大的实像，物距较大时出现倒立缩小的实像。反复调节凸透镜的高度，使两个像的中心在竖直方向位于白屏的中心即可。再调节其它圆形的光学元件，使之与凸透镜的高度保持一致。

1. 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，记录左边值；从右往左移动白屏，当像清晰时，记录右边值。然后计算成像范围，及平均值。

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。

**【数据处理】**

1. 数据记录在专用表格中。
2. 利用高斯公式求出实验中所有相距的理论值****；
3. 计算所有表格中的成像范围、平均值以及相距的测量值。

**【思考题】**

1. 观察色差时，不同颜色的光成像的位置不同，从左到右依次为什么颜色？列出可见光中各种颜色的波长范围，与成像位置相比较，可得出什么结论？（波长与成像位置的关系，波长与折射率的关系）
2. 观察球差时，放置环形、圆形球差屏与无球差屏时，成像位置有何区别？从测量数据中找出规律，并说明球差与焦距的关系。
3. 观察景深时，在固定焦距和物距的情况下，光圈和景深有什么关系？在实际拍摄中，若要得到清晰的主体和模糊的背景，应如何设置光圈得到什么样的景深？
4. 观察慧差时，有什么样的实验现象？