



基于 MATLAB App Designer 的光学干涉实验 仿真平台的设计与教学应用

张兴坊, 梁兰菊

(枣庄学院 光电工程学院, 枣庄 277160)

摘要: 利用 MATLAB 的 App Designer 功能, 设计了典型光学干涉实验的仿真教学平台, 实现了杨氏双缝、劈尖、牛顿环、迈克尔逊、法布里-珀罗干涉 5 个实验的干涉图样复现, 且能展示干涉图样随影响因素的动态变化。该平台可帮助学生更好地理解光学干涉原理, 培养学生的逻辑思维和科学创新能力, 也有助于在线学习以及混合式课堂教学的开展。

关键词: MATLAB; App Designer; 光学仿真; 干涉; 双光束; 多光束

中图分类号: O4-39

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20220638](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20220638)

Design and Teaching Application of Optical Interference Experiment Simulation Platform Based on MATLAB App Designer

ZHANG Xingfang, LIANG Lanju

(College of Optoelectronics Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China)

Abstract: According to the interference theory of light, a simulation platform capable of demonstrating optical interference phenomena is designed based on MATLAB App Designer, including five interference experiments, namely Young's double slit, wedge, Newton's ring, Michelson as well as Fabry-Perot interference. It can intuitively display the effects of relevant physical parameters on the interference pattern, and can also display the simulation results in the form of animation. The use of this platform can help students better understand the theoretical mechanism of optical interference, improve their logical thinking and scientific innovation ability, and also help online learning and hybrid classroom teaching.

Key words: MATLAB; App Designer; optical simulation; interference; double beam; multibeam

光的干涉现象揭示了光的波动本性, 对其产生机制的理解和掌握在学生的创新思维开拓和科学精神培养等方面起着重要的作用。虽然干涉图样仅表现为条纹按光强强弱变化简单分布的特点, 但其物理内容抽象、影响因素多、演变规律复杂的特性, 决定了光学干涉这一内容一直是课堂教学中的重点和难点。同时, 与之对应的光学实验虽然实现了干涉现象的复现, 加深了学生实践动手能力和对理论知识的理解, 但由于受到如平台稳定性、温度、亮度等实验环境条件的限制, 以及光路搭建、仪器调试等耗时费力因素影响, 大多数光学干涉实验难以在有限时间内充分

地展示物理现象的变化特点, 使得实际教学效果不能得到很好地体现。作为提高教学质量和教学效率的一种手段, 借助计算机模拟技术开展光学实验仿真演示, 将抽象的光学现象演变规律可视化, 因具有可指导光学实验操作、可扩展和延伸实验内容拓展学生知识面和提升学生学习兴趣等优势, 在光学实验教学中的应用日趋广泛^[1-3]。

MATLAB 作为一款优秀的集数值计算、数据可视化功能于一体的科学计算软件, 已实现了多种光学实验现象的仿真^[4]。其不仅可将干涉效果以图像或动画的形式展示出来^[5-6], 而且自带的图形用户界面 GUI 具有良好的人机交互功能, 通过在界

收稿日期: 2022-11-08; 修回日期: 2023-03-13

基金项目: 2019 年山东省线上线下混合式一流课程——大学物理(鲁教高函[2020]3号)。

作者简介: 张兴坊(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学实验教学和光电子器件研究工作。E-mail: zxf4114@126.com

面上直接输入参数即可显现出光学图像,且还能实现多个光学实验现象在同一界面的可视化^[7-8]。但目前已报道的 MATLAB 光学干涉实验仿真平台大多只能在独立电脑环境下演示,制约了其应用范围。最近, MATLAB 提供了新的交互式开发环境 App Designer,可实现在 Web 上的 MATLAB 应用程序运行,且兼容 HTML5,能够集成网页、多媒体等多种素材,以帮助用户更加便捷地设计仿真界面^[9-13],但其在光学干涉方面的仿真应用还较为少见^[14]。为丰富光学干涉实验教学手段,我们利用 MATLAB 的 App Designer 功能设计光学干涉实验仿真教学平台,集成杨氏双缝、劈尖、牛顿环、迈克尔逊、法布里-珀罗干涉 5 个干涉仿真实验,不仅可进行多个影响参数对干涉图样的复现并动态演示,还可实现红绿蓝三基色复合光照射时的图像展示。该平台可帮助学生更好地理解光学干涉原理,提升学生通过仿真结果总结物理规律的水平,培养学生的逻辑思维和科学创新能力。

1 理论基础

一般,在涉及双光束干涉的理论计算时,两光束的光强设为等强度,空间中某观测点 P 处的干涉光强可表示为:

$$I_P = 4I_0 \cos^2(\Delta\varphi/2) \quad (1)$$

式中: $\Delta\varphi = 2\pi(n_2r_2 - n_1r_1)/\lambda - (\varphi_{20} - \varphi_{10})$ 为两光束在 P 点处的相位差,其中 φ_{20} 、 φ_{10} 分别为两光束的初始相位, λ 为入射波长; I_0 为入射光强; n_2r_2 、 n_1r_1 为光程,分别表示两光束所经介质折射率 n_2 、 n_1 与路程 r_2 、 r_1 的乘积。通常,两光束在同一介质(折射率为 n)中传播,即 $n_2 = n_1 = n$,且初始相位差 $\varphi_{20} - \varphi_{10} = 0$ 。在 P 点产生的干涉条纹满足 $n_2r_2 - n_1r_1 = j\lambda$, j 为干涉级次。在劈尖和牛顿环等厚干涉实验中,由于所使用干涉元件为玻璃-空气(介质)-玻璃的结构,使得两束反射光除了正常的光程差外,还存在额外的光程差 $\lambda/2$ 。而光程差在等厚干涉实验中常以厚度 d 替代,因此总光程差常表示为 $\Delta\delta = 2nd + \lambda/2$ 。在迈克尔逊等倾干涉实验中,干涉的两束光之间的光程差除了与虚拟空气膜厚度 d 有关外,还与入射倾角 i 有关,总光程差常表示为 $\Delta\delta = 2nd\cos(i)$ 。

多光束干涉的原理为以小角度 i_1 入射的光束在镜面反射率为 ρ 的两镜间多次反射和透射后,

形成的反射和透射光振幅依次减小但相互平行,再经透镜聚焦后将在焦平面上形成薄膜干涉条纹。典型实验为法布里-珀罗干涉,其干涉光强表示为^[15]:

$$I = \frac{I_0^2}{1 + \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)} \quad (2)$$

式中: $\Delta\varphi = 2\pi\delta/\lambda$ 为相邻两束透射光的相位差。光程差为:

$$\delta = 2n_2d_0\cos i_2 = 2n_2d_0\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i_1} \quad (3)$$

式中: n_2 、 n_1 分别为法布里-珀罗腔和环境的折射率; d_0 为腔长; i_2 为折射角。

2 仿真平台设计与应用

2.1 设计思路

1) 根据仿真目的,输出图像为干涉图样和光强曲线,当输入参数(器件参数、入射波长、观测屏尺寸、透镜焦距等)变化时需即时显示干涉现象的变化,为此在 MATLAB App Designer 设计视图中布置几个滑块组件和编辑字段(数值)组件用以实时改变和显示输入参数值。

2) 调整各组件尺寸和位置等基本属性,根据干涉公式编写各组件的回调函数代码和私有函数。回调函数是对组件触发时的事件响应函数,在这里为读取输入值并触发私有函数更新图像。私有函数设计流程为:首先读取界面参数,设置观察范围并离散数据;然后用干涉公式实现对光强的计算;最后用 `imagesc()` 和 `plot()` 函数绘制干涉图样和光强分布曲线。

3) 仿真图像演示和结果分析。

4) 对接服务器,实现 Web 运行。

2.2 代码编写

在自动生成的 App 代码视图中编写私有函数以及初始界面、各个组件的回调函数。由于干涉公式形式相差不大,回调函数代码类似,这里只给出双缝干涉仿真实验 App 的主要代码,其他干涉仿真实验的代码可以此例修改得到。

```
d=app.d_EF.Value*1e-6;% 读取双缝间隔
```

```
lamd=app.lamdEF.Value*1e-9;% 读取入射波长
```

```
D=app.D_EF.Value*1e-6;% 读取双缝和屏的距离
```

```

xmax=app.ping_EF.Value*1e-6; % 读取屏边长
NN=500;x=linspace(-xmax/2,xmax/2,NN);
M=zeros(1,length(x),3);
r1=sqrt(D.^2+(x-d/2).^2);
r2=sqrt(D.^2+(x+d/2).^2); % 计算光程
phi=(r1-r2).*2*pi/lamd; % 计算相位差
I1=cos(phi/2).^2; M(:,,1)=I1;
imagesc(app.UIAxes_2,x,x,M)
plot(app.UIAxes,x,I)

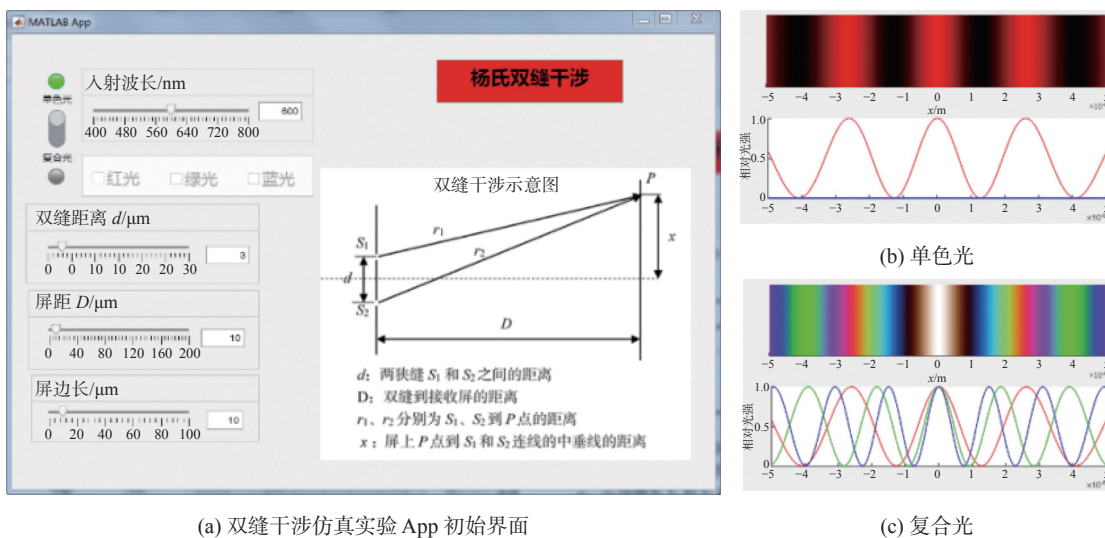
```

2.3 仿真演示与教学应用

按照杨氏双缝、劈尖、牛顿环、迈克尔逊、法布里-珀罗干涉实验的顺序依次进行平台在光学干涉教学中的仿真演示。

如图 1 所示，图 1(a) 为双缝干涉仿真实验 App 的初始界面。左边分别显示入射波长、双缝间距、屏距和观察屏边长 4 个输入参数，右侧为双缝干涉示意图，用以简单表达各个参数的意

义。当滑动任意滑块或在滑块右侧的框内输入数值时，将在界面右下位置出现双缝干涉图样和光强分布曲线，如图 1(b) 所示。在框中修改各参数值可静态观察和比较该参数对图样的影响，而大范围移动滑块可实现图样的实时动态展示，同时在框中即时显示参数值。图 1(a) 左上角的开关由单色光指向复合光时，还可实现白光三基色的干涉图样演示，如图 1(c) 所示。通过该界面的图像展示，使学生了解在一定观测范围内，双缝干涉条纹为条状且光强分布曲线呈现三角函数线型，条纹的数量与入射波长或屏距成反比，与双缝距离成正比。进而可根据这些变化规律总结出：干涉条纹的移动是由于两束光的光程差(或相位差)发生了变化的缘故，光程差变化越大观察到的条纹数量也越多。可见，该界面的使用将增强学生对双缝干涉现象的直观感性认知，帮助学生更好地探索双缝干涉演化规律。



(a) 双缝干涉仿真实验 App 初始界面
 (b) 单色光
 (c) 复合光
 图 1 双缝干涉仿真实验 App 初始界面及不同入射波长时的干涉图样和光强曲线

如图 2 所示，图 2(a) 为劈尖干涉仿真实验 App 界面。输入参数分别为入射波长、劈尖长度、劈尖的夹角角度、劈尖内介质膜折射率以及劈尖两平面间的纵向位移，在初始界面可看到如图 2(b) 中参数意义，滑动“入射波长”滑块可发现，劈尖长度一定时，入射波长越短条纹数量越多。膜折射率或劈尖角度增大时也发生类似的条纹数量变化。当劈尖的纵向位移改变时，干涉图样外侧的条纹亮暗程度交替变化，但条纹数量保持不变。这些现象的展示将在一定程度上激发学生积

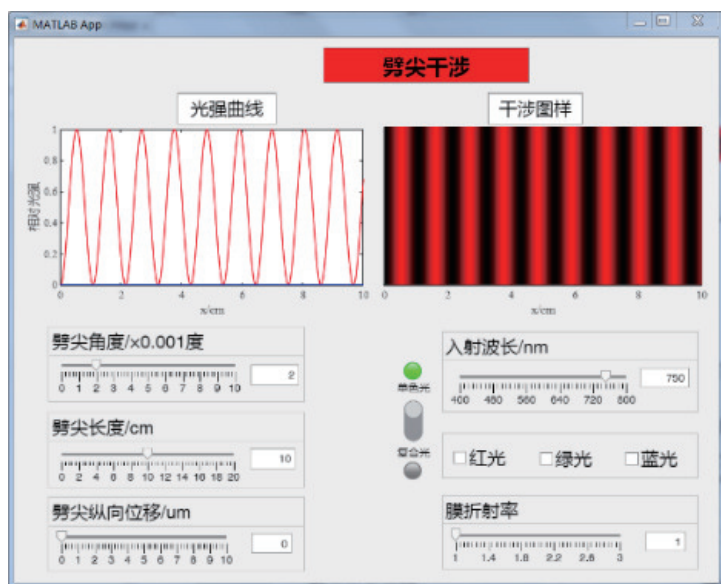
极探求起因的主动性，结合干涉理论可认识到，一定入射波长条件下条纹数量的变化源于观测点处光程差的改变，增大膜折射率或劈尖角度相当于增大了光程差，光程差越大则该处的条纹干涉级次也越大，一定观测范围内显示的条纹数量也越多，且光程差每变化半个波长条纹的数量增加或减少一个。劈尖的纵向位移虽然也改变了观测点处的光程差，然而劈尖左右两端条纹的干涉级次发生了同等程度的增减，两端条纹干涉级次的差值保持不变，因此条纹数量没有发生变化，但

劈尖一定位置处的亮暗程度却由于相位差(光程差)的改变而发生了变化。

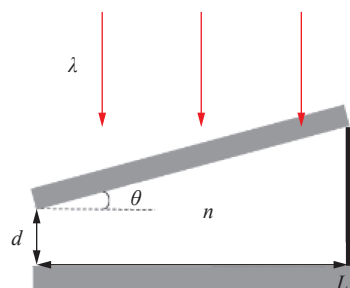
如图 3 所示, 图 3(a)给出了牛顿环干涉仿真实验中使用的牛顿环元件的结构示意图。该牛顿环元件由两个曲率半径分别为 R_1 和 R_2 的平凸透镜组成(R_2 取负值时表示平凹透镜), 两者的中心间隔为 d , 填充介质折射率为 n 。当 $R_1=10\text{ m}$, R_2 面近似为平面的牛顿环元件在红光和蓝光同时照射下的干涉图样和光强分布曲线, 如图 3(b) 所示。

可以看到, 牛顿环干涉条纹为环状分布, 图

样中心为暗纹, 且波长越长同干涉级次的条纹越大。多次改变参数观察干涉图样可知, 当间隔 $d=0$ 时, 不管透镜的曲率半径、填充介质折射率、入射波长如何变化, 干涉图样的中心始终为暗纹。通过该现象可引导学生寻找出原因, 即图样中心处对应的光程差始终为半个波长, 一直符合暗纹的产生条件。条纹数量的变化规律与劈尖干涉变化类似, 观测点处的光程差越大, 出现的条纹数量也越多。当间隔 d 变化时, 将出现条纹不断由图样中心冒出或缩进的现象, 生动的图像变化将吸引学生主动了解牛顿环干涉的物理规律。

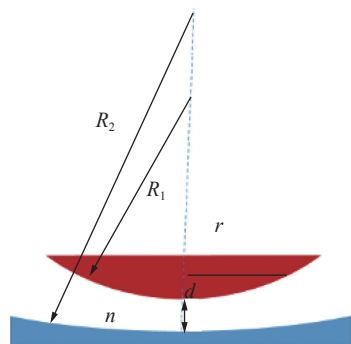


(a) 劈尖干涉仿真实验 App 界面



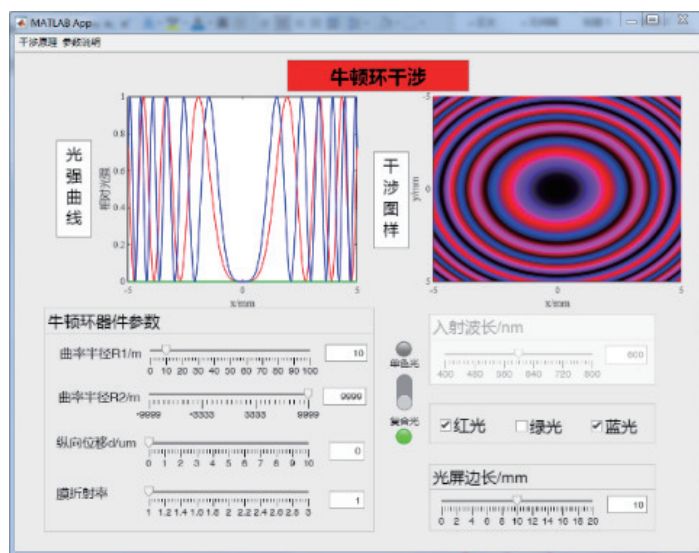
θ —劈尖角度;
 d —介质膜纵向位移;
 λ —入射光波长;
 n —介质膜折射率;
 L —劈尖长度。

图 2 劈尖干涉仿真实验 App 界面及结构示意图



R_1 、 R_2 —两透镜的曲率半径;
 d —两透镜间距;
 n —介质膜折射率。

(a) 牛顿环结构示意图



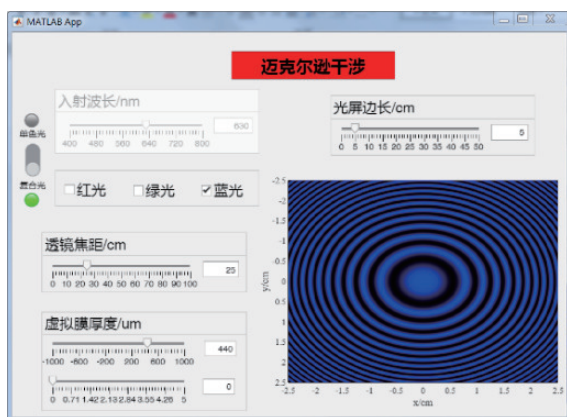
(b) 牛顿环干涉仿真实验 App 界面

图 3 牛顿环结构示意图及干涉仿真实验 App 界面

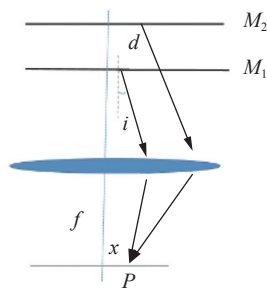
如图 4 所示，分别给出了默认条件下的迈克尔逊干涉仿真实验 App 界面和光路示意图。可见，迈克尔逊干涉图样为一组由内向外逐渐变密集的同心圆纹组成，图样中心为亮纹。当移动滑块使虚拟膜厚度变化时干涉图样出现圆纹吞吐的现象。导致这些现象产生的原因可总结为：迈克尔逊干涉的光程差 $2d\cos i$ 与膜厚度 d 、入射倾角 i 有关，条纹的干涉级次由图样中心向外逐渐减小，条纹宽度由角宽度 Δi 决定，中心处条纹的亮暗程度由光程差与入射波长的比值决定。当膜厚度增大时图样中心处对应的光程差变大，导致条纹干涉级次变大引起圆纹由内向外冒出，而条纹数量取决于观察屏中心和最外侧干涉级次的差值，厚度越大差值也越大，观察到的条纹也越多，同时导致圆纹宽度减小。当膜厚度为 0 时，干涉条纹消失。这些演示图像将有助于学生进一步

理解光程差在等倾干涉实验中的应用。

如图 5 所示，给出了白光照射下的法布里-珀罗干涉仿真实验 App 界面及光路图。可见，法布里-珀罗干涉图样由一组宽度非常狭窄且非常明亮的同心圆纹构成。这与图 4 展示的迈克尔逊干涉图样类似，但法布里-珀罗干涉圆纹更加细锐，究其原因在于迈克尔逊干涉是等振幅的双光束干涉，其光强因为相位差连续改变而变化缓慢；法布里-珀罗干涉是多光束干涉，其光强仅在非常小范围内的相位差处才出现最大值，而在其他的相位差处急剧递减。反射率越大，光强最大值时对应的相位差取值范围越小，产生的条纹越清晰明锐。法布里-珀罗干涉条纹细锐的这种特性广泛应用于光谱超精细结构分辨和测量领域。另外，由于这两种干涉均为等倾干涉，光程差表达形式完全相同，故两者圆纹分布、变化规律类似。



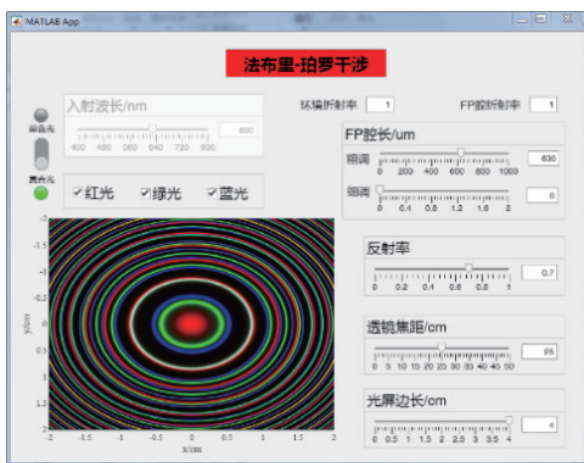
(a) 迈克尔逊干涉仿真实验 App 界面



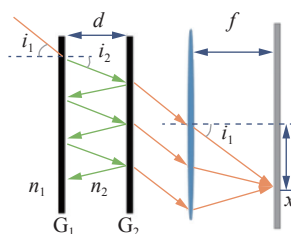
M_1 —定镜；
 M_2 —动镜；
 d —两镜距离；
 f —透镜焦距；
 i —入射倾角；
 x —观察屏中心到屏任一点 P 的距离。

(b) 迈克尔逊干涉光路示意图

图 4 迈克尔逊干涉仿真实验 App 界面及光路示意图



(a) 法布里-珀罗干涉仿真实验 App 界面



G_1 、 G_2 —内表面反射率为 ρ 的平行镜面；
 d —法布里-珀罗腔长；
 f —透镜焦距；
 i_1 —入射角度；
 i_2 —折射角；
 n_1 —周围环境折射率；
 n_2 —法布里-珀罗腔填充介质折射率。

(b) 法布里-珀罗干涉光路示意图

图 5 法布里-珀罗干涉仿真实验 App 界面及光路示意图

2.4 在线平台搭建

1) 在 App Designer 中利用 MATLAB Compiler 创建预部署 Web App, 将几个干涉仿真实验 App 集体打包生成 .ctf 文件;

2) 将 .ctf 文件拷贝到 MATLAB Web App Server 的 Open App Folder 文件夹中;

3) 点击 Open Home Page 启动 App。经过上述步骤, 就可以将 App 程序发布到本地 App Server, 学生可以通过浏览器访问和运行 Web 应用程序, 而无需任何配置。如果要布置在公共网路, 则利用工具设置 Http 协议。具体步骤可参考文献 [14]。

3 结束语

利用 MATLAB App Designer, 设计了包含杨氏双缝、劈尖、牛顿环、迈克尔逊、法布里-珀罗干涉 5 个光学干涉实验在内的仿真教学平台, 实现了不同输入条件下的干涉图样或光强分布曲线的动态展示, 这将有利于增强学生对光学干涉现象产生机制的理解, 激发学生对物理规律深入了解的求知欲, 同时也有助于在线学习以及混合式课堂教学的开展。

参考文献

- [1] 江萍, 杨华军, 郭劲轶, 等. 光学课程仿真与案例式实验教学方法探究[J]. *实验室研究与探索*, 2022, 41(7): 175-179.
- [2] 哈斯乌力吉, 董永康, 巴德欣, 等. “物理光学”课程虚拟仿真实验平台的研究[J]. *电气电子教学学报*, 2020, 42(6): 116-119.
- [3] 李瑞, 刘鑫鹏, 徐林轩, 等. 计算机仿真在光学教学中的应用[J]. *大学物理实验*, 2020, 33(5): 113-117.
- [4] 胡俊微, 帅晓红. Matlab在物理教学中应用的研究综述[J]. *物理通报*, 2022, 41(4): 157-161.
- [5] 周群益, 莫云飞, 周丽丽, 等. 用MATLAB程序实现牛顿环的动画演示[J]. *物理通报*, 2021, 40(11): 130-133.
- [6] 张兴坊, 刘凤收, 闫昕, 等. 基于MATLAB GUI的杨氏双缝干涉仿真动画设计[J]. *高师理科学刊*, 2021, 41(9): 98-101.
- [7] 郑素珍, 王凡, 苏娟. 基于Matlab的大学物理教学辅助系统设计[J]. *教育现代化*, 2019, 6(87): 222-227.
- [8] 李媛, 侯宏录, 李兰兰. 基于MATLAB GUI的多光学实验仿真平台研究[J]. *国外电子测量技术*, 2018, 37(10): 25-30.
- [9] 岑冠军, 张昕, 杨德贵, 等. 基于MATLAB Web App的数学实验在线课堂的设计与实践[J]. *实验技术与管理*, 2021, 38(4): 36-41.
- [10] 刘小琪, 吴颖. 基于App Designer开发的傅科摆仿真模拟[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2022, 40(1): 164-167.
- [11] 苏彦涛, 宋家琪, 于永芹. MATLAB App Designer在物理机械波可视化教学中的运用[J]. *创新创业理论与实践*, 2022, 5(2): 25-27.
- [12] 臧营邦, 刘旭阳, 王加敏. 基于MATLAB App Designer的最优化方法辅助教学设计[J]. *电脑与信息技术*, 2022, 30(1): 81-83.
- [13] 张雨亭, 杨超, 印茂伟, 等. 简易示波器设计与实现[J]. *实验科学与技术*, 2021, 19(6): 32-37.
- [14] 于欣杰, 王美姣, 赵加强. 基于MATLAB App Designer光学实验虚拟仿真系统的设计与实现[J]. *实验科学与技术*, 2022, 20(1): 45-50.
- [15] 姚启钧. 光学教程[M]. 5版. 华东师范大学教材编写组改编. 北京: 高等教育出版社, 2014.

编辑 张俊