

基于MATLAB的牛顿环图样仿真设计

管青汶¹, 陈贵宾^{1,2}, 边心田^{1,2*}

¹淮阴师范学院物理与电子电气工程学院, 江苏 淮安

²江苏省现代检测技术与智能系统重点建设实验室, 江苏 淮安

收稿日期: 2025年11月26日; 录用日期: 2025年12月31日; 发布日期: 2026年1月8日

摘要

本文针对传统牛顿环实验中透镜类型单一, 难以满足学生快速观察不同透镜干涉图样的需求, 提出一种结合多种透镜的干涉图样仿真系统。基于等厚干涉理论, 采用MATLAB GUI构建交互式仿真平台, 通过调节入射光波长、透镜结构(例如曲率半径、圆锥角、非球面系数)等多种参数, 准确生成不同类型透镜的交互式仿真干涉图样, 为研究者学习和教学研究提供了便利。

关键词

牛顿环, 类牛顿环, 等厚干涉, MATLAB仿真

Simulation Design of Newton's Rings Pattern Based on MATLAB

Qingwen Guan¹, Guibin Chen^{1,2}, Xintian Bian^{1,2*}

¹School of Physics and Electronic Electrical Engineering, Huaiyin Normal University, Huai'an Jiangsu

²Key Laboratory of Modern Testing Technology and Intelligent Systems of Jiangsu Province, Huai'an Jiangsu

Received: November 26, 2025; accepted: December 31, 2025; published: January 8, 2026

Abstract

To address the limitations of traditional Newton's rings experiments—such as the use of a single type of lens, which fails to meet students' needs for quickly observing interference patterns of different lenses—this study proposes an interference pattern simulation system integrating multiple lens types. Based on the theory of equal-thickness interference, an interactive simulation platform was constructed using MATLAB GUI. By adjusting various parameters including incident light

*通讯作者。

wavelength and lens structure (e.g., radius of curvature, cone angle, aspheric coefficient), interactive simulated interference patterns of different lens types were accurately generated. This system provides convenience for researchers in learning, teaching, and research activities.

Keywords

Newton's Rings, Quasi-Newton's Rings, Equal Thickness Interference, MATLAB Simulation

Copyright © 2026 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/>



Open Access

1. 引言

牛顿环作为典型的等厚干涉现象，广泛应用于平凸透镜曲率半径的测量[1]、光学元件面型检测[2]、玻璃弹性的测量[3]、薄膜厚度的测量[4]-[6]及大型望远镜镜面共聚焦[7]等问题。学生进行的传统牛顿环实验主要依赖于实体的透镜，而多数实验室中仅配备由平凸透镜与平板玻璃组成的牛顿环仪，存在透镜类型固定、参数调节受限等局限，使得学生难以直观地观察到牛顿环及类牛顿环的干涉图样[8]。此外，实验室中的接触式测量易造成光学表面损伤[9]，长此以往会使得透镜形成的干涉图样存在较大的误差。随着计算机技术的发展，模拟仿真技术越发完善，基于 MATLAB 构建虚拟仿真系统成为突破上述局限的有效手段，可实现多种参数动态调控、无损仿真与直观性教学。已存在大量学者对其进行相关的探索研究，从核心聚焦平凸透镜 - 平板玻璃单一结构的光强分布计算，并通过 MATLAB 实现牛顿环实验的仿真与分析生成了基本的干涉图样[10]到针对白光场景下牛顿环干涉的 MATLAB 仿真模型优化，弥补了单色光仿真的局限[11]，通过简化计算模型提升图样生成效率，对仿真流程有了进一步优化[12]，并初步搭建了牛顿环虚拟仿真实验平台，实现了传统牛顿环的基础参数的调节功能[13]，实现了通过 MATLAB 程序对牛顿环的干涉条纹的动态演示[14]；在教学应用层面，不仅探讨 MATLAB 仿真技术在大学物理光学实验教学中的价值，证实了仿真模型能够加深抽象概念的理解[15]，还以“牛顿环干涉”为例展开光学实验仿真与可视化教学研究[16]。因此，设计具有多种透镜类型的交互式仿真系统，对理解光学干涉理论与推进直观性教学具有重要现实意义。

现有牛顿环实验仿真研究仍存在不足，难以满足多元化教学需求。一方面，教学仿真多聚焦于单一的平凸透镜—平板玻璃结构类型，未涉及其他透镜类型[10]-[12]；一些研究者虽设计变形牛顿环实验仿真平台，但未突破单一结构限制[17]。另一方面，类牛顿环的可视化仿真还存在一些不足，有文献研究圆锥面 - 抛物面[18]、正 n 棱锥 - 平板玻璃组合的类牛顿环干涉图样[19]，展示了在特定参数下的干涉图样，部分文献分析牛顿环装置的若干变异结构[8]，或开展等厚干涉实验教学拓展，却未形成可交互的仿真系统。此外，非球面镜相关的仿真与参数调节存在不足，有基于 Mathematica 实现牛顿环干涉图样的可视化交互，虽补充了交互功能[20]，但未涉及非球面透镜，且工具与 MATLAB 存在差异。上述文献的研究思路和研究方法都给予本文重要的启发，同时也凸显出构建集成多透镜类型、高交互性的仿真系统，是填补当前研究空白、满足教学需求的关键。

本文建立了平凸透镜与平板玻璃、圆锥透镜与平板玻璃及平凸透镜与非球面镜的统一干涉理论模型，并在此基础上设计出具有交互式的 MATLAB 模拟仿真平台，实现多种参数实时调控与图样显示。学习研究者可以通过仿真实验进行直观地学习。

2. 牛顿环干涉原理

2.1. 平凸透镜与平板玻璃模型

曲率半径为 R 的平凸透镜与平板玻璃平行放置, 中间形成空气膜(折射率 $n=1$), 空气薄膜厚度 $e(r)$ 随径向距离 r 增大而增大, 中心($r=0$)厚度为 d_0 , 具体装置示意图见图 1。

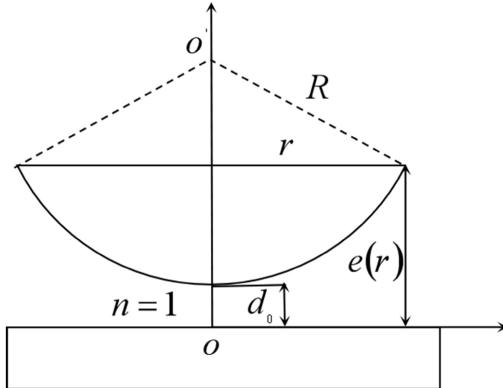


Figure 1. Schematic diagram of the Newton's rings apparatus
图 1. 牛顿环装置示意图

根据几何关系, 已知平凸透镜方程为

$$R^2 = r^2 + (R - e(r))^2$$

展开后忽略高阶小项 e^2 , 可知空气薄膜厚度为

$$e(r) = \frac{r^2}{2R} + d_0$$

考虑半波损失, 得总光程差为

$$\delta = 2ne(r) + \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} + 2d_0$$

干涉条纹明(暗)环条件由光程差决定,

明纹光程差满足 $\Delta\delta = k\lambda (k=1,2,3,\dots)$, 得

$$r_{\text{明}} = \sqrt{R \left(\left(k - \frac{1}{2} \right) \lambda - 2d_0 \right)}$$

暗纹光程差满足 $\Delta\delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2} (k=0,1,2,\dots)$, 得

$$r_{\text{暗}} = \sqrt{R(k\lambda - 2d_0)}$$

光强为

$$I(r) = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi\delta}{\lambda} \right) = 4I_0 \cos^2 \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} + 2d_0 \right) \right\}$$

2.2. 圆锥透镜与平板玻璃模型

圆锥角为 θ 的圆锥透镜的锥面与平板玻璃中间形成空气膜($n=1$), 空气膜厚度为 $e(r)$ 随径向距离 r

线性增大(圆锥面斜率恒定), 中心厚度为 d_0 。当光线由光密介质射向光疏介质时, 入射角增加到一定程度, 则会发生全反射, 无法显示干涉图样。此外, 圆锥角 θ 需适宜, 入射角需要近似垂直入射, 具体装置示意图见图 2。

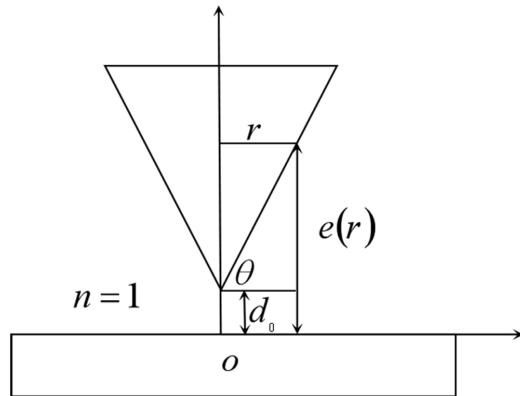


Figure 2. Schematic diagram of the quasi-Newton's rings apparatus composed of an axicon and a flat glass plate
图 2. 圆锥透镜和平板玻璃组合的类牛顿环装置示意图

根据几何关系可知, 可知空气膜厚度为

$$e(r) = r \tan \theta + d_0$$

考虑半波损失, 得总光程差为

$$\delta = 2ne(r) + \frac{\lambda}{2} = 2r \tan \theta + \frac{\lambda}{2} + 2d_0$$

干涉条纹明(暗)环条件由光程差决定,

明纹光程差满足 $\Delta\delta = k\lambda (k=1,2,3,\dots)$, 得

$$r_{\text{明}} = \frac{1}{2 \tan \theta} \left(\left(k - \frac{1}{2} \right) \lambda - 2d_0 \right)$$

暗纹光程差满足 $\Delta\delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2} (k=0,1,2,\dots)$, 得

$$r_{\text{暗}} = \frac{1}{2 \tan \theta} (k\lambda - 2d_0)$$

光强为

$$I(r) = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi\delta}{\lambda} \right) = 4I_0 \cos^2 \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \left(2r \tan \theta + \frac{\lambda}{2} + 2d_0 \right) \right\}$$

2.3. 平凸透镜与非球面镜模型

曲率半径为 R 的平凸透镜与非球面系数为 α 的非球面镜组合, 中间的空气薄膜厚度 $e(r)$ 为平凸透镜的凹陷深度与非球面镜的凸起高度的差值, 中心厚度为 d_0 , 具体装置示意图见图 3。非球面镜的凸起高度由非球面系数 α 调控, 当 $\alpha > 0$ 时, 空气薄膜加速变薄, 导致光程差加速减小, 环纹间距随 r 增大而缩小, 条纹向内收缩; 当 $\alpha < 0$ 时, 空气薄膜加速变厚, 导致光程差加速增大, 环纹间距随 r 增大而扩大, 条纹向外扩张; $\alpha = 0$ 时, 空气薄膜厚度均匀, 光程差恒定, 无干涉条纹存在。

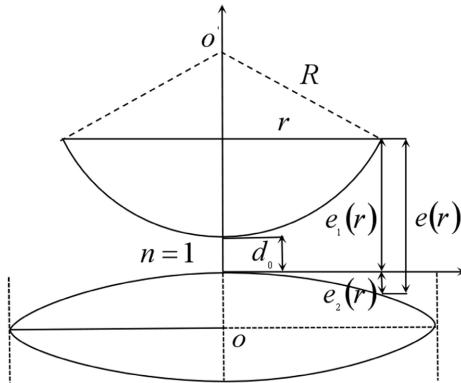


Figure 3. Schematic diagram of the quasi-Newton's rings apparatus composed of a plano-convex lens and an aspherical mirror
图 3. 平凸透镜和非球面镜组合的类牛顿环装置示意图

由几何关系, 可知平凸透镜凹陷深度为

$$e_1(r) = \frac{r^2}{2R} + d_0$$

非球面镜的凸起高度为

$$e_2(r) = \frac{r^2}{2R} \left(1 + \alpha \frac{r^2}{R^2} \right)$$

根据几何关系, 可知空气膜厚度为

$$e(r) = e_1(r) - e_2(r) + d_0 = -\frac{\alpha r^4}{2R^3} + d_0$$

考虑半波损失, 得总光程差为

$$\delta = 2ne(r) = -\frac{\alpha r^4}{R^3} + \frac{\lambda}{2} + 2d_0$$

干涉条纹明(暗)环条件由光程差决定,

明纹光程差满足 $\Delta\delta = k\lambda (k = 1, 2, 3, \dots)$, 得

$$r_{\text{明}} = \sqrt[4]{\frac{R^3}{\alpha} \left(\left(\frac{1}{2} - k \right) \lambda + 2d_0 \right)}$$

暗纹光程差满足 $\Delta\delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2} (k = 0, 1, 2, \dots)$, 得

$$r_{\text{暗}} = \sqrt[4]{\frac{R^3}{\alpha} (2d_0 - k\lambda)}$$

光强为

$$I(r) = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi\delta}{\lambda} \right) = 4I_0 \cos^2 \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \left(-\frac{\alpha r^4}{R^3} + \frac{\lambda}{2} + 2d_0 \right) \right\}$$

3. 交互式仿真系统设计

牛顿环实验是光学中波动性的核心实验, 其形成干涉条纹的图样与光学元件几何参数、入射光波波长及空气薄膜厚度等物理量密切相关。该交互式牛顿环仿真界面采用“理论模型 - 算法实现 - MATLAB

交互设计”三层递进结构,各层级功能独立且协同工作,实现多结构牛顿环模型的可调节与可视化,既保障仿真结果的科学性与严谨性,又提升了操作的便捷性,为光的干涉理论教学提供高效辅助工具。

在理论模型层,以光的薄膜干涉理论为核心,针对平凸透镜-平板玻璃、圆锥透镜-平板玻璃、平凸透镜-非球面镜三种结构构建物理模型,明确关键物理量的定量关系,得到不同模型中空气膜表达式。与此同时,考虑光从光疏介质到光密介质反射时产生半波损失,推导总光程差公式,并基于光的干涉叠加原理得到光强分布公式,为整个仿真设计提供坚实的数据理论依据。在算法实现层中,将上层结构中推导所得的数学表达式转化为 MATLAB 可执行代码,通过相位差计算等三大模块实现从抽象物理量到可视化图像的转化。而在交互控制层,系统以功能分区,依据逻辑清晰原则,按照如图 4 所示的 GUI 设计流程图,构建“参数输入-实时反馈-结果输出”的交互闭环,将抽象的理论数据迅速转变为易于学生理解的可视化干涉图样。

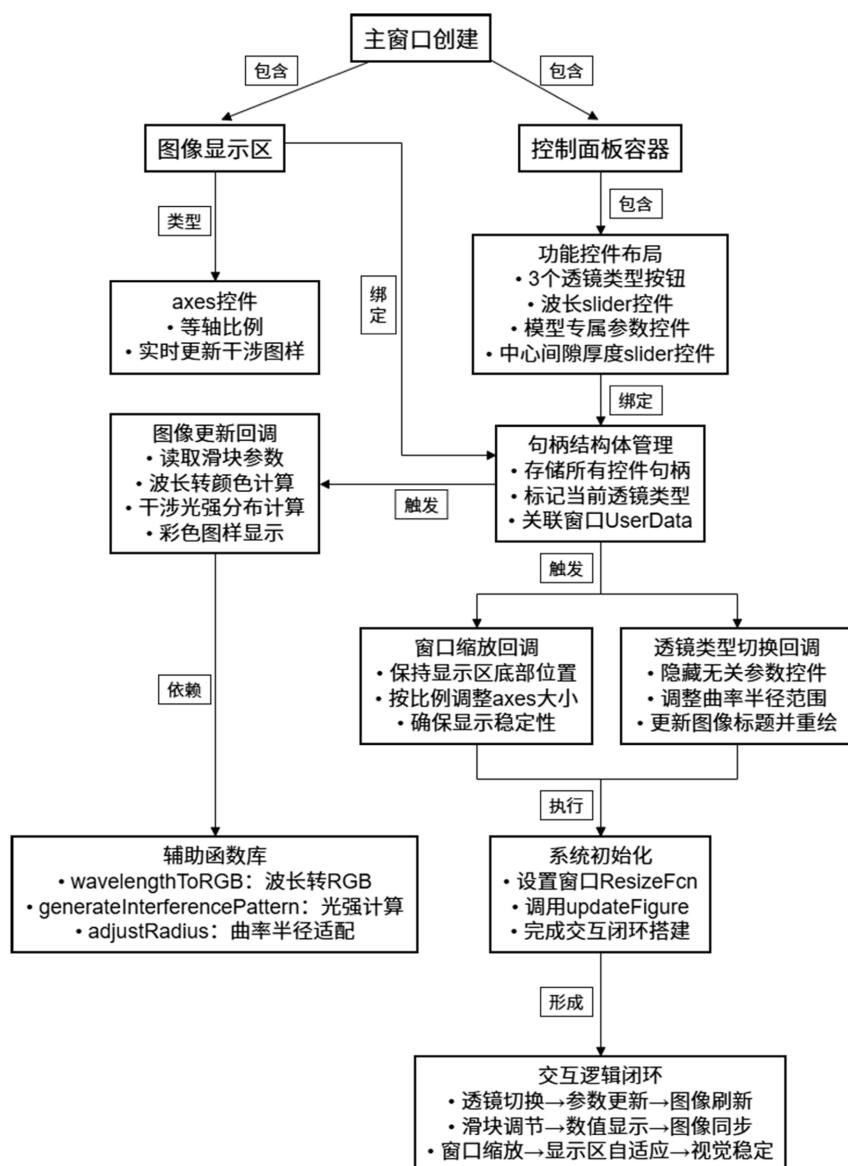


Figure 4. GUI design flow chart

图 4. GUI 设计流程图

仿真界面大体上分为“参数控制区”与“干涉图样显示区”两区域，前者负责模型的选择与参数的调节，后者实现干涉条纹动态显示，两区域间通过回调函数(如 `selectLensType`、`updateFigure`)实现控件之间的协作，确保在参数调节后能够迅速进行光强计算并对图样进行更新，提升交互效率。

参数控制区以“共有参数 + 特有参数”的布局分布，大量使用 MATLAB 的 UI 与 `axes` 控件，对参数的控制均处于 UI 控件内。通过 3 个 `pushbutton` 控件分别对应三种模型结构实现了模型的选择，每当点击不同模型的按钮，会触发 `selectLensType` 回调函数，自动隐藏与当前模型无关的参数控件。这种调节形式不仅能够使学生明确当前仿真对象、了解不同模型的影响参数，还使界面更加整洁、清晰。在共有参数调节模块中，首先在调节入射光波长时，配合 `text` 控件与 `wavelengthToRGB` 函数，不仅能实时改变波长数值，还能够迅速计算出波长对应的颜色，实现干涉图样颜色的实时变化。而在特有参数调节模块中，参数均通过 `slider` 控件进行调节，在平凸透镜中，以“曲率影响光程差的变化率”为核心逻辑，通过改变曲率半径的 `slider` 影响条纹间距；在圆锥透镜中，以“圆锥角影响膜厚的线性变化率”为核心逻辑，通过调节圆锥角 `slider` 改变空气薄膜厚度的线性斜率，从而影响条纹的疏密程度；在平凸透镜 - 非球面镜中，以“系数正负改变膜厚分布”为核心逻辑，通过调节非球面系数 `slider`，影响非球面镜凸起程度，进而影响条纹的移动。此外，为了在不同模型的仿真过程中，使图样具有显著的变化，本设计针对不同模型对曲率半径进行了相应的调节，例如选择“平凸透镜”时，曲率半径的范围为 2.5~25 m；切换至“平凸 - 非球面镜”时，曲率半径的范围会调节为 0.05~0.15 m，为了在这个变化过程中确保参数的平滑过渡，本设计还添加了 `adjustRadius` 函数。

图样显示区则基于 `axes` 控件实现干涉条纹动态显示，在调节参数或切换模型的同时，触发相应的 `updateFigure` 回调函数，重新计算参数并更新图样并同步调节干涉图样下方的实时参数，确保了该仿真界面的及时性与直观性。

3.1. 核心代码

3.1.1. 坐标网格的生成

```
simRadius = 5e-3; %仿真区域半径
sampleNum = 500; %采样点数(500 × 500)
[X, Y] = meshgrid(linspace(-simRadius, simRadius, sampleNum));
r = sqrt(X.^2 + Y.^2); %径向距离 r
```

3.1.2. 空气薄膜厚度计算

```
d0 = round(get(slider_d0, 'Value')) * 1e-9; %中心厚度
R = get(slider_r, 'Value'); %曲率半径
theta = get(slider_theta, 'Value') * pi/180; %圆锥角
alpha = get(slider_alpha, 'Value'); %非球面系数
% 根据透镜类型计算空气膜厚度 e(r)
switch lensType
    case 'standard' %平凸透镜
        e = r.^2/(2 * R) + d0;
    case 'cone' %圆锥透镜
        e = r * tan(theta) + d0;
    case 'aspheric' %非球面镜
        e_sphere = r.^2 / (2 * R); %球面厚度
```

```

e_aspheric = e_sphere.* (1 + alpha .* (r.^2 / R.^2)); %非球面修正项
e = e_sphere - e_aspheric + d0; %实际空气膜厚度
end

```

3.1.3. 光程差矩阵构建

```

lambda = round(get(slider_wavelength, 'Value')) * 1e-9; %获取入射光波长
opticalPath = 2 * e + lambda/2; %计算总光程差(含半波损失)

```

3.1.4. 强度矩阵生成

```

phase = 2 * pi * opticalPath/lambda; %计算相位差
intensity = 0.5 * (1 + cos(phase)); %计算归一化光强
grayImg = imadjust(intensity, [0.05 0.95], [0 1]); %增强条纹对比度, 避免过暗或过亮

```

3.1.5. 图像渲染

```

rgbColor = wavelength2rgb(round(lambda * 1e9));
%合成彩色干涉图像
colorImg = cat(3, grayImg * rgbColor(1), ...
grayImg * rgbColor(2), ...
grayImg * rgbColor(3));
%在指定坐标轴中显示图像
imshow(colorImg, 'Parent', targetAxes, ...
'XData', [-simRadius simRadius], 'YData', [-simRadius simRadius], ...
'Border', 'tight', 'InitialMagnification', 100);
axis(targetAxes, 'tight', 'equal'); %保持坐标轴等比例, 避免条纹畸变
box(targetAxes, 'on'); %显示坐标轴边框

```

4. 结果分析

基于上述设计, 对三种透镜模型进行仿真, 通过调节关键参数, 分析干涉图样的特征规律。由平凸透镜 - 平板玻璃构成的牛顿环仪, 生成如图 5、图 6 所示交互式仿真界面。

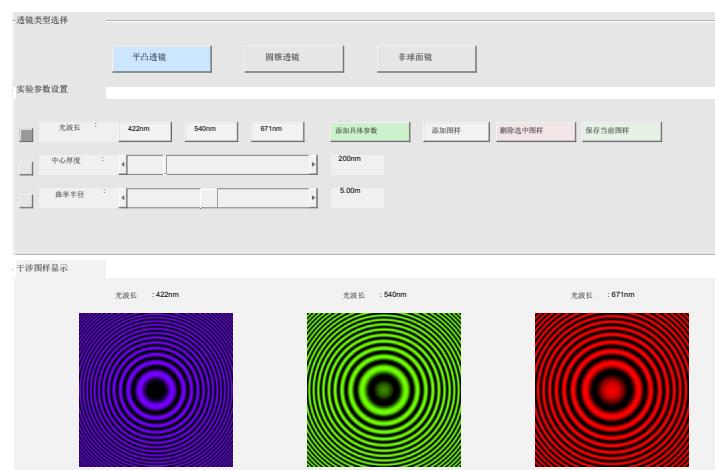


Figure 5. Simulation of Newton's rings in plano-convex lens-flat glass structure (wavelength variation)
图 5. 平凸透镜 - 平板玻璃结构牛顿环的仿真(波长变化)

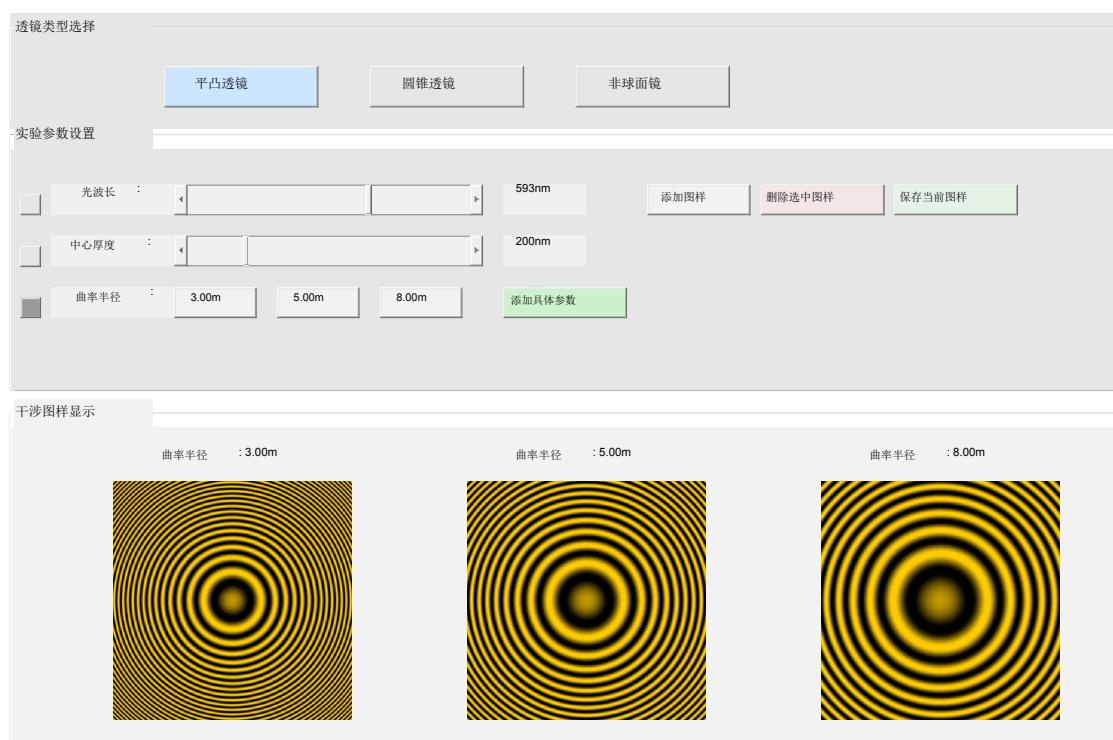


Figure 6. Simulation of Newton's rings in plano-convex lens-flat glass structure (curvature radius variation)
图 6. 平凸透镜 - 平板玻璃结构牛顿环的仿真(改变曲率半径)

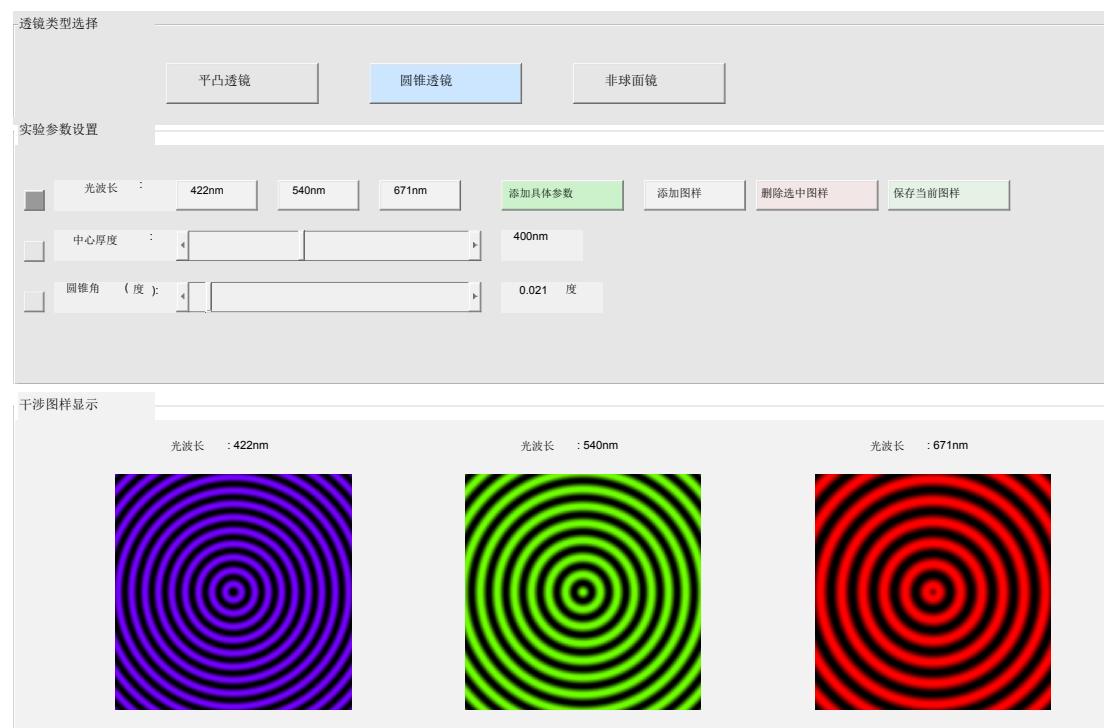


Figure 7. Simulation of Quasi-Newton's rings in axicon-flat glass structure (wavelength variation)
图 7. 圆锥透镜 - 平板玻璃结构的类牛顿环仿真(波长变化)

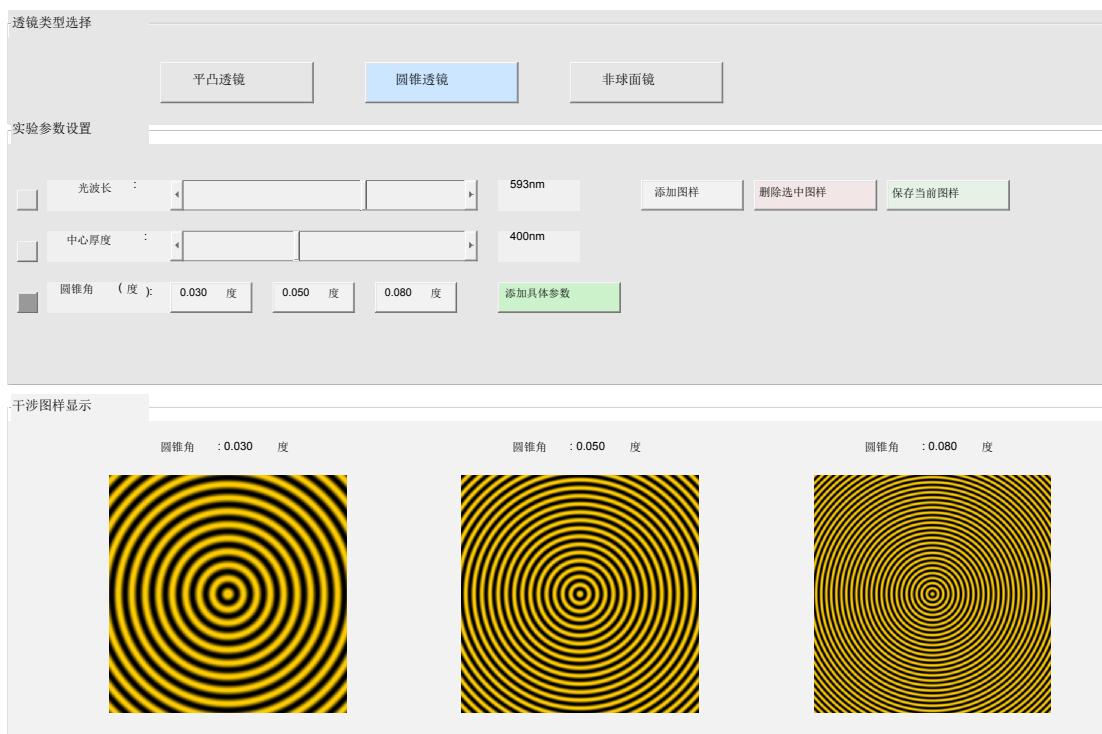


Figure 8. Simulation of Quasi-Newton's rings in axicon-flat glass structure (axicon angle variation)
图 8. 圆锥透镜 - 平板玻璃结构的类牛顿环仿真(改变圆锥角)

由图 7 可以看出, 该类牛顿环干涉条纹为等间距圆环条纹, 从中心到边缘, 环间距基本不变。固定该透镜中的圆锥角的值以及中心膜厚, 仅调节入射波长使之由紫光至红光, 能够发现波长越长, 同级别暗环半径越大。固定该透镜模型中的入射波长以及中心膜厚, 仅调节增大圆锥角的大小, 如图 8 所示, 能够发现圆锥角越大, 同级别暗环半径越小, 环间距越小。

圆锥透镜模型的应用拓展:

1) 系统放大率的校准: 将某一固定参数的圆锥透镜模型生成的等间距条纹作为标准, 将其相邻暗环间距 $\Delta r_{\text{标准}}$ 定义为标准值, 在实验中测量相邻两暗条纹的实际间距 $\Delta r_{\text{实际}}$, 通过

$$M = \frac{\Delta r_{\text{实际}}}{\Delta r_{\text{标准}}}$$

计算可得系统的放大率, 从而用于校准光学测量系统的放大率误差。

2) 锥面角度的检测: 对于一个未知的圆锥透镜, 可以通过拍摄其实验中实际生成的干涉条纹, 测量相邻暗环的间距, 并通过前文所示的暗纹半径公式的计算推导, 得到实际测量所得的圆锥角, 与仿真系统中标准的圆锥角进行对比从而实现了非接触式的锥面角度检测, 避免了传统机械测量对透镜表面的损伤。

由平凸透镜 - 非球面镜构成的类牛顿环仪, 生成如图 9 所示交互式仿真界面。

由图 9 平凸透镜 - 非球面镜结构的类牛顿环仿真(非球面系数变化)可以看出, 该类牛顿环干涉条纹从中心到边缘, 环间距逐渐减小。固定该透镜模型中的曲率半径值以及中心膜厚, 在 $\alpha > 0$ 的条件下, 非球面镜表面凸于理想球面, 模拟被测件中心区域的正偏差, 调节增大非球面系数, 能够发现非球面系数越大, 同级别暗环半径越小, 环间距越小; 在 $\alpha < 0$ 的条件下, 非球面镜表面凹于理想球面, 模拟被测件

边缘区域的负偏差, 调节减小非球面系数, 能够发现非球面系数越小, 同级别暗环半径越小, 环间距越小。

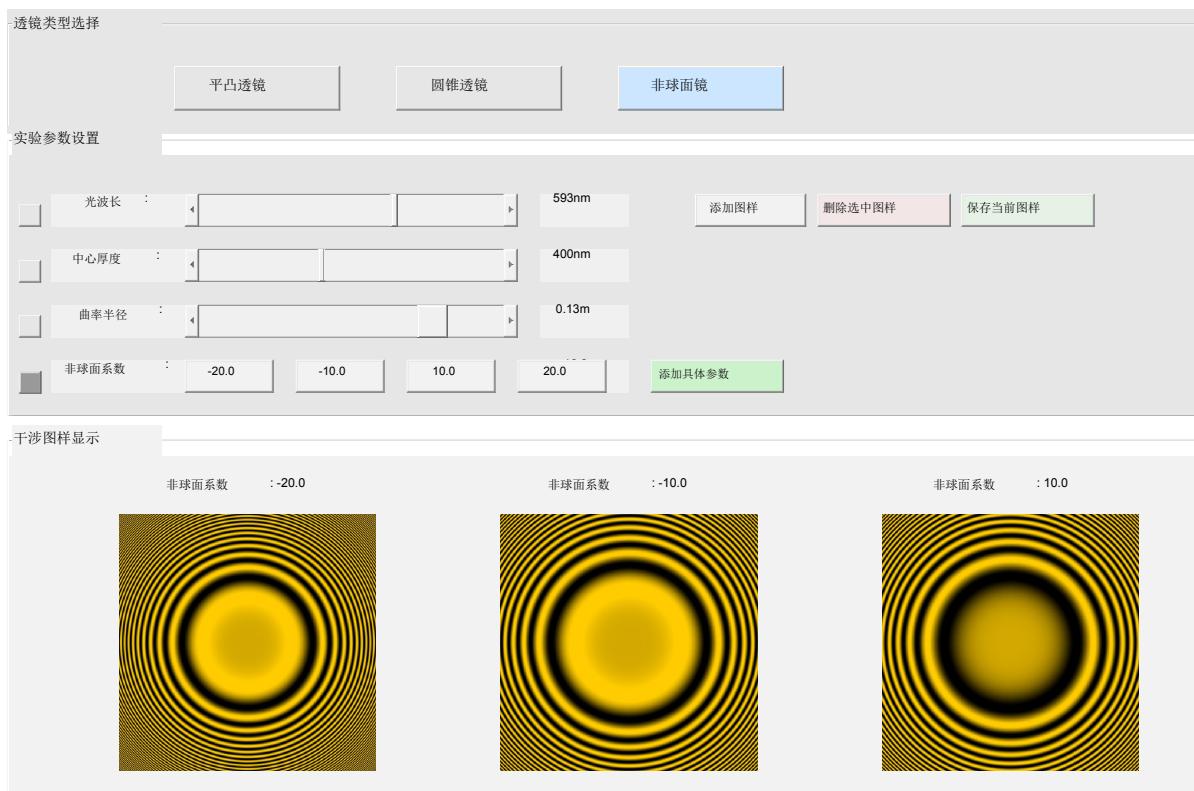


Figure 9. Simulation of Quasi-Newton's rings in plano-convex lens-aspherical mirror structure (aspheric coefficient variation)
图 9. 平凸透镜 - 非球面镜结构的类牛顿环仿真(非球面系数变化)

非球面镜模型的应用拓展: 通过引入“零位检测”概念, 能够探究干涉条纹与面型偏差的关联, 将被测非球面镜与标准原件完全匹配时产生的干涉条纹定义为零位状态, 当存在一定面型偏差时, 条纹发生偏移, 通过对比实际条纹与仿真值的偏移程度, 可定量计算被测件的面形偏差, 将仿真系统转化为非球面镜检测的辅助分析工具。

5. 结论

本文设计的基于 MATLAB 的牛顿环仿真系统实现了三种干涉模型的可视化, 具有以下特点:

- 1) 交互性强: 通过仿真实时调整入射光波长、曲率半径等参数, 动态观察干涉图样变化, 将多种类型透镜的干涉图样可视化、教学适用性强。该系统可作为光学教学的辅助工具, 帮助学生直观地了解不同模型的干涉图样。
- 2) 扩展性好: 可基于本仿真界面, 进一步添加更多模型, 例如双缝干涉、薄膜干涉, 还可以添加傅里叶变换等数据分析功能, 更加有效验证仿真结果的有效性和准确性。

本文设计的交互式仿真界面着重于展示干涉图样的动态变化, 在代码编写与数据计算中对透镜进行了一定的理想化, 未考虑透镜面型精度, 例如表面平整度等的限制。未来可以在本文已有的仿真界面上进一步研究透镜的面型精度, 例如通过对空气薄膜厚度公式中引入 Zernike 多项式描述透镜表面的系统

性面形误差, 模拟加工中出现的彗差、球差等形式, 使得干涉图样的条纹发生畸变, 以及通过添加随机噪声来模拟调节透镜表面的粗糙程度, 降低条纹边缘的清晰度, 使干涉图样出现局部断裂的条纹等, 能够直观观察面型精度对干涉图样的影响, 提升仿真系统的实用性。不仅能帮助学生进一步了解抽象的概念和原理, 接受相关的知识, 还可以进一步拓展仿真系统为面型检测等提供虚拟检测平台。

基金项目

江苏省高等学校大学生实践创新训练计划项目(X202510323092)。

参考文献

- [1] 高文慧, 张欣, 张晶, 等. 基于牛顿环测量曲率半径实验的课程思政教学实践[J]. 物理实验, 2025, 45(1): 44-49.
- [2] 张鑫. 大口径拼接非球面镜曲率一致性高精度检测技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2023.
- [3] 王必利. 利用牛顿环实验测定玻璃的弹性模量[J]. 大学物理实验, 2012, 25(2): 44-46.
- [4] Ramadan, W.A., Wahba, H.H. and El-Tawary, A.S. (2020) Enhanced Short Temporal Coherence Length Measurement Using Newton's Rings Interference. *Optics & Laser Technology*, **127**, Article 106192. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106192>
- [5] Abd El-Sadek, I.G., Ramadan, W.A., Nawareg, M. and El-Tawary, A.S. (2019) Variable Wavelength Newton's Rings Formed in Transmission for Measuring Radius of Curvature and Sub-Micrometric Thin Film Thickness. *Indian Journal of Physics*, **94**, 1271-1277. <https://doi.org/10.1007/s12648-019-01570-z>
- [6] Wahl, K.J., Chromik, R.R. and Lee, G.Y. (2008) Quantitative *in Situ* Measurement of Transfer Film Thickness by a Newton's Rings Method. *Wear*, **264**, 731-736. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.04.009>
- [7] 左恒, 张茜, 张勇. 基于等厚干涉的拼接镜面边缘传感器研究[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 117-124.
- [8] 周国全. 牛顿环干涉装置的若干变异结构[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000(5): 110-112.
- [9] 郭长立, 周国全. 非接触式及浅近切割式牛顿环装置的工作原理[J]. 西安科技大学学报, 2005(2): 260-262.
- [10] 冯明春, 王玉杰. 牛顿环实验的 MATLAB 仿真及分析研究[J]. 大学物理实验, 2019, 32(5): 74-78.
- [11] 王蕴杰. 基于 Matlab 的牛顿环白光干涉实验仿真[J]. 大学物理实验, 2014, 27(4): 97-99.
- [12] 崔海瑛, 吴春梅, 赵大伟, 等. 牛顿环实验的 MATLAB 仿真[J]. 大庆师范学院学报, 2016, 36(3): 14-16.
- [13] 曾立, 樊东鑫, 陈凌珍, 等. 基于 MATLAB 的牛顿环虚拟仿真实验平台设计与开发[J]. 大学物理实验, 2018, 31(6): 104-107.
- [14] 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(11): 130-133.
- [15] 师青梅, 常宇. Matlab 仿真技术在大学物理光学实验教学中的应用[J]. 中国电力教育, 2012(15): 78-79+87.
- [16] 王贤平, 周华清, 桑明煌. 《光学》实验仿真及可视化教学研究——以“牛顿环干涉”为例[J]. 鞍山师范学院学报, 2015, 17(6): 36-38.
- [17] 郭中华, 郑隆举. 变形牛顿环装置干涉结果的仿真模拟[J]. 大学物理实验, 2013, 26(2): 77-81.
- [18] 张丽颖, 顾菊观, 徐海斌. 圆锥面与抛物面组合的类牛顿环干涉图样研究[J]. 物理通报, 2023(8): 15-22.
- [19] 张丽颖, 顾菊观, 徐海斌. 正 n 棱锥与平板玻璃组合的类牛顿环干涉图样研究[J]. 广西物理, 2023, 44(1): 36-39.
- [20] 张丽颖, 顾菊观. 基于 Mathematica 的牛顿环干涉图样可视化交互研究[J]. 大学物理实验, 2021, 34(4): 81-86.