

基于 MATLAB GUI 的菲涅尔衍射仿真模拟平台

陈家麟

(兰州大学 物理科学与技术学院, 兰州 730000)

摘要:《光学》是物理类专业的基础课程,是物理类学生后续专业课的理论基础。但是由于进入大学之前学生接触光学不多,光学对大部分学生而言学习难度较大。文章将衍射理论和 MATLAB GUI 相结合,开发了基于 MATLAB GUI 的菲涅尔衍射仿真模拟平台,该实验平台操作简单,参数可变,效果理想,使衍射理论可视化、直观化。通过本平台,教师可以将理论教学与实践相结合,提高理论教学的效果;学生可以验证衍射相关的理论,激发学习兴趣,加深对衍射理论的理解。

关键词: 菲涅尔衍射; 仿真模拟平台; MATLAB GUI

《光学》是物理专业本科生所必修的一门普通物理学课程,课程主要涵盖几何光学和波动光学两部分内容。由于进入大学之前学生主要接触的是与几何光学相关的知识、物理光学的一些现象在生活中往往被忽略、物理光学的实验教学与理论教学不同等因素,学生往往难以很快的接受波动光学的知识。为此,为学生提供一个能够直观看到物理光学现象的实验平台很重要。论文开发了基于 Matlab GUI 的菲涅尔衍射仿真模拟平台,学生可以通过该平台模拟任意衍射屏的菲涅尔衍射,直观地看到波动光学的现象,验证与衍射相关的一些定理、结论,从而培养学习光学的兴趣。此外,教师也可用该平台制作一些有趣的衍射图样用于教学,活跃课堂气氛。

1 实验平台介绍

实验平台利用 Matlab GUI 设计了任意衍射屏的菲涅尔衍射的交互式图形界面,该界面分为衍射屏选择、参数调节和光强分布

查看三大模块。

衍射屏选择模块可以实现将 $N \times N$ (N 为通过参数调节模块设定的采样率) 像素的图像二值化,从而生成衍射屏的透过率函数。

参数调节模块可以调节一个仿真参数(采样率)和三个物理参数(波长、衍射距离、屏幕线度)。调节仿真参数可以控制衍射图样生成的质量和速度,若需要较高质量的图样(定量研究),可以采用较高的采样率;若需要较快的生成速度(定性研究),可以采用一般的采样率。调节物理参数则可获得不同条件下多姿多彩的衍射图样。

光强分布查看模块主要是为定量研究光强在接收屏上的分布,借助 Matlab 自带的图形工具,用户可以探索衍射图样特征,验证物理规律等等。

2 实验平台设计

实验平台设计主要有三个步骤,即 GUI 界面的设计、回调函数的设计和功能函数及算法设计。以 Matlab 用户界面提供的不同

控件为基础，对界面进行设计；根据所需要实现的功能，对控件所对应的函数进行编程实现回调函数设计；以傅里叶变换为基础，对输入的衍射屏进行傅里叶变换输出衍射图样。

2.1 GUI 界面设计

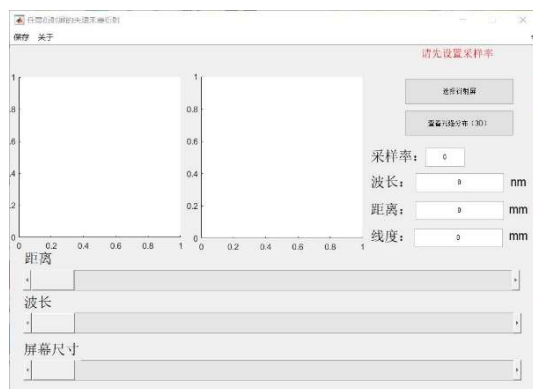


图1 主界面

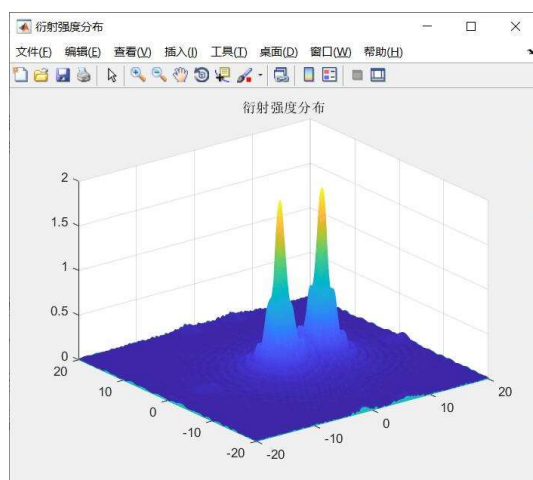


图2 辅助界面

该实验平台的GUI界面设计包括主界面和辅助界面两部分。如图1所示，实验平台软件开始时，首先显示的为主界面，主界面主要包括采样率设置框、衍射距离设置框及滑动条、波长设置框及滑动条、屏幕线度设置框及滑动条、衍射屏选择按钮、光强查看按钮和保存下拉栏。点击主界面上的“查看光强分布(3D)”按钮可进入辅助界面，通过辅助界面的图形工具可以探索衍射图样特征，验证物理规律等等。

2.2 回调函数设计

回调函数是控件的核心函数，所有对控件进行响应的操作均在该函数中完成。在该实验平台设计过程中，采样率设置框的回调函数功能是设置采样率N、更改标签内容以提示衍射屏图片的像素要求；衍射距离设置框及滑动条、波长设置框及滑动条、屏幕线度设置框及滑动条六者的回调函数功能是同步设置框和滑动条、以用户设定的参数去调用 calculate 函数来输出衍射图样；衍射屏选择按钮的回调函数功能是将用户选择的图像进行二值化处理，生成衍射屏的透过率函数；光强查看按钮的回调函数功能是通过 Matlab 的 figure 函数在辅助界面中显示衍射强度分布；保存下拉栏的回调函数功能是将衍射图样以图片形式保存到软件的运行目录，该回调函数同样可以用热键（Ctrl+S）调用。

2.3 功能函数及算法设计

2.3.1 菲涅尔衍射算法

菲涅尔衍射理论公式：菲涅尔积分

$$U(x, y) = \frac{1}{i\lambda z} \iint U_0(x_0, y_0) e^{ikr} dx_0 dy_0$$

$$= \frac{1}{i\lambda z} e^{ikz} \iint U_0(x_0, y_0) e^{i\frac{k}{2z}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]} dx_0 dy_0$$

这是一个线性空不变系统，若令

$$h(x, y; x_0, y_0)$$

$$= \frac{1}{i\lambda z} e^{ikz} e^{i\frac{k}{2z}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]} dx_0 dy_0$$

$$= h(x - x_0, y - y_0)$$

则原积分可以表述成为：

$$U(x, y) = \iint U_0(x_0, y_0) h(x, y; x_0, y_0) dx_0 dy_0$$

即观察平面的卷积积分表达式可以进一步写成：

$$U(x, y) = \iint U_0(x_0, y_0) h(x, y; x_0, y_0) dx_0 dy_0$$

$$= U_0(x_0, y_0) * h(x, y) \dots\dots (1)$$

其中, $U_0(x_0, y_0)$ 为衍射屏的透过率函数, $h(x, y)$ 为脉冲相应函数:

$$h(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \dots\dots (2)$$

实现算法: 本平台采用 IR(Fresnel Impulse Response) 算法和 TF(Fresnel Transfer Function) 算法来实现菲涅尔衍射^[1]。IR 算法的原理如下: 根据公式 (1), 接收面的菲涅尔衍射场可以表示为两个傅里叶变化乘积的逆变换形式, 即

$U(x, y) = F^{-1}\{F\{U_0(x_0, y_0)\}F\{h(x, y)\}\}$ 其中, $F\{\}$ 表示傅里叶变换, $F^{-1}\{\}$ 表示其逆变换。TF 算法的原理如下: 菲涅尔衍射的卷积积分表达式表明, 若把菲涅尔衍射看作是一个系统, 那么这是一个线性空不变系统, 因此这个衍射过程存在一个相应的传递函数, 即

$$H(f_x, f_y) = e^{ikz\sqrt{1-(\lambda f_x)^2-(\lambda f_y)^2}}$$

$$= e^{ikz} e^{-i\pi(f_x^2+f_y^2)}$$

观察平面的菲涅尔衍射场可以表示为

$$U(x, y) = F^{-1}\{F\{U_0(x_0, y_0)\}H(f_x, f_y)\}$$

这两种算法有不同的适用情境。对于 IR 算法, 考虑菲涅尔传递函数的傅里叶变换式的离散抽样, 根据奎斯特定理可以得到,

$$\Delta x_0^2 \leq \frac{\lambda d}{N_x}, \Delta y_0^2 \leq \frac{\lambda d}{N_y}$$

在满足上述采样条件的情况下, 用 IR 算法计算衍射场会比较准确; 对于不满足上述条件的情况, 我们采用 TF 算法来计算。^[1-3]

2.3.2 灰度非线性对数变换算法

本平台采用灰度非线性对数变换算法^[4]来处理傅里叶变换得到的衍射图样, 可以使衍射图样的暗部细节明显 (如图 3 所示), 图像展示效果更佳。

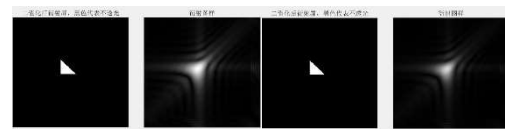
图像灰度的对数变换一般表示为:

$$D_B = c \times \log(1 + D_A)$$

其中 c 为尺度比较常数, D_A 为原始图像灰度值, D_B 为变换后的目标灰度值。

由于对数曲线在像素值较低的区域斜率大, 在像素值较高的区域斜率较小, 所以图像经过对数变换后, 较暗区域的对比度将有所提升。

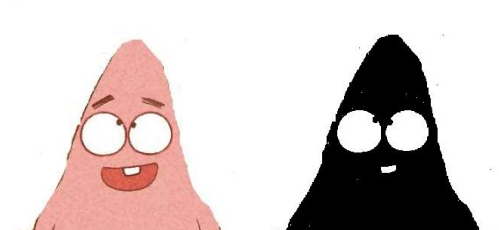
对数变换实现了扩展低灰度值而压缩高灰度值的效果, 被广泛地应用于频谱图像的显示中。傅立叶频谱动态范围可能宽达 0~106, 直接显示频谱时, 图像显示设备的动态范围往往不能满足要求, 从而丢失大量的暗部细节; 而在使用对数变换之后, 图像的动态范围被合理地非线性压缩, 从而可以清晰地显示。



(a) 采用对数变换 (b) 未采用对数变换
图 3 衍射图样暗部细节对比

2.3.3 图片二值化算法

图像二值化算法(Image Binarization)^[6]是通过选择适当的阈值, 将像素点的灰度值设置为 0 或 255 的算法, 也就是将整个图像呈现出明显的黑白效果的过程。图像二值化算法能凸显出感兴趣的目标的轮廓, 从而生成较为合适的衍射屏, 方便用户快捷地得到一些有趣的衍射屏 (如图 4 所示)。



(a) 原图像 (b) 二值化后图像
图4 图像二值化前后对比

本平台使用最大类间方差法来计算得到合适图片二值化的阈值,利用这个阈值通常比人为设定的阈值能更好地把一张灰度图像转换为二值图像。

3 实验平台运行实例

通过本平台可以验证一些光学的结论和方法。本文以半波带法为例,通过模拟圆孔衍射来验证半波带法的合理性。

由半波带法我们可以计算得出轴上衍射光强度为^[7,8]

$$I(b, \rho, R, \lambda) = \frac{a^2}{(R+b)^2} 4 \sin^2\left(\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{b}\right) \frac{\rho^2}{\lambda} \cdot \frac{\pi}{2}\right)$$

其中 a 与照明光源发光强度相对应; b 为接收屏到衍射屏的距离; R 为球面波的半径; λ 为光的波长。

那么在平行光照射的条件下,上述式子可以近似为

$$I(b, \rho, \lambda) = 4I \sin^2\left(\frac{1}{b} \cdot \frac{\rho^2}{\lambda} \cdot \frac{\pi}{2}\right)$$

考虑到距离会影响亮斑的亮度,而对暗斑无影响,故验证暗斑的位置。暗斑的条件是

$$\frac{1}{b} \cdot \frac{\rho^2}{\lambda} \cdot \frac{\pi}{2} = k\pi$$

即在 $b = \frac{\rho^2}{2k\lambda}$ 出现暗斑,采用 $\rho = 10\text{mm}$, $\lambda = 600\text{nm}$, 计算可得

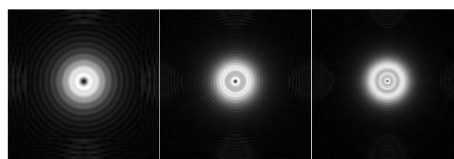
$$b_1 = 83333.33$$

$$b_2 = 41666.67$$

$$b_3 = 27777.78$$

本平台仿真的结果如图5所示,依次是 83333.33mm 远的图样、41666.67mm 远的

图样、27777.78mm 远的图样



(a) $b=83333.33$ (b) $b=41666.67$ (c) $b=27777.78$

图5 模拟结果

从直观上很容易可以得到中心为暗斑的结论,借助“查看光强分布(3D)”功能可以进一步验证中心为暗斑

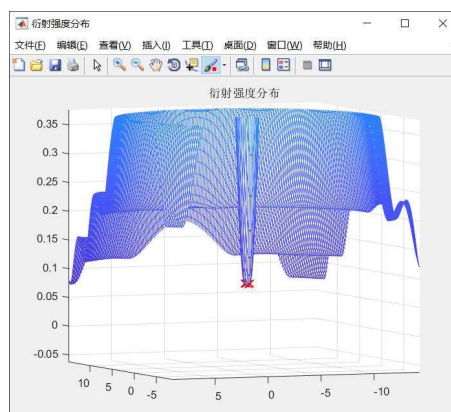


图6 最小光强

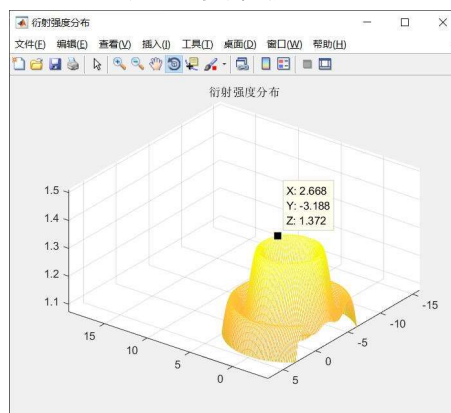


图7 最小光强

如图6、图7所示,光强最弱处约为0.006,光强最强处大致在1.372左右,最弱光强约为最强光强的千分之四。可见,中心为暗斑这个结论是可以接受的。不完全为0是因为半波带法的系统误差、模拟的精度不够高等因素。

4 结语

将本平台引入教学,可以将深奥的理

论知识生动地展现给学生, 激发他们的学习兴趣。此外, 该实验平台可以促进拓展式教学开展, 提高学生学习积极性。学生可以自行操作该平台, 通过观察不同衍射屏的衍射图样, 更好地掌握和理解光学中的抽象概念和理论原理。

参考文献:

- [1] 佚名. 菲涅尔衍射数字仿真与实验[EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/180c36bbcc175527062208b4.html>. 2015. 12.
- [2] 佚名. 菲涅尔衍射常用计算方法的研究

[EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/3b6826b571fe910ef12df83d.html>. 2014. 01.

[3] 崔文乐, 韩利琪, 霍晓敏, 杨丽君, 张素恒. 菲涅尔衍射积分的单次傅里叶变换算法[J]. 大学物理, 2019, 38(2):9-16.

[4] 杨秀璋. [Python 图像处理] 十六. 图像的灰度非线性变换之对数变换、伽马变换[EB/OL]. <https://blog.csdn.net/Eastmount/article/details/88929290>. 2019. 03.

[5] Gabriel Landini. Auto Threshold[EB/OL]. https://imagej.net/Auto_Threshold. 2017. 08.

[6] 钟锡华. 现代光学基础(第二版)[M]. 北京: 北京大学出版社, 2018:61-89.

[7] 赵凯华. 新概念物理教程. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004:163-189.

Fresnel diffraction simulation platform based on MATLAB GUI

CHEN Jia-lin

(The School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Optics is the basic course of physics majors and the theoretical basis of subsequent professional courses for physics students. However, it is difficult for learners to understand it since few students have good access to optics before college. This paper combines the diffraction theory with MATLAB GUI, and develops a Fresnel diffraction simulation platform. The experimental platform is simple to operate, with variable parameters and ideal effect, which makes the diffraction theory visible and intuitive. Through this platform, teachers can not only combine learning with practice but also improve the whole teaching process. Students can verify diffraction related theories, stimulate their interest in learning, as well as deepen their understanding of diffraction theory.

Key words: Fresnel Diffraction; Simulation platform; MATLAB GUI