

## 实验 2-衍射实验

实验目的：

- 1.对光学实验形成感性的认知，掌握组装、调整衍射光路的方法。
- 2.使用不同结构衍射屏实现夫琅禾费衍射，观察实验现象，研究不同结构衍射屏的衍射光强分布特征；
- 3.结合理论计算衍射屏的结构参数，包括单缝的缝宽，双缝中心间距以及小孔的直径。

实验原理：

根据实验装置的不同，衍射实验一般可以分为夫琅禾费衍射和菲涅尔衍射两种。本实验只讨论夫琅禾费衍射。

产生夫琅禾费衍射的装置的基本组成如图 1.1 所示：

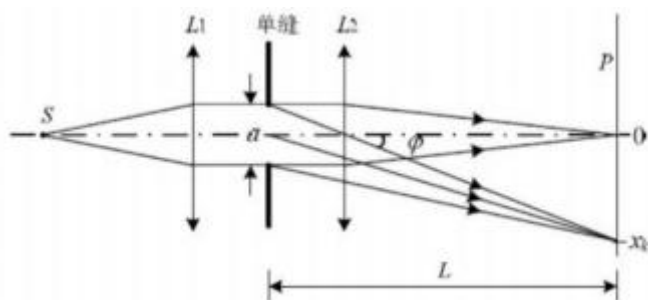


图 1.1 夫琅禾费衍射原理

为了满足无限远的效果，实验中使用两个透镜来完成光路的会聚。图中的 S 为一个仅发出波长为  $\lambda$  的光的光源，在 L1 与 L2 的平行光光路上插入一个宽度为 a 的单缝后，可以在屏 P 上观察到衍射图像。

衍射图像的形状如图 1.2：

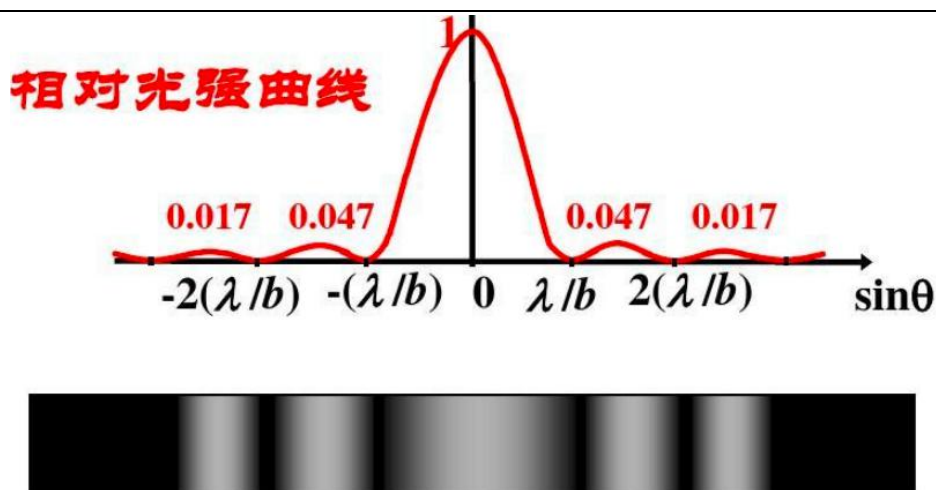


图 1.2 单缝夫琅禾费衍射图样

## 1. 单缝夫琅禾费衍射的光强分布

利用能发出平行光的波源，通过单缝后在一个接收屏上可以收到衍射图样。由惠更斯—菲涅尔原理可知，单缝上的每个点都可以看做是新的波源。这些波源发出的子波在接收屏上叠加，由理论计算得，其光强分布表现为：

$$I_{\varphi} = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2, \quad \text{其中 } u = \pi a \frac{\sin \varphi}{\lambda} \quad (1)$$

式中  $a$  为单缝的宽度， $I_0$  为入射光光强， $\varphi$  为衍射光与光轴的夹角，即衍射角。当衍射角  $\varphi$  固定时，观察点的光强值与波长  $\lambda$  和单缝缝宽  $a$  有关。

当  $u=0$  即  $\varphi=0$  时， $I_{\varphi}$  取得最大值，即  $I_0$ ，此时对应的衍射亮斑在所有条纹中最亮，被称为中央主极大。而

$$a \sin \varphi = k\lambda \text{ 时, } k=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3... \quad (2)$$

时，有  $u = k\pi$ ，即  $\sin u = 0$ ，表现为暗纹。此时衍射角对应的位置为暗纹的中心。在本实验中，衍射角  $\varphi$  很小，可以认为  $\sin \varphi = \varphi$ ，于是 (2) 式可以写为

$$\varphi = \frac{k\lambda}{a} \quad (3)$$

由图 1.1 可知，其衍射角在一级近似下可认为是

$$\varphi = \frac{k_x}{L} \quad (4)$$

整理方程 (3) 和 (4) 得到

$$\frac{k\lambda}{a} = \frac{x_k}{L} \quad (5)$$

由以上推导得到:

(1) 中央主极大宽度为其他亮条纹宽度的两倍;

(2) 暗条纹是以主极大为中心, 两边等间距排列分布的;

(3) 位于相邻两暗条纹之间的各级亮条纹, 被称为次级大, 宽度为中央主极大的一半。

## 2. 双缝夫琅禾费衍射的光强分布

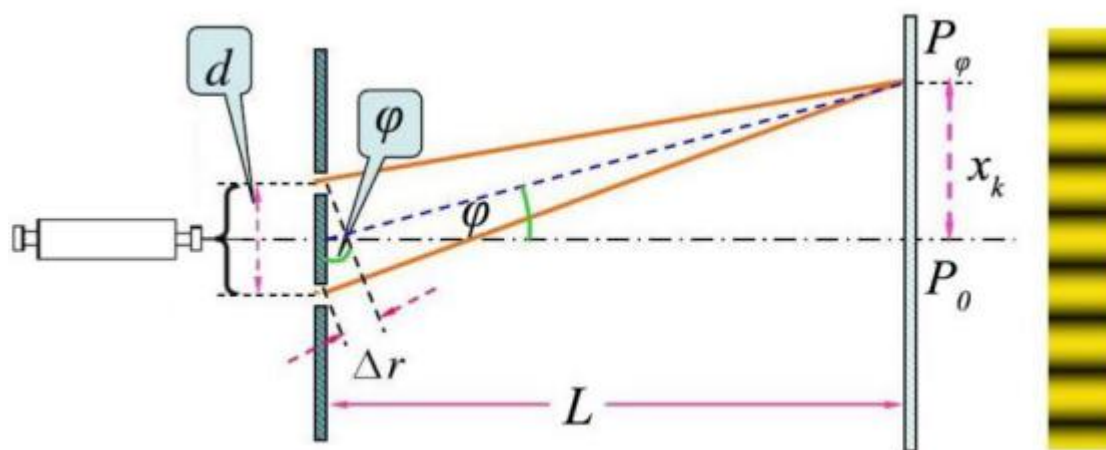


图 1.3 双缝夫琅禾费衍射示意图

如图 1.3, 每条狭缝的宽度仍为  $a$ , 中间不透光部分宽度为  $b$ , 则双缝中心间距  $d = a + b$ . 因此, 屏上  $P_\phi$  处的光强分布为

$$I_\phi = 4I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2 \cos^2 v \quad (6)$$

其中  $u = \pi a \frac{\sin \phi}{\lambda}$ ,  $v = \pi d \frac{\sin \phi}{\lambda}$ ;

上式表明: 双缝衍射的光强由两个因素共同决定。其中  $u$  是单缝衍射带来的决定项, 而  $v$  表示两个缝产生的两束光的相位差带来的影响结果。因此双缝夫

琅禾费衍射的光强由两个因素乘积共同作用而成。

因此，当两个因子有一个的正弦值为 0 时，接收屏上接收到的图像为暗纹。

①对  $u$  而言，使得  $\frac{\sin u}{u}$  为 0 的条件是： $u = \pi a \frac{\sin \varphi}{\lambda} = k\pi$ ，即

$$a \sin \varphi = k\lambda, k \in Z \text{ 且 } k \neq 0 \quad (7)$$

②对  $v$  而言，使得  $\cos^2 v = 0$  的条件是： $v = \pi d \frac{\sin \varphi}{\lambda} = \pm \left(m - \frac{1}{2}\right)\pi$ ，即

$$d \sin \varphi = \pm \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda, m \in N^* \quad (8)$$

同样，出现衍射极大值的条件是： $v = \pi d \frac{\sin \varphi}{\lambda} = n\pi$ ，即

$$d \sin \varphi = n\lambda, n \in Z \quad (9)$$

但是，当  $d \sin \varphi = n\lambda, n \in Z$  确定的最大值与  $a \sin \varphi = k\lambda, k \in Z \text{ 且 } k \neq 0$  确定的最小值重合时，第  $n$  级干涉条纹不会出现，这种现象称为缺级。第  $n$  级缺级的条件是：

$$\frac{n}{k} = \frac{d}{a} \quad (10)$$

根据以上推导可得：当狭缝宽度较小时，尤其是小于光的波长时，观察到的衍射条纹，从中央向两端的亮度基本不衰减；同时，条纹之间的间距与屏与双缝的距离成正比，与双缝间距成反比。

由于实际条纹是单缝衍射和双缝干涉的共同作用结果。考虑到实际试验中狭缝宽度比较大，远大于光的波长，因此衍射条纹将出现明显的亮度衰减，呈现出中间强、两边弱的情况；同时，缺级现象将很明显，这都是不可忽略的部分，会对实验结果造成较大的干扰。

### 3. 单孔夫琅禾费衍射的光强分布

由于光的波动性，光通过小孔发生衍射，在接收屏上呈现出一个中央亮斑和环绕中央亮斑的环状衍射图样。大约有 84% 的光强集中于中央亮斑，这个亮斑被称为艾里斑。根据理论计算，艾里斑周围的第一暗环对于小孔位置的张角  $\theta$

# 实 验 报 告

评分:

少年班学院 系 20 级

学号 \*\*\*\*\*

姓名 \*\*\*\*\*

日期 2021-4-13

和小孔直径  $D$ 、波长  $\lambda$ 、存在定量关系:

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (11)$$

由于一般情况下这个  $\theta$  比较小, 所以 (11) 式一般被简化为

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (12)$$

对于光学成像系统而言, 用艾里斑直径衡量成像面分辨率的极限, 艾里斑半径为

$$r = 1.22 \frac{\lambda f}{D} \quad (13)$$

## 实验器材

光学导轨及附件, He-Ne 激光器 (632.8 nm) 及电源, 衰减片, 衍射元件 (单缝, 双缝, 圆孔等), CCD, 一维平移台, 显示屏, 支架等。

## 实验步骤

### 一、导轨及 CCD 的调节和衍射图样的观察方法

将导轨置于水平桌面上, 从左到右依次装好激光器、衰减片、固定衍射元件的支架和 CCD 镜头。调整四个光学仪器的高度和位置, 使得四个原件的中心位置在一条与导轨平行的等高直线上。

记下衍射元件支架和 CCD 镜头支架在其底座左右两侧的读数, 两者取平均值即为底座中心的位置。衍射原件的位置即可以认为是在其底座的中心位置, 而 CCD 镜头向光路内凸出 2cm, 因此其实际位置可认为是底座中心位置减去 2cm, 从而可以计算出衍射元件到 CCD 镜头的距离。

注意要保持 CCD 镜头在闭合状态, 若未闭合, 则使用保护盖将其闭合。  
将一个衍射元件置于固定支架上, 接通氦氖激光器、CCD 和显示屏的电源,

# 实 验 报 告

评分:

少年班学院 系 20 级

学号 \*\*\*\*\*

姓名 \*\*\*\*\*

日期 2021-4-13

调整好仪器参数，打开氦氖激光器使其发出红色激光。调整衍射元件的位置使光路通过元件的待观察的部分；调整衰减器使得照在 CCD 的镜头保护盖上的光有一个合适的强度。调整 CCD 支架的位置使衍射条纹在其中心位置。去掉保护盖，待显示屏稳定后观察现象。

## 二、衍射图样的观察与实验项目的进行

基础实验：将衍射原件支架上的衍射原件分别调整为单缝、双缝与小孔，对于同一形状的衍射原件，调整缝宽、间距或大小，观察衍射现象，记录实验现象于实验数据记录纸上（见实验报告附纸）；

### 提升实验：

1.将衍射元件调整为单缝，调整位置使激光穿过单缝，在显示屏上观察 CCD 成像。找到中央最亮的条纹，此为中央主极大；横向调整 CCD 镜头的位置，使得显示屏正中央在主极大左侧的第三级条纹的左侧，从此开始，转动螺旋测微仪，使得 CCD 镜头右移，每当显示屏中心与一条暗纹（或主极大中心）重合时，记下此时的螺旋测微仪读数。换用三种缝宽的单缝，进行三次试验，每组实验大多可以得到 6~8 组数据。

2.将衍射元件调整为双缝，调整位置使激光穿过双缝，在显示屏上观察 CCD 成像。找到中央最亮的条纹，此为零级衍射条纹；横向调整 CCD 镜头的位置，使得显示屏正中央的竖线在左侧的第三级条纹的左侧，从此开始，转动螺旋测微仪使镜头向右移动，每当显示屏中心与一条亮纹重合时，记下此时的螺旋测微仪读数。换用三种缝宽的双缝，进行三次试验，每组实验都可以得到 6~8 组数据。

### 进阶实验：

在衍射元件支架上固定不同形状的小孔、不同尺寸的光栅与细铁丝等衍射元件，观察并记录实验现象。

# 实 验 报 告

评分:

少年班学院 系 20 级

学号 \*\*\*\*\*

姓名 \*\*\*\*\*

日期 2021-4-13

实验完毕后，整理器材。

## 三、注意

每次更换衍射元件时，要注意不要在更换过程中使激光直射 CCD 屏幕。同样也不要眼睛直视激光。

测量位置时，要从一侧开始，朝另一个方向一直同向调整，以此避免回程误差。

另外，不要用手触碰光学元件表面，以防污损。

## 数据记录

原始数据记录在数据记录纸上。

### 一、基础实验

1. 观察单缝、双缝和小孔的衍射光强分布，总结各元件衍射图样的特点；

单缝衍射现象：呈现出红色的衍射图样，中间存在一个较大且明亮的亮斑，亮斑两侧存在一些较暗较小的亮斑，亮度依次递减；中间亮斑的宽度大约是两侧相邻两个亮斑的距离的两倍。

双缝衍射现象：呈现红色条带状衍射图样，中间存在一个亮度最大的亮条纹，两边等距均匀分布其他的亮条纹，暗度由中心向两端依次递减。但是在使用某两个双缝时，在应该出现第三级的条纹的地方，实际观察到暗条纹，出现“缺级”现象，在第 6、9 级的位置同样出现缺级。

小孔衍射现象：小孔中央出现红色亮斑，该亮斑没有很清晰的边界。圆斑以外环绕有若干暗红色条带状图形，这些条带的颜色较暗。

2. 观察并总结各元件缝宽（或直径）变化时衍射图样的变化规律

单缝：中央主极大宽度随单缝缝宽减小而增大。

双缝：各条相邻亮纹、缺级之间的距离随双缝间距的减小而增大。

# 实 验 报 告

评分:

少年班学院 系 20 级

学号 \*\*\*\*\*

姓名 \*\*\*\*\*

日期 2021-4-13

小孔：光斑直径随小孔直径增大而变小。

## 二、提升实验

### (1) 光学元件的位置

衍射元件位置：底座左右两端坐标为 52.60cm、56.60cm；

CCD 镜头位置：底座左右两端坐标为 84.92cm、88.92cm；

CCD 镜头凸出：2cm

### (2) 单缝衍射实验

实验序号	单缝标定 宽度/mm	各级暗条纹、主极大位置/mm						
		-3	-2	-1	主极大	1	2	3
1	0.05	3.321	7.042	10.989	14.866	18.751	22.501	超量程
2	0.1	9.499	11.396	13.332	15.249	17.149	19.118	21.088
3	0.2	11.840	12.814	13.790	14.754	15.709	16.653	17.606

### (2) 双缝衍射实验

实验序号	双缝标定 间距/mm	各级亮条纹位置/mm						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
1	0.2	缺级	12.282	13.110	13.833	14.602	15.353	缺级
2	0.3	缺级	12.582	13.230	13.880	14.524	15.144	缺级
3	0.45	14.964	15.393	15.818	16.249	16.668	17.111	17.531

## 三、进阶实验

其他衍射原件的观察结果：

### (1) 不同形状小孔的衍射图像

圆形：中央形成一个大而亮的圆形光斑，周围有围绕的光环，颜色较暗，从中心向外围亮度递减。

正方形：中间形成一个圆角方形亮斑，且周围向对称的四个方向有暗的



# 实 验 报 告

评分:

少年班学院 系 20 级

学号 \*\*\*\*\*

姓名 \*\*\*\*\*

日期 2021-4-13

衍射斑，从中心向外亮度依次递减。

矩形：衍射形成椭圆形的中央亮斑，向四个方向有较暗的衍射斑，且沿长轴方向衍射亮斑较小、沿短轴方向较大，从中心向外亮度依次递减。

三角形：中间形成一个圆亮斑，并且朝六个对称的方向有暗衍射斑，从中心向四周亮度递减。

## (2) 光栅的衍射图样

每个光栅均呈现密集的竖条纹，排列均匀，且每条条纹呈现中间亮而两边暗的特征。光栅的  $d$  值越小，条纹间间距越大。

## (3) 细铁丝的衍射图样

衍射图样中，中央形成强亮斑，亮斑中央有两条相距很近的平行的细的暗线，将其分为三个亮斑，中间小而两边大。垂直于暗线方向有衍射亮斑排列。

## 数据处理：

光学元件：经计算，光路中的  $L$  长度为  $L=30.32\text{cm}=0.3032\text{m}$ 。

### 一、单缝衍射：

实验序号	单缝标定 宽度/mm	各级之间的位置差/mm						平均数 /mm	展伸不确 定度/mm
		1	2	3	4	5	6		
1	0.05	3.721	3.947	3.877	3.885	3.750	无	3.836	0.119
2	0.1	1.897	1.936	1.917	1.900	1.969	1.970	1.932	0.034
3	0.2	0.974	0.976	0.964	0.955	0.944	0.953	0.961	0.013

因此，计算得到的结果为

$$\Delta x_{k1} = (3.836 \pm 0.119)\text{mm} (P = 0.95)$$

$$\Delta x_{k2} = (1.932 \pm 0.034)\text{mm} (P = 0.95)$$

$$\Delta x_{k3} = (0.961 \pm 0.013) \text{mm} (P = 0.95)$$

分别代入公式

$$a = \frac{\lambda}{\Delta x_k} L \quad (14)$$

算得各单缝宽度为

$$a_1 = \frac{632.8 \times 10^{-9}}{\Delta x_{k1}} \times 0.3032 = (0.05002 \pm 0.00019) \text{mm}$$

$$a_1 = \frac{632.8 \times 10^{-9}}{\Delta x_{k1}} \times 0.3032 = (0.0997 \pm 0.0017) \text{mm}$$

$$a_1 = \frac{632.8 \times 10^{-9}}{\Delta x_{k1}} \times 0.3032 = (0.199 \pm 0.003) \text{mm}$$

相对误差分别为 0.4%、0.3%和 0.5%（对比于标定数据）。

对每组实验数据画出统计图，如下图 1.4 所示，其中 0 表示中央主极大：

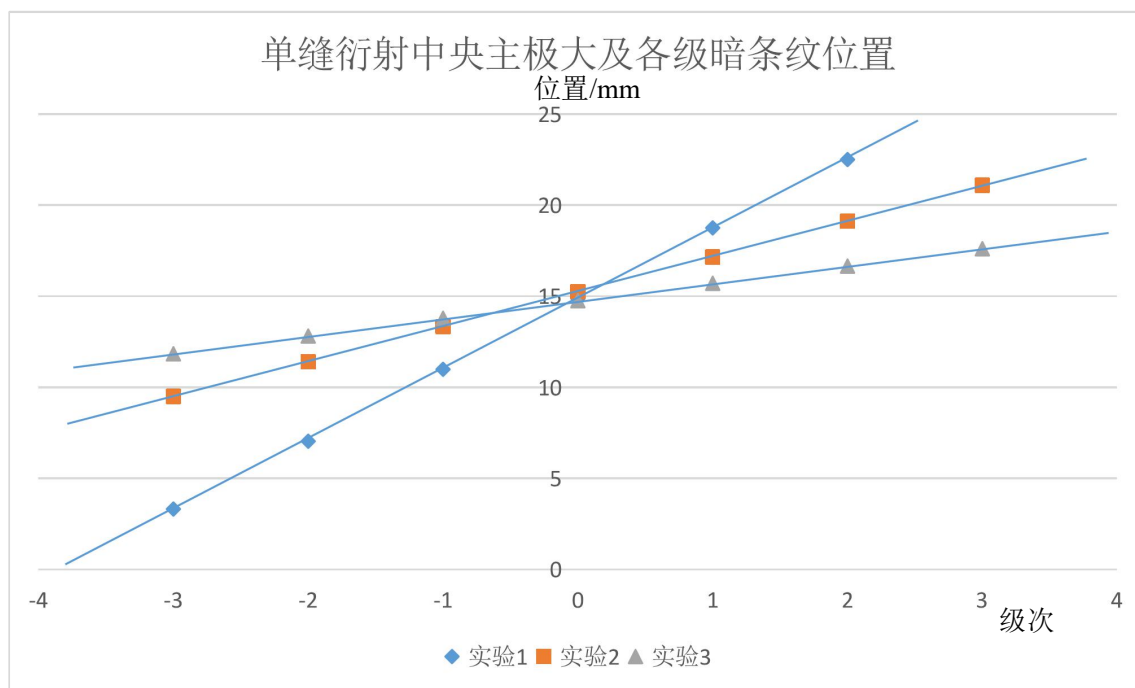


图 1.4 单缝衍射实验各级条纹位置

## 二、双缝衍射

对记录的数据用最小二乘法拟合，其拟合后的理论公式应为：

$$x = \frac{\lambda L}{d} k + x_0 \quad (15)$$

作图为图 1.5:

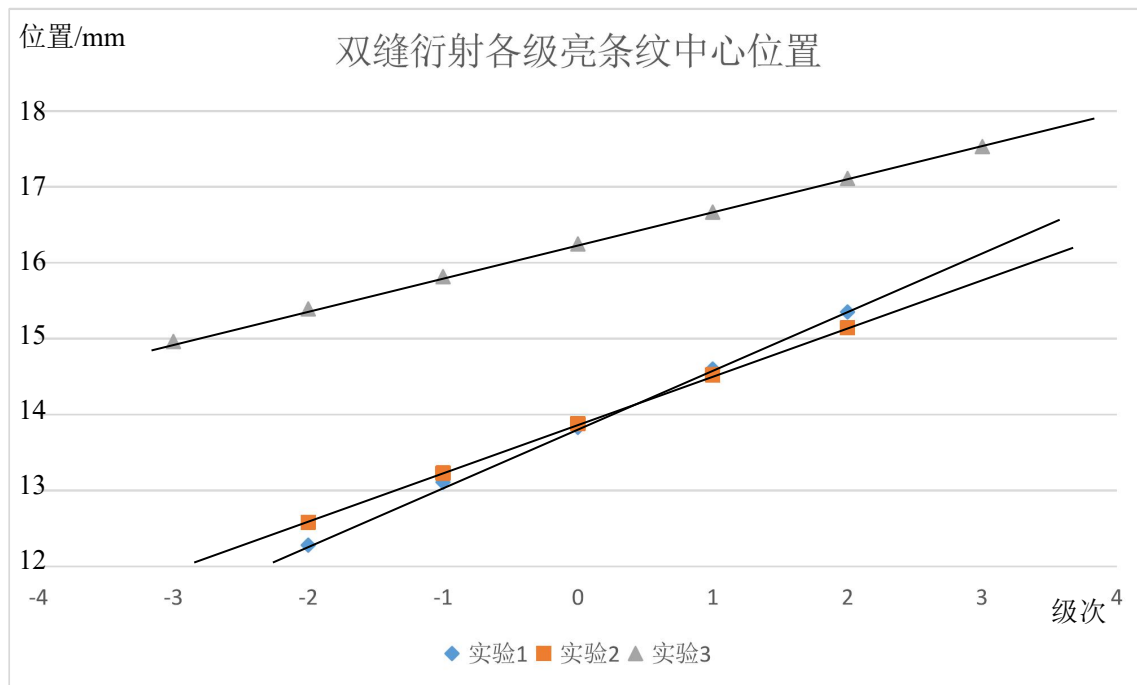


图 1.5 双缝衍射各级亮条纹中心位置

将数据分别代入计算知

$$x_1 = 0.7634k + 13.836, \text{线性相关系数 } r = 0.9998$$

$$x_2 = 0.6418k + 13.872, \text{线性相关系数 } r = 0.9999$$

$$x_3 = 0.4281k + 16.248, \text{线性相关系数 } r = 0.9998$$

由此计算得到双缝的间距, 其中  $a_i (i=1,2,3)$  是每一组实验的线性回归系数:

$$d_1 = \frac{\lambda L}{a_1} = 0.2513 \text{ mm}, \quad d_2 = \frac{\lambda L}{a_2} = 0.2989 \text{ mm}, \quad d_3 = \frac{\lambda L}{a_3} = 0.4481 \text{ mm}$$

其相对误差分别为 25.7%, 0.36% 和 0.42%; 由此合理推测, 标定数据为 0.2mm 的单缝标注错误, 应该为 0.25mm, 这样其相对误差为 0.52%, 数据合理。

## 思考题

1. 答: 如果小孔比较大, 则仅仅出现一个光斑; 当小孔比较小时出现一个夫

# 实 验 报 告

评分:

少年班学院 系 20 级

学号 \*\*\*\*\*

姓名 \*\*\*\*\*

日期 2021-4-13

琅禾费小孔衍射图案。如果是不同颜色的光，则其衍射条纹将有不同色光分布。根据公式（12）结合小孔到衍射屏的距离  $L$  可以计算出临界直径：

$$D = \sqrt{1.22\lambda L} \quad (16)$$

该  $D$  值为是否呈现夫琅禾费衍射图案的转折点。

2.答：中间形成白色亮条纹，两边不均匀地分布不同颜色的彩条纹。因为白光是由不同色光混合而成，在这里会分别成像。

3.答：这个图像类似于各种衍射图样的叠加。LED 射灯发出的光由不同色光混合而成，照在手机屏幕时，由于手机屏幕内部有小孔等光学结构，且屏幕本身是透明的可以发生折射的物质，因此光在手机屏幕透明层里多次折射和衍射，这样可以形成这种状态。