

# 学生视角下细节教学在全息照相实验中的应用\*

吴悦嘉 万佳 王浩 汪海宾

(江苏科技大学理学院 江苏 镇江 212003)

(收稿日期:2022-02-28)

**摘要:**全息照相实验利用光的干涉及衍射原理实现物体的三维成像.从学生视角出发,对实验原理、影响全息照相实验成功与否的实拍操作要点,以及实验教学展示的细节事项,并结合课程思政进行了分析讨论,对于初次学习的学生在有限课时内提高实验的成功率有一定指导作用,对学生提高自信心和激发学习兴趣有着很大的帮助,能够培养学生的实际操作能力和自主探究意识,从而推动大学物理实验课程教学质量的提高.

**关键词:**教学细节 全息照相 相干长度

全息照相实验是面向所有理工科大学生的必修课,是一个考查学生动手能力、观察能力的基础实验.在实验中,学生要理解、掌握全息照相的原理,进行光路搭建、曝光、显影定影,最终得到全息照片,再现出物体的三维立体像<sup>[1-3]</sup>.该实验有助于培养和激发学生的物理实验学习兴趣,更加形象地帮助学生对光的波动及衍射特性知识的理解,对于光学相关专业学生的培养具有重要作用.然而,由于较高的实验操作要求,该实验成功率却不是很高,因此如何帮助初次学习的学生在有限的课时内提高实验的成功率,成为实验教学中必须考虑的问题.本文从学生的视角出发,从实验原理、拍摄操作要点以及实验教学展示的细节事项,并结合课程思政进行了探讨,有利于提高实验成功率,完成实验教学目的.

## 1 从学生视角全息照相实验原理上的细节教学

### 1.1 强调普通照相和全息照相两者的对比 加深对实验原理的理解

光是电磁波,它具有振幅和相位两个主要信息,物体上各点发出的光作为信息被人的眼睛接收引起感知,物光波的光场分布可以通过方程式  $O(x, y) = A_0(x, y)\exp[-j\varphi(x, y)]$  表示,  $A_0(x, y)$  为物光波振幅,  $\varphi(x, y)$  为物光波相位,由于物体上各点发出

的电磁波信息不同,因而人们就能区别物体的颜色、形状和远近<sup>[4]</sup>.

目前,不管是传统胶片感光材料还是 CCD 感光模块,都只能对光波的强度信息产生响应.普通照相技术是利用透镜汇聚光线,将被拍摄物体在某个瞬间漫反射的光波所反映的物体亮度成像于底片上,它丢失了物光波的相位信息,所以普通照片上的物像没有立体感,而且每个物点转换成一个对应的像点,如果照片被截断、破坏,那么原来照片上完整的信息也会被破坏.

全息照相技术利用光的干涉原理,通过物光和参考光的相互干涉,将相位信息转化为干涉条纹的明暗强度信息记录在底片上来进行拍摄,不仅仅记录下物光的强度信息,同时还能记录相位信息,最终以干涉图样的形式记录在全息干板上.底片上的每个点都记录下了所有物点发出的光波信息,因此能重现出原始物光波,从而形成与原物体逼真的三维图像,而且所获得的全息照片即使被截断破坏只剩下一小片,依然可以再现完整的物像.

### 1.2 对比生活中常见的“全息投影”/ 立体成像技术 加强对全息技术的理解

佩珀尔幻象原理是伪全息技术经常使用的原理<sup>[5]</sup>,其主要利用了光的反射来产生物体的立体感,

\* 江苏科技大学校级教改课题,项目编号:1052022002

作者简介:吴悦嘉(1999-),女,在读研究生.

通讯作者:汪海宾(1978-),男,博士,主要从事大学物理教学及研究.

如图1所示,装置主要由投影源和投影平台构成(图2).因为有4个不同角度的投影源,显影时投影源将物像射向投影平台上的透明介质,随后发生发射,反射后的像与投影源呈 $90^\circ$ ,所以在观察时,可以看到不同角度物体的像,因此有很强的立体感,这是目前利用智能手机进行的一种“伪全息成像技术”.

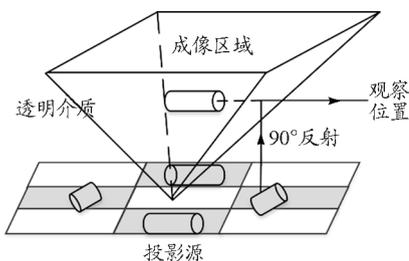
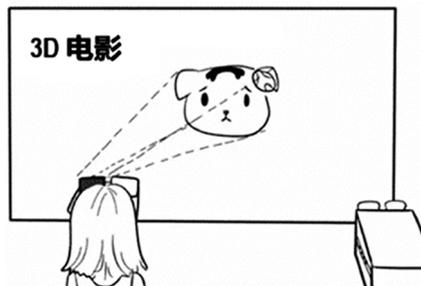


图1 佩珀尔幻象成像原理

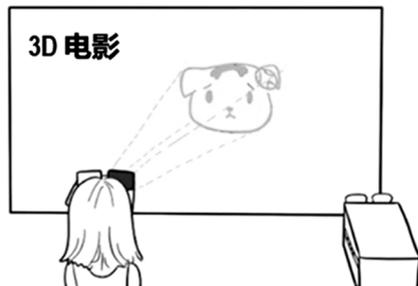


图2 佩珀尔幻象实物展示

3D电影成像技术(图3)就是利用像差,来制造立体感<sup>[6]</sup>.光波拥有 $x, y$ 两个相互垂直的偏振方向.3D眼镜就主要由两个偏振方向相互垂直的偏振片构成,其一允许拥有 $x$ 轴偏振分量的光通过,另一个允许拥有 $y$ 轴偏振分量的光通过.在3D电影院中由两台放映机同时将图像放映到同一银幕上,一台放映机放映出来的光只有 $x$ 轴偏振分量,另一台放映机则只放映出 $y$ 轴偏振分量的光.因此人在戴上3D眼镜后,两只眼睛分别看到两台放映机放映出来的图像,这两个图像并非完全重合,而是具有一定的像差,于是人也就看到了像差,大脑自动将其生成立体的图像.



(a)



(b)

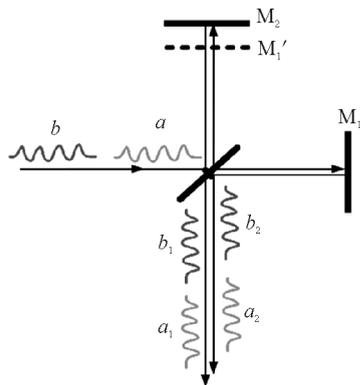
图3 3D电影成像原理

由此可见,能够成立体的像并不是全息照相技术的专利,全息照相技术的关键在于利用光的干涉原理所实现的光波全部信息的记录,这一点是区分全息照相技术和其他立体成像技术的根本.

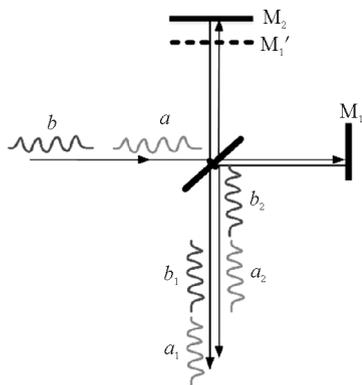
## 2 从学生视角全息照相实验操作的细节教学

### 2.1 对比迈克尔孙干涉实验对相干长度的要求 阐明光程差控制的关键

全息照相实验和迈克尔孙干涉实验,都是利用光的干涉原理,在迈克尔孙干涉实验中,强调了相干长度的概念<sup>[7]</sup>,如图4(a)所示,光源先后发出两个波列 $a$ 和 $b$ ,每个波列都被分光板分成1,2两波列.当两路光程差不太大时,由同一波列分解出来的两波列如 $a_1$ 和 $a_2, b_1$ 和 $b_2$ 可能重叠,这时能够发生干涉;如若两路的光程差太大,则无法相遇,也就不产生干涉,如图4(b)所示,这个产生干涉的临界值称为该光源的相干长度.对于不同的光源,存在不同的相干长度.普通光源发光为自发辐射,光源上每一点,甚至同一点上不同时刻产生的光子都具有不同的频率、振动方向和相位差,因此在迈克尔孙实验中需要强调相干长度.



(a) 完全相干



(b) 不能相干

图4 迈克尔孙干涉仪中光路

而全息照相拍摄时使用的光源为激光. 激光是由受激辐射发出, 所发出的每一个光子的频率、振动方向和相位差都相同, 具有极高的相干性. 例如波长为 632.8 nm 的氦氖激光器相干长度可达 100 m, 理论上无需考虑光程差的问题, 但是为保证足够的亮度和对比度, 通常不会刻意加大光程差, 因此, 无需使用刻度尺精确测量光程, 由于本实验中无刻度长绳的误差主要由手指宽度决定, 范围为  $\pm 2$  cm, 因此多数教材中才指出物光与参考光的光程差需保证在 2 cm 以内<sup>[3,8]</sup>, 所以, 在搭建光路时可以使用无刻度导线通过手指掐量光路即可满足实验要求.

## 2.2 阐明物光与参考光的光强调节要求和相关操作要领

暗室环境下确定物光和参考光的光强比. 理论上来说让分束的两路光在干板上干涉, 光强的最佳比值是 1:1, 但是由于物光是物体在全息干板上的散射光, 和参考光相比, 物光会弱很多. 因此搭建光路时, 我们使用光强比为 3:7 的分束镜将入射光束分成反射与透射两束光, 并在物光路上采用大孔扩束镜, 参考光路上用小孔扩束镜来扩束光束, 都是为了提高物光的光强. 另外可以利用光强计测量二者光强, 使在干板位置的物光与参考光的光强比控制在 1:4 ~ 1:10 的范围内, 这个光强比是影响实验成功率的关键因素, 能有效提高实验的成像效果.

## 2.3 阐明物光和参考光夹角的控制的原理要领

当激光全息记录时, 物光和参考光在全息干板处于干涉产生光栅, 其光栅常数为<sup>[3]</sup>

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  为光源波长,  $\theta$  为物光与参考光的夹角. 相应的光栅密度为

$$\eta = \frac{1}{d} = \frac{2\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\lambda} \quad (2)$$

由公式可知, 夹角  $\theta$  越小, 光栅密度  $\eta$  越小, 光栅越稀疏, 产生的全息干涉光栅越稀疏, 对形成的全息干板条纹的边界也越清晰, 成像效果也就越好. 而夹角  $\theta$  越大, 光栅密度  $\eta$  越大, 光栅越密集, 特别是当干涉光栅密度越接近全息干板的极限分辨率时, 成像效果越不理想. 综合以上分析, 物光与参考光的夹角会影响到干涉条纹的疏密, 根据干涉条纹疏密与全息干板条纹分辨率的匹配关系, 就给出了  $15^\circ \sim 30^\circ$  的夹角范围, 搭建光路时在保证物体不会遮挡参考光的前提下, 夹角还是小一点好.

## 2.4 防震

照相系统要具有稳定性, 由式(1)估计下条纹的宽度. 当物光与参考光之间的夹角  $\theta = 30^\circ$ ,  $\lambda = 632.8$  nm, 则  $d = 10^{-6}$  m 左右, 干涉图样非常精细致密, 可见在拍摄记录时, 条纹移动不能大于  $10^{-7}$  m, 所以曝光时任何微小的移动或振动, 哪怕是气流的流通、声波的干扰及温度的变化, 都可能导致对底板曝光过程中全息图记录的破坏. 因此本实验需要在暗室中防震良好的光学平台上进行, 以减少杂光、振动等影响. 另外, 保持室内环境密闭、安静有利于干板记录干涉图样.

## 3 从学生视角设计全息照相教学展示的细节

### 3.1 通过图像对比 展示采用投影法判断物光均匀照射的要求

物光为物体表面的漫反射投射到底片上而成, 物体需要被均匀照射才能被完整地记录下来, 检验物光是否扩束恰当物体是否被均匀照射时可采用投影法, 即在物体后放置一个白色光屏, 观察光斑的大小以及物体的影子是否处于光斑的中心即可. 光斑不能太小, 否则物体各部分被照射不均匀, 最后的成像可能只能呈现一个局部; 光斑也不能太大, 这样对光的耗散太大, 会导致物体反射到全息干板的光太弱, 影响实验效果; 物体的影子正好处于光斑亮度

较为均匀的中心位置是最佳的.在教学展示时,通过图5展示光斑较小、光斑较大、光斑大小适中的实例,非常有助于学生直观了解调节的要求和要领.

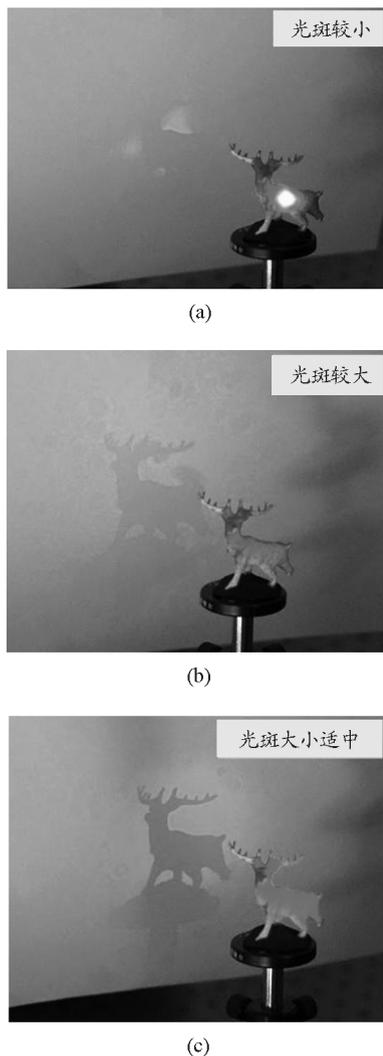


图5 投影法判断物光均匀照射

### 3.2 通过图片或者影像展示显影程度 提高实验成功率

全息干板的片基为玻璃板,采用超微粒卤化银悬浮于明胶作为感光材料,在曝光过程中,干板上  $\text{Ag}^+$  离子将被中和为  $\text{Ag}$  原子.依据感光量的多少,全息干板上  $\text{Ag}$  原子的浓度分布不同,感光量多的位置,  $\text{Ag}$  原子浓度高;反之浓度低.完成曝光后的全息干板,由于被还原的  $\text{Ag}$  原子较少,人眼不可见,因此看上去全息干板的颜色并无变化.要使它变为可见的图样,就需要通过显影过程来完成.

显影的目的是将感光片乳胶层感光处的  $\text{Ag}^+$  离子继续还原成  $\text{Ag}$  原子.在操作时,感光多的部位

显影快,生成的  $\text{Ag}$  原子多,颜色深;感光少的部位显影慢,生成的  $\text{Ag}$  原子少,颜色浅.如果显影时间过短,干涉图样将不明显,可能导致成像模糊甚至失败,而如果显影时间过长,显影中心处的卤素银全部被还原后,非显影中心处的卤素银也开始被还原,这就会造成过度显影,使整个干板不透光,且这一反应不可逆转无法复原,最终将导致成像的失败.

通常显影时间与全息干板的特性、显影药水浓度、显影药水放置时间、pH 值、温度等多种因素有关,因此没有一个确定的显影时间,需要全程追踪观察全息干板的显影程度.当干涉花纹清晰,全息干板呈现深灰色半透状态时需立即停止显影,并用清水冲洗掉残留的显影液,以免过度显影.这一过程的显影程度初学者不太容易掌握,通过图片或者影像进行教学展示其显影程度(图6),对学生的实验指导较有帮助.



图6 定影完成后的全息干板

## 4 课程思政在教学里的应用

### 4.1 结合实验本身“细致严谨”的操作要求 开展精益求精工匠精神的思政教育

本实验从光路搭建、曝光、显影定影,到最后的再现,每一个过程都需要细致耐心的操作,才能保证最终的成功,因此,可以结合实验本身“细致严谨”的操作要求,开展精益求精工匠精神的思政教育.把知识模糊的地方弄懂这是精益求精;在这过程中遇到困难了,去想各种办法解决,也是精益求精,让学生体会到追求精益求精的过程其实也就是创造力萌发的过程.

### 4.2 结合疫情中的高新防控技术 开展课程思政

2020年3月2日,基于全息照相技术的全球首

台空气成像无接触电梯按钮终端在合肥高新区正式投入使用,这是继“无接触自助机”在医院投入使用后,全息投影技术又一次成功运用于生活场景,该技术完全不用实体屏幕,安全稳定,交互灵敏,全部操作均在空气中完成,完全切断接触式污染源,也完全解决公共设施病菌附着残留的问题,为新冠疫情防控给出了技术支持,同时它标志着我国在全息投影领域的全球领先地位<sup>[9]</sup>。

## 5 结论

本文通过学生的视角,弥补了因教师“习以为常”的思维惯性而对教学细节的疏忽,对影响全息照相实验成功与否的各重要因素和教学方式方法进行了分析讨论,有助于学生更深入地掌握激光全息照相实验的原理,提升学生的物理实验技能。

学生参与实验教学内容的组织和教学,充分发挥学生视角在实验教学中的创新能力,有利于提高实验教学的有效性和高效性,对激发学生参与实验学习体验的深度和广度,提高学生创新能力等方面都有很好的帮助。通过采纳学生视角制定更为有效的实验引导,提高包括全息照相实验在内的大学物理实验的成功率,对学生提高自信心和激发学习兴

趣有着很大的帮助,能够培养学生的实际操作能力和自主探究意识,从而推动大学物理实验课程教学质量的提高。

## 参考文献

- 1 张影,李亚林. 浅谈全息照相实验教学[J]. 大学物理实验,2008(3):58~60
- 2 张三慧. 大学物理学[M]. 北京:清华大学出版社,2020. 273~276
- 3 李学慧. 大学物理实验[M]. 北京:高等教育出版社,2005. 258~266
- 4 苏显渝,李继陶. 信息光学[M]. 北京:科学出版社,1999. 111~123
- 5 解问鼎,郭雅洁,陶洪. “佩珀尔幻象”的光学原理及其在初中物理教学中的应用[J]. 物理教师,2014,35(10):40~42,48
- 6 施林叶. 浅谈数字3D立体电影技术[J]. 环球市场,2019(22):395
- 7 程守洙,江之永. 普通物理学[M]. 北京:人民教育出版社,1981. 180~181
- 8 尤建飞,李巧改. 大学物理实验[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2000. 103~107
- 9 “合肥造”无接触电梯按钮投入使用[J]. 国际人才交流,2020(4):32~33

# Application on Teaching Details in Holographic Experiment from Students' Perspective

Wu Yuejia Wan Jia Wang Hao Wang Haibin

(School of Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003)

**Abstract:** Holographic experiments use the principle of light diffraction to achieve three-dimensional image of objects. From the perspective of students, this paper analyzes and discusses the principle of experiment, the key points of actual shooting operation that affect the success of holography experiment, and the details of experimental teaching display, combined with the course ideology and politics. It has certain guiding role for first-time students to improve the success rate of experiment within a limited class. It is of great help to students to improve their self-confidence and stimulate their interest in learning. It can cultivate students' practical operation ability and independent inquiry consciousness, so as to promote the improvement of the teaching quality of university physics experiment course.

**Key words:** teaching details; holography; coherence length