

光栅衍射与相控阵雷达结合的教学案例探索

崔慧娟¹ 陈曦²

(¹ 北京建筑大学理学院, 北京 100044; ² 中科院物理研究所, 北京 100190)

摘要 光栅衍射是光学教学中重要的章节, 是对多缝干涉和单缝衍射的综合运用。但是教学过程中会出现教学过程枯燥、教学内容晦涩难懂等问题, 这极大地影响了教学效果。本文基于光栅衍射的基本公式, 以实际工程应用相控阵雷达为案例, 融入课程思政, 同时结合 Matlab 仿真, 具体形象地展示了光栅常数、缝宽、衍射角对衍射光谱的影响, 以及相控阵雷达的基本原理与以上各因素的联系, 在学习知识的同时让学生掌握了相控阵雷达的基本原理。本次教学探索对于光栅衍射教学知识点的教学、思政、实际问题的解决都具有重要的意义。

关键词 光栅衍射; Matlab 仿真; 相控阵雷达

EXPLORATION OF TEACHING CASES ON THE COMBINATION OF GRATING DIFFRACTION AND PHASED ARRAY RADAR

CUI Huijuan¹ CHEN Xi²

(¹ College of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture; ² Institute of Physics Chinese Academy of Sciences)

Abstract Grating diffraction is an important chapter in optical teaching, which is the comprehensive application of multi slit interference and single slit diffraction. But in the teaching process, the students feel boring and hard to understand, which greatly affect the teaching effect. This paper, based on the basic formula of grating diffraction, takes the practical engineering application of phased array radar as an example, integrates the ideological and political education of the course. At the same time, we combines Matlab simulation to concretely and vividly show the influence of grating constant, slit width, and diffraction angle on the diffraction spectrum, which intuitively show the influence of the above factors on the phased array radar, and the students both study the grating diffraction and the phased array radar. This teaching exploration is of great significance to the teaching of grating diffraction teaching knowledge points, ideological and political education, and the solution of practical problems.

Key words grating diffraction; Matlab simulation; phased array radar

1 研究意义

光栅衍射是大学物理光学教学中的重要部

分, 与干涉和偏振并列为光学教学三大模块。衍射光栅是通过规律的光学结构, 使得入射光的振幅和相位受到周期性的调制^[1,2]的光学器件。衍射光栅是对多缝干涉和单缝衍射知识的综合应

收稿日期: 2022-11-15; 修回日期: 2023-05-23

基金项目: 北京市教委科研计划项目资助(KM202010016008); 北京建筑大学教研项目(重点)资助(Y2114); 北京建筑大学“双塔计划”优秀主讲教师支持计划资助(YXZJ20220809); 北京建筑大学“2022—2023 学年第二学期混合式课程”项目资助(YY220229)。

作者简介: 陈曦, 男, 助理研究员, 主要从事理论物理研究工作, chenxi@iphy. ac. cn。

通讯作者: 崔慧娟, 女, 讲师, 主要从事物理教学科研工作, 研究方向为凝聚态物理, cuihuijuan@bucea. edu. cn。

引文格式: 崔慧娟, 陈曦. 光栅衍射与相控阵雷达结合的教学案例探索[J]. 物理与工程, 2023, 33(4): 36-40.

Cite this article: CUI H J, CHEN X. Exploration of teaching cases on the combination of grating diffraction and phased array radar[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 36-40. (in Chinese)

用,对于学生知识的掌握要求较高。然而光栅衍射缺乏较为直观的课堂展示,学生普遍认为晦涩难懂。同时该部分知识与实际生活中的案例偏离较远,学生不能直观的感受和理解,教学效果不佳,学生掌握度不好。本文基于以上考虑,以国防科技中的相控阵雷达作为问题的引入,从光栅衍射的基本知识出发,结合数学软件 Matlab 仿真计算,将光栅衍射的知识形象化、应用化。知识讲解贯穿于实际问题的解决过程,增强教学效果。我们了解到,之前有许多的学者也对光栅衍射进行了不同仿真研究工作^[5-9],但是基于相控阵雷达研究的仿真较少。通过本次教学探索,学生对于光栅衍射知识的掌握普遍提升。同时,在课程教学过程中将配有相控阵雷达的辽宁舰作为课堂引入,展示我国军事强国和科技强国的形象,有机融入课程思政,提升学生的民族自豪感和荣誉感。

2 光栅衍射教学探索

在光栅衍射的教学过程中,为了提升教学效果和学生的接受度,主要进行了如下教学探索。

2.1 光栅衍射与相控阵雷达

2.1.1 相控阵雷达模型化

典型的有源相控阵雷达的发射装置(图 1(a))是由多个发射单元组成的二维平面阵列(图 1(b)),其中每一个发射源的相位可以单独调制。密集排布的发射源,即等效为干涉光的相干光

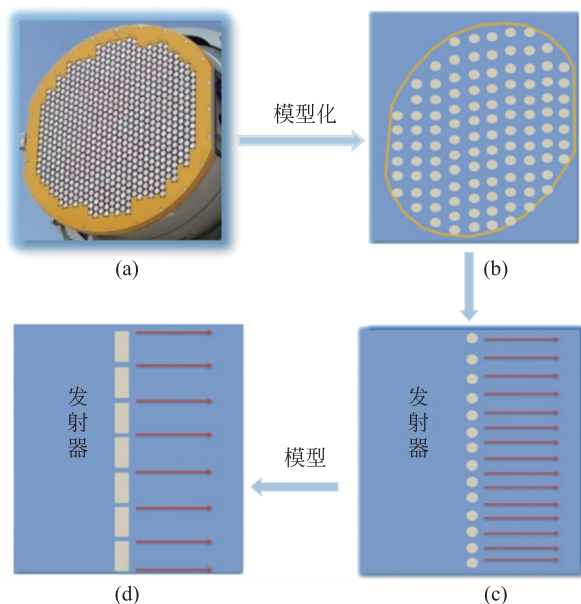


图 1 相控阵雷达的模型化过程

(a) 单缝衍射; (b) 多缝干涉; (c) 光栅衍射

源^[3,4]。为进一步简化模型,只考虑波强在列的方向上的强度分布。此时可令每行发射源以相同相位发射电磁波。此时,每一个发射阵列可等效为单缝(图 1(c)),而多列的单缝规律排列,即可以等效为光栅(图 1(d))。至此,我们将相控阵雷达转化为光栅模型。在相控阵雷达模型化的过程中,不仅仅将实际的问题与基础知识建立了直接联系,同时也教会了学生在以后的专业学习中遇到实际的问题时如何将实际问题转化为理论模型,这也锻炼了学生解决实际问题的能力。

2.1.2 光栅衍射的基本原理

对于垂直入射的平行光照射到 N 条透射光栅上,光栅常数 d 。依据光栅衍射的基本原理,通过振幅矢量法得到光栅衍射强度的公式^[1,2]

$$I_{\theta} = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin N\beta}{\sin \beta} \right)^2 \quad (1)$$

其中, I_0 为单缝衍射中央主极大的振幅, $\left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$

$\left(\alpha = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)$ 单缝衍射因子, $\left(\frac{\sin N\beta}{\sin \beta} \right)^2$ $\left(\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)$ 多缝干涉因子。通过上面的公式可知衍射光栅是多缝干涉和单缝衍射共同调制的结果,如图 2 所示。通过 Matlab 仿真画出了单缝的缝宽 a , 光栅常数 d 、衍射角为 θ 的多缝干涉、单缝衍射和光栅衍射的示意图。通过仿真图形可以清楚的观察到单缝衍射对多缝干涉的调制作用。

通过光强公式(1),我们可以得到这样的结论:

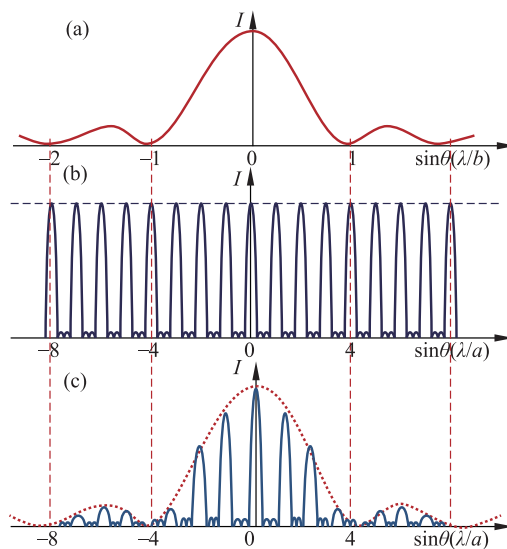


图 2 多缝干涉和单缝衍射对光栅衍射的调制

(a) 单缝衍射图谱; (b) 多缝干涉图谱; (c) 光栅衍射图谱

1) 主极大是由多缝干涉决定的,当

$$\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta = k \pi \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2)$$

即 $d \sin \theta = k \lambda \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots)$ (3)
时为主极大所在位置。

其中, $k = 0, \sin \theta = 0$ 的位置为中央主极大的位置, 所有的光矢量加和, 光强最大。

2) 干涉极小时满足

$$d \sin \theta = \frac{k'}{N} \lambda \quad (k' \neq 0, N, 2N \dots) \quad (4)$$

即两个主极大之间有 $(N-1)$ 个暗纹和 $(N-2)$ 个次级大。为了进一步分析缝宽对衍射图样地影响, 我们采用通过改变 a/d 的值来演示衍射图样地变化, 即归一化光栅常数 d , 通过改变缝 a 的值来模拟仿真。本文通过 Matlab 仿真模拟了随着缝宽 a/d 变化, 衍射图像的变化(图 3)。通过图像的分析, 随着单缝缝宽地增加, 主峰越局域在中央主极

大。而这个现象, 正好符合相控阵雷达中我们需要能量较为集中的峰作为扫描物体所需的主峰。

主极大和中央主极大概念引出以后, 通过增加单缝衍射缝宽, 增加中央主极大光强, 通过 Matlab 仿真出雷达的实时扫描图样, 让学生观察并理解雷达的扫描原理。这样的教学设计可以使学生更为直观地理解光栅衍射的原理, 同时理论联系实际, 提升教学效果通过进一步引发学生思考, 启发学生思考当改变入射角时衍射图样会发生怎样的变化, 引入斜入射, 如图 4 所示, 进一步给出斜入射的光栅方程(5)。即当入射光线与衍射光线位于法线同侧的时候, 光栅方程为

$$d(\sin \varphi + \sin \theta) = k \lambda \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (5)$$

当入射光线与衍射光线位于法线异侧的时候, 光栅方程为

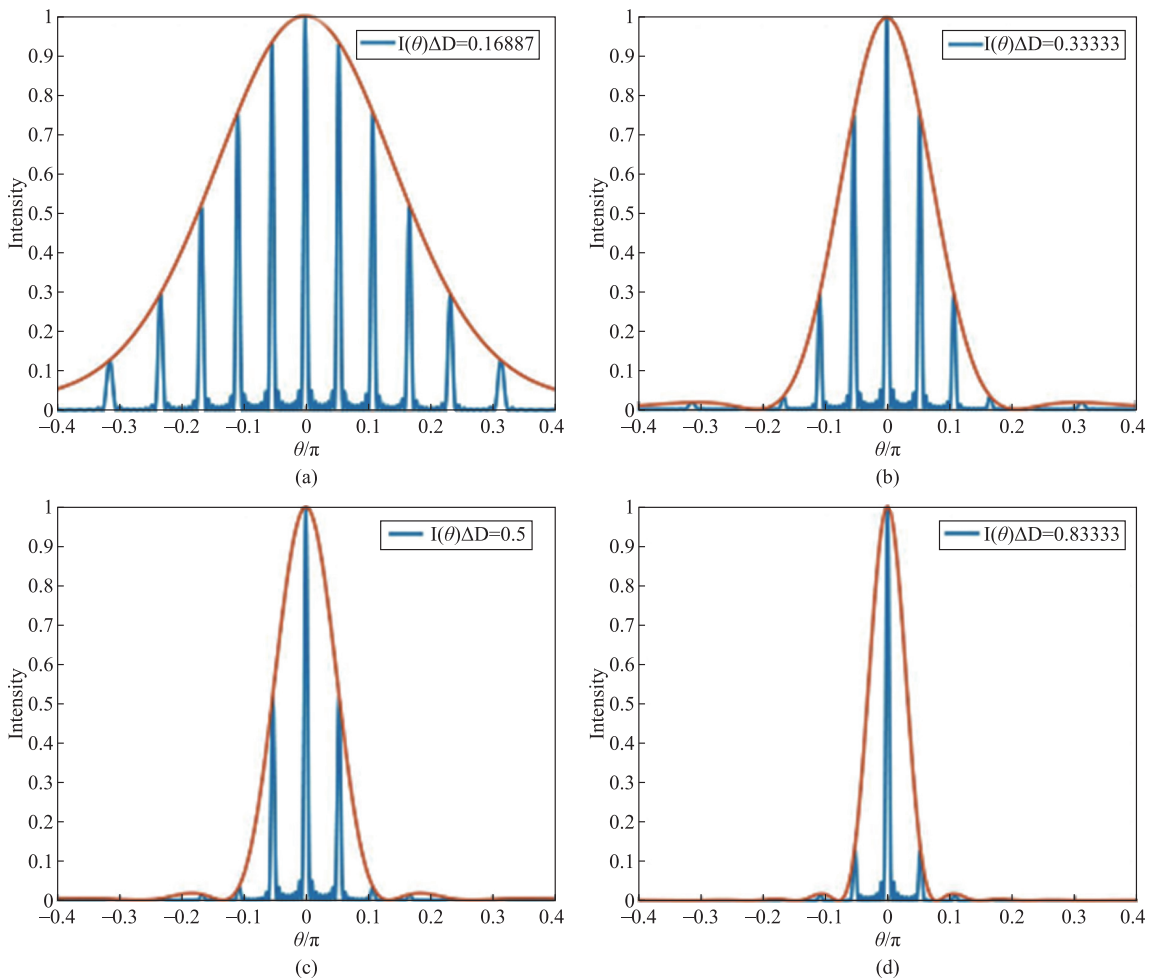


图 3 衍射图样随 a/d 的值变化的规律

(a) 缝宽 a 与光栅常数 d 的比值为 0.16887 时的光栅衍射图谱; (b) a/d 为 0.333 时的光栅衍射图谱; (c) a/d 为 0.5 时的光栅衍射图谱; (d) a/d 为 0.8333 时的光栅衍射图谱

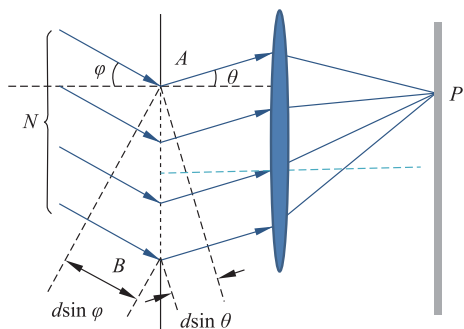


图4 斜入射示意图

$$d(\sin\varphi - \sin\theta) = k\lambda \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (6)$$

同样分析 $k=0$ 时的 0 级衍射光栅,可以得到

$$d\sin\varphi = d\sin\theta \quad (7)$$

相位差:

$$d\sin\theta = \frac{\lambda}{2\pi d}\delta \quad (8)$$

式中, δ 为相位差。

这样我们就可以得到这样结论改变 φ , 即可改变 0 级衍射光 θ 的方向。进一步我们用 Matlab 仿真得到了随 φ 变化的光栅衍射的动态图谱, 如图 5 所示, 进一步结合雷达扫描动态图样, 分析了相控阵雷达的基本原理。

2.2 拓展与思考

通过本次的教学探索, 基本上完成了光栅衍射基本知识的讲解和相控阵雷达基本原理的了解, 但是学生对于知识得掌握还是局限于知识本身, 为了提升学生的主动学习和动手能力, 我们为

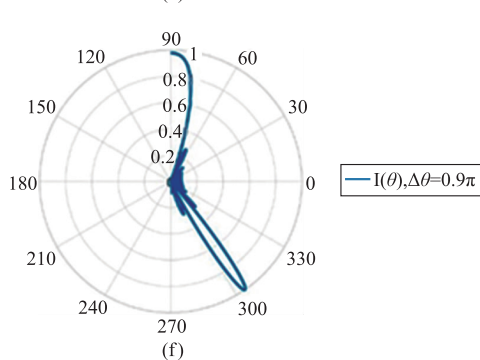
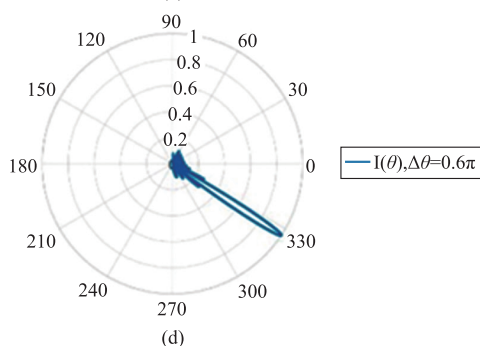
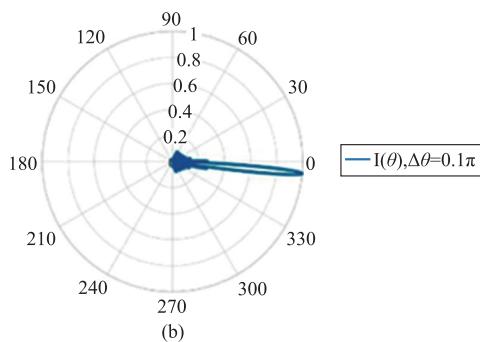
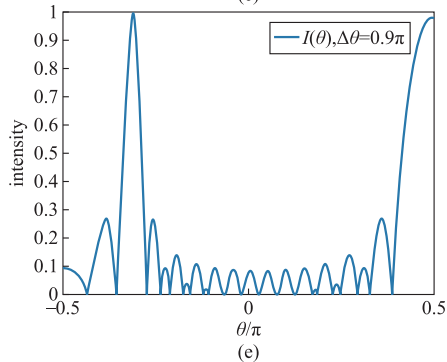
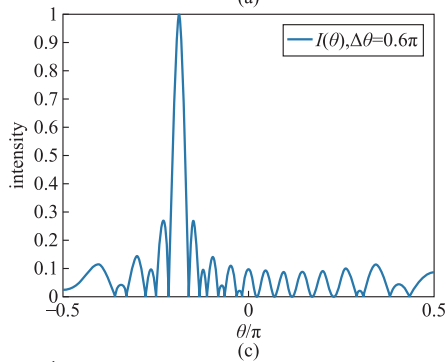
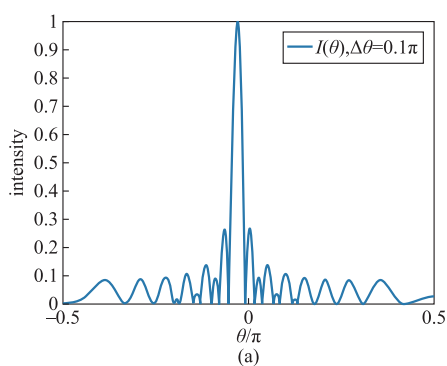


图5 随入射角变化的光栅衍射的图谱

(a) 当入射角为 0.1π 时, 光栅衍射图谱; (b) 当 0.1π 时, 光栅衍射图谱对应的雷达扫描图谱; (c) 当入射角为 0.6π 时, 光栅衍射图谱; (d) 当 0.6π 时, 光栅衍射图谱对应的雷达扫描图谱; (e) 当入射角为 0.9π 时, 光栅衍射图谱; (f) 当 0.9π 时, 光栅衍射图谱对应的雷达扫描图谱

学生在课后通过“雨课堂”(雨课堂是清华大学和学堂在线于 2016 年共同推出的一款智慧教学工具)提供了两个思考题,基于这两个思考题的分析和解答,学生在巩固本次内容的同时,又开阔了视野,对于本次教学内容地掌握和理解得到了质地提升。图 6 为课后拓展的素材之一——相位控制阵列演示图。

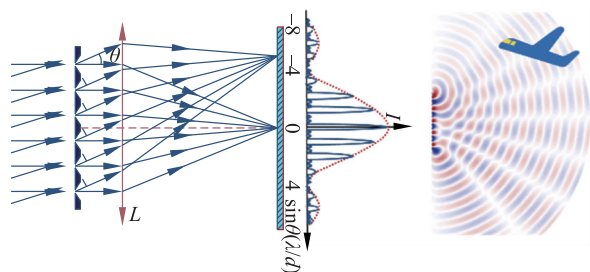


图 6 相位控制阵列演示图

2.3 光栅衍射课堂实验

光栅衍射的课程实验较为缺乏,我们在介绍光栅衍射图样的时候采用较为简单直观的实验,用激光笔作为单色光源,手持光栅片,可以在黑板上形成中间亮,两边亮度减弱的衍射图样。此为点光源衍射,同时改变激光的光源,对比绿色激光笔和红色激光笔的衍射图样,可以清晰地展示波长对衍射图样地影响。通过简单直观的课堂实验演示,增强课堂地互动,提升了教学效果,同时也避免了物理实验和物理课堂分析的状况。

2.4 光栅衍射课程思政

物理教学作为纯理科教学,对于情感态度价值观的把控往往体现在课程整体对于严谨的科学态度、缜密的逻辑思维能力的培养。本课程将案例教学与课程思政有机结合,在提高学生兴趣的同时,介绍大国国防,提高民族自豪感和荣誉感。

2.5 光栅衍射应用拓展

物理作为各工科的基础,其知识的应用涉及各个领域,为了提升学生视野,巩固学生知识。基于本堂课的内容我们设计了知识拓展教学环节,结合“雨课堂”让学生作为课后作业完成。拓展问题之一是基于相控阵雷达,根据前面的分析,我们发现随着缝宽 a 的减少,衍射的中央亮纹会越来越局域于中央主极大,那么在实际相控阵雷达应用中,是不是缝越小越好? 小到什么程度是最好的,另外为了提高雷达的分辨率,我们还可以通过哪些参数的调整改进? 通过这样的课堂拓展思考真正的将一堂课融为一体,学生有问题,有思考,还有独立解决问题的过程。

3 结语

本文通过相控阵雷达实际问题的解决,结合随堂实验和 Matlab 仿真,完成了光栅衍射地教学探索,通过本次教学探索我们形成了以教学实例为导向,教学知识与新型教学手段结合,课程思政有机融入的创新教学课堂。学生在学习知识的同时,掌握实际解决问题的能力,同时提升教学效果,是非常有效的课堂教学探索。

致谢:感谢北京市教育工会对本文支持。

参 考 文 献

- [1] 姚启钧. 光学教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
- [2] 王俊平, 苏欣纺, 崔慧娟, 等. 普通物理教程[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社, 2021.
- [3] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- [4] 杨植宗. 光栅衍射规律与相控阵雷达原理[J]. 物理通报, 2004(4): 39-41.
YANG Z Z. Grating diffraction law and principle of phased array radar[J]. Physics Bulletin, 2004(4): 39-41. (in Chinese)
- [5] 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.
ZHAO W, ZHANG Z M. Experimental study of diffraction grating characteristics[J]. Physics Experimentation, 2017, 37(10): 22-25. (in Chinese)
- [6] 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): 153-170.
ZHANG H Y, FAN X H, DENG J. Simulation and experimental study of multi-slit Fraunhofer diffraction[J]. Public Communication of Science & Technology, 2015, (19): 153-170. (in Chinese)
- [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.
ZHENG X B, ZHOU G Q, ZHANG D M. Simulation of grating diffraction based on MATLAB[J]. Technology Wind, 2018, (25): 255, 259. (in Chinese)
- [8] 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.
DONG S G, ZHU C Y, TAN P. Z Z. Application of MATLAB visualization program in college physics teaching—Taking grating diffraction teaching content as an example[J]. Journal of Jiangsu Engineering Vocational and Technical College, 2018, 18(3): 104-108. (in Chinese)
- [9] 陈继超, 向文丽. 光栅衍射效应 Matlab 仿真的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2020(1): 45-48.
CHEN J C, XIANG W L. Application of Matlab simulation of grating diffraction effect[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020(1): 45-48. (in Chinese)