

| | | | | | |
|------|--|---------|--|-----|--|
| 预习报告 | | 实验记录与分析 | | 总成绩 | |
| 30 | | 50 | | 80 | |

| | | | |
|--------|------------|-------|---------|
| 年级、专业： | 物理学 | 组号： | 实验班 2 |
| 姓名： | 戴鹏辉 | 学号： | 2344016 |
| 日期： | 2024/03/25 | 教师签名： | |

光学像差实验 I

【实验报告注意事项】

1. 实验报告由两部分组成：

1) 预习报告：课前认真研读实验讲义，弄清实验原理；实验所需的仪器设备、用具及其使用、完成课前预习思考题；了解实验需要测量的物理量，并根据要求提前准备实验记录表格（可以参考实验报告模板，可以打印）。（30 分）

2) 实验记录与分析：认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名（用铅笔记录的被认为无效）。保持原始记录，包括写错删除部分，如因误记需要修改记录，必须按规范修改。（不得手记的值输入到电脑打印）；离开前请实验教师检查记录并签名。（50 分）
2. 本实验报告可提前打印出来，当场记录分析完成交给带实验的老师，课后无需再提交。若当场完成不了，则请课后完成，再扫描并通过 seelight 提交。

注意：本文档已留出填写空间，若填写空间不够的话请提前规划留白，做到报告的美观
3. 注意事项：

1) 实验中避免激光器伤到眼睛

2) 避免用手直接接触镜片的光学面

3) 安装镜片时需 在光学平台上尽量靠近台面 的高度操作，以免失手跌落摔碎镜片

4) 实验平台配件所用固定螺钉需拧紧，以免镜架晃动；但不可过紧，以免损坏

5) 实验前需按仪器清单检查光学元件是否齐全，实验结束后按照顺序放回元件盒

目录

1 光学像差实验 I 预习报告 3

1.1 实验目的 3

1.2 仪器用具 3

1.3 原理概述 4

1.4 实验前思考题 5

2 光学像差实验 I 实验记录 7

2.1 实验内容、步骤、结果及讨论 7

2.1.1 色差测量实验 7

2.2 光路调试与慧差测量实验 8

2.3 实验过程中遇到的问题记录 11

光学像差实验 I 预习报告

1.1 实验目的

- (1) 了解七种几何像差产生的原理、基本规律；
- (2) 了解各种像差对光学成像质量的影响；
- (3) 掌握慧差、色差产生的原理及其测量表征；
- (4) 掌握光学系统的基本调试方法；

1.2 仪器用具

| 产品编号 | 产品名称 | 规格 | 数量 |
|------|--------|--|-----|
| 1 | 激光光源 | $\lambda = 632.6nm$ | 1 |
| 2 | 激光器夹持器 | 3 维调整 | 1 |
| 3 | 显微物镜 | 10 \times /0.25 | 1 |
| 4 | 针孔 | $\varnothing 100\mu m$ 或 $\varnothing 50\mu m$ | 1 |
| 5 | 五维调整机构 | 装配显微物镜和针孔用 | 1 |
| 6 | 衰减片 1 | 0.0001 (衰减系数), 装在镜框中 | 1 |
| 7 | 衰减片 2 | 0.01 (衰减系数), 装在镜框中 | 1 |
| 8 | 双凸透镜 1 | 焦距 $f = 300mm$, 装在透镜/反射镜座中 | 1 |
| 9 | 平凸透镜 2 | 焦距 $f = 100mm$, 装在透镜/反射镜座中 | 1 |
| 10 | 平凸透镜 3 | 焦距 $f = 150mm$, 装在透镜/反射镜座中 | 1 |
| 11 | 白屏 | SZ-13, 一面白屏, 一面带坐标纸 | 1 |
| 12 | 成像相机 | 大恒的 MER-130-30UM 或元启智能的 REV-13AMU2C | 1 |
| 13 | 数据线 | 图像采集数据线 | 1 |
| 14 | 计算机 | 台式或笔记本, 安装有成像相机图像采集软件 | 1 |
| 15 | 光学导轨 | 长度 1 米, 带刻度 | 1 |
| 16 | 二维平移台 | 行程 >10mm | 4 |
| 17 | 平移滑块 | | 8 |
| 18 | 支杆 | 50mm 长和 75mm 长 | 3+5 |
| 19 | 磁性表座 | | 4 |
| 20 | 旋转调整台 | 可调角度 $>\pm 5^\circ$ | 1 |
| 21 | 白光灯 | GY-6 型, 亮度可调, 即溴钨灯 | 1 |
| 22 | 滤光片 1 | 透光波长: 435nm | 1 |
| 23 | 滤光片 2 | 透光波长: 630nm | 1 |

1.3 原理概述

(15 分) (概述色差和慧差产生的原理) (请用自己的语言描述, 勿大幅 copy 讲义等) (填写空间不够的话请提前规划留白, 做到报告的美观)

像差理论是光学设计求解光学系统初始结构的理论基础。在建立起理想光学系统后, 将实际光学系统所成的像偏离理想光学系统的误差称为几何像差, 简称像差。光学设计者将几何像差分为七种, 即球差、慧差、像散、场曲、畸变、位置色差和倍率色差。产生像差的原因有三点:

- i. 光线计算公式的非线性;
- ii. 物面为平面, 折(反)射面为球面(曲面), 成像面为曲面;
- iii. 不同颜色(波长)的光在折射介质中的折射率不同。

下面具体讨论“色差”和“慧差”的形成原理:

(1) **色差 (Chromatic Aberration):** 色差是由于不同波长(颜色)的光线在透镜或系统中的折射率不同而引起的。这导致不同波长的光线会聚或发散到不同的焦点位置, 从而造成成像时不同波长的光线无法同时聚焦于同一平面上, 使得图像产生色彩偏差。色差分为两种:

- i. **位置色差:** 是光学系统中的一种像差, 由于不同波长的光在介质中的折射率不同, 导致同一物点的不同颜色光线经过光学系统后在像面上成像位置不同。这种现象使得物点的像在像面上呈现出一个彩色的弥散斑。位置色差也称为轴向色差, 不同孔径的光线产生的色差值也不同。因此, 位置色差描述了不同波长光线成像位置之间的差异, 是光学系统中一个重要的参数。
- ii. **倍率色差:** 根据几何光学理论, 同一介质对不同波长的光有不同的折射率, 因此对轴外物点, 不同波长的光的主光线焦距或像距是曲率半径、间距和折射率的函数, 导致不同波长的光的垂轴放大率不相等。

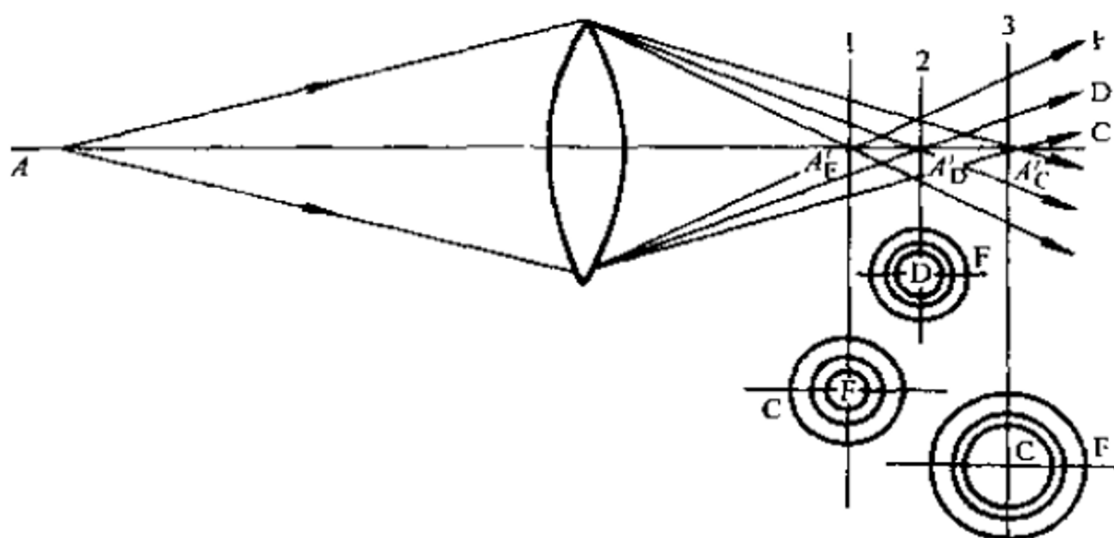


图 1: 位置色差

(2) **慧差 (Spherical Aberration)**: 主要表现为在小视场和大孔径条件下产生的像差。慧差主要针对轴外光束, 当光学系统不满足等晕条件时, 轴外光束的对称性被破坏, 导致成像光束与高斯像面相交成一个彗星状的弥散斑。孔径边缘上的光线在像面上的交点形成一个圆, 距离孔径中心越近的圆周上的光线形成的交点圆越小, 距离主光线和像面焦点越近。慧差可分为子午慧差和弧矢慧差, 分别表示孔径边缘上、下光线和弧矢光线在像面上的交点与像面焦点的距离。慧差的存在会导致轴外像点成为彗星状的弥散斑, 影响轴外像点的清晰度。

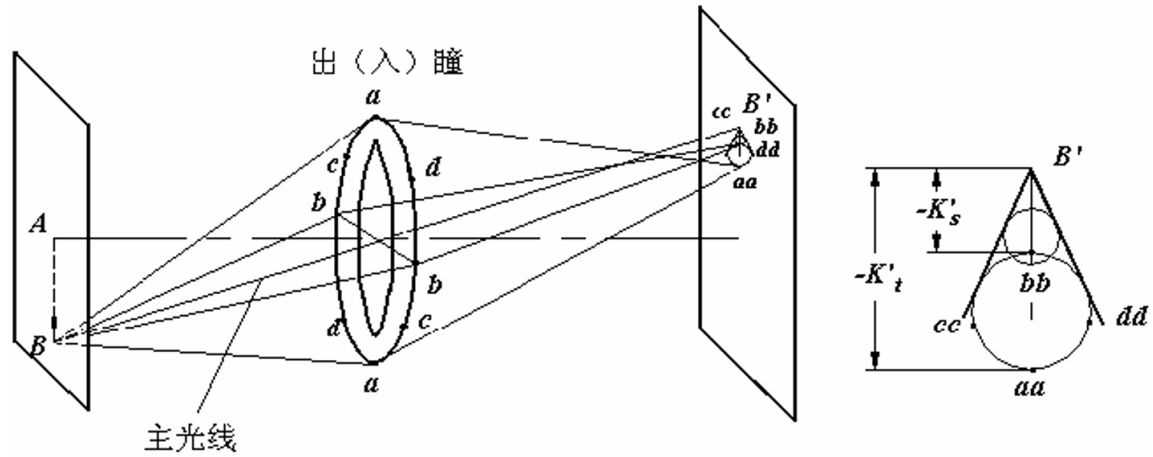


图 2: 慧差成像示意图和子午慧差、弧矢慧差

1.4 实验前思考题

思考题 1.1: 慧差与孔径、视场的关系?

- (1) **孔径对慧差的影响**: 孔径越大, 通过光学系统的光线范围越广, 慧差产生的影响也就越显著。在大孔径条件下, 光线在光学系统中的传播路径更加复杂, 不同位置的光线会汇聚到不同的焦点上, 导致成像质量下降, 慧差效应更加明显。
- (2) **视场对慧差的影响**: 视场指的是在成像平面上能够接收光线的范围。在小视场条件下, 成像平面上只有部分光线能够到达, 此时慧差对成像的影响相对较小。然而, 在大视场条件下, 不同位置的光线经过光学系统后会形成不同位置的焦点, 慧差会导致成像位置偏离预期位置, 影响成像质量。

思考题 1.2: 产生色差原因? 列举几种消色差的方法

产生色差的主要原因是介质对不同波长的光的折射率不同, 导致不同波长的光线在经过光学系统后成像位置不同。具体来说, 产生色差的原因包括:

- (1) **介质色散**: 介质对不同波长的光的折射率不同, 这种现象称为色散。在透镜或光学系统中, 不同波长的光线经过折射后会有不同的折射角, 导致不同波长的光线聚焦于不同位置。
- (2) **透镜形状**: 透镜的形状不同会导致不同波长的光线经过透镜后的光程不同, 从而引起色差。例如, 球面透镜的球差会导致不同波长的光线聚焦于不同位置。

- (3) **玻璃材料**：不同的玻璃材料对不同波长的光的折射率不同，使用不同材料制作的透镜或光学元件会产生色差。

几种消色差的方法包括：

- (1) **复合透镜设计**：使用多个透镜组合成复合透镜，利用不同透镜的特性来抵消色差。
- (2) **使用折射率不同的玻璃材料**：选择折射率不同的玻璃材料组合制作透镜，使得不同波长的光线经过透镜后折射角相近，从而减小色差。
- (3) **非球面透镜设计**：设计非球面透镜以校正球差和像差，可以减小色差。
- (4) **色差补偿镜片**：在透镜组合中加入特殊设计的色差补偿镜片，用于校正不同波长的光线的色差。
- (5) **光栅消色差**：使用光栅结构的光学元件，在不同波长的光线上产生不同的光程补偿，从而减小色差。

思考题 1.3：针孔滤波的工作原理

针孔滤波是一种光学滤波方法，其工作原理基于衍射现象。当光线穿过一个非常小的孔径时，会发生衍射现象，即光线在经过孔径后会呈现出特定的衍射图样。针孔滤波利用这种衍射效应来控制光线的传播和成像。

针孔滤波的工作原理如下：

- (1) **光线穿过孔径**：光线从光源处发出，经过一个非常小的孔径（针孔）后，会形成衍射图样。孔径的尺寸决定了通过的光线范围。
- (2) **衍射效应**：光线通过孔径后，会在成像平面上形成衍射图样，这是由于光波在经过孔径时会发生弯曲和相互干涉的结果。衍射图样的形状和大小取决于孔径的尺寸和光波的波长。
- (3) **滤波效果**：针孔滤波器根据衍射图样的特性来选择通过的光线。通常，衍射图样中心的光强最强，周围逐渐减弱，因此可以通过调整孔径的尺寸和光源与成像平面的距离来控制通过的光线，实现对光的滤波。

应用：针孔滤波器常用于显微镜等光学系统中，用于控制成像的分辨率和对比度。通过调整针孔的尺寸和位置，可以改变成像的清晰度和细节表现。

| | | | |
|-------|-----|-------|----------|
| 专业： | 物理学 | 年级： | 2022 级 |
| 姓名： | 戴鹏辉 | 学号： | 22344016 |
| 室温： | | 实验地点： | |
| 学生签名： | | 评分： | |
| 日期： | | 教师签名： | |

光学像差实验 I 实验记录

2.1 实验内容、步骤、结果及讨论

（按照实验顺序依次简要记录实验内容及步骤，）（空间不够，可自行加页）

2.1.1 色差测量实验

实验光路如图3所示：

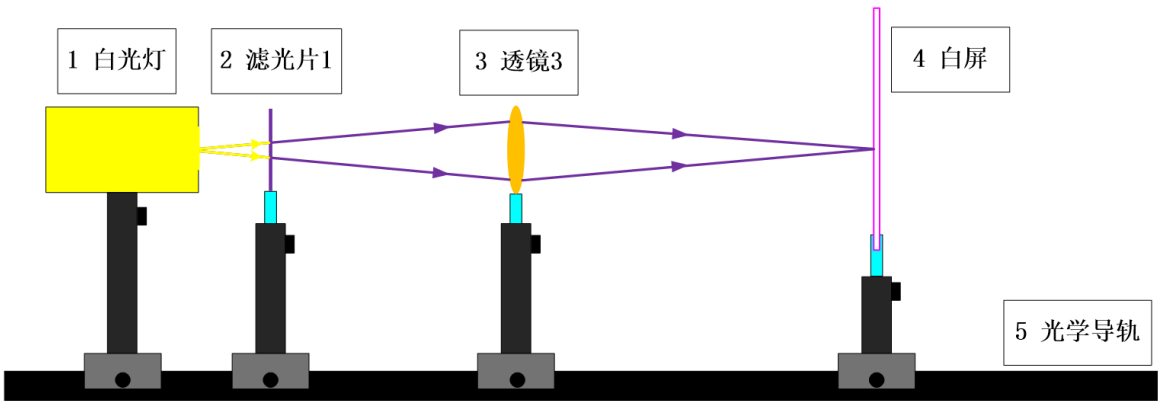


图 3: 位置色差测量光路图

实验步骤如下：

- (1) 按图示光路，先摆放溴钨灯、透镜、白屏，调整透镜 3 的中心高与光源等高，使光源在透镜 3 的物方 1-2 倍焦距处，调整白屏的位置，找到溴钨灯灯丝最清晰的像位置，并记录该位置 $x_1 = \text{ } \text{O}$ ；
- (2) 按图示光路，放置滤光片 1，调整白屏的位置，找到这时溴钨灯丝最清晰的像位置并记录白屏位置 $x_2 = \text{ } \text{O}$ ；
- (3) 更换为滤光片 2，再调整白屏的位置，找到这时溴钨灯丝最清晰的像位置并记录白屏位置 $x_3 = \text{ } \text{O}$ ；
- (4) 计算位置色差；

(5) **判断**波长与折射率之间的关系。

实验结果如下：

| 溴光灯位置/cm | 透镜位置/cm | 白光位置/cm | 蓝光位置/cm | 红光位置/cm | 色差/cm |
|----------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 18.9 | 42.0 | 90.7 | 90.5 | 91.6 | -1.1 |
| | 43.5 | 85.2 | 85.5 | 86.5 | -1.0 |

表 1: 观察色差实验数据记录与处理

实验中不放置任何滤光片时，波长接近 $\lambda = 589.29nm$ ，使用红色滤光片时，波长为 $\lambda_C = 656.27nm$ ，使用蓝色滤光片时，波长为 $\lambda_F = 486.13nm$ 。则根据位置色差计算公式

$$\Delta L'_{FC} = L'_F - L'_C$$

得到系统对红光和蓝光的位置色差，如表1所示。

则由数据可知，波长越短，成像越近，折射率越大。

2.2 光路调试与慧差测量实验

实验光路如图4所示。

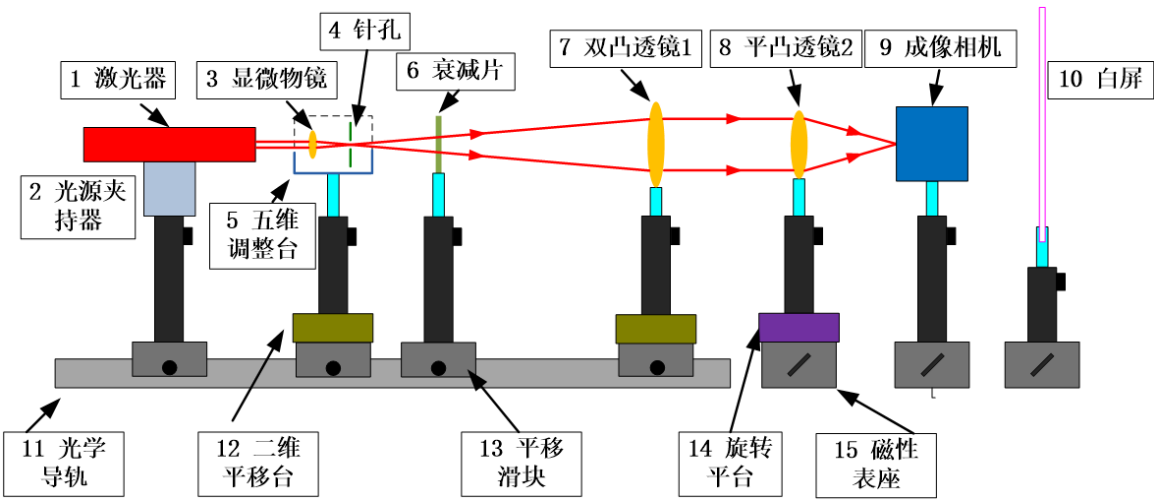


图 4: 慧差观测光路图

实验步骤如下：

- (1) 根据图示布局及元器件参数，**估计**各器件的摆放位置，并做初步的**预调整**；
- (2) 放置好激光器，打开光源，白屏安装在滑块上并在导轨上前后移动，利用激光光源打在白屏上的光点的位置**调整**激光器的方位和俯仰，使得光点的位置随白屏的移动基本不变；之后在离激光器约 400mm 的位置固定白屏，并在白屏上**标记**光斑的位置；

- (3) 把显微物镜和针孔**安装**到五维调整机构上，并如图摆放，让激光正入射显微物镜，先**调整**针孔的位置，使其位于显微物镜的焦点位置，直到出现环形衍射光斑；**后微调**五位调整机构的高低和左右（垂直光轴方向）平移，同时微调针孔的平移，**目标**是使得环形衍射光斑的中心位于第 2 步中所标记的位置；之后**固定并保持**显微物镜和针孔的位置不变。**记录**此时调试出来的环形衍射光斑；
- (4) 如图**拜访**上双凸透镜 1，对经过针孔的发散球面波进行准直。**调整**透镜的位置，使光斑与镜面通孔同心，并使针孔位于透镜的焦点位置，光斑经过透镜后为近似平行光（前后平移白屏，观察光斑在白屏上的尺寸，如光斑大小基本不变，则可判定出射光为平行光）；
- (5) 如图**拜访**上平凸透镜 2（也可用平凸透镜 3）（平面朝入射光方向），**调整**该透镜的位置，使入射光斑与镜面同心，并使旋转调整机构位于调整的中间位置，方便后续的正负角度调整。
- (6) 如图**先摆放**上衰减片 1，**后安装**成像相机，**打开**相机控制采集软件，**采集**图像，**调整**相机位置，使相机靶面位于平凸透镜 2 的焦点处，并使图像尽可能位于靶面中心。最开始应通过软件把相机的增益和曝光时间调低，防止过度曝光，损坏相机。如果衰减的不够，可以用上衰减片 2。在图像没有饱和的情况下，**记录**此时得到的焦点图像；在光路调整没有问题的情况下，此时应该得到一个圆心光斑，并可看到暗的同心环。
- (7) **调整**旋转调整机构的旋转角度，使平凸透镜 2 发生偏转，观察并**记录**此时得到的**焦点图像**，同时**记录**偏转角度（这一步应该能够观察到前述慧差所对应的像斑形状）；在旋转调整机构的角度调整范围内选 5 点（如 -10° 、 -5° 、 0° 、 5° 、 10° ），分别**记录**对应得到的图像，**分析**慧差大小随角度的变化关系；

实验结果如图5所示，其中的“顺时针”“逆时针”定义为俯视平凸透镜 2 所观察的结果：

观察慧差图像可知：

- (1) 正入射时，光斑最小最清晰。
- (2) 当平凹透镜 2 旋转一定角度后，图像开始出现彗尾。逆时针旋转时，彗尾向右，图像向左移；顺势针旋转时，彗尾向左，图像向右移。
- (3) 彗尾的大小与透镜旋转角度呈正相关关系。

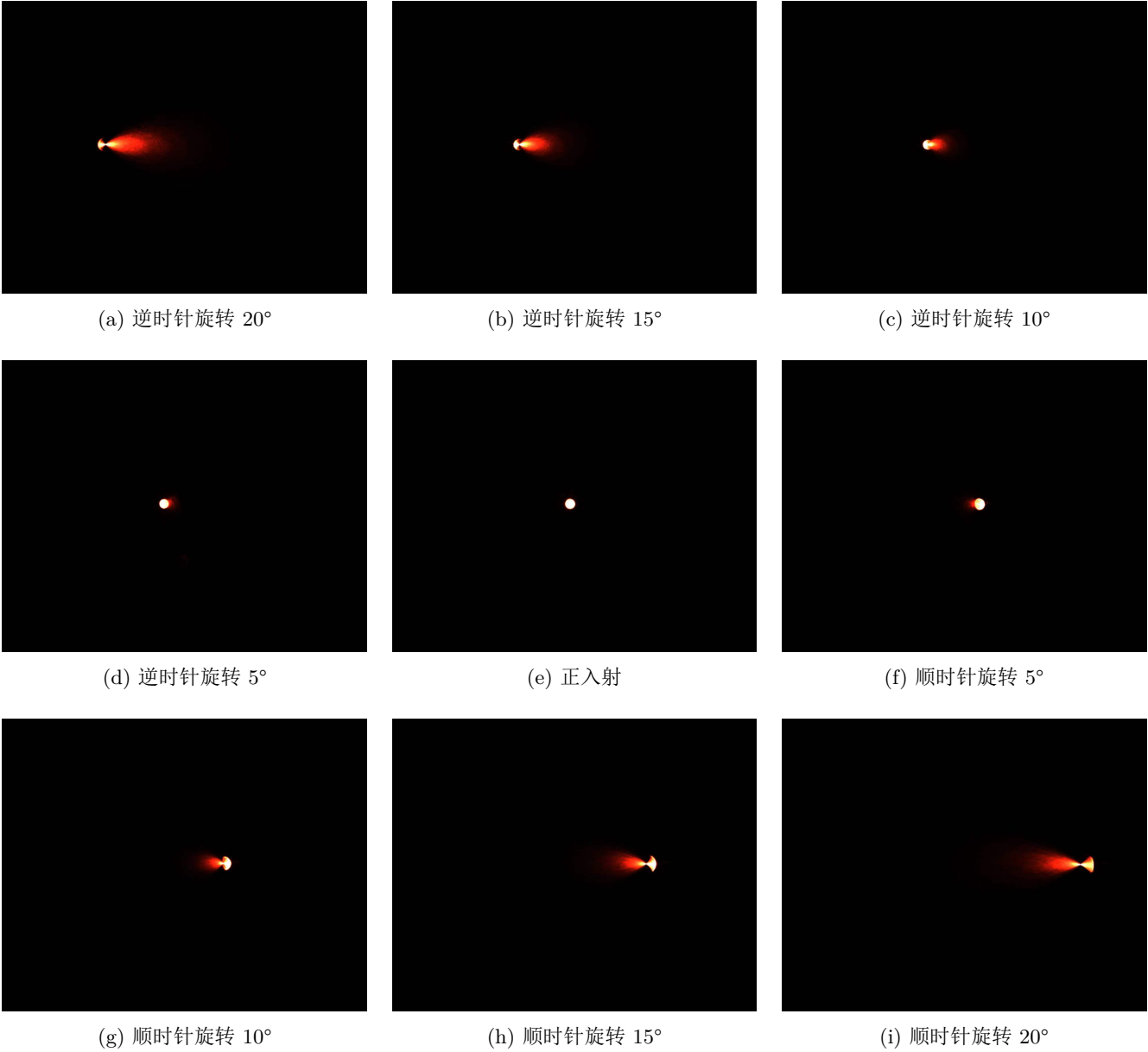


图 5: 慧差实验结果图

2.3 实验过程中遇到的问题记录

- (1) 在观察色差的实验中，应注意光源应当放置在透镜 1-2 倍焦距处，以成放大的像，便于观察
- (2) 在观察色差的实验中，像的清晰与否比较主观，实验结果可能存在较大的误差
- (3) 在观察慧差的实验中，需要保证所有的光学器件都应保持等高共轴，这样能保证成像最清晰

思考题 2.1: 有没有办法通过图像计算光学系统的像差？请给出方法说明。如果通过相机采集图像进行判断的话，相机象元尺寸应如何选择？

计算光学系统的像差通常涉及到复杂的光学理论和实验设备。通过图像来评估像差，可以采用以下基本步骤：

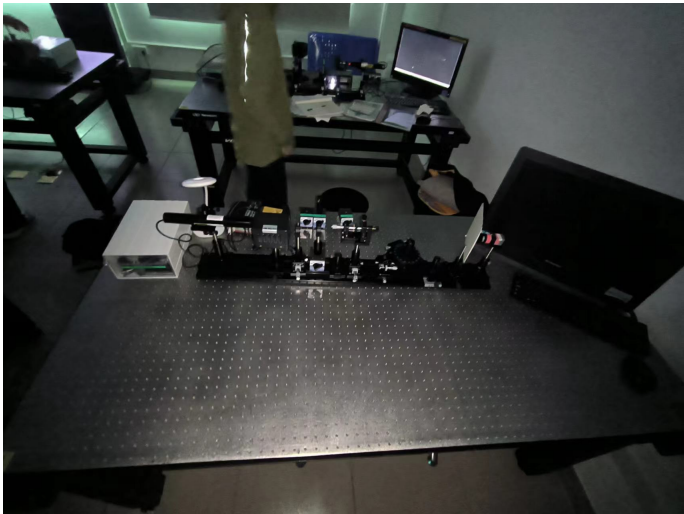
- (1) 图像采集：使用相机拍摄光学系统产生的图像。这些图像应该包含特定的测试图案，如条纹或点阵，以便分析。
- (2) 图像处理：对采集的图像进行处理，以提取像差信息。这可能包括边缘检测、对比度分析和图像质量评估。
- (3) 像差分析：使用软件工具分析处理后的图像，以确定光学系统的像差类型和程度。常见的像差包括球差、彗差、像散、畸变等。
- (4) 优化与校正：根据分析结果，调整光学系统的参数或使用图像后处理技术来减少像差的影响。

关于相机象元尺寸的选择，它取决于所需的图像分辨率和光学系统的特性。一般来说，较大的像元尺寸可以提高相机的灵敏度，适合于低光照条件下的成像。而较小的像元尺寸可以提高图像的细节分辨率，适合于对细节有高要求的应用场景。

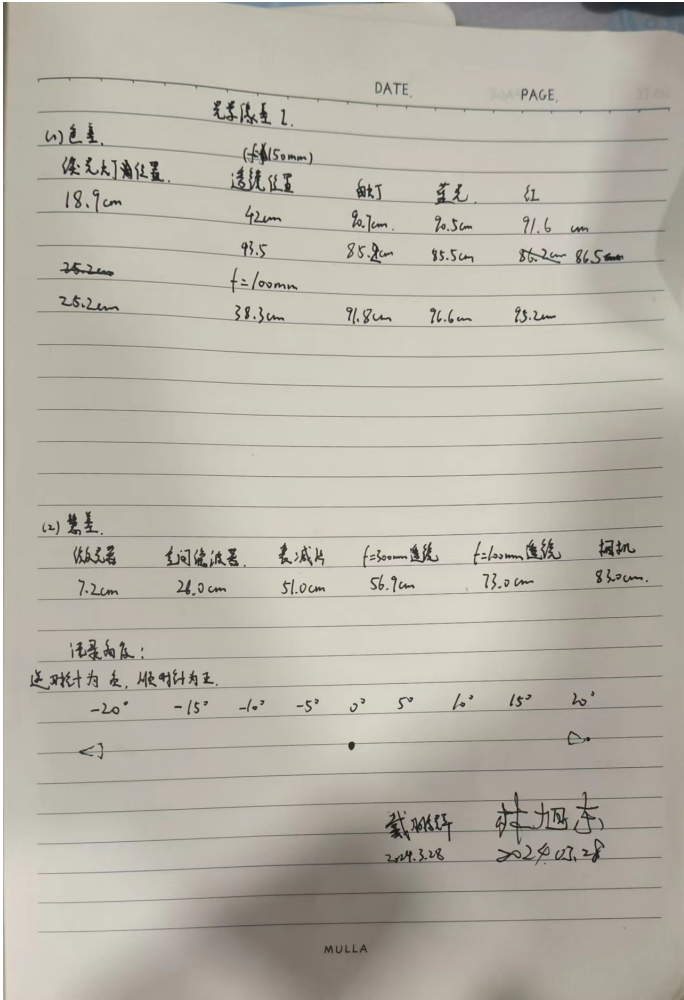
在选择相机象元尺寸时，还需要考虑以下因素：

- (1) 系统放大倍率：传感器像元尺寸除以光学系统总放大倍率得到的图像像素大小，决定了成像特性。
- (2) 数值孔径 (NA)：显微镜物镜的 NA 决定了光学系统的分辨率极限，应选择与物镜 NA 匹配的像元尺寸。
- (3) 信噪比与分辨率：需要平衡信噪比和分辨率的要求，选择合适大小的像元尺寸。

综合考虑以上因素，可以选择适合特定光学系统和应用需求的相机象元尺寸。



(a) 桌面收拾情况



(b) 实验原始数据

图 6: 桌面收拾情况