



大学物理-基础实验 | 实验报告

姓名 王嘉璐
学号 PB21051167
班级 21 级 209 院 05 班 (工程科学学院 5 班)
日期 2022 年 5 月 5 日

衍射实验[†]

1 实验目的

1. 对光学实验形成感性的认知，掌握组装、调整衍射实验光路的方法。
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，包括单缝的缝宽和双缝中心间距。
4. 观察、分析多种元件的衍射图样，研究如何利用光的衍射测量弹簧的参数。

2 实验原理

波在传播方向上遇到障碍物时，能够偏离直线传播而绕过障碍物的边缘前进，这种物理现象称为衍射。当光源和接收屏都距离衍射屏无限远（或相当于无限远）时，在接收屏处由光源及衍射屏产生的衍射为夫琅禾费衍射，此时，入射光和衍射光都是平行光。

2.1 单缝夫琅禾费衍射

本实验使用 He-Ne 激光器作为光源，利用激光优异的方向性使光源距离衍射屏无限远；同时使观察屏远离狭缝，由于狭缝的宽度远小于缝到屏的距离，使光源距离衍射屏相当于无限远，光路如图 1.1.1 所示。

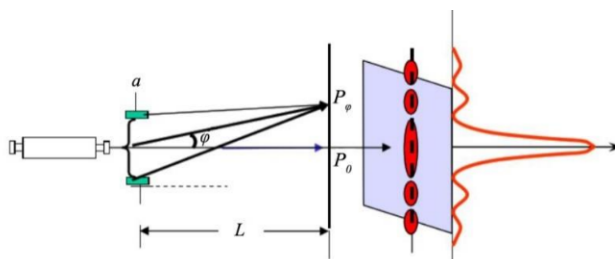


图 1.1.1 单缝衍射光路图

从光源发出的平行光束垂直照射到狭缝上时，在观察屏上会形成一组明暗相间的条纹，这就是单缝夫琅禾费衍射现象。根据惠更斯—菲涅尔原理，其光强分布可计算为

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

式中， a 为单缝的宽度， I_0 为入射光光强， φ 为衍射光与光轴的夹角即衍射角。

当

$$a \sin \varphi = k \lambda, \quad k = \pm 1, k = \pm 2, k = \pm 3, \dots$$

[†]本报告由王嘉璐撰写，存在一定不足，仅供参考。如需了解不足、获取最新版本，请访问我的主页 home.ustc.edu.cn/~luiswang。

时, $I_\varphi = 0$, 即为暗条纹。与此衍射角对应的位置为暗条纹的中心。由于 φ 很小, 可近似 $\sin\varphi = \tan\varphi = x/L$, L 为衍射屏与观察屏的距离, 则

$$a \frac{x_k}{L} = k\lambda \quad (2)$$

式中, x_k 为第 k 级暗条纹距离中央亮条纹中心的距离。因此, 测出一系列 x_k 的值, 即可计算单缝缝宽 a 。

2.2 双缝夫琅禾费衍射

将图 1.1.1 中的单缝换成双缝, 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 $d = a + b$, 光路如图 1.1.2 所示。

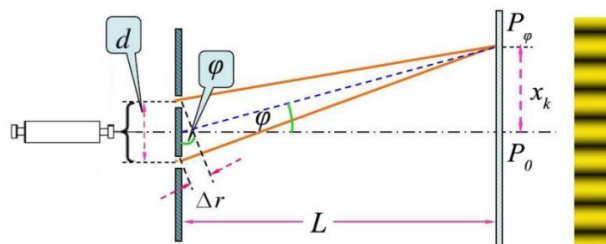


图 1.1.2 双缝衍射光路图

根据惠更斯—菲涅尔原理, 其光强分布可计算为

$$I_\varphi = 4I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2 \sin^2 v, \quad u = \pi a \frac{\sin\varphi}{\lambda}, \quad v = \pi d \frac{\sin\varphi}{\lambda} \quad (3)$$

经如上计算, 相邻暗条纹间距 Δx 为

$$\Delta x = \lambda \frac{L}{d} \quad (4)$$

因此, 测出一系列暗条纹位置, 即可计算双缝中心间距 d 。

2.3 圆孔夫琅禾费衍射

将图 1.1.1 中的单缝换成小孔, 由于光的波动性, 光通过小孔会发生衍射, 产生明暗相间的条纹衍射图样, 条纹间距随小孔尺寸的减少而变大。大约有 84% 的光能量集中在中央亮斑, 其余 16% 的光能量分布在各级明环上。衍射图样的中心区域有最大的亮斑, 称为艾里 (Airy) 斑。

3 实验仪器

光学导轨及附件, He-Ne 激光器 (632.8nm) 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。

4 测量记录

参见“附件: 原始数据”。

5 分析与讨论

5.1 基础实验

5.1.1 衍射图样的特点

单缝衍射的图样为明暗相间的平行条纹, 中央为亮条纹, 其宽度、亮度均最大; 其余亮、暗条纹在两侧呈对称分布, 宽度均为中央亮条纹的一半, 距中央越远的亮条纹亮度越小, 如图 5.1.1.1 所示。

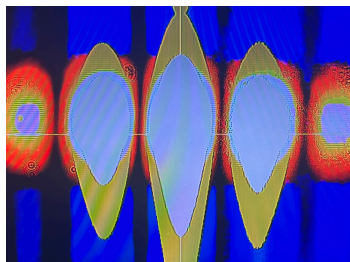


图 5.1.1.1 单缝衍射图样

双缝衍射的图样为明暗相间的平行条纹，中央为亮条纹，其宽度、亮度均最大；其余亮、暗条纹在两侧呈对称分布，亮条纹随着与中央的距离增大而亮度逐渐衰减，发生周期性的缺级现象，如图 5.1.1.2 所示。

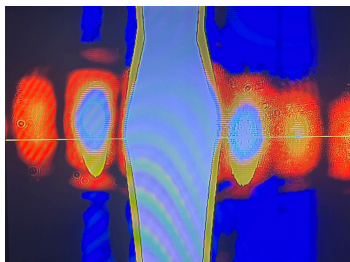


图 5.1.1.2 双缝衍射图样

小孔衍射的图样为中央出现亮圆斑、外侧出现明暗相间的同心圆环，距中央越远的亮圆环亮度、宽度越小，如图 5.1.1.3 所示。

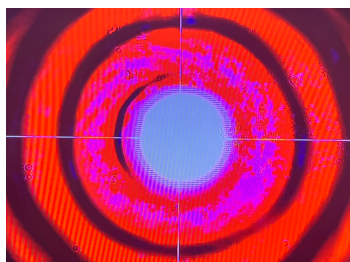


图 5.1.1.3 小孔衍射图样

5.1.2 衍射图样的变化规律

单缝衍射的图样随缝宽增大，各级条纹向中央收缩，即条纹宽度减小，如图 5.1.2.1 所示。

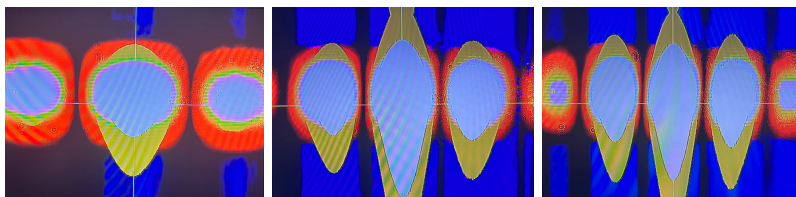


图 5.1.2.1 单缝衍射图样随缝宽增大的变化规律

双缝衍射的图样随双缝中心间距增大，各级条纹向中央收缩，即条纹宽度减小，如图 5.1.2.2 所示。

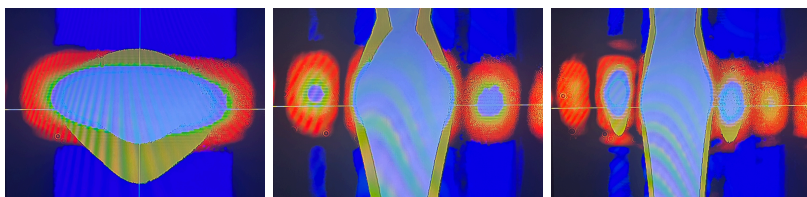


图 5.1.2.2 双缝衍射图样随双缝中心间距增大的变化规律

小孔衍射的图样随孔径增大，圆斑直径减小、各圆环内外径和宽度均减小，如图 5.1.2.3 所示。

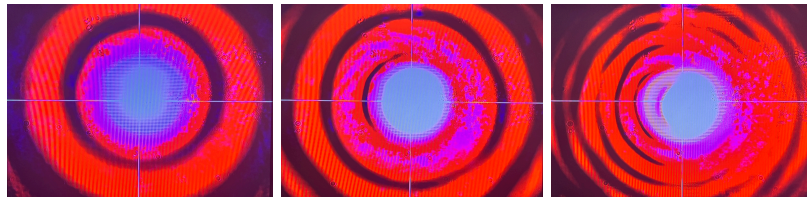


图 5.1.2.3 小孔衍射图样随孔径增大的变化规律

5.2 提升实验

5.2.1 计算单缝缝宽

1. 数据处理

根据式 (2), 有

$$x_k = \frac{\lambda L}{a} k$$

其中, $L = 31.00\text{cm}$ 。利用单缝衍射中观察、记录的数据, 以 k 为自变量 X 、 x_k 为因变量 Y , 处理所得原始数据, 结果如表一。

表一 单缝衍射中 x_k-k 系列数据

x_k/mm	-8.006	-5.974	-4.028	-2.025	0	2.070	4.069	6.065	8.025
x	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4

将以上数据导入 Origin, 利用线性拟合功能, 得到图 5.2.1.1 与图 5.2.1.2。

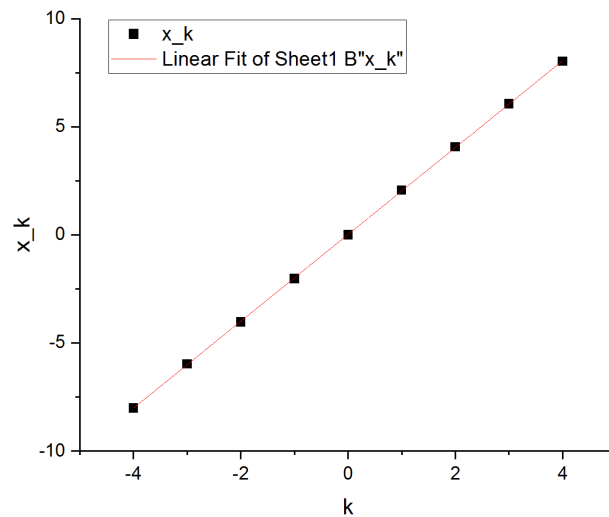


图 5.2.1.1 单缝衍射中 x_k 与 k 的关系

Equation	$y = a + b*x$
Plot	x_k
Weight	No Weighting
Intercept	0.02178 ± 0.01104
Slope	2.00883 ± 0.00428
Residual Sum of Squares	0.00768
Pearson's r	0.99998
R-Square (COD)	0.99997
Adj. R-Square	0.99996

图 5.2.1.2 单缝衍射中 x_k 与 k 经最小二乘法拟合的结果

因此，斜率为 $m = 2.009mm$ 。所以单缝缝宽的测量值为

$$a = \frac{\lambda L}{m} = \frac{632.8 \times 31.00 \times 10^{-3}}{2.009} \mu m = 97.6 \mu m$$

2. 误差分析

根据单缝缝宽的真实值 $a_0 = 100 \mu m$ ，可知相对误差为

$$\Delta = \frac{|a - a_0|}{a_0} \times 100\% = \frac{|97.6 - 100|}{100} \times 100\% = 2.40\%$$

3. 实验讨论

在实验设计上，使用了 $\sin\varphi = \tan\varphi = x/L$ 进行近似处理，产生系统误差。在实验操作上，判断暗条纹位置时，由生理、心理因素导致的系统误差较大；使用千分尺测量位置时，由环境因素导致微小的偶然误差。

5.2.2 计算双峰中心间距

1. 数据处理

根据式 (4)，有

$$x_k = \frac{\lambda L}{d} k + x_0$$

其中， $L = 31.00cm$ ， k 在这里代表暗条纹的序号而非级数（考虑到暗条纹无 0 级）， x_0 为待定常数。利用双缝衍射中观察、记录的数据，去除缺级的数据，将级数改为序号，以 k 为自变量 X 、 x_k 为因变量 Y ，处理所得原始数据，结果如表二。

表二 双缝衍射中 x_k-k 系列数据

x_k/mm	6.031	7.319	8.559	9.859	11.158	12.528	13.732	15.019
x	1	2	3	4	5	6	7	8

将以上数据导入 Origin，利用线性拟合功能，得到图 5.2.2.1 与图 5.2.2.2。

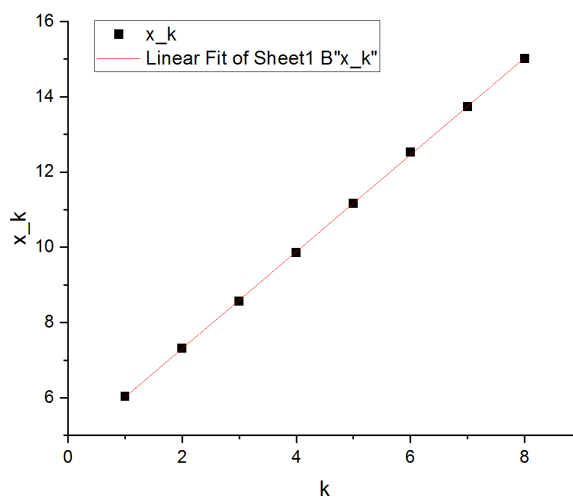


图 5.2.2.1 双缝衍射中 x_k 与 k 的关系

Equation	$y = a + b \cdot x$
Plot	x_k
Weight	No Weighting
Intercept	4.72989 ± 0.02765
Slope	1.28794 ± 0.00548
Residual Sum of Squares	0.00756
Pearson's r	0.99995
R-Square (COD)	0.99989
Adj. R-Square	0.99987

图 5.2.2.2 双缝衍射中 x_k 与 k 经最小二乘法拟合的结果

因此，斜率为 $M = 1.288mm$ 。所以双缝中心间距的测量值为

$$d = \frac{\lambda L}{M} = \frac{632.8 \times 31.00 \times 10^{-3}}{1.288} \mu m = 152.3 \mu m$$

2. 误差分析

根据单缝缝宽的真实值 $d_0 = 150 \mu m$ ，可知相对误差为

$$\delta = \frac{|d - d_0|}{d_0} \times 100\% = \frac{|152.3 - 150|}{150} \times 100\% = 1.53\%$$

3. 实验讨论

参考计算单缝缝宽的实验讨论。

5.3 进阶实验-不同元件的衍射图样

5.3.1 光栅

1. 一维光栅

一维光栅的衍射图样为一维光点阵列，中心光点最亮，其余光点随着与中心光点距离增大亮度衰减，如图 5.3.1.1 所示。

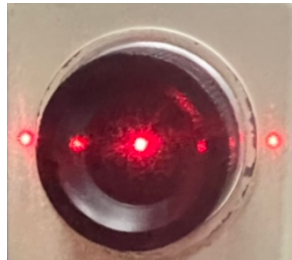


图 5.3.1.1 一维光栅衍射图样

2. 二维光栅

二维光栅的衍射图样为二维光点阵列，中心光点最亮，其余光点随着与中心光点距离增大亮度衰减，如图 5.3.1.2 所示。



图 5.3.1.2 二维光栅衍射图样

5.3.2 细丝

细丝的衍射图样与单缝衍射图样相似，为明暗相间的平行条纹，中央为亮条纹，两侧条纹对称分布，亮度随与中央距离增大而衰减。

5.4 高阶实验-测量弹簧参数

5.4.1 理论分析

激光束照射弹簧可先、后照到两小段倾斜的钢丝，沿光束方向看，两段钢丝呈现交叉状，分别产生与单缝衍射相同的条纹，两段钢丝间的夹角与两组单缝衍射条纹中点连线间的夹角相等，设其为 ϕ 。

钢丝的直径和相邻平行钢丝的间距可通过衍射条纹的细节结构计算得到。可以看到，衍射条纹有一种长空间周期 Δx_1 和一种短空间周期 Δx_2 ，分别对应钢丝的衍射条纹和相邻钢丝间空隙的衍射条纹。

根据式 (2)，可知，单缝衍射中相邻暗条纹间距为 Δx ，则缝宽为

$$a = \lambda \frac{L}{\Delta x}$$

又根据巴比涅定理，这一关系同样适用于钢丝衍射，因此，弹簧钢丝直径 d_1 与弹簧相邻平行钢丝的间距 d_2 分别为

$$d_1 = \lambda \frac{L}{\Delta x_1} \quad (5)$$

$$d_2 = \lambda \frac{L}{\Delta x_2} \quad (6)$$

设弹簧节距为 p ，弹簧圈外径为 D ，由几何关系，并考虑到弹簧钢丝直径的影响，有

$$\frac{d_1 + d_2}{p} = \cos \frac{\phi}{2} \quad (7)$$

$$\frac{d_1 + d_2}{2\pi \frac{D-d_1}{2}} = \sin \frac{\phi}{2} \quad (8)$$

5.4.2 数据处理

根据弹簧衍射中观察、记录的数据， $L = 31.00\text{cm}$ ，长、短空间周期分别为

$$\Delta x_1 = \frac{3.789 - 0.389}{5} \text{mm} = 0.68\text{mm}, \quad \Delta x_2 = \frac{10.661 - 10.159}{4} \text{mm} = 0.126\text{mm}$$

为了得到弹簧衍射图样中两直线夹角，对图 5.4.2.1 所示的原始照片进行复原处理，使得图中镜头盖边缘变成标准圆，即可抵消拍摄角度带来的误差。此时，如图 5.4.2.2 所示，可算得该夹角为

$$\phi = 42.4^\circ$$



图 5.4.2.1 弹簧衍射总体图样

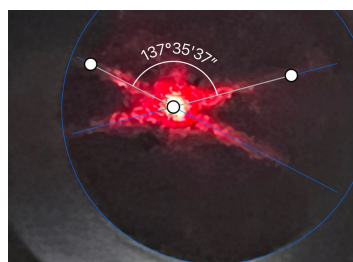


图 5.4.2.2 经处理的弹簧衍射总体图样

由式 (5), 弹簧钢丝的直径为

$$d_1 = \lambda \frac{L}{\Delta x_1} = 632.8 \times \frac{31.00}{0.68} \times 10^{-5} \text{mm} = 0.29 \text{mm}$$

由式 (6), 弹簧相邻平行钢丝的间距为

$$d_2 = \lambda \frac{L}{\Delta x_2} = 632.8 \times \frac{31.00}{0.126} \times 10^{-5} \text{mm} = 1.56 \text{mm}$$

由式 (7), 弹簧的节距为

$$p = \frac{d_1 + d_2}{\cos \frac{\phi}{2}} = \frac{0.29 + 1.56}{\cos \frac{42.4^\circ}{2}} \text{mm} = 1.98 \text{mm}$$

由式 (8), 弹簧圈的外径为

$$D = \frac{d_1 + d_2}{\pi \sin \frac{\phi}{2}} + d_1 = \frac{0.29 + 1.56}{3.1416 \times \sin \frac{42.4^\circ}{2}} + 0.29 \text{mm} = 1.92 \text{mm}$$

5.4.3 实验讨论

由于缺乏弹簧参数的真实数据, 无法进行误差分析, 仅从实验设计上做讨论, 关于实验操作的讨论可以参考 5.2.2。

其一是夹角 ϕ 的测量。由于 CCD 图像范围较小, 无法利用其完成对夹角的测量, 只能拍摄镜头盖上的衍射图样以测量夹角。又由于拍摄时为避免遮挡激光束, 选择以一定角度从侧面拍摄衍射图样并进行后期拉伸处理以抵消角度带来的误差。实际上, 后期处理无法完全恢复衍射图样, 作为参考标准的镜头盖边缘仅能做到近似为圆, 在最大程度上减小误差。因此, 夹角 ϕ 的测量对弹簧的节距、弹簧圈的外径产生不确定的误差。

其二是长、短空间周期 Δx_1 、 Δx_2 的测量。由于弹簧衍射图样由两组图样交叉组合形成, 两者都存在一定的倾斜角度, 无法直接使用千分头测量, 选择在弹簧一侧下方垫一定厚度的纸, 使得其中一组图样近似水平。但是, 这样无法确保图样完全水平, 可能存在微小倾斜角度, 使得 Δx_1 、 Δx_2 的值偏小, 所以弹簧参数的值均可能偏小。

6 思考题

6.1 当光通过一个小孔时, 在后面的光屏上会得到什么样的图案?

当小孔很大或小孔不太大、光源与小孔距离很小时, 由于光沿直线传播的特点, 光屏上出现与小孔形状相同的亮斑; 当小孔不太大、光源与小孔距离合适时, 会产生小孔成像的现象; 当小孔很小、其尺度与光的波长相近时, 会产生衍射现象。

6.2 白光照射到狭缝上, 衍射条纹有什么特点?

中央为白色亮纹, 宽度、亮度均最大; 两侧为彩色亮纹、呈对称分布, 随着与中央距离增大, 宽度、亮度均变小。

6.3 LED 射灯照到手机屏幕时可观察到图 6.3 的现象, 解释其原因。

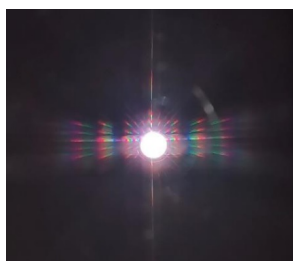


图 6.3 LED 射灯照到手机屏幕时产生的现象

根据实验“显微镜的使用”中观察手机屏幕得到的现象, 可知屏幕上的像素点排列是规律的、呈周期性的, 这使得屏幕形成了类似二维光栅的结构, 所以光照射屏幕时会发生衍射, 效果如图 5.3.1.2 所示。

由于 LED 射灯的发光指向性非常强, 照在屏幕上很容易发生衍射。从图中可以看出, 它的光为白光, 由多种色光混合而成, 这些不同的光具有不同的波长, 产生的衍射图样间距不同, 众多图样重叠在一起, 产生了图中的现象。

附件

原始数据