

文章编号:1005-4642(2021)09-0060-04

## 圆孔衍射中心显现亮暗斑的实验设计与实施

王 雁<sup>1</sup>, 郝 辉<sup>2</sup>

(1. 沈阳市第二中学, 辽宁 沈阳 110016; 2. 抚松县第一中学, 吉林 白山 134500)

**摘 要:**根据半波带法的理论推导,发现了在圆孔衍射实验中难以观察到衍射图样中心为暗斑的原因,并利用几何画板软件进行了模拟实验,快速找出了合理的实验参量. 根据这些参量,采用简单的实验器材在课堂上为学生演示出了丰富的衍射现象.

**关键词:**圆孔衍射;半波带;亮斑;暗斑

**中图分类号:**G633.7

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.09.011

《高中物理课程标准》对光的波动性要求是:观察光的干涉、衍射和偏振现象,掌握这些现象产生的条件,了解其在生产生活中的应用<sup>[1]</sup>. 学生生活中对光的直线传播、反射、折射的现象已深有体会,但是对光的波动性引起的干涉、衍射等现象非常陌生. 泊松亮斑是较为典型的由光的波动性引起的衍射现象<sup>[2]</sup>,高中物理教材对此也有一定的介绍. 其中《普通高中教科书·物理》(选择性必修第一册)<sup>[3]</sup>中“黑暗中心的光明”现象引起了师生的极大兴趣,然而“光明中心的黑暗”现象却往往被忽视,这导致很多师生没有见过圆孔衍射图样中心斑点为暗斑的现象. 在衍射实验教学过程中,教师通过移动光屏能够让学生观察到衍射图样中心出现忽亮忽暗的现象,该现象对于学生认识光的波动性具有重要意义. 基于以上情况,本文对圆孔衍射进行理论分析和参量对比,采用简单的实验器材在课堂上为学生演示出了丰富的衍射现象.

### 1 实验原理

圆孔衍射现象是在点光源(或激光束)的照明空间中插入带圆孔的衍射屏,接收屏幕上出现亮暗相间的互为同心圆的衍射条纹图样,中心斑点可能是亮的(亮斑),也可能是暗的(暗斑),该现象可利用半波带法来解释.

取波前  $\Sigma$  作为以点光源  $S$  为球心的球面(等相面),设其半径为  $R$ ,其顶点  $O$  与场点  $P_0$  的距离为  $b$ ,以  $P_0$  为中心,分别以  $b+\lambda/2, b+\lambda, b+3\lambda/2, b+2\lambda, \dots$  为半径做球面,其中  $\lambda$  为光的波长. 将波前  $\Sigma$  分割为一系列环形带,分隔点为  $M_1, M_2, M_3, \dots$ ,其中  $M_1, M_2, M_3, \dots$  到  $P_0$  的光程逐次相差半个波长,故将此环形带称作半波带,如图 1 所示<sup>[4]</sup>. 根据计算,可得到第 1 个半波带的半径为

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{Rb\lambda}{R+b}}, \quad (1)$$

第  $k$  个半波带的半径为<sup>[4]</sup>

$$\rho_k = \sqrt{\frac{Rbk\lambda}{R+b}} = \sqrt{k}\rho_1, k=1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

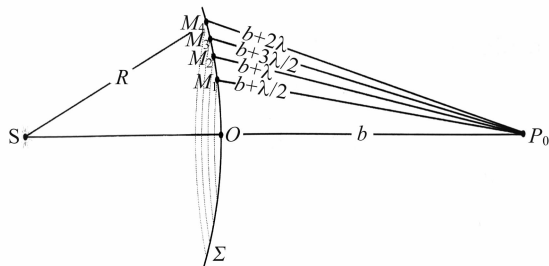


图 1 半波带法的光线示意图

在波前  $\Sigma$  处放置带圆孔的衍射屏. 一般来说,当该圆孔包含奇数个半波带时,衍射图样中心

收稿日期:2021-07-01;修改日期:2021-07-30

作者简介:王 雁(1973-),女,辽宁沈阳人,沈阳市第二中学高级教师,学士,从事中学物理教学. E-mail:1198725421@qq.com



为亮斑;包含偶数个半波带时,衍射图样中心为暗斑。

根据式(2)可得出

$$b = \frac{R_d \rho_k^2}{kR\lambda - \rho_k^2}, k=1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

令圆孔半径  $R_d = \rho_k$ , 则  $\rho_k$  可通过测量孔径得到, 再代入式(3)即可求出衍射图样中心出现暗斑与亮斑时对应的接收屏位置  $b$ 。  $k$  取偶数时, 求得的  $b$  值对应的是衍射图样中心为暗斑时接收屏的位置;  $k$  取奇数时, 求得的  $b$  值对应的是衍射图样中心为亮斑时接收屏的位置。

根据式(3)可知,  $k$  越小,  $b$  越大, 由于  $b$  为正数, 因此  $k$  有最小值。当  $k$  取最小正整数时, 可得到  $b$  的最大值。该最大值的意义是: 在控制  $\lambda$  和  $R_d$  不变时,  $b_{\max}$  以外位置的衍射图样中心不会有亮暗变化, 即观察衍射图样中心有亮暗变化的范围需小于  $b_{\max}$ 。另外, 若接收屏距离圆孔太近, 即小于 1 m 时, 接收屏上的衍射图样直径小、亮度高, 导致人眼很难分辨图样中心的亮暗。因此, 人眼能够清晰观察到衍射图样中心亮暗变化的孔屏距离范围是  $1 \sim b_{\max}$ 。通常, 人们习惯选择  $R_d < 1$  mm 的圆孔, 此时, 计算出的  $b_{\max} < 1$  m, 根据上述分析可知该范围难以观察到衍射图样中心的亮暗变化。因此, 在课堂上的演示实验过程中, 若让学生能够较明显地观察到衍射图样中心亮暗变化的现象, 须合理选择参量的大小。

## 2 实验参量探究

对圆孔半径  $R_d$ 、光源到圆孔的距离  $R$  与接收屏位置  $b$  的关系进行探究。

### 2.1 圆孔半径 $R_d$ 与接收屏位置 $b$ 的关系

根据理论分析结果, 利用几何画板软件, 通过改变  $R_d$  的大小对圆孔衍射现象进行模拟实验。设光源  $S$  到圆孔的距离  $R = 0.38$  m, 激光波长  $\lambda = 623.8$  nm, 亮(暗)斑位置可通过  $R_d$  和  $k$  来确定, 实验数据如表 1 所示。考虑衍射图样不能太小, 且亮度不能过高, 因此须满足  $b_{\max} > 1$  m。结合表 1 中数据, 若想要较明显地观察到衍射图样中心亮暗变化的现象, 则当  $R_d = 1.17$  mm 时, 须在距离圆孔  $0.99 \sim 9.75$  m 范围内移动接收屏; 当  $R_d = 1.50$  mm 时, 须在距离圆孔  $1.44 \sim 7.10$  m 范围内移动接收屏; 当  $R_d = 2.50$  mm 时, 须在距离圆孔  $3.80 \sim 15.80$  m 范围内移动接收屏。

表 1 不同  $R_d$  时, 几何画板模拟出的亮(暗)斑位置

$R_d/\text{mm}$	$k$	$b/\text{m}$	衍射图样中心的亮暗
1.17	6	9.75	暗斑
1.17	7	1.79	亮斑
1.17	8	0.99	暗斑
1.50	10	7.10	暗斑
1.50	11	2.39	亮斑
1.50	12	1.44	暗斑
2.50	27	15.80	亮斑
2.50	28	6.13	暗斑
2.50	29	3.80	亮斑

### 2.2 光源到圆孔距离 $R$ 与接收屏位置 $b$ 的关系

当圆孔半径  $R_d = 2.50$  mm,  $\lambda = 623.8$  nm, 改变  $R$  的大小, 利用几何画板软件对圆孔衍射现象进行模拟实验, 模拟数据如表 2 所示, 可以看出  $R$  变化 1 cm, 衍射图样中心的亮(暗)斑位置则有较大变化, 并且光源到孔距离越近(即  $R$  越小), 同一  $k$  值对应的接收屏位置就越远( $b$  越大)。因此教师在课堂上进行演示实验时, 一般选择  $R = 0.38 \sim 0.39$  m, 对应接收屏的位置在 4 m 左右, 此时学生能够较明显地观察到衍射图样中心亮暗交替的有趣现象。

表 2 不同  $R$  时, 几何画板模拟出的亮(暗)斑位置

$R/\text{m}$	$b/\text{m}$	
	$k=28$ (暗斑)	$k=29$ (亮斑)
0.39	4.34	3.03
0.38	6.13	3.80
0.37	10.88	5.22
0.36	59.36	8.57

## 3 实验方法

实验器材: 氦氖激光演示仪( $\lambda = 623.8$  nm)、铁架台(2个)、带圆孔的钢板尺、凸透镜、双面胶带、卷尺、接收屏(贴有白纸的木板)。

实验步骤为:

- 1) 按图 2 放置实验仪器(接收屏除外)。
- 2) 调整激光演示仪和凸透镜, 使二者之间的水平距离约为 1 m, 且光束能够垂直穿过凸透镜的中心。
- 3) 将接收屏放置在凸透镜与圆孔尺之间, 移动接收屏, 观察接收屏上光斑的变化, 当光斑会聚

成最小最亮的点时,标记此时位置作为等效点光源  $S'$  的位置.

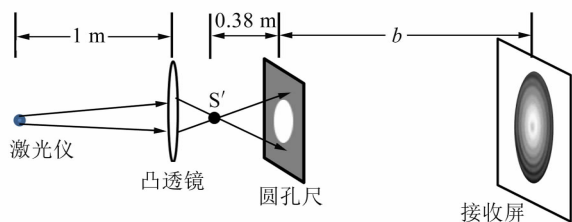


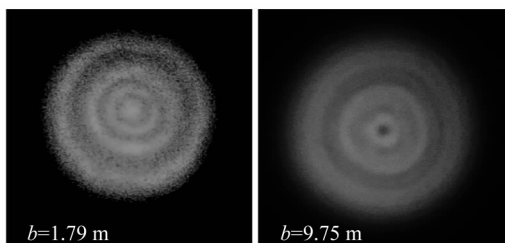
图 2 实验装置示意图

4) 将接收屏放置在图 2 所示位置,在圆孔尺上选择一孔,用双面胶封上其他孔. 调整圆孔尺,使尺孔与等效点光源  $S'$  之间的水平距离为 0.38 m,且光束垂直于尺面,保证光束中心与尺孔中心重合,并满足光束的半径大于圆孔半径.

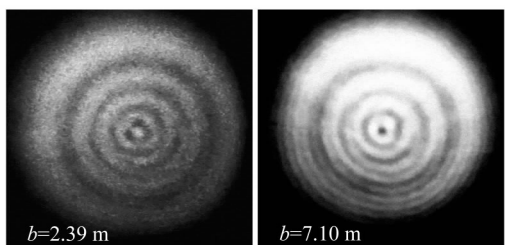
5) 参考表 1 中的位置,移动接收屏,观察衍射图样中心亮暗交替的现象.

6) 改变不同孔径,重复实验步骤 1)~5),观察衍射图样中心亮暗交替的现象.

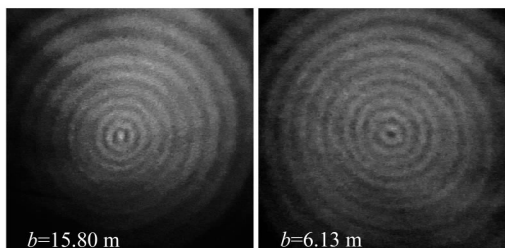
衍射图样如图 3 所示.



(a)  $R_d = 1.17 \text{ mm}$



(b)  $R_d = 1.50 \text{ mm}$

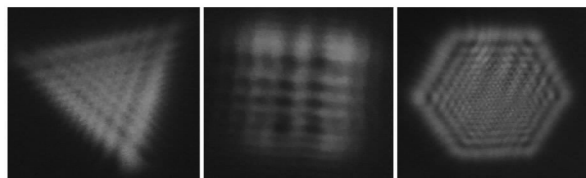


(c)  $R_d = 2.50 \text{ mm}$

图 3 接收屏不同位置及不同孔径情况下的衍射图样

#### 4 孔形状对衍射图样的影响

上文分析都是在圆形孔的条件下进行的探究,当孔的形状不是圆形,而是三角形、矩形或六边形时,衍射图样是否依然会出现圆形光斑呢? 本文根据该问题进行了拓展探究,即将圆形孔分别换成边长为 2 mm 的三角形、矩形和六边形的孔,得到如图 4 所示的衍射图样. 从图 4 中可以看出三角形、矩形和六边形的孔分别呈现出与它们形状相同的衍射图样,这说明孔的形状决定了衍射图样的边界形状.



(a) 三角形 (b) 矩形 (c) 六边形

图 4 不同形状孔的衍射图样

有师生猜想上述现象可能与孔径较大有关,为探究该问题,本文选取不同边长的三角形孔进行了拓展实验,得到如图 5 所示的衍射图样. 从图 5 可以看出,当边长  $a = 2 \text{ mm}$  时,衍射图样的边界亮而清晰,衍射条纹与边界平行,宽度较窄,边界形状与孔的形状一致;当边长  $a = 0.5 \text{ mm}$  时,衍射图样的边界变得模糊,中心处更亮,衍射条纹变宽,边界形状与孔的形状相近. 因此,衍射图样与孔的形状及大小都有关系.

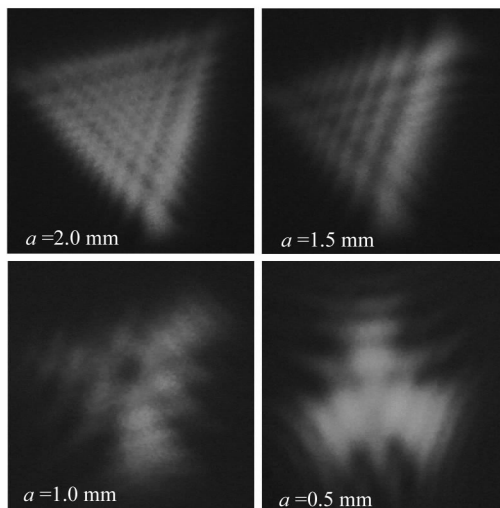


图 5 边长逐渐减小的三角形孔的衍射图样

## 5 结束语

本文通过实验原理分析和理论公式推导深化了物理学科素质教育,培养了学生科学推理、科学论证、质疑创新等物理学科核心素养。在课堂上的演示实验过程中,学生参与了实验的全过程,在不同孔径和不同孔形条件下,观察到了丰富多样的衍射图样,直观地体验了由光的波动性引起的衍射现象。该演示实验激发了学生对探究科学知识的兴趣和热情,培养了学生的创造力,并全面提升了学生的科学探究素养。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017年版2020年修订)[S]. 北京:人民教育出版社,2020:26.
- [2] 姚启钧. 光学教程[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2002:104.
- [3] 人民教育出版社,课程教材研究所,物理课程教材研究开发中心. 普通高中教科书·物理(选择性必修第一册)[M]. 北京:人民教育出版社,2018:100.
- [4] 赵凯华. 新概念物理教程·光学[M]. 北京:高等教育出版社,2014:175-177.

# Experimental design and implementation of bright and dark spots in the center of circular hole diffraction

WANG Yan<sup>1</sup>, BING Hui<sup>2</sup>

(1. Shenyang No. 2 High School, Shenyang 110016, China;

2. Fusong No. 1 High School, Baishan 134500, China)

**Abstract:** In the circular hole diffraction experiment, it is difficult to observe the experimental phenomenon if a dark spot is in the center of the diffraction pattern, and the reason could be found by the theoretical derivation of the half-wave strip method. By using the Geometer Sketchpad software to carry out a simulation experiment, the reasonable experimental parameters were quickly found. Based on these parameters and using some simple experimental equipment, a wealth of diffraction phenomena could be demonstrated in the classroom.

**Key words:** circular hole diffraction; half-wave strip; bright spot; dark spot

[责任编辑:郭 伟]

## 欢迎订阅 欢迎投稿

《物理实验》是由教育部主管、东北师范大学主办的学术期刊,是教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会会刊,是中国高等学校实验物理教学研究会副秘书长单位,是高等学校物理演示实验教学研究会常务理事单位。本刊宗旨主要是交流物理实验研究成果,介绍国内外物理实验教学经验,培养读者的科学精神与创新能力,引领我国物理实验教学的改革与发展。杂志着重刊载对物理实验教学改革与发展具有前瞻性,对实验教学的具体问题具有指导性,对新科技成果应用于实验教学具有深度融合性,对传统实验内容具有拓展性和创新性的论文。目前开设的主要栏目有:前沿导读、近代与综合实验、拓展与创新、普通物理实验、教学论坛、专题、互联网+物理、学生园地、基础教育等。《物理实验》适合于物理实验工作者、理工科学生以及教学仪器研制技术人员阅读。

《物理实验》为月刊,全国各地邮局均可订阅,邮发代号为12-44。若错过邮局订阅时间,可直接与编辑部联系。

《物理实验》编辑部