Hans汉斯

简易双缝干涉与单缝衍射仪的制作与研究

王舒鹏1, 麻志君1.2*, 王桃芬1, 赵明卓1.2

¹湖南科技大学物理与电子科学学院,湖南 湘潭 ²智能传感器与新型传感材料湖南省重点实验室,湖南 湘潭

收稿日期: 2025年2月21日; 录用日期: 2025年4月9日; 发布日期: 2025年4月17日

摘要

物理实验中双缝干涉和单缝衍射仪器通常操作复杂、价格昂贵,在中学物理教学中普及率不高。针对这些问题,本研究基于波动光学理论,详细介绍了一种简易的双缝干涉与单缝衍射仪的制作和操作方法, 提出一种低成本的手工实验装置设计方案,旨在帮助老师和学生简单制作与操作这种实验装置。该装置 不仅实验效果明显,成本低廉,而且可以广泛应用于光学课堂实验教学,显著提高学生的学习效果,为 资源有限地区的光学课堂实验教学提供了可参考的解决方案。

关键词

双缝干涉,单缝衍射,自制仪器,课堂教学

Design and Study of a Simple Apparatus for Double-Slit Interference and Single-Slit Diffraction

Shupeng Wang¹, Zhijun Ma^{1,2*}, Taofen Wang¹, Mingzhuo Zhao^{1,2}

¹School of Physics and Electronic Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan ²Hunan Provincial Key Laboratory of Intelligent Sensors and Advanced Sensor Materials, Xiangtan Hunan

Received: Feb. 21st, 2025; accepted: Apr. 9th, 2025; published: Apr. 17th, 2025

Abstract

In physics teaching, instruments used for double-slit interference and single-slit diffraction experiments are typically complicated to operate and expensive, leading to low popularity in secondary

*通讯作者。

education. To address these issues, this study, based on wave optics theory, introduces a simple apparatus for performing double-slit interference and single-slit diffraction experiments. A detailed method for constructing and operating a low-cost, handmade experimental device is presented, aiming to assist teachers and students in easily fabricating and using this equipment. The apparatus not only demonstrates clear experimental results at a low cost but also is highly suitable for widespread adoption in classroom optics experiments. It can significantly enhance students' learning outcomes and provide a practical reference for conducting optics experiments in resourcelimited regions.

Keywords

Double-Slit Interference, Single-Slit Diffraction, Homemade Apparatus, Classroom Teaching

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

光的干涉和衍射是波动光学的重要内容,其应用已经从实验室的基础理论研究扩展到尖端技术领域。 如干涉测角受光栅衍射效率的影响,复色光能显著降低星敏感器的姿态测量精度,使其精确度由 0.01 降 低至 0.3 [1]。同样在大口径光学加工的领域,通过偏振分光与 Hindle 球面补偿,瞬态干涉技术能实现 16 mm⁻¹级面形检测[2],但其复杂光路调试限制了其普及性。值得注意的是,这些理论方案多依赖专业设备, 难以迁移至基础教学——例如传统杨氏模量实验仍受限于光杠杆法的毫米级分辨率[3]。现有干涉、衍射 实验装置普遍存在高精度与高复杂度强耦合性,如超分辨显微需荧光标记[4],精密干涉仪依赖高稳定性 实验平台,但这会导致可操作性及教学延展性受到限制。因此,开发"原理直观、成本可控、精度达标" 的干涉、衍射综合实验系统,成为理论教学的关键突破口。

近年来,研究者通过创新技术推动光学干涉与衍射实验的普及化,主要沿三个方向突破:虚拟现实、数值仿真、硬件简化。如基于 Blender、VSCode 和 Unity 构建的 3D 仿真平台,集成单缝、双缝及光栅衍 射等六类实验模块,通过交互式操作复现实验现象[5];利用 MATLAB 波动函数建模,实现条纹与图像 的虚拟生成,为线上教学提供高保真可视化支持[6];大功率激光笔与凹透镜组装的低成本装置,显著提 升单缝、双缝及泊松亮斑的观测可见度,解决了传统实验设备笨重、现象模糊的痛点[7]。

本文研究一种简单、易用、成本低廉的简易双缝干涉与单缝衍射仪器,该仪器装置取自于日常生活, 易于获取,其组建快速,易于制作,其现象明显,具有较高可见度。该装置解决了传统光学实验设备昂 贵,调试耗时等问题。通过低成本的简易装置设计,实现双缝干涉与单缝衍射现象的同步观测与定量分 析,进而验证波动光学理论的教学适用性。这种简易装置可以作为理论教学和物理课堂实验教学的教具, 帮助老师更好地教授干涉与衍射原理,为基层教学提供复制的低成本教学教具。

2. 双缝干涉与单缝衍射光学原理

杨氏双缝干涉实验与夫琅禾费单缝衍射实验是历史上极具代表性的光学实验[8]。对于双缝干涉实验: 原理如图 1 所示,当干涉性强的光线照射在两个宽度相同、间距很小的细狭缝时,两狭缝可分别视为一 个新的波源。如果两波源所产生的相干波频率相同,振动方向相等,相位差保持不变,则两列相干波会 在传播空间中互相叠加,二者在叠加区域的振幅公式分别为



Figure 1. Schematic diagram of double-slit interference 图 1. 双缝干涉原理图



Figure 2. Schematic diagram of single-slit diffraction 图 2. 单缝衍射原理图

$$y_1 = A_1 \cos\left(\omega t + \theta_{10} - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right)$$
(1)

$$y_2 = A_2 \cos\left(\omega t + \theta_{20} - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right)$$
(2)

其中和分别为两个波源的振幅。进一步假定等于,两列波在 P 点处叠加。在这种情况下, P 点合振动叠 加公式与波强公式分别为

$$y = y_1 + y_2 = A\cos(\omega t + \theta_0)$$
(3)

相应地, P 点的波强公式为

$$I = I_1 + I_2 = 2\sqrt{I_1I_2}\cos(\Delta\theta) \tag{4}$$

其中为合振动的波强, Δθ为两波源的相位差。由公式(4)可知,当叠加区域的合振幅增强至原来的两倍时,光强增强到原来的四倍。相反,当叠加区域合振幅减小至零,光强度也为零,从而在接收屏上形成 一系列明暗交替的干涉图样。对于单缝衍射,其原理如图2所示。当光线垂直照射单个缝隙时,狭缝中 各点会形成一个新的子波波源,发出的子波在空间中延展且互相叠加,形成衍射现象。这种现象在接收 屏上表现为明暗相间的条纹,其中中央明条纹的宽度约为其他明条纹宽度的两倍。

3. 简易双缝干涉与单缝衍射仪的设计与制作

3.1. 双缝干涉与单缝衍射仪的构造

1) 光源:选择高功率如 5 mW (毫瓦)的红色激光笔(波长约为 656 nm)作为光源,因为激光具有极高的相干性,能够显著增强双缝干涉与单缝衍射的图样清晰度。

2) 双缝和单缝纸片:双缝纸片和单缝纸片是本实验装置的关键部分。双缝纸片由两个宽度相同、间距极小的细狭缝组成,这些狭缝通过小刀在纸片上精细切割而成。单缝纸片则是一条宽度极细的狭缝。为了确保实验的准确性,需精心制作这些纸片,多次尝试以达到最佳效果[9]。

3) 接收屏幕:使用白色屏幕,如图 3 所示,空白 A4 纸,作为接收屏幕的表面来捕获干涉和衍射图 样。这种方法不仅成本低廉,而且现象明显,便于观察和记录。

4) 固定仪器:由于纸片无法自立,我们使用固定夹对纸片进行固定,以确保实验的稳定性,如图 4 所示。同时,为了防止外部不确定性因素的影响,如激光笔在平台上滚动,也可使用第二个固定夹对激 光笔进行固定。

5) 相机:利用数码相机或手机等设备记录接收屏幕上的干涉和衍射图样,以便于后续分析和讨论。



Figure 3. A4 paper with scale markings 图 3. 带有刻度的 A4 纸





Figure 4. Simple schematic diagram of the homemade apparatus 图 4. 自制仪器简易图

3.2. 双缝干涉与单缝衍射实验操作

1) 固定仪器:由于双缝纸片与单缝纸片无法自然垂直于水平桌面,因此需要使用固定夹进行固定。

同时,为了保证实验的稳定性,在外界环境不稳定的情况下,还需对激光笔进行固定。

2) 正确摆放干涉与衍射仪的器具:如图 5(a)所示,将激光光源固定在水平桌面上,并在距离光源较近的位置摆放双缝或单缝纸片。使用固定夹将纸片竖直固定,确保其稳定。

3) 校准激光笔:调整双缝和单缝纸片,如图 5(b)所示,使激光垂直照射在纸片的狭缝上。在完成双缝干涉演示实验后,无需大幅移动纸片,直接调换纸片进行单缝衍射演示实验。



Figure 5. (a) Experimental apparatus setup; (b) Laser calibration diagram 图 5. (a) 仪器摆放图; (b) 激光校准图

4) 进行双缝演示实验: 在水平桌面上, 让激光直射在双缝纸片上, 产生干涉现象。手持接收屏幕在 双缝纸片较远处进行移动, 捕捉干涉图样, 并使用相机对图样进行拍摄记录。

5) 进行单缝演示实验:将双缝纸片与单缝纸片互换,进行激光校准与微调,使激光几乎垂直照射在 单缝纸片上。激光穿过单缝后产生衍射现象。手持接收屏幕在单缝纸片较远处进行移动,捕捉衍射图样, 并使用相机对图样进行拍摄记录。

6) 重复双缝与单缝演示实验:多次进行双缝与单缝演示实验,移动接收屏幕以捕捉不同位置的图样, 并拍摄多组照片。随后,筛选出清晰度高、辨析度好的照片,以便进行深入分析。

4. 结果与讨论

4.1. 双缝干涉图样与结果分析

4.1.1. 干涉图样定性分析

图 6(a)展示了理论上的干涉图样示意图,其中预期干涉图样由一系列明暗相间的条纹组成,各明条 纹亮度相等。而图 6(b)和图 6(c)则给出了利用简易双缝干涉仪在亮环境和暗环境下进行干涉实验得到的 干涉图样。在这两组实验中,暗环境下的实验现象最为明显。观察到的实验干涉图样中,明条纹的亮度 呈现出逐级递减的趋势。这种现象的原因是,实际的干涉图样不仅包含了干涉效应,还包含了单缝衍射 效应。单缝衍射导致的光波传播方向的改变,使得各级明条纹的亮度出现差异,从而产生了亮度逐级递 减的现象。

波粒二象性理论指出,光既具有波动性,又具有粒子性。而双缝干涉实验正是这一理论的重要实证 之一,它证实了光具有波动性。如图 7 所示的惠更斯原理表明,当激光照射在双缝纸片的两狭缝上时, 这两个狭缝都成为新的波源。这些波源产生的波具有相干性,并向前传播。在干涉相长的地方,即两个 波峰或波谷相遇的地方,会形成明条纹;而在干涉相消的地方,即一个波峰和一个波谷相遇的地方,则 会形成暗条纹[10]。

通过比较理论示意图与实验结果图,我们发现自制双缝干涉仪演示实验获得的干涉图样(尤其是在暗

环境下的干涉图)与理论图样具有高度的一致性。这表明我们的实验结果有效地验证了波动光学的基本原理,增强了学生对波动性理论的理解。



Figure 6. (a) Double-slit interference diagram; (b) Interference pattern in bright environment; (c) Interference pattern in dark environment

图 6. (a) 双缝干涉示意图; (b) 亮环境干涉图; (c) 暗环境干涉图



 Figure 7. Schematic diagram of Huygens' principle

 图 7. 惠更斯原理图

4.1.2. 干涉实验结果定量分析

自制双缝干涉仪演示实验是基于杨氏双缝干涉实验原理设计的。在这个实验中,两个狭缝被分别设 定为光源 P₁和光源 P₂,它们之间的距离设为 *d*。接收屏幕位于距离纸片一定距离 *D*的位置,而条纹所处 位置点到中心点的距离被标记为 *x*。两条纹之间的波程差为

$$\delta = r_2 - r_1 \approx d \sin \theta \approx d \tan \theta = \frac{xd}{D}$$
(5)

若 $\delta = \pm k\lambda$, P 点条纹为明纹, 则

$$x = \pm k \frac{D\lambda}{d} \quad k = 0, 1, 2, 3, 4, 5 \tag{6}$$

若 $\delta = \pm (2k+1)\frac{\lambda}{2}$, P 点条纹为暗纹, 则

$$x = \pm (2k+1) \frac{D\lambda}{2d} \quad k = 0, 1, 2, 3, 4, 5$$
(7)

从图 8 接收屏幕捕捉到的干涉图样进行数据分析,得到每个明条纹间距约为 3.9 mm。已知接收屏幕 到双缝纸片的距离为 2.97 m,狭缝间距约为 0.5 mm,则由条纹间距公式

$$\Delta x = \frac{D\lambda}{d} \tag{8}$$

通过计算,我们得到光的波长为656.66 nm,这一结果位于红色激光的波长范围之内,与理论相符。



Figure 8. Interference pattern on the observation screen 图 8. 接收屏幕干涉图样

4.2. 单缝衍射图样与结果分析

4.2.1. 衍射图样定性分析

在自制单缝衍射仪演示实验中,确保激光尽可能垂直照射纸片至关重要。如果激光无法垂直照射,如图9所示,非垂直照射细缝会导致中央明条纹的偏移。







Figure 10. (a) Single-slit diffraction diagram; (b) Diffraction pattern in a bright environment; (c) Diffraction diagram in a dark environment

图 10. (a) 单缝衍射示意图; (b) 亮环境衍射图; (c) 暗环境衍射图

图 10(a)展示了理论上的单缝衍射图样示意图,而图 10(b)和图 10(c)给出了单缝衍射教具演示实验产 生的实际衍射图样。实验中观察到,衍射图样中央是一条较宽的明条纹,两侧是一系列较窄的条纹,这 些条纹随着远离中央条纹,其光强逐级变弱。这符合光的波动性理论,其中光的衍射是波动性现象之一。 惠更斯原理解释了这一现象:当光波通过狭缝时,狭缝上任意一点都成为子波源,这些子波源发射的子 波形成一个包络面,而非平面传播。狭缝宽度越细,衍射现象越明显。从接收屏中的衍射图样可以看出, 中央条纹是最宽和最亮的,因为它是零条纹,宽度为其他明条纹的两倍,亮度也最为显著。

4.2.2. 衍射图样定性分析

自制单缝衍射仪演示实验是基于单缝夫琅禾费衍射实验原理设计的。如图 11 所示,我们使用自制的 单缝纸片,其缝宽为。在接收屏幕上,衍射图样中点与狭缝 AB 中心点所成的夹角定义为衍射角,而自 制单缝纸片到接收屏幕的距离为,点到中心点的距离为。这些参数在实验中起着关键作用,因为它们直 接影响衍射图样中条纹的分布和亮度。通过精确控制这些参数,我们可以观察到清晰的衍射图样,从而 加深对波动光学原理的理解。



Figure 11. Interference theory diagram 图 11. 干涉理论图

干涉暗条纹公式为

$$a\sin\theta = \pm 2k\frac{\lambda}{2}$$
 $k = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ (9)

干涉明条纹公式为

$$a\sin\theta = \pm (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$
 $k = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ (10)

自制单缝纸片与接收屏幕的距离为数米,而纸片中的细狭缝宽度为零点零几毫米,因此可有下面的 近似公式:

$$\sin\theta \approx \tan\theta \approx \frac{x}{D} \approx \theta \tag{11}$$

如果我们对明条纹和暗条纹进行定量计算,比如以一级明条纹为测量对象,如图 12 所示, *x* 约为 2.23 cm, *D* 约为 3.17 m, 细缝宽度 *a* 约为 0.14 mm, 代入条纹公式可得到

$$a\frac{x}{D} = \frac{3\lambda}{2} \tag{12}$$

计算得到波长 λ 为 656.572 nm。这一结果与红色激光的实际波长范围相吻合。这充分证明了我们的 实验数据和计算过程的准确性,同时也进一步验证了简易双缝干涉与单缝衍射仪在测量波长方面的有效 性与一致性[11]。



Figure 12. Diffraction pattern on the receiving screen 图 12. 接收屏幕衍射图样

5. 结果与讨论

本研究通过激光 - 纸片系统成功复现了双缝干涉与单缝衍射现象,实验结果与理论预测高度吻合, 验证了该装置的基础光学测量能力。相较于传统高成本教具,该设计利用日常生活材料构建,不仅实现 了与标准实验相当的波长推导结果,还能额外拓展动态演示功能,例如通过即时调节纸片与光源之间的 距离,直观展示条纹间距随间距的变化规律。这一创新证明,微观波动性质的教学可脱离复杂设备依赖, 仅凭简易装置即可传递核心物理思想。

该仪器打破光学实验的硬件门槛,其"极低成本实验范式"为偏远地区学校及家庭科学教育提供了 新路径。未来,基于此类设计能为其他波动实验(如光栅衍射)的教具设计提供普适性参考。

基金项目

中国高等教育学会高等教育科学研究规划课题重点项目(22LK0301);湖南省普通高等学校教学改革研究项目(202401000916, HNJG-2022-0772)。

参考文献

- [1] 姚帅, 张徐玮, 叶志龙, 等. 光栅衍射效率对干涉式星敏感器测角影响分析[J/OL]. 飞控与探测: 1-12. <u>http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1567.TJ.20250224.1022.002.html</u>, 2025-03-08.
- [2] 金乐龄, 王建, 曾大舟, 等. 面向大口径光学元件面形检测的点衍射瞬态干涉仪设计[J]. 光学学报, 2025, 45(3): 200-211.
- [3] 王国友, 范沁, 资雄, 等. 用光干涉和衍射装置替换光杠杆的杨氏模量测量方法[J]. 大学物理, 2024, 43(4): 44-48+74.
- [4] 左超,陈钱.计算光学相位成像:从干涉数字全息到光强衍射层析[J].科学通报,2023,68(25):3240-3243.
- [5] 郑乐,郑雪丽,杨骏骏,等.光学虚拟仿真实验平台的设计与实现[J].物理实验,2024,44(3):39-43.
- [6] 王美姣, 赵加强, 邢匡衡, 等. 基于 MATLAB 仿真光学实验的设计与实现[J]. 潍坊学院学报, 2024, 24(5): 52-63.

- [7] 胡贝. 光的干涉和衍射演示实验的改进[J]. 实验教学与仪器, 2024, 41(11): 62-63.
- [8] 黎红. 干涉、衍射实验中衍射物位置的估算[J]. 大学物理, 2009, 28(1): 39-40+49.
- [9] 王舒鹏, 麻志君, 陆振烟, 等. 一种多功能光学实验演示教具及其使用方法[P]. 中国专利, CN114677889A. 2022-06-28.
- [10] 陈丽, 张登玉, 王友文, 等. 浅谈光学中杨氏双缝干涉实验[J]. 衡阳师范学院学报, 2014, 35(6): 33-35.
- [11] 石仁斌, 陈晓钊. 浅析光的单缝夫琅和费衍射[J]. 广西物理, 2021, 42(4): 12-16.