

水波干涉衍射的演示与仿真实验设计研究

袁晨翔¹ 翟立朋^{2,3} 常凯歌^{2,3} 李俊豪¹ 叶颖东⁴ 张俊武^{2,3}

(西安交通大学¹电子与信息学部;²物理学院;³大学物理国家级实验教学示范中心;

⁴能源与动力工程学院,陕西 西安 710049)

摘要 本文自主设计了一种水波干涉衍射的演示实验仪器,通过光影法进行增强,展示了水波干涉衍射的效果。本文还研究了振动频率、衍射缝宽等不同条件下的干涉衍射现象,并对该现象的原理进行了深入探讨。同时本文基于 Matlab 开发了一种可视化的水波干涉衍射虚拟仿真实验,具备图形化、直观性等优点。经过与演示实验现象的对比验证了仿真实验的合理性。仿真实验可以更好地应用于大学物理课堂演示。本研究可以促进物理学相关领域的研究和应用,对推动相关领域的发展具有重要的意义。

关键词 水波;干涉衍射;演示实验;仿真实验;Matlab 可视化

DEMONSTRATION AND SIMULATION EXPERIMENTAL DESIGN OF WATER WAVE INTERFERENCE AND DIFFRACTION

YUAN Chenxiang¹ ZHAI Lipeng^{2,3} CHANG Kaige^{2,3} LI Junhao¹ YE Yingdong⁴ ZHANG Junwu^{2,3}

(¹ Faculty of electronic and information engineering; ² School of Physics;

³ National College Physics Experimental Teaching Demonstration Center;

⁴ School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049)

Abstract This article independently designed a demonstration experimental instrument for water wave interference diffraction, which was enhanced by the light shadow method to demonstrate the effect of water wave interference diffraction. And the interference diffraction phenomenon under different conditions such as vibration frequency and diffraction slit width was studied, and the principle of this phenomenon was deeply explored. At the same time, this article developed a visual virtual simulation experiment of water wave interference diffraction based on Matlab, which has the advantages of graphical and intuitive. The rationality of the simulation experiment was verified through comparison with the demonstration experiment phenomenon. Simulation experiments can be better applied to demonstrate in university physics classrooms. The research results can promote the research and application of physics related fields, and are of great significance for promoting the development of related fields.

Key words water waves; interference and diffraction; demonstration experiments; simulation experiments; visualization in Matlab

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 2022 年西安交通大学本科实验实践与创新创业教育教学改革研究专项(编号:22SJZX01,编号:22SJZX02);2022 年西安交通大学本科教学改革研究项目(拔尖专项)(编号:22BJ03Y);教育部高等教育司 2021 年第二批产学合作协同育人项目(编号:202102153105)。

通讯作者: 翟立朋,男,工程师,主要从事物理实验教学与研究,zhailp2018@xjtu.edu.cn。

引文格式: 袁晨翔,翟立朋,常凯歌,等. 水波干涉衍射的演示与仿真实验设计研究[J]. 物理与工程,2023,33(4):47-51.

Cite this article: YUAN C X, ZHAI L P, CHANG K G, et al. Demonstration and simulation experimental design of water wave interference and diffraction[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 47-51. (in Chinese)

波的干涉衍射是大学物理课程中的重要内容^[1,2],干涉衍射现象广泛存在于机械波、声波、光波、电磁波等各种类型的波。对于声波、光波和电磁波的干涉衍射,只能观察到干涉衍射结果而无法看到干涉衍射过程。水波作为一种机械波,能够非常直观地观察到干涉衍射的过程,所以水波经常被用来设计作为干涉衍射演示实验的理想载体^[3-5]。

演示实验是大学物理课程中重要的一环^[6,7]。伴随着近年来高校的扩招,大学物理课堂的学生容量越来越大,水波演示实验因为需要近距离观察,导致实际教学应用越来越少。所以本文自主设计了一种水波干涉衍射的演示实验装置,增强了干涉衍射图样对比度,极大地方便了干涉衍射过程的展示,并基于 Matlab 开发了一款虚拟仿真实验软件,通过与实验对比验证了仿真实验的可行性。仿真实验替代演示实验能够很好的匹配大班教学的现实场景。

1 演示实验设计

1.1 理论模型

当频率相同、振动方向平行、相位差恒定的两列波叠加时,某些区域振动始终增大,而使另一些区域振动始终减小的现象,称为波的干涉现象。只有两列波频率一样,振动方向平行,相位差恒定时才能产生干涉现象。

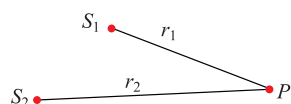


图1 双波源干涉的理论模型

如图1所示为两个频率相同的波源 S_1 和 S_2 , 波源传播到任意一点 P 的振幅分别可表示为:

$$y_1 = A_{10} \cos\left(\omega t + \varphi_{10} + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot r_1\right) \quad (1)$$

$$y_2 = A_{20} \cos\left(\omega t + \varphi_{20} + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot r_2\right) \quad (2)$$

其中 A_{10} 、 A_{20} 分别表示两个波源的振幅, ω 为波源振动的角频率, φ_{10} 、 φ_{20} 分别振动的初相位, r_1 、 r_2 为分别 P 点到两个波源的距离。则 P 点的振幅可以表示为:

$$y = y_1 + y_2 \quad (3)$$

建立坐标系后,即可得到双波源干涉的理论图样,如图2所示。可以看出,频率相同的两列波叠加时,某些区域振动加强,某些区域振动减弱,这些区域相互间隔,形成了稳定的干涉图样。

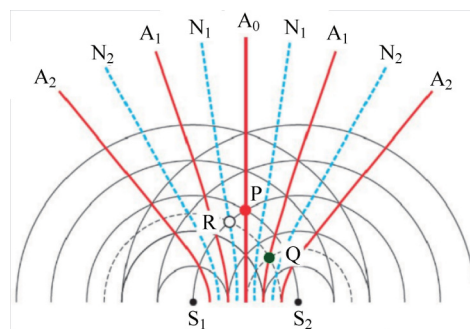


图2 双波源干涉的理论图样

波绕过障碍物传播的这种现象叫做波的衍射^[1,2]。当缝、孔的宽度尺寸与波长接近,或者比波长小时,能观察到明显的衍射现象,波长与狭缝大小相等时,衍射现象最明显。水波的衍射可以通过惠更斯原理来解释,即在水面上每一点都可以看作一个次级波源,它们发出的波峰和波谷在水中相互干涉,产生新的波前,从而形成了衍射波,如图3所示。当水面上存在一道狭缝时,狭缝两侧的水波传播方向发生偏转,同时在狭缝两侧分别形成半圆形的波前,这些波前相互重叠,形成交错的干涉花样。其间发生的相消干涉和相长干涉的效应使得不同位置的水波的相位和振幅存在差异,形成衍射波并沿各个方向传播。

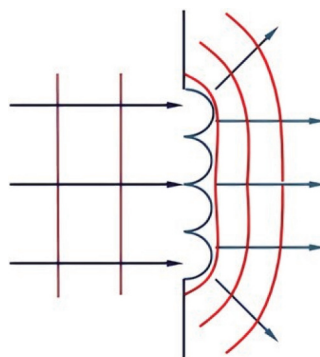


图3 水波衍射的原理图

1.2 演示实验设计

水波是一种机械波,具有不可压缩性,水波中波峰与波谷的形成都来源于水从波峰向波谷的流动,水波中的每一个质点既做横向运动又做纵向

运动,也就是说既有横波的部分也有纵波的部分。所以水波的干涉衍射需选择在浅水波中进行,如图4所示。图中 x 为水波的传播方向, d 为水深, L 为水波波长。

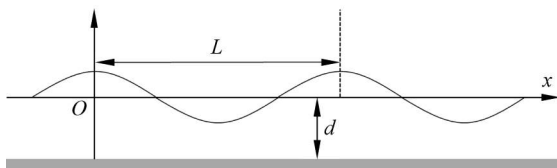


图4 浅水波坐标示意图

本文设计将水槽、振源和驱动电机等装置按照如图5(a)所示的示意图进行,为了能够提高干涉衍射图样的对比度,我们在水槽上方加上光源,通过光源对衍射水波在装置底部的投影来观察干涉衍射波形,以方便更清楚地观察到干涉衍射现象,如图5(b)所示。

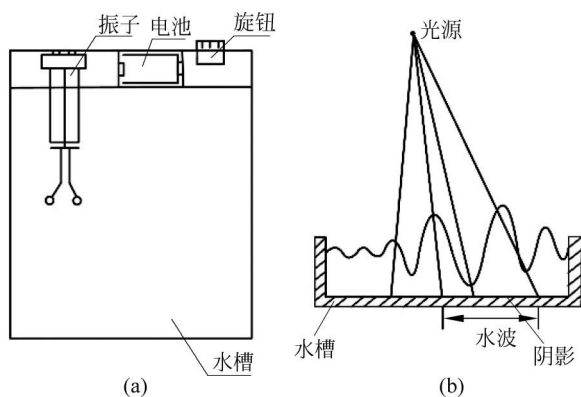


图5 干涉衍射装置示意图和光影法原理图

基于以上关于干涉衍射的理论和实验模型,搭建了如图6所示的实验装置。图中数字1~6分别表示为发波振子、电池、频率调节旋钮、导线、挡板和备用挡板。振子在水中可以按照一定的频

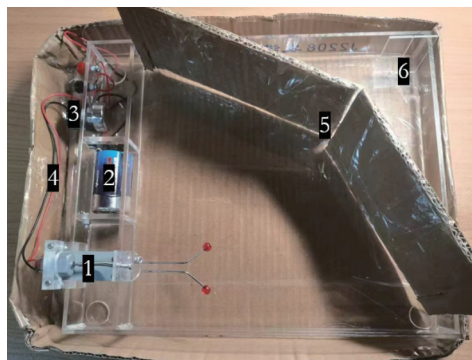


图6 水波干涉衍射装置图

率振动产生水波,并通过其上的旋钮调节振子的振动频率,从而调控波源的振动频率,通过调节纸板的位置可以设置狭缝的宽度,进而提高实验现象的对比度。

2 实验方法

将实验仪器水平放置在实验平台上,向水槽内倒入10mm的清水,将振子浸水湿润后固定在振动源上,并调节振子的高度,使其浸入水面1~2mm,接通电源后调节频率旋钮,改变振动频率观察不同频率下(5Hz、10Hz、15Hz和20Hz)的干涉图样,如图7所示。可以看出随着振动频率的升高,在相同的视场下干涉条纹密度越高。

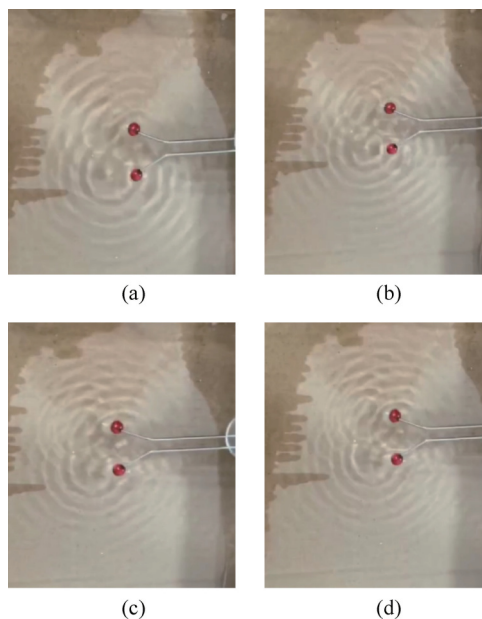


图7 不同振动频率下的干涉图样

(a) 5Hz; (b) 10Hz; (c) 15Hz; (d) 20Hz

将双振子换成单振子并固定好,调节振子的频率为5Hz,使用纸板和胶带自制衍射挡板。在挡板上分别裁剪出缝宽不同的狭缝,缝宽分别2mm、3mm、4mm、5mm,将挡板放到距离波源5cm处,可以得到其衍射图样,如图8所示。可以看出水波在缝宽与其波长大小相等时衍射现象最为明显,在狭缝过窄与过宽时衍射现象减弱。是因为当狭缝过窄时,虽然满足衍射波长条件,但水波能够通过狭缝的振动能量减小,衍射现象减弱;当缝宽大于水波波长时,不太容易产生衍射现象,所以衍射现象减弱。该装置能够比较好地完成演

示实验的要求。

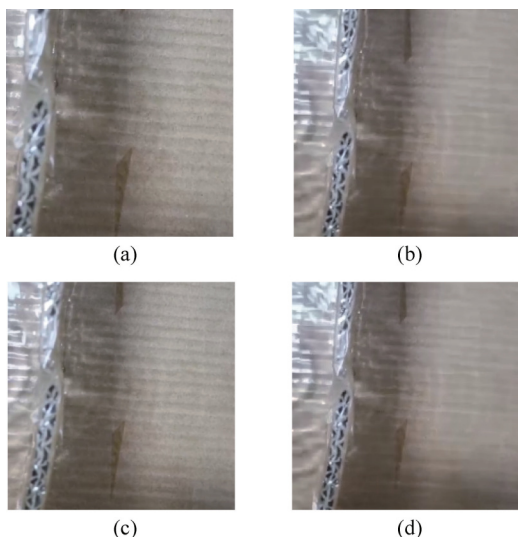


图8 不同衍射缝宽条件下的衍射图样
(a) 2mm; (b) 3mm; (c) 4mm; (d) 5mm

3 仿真实验的开发设计

但不管是本文所设计的水波装置还是传统水波演示装置,都不太能够满足大班授课的要求,所以本文基于 Matlab 设计了参数可以调节的仿真 APP,如图 9 所示。该 APP 可以计算并给出不同

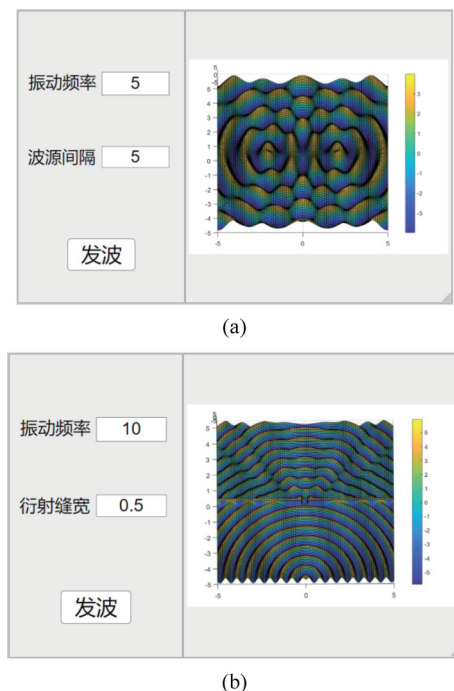


图9 虚拟仿真实验 APP 界面
(a) 干涉仿真演示界面; (b) 衍射仿真演示界面

频率、不同间隔和不同缝宽等条件下的水波干涉与衍射图案。

为了更直观地在大班授课中应用仿真演示 APP,本文还设计了不同参数之间的对比试验。图 10 为不同振动频率的干涉图样对比,与此同时对比参数可以很方便地进行改变。

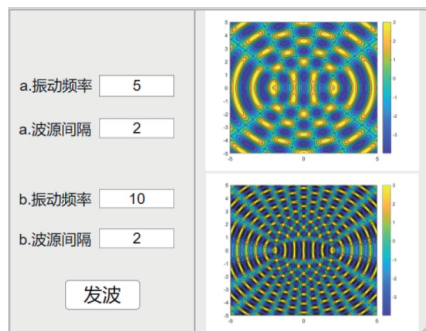


图10 不同振动频率之间的干涉图样对比

图 11 为在不同频率下改变衍射缝宽所得到的衍射图样,从图中可以看出,缝宽的改变对衍射图样的影响较大,在缝宽小于或与水波波长相近,衍射现象更为明显。

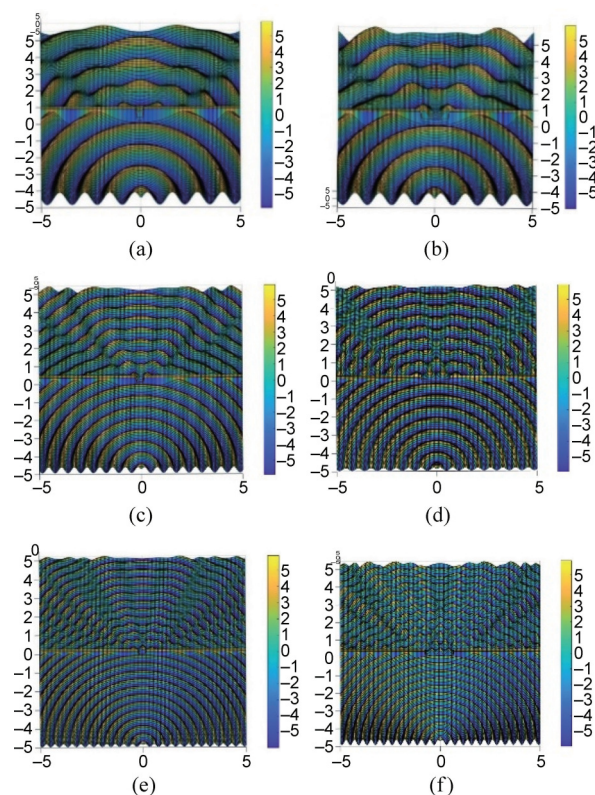


图11 不同衍射条件下的衍射图样对比
(a) 5Hz, 2mm; (b) 5Hz, 4mm; (c) 10Hz, 2mm; (d) 10Hz, 4mm; (e) 15Hz, 2mm; (f) 15Hz, 4mm

4 总结

本文运用浅水波模型分析了水波在不同频率下干涉和衍射的波形图,推导出水波的干涉与衍射原理公式,以发波水槽和双振子为基本实验仪器,通过实验进行演示,观测到了水波的干涉与衍射,并使用 Matlab 进行仿真模拟,增强了水波在干涉和衍射过程中的可视化。同时,设计了通过光照投影的方法来增强水波干涉实验的可观察性,并设计了一款用于课堂教学实践的 APP。理论与实验研究证明:对于水波干涉,在波源间距一定的情况下,频率越大的波其干涉条纹越密,干涉条纹的间距越小。对于水波衍射,其发生对缝宽的要求较为苛刻,只有对于缝宽小于水波波长或与水波波长相近的情况下才能发生。

参 考 文 献

- [1] 吴百诗. 大学物理学(下册)[M]. 北京:高等教育出版社, 2012. 12.
- [2] 程守洙,江之永. 普通物理学(第六版)下册[M]. 北京:高等教育出版社,2006. 12.
- [3] 魏薇. 电磁谐振水波干涉演示仪的设计研究[J]. 物理与工程,2012(3):23-25.
- WEI W. Design of water wave interferometer of electromagnetic resonance[J]. Physics and Engineering, 2012(3): 23-25. (in Chinese)
- [4] 杨万琴,汪成瑞,张铁炳. 基于声振动的机械波干涉与衍射实验[J]. 物理实验,2018(4):59-60.
- YANG W Q, WANG C R, ZHANG Y B. Demonstrating device of exploring sound propagation conditions based on magnetic suspension[J]. Physics Experimentation, 2018(4): 59-60. (in Chinese)
- [5] 卢桂林,钟浩源,谭铝平,等. 液体表面驻波的演示和驻波波长的测量[J]. 物理实验,2019(5):29-33.
- LU G L, ZHONG H Y, TAN L P, et al. Observing and measuring standing waves on liquid surface[J]. Physics Experimentation, 2019(5): 29-33. (in Chinese)
- [6] 秦哲,杨广武,胡雪兰,等. 基于便携式课堂演示实验的大学物理教学探索与实践[J]. 大学物理,2021(11):26-30.
- QIN Z, YANG G W, HU X L, et al. Exploration and practice of college physics teaching based on portable demonstration experiment[J]. College Physics, 2021(11): 26-30. (in Chinese)
- [7] 孙宝印,李成金,刘军. 基于创新能力培养的物理演示实验教学模式[J]. 物理实验,2017(S1):25-28.
- SUN B Y, LI C J, LIU J. Demonstration experiment teaching based on the cultivation of innovative ability[J]. Physics Experimentation, 2017(S1): 25-28. (in Chinese)