光栅衍射效应 MATLAB 仿真的应用

文/陈继超[1]　向文丽[2]
（1. 会泽县乐业镇中学校　云南省会泽县　654223　2. 楚雄师范学院物理与电子科学学院　云南省楚雄彝族自治州雄市　675000）

摘　要：本文探究了缝数 N（2、6、10、100）、光栅常数 d（0.010 mm、0.020 mm、0.030 mm、0.040mm）、缝宽 b（0.005、0.007、0.009、0.011mm）、波长 λ（700nm、500nm、300nm、100nm）对衍射效应的影响。通过 MATLAB 程序设计得到衍射条纹及光强分布图，结果表明光栅参数（缝数 N、光栅常数 d、缝宽 b）和光波波长 λ 对衍射效应的影响显著，特别光波从可见光范围变化到不可见光范围，衍射效应较复杂，波长越长波动性越显著，波长越短，粒子性越显著。仿真不但吸引了学生，同时也利用计算机丰富了实验教学，突破教学重难点。

关键词：多缝衍射；MATLAB 仿真；光栅常数；实验教学

中学物理衍射部分的知识是物理学习的重要章节，衍射部分的知识属于波动光学，比较抽象难懂，借助于平面光栅衍射实验可进一步较形象地理解和掌握该知识点，其实验装置较为简单，但实验现象却受很多因素的影响，例如波长 λ，缝数 N，光栅常数 d，以及缝宽 b，看似容易的实验，但在实际操作时存在一定的难度和误差，主要问题是：首先、平行光严格垂直入射光栅难以调节，存在一定的误差；其次、由于光源发出的光在介质中会发生散射，最终通过光栅的光强有一定程度的减弱，从而影响衍射条纹的接收和观察；再次、一般实验室只有一定规格的光栅，光栅衍射只局限于单种规格光栅实验现象和规律，不同规格光栅衍射存在一定的实际困难；最后、由于实际实验中存在一些杂散光干扰，当杂散光汇聚在接收屏上会看到额外的鬼像，在这些区域会引起对比度的下降，不利于衍射条纹的观察。基于这样的实验缺陷，顾将抽象难懂的光学现象、规律通过计算机仿真，将实验生动、形象地表现出来，使学生更易于接受，激发学习兴趣，从而加深对衍射内容及规律的理解，具有明显的教学效果。

本文利用 MATLAB 程序设计得到衍射光强分布图和条纹分布图，探索了缝数 N、光栅常数 d、缝宽 b、波长 λ 对衍射效应的影响，如此，不仅可以克服实验验中物理仪器和其他偶然情况等因素给实验带来的限制和误差，还可以和实验现象对比，加深对光栅衍射特征及规律的理解。

1 衍射原理

衍射光栅是基于单缝衍射和多缝干涉效应工作的周期性光波调制器件。基于夫琅禾费平面光栅衍射实验，波长为 λ 的激光垂直照射等宽等间距的平行狭缝或刻痕，如图 1 所示，各缝的宽度为 b，相邻两缝不透明部分的宽度为 a，光栅常数 d=a+b. 衍射角为 θ。

平面光栅衍射光强满足：

$$I = I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2} \frac{\sin^2 Nv}{\sin^2 v} \tag{1}$$

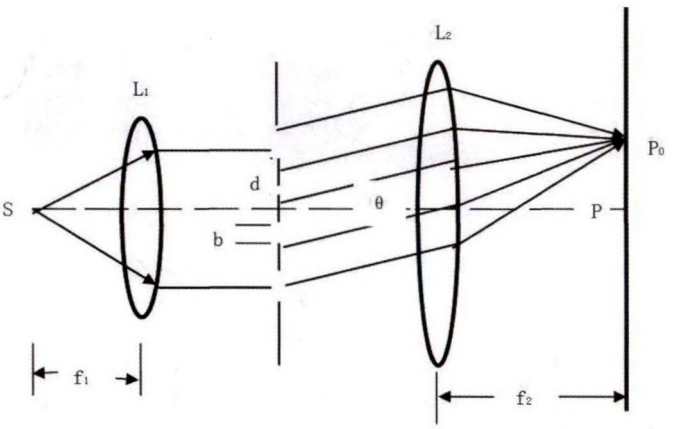


图 1：平行光垂直入射光栅图

式中 $v=(\pi d\sin\theta)/\lambda$，表示单缝衍射光强，是衍射图样的包络面，称为单缝衍射因子。

当平行光垂直入射光栅时，满足下式：

$$d\sin\theta = j\lambda \tag{2}$$

式中 λ 为单色光的波长，θ 为衍射角（衍射光与光栅平面法线之间的夹角），j 为衍射光谱的级次，取值：0，±1，±2…。

特别地，当平行光垂直入射单缝时，即为下式：

$$a\sin\theta = j\lambda \tag{3}$$

式中 λ 为单色光的波长，θ 为衍射角（衍射光与光栅平面法线之间的夹角），j 为衍射光谱的级次，取值：0，±1，±2…。

德布罗意关系式：

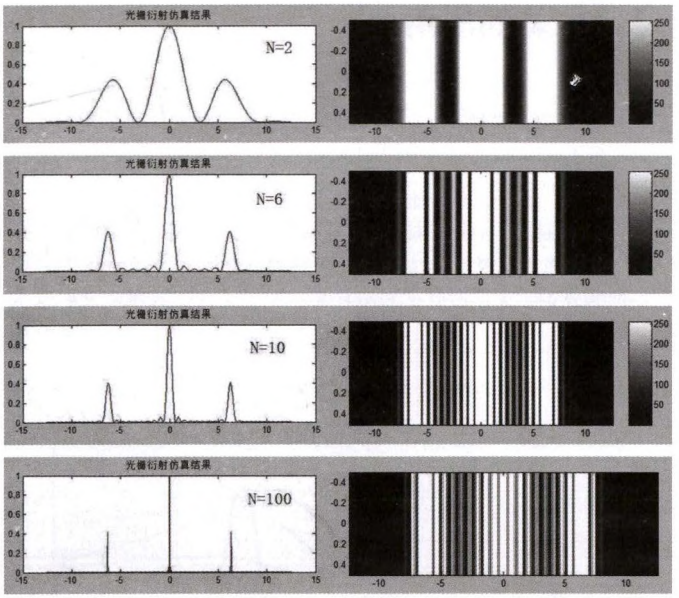
$$E = h\nu = \hbar\omega \tag{4}$$

$$\vec{p} = \frac{h}{\lambda}\vec{n} = \hbar\vec{k} \tag{5}$$

2 仿真参数的设置

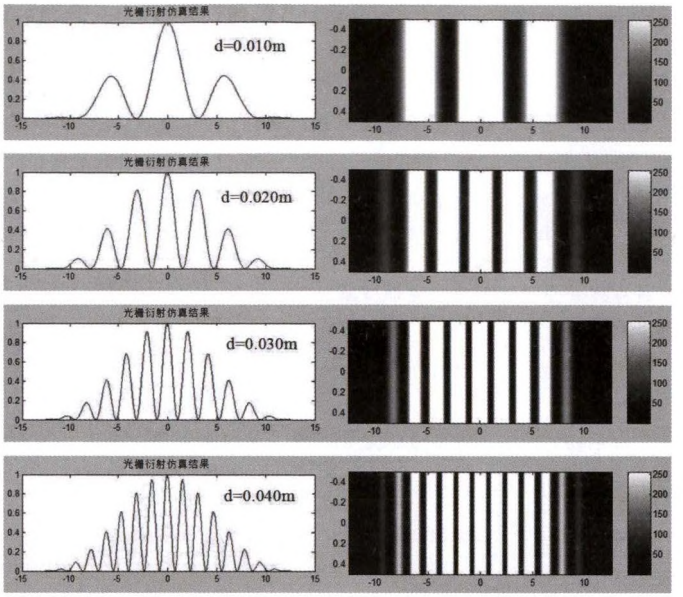
在夫琅禾费平面光栅衍射实验理论的指导下进行 MATLAB 仿真，参数的设置及程序的设计如下：

参数的设置：在探究缝数 N、光栅常数 d、波长 λ 及缝宽 b 对



a 相对光强　　b 衍射条纹

图 2：不同缝数下的衍射效应图



c 相对光强　　d 衍射条纹

图 3：不同光栅常数下的衍射效应图

衍射效应的影响时，均采用控制变量法。

（1） 缝数变化：λ=632.8nm，b=0.005mm，d=0.01mm，f=100mm 保持不变。

（2）改变光栅常数，保持 λ=632.8nm，b=0.005mm，N=2，f=100mm 不变。

（3）缝宽 b 变化，波长 λ=628nm，f=100mm,d=0.01mm，N=2 不变。

（4）波长变化，保持 f=100mm;b=0.005mm;d=0.01mm;N=4 不变。

主程序如下：

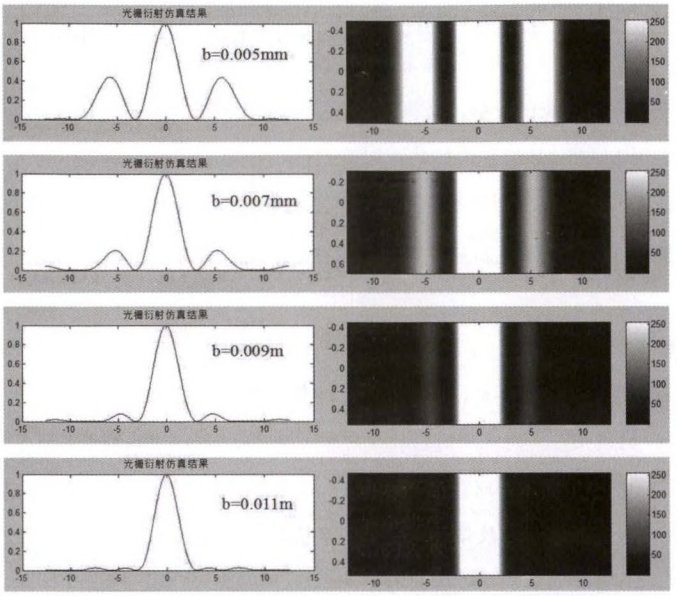
```
wavelength=;f=100;b=;d=;N=;                    % 设定参数值 ( 单位：mm)
x=linspace(-4*pi,4*pi,1000);                   % 设定 x 的范围
for j=1:1000                                   % 对 x 方向的全部点进行循环计算
u=(pi*b/wavelength)*(((x(j)/sqrt(x(j)^2+f^2))));
Idan=((sin(u)/u).^2);                          % 单缝衍射光强公式
Iduo=((sin(d*u*N/b)/sin(d*u/b)).^2);           % 多缝干涉光强公式
I(j)=Idan*Iduo;                                % 光栅衍射光强公式
end
hold on;
NCLevels=255;
Ir=NCLevels*I;
IG=NCLevels*Idan;
IB=NCLevels*Iduo;
colormap(gray(NCLevels));                      % 用灰度级颜色图
subplot(2,1,2),image(x,I,Ir)
subplot(2,1,1),plot(x,I(:)/max(I));            % 光强与位置的关系曲线
title(' 光栅衍射仿真结果 ')
```

3 仿真结果及分析

MATLAB 将数值分析、矩阵计算、科学数据可视化以及非线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能集成于一个易于使用的可视窗环境中，并且进行有效数值计算，为众多科学领域提供了一种全面的解决方案，其在很大程度上摆脱了传统非交互式程序设计语言，从而得到不同缝数的仿真图。为了保证图形更清晰，文中将 MATLAB 设置为灰色。仿真结果得到的衍射光强分布图（图2-图5），进一步讨论可知：

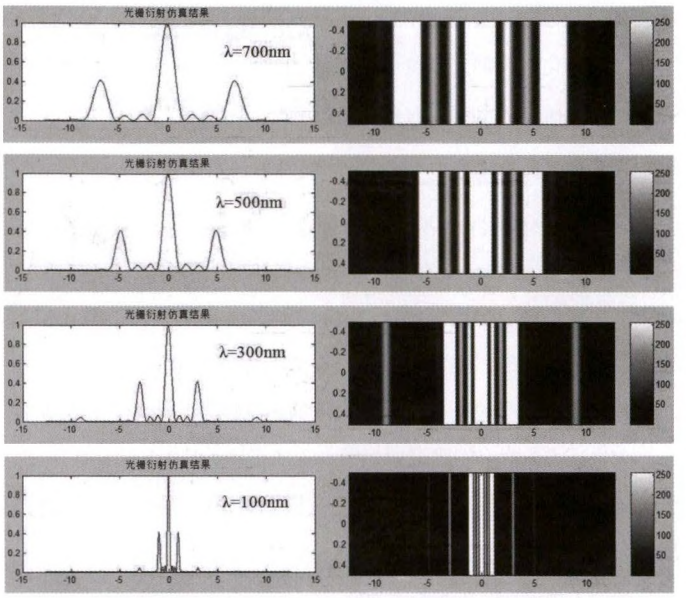
3.1 缝数对衍射效应的影响

由 MATLAB 程序设计了多缝衍射缝数 N 分别为 2、6、10、100。保持其他相关参数不变：λ=632.8nm，b=0.005mm，d=0.01mm，f=100mm。运行程序的到图 2（a 相对光强和 b 衍射条纹），从图 2 中（a、b）的衍射条纹看到，缝数越多，条纹越密集，主级大光强分布曲线也越尖锐，并且以主级大为中心，靠近主级大



e 相对光强　　f 衍射条纹

图 4：不同缝宽下的衍射效应图



g 相对光强　　h 衍射条纹

图 5：不同波长下的衍射效应图

的两个光强峰随缝数的增强也变得尖锐，高度不变。在图 2（a）中，0 位置处均表示光强的主极大，其左右两边较突出的峰是次级大；在图 2（b）中，0 位置处均表示衍射图样的零级条纹，左右两边分别是其他级次的条纹。对图形分析得到：

（1）多缝衍射图样出现一系列新的光强级大和级小，较大的亮线是主级大，较弱的亮线是次级大；

（2）主级大的位置和缝数无关，其宽度随着缝数的增大反而减小，但光强与缝数的平方成正比；

（3）相邻两主极大间的次极大和次极小的数量与缝数 N 有关，相邻主级大有 N-1 条暗纹，N-2 个次级大；

（4）光强分布中保留了单缝衍射因子，而单缝衍射因子仅影响强度在各级主级大间的分配。

（5）光屏上接收到的所有最大值和最小值条纹，其条纹位置分布取决于衍射角 θ。

从 MATLAB 仿真的多缝图样中可以看到主级大的亮线的宽度随着缝数 N 在减小，这在光栅光谱中有实际意义。在 (1) 式中包含了两部分，即单缝衍射因子和缝间干涉因子，以下是对他们的讨论：

实际的实验装置，干涉和衍射同时存在，并且混杂在一起，此时干涉条纹的分布要受单元衍射因子的调制，而在光栅次数 d 确定的情况下，衍射图样中主级大的位置就确定了，而单缝衍射因子仅仅影响光强在各级主级大间的分布，由于每一条狭缝衍射的作用，在多缝屏接收到的干涉明纹并不是等强度分布，而是受到了单缝衍射光强分布的调制，接收屏上的光强分布发生了重新分布。

利用 MATLAB 程序设计，可使衍射光强的分布可视化，这对衍射部分知识的理解更容易，其衍射条纹更加清晰，实验现象更明显，有利于总结衍射规律，教学效果好。

3.2 光栅常数对衍射效应的影响

当缝数 N=2, 波长 λ=632.8nm，焦距 f=100mm 时，保持缝宽 b=0.005mm 不变，改变光栅常数 d 依次为 d=0.010 mm、0.020 mm、0.030 mm、0.040mm，其仿真结果如图 3（c、d）。从条纹和光强的现象图中可以看到，光栅常数增大时，主级大出现的数目越多，出现的条纹越多且越细，但光强的峰高不变，峰的宽度减小，其中衍射的谱线逐渐变窄，锐度变得越来越好，并且在图 3（d）中的衍射条纹可明显的看到，当光栅常数（d）从 0.010mm 开始计算，逐渐增大 0.010mm 时，相邻两个衍射图的衍射条纹总体相差三条，明条纹相差两条，暗条纹相差一条；在波长 λ 一定时，d 越大，相邻两个主极大明纹靠的越近；在图3(c)相对光强中也呈现相应的变化。

3.3 缝宽对衍射效应的影响

当波长 λ=628nm，焦距 f=100mm，缝数 N=2 时，保持光栅常数 d=0.01mm 不变，改变缝宽 b=0.005、0.007、0.009、0.011mm。其仿真结果如图 4（e、f）。从图中的衍射现象看到，当 b 逐渐增大时，主极大的条纹亮度、光强和峰宽均不变，次级大的条纹亮度变暗、光强和峰宽均变化。从图 4（f）中的衍射条纹可明显的看到，当缝宽（b）从 0.005mm 开始计算，逐渐增大 0.002mm 时，零级条纹的亮度、宽度和位置不变，+1 级、-1 级的亮度逐渐变暗、宽度变窄和位置在改变；在图 4（e）相对光强中也呈现相应的变化。缝宽为 0.011mm 的衍射条纹和光强与缝宽为 0.005、0.007、0.009mm 的衍

射条纹和光强与缝宽存在差别，表现在：条纹多了两条，峰多了两个。这种变化在光栅光谱仪中，光栅光谱仪的分辨率受狭缝宽度的影响，因此研究缝宽对衍射效应的影响是非常有必要的。

3.4 波长对衍射效应的影响

保持 f=100mm;b=0.005mm;d=0.01mm;N=4 不变，光源的波长分别为 700nm、500nm、300nm、100nm。仿真结果如图 5（g、h）。从图中的衍射现象看到，每一种波长都会产生与之对应的最大值条纹，对于一级衍射，不同波长的光波的衍射角不同，衍射峰值光强的大小也不同。当波长减小时，出现的条纹越多且越细，光强在各级次中也减小。由（7）式可知，Δθ 与 λ 成正比，保持其他参数不变，仅改变 λ，其衍射条纹的变化特点、主极强的衍射角和条纹角间距均随 λ 的变长而变大。

从图 5 中看到，在波长在 700-300nm 内变化，衍射条纹有九条，相对光强图中的峰均有九个；但在波长减小时，条纹的宽度随着减小，零级条纹的位置不变，其他级的条纹位置变化较明显；与波长 λ=700nm、500nm 相比，波长为 300nm 时衍射条纹和光强图差别较大，表现在：六条条纹接近零级条纹，但在远离该区域的方向上，两侧明显出现了有一定亮度的条纹；波长变为紫外光时（λ=100nm），与波长 λ=700nm、500、300nm 相比，条纹的数目明显多于九条，条纹亮度依次变暗。由此可见，波长对衍射效应的影响较复杂。

1905 年爱因斯坦提出光子假说，认为一束光是一束以光速运动的粒子流，该粒子即为光子，频率为 v 的光，每一个光子所具有的能量为 hv，不可再分割，并依此建立起光电效应方程，全面说明了光电效应实验规律。许多实验都表明光既具有波动性，又具有粒子性，从而逐步加深了人们对光的本性的认识，即光具有波粒二象性。由德布罗意关系式（4）（5）可得：波长越长波动性越显著，波长越短，粒子性越显著。在图 5 中可以看出相同的规律。

综上所述，本文利用 MATLA 程序设计得到衍射光强分布图及条纹图，在探索了缝数 N、光栅常数 d、波长 λ 对衍射效应的影响及缺级现象的分析，不仅可以克服实验中物理仪器和其他偶然情况等因素给实验带来的限制和误差，MATLA 程序设计得到衍射图样，其衍射现象清晰可见，图形中的信息提供了丰富的内容，通过计算机的仿真，可直观而丰富的把光栅衍射的全部特征呈现出来，为理论的学习奠定基础 。对于波的衍射，理论上光是一种波，但在生活中很难看到光的衍射，学生在学习过程中会产生认知冲突，通过仿真引导学生经历物理探究过程，培养实验解决物理问题的思维，以达到突破教学重难点的方法。

3 结束语

本文设计的 MATLA 程序运行后，得到的衍射条纹及光强分布图，探索了缝数 N、光栅常数 d、波长 λ 及缝宽 b 对衍射效应的影响及缺级现象的分析，是将夫琅禾费衍射理论进一步拓展和升华。利用 MATLAB 编程将一些难以观察的现象展现出来，这加深了对此内容的理解。利用条纹的清晰度来判断光学导轨的调平，提供一种简便的方法，丰富了衍射实验内容。

参考文献

[1] 董少光，朱传云，谭鹏.MATLAB 可视化程序在大学物理教学中的应用——以光栅衍射教学内容为例 [J]. 江苏工程职业技术学院学报，2018,18(3):104-108.

[2] 姚启钧. 光学教程. 北京：高等教育出版社.2008.97.

[3] 常伟军，耿海峰，腾国奇，等. 基于 CODE V 和 LightTools 的成像系统初级鬼像分析 [J]. 应用光学，2017,38(2):281-284.

[4] 赵伟，张增明. 衍射光栅特性研究实验 [J]. 物理实验，2017,37(10):22-25.

[5] 张河叶，樊孝贺，邓健. 多缝夫琅禾费衍射仿真及实验研究 [J]. 科技传播，2015,(19):153-153,170

[6] 邓磊，汤剑锋. 多缝夫琅禾费衍射实验的计算机仿真 [J]. 湖南文理学院学报（自然科学版），2014,(4):59-64,74.

[7] 郑小波，周国庆，张丹妹. 基于 Matlab 的光栅衍射仿真研究 [J]. 科技风，2018,(25):255,259.

[8] 裴世鑫，刘云，崔芬萍. 狭缝宽度对光栅光谱仪分辨率影响的实验研究 [J]. 实验科学与技术，2018,16(5):47-52.

[9] 高华，周静，郑志远. 透射式矩形相位光栅的衍射光谱分析 [J]. 大学物理，2012,31(1):27-30.

[10] 崔富刚，谭毅. 光栅衍射次极大条纹相对强度分布的仿真研究 [J]. 实验技术与管理，2012,29(7):80-82.

[11] 刘颖，常春蕊，魏环，等. 量子力学波粒二象性以及纠缠现象的一个实验验证 [J]. 大学物理，2018,37(7):5-7,14.

[12] 孙运周，毕浩，胡中华，王闵. 基于 MATLAB 的物理光学衍射实验平台的仿真与设计 [J]. 教育现代化，2018,5(10):151-153.

[13] 苏米，黄致新，张天宇. “光的衍射” 教学设计 [J]. 物理教学探讨，2019,37(07):28-30.

作者简介

陈继超（1995-），男，大学本科学历。主要从事物理实验研究。

向文丽（1982-），女，实验师，硕士学位。主要从事物理实验教学和研究。