



物理光学研究式项目设计与教学改革

张尚剑, 张雨晴, 张西西, 张靖雯, 冯曦, 张雅丽

(电子科技大学 光电科学与工程学院, 成都 611731)

摘要: 物理光学课程推行以学为中心的教学创新, 打造了“问题式互动课堂、沉浸式探究授课、研究式项目设计”的三阶递升教学设计和“现象-问题-理论-方法-能力”五环建构教学方法。光盘作为生活中常见的数据存储介质, 同时也是一种反射型衍射光栅, 其光栅衍射现象明显、易于观察。该文以光栅衍射测量激光器工作波长和光盘轨道间距的项目制设计实验为例, 探讨了物理光学课程研究式项目设计的教学改革实践, 提出的实验方法设计简单、可重复性强。将光栅衍射理论与实际衍射现象有机结合, 有助于加深对夫琅禾费衍射效应的理解。

关键词: 物理光学; 光盘轨道间距; 光栅衍射; 夫琅禾费衍射

中图分类号: O436.1

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240306

Research-Oriented Project Design and Teaching Reform in Physical Optics

ZHANG Shangjian, ZHANG Yuqing, ZHANG Xixi, ZHANG Jingwen, FENG Xi, ZHANG Yali

(School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In the physical optics course, a learning-centered teaching innovation is proposed, and a three-tiered progressive teaching design of “problem-oriented interactive classroom, immersive exploratory teaching, research-oriented project design”, and a five-ring constructive teaching method of “phenomenon-problem-theory-method-capability” is developed. As a common data storage medium in daily life, the optical disc is also a reflective diffraction grating, exhibiting obvious grating diffraction phenomena that are easy to observe. The paper takes the project-based design experiment on measuring the operating laser wavelength and the track spacing of optical discs using diffraction gratings, as an example, to explore the teaching reform practice of research-oriented project design in the physical optics course. The proposed experimental method is straightforwardly designed with strong repeatability, combining the grating diffraction theory with actual diffraction phenomena organically, which is helpful for deepening the understanding of the Fraunhofer diffraction effect.

Key words: physical optics; track spacing of optical discs; diffraction gratings; Fraunhofer diffraction

为深入实施国家创新人才培养战略, 主动应对新一轮科技革命和产业变革, 教育部大力推进新工科建设, 要求将产业和技术的最新发展、行业对人才培养的最新要求引入教学过程, 更新教学内容和课程体系, 加快培养新兴领域工程科技人才, 主动布局未来战略必争领域人才。课程教学创新是实践新工程教育、推进新工科建设的主要载体, 也是实施国家创新人才培养战略的重要要求。物理光学课程组以问题导入和成果导向为理念, 以学生发展为中心, 从创新教学模式、推行科教融合、强化课程育人 3 个维度, 打造“问题式互动课堂、沉浸式探究授课、研究式项目设计”的三阶递升教学设计和“现象-问题-理论-方法-能力”的五环建构教学法。

1 研究式项目设计背景

物理光学课程源自诺贝尔物理学奖得主马克斯·玻恩(Max Born)的《光学原理: 光的传播、干涉和衍射的电磁理论》, 其核心是用麦克斯韦电磁理论研究光的传播、干涉和衍射的规律^[1]。物理光学是电子科技大学国家一流专业——光电信息专业的核心基础课, 也是 A 类光学工程学科的必修课, 课程理论体系完备, 课程影响力强。

根据新工科学科交叉本质和产学研融合特征,

收稿日期: 2024-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(62475034); 四川省高阶课程(2024); 四川省高等教育人才培养质量和教学改革项目(JG2024-0221)。

作者简介: 张尚剑, 博士, 教授, 主要从事高速光通信与光电子学、微波光子技术方面的研究。E-mail: sjzhang@uestc.edu.cn

在物理光学课程教学改革中, 将科研素材引入教学设计, 通过研究式项目设计, 突出“真实问题”和“挑战性”; 以“构思 (conceive)、设计 (design)、实现 (implement) 和运作 (operate)” (CDIO) 为主线, 通过“系统化、挑战性”项目研究, 培养学生高阶思维和科学素养, 提升挑战性学习能力^[2]。

在物理光学教学中, 弗朗禾费多缝衍射内容具有衍射和干涉多重特征, 理论推导并不难, 但是不够具象, 为此, 本文专门布置研究式项目设计, 要求学生利用 CDIO 思路完成项目实验, 培养其创造性思维 and 创新能力。

2 研究式项目设计实例

光盘是以光信息作为载体的数据存储介质, 通常采用阿基米德螺旋线结构的记录轨道, 分为 CD (compact disc)、DVD (digital video disc)、BD (blu-ray disc) 等类型。CD 和 DVD 的标准轨道间距分别为 $1.6\ \mu\text{m}$ 和 $0.74\ \mu\text{m}$, 红、绿两种激光笔标定的波长范围分别是“ $650\ \text{nm} \pm 10\ \text{nm}$ ”和“ $532\ \text{nm} \pm 10\ \text{nm}$ ”, 均满足略小于光盘轨道间距 (光栅常数) 的条件, 因此, 当红、绿两种激光照射在光盘表面时, 均可观察到明显的衍射现象。

通过测量 0 级和 ± 1 级衍射光斑之间的间距, 即可实现对光盘轨道间距的测量^[3-6]。考虑到实验中采用低成本激光笔的实际工作波长不确定, 还需要设计对激光笔波长的测量实验, 因此, 本项目目标是设计方案并实验验证, 利用未知波长激光笔完成对 CD 和 DVD 两种光盘轨道间距的测量。

2.1 方案设计

本实例展示了利用未知波长的激光笔、CD 和 DVD 光盘 (北京银盘电子技术有限公司)、电脑液晶屏幕以及直尺等器材, 基于光栅衍射原理测量光盘轨道间距的实验方案。首先使用已知光栅常数的液晶屏幕 (二维衍射光栅) 来测定激光笔的波长, 然后利用激光笔对光盘的轨道间距 (光栅常数) 进行测量^[7]。

测定激光笔波长的实验装置如图 1 所示。实验中, 将墙面作为衍射光斑观察屏, 先在距墙面 1 m 处摆放电脑, 电脑屏幕与墙面平行; 然后在墙面与屏幕间摆放激光笔, 为使激光光束屏幕上反射的衍射光斑可在墙面上观察到, 激光笔应与垂直屏幕方向呈微小角度。通过测量墙面上衍射光斑水平或竖直方向上的光斑间距, 根据电脑屏幕光栅常数, 即可得到红光和绿光两种激光笔的光波波长。

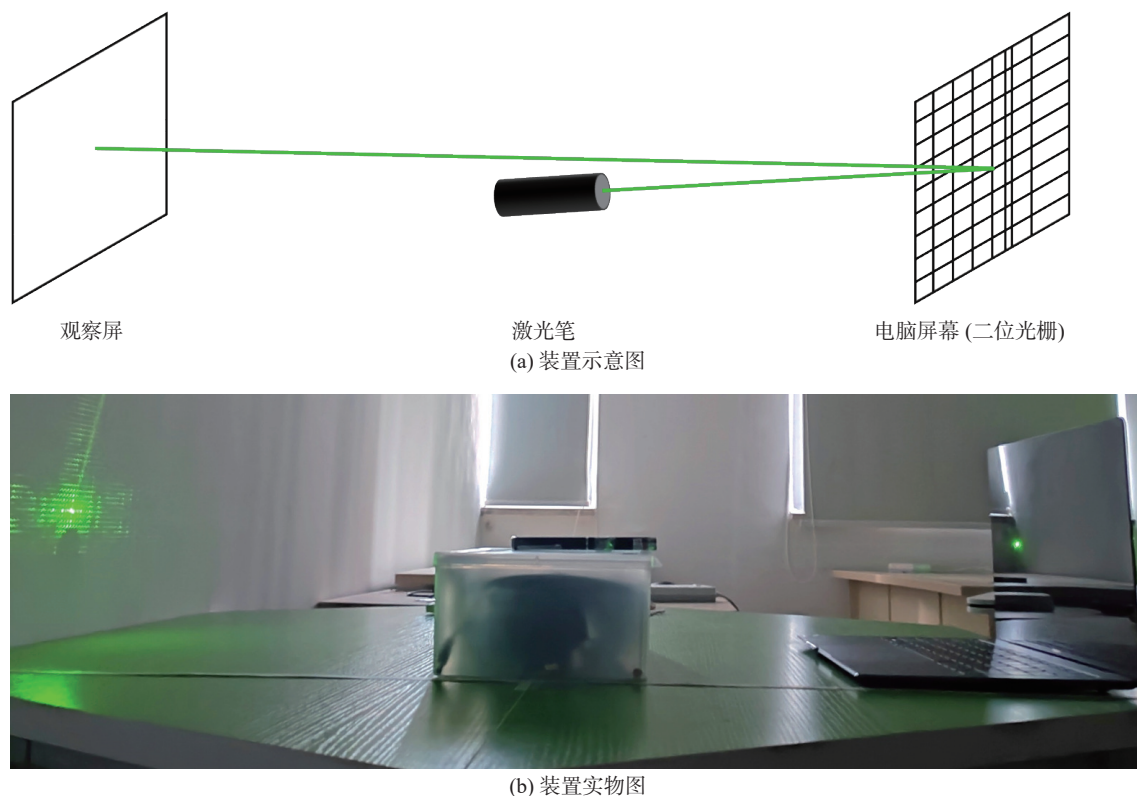


图1 测定激光笔波长的实验装置图

测量光盘轨道间距的实验装置如图 2 所示。由于衍射光斑间距会随光盘到观察屏的距离增大而增大, 光斑间距过大会导致测量困难, 当光盘与观察屏间距较近时, 激光笔与垂直光盘方向间需较大夹角才能使反射光斑不被激光笔遮挡, 因

此在实验中选较合适的 0.3 m 和 0.4 m 作为光盘与观察屏的间距多次测量。将 0 级与 ± 1 级衍射光斑间距、光盘与观察屏之间的间距及激光笔波长代入光栅方程, 即可计算出光盘光栅常数, 即光盘的轨道间距。

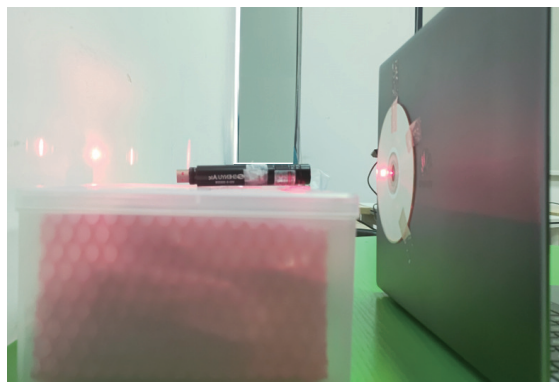
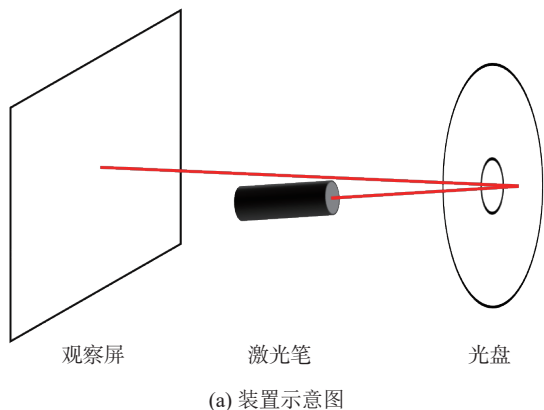


图 2 测量光盘轨道间距的实验装置图

2.2 理论仿真

将光盘作为反射型光栅进行理论计算, 根据光栅方程^[8]:

$$d(\sin\phi \pm \sin\theta) = k\lambda (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

当入射角 $\phi \approx 0^\circ$, 方程简化为:

$$d \sin\theta = k\lambda (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2)$$

$$d_0 = \frac{19.3 \times 2.54}{\sqrt{3\,000^2 + 2\,000^2}} [\text{cm}] \quad (3)$$

$$\lambda = d_0 \times \sin \left[\arctan \left(\frac{x}{L} \right) \right] \times 10^7 [\text{nm}] \quad (4)$$

由于 $|\sin\theta| \leq 1$, 则 $|k| \leq d/\lambda$, 可计算得到使用红光和绿光激光笔照射 CD 光盘时能看到 0 级、 ± 1 级和 ± 2 级衍射光斑, 照射 DVD 光盘时能看到 0 级和 ± 1 级衍射光斑。由式(2)可知, x 为衍射光斑距离零级衍射的距离, L 为反射光栅到投射墙面的距离。使用红光和绿光激光笔照射 CD 光盘时, 计算得到 1 级和 2 级衍射光斑的位置如图 3(a) 所示; 使用红光和绿光激光笔照射 DVD 光盘时, 计算得到 1 级的衍射光斑的位置如图 3(b) 所示。

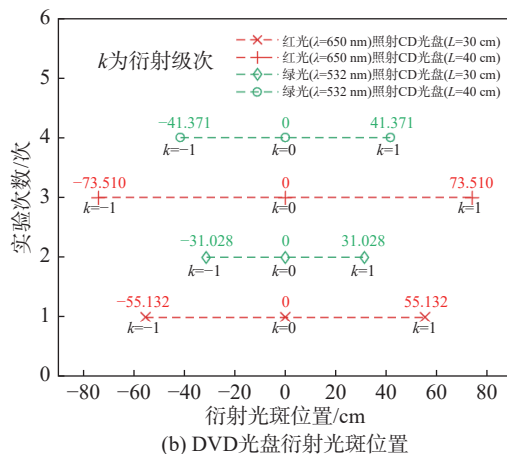
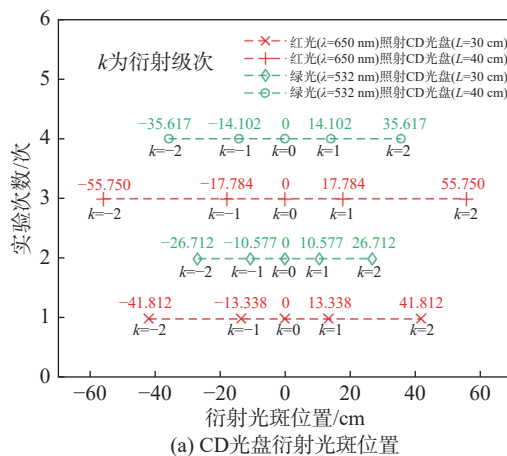


图 3 光盘衍射光斑位置理论计算结果

2.3 实验结果

电脑屏幕和两种光盘在红光、绿光激光笔照射下的衍射图样如图4和图5所示。在测定激光笔波长的实验中,观察到经电脑屏幕反射衍射的光斑呈现较为明显的二维分布,如图4所示;测量CD光盘轨道间距的实验中,用绿光和红光激光照射光盘得到的衍射光斑分别如图5(a)和5(b)所示,都可以观察到0级、 ± 1 级和 ± 2 级5个衍射光斑,光斑近似沿直线分布;测量DVD光盘轨道间距时,小角度照射得到的衍射光斑如图5(c)和5(d)所示,只能观察到0级和 ± 1 级的3个衍射光斑。无论是电脑屏幕还是光盘的衍射光斑,都是0级光斑最亮,整个衍射图样近似关于0级光斑对称分布。

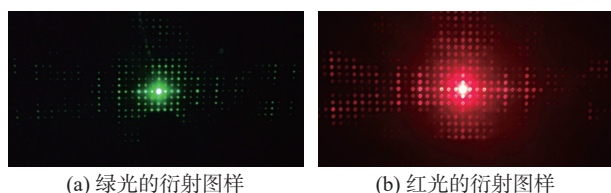


图4 激光照射电脑屏幕的衍射图样

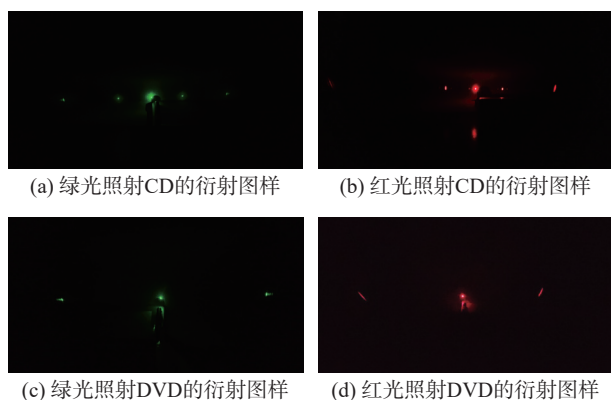
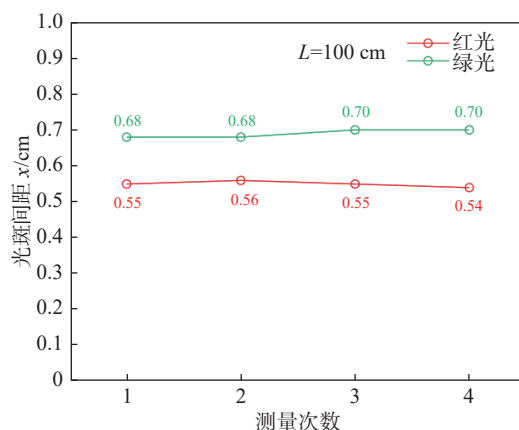
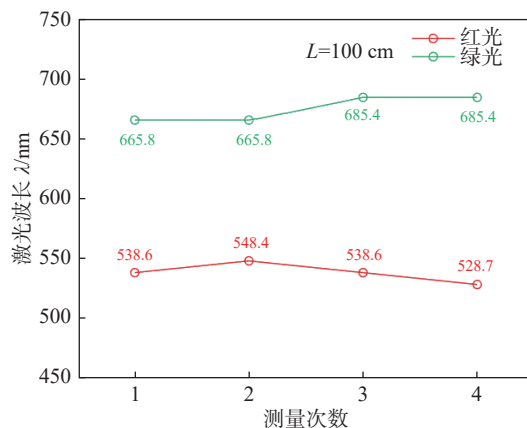


图5 激光照射光盘的衍射图样

实验所用电脑屏幕尺寸为19.3英寸,分辨率为 3000×2000 ,根据式(3)可以计算出屏幕的光栅常数 d_0 。如实验方法所述,在电脑屏幕与墙面距离固定为 L 的情况下,用精度为0.01 mm的刻度尺量出激光笔经电脑屏幕光栅反射衍射得到的0级、1级衍射光斑之间的距离 x ,多次测量结果如图6(a)所示。将测量结果代入式(4),即可求出激光笔波长 λ ,对应的计算结果如图6(b)所示,取其平均值,得到实验所用绿光激光笔波长为538.6 nm,红光激光笔波长为675.6 nm。



(a) 红绿激光笔照射电脑屏幕时 ± 1 级衍射光斑测量结果



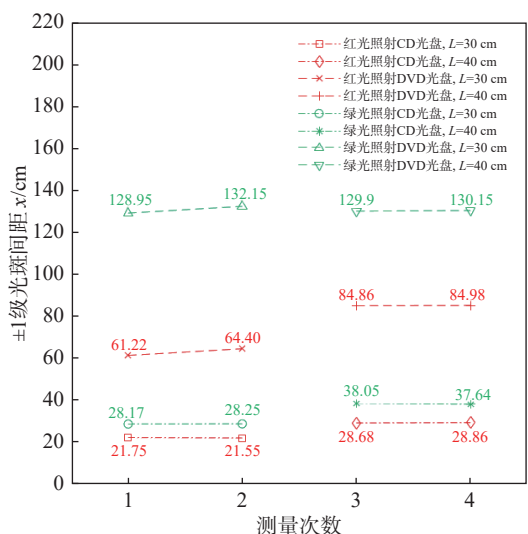
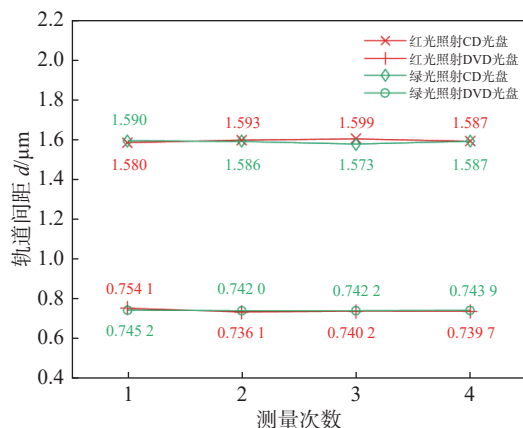
(b) 红绿激光笔波长计算结果

图6 测量激光笔波长的实验数据

明确绿光、红光激光笔波长后,便可以进行CD、DVD光盘轨道间距的测量,测量时先测出 d 为固定值时激光笔照射CD、DVD光盘所形成的 ± 1 级衍射光斑之间的距离 x ,测量结果如图7(a)所示。再代入式(5)计算得到 d ,各次测量对应的计算结果如图7(b)所示。对轨道间距计算结果取平均值,由此红光激光笔测量得到的CD、DVD光盘轨道间距分别为1.590、0.7425 μm ,绿光激光笔测量得到的CD、DVD光盘轨道间距分别为1.584、0.7438 μm 。

$$d = \frac{\lambda}{\sin \left[\arctan \left(\frac{x}{2L} \right) \right]} \times 10^{-3} [\mu\text{m}] \quad (5)$$

将实验测得的CD、DVD光盘轨道间距分别与其标准值1.6、0.74 μm 比较,可以计算出利用绿光激光笔测得CD、DVD轨道间距的相对误差分别为-0.625%、0.34%,利用红光激光笔测得CD、DVD轨道间距的相对误差分别为-1.0%、0.52%。

(a) 红绿激光笔照射光盘时 ± 1 级衍射光斑测量结果

(b) 光盘轨道间距计算结果

图 7 测量光盘轨道间距的实验数据

2.4 误差分析

通过对实验过程进行分析,发现存在多种原因可能导致实验误差。通过对光盘建模,再截取激光照射光盘近圆心、1/2 半径处、近边缘 3 种位置小块圆形区域作为衍射屏以仿真观察屏上的光场分布情况。

通过如图 8 所示的仿真结果和如图 9 所示的光场分布可以发现,虽然当选取区域逐渐靠近边缘时光盘轨道弧度变小,越来越近似于直线条纹光栅,但是仍有一定弧度,将实验数据代入直线光栅模型的光栅方程计算时引入了一定的误差^[9-15]。

实验过程中为了使 0 级衍射光不被激光笔自身遮挡,更完整地观察到衍射图样,实际方案采用小角度入射,即激光的入射角 ϕ 不严格等于 0,只是近似为 0。但由于小角度入射的角度过小,难以精确测量,在计算时将入射角度带入为 0,0 级

与 1 级衍射光斑距离用 ± 1 级衍射光斑距离的一半来代替,因此不可避免地引入误差。其次,在实验中屏幕与光盘位置摆放难以准确定位,在搭建实验装置时存在一定的精度误差。此外,激光笔的光斑直径较大,记录光斑位置时需人为地确定光斑中心位置,由此引入了读数的人员误差与估读误差。

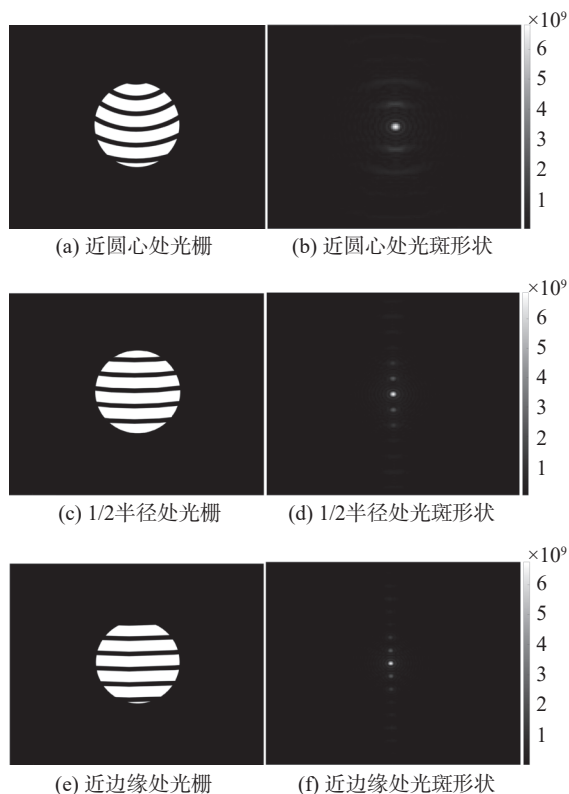
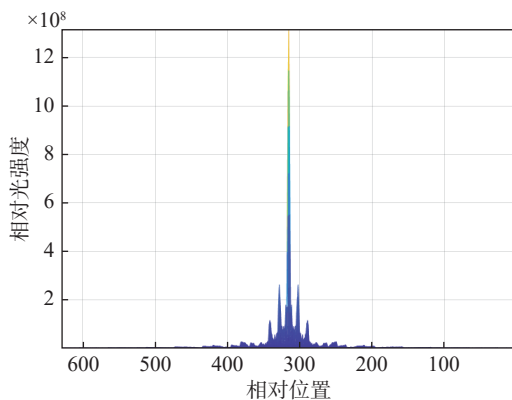
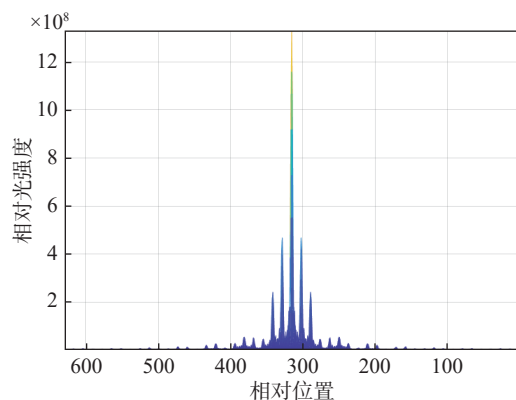


图 8 激光照射光盘仿真的光栅形状及衍射光斑显示图

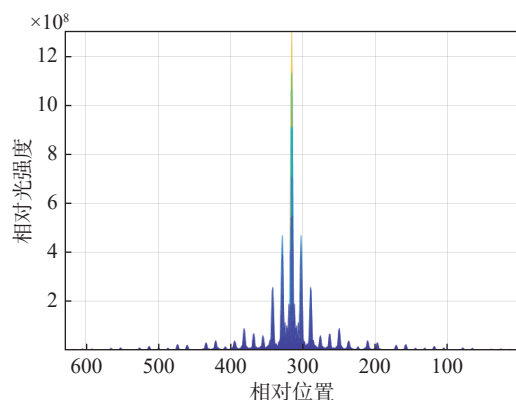


(a) 近圆心处光栅观察屏光场分布

图 9 激光照射光盘仿真的光场分布图



(b) 1/2半径处光栅观察屏光场分布



(c) 近边缘处光栅观察屏光场分布

图9 (续)

3 结束语

在物理光学教学中,围绕光栅衍射主题,设计了一种测量激光笔工作波长和CD、DVD光盘轨道间距的方案,给出了实验中观察到的衍射光斑图样以及实验测量得到的实际数据,通过计算得到对应光盘的轨道间距,并对实验误差进行了分析。以“构思、设计、实现和运作”为主线,构建以目标导向的研究式项目设计,学生通过课程学习与资料查阅,自主设计并执行了相关实验,完成实验数据的收集和处理并进行误差分析,以确保结果的准确性。教学过程中,采用启发式与讨论式相结合的互动教学模式,鼓励学生开放思维、积极创造,并最终完成实验论文的撰写。这种教学方法不仅促进了学生的主动学习,还增强了他们对知识的深入理解。通过参与本研究式项目,学生在“现象-问题-理论-方法-能力”的五环教学法指导下,显著提升了对工程技术现象的

分析能力,同时深入理解了光栅衍射这一物理光学现象,并能够熟练运用光栅衍射方程来处理实验数据和进行误差分析。这一过程不仅锻炼了学生“问题发掘”与“自主创新”能力,还有效地将科研与教学相结合,实现了以研促学的目标。这一教学创新有效支撑了物理光学入选首批国家级一流本科课程和四川省高阶课程。

参考文献

- [1] BORN M, WOLF E. 光学原理: 光的传播、干涉和衍射的电磁理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [2] CRAWLEY E F, MALMQVIST J, ÖSTLUND S, et al. Rethinking engineering education: The CDIO approach[M]. New York: Springer US, 2014.
- [3] 单会会, 马书炳, 张辉, 等. 基于CD/DVD光盘的光栅衍射演示实验[J]. 物理实验, 2018, 38(2): 34-35.
- [4] 程春雨, 商云晶, 马驰, 等. 基于CDIO工程教育模式的理科人才培养研究[J]. 实验科学与技术, 2020, 18(3): 123-127.
- [5] 谷平, 程勇, 湛静. PS小球阵列制备及二维激光衍射综合实验设计[J]. 实验科学与技术, 2024, 22(3): 62-66.
- [6] 岳慧敏, 欧中华, 代志勇, 等. 光电信息检测综合设计实验教学探索[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(4): 50-53.
- [7] 黄振永, 林学春, 赖康, 等. 光盘等效光栅常量和存储容量的测量[J]. 物理实验, 2008, 28(1): 5-8.
- [8] 叶玉堂, 张尚剑, 饶建珍. 光学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2024.
- [9] 张庆, 刘秋武. 计算机模拟任意形状衍射屏的衍射[J]. 物理实验, 2006(10): 14-17.
- [10] 张敬雯, 王文玲, 黄安平. 利用傅里叶变换的可分割性计算夫琅禾费衍射图样[J]. 物理与工程, 2020, 30(6): 43-47.
- [11] 吕波, 许志军. 基于任意形状衍射屏的光学夫琅禾费衍射仿真[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(7): 8-12.
- [12] 方慧雯, 杨锦宏, 贺胜男, 等. 任意亮度孔形衍射的数值模拟[J]. 大学物理, 2021, 40(12): 24-28.
- [13] 陈继超, 向文丽. 光栅衍射效应MATLAB仿真的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2020, (1): 45-48.
- [14] 汪峰, 傅洪波, 赵箭光. 任意形状孔夫琅禾费衍射的计算机模拟[J]. 软件导刊, 2010(12): 190-191.
- [15] 马广清, 刘蕾, 陈志国. 全息衍射光栅衍射场的研究[J]. 沈阳大学学报, 2004, 16(2): 97-100.

编辑 钟晓