

实验五 星点法观测光学系统单色像差

一、实验目的

1. 了解星点检验法的测量原理和基本理论依据。
2. 学会用星点法观测各种单色像差（球差、彗差、像散、场曲、畸变）。

二、实验仪器

- 平行光管
- 可调直流电源
- 绿色 LED 光源
- 小孔光阑、环带光阑
- 透镜（80mm、160mm 焦距）
- 彗差镜头
- CMOS 相机与采集软件
- 侧推平移台（X、Y 方向）
- 可变光阑
- 网格板、十字缝板

三、实验原理

星点检验法是通过考察一个点光源经光学系统后，在像面及像面前后不同截面上所成衍射像的形状（通常称为星点像）及光强分布来定性评价光学系统成像质量好坏的一种方法。

对于一个理想的光学系统，光瞳函数是一个实函数，而且是一个常数，代表一个理想的平面波或球面波，因此星点像的光强分布仅仅取决于光瞳的形状。在圆形光瞳的情况下，理想光学系统焦面内星点像的光强分布就是圆函数的傅里叶变换的平方，即爱里斑光强分布，即

$$\begin{cases} \frac{I(r)}{I_0} = \left[\frac{2J_1(\psi)}{\psi} \right]^2 \\ \psi = kr = \frac{\pi \cdot D}{\lambda \cdot f'} r = \frac{\pi}{\lambda \cdot F} r \end{cases}$$

式中， $I(r)/I_0$ 为相对强度（在星点衍射像的中间规定为 1.0）， r 为在像平面上离开星点衍射像中心的径向距离， $J_1(\psi)$ 为一阶贝塞尔函数。

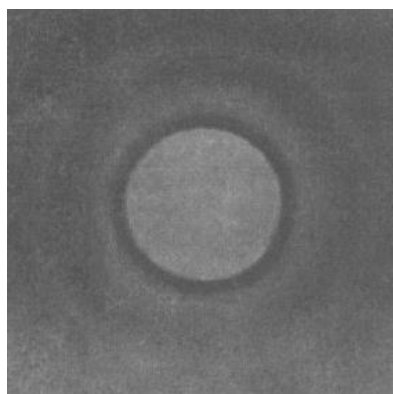


图 1 无像差星点衍射像

四、实验步骤

(一) 球差观测

1. 按图 2 搭建实验光路：平行光管加入针孔，透镜（凸面朝光源）。
2. 调整各元件同轴，打开绿色 LED 光源，打开采集软件，设置分辨率 640×512 ，中心位置 320×256 。
3. 可变光阑开到最小，微调相机沿光轴位置，使聚焦光斑最小、锐利，记录焦点位置。
4. 更换 10mm、20mm、30mm 环带光阑，分别找到各自焦点并记录数据。
5. 依据焦点位置变化计算球差值 ($\delta L' = L' - l'$)。

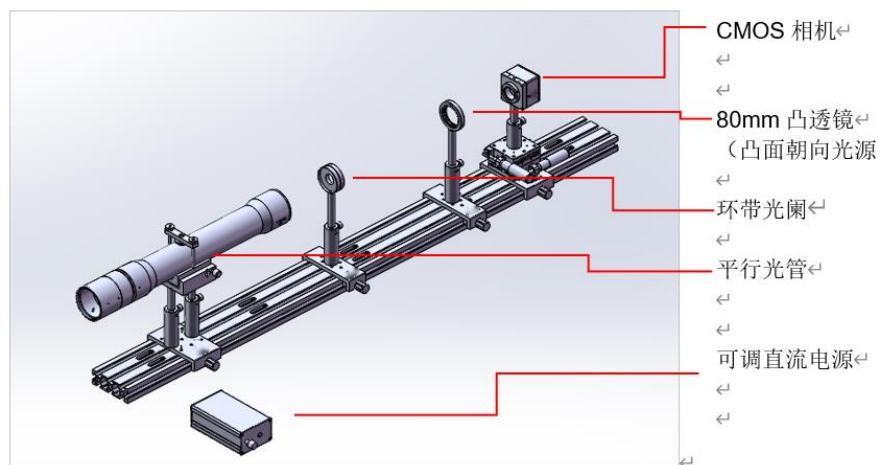


图 2 球差观测装配图

(二) 彗差观测

1. 按图 3 搭建光路。（平行光管加入针孔），由于彗差镜头工作距较短，相机套筒安装在侧推平移台的前孔，以缩短和彗差镜头的距离，彗差镜头按照箭头指示方向安装，箭头指示方向为光束传播方向。
2. 设置采集参数（ 640×512 分辨率，中心 320×256 ），调整相机与镜头距离使成像清

晰。

3. 轻微旋转彗差镜头，同时微调 Y 向位置，观察到彗差特征：星点像拉伸成“彗尾”形状。

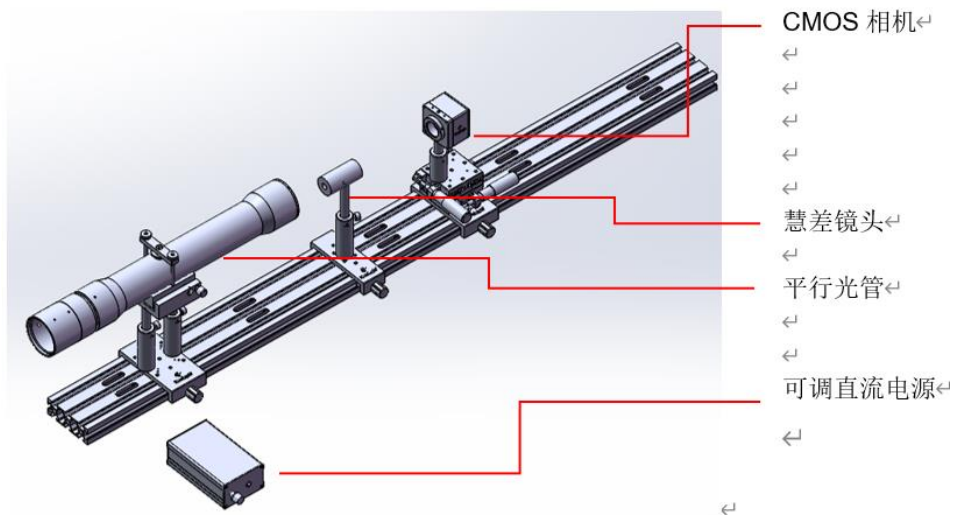


图 3 彗差观测装配

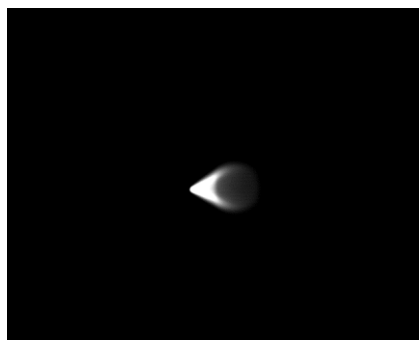


图 4 彗差效果参考图

(三) 像散观测

1. 按图 5 搭建光路。(平行光管加入针孔)，可变光阑尽量靠近平行光管放置，孔径调节至 4mm 到 5mm，透镜凸面朝向光源。
2. 设置采集参数 (640×512 分辨率，中心 320×256)，调节透镜与相机距离，获得清晰圆形光斑。

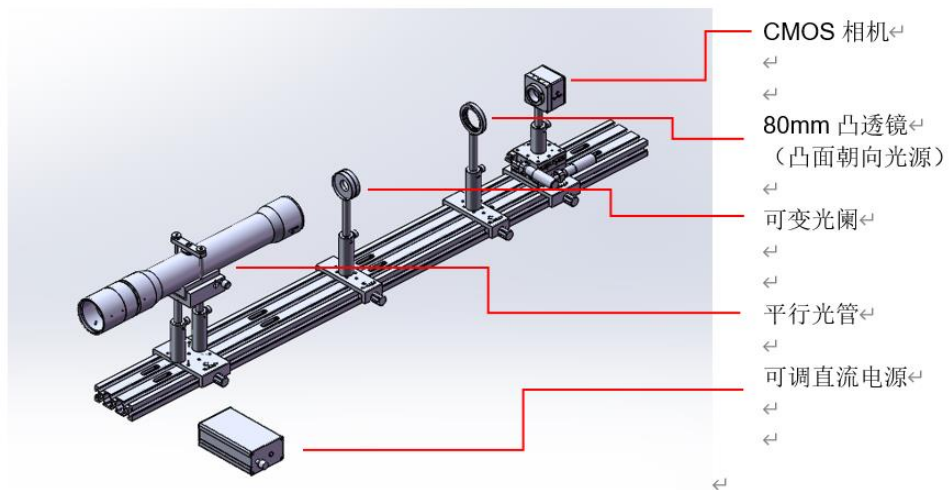


图 5 像散实验装配图

3. 离焦并微调相机，观察子午像散 (A) 和弧矢像散 (B) 现象，记录两种离焦位置读数。

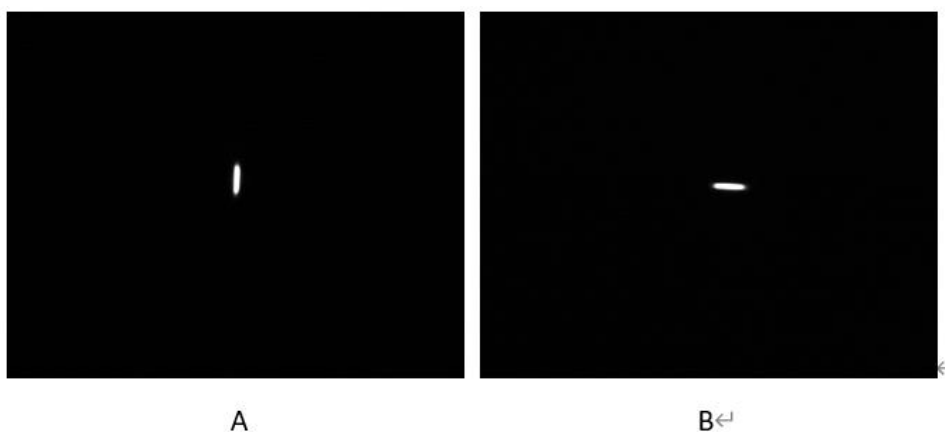


图 6 子午像散 (A) 和弧矢像散 (B)

4. 根据公式计算像散数据($X'_{ts} = X'_t - X'_s$)
5. 更换十字缝板，观察横线与竖线清晰位置不同，进一步确认像散存在。



图 7 十字缝效果图

(四) 场曲观测

1. 按图 8 搭建光路。(平行光管里加入十字缝), 孔径调节为 3mm 到 4mm, 透镜凸面朝向相机放置。

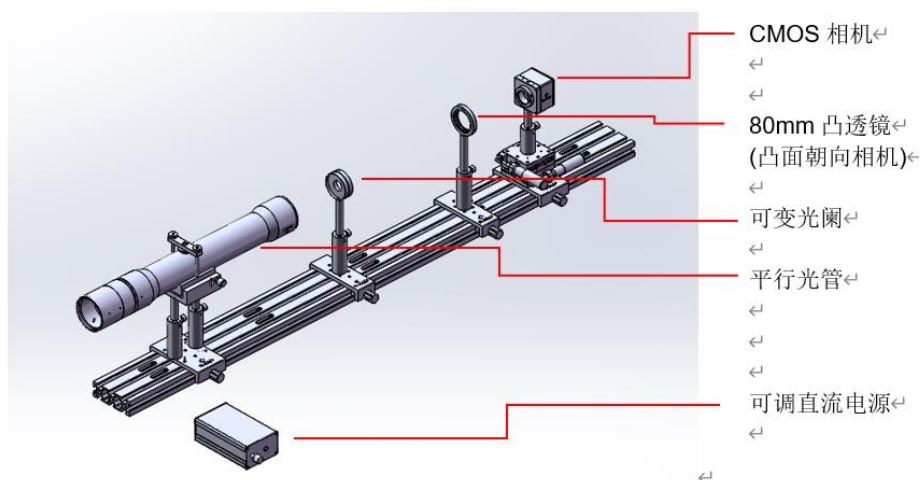


图 8 场曲测量装配图

2. 设置相机分辨率 1280×1024 , 采集图像。
3. 调整使中心十字像无畸变。
4. 调节 X 向位置, 分别观察中心和边缘成像清晰的位置, 记录千分尺读数。
5. 根据公式计算场曲 ($X'_{中心} - X'_{边缘} = X'$)

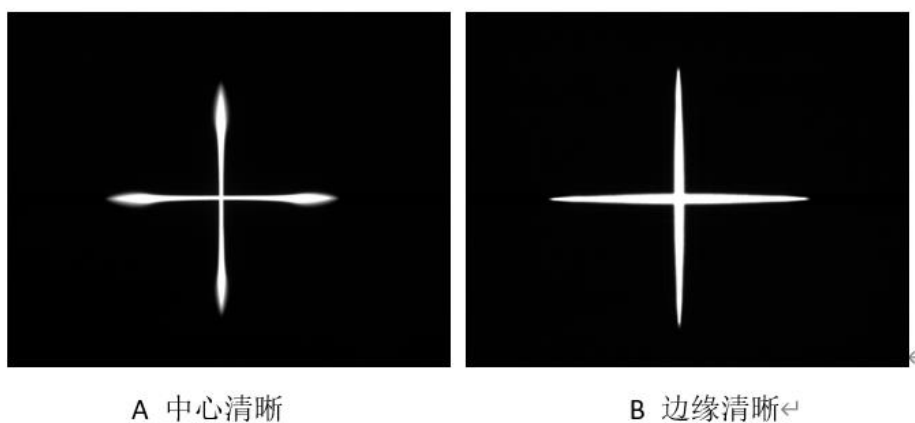


图 9 场曲效果参考图

(五) 畸变观测

● 桶形畸变:

1. 按图 3-10 搭建光路。(平行光管里加入网格板), 选择绿光照明, 透镜凸面朝向光源放置。

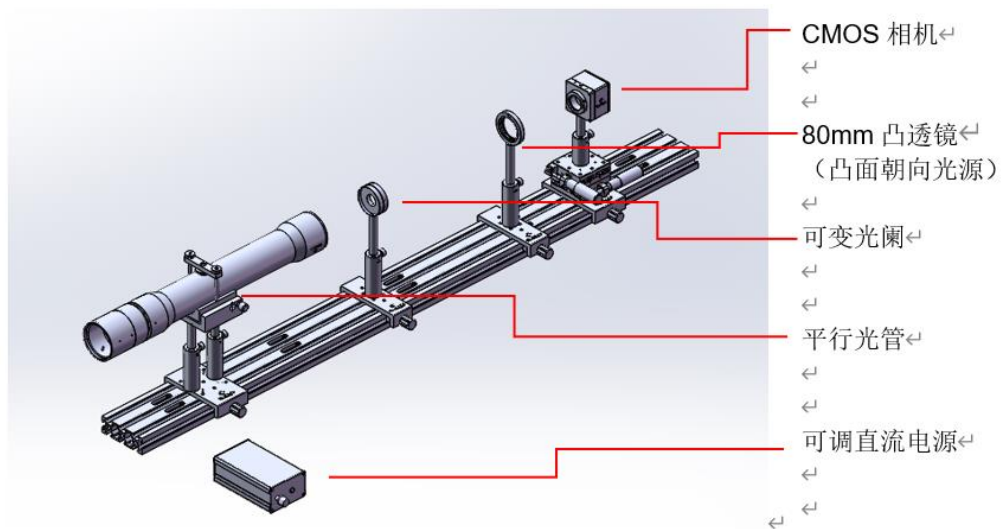


图 10 桶形畸变测量装配图

2. 设置相机分辨率 1280×1024 ，采集图像。

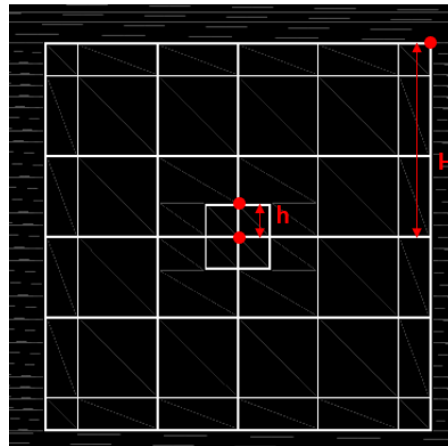


图 11 网格板示意图

3. 获取中心、上边缘、中间点像素位置，根据偏差计算桶形畸变量。

$$q' = \frac{y'_z - y'}{y'}$$

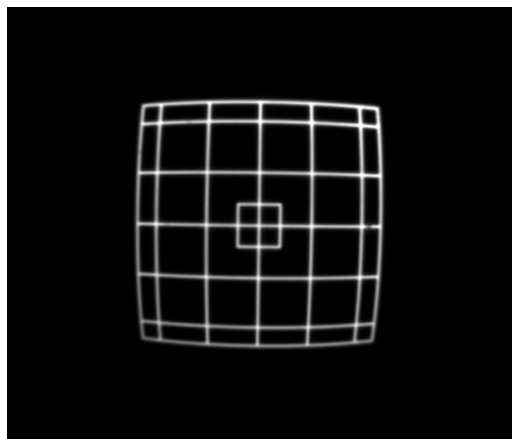


图 12 网格板示意图

● 枕形畸变:

1. 按图 13 搭建光路。相机套筒安装在侧推平移台的前孔，以缩短和 1mm 小孔光阑的距离，将透镜更换为 160mm 焦距，透镜凸面朝向相机。

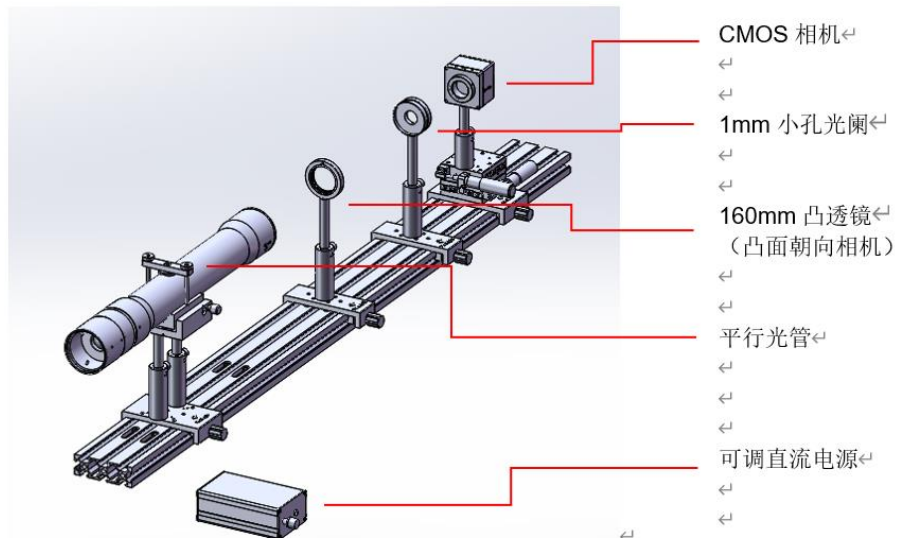


图 13 枕形畸变测量装配图

2. 采集图像。调节相机位置，使成像清晰，将光阑放置在相机前面约 20mm 处，调节光学器件高度和角度，使网格板的成像尽可能对称。
3. 调整形成枕形畸变图像，记录并计算畸变率。

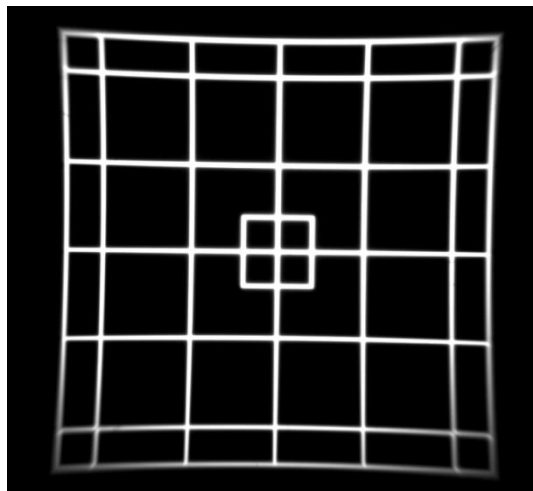


图 13 枕形畸变效果图

思考题

1. 比较球差、彗差、像散在星点图像中的典型特征？
2. 光阑的大小和位置会对像差造成哪些影响，能否通过实验验证？
3. 像差会对成像光学系统造成影响，如何才能减小光学系统的像差，对于常见的对称光学系统能减小哪些像差？能否通过实验验证？