

Mathematica在《光学原理》课程的可视化辅助教学应用

胡征达*, 杨国锋, 席曦, 王继成, 孔艳

江南大学理学院, 江苏 无锡

收稿日期: 2025年4月23日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

《光学原理》课程作为光学相关专业的核心基础课程, 其内容涵盖了光的干涉、衍射、偏振、光的电磁理论以及光在不同介质中的传播特性等, 具有理论抽象、公式推导复杂等特点。传统教学模式下, 学生对课程内容的理解和掌握存在较大难度, 学习兴趣和积极性不高等问题。本文探讨了利用Mathematica软件的可视化功能辅助《光学原理》课程教学的改革方法, 通过将抽象的物理概念和复杂的数学公式转化为直观的图形和动画, 降低学生的学习难度, 提高教学效果。

关键词

光学原理, Mathematica, 可视化, 辅助教学

Application of Mathematica in Visualized Auxiliary Teaching of the Course “Principles of Optics”

Zhengda Hu*, Guofeng Yang, Xi Xi, Jicheng Wang, Yan Kong

School of Science, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu

Received: Apr. 23rd, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

As a core basic course for optics-related majors, the course “Principles of Optics” covers the interference, diffraction, polarization of light, the electromagnetic theory of light, and the propagation

*通讯作者。

文章引用: 胡征达, 杨国锋, 席曦, 王继成, 孔艳. Mathematica 在《光学原理》课程的可视化辅助教学应用[J]. 教育进展, 2025, 15(5): 1239-1245. DOI: 10.12677/ae.2025.155895

characteristics of light in different media. It is characterized by abstract theories and complex formula derivations. Under the traditional teaching mode, students have great difficulties in understanding and mastering the course content, and there are problems such as low learning interest and enthusiasm. This paper explores the reform method of using the visualization function of Mathematica software to assist the teaching of the course "Principles of Optics". By transforming abstract physical concepts and complex mathematical formulas into intuitive graphics and animations, it reduces students' learning difficulties and improves the teaching effect.

Keywords

Principles of Optics, Mathematica, Visualization, Auxiliary 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/>



Open Access

1. 引言

《光学原理》课程是光学及相关研究生专业的核心课程，其内容涉及光的基本性质、光的干涉、衍射、偏振以及光的电磁理论等多个方面[1]。这些内容不仅理论性强、概念抽象，而且涉及大量的数学公式推导，学生在学习过程中普遍感到困难较大，学习兴趣不高。传统教学模式主要依赖教师的讲解和板书，对于这些抽象内容的呈现方式有限，导致学生学习积极性不高，教学效果难以达到预期。随着信息技术的飞速发展，将数学及仿真类软件引入可视化教学已成为教育领域的重要趋势[2]-[4]。根据 Clark 和 Paivio 的双重编码理论，可视化教学通过同时激活语言和非语言处理通道，可使信息留存率提升 40%以上[5]。Mathematica 作为一款功能强大的科学计算软件，具备卓越的符号运算、数值计算、图形绘制和模拟仿真能力，能够将《光学原理》中的抽象知识以直观的可视化形式呈现，为解决教学难题提供了新的途径[6]。Mathematica 的动态交互特性(如 Manipulate 控件)符合 Mayer 提出的多媒体学习认知理论[7]，通过时空邻近原则促进学生建立概念关联。因此，在光学教学中运用 Mathematica 进行可视化辅助教学，不仅可以帮助学生更好地理解课程内容，还能激发学生的学习兴趣，培养学生的创新思维 and 实践能力。然而，当前光学可视化教学研究多集中于本科阶段的基础光学现象演示[8]，缺乏对更复杂的光学专业知识的可视化演示。本文探讨了利用 Mathematica 软件的可视化功能辅助《光学原理》研究生课程教学的改革方法，旨在提高学生的学习兴趣 and 教学效果。

2. Mathematica 简介及其在课程教学中的潜在优势

Mathematica 是由 Wolfram Research 公司精心打造的一款具有开创性的科学计算软件。自 1988 年首次发布以来，历经多年发展与优化，已成为科研、教育等领域中不可或缺的工具。它整合了符号计算、数值计算、图形可视化以及编程等多种强大功能。在符号计算方面，Mathematica 表现卓越，能够进行复杂的代数运算、微积分求解、方程推导等，给出精确的符号化结果，这为理论研究和公式推导提供了极大的便利。其数值计算能力同样出色，可高效处理大规模数据和复杂的数值算法，为解决实际问题提供可靠的数值解。图形可视化功能也十分强大，能够绘制各种精美的二维和三维图形，直观呈现数据特征和数学模型，有助于用户更好地理解和分析问题。此外，Mathematica 拥有简洁灵活的编程语言，支持多种编程范式，方便用户根据需求进行定制开发[9]。在当前的教育改革背景下，Mathematica 软件具有重要的应用价值和深远意义。在教学中，它打破了传统教学的局限，将抽象的数学概念以直观的图形和动态

演示的方式呈现给学生，激发学生的学习兴趣和探索欲望，提高学生的学习效果。例如，通过绘制函数图像，学生可以更深刻地理解函数的性质和变化规律。尤其在理工科专业教学中，Mathematica 为解决实际工程问题和科学研究提供了有力的支持[10]-[14]。学生可以利用该软件进行建模、仿真和数据分析，培养解决实际问题的能力和创新思维。同时，教师也可以借助 Mathematica 设计更加丰富多样的教学案例和实验项目，推动教学方法的创新和教学质量的提升。Mathematica 软件的应用将为教育改革注入新的活力。本论文重点探索 Mathematica 软件的图形可视化功能在本学院研究生课程《光学原理》中的辅助教学应用。

3. Mathematica 在《光学原理》课程中的应用示例

3.1. 光的折射现象的可视化

在《光学原理》课程中，光的折射现象及 Snell 定律是几何光学部分的重要基础内容。传统教学方式主要以理论推导和静态图示为主，学生较难直观地理解折射现象中各参数的动态变化关系。Mathematica 软件具有强大的数值计算、符号推导和可视化功能，能够为这部分内容的教学提供新的手段，帮助学生更深入地掌握光的折射原理。Snell 定律描述了光从一种介质进入另一种介质时，入射角 θ_1 和 θ_2 与两种介质的折射率 n_1 和 n_2 之间的关系，其数学表达式为：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

为了更直观地展示光在不同介质表面发生的折射现象，可以使用 Mathematica 绘制光线及波面在两种不同介质表面的折射现象，如图 1 所示。

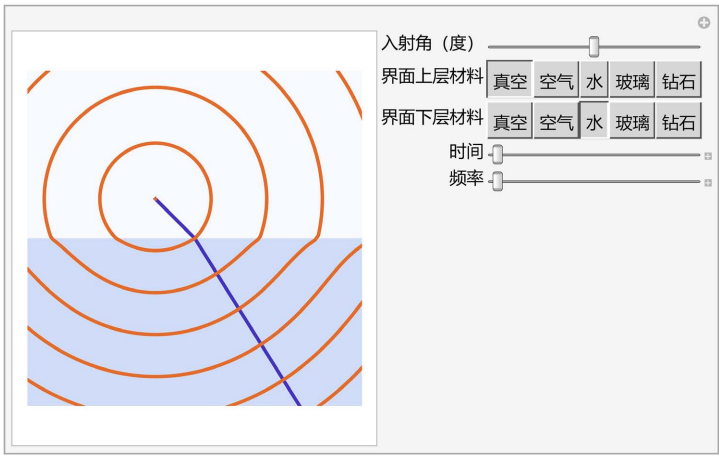


Figure 1. The refraction phenomenon of light
图 1. 光的折射现象

3.2. 像质分析的可视化

几何光学像质分析部分的波前像差在研究所有光学系统的设计、制造和测试过程中都极为重要。以诺贝尔奖得主泽尼克(Zernike)命名的泽尼克多项式，常被用于描述这些像差。点扩散函数(Point Spread Function, PSF)由波前的傅里叶变换的绝对值的平方给出，而调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)由点扩散函数的傅里叶变换的模值给出，它表示了非相干光学系统的空间频率传递函数。PSF 包含了光学系统的像差信息，通过分析 PSF 可以了解光学系统的成像质量，如像的清晰度、对比度等。MTF 曲线能够全面反映光学系统的成像质量，包括分辨率、对比度等。通过分析 MTF 曲线，可以判断光学系

统对不同空间频率信息的传递能力,从而评估其成像性能。二者分别从空域和频域互补视角给出像质的评估。借助 Mathematica 作图可以直观地分析由正交归一化的泽尼克圆多项式 $Z_j(\rho, \theta)$ 所描述的波前的像差密度图、 x 和 y 方向的剖面图、点扩散函数的密度图,以及调制传递函数的 x 和 y 方向的剖面图,如图 2 所示。

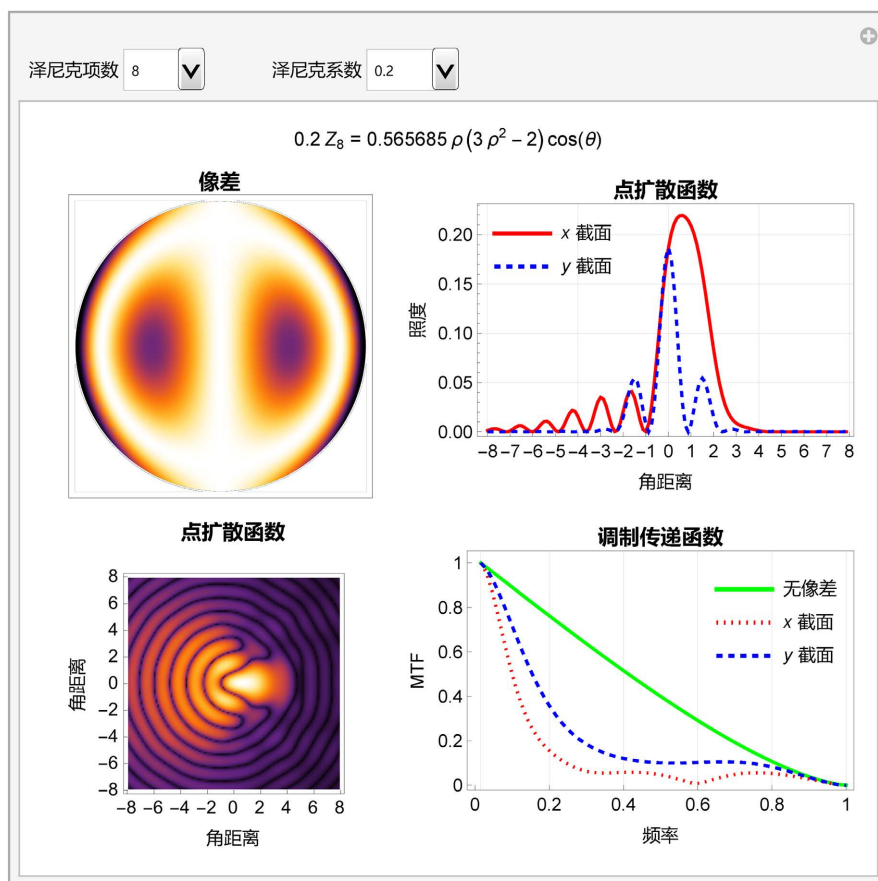


Figure 2. Image quality analysis
图 2. 像质分析

3.3. 光的干涉现象的可视化

光的干涉是《光学原理》课程中关于波动光学部分的一个重要内容,涉及光的波粒二象性和光的相干性等概念。其中杨氏双缝干涉是光学中经典的实验之一,用于研究光的波动性质。通过 Mathematica 软件,可以直观地模拟和分析杨氏双缝干涉现象,帮助学生更好地理解相关原理。杨氏双缝干涉实验中,光通过两个狭缝后,在屏幕上形成明暗相间的干涉条纹。干涉条纹的位置和间距由光的波长(λ)、双缝间距(d)和屏幕与双缝的距离(L)决定。干涉条纹的光强分布公式为:

$$I(x, y) = I_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi dx}{\lambda L}\right) \right]^2 \quad (2)$$

其中, I_0 是初始光强, x 和 y 是屏幕上的坐标。通过 Mathematica 软件绘制杨氏双缝干涉的干涉图样,并使用 Manipulate 控件展示不同波长、不同缝间距和不同光程差对干涉图样的影响,如图 3 所示。通过这种方式,学生可以更直观地观察到光的干涉现象,理解光的相干性和干涉条件等概念。

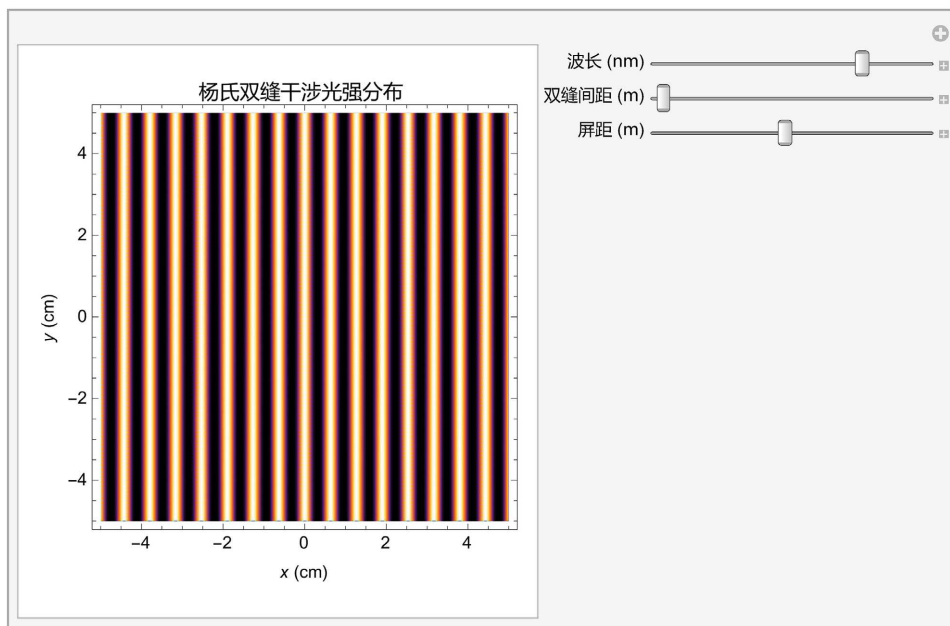


Figure 3. Young's double-slit interference pattern

图 3. 杨氏双缝干涉图样

3.4. 光的衍射现象的可视化

光的衍射是《光学原理》课程中的另一个重要内容，涉及光在传播过程中遇到障碍物或通过狭缝时发生的弯曲和扩散现象。光的多缝衍射是光学中一个重要的现象，其光强分布是单缝衍射与多缝干涉共同作用的结果，其数学表达式和物理特性如下：

$$I(x, y) = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin(N\beta)}{\sin \beta} \right)^2 \quad (3)$$

其中， I_0 是初始光强， x 和 y 是屏幕上的坐标。上式中已令 $\alpha = \frac{\pi ax}{\lambda L}$ 以及 $\beta = \frac{\pi dx}{\lambda L}$ ，其中 a 为缝宽， λ 为光

波长， d 为相邻缝间距， N 为缝数，屏幕与缝的距离为 L 。单缝衍射项 $\left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$ 决定了光强的整体分布趋

势，中央主极大最宽最亮，两侧次极大逐渐减弱；多缝干涉项 $\left(\frac{\sin(N\beta)}{\sin \beta} \right)^2$ 形成尖锐的主极大和较弱的

次极大。利用 Mathematica 软件的可视化功能，并使用 Manipulate 控件展示不同波长、不同缝宽和不同光栅常数对衍射图样的影响，如图 4 所示。学生可以进一步调整控件缝参数，例如令 $N=1$ 可以得到单缝衍射图样。此外，值得一提的是，令 $N=2$ 且 $a \rightarrow 0$ 则可以得到双缝干涉公式(2)。

3.5. 光的偏振现象的可视化

光的偏振是《光学原理》课程中的一个重要内容，涉及光的横波性和光的偏振状态等概念。在传统的教学中，光的偏振现象主要通过琼斯矢量和斯托克斯参量的庞加莱球来展示，学生难以直观地理解二者的一一对应关系。一般而言，电磁波的偏振态可以用琼斯(Jones)矢量或者斯托克斯(Stokes)参数来描述。对于琼斯矢量，可以用偏振椭圆描述沿垂直于传播方向的平面内电场矢量($E_x, E_y e^{i\delta}$)，其中 δ 为相对相位。与之相应斯托克斯参数可以表示为

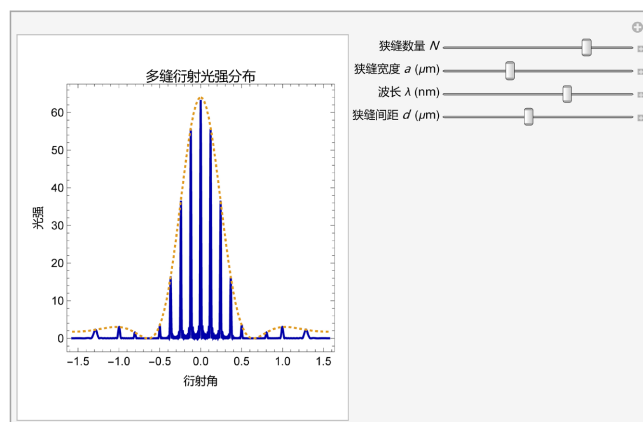


Figure 4. Diffraction pattern of multiple slits
图 4. 多缝衍射图样

$$\begin{aligned} S_0 &= E_x^2 + E_y^2, \\ S_1 &= E_x^2 - E_y^2, \\ S_2 &= E_x E_y \cos \delta, \\ S_3 &= E_x E_y \sin \delta \end{aligned} \quad (4)$$

定义斯托克斯矢量 $\mathbf{S} = (S_1, S_2, S_3)$ ，并以其为坐标轴构建庞加莱球，用于表示光的偏振态的图示方法。该方法由庞加莱于 1892 年提出，通过球面上的点来表示不同的偏振态，其参数与偏振椭圆的参数，如椭圆取向角 α 、椭圆度 ε 相对应。为了便于实验上测量，常借助线偏振度(Degree Of Linear Polarization, DOLP):

$$\text{DOLP} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5)$$

其中， $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别是沿偏振椭圆的长轴和短轴测得的光强。利用 Mathematica 软件的可视化功能和 Manipulate 控件，可以将偏振椭圆和庞加莱球以直观的图形和动画形式展示出来，如图 5 所示。通过控制偏振度 DOLP、椭圆度 ε 等参数可以方便地观察琼斯矢量或者斯托克斯参数的映射关系。

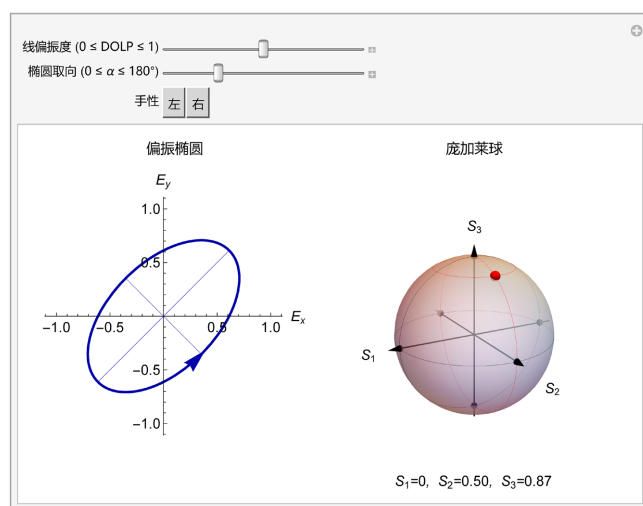


Figure 5. Schematic diagrams of polarization ellipse and Poincaré sphere
图 5. 偏振椭圆和庞加莱球示意图

4. 总结

本文探索了 Mathematica 在《光学原理》课程的可视化辅助教学应用。通过利用 Mathematica 软件的可视化功能辅助《光学原理》课程教学中相关概念的讲解,将抽象的物理现象和复杂的数学公式直接转化为直观的图形和动画呈现,帮助学生更好地理解和掌握课程内容,激发学生的学习兴趣和积极性,提高教学效果。在今后的教学中,将进一步探索和应用 Mathematica 软件的可视化功能,不断改进教学方法和手段,提高教学质量,培养学生的创新思维 and 实践能力。

致 谢

感谢江南大学研究生教育教学改革研究与实践课题项目和江南大学劳动教育示范实践项目对本研究的经费支持。

基金项目

本论文受江南大学研究生教育教学改革研究与实践项目(项目编号:YJSJGZD24_006、YJSJGZD24_020)和江南大学研究生教育教学改革研究与实践项目(YJSJGYB22_009)资助。

参考文献

- [1] Born, M. and Wolf, E. (2013) Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Elsevier.
- [2] 景元萍, 张娜. 关于将数学软件融入大学教学的研究[J]. 科技资讯, 2013(25): 195, 197.
- [3] 曹一青, 沈志娟, 郑志霞. 光学设计软件 Zemax 在《工程光学》课程教学中的应用[J]. 教育进展, 2019, 9(2): 108-112. <https://doi.org/10.12677/AE.2019.92023>
- [4] 林志立, 陈子阳, 陈旭东, 等. 基于 FDTD 和 MATLAB 的光学理论课程可视化辅助教学研究[J]. 教育现代化, 2019, 6(82): 173-175.
- [5] Clark, J.M. and Paivio, A. (1991) Dual Coding Theory and Education. *Educational Psychology Review*, 3, 149-210. <https://doi.org/10.1007/bf01320076>
- [6] Wolfram, S. (2003) The Mathematica Book. Wolfram Research, Inc.
- [7] Mayer, R.E. (2002) Multimedia learning. In: *Psychology of Learning and Motivation*, Elsevier, 85-139. [https://doi.org/10.1016/s0079-7421\(02\)80005-6](https://doi.org/10.1016/s0079-7421(02)80005-6)
- [8] 唐苗苗, 杨蕴哲, 李新忠. 基于 Mathematica 虚拟仿真的《物理光学》教学改革探索[J]. 教育现代化, 2021(71): 1-4.
- [9] Wolfram Demonstrations Project. <https://demonstrations.wolfram.com/>
- [10] 高峰, 杨迪, 李健, 等. Mathematica 在电磁学教学中的应用[J]. 教育进展, 2023, 13(6): 3920-3924. <https://doi.org/10.12677/AE.2023.136624>
- [11] 林志立. 基于 Mathematica 的“电磁场与电磁波”课程辅助教学改革研究[J]. 教育教学论坛, 2016(1): 86-87.
- [12] 商紫怡, 于巾荔, 陈映君, 等. 基于 Mathematica 的偏振光现象动态仿真[J]. 大学物理实验, 2023, 36(3): 95-101.
- [13] 谭超, 席在芳. Mathematica 仿真在光源模型辅助教学中的应用[J]. 电子世界, 2017(5): 38, 40.
- [14] 张斯博, 刘思雨, 宋思盈, 等. 基于 Mathematica 的物理教学资源开发——以波动现象的动态模拟为例[J]. 大学物理实验, 2024, 37(1): 85-91.