

基于 Unity3D 的全息照相与全息干涉法虚拟仿真平台

罗杨一飞¹ 郑 晓² 王光祖¹ 程泽轩¹ 董国波² 张国锋²

(北京航空航天大学¹ 计算机学院, 北京 100191; ² 物理学院, 北京 102206)

摘 要 全息照相和全息干涉法研究需要对实验仪器进行精准的控制和调整, 同时实验现象的观察与测量依赖于干板的成像效果。而虚拟仿真实验能够弥补实验现象的观察与测量而出现的问题, 同时也能够准确体验操作过程, 获得更为理想的实验效果。我们基于 Unity3D 搭建虚拟仿真实验平台, 由单色光干涉理论计算得到干板透射率分布, 通过再进行实时渲染出实验效果以便学生研究全息照相与全息干涉法实验。借助虚拟仿真平台, 可以使实验教学更加轻松, 让学生更加直观地理解实验, 同时得到更高的实验成功率与更好的实验效果。

关键词 虚拟仿真; 全息照相; 全息干涉法; Unity3D

THE VIRTUAL SIMULATION PLATFORM OF HOLOGRAM AND HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY EXPERIMENTS BASED ON UNITY3D

LUOYANG Yifei¹ ZHENG Xiao² WANG Guangzu¹ CHEMG Zexuan¹
DONG Guobo² ZHAMG Guofeng²

(¹ School of Computer Science, Beijing 100191;

² School of Physics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 102206)

Abstract The research of holography and holographic interferometry requires accurate control and adjustment of experimental instruments. At the same time, the observation and measurement of experimental phenomena depend on the imaging effect of dry plate. The virtual simulation experiment can solve these problems caused by observation and measurement of experimental phenomena. At the same time, students can experience the operation process accurately and get more ideal experimental results. We design a virtual simulation experiment platform based on unity3D, calculate the transmittance distribution of the dry plate from the monochromatic light interference theory, and then render the experimental effect in real time for students to study holography and holographic interferometry experiments. With the help of virtual simulation platform, the experimental teaching can be more relaxed, so that students can understand the experiment more intuitively, and get a higher success rate and better experimental effect at the same time.

Key words virtual simulation; hologram; holographic interferometry; Unity3D

收稿日期: 2021-12-29

基金项目: 北京航空航天大学 2019—2022 年教育教学改革培育项目(ZG211J1984); 物理学(1)校级一流课程项目资助。

通讯作者: 郑晓, 女, 讲师, 主要从事物理教学科研工作, 研究方向为理论物理。xiaozheng@buaa.edu.cn。

引文格式: 罗杨一飞, 郑晓, 王光祖, 等. 基于 Unity3D 的全息照相与全息干涉法虚拟仿真平台[J]. 物理与工程, 2022, 32(5): 110-116.

Cite this article: LUOYANG Y F, ZHENG X, WANG G Z, et al. The virtual simulation platform of hologram and holographic interferometry experiments based on Unity3D[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 110-116. (in Chinese)

虚拟仿真实验教学综合应用多媒体、人机交互、可视化、仿真、虚拟现实、虚拟仿真、增强现实、数据库以及网络通讯等技术,通过构建逼真的实验环境和仪器,使学生在开放、自主、交互的虚拟环境中进行高效、安全且经济的实验,进而达到真实实验不具备或难以实现的效果。当前,虚拟仿真实验教学中心建设受到高校的高度重视,其既为实验室建设注入了新的活力,也为推进实验教学改革与创新增添了新的动力^[1]。

全息照相技术最初由英国科学家丹尼斯伽伯(Dennis Gabor)提出,在激光发现后有了迅速的发展,在全息显微术、全息显示、全息干涉计量、全息信息存储、计算全息、模压全息和医学等领域得到广泛应用^[2]。因此,全息实验引起很多人的兴趣去研究,而全息实验的研究需要对实验仪器进行精准的控制和调整,且对温度、湿度和噪声等环境因素十分敏感,实验成功率较低,现象与结果不易记录。而虚拟仿真实验可以提供理想的实验环境条件、完美保存实验结果,同时又有助于学生理解熟悉实验操作。利用 Solidworks 可建立各种实验仪器部件的 3D 模型,使用 Blender 可将各部件赋予不同材质并拼接起来得到逼真的实验仪器,再使用 Unity3D 便能够实现虚拟仿真实验平台的功能,实现最大程度还原真实实验场景。由光的单色光干涉理论,计算激光在干板上的光场分布,再利用光的衍射原理^[3],对于干板进行实时渲染,得到实验结果。同时设计友好的人机交互,使用键盘调整视角,鼠标控制仪器的移动与旋转,并提供虚拟直尺用于测量条纹间距。借助虚拟仿真平台,可以使实验教学更加轻松,让学生更加直观地理解实验,同时得到更高的实验成功率与更好的实验效果。

1 全息照相的基本原理

全息照相不仅要记录物体光波的振幅,而且还要记录相位,而记录介质只对光的强度敏感,因此必须把相位也转换成振幅信息并把它记录下来。光的干涉效应——两列相干光波叠加而产生明暗相间的干涉条纹(干涉图案),不但与这些相干光的振幅有关,而且与相位有关,为了产生干涉效应记录相位,可用另一束称之为参考光的相干光和物体光波相干干涉来完成^[3-8]。

下面对全息照相作具体的数学描述。记干板所在位置平面为 xy 平面,物光所引起的振动表达式为

$$E_O(x, y) = A_O(x, y) \cos[\omega t + \varphi_O]$$

参考光所引起的振动表达式为

$$E_R(x, y) = A_R(x, y) \cos[\omega t + \varphi_R]$$

若写为复数形式,有

$$\begin{cases} E_O(x, y) = A_O(x, y) e^{i\varphi_O(x, y)} e^{i\omega t} \\ E_R(x, y) = A_R(x, y) e^{i\varphi_R(x, y)} e^{i\omega t} \end{cases} \quad (1)$$

考虑到对于相干波的叠加,其中有效的是振幅与相位,用复振幅来表示,即省去时间相位因子 $e^{i\omega t}$,由此得到物光和参考光的复振幅

$$\begin{cases} O(x, y) = A_O(x, y) e^{i\varphi_O(x, y)} \\ R(x, y) = A_R(x, y) e^{i\varphi_R(x, y)} \end{cases} \quad (2)$$

物光和参考光相干叠加得到的合成光场复振幅即为

$$H(x, y) = O(x, y) + R(x, y) \quad (3)$$

合成光场的光强为

$$I = HH^* = [O + R][O^* + R^*] \quad (4)$$

式中 H^* 为 H 的共轭复数。其中为使得表达式简洁,将 x, y 省略。展开式(4)即可得到

$$\begin{aligned} I &= A_O^2 + A_R^2 + A_O A_R e^{i(\varphi_O - \varphi_R)} + A_O A_R e^{-i(\varphi_O - \varphi_R)} \\ &= A_O^2 + A_R^2 + 2A_O A_R \cos(\varphi_O - \varphi_R) \end{aligned} \quad (5)$$

上式中光强 $I(x, y)$ 包含了物光波的振幅和相位信息,将干板进行一定时间的曝光,并进行溶液的冲洗操作后,便得到了一张全息图。

假定使用照明光 $R'(x, y)$ 来进行全息图的再现,设其复振幅为

$$R'(x, y) = A_{R'}(x, y) e^{i\varphi_{R'}(x, y)} \quad (6)$$

将全息图视为衍射屏,则透过全息图后衍射波的复振幅为

$$U(x, y) = R'(x, y)t(x, y) \quad (7)$$

其中 $t(x, y)$ 为全息图的透射率,对于经过一定时间曝光后线性处理的全息图,其透射率与曝光时光强成正比,即

$$t(x, y) = t_0 + \beta I(x, y) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)可得

$$U(x, y) = R'(x, y)[t_0 + \beta I(x, y)] \quad (9)$$

进一步,可代入 $I(x, y)$ 得

$$U = U_0 + U_{+1} + U_{-1} \quad (10)$$

其中 $U_0 = [t_0 + \beta(A_O^2 + A_R^2)]A_{R'}e^{i\varphi_{R'}}$ 。可见其除

了系数 $[t_0 + \beta(A_O^2 + A_R^2)]$ 与再现光完全相同, 为零级衍射, 在全息图的再现中不考虑。其中 $U_{+1} = \beta A_{R'} A_R e^{i(\varphi_{R'} - \varphi_R)} O$ 为 +1 级衍射波, 考虑到若再现光与参考光完全一致, 则有 $\varphi_{R'} = \varphi_R, A_{R'} = A_R$, 于是可得

$$U_{+1} = \beta A_R^2 O \quad (11)$$

可见其除了系数 βA_R^2 与原物光 O 完全相同, 实现了原物光的再现。

2 虚拟仿真实验平台的搭建

首先建立本实验各个仪器的 3D 模型。利用 Solidworks 软件建立每一个仪器部件, 如旋钮、底座、螺丝等, 再通过 blender 将部件赋予不同的材质并拼接组装为仪器, 最后通过 Unity3D 搭建实验环境, 使得仪器的每一个部件均可进行与现实相同的操作, 最大程度地还原真实实验室, 得到更好的虚拟仿真效果。在本平台中, 我们建立了 He-Ne 激光器、全息台、平面反射镜、分束镜、扩束镜等一系列光学仪器的等比例 3D 模型。其中平面反射镜和分束镜如图 1 所示。

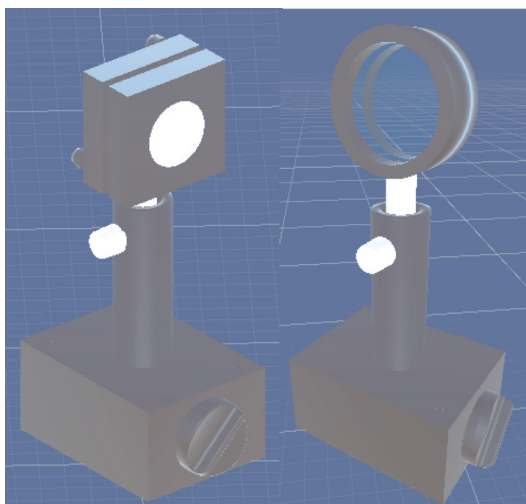


图 1 平面反射镜与分束镜模型

接下来通过 Unity3D 软件搭建实验平台, 将系统分为多个子系统: 光路系统、元件系统、干板系统、溶液系统。这 4 个子系统互相协作运行, 下面给出他们之间的交互关系, 如图 2 所示。

再接下来是元件系统的搭建用于控制用户与仪器的交互。该子系统的目的为编写程序使得场景中所有仪器均可交互, 且尽量将现实中可完成

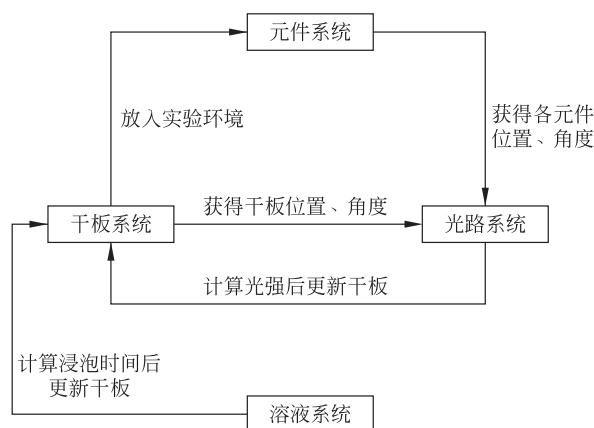


图 2 系统总框架构图

的操作复现, 因此我们设计了统一的交互方式: 鼠标左键点击某一个部件拖动即可移动该部件, 鼠标右键点击某一个部件拖动即可旋转该部件, 此外旋钮的控制则是通过鼠标左键控制逆时针旋转, 鼠标右键控制顺时针旋转。另外还可通过下面的固定旋钮来将其固定。下面我们给出该系统的运行框图, 如图 3 所示。

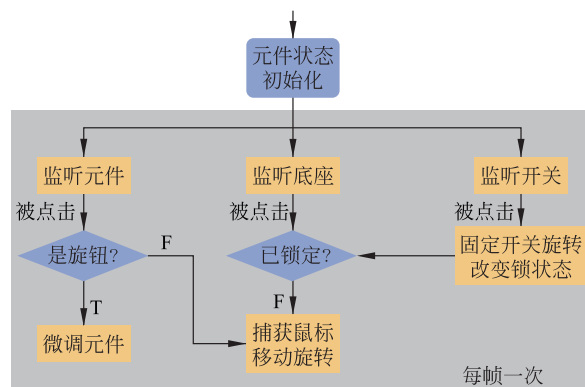


图 3 元件系统框图

再是光路系统的搭建用于计算光学模型。光路系统可以根据元件系统可得到当前所有仪器所处位置, 之后再通过几何光学的反射公式即可得到激光的光路。对于不同的仪器, 其均与现实中对激光的物理效果相同, 如图 4 至图 6 所示。

之后可以通过光程的计算, 利用第一章中的光学理论可得出当前干板上的光场分布, 从而对干板的透射率分布进行实时更新。如图 7 所示, 假设当前有参考光从点 $R(x, y, z)$ 发出以及有物光从点 $O(x'', y'', z'')$ 发出, 则对于干板上一点 $S(x', y', z')$, 两者在其上产生的光强可由式(5)得到。对于干板上的每一点, 干板透射率 T 与曝

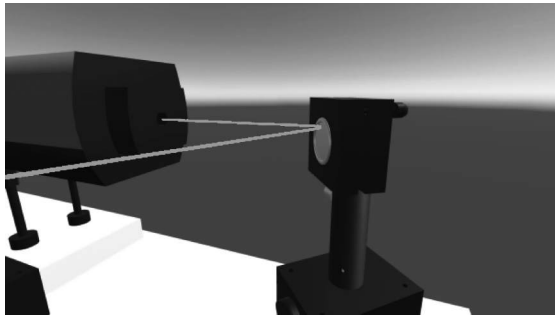


图4 激光入射平面反射镜

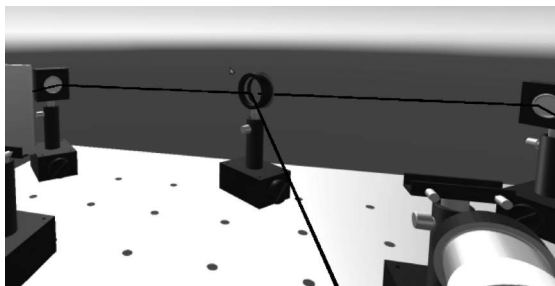


图5 激光经过分束镜

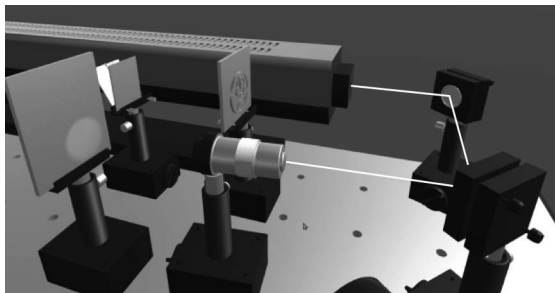


图6 激光经过扩束镜

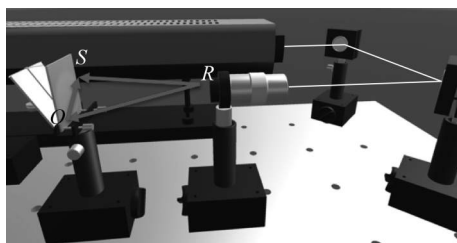


图7 光路示意图

光时光强成线性关系,每过 dt 时间(即 unity3D 中的一帧),记录一次当前干涉光强,经过 t 时间的曝光后,干板透射率为

$$T = T_0 + \int_0^t \beta I dt \quad (12)$$

其中, T_0 为干板透射率的初始值。

最后利用衍射相关理论通过着色器渲染出干板的效果,即进行实验现象的可视化。在进行光

场的计算时,计算量较大,因此使用多线程并行计算,以避免操作界面的卡顿。光路系统的程序框图如图8所示。

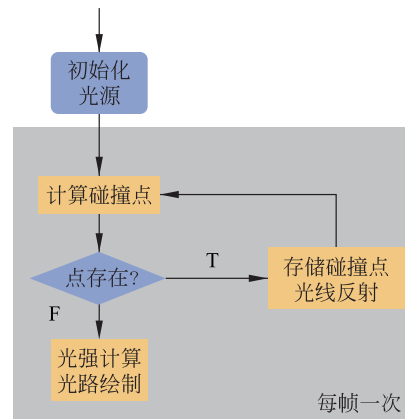


图8 光路系统框图

最后是干板系统与溶液系统的搭建主要用于管理干板和干板的浸泡处理。也就是说,对于干板进行统一的管理,对每一个干板的透射率分布进行保存,从而实现一次可完成多个实验并且保存每次实验的结果,方便查看实验结果。干板系统与溶液系统的程序框图如图9所示。

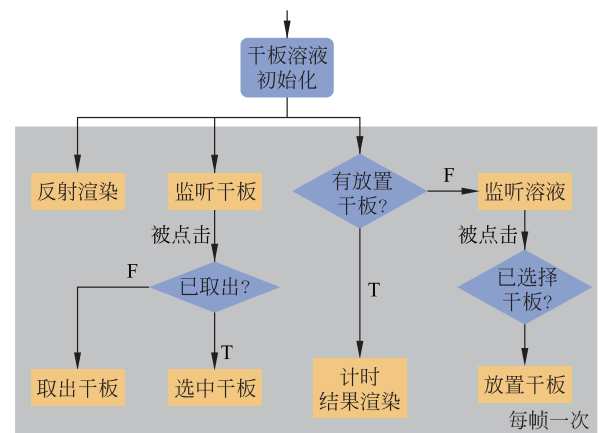


图9 干板与溶液系统框图

另外为了方便平台的使用,提供网页版平台,利用 WebGL 技术将项目部署至网页,学生只需在浏览器打开网页即可在线进行实验操作,无需下载任何软件。

3 仿真实验流程

该平台主要支持3个实验:反射式全息照相、二次曝光法测定铝板的弹性模量、透射式全息

照相^[3]。

以二次曝光法测定铝板的弹性模量实验为例,进行一次完整的虚拟仿真实验。

对于场景中的所有仪器设置均与实验室中一致^[3],在该实验中使用不到的仪器只需将其摆放在旁边。

首先进行光路调节,如图 10 所示。利用鼠标可以调整平面反射镜的位置、高低、俯仰等角度,同理也可调整扩束镜的位置与角度,将激光通过扩束镜形成的光斑略比干板小一些,同时保证铝板与激光大致垂直。

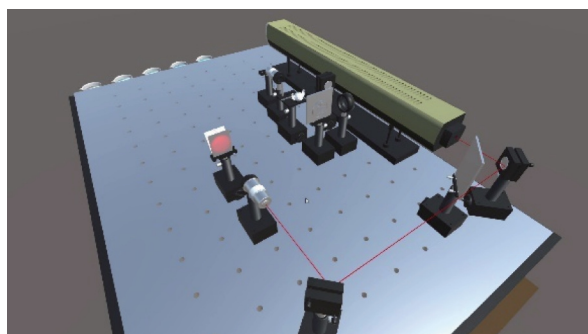


图 10 调节平面反射镜和扩束镜

调节完成后,将激光先挡住,前往干板盒取一块干板,并将干板放上,之后挂上一个砝码,如图 11 所示。

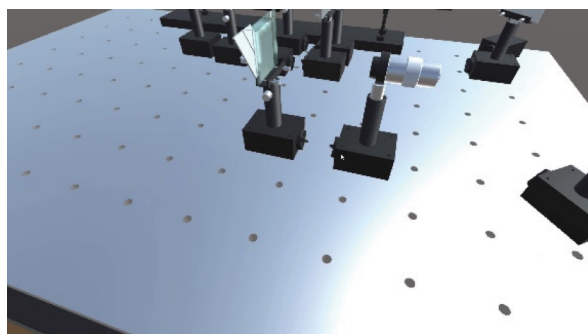


图 11 放上干板和挂一个砝码

让激光形成的光斑照在干板上,进行第一次曝光,时间为 25 秒(图 12)。

之后将激光挡住,挂上第二个砝码,待稳定后再将挡光板移开,进行第二次曝光,时间为 35 秒(图 13)。

曝光完成后,进行干板的处理:将曝光后的干板用鼠标点击,放在纯净水中浸泡 30 秒取出,滤尽水;将干板依次放入 40%、60%、80%浓度的异

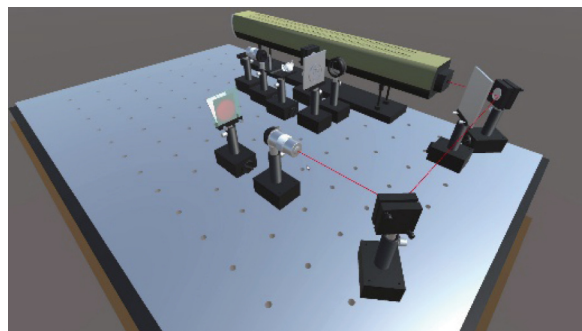


图 12 第一次曝光

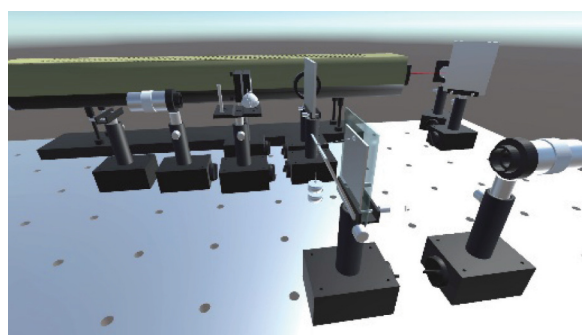


图 13 挂第二个砝码与第二次曝光

丙醇溶液中各脱水 30 秒后取出;最后将干板放入 100%浓度的异丙醇中脱水,直至干板呈现红色或黄绿色为止(图 14)。



图 14 干板的冲洗处理

最终即可得到实验结果,如图 15 所示,可使用直尺测量条纹间距,并利用一元线性回归法得到铝板的弹性模量。反射式全息图在记录时用波长为 632.8nm 的激光,可以预期,用白光再现,像也应是红的,但实际上,看到的再现像往往是绿色的,其原因是底板在冲洗过程中,乳胶发生收缩,使干涉层间距变小^[3]。

对于其他两个实验也可以经过类似操作,下面给出调整光路后的示意图如图 16、图 17 所示。

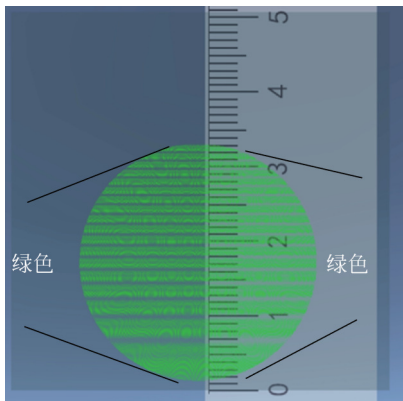


图 15 实验结果

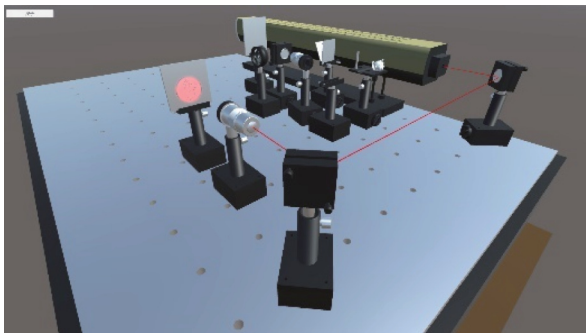


图 16 反射式全息照相光路示意图

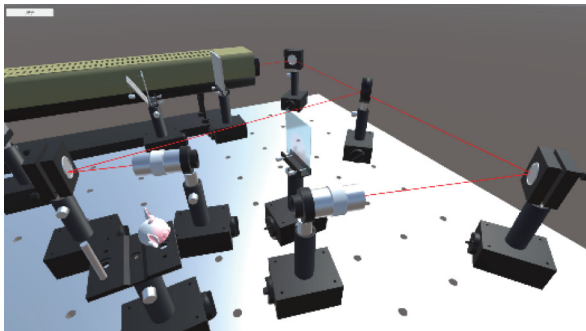


图 17 透射式全息照相光路示意图

4 实验结果与讨论

对于二次曝光法测定铝板的弹性模量实验,原始数据见表 1 所示。

表 1 原始数据

暗条纹级数 k	0	1	2	3	4	5
暗条纹位置 l/mm	6.8	9.5	12.4	14.3	16.2	18.0

由《基础物理实验》课本中两次曝光法测定金属板的弹性模量中可知^[2]

$$E = \frac{4F_y l^2 (3L - l)}{(2k - 1) \lambda b h^3} (\cos \alpha + \cos \beta) \quad (13)$$

在本实验中, $\alpha \approx 0, \beta \approx 0$, 因此我们的式(13)可化简为

$$l^2 (3L - l) = \frac{E \lambda b h^3}{8F_y} (2k - 1) \quad (14)$$

令 $y = l^2 (3L - l), x = k$, 设直线方程 $y = ax + b$, 则 $a = \frac{E \lambda b h^3}{4F_y}$, 得到如表 2 所示线性回归数据表。

表 2 线性回归数据

x	0	1	2
$y/10^{-9} \text{m}$	6621.568	12680.125	21157.376
x	3	4	5
$y/10^{-9} \text{m}$	27749.293	35114.472	42768.000

线性回归得到

$$a = 7275.061 \times 10^{-9} \text{m}$$

$$b = 6160.821 \times 10^{-9} \text{m}$$

$$r = 0.9994$$

在实验中 $L = 50 \text{mm}, b = 30 \text{mm}, h = 0.6 \text{mm}, \lambda = 632.8 \text{nm}$, 代入式(14)得

$$\begin{aligned} E &= \frac{4F_y a}{\lambda b h^3} \\ &= \frac{4 \times 0.01 \times 9.8 \times 7275.061 \times 10^{-9}}{632.8 \times 10^{-9} \times 30 \times 10^{-3} \times (0.6 \times 10^{-3})^3} \\ &= 69.547 \text{GPa} \end{aligned}$$

铝板弹性模量公认值为 $E' = 72 \text{GPa}$

故相对误差为

$$\eta = \frac{E' - E}{E'} = \frac{72 - 69.547}{72} \times 100\% = 3\%$$

因此,便完成了二次曝光法对铝板的弹性模量的测定。其他两个实验也与该实验类似,按照光路图摆放调整好仪器后进行曝光处理,最后对干板进行冲洗处理,即可得到相应实验结果。

下面进行虚拟实验与真实实验的结果对比,如图 18 至图 20 所示。

其中,真实实验的结果均使用的为记录下来的最好的结果,实际上在真实实验中往往成功率不高,实验效果不佳,而虚拟实验可以保证较高的实验成功率,同时方便保存实验结果。

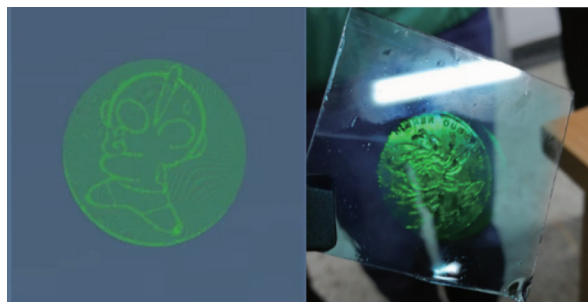


图 18 反射式全息照相实验对比

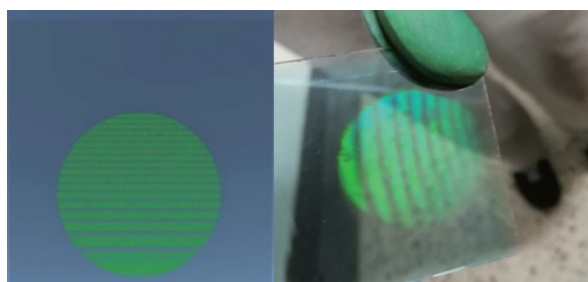


图 19 二次曝光法测铝板弹性模量实验对比

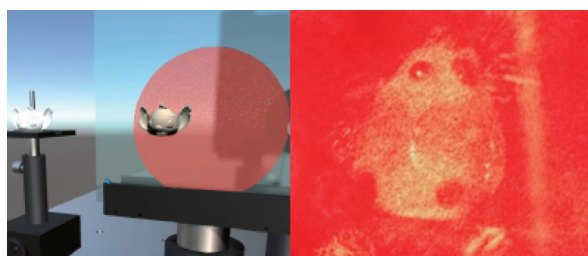


图 20 透射式全息照相实验对比

5 结语

利用 Unity3D 搭建虚拟仿真实验平台,可最大程度还原实验场景。由光的干涉、衍射理论,计算激光入射到干板后的光场分布,将干板处理后再现的效果进行可视化。实验中可利用鼠标和键盘移动视角、控制仪器、调整光路,同时提供虚拟直尺进行条纹间距的测量。借助虚拟仿真软件,可以使实验内容更加丰富,学生可以自主选做相应内容进行研究,加深对全息实验理论的理解。

在大学物理实验教学中辅助使用虚拟仿真实验,能够直观的体现教学内容,有助于学生理解与开发实验,在实验前应用虚拟仿真实验能够更好的达到预习实验的目的,同时也能解决实验室中光学实验局限性的问题^[4]。最后,该虚拟仿真平台能够移植到其他光学实验中,具有极强的拓展能力。

参 考 文 献

- [1] 王卫国,胡今鸿,刘宏. 国外高校虚拟仿真实验教学现状与发展[J]. 实验室研究与探索,2015,(5):214-219.
WANG W G, HU J H, LIU H. Current situation and development of virtual simulation experimental teaching of overseas universities[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, (5): 214-219. (in Chinese)
- [2] 杨桂娟,梅妍,白亚乡. 全息术及其应用[J]. 应用光学,2006,(2):96-100.
YANG G J, MEI Y, BAI Y X. Development and application of holography[J]. Journal of Applied Optics, 2006, (2):96-100. (in Chinese)
- [3] 董国波,唐芳. 基础物理实验 下册[M]. 北京:机械工业出版社,2021:96-105.
- [4] 徐芊歆,唐芳. 基于 Unity3D 的光栅自成像虚拟仿真实验[J]. 物理实验,2020,(6):53-56.
XU Q X, TANG F. Virtual simulation experiment system of grating self-imaging based on Unity3D[J]. Physics Experimentation, 2020, (6):53-56. (in Chinese)
- [5] 杨国光. 近代光学测试技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,1997.
- [6] 王绿苹. 光全息和信息处理实验[M]. 重庆:重庆大学出版社,1991.
- [7] 陈守之. 全息成像原理浅解[J]. 工科物理,1994(1):17-20.
CHEN S Z. Holographic imaging principle shallow explanation[J]. Physics and Engineering, 1994(1):17-20. (in Chinese)
- [8] 梁文耀,刘基. 基于 Unity 的激光全息法制作微结构的虚拟仿真实验开发[J]. 物理实验,2019(3):42-47.
LIANG W Y, LIU J. Virtual simulation experiment development of the fabrication of microstructures using multi-beam holographic interferometry based on Unity[J]. Physics Experimentation, 2019(3):42-47. (in Chinese)