

·测试、试验与仿真·

基于菲涅耳数字全息术的物体位移测试研究

刘 喆¹, 张婉怡¹, 赵 亮²

(1. 长春理工大学 光电信息学院光电工程分院, 长春 130012; 2. 中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘要: 对于物体位移的测试一直是工程领域中不可避免的问题。应用传统全息干涉术测试物体位移的方法处理过程复杂, 测量结果精度低。数字全息是传统全息与现代电子技术相结合的一种数字化的光信息处理技术。文中将电荷耦合器件 CCD 与电寻址液晶 EALCD 相结合, 实现数字全息的记录和再现过程。用数字的方式记录和处理全息图像, 避免了传统全息照相的化学处理, 利用数字图像处理技术来改善再现图像质量和提取有价值的信息。在数字全息实验理论分析的基础上, 对反射式的被测物体进行了菲涅耳全息图的记录与再现, 再现图像的清晰度和干涉条纹的对比度都得到了显著的改善。

关键词: 数字全息; 菲涅耳数字全息; CCD; EALCD; 位移测试

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-05-0070-07

Research on Displacement Measurement of Object Based on Fresnel Digital Holography

LIU Zhe¹, ZHANG Wan-yi¹, ZHAO Liang²

(1. College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;
2. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: The test of object displacement is always an unavoidable problem in the engineering field. The method of using traditional holographic interferometry to test the displacement of objects is complicated and the accuracy of measurement results is low. The digital hologram is a digitalization information process technology combining traditional holography and modern electronic technology. The process of digital holographic recording and reconstruction is realized through combining charge-coupled device (CCD) with electrically addressed liquid crystal display (EALCD). Digital imaging processing technology is used to record and process holographic images to avoid traditional chemical processing. The quality of the reconstruction images is improved and the needed information is extracted. On the basis of theoretical analysis of digital holographic experiments, Fresnel holograms about reflecting measured objects are recorded and reconstructed, the clarity of the images and the contrast of holographic interferogram is significantly improved.

Key words: digital holography; Fresnel digital holography; charge coupled device (CCD); electrically addressed liquid crystal display (EALCD); displacement measurement

应用数字全息术的方法进行测量具有全场、实时、非接触、条纹对比度好、灵敏度高和设备简单等优点, 是全息干涉测量方向发展的大趋势。文中将电荷耦合器件 CCD 与电寻址液晶 EALCD 相结合, 提出菲涅耳数字全息干涉测量系统, 实现数字全息

的记录和再现过程。将 CCD 作为全息图、全息再现像和干涉条纹的记录介质; EALCD 则作为再现过程中全息图的存储介质, 将其与计算机接口相连并准确复位在 CCD 记录全息图时的位置, 然后将所获得的全息图或全息干涉图输入 EALCD, 从而取代传统

收稿日期: 2017-07-31

作者简介: 刘喆(1984-), 女, 吉林长春人, 硕士, 讲师, 主要研究方向是光电技术应用; 张婉怡(1985-), 女, 吉林长春人, 硕士, 讲师, 主要研究方向是光电技术应用; 赵亮(1983-), 男, 辽宁锦州人, 学士, 主要研究方向是光电工程。

的全息干板。实验表明,将 CCD 和 EALCD 相结合,并结合数字图像处理的菲涅耳数字全息干涉术测试物体位移的方法有效且可行。

1 数字全息的理论基础

数字全息术以光学全息术作为理论基础,利用光敏电子成像器件 CCD 来代替普通的全息干板作为记录介质获取波前,然后以数字化方式存入计算机当中,再利用计算机模拟光学衍射的全过程来实现波前的再现。文中提出利用 CCD 和电寻址液晶 EALCD 相结合来实现数字全息技术,利用空间光调制器电寻址液晶 EALCD 来实现波前再现的过程。

1.1 光的衍射

光在传播过程中遇到障碍物(如缝、孔等)会发生偏离直线传播的现象,这种光学现象叫做衍射。但并不是光波通过任何的孔或缝都能发生衍射现象,只有在孔或缝的尺寸与入射光波波长接近时才能发生。全息图包含很多复杂细密的干涉条纹,一张全息图中一毫米区域内就包含数千条干涉条纹,也就是说干涉图中的每条干涉条纹的尺寸都只有一个波长量级。可见,全息图本质上就是一种具有衍射能力的特殊衍射体,所以当光波入射到全息图上就发生衍射现象。因此,全息术可以说成是两个过程,即“干涉”记录和“衍射”再现。

根据光场的传播规律,可以将衍射分为菲涅耳衍射(近场衍射)和夫琅禾费衍射(远场衍射);对于夫琅禾费衍射来说,光源和观察平面距离衍射屏都是比较远的。当衍射屏逐渐向光源靠近时,或者将衍射屏逐渐靠近观察平面时,夫琅和费衍射可以转化为菲涅耳衍射。文中讨论的全息理论是建立在菲涅耳衍射基础之上的,所以在这里探讨一下光波的菲涅耳衍射理论。衍射图如图 1 所示。

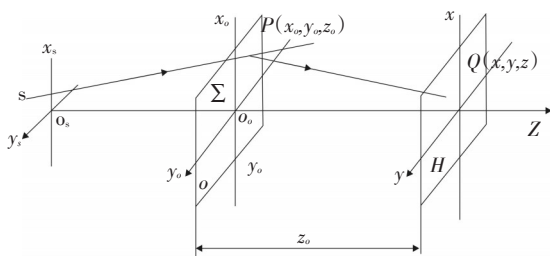


图1 孔径 Σ 的衍射

由图 1 所示, S 为照明光源, O 为衍射物体, P 为衍射物上一点, H 为观察平面, Q 为观察平面上任一观察点,在 P 点处入射光波方向和衍射光波方向之间夹角为 θ 。衍射孔径上某光点 $P(x_0, y_0)$ 发出的光波衍射到像面上 $Q(x, y)$ 点, 这一点的光波复振幅表示为

$$U(x, y) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} O(x_0, y_0) \frac{e^{jkr}}{r} \cos\theta dx_0 dy_0 \quad (1)$$

当 $\theta=0$ 时, 倾斜系数 $\cos\theta=1$, 式(1)可进一步推导为

$$U(x, y) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} O(x_0, y_0) \frac{e^{jkr}}{r} dx_0 dy_0 \quad (2)$$

两点之间的传播距离为

$$r = \sqrt{z_0^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (3)$$

用二项式定理将其展开, 可以得到下式

$$r = \sqrt{z_0^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} = z_0 \sqrt{1 + \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{z_0^2}} = z_0 + \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2z_0} - \frac{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]^2}{8z_0^3} + \dots \quad (4)$$

当 z_0 足够大时, 有下式

$$z_0^3 \gg \frac{1}{4\lambda} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]_{\max}^2 \quad (5)$$

由此可知, 式(4)从第三项开始以后的所有项的贡献量都可以忽略不计, 则有

$$r = z_0 + \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2z_0} \quad (6)$$

式(6)的表达形式是一种近似的表达, 这种表达形式称为菲涅耳近似。当观察屏与衍射屏距离较近时, 这一区域就叫做菲涅耳衍射区, 这一区域中观察到的衍射现象称为菲涅耳衍射。

在菲涅耳近似条件下, 根据式(6)可以得到菲涅耳衍射公式如下

$$U(x, y) = \frac{\exp(jkz_0)}{j\lambda z_0} \iint_{\Sigma} O(x_0, y_0) \exp\left[jk \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2z_0}\right] dx_0 dy_0 \quad (7)$$

1.2 全息图的分类

根据参考波与物光波主光线的位置, 可以将全息图分为同轴全息图和离轴全息图。如果参考光波与物光波主光线为同轴关系则被称为同轴全息图, 反之则为离轴全息图。

同轴全息图指参考光束和物光束的传播方向在同一直线上时,即它们的夹角为零,记录过程如图2所示。

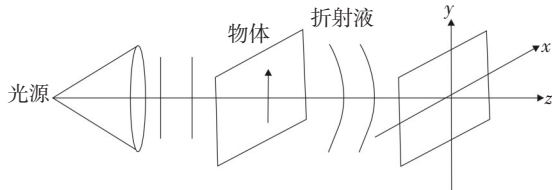


图2 同轴全息的记录过程

如果用一个平面波作为参考光波来照射记录的全息图,可以实现同轴全息图的再现过程,再现过程如图3所示。

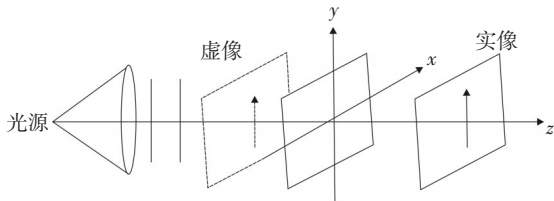


图3 同轴全息的再现过程

如果两个再现像同时出现在一个光轴上时,观察者看到的虚像将会不可避免的受到共轭像的影响,成像质量被严重破坏。这些都限制了同轴全息术在实验研究中的应用范围。

离轴全息图各部分的几何位置要求物光束与参考光束之间有一定的夹角。与同轴全息图的光路相比,显著的扩大了这两个光束之间的光程差,因此要求必须在使用相干光源时才可以被实现。所以,离轴全息图的拍摄是在激光发明之后。离轴全息图的记录过程如图4所示。

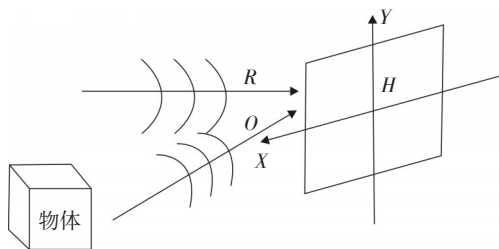


图4 离轴全息的记录过程

离轴全息图的再现过程如图5所示。离轴全息图的优点是在实验中记录全息图时参考光波与物

光波之间选择了适当的夹角,进行原物体再现时,物体的原始像和共轭像相互之间不会受到干扰,成功分离了零级衍射像、原始像和共轭像三者,大大的提高了再现像的质量。

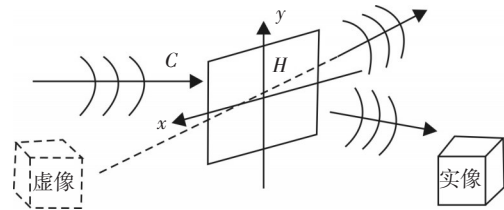


图5 离轴全息的再现过程

1.3 数字全息的记录与再现

数字全息术与传统光学全息术的基本原理相同,都要经过记录和再现这两个过程。不同之处在于对全息图的记录、存储和再现这几个过程采用了不同的方式来实现。传统的全息术采用银盐干板作为记录介质,而数字全息采用电子光敏器件CCD进行记录,采用计算机进行高速的存储。传统全息再现的时候要经过记录干板复杂的显影、定影等化学处理过程,而数字全息可以直接使用计算机进行再现过程的光学模拟。文中在数字全息的再现过程中采用一种全新的再现方法,将记录的全息图直接输入电寻址液晶EALCD,结合计算机进行光学再现,给数字全息的发展注入了新的元素。

数字全息的记录光路和传统光学全息的记录光路相同,如图6所示。

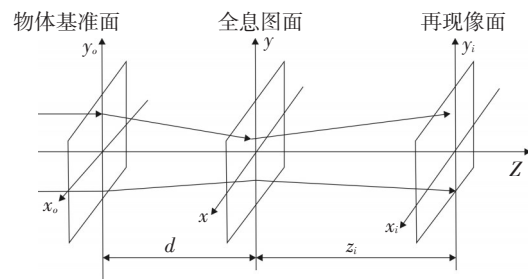


图6 数字全息记录和再现坐标变换示意图

图中, x_o, y_o 所在的平面为记录物体所在的平面, $U_o(x_o, y_o)$ 为附近的光场分布, xy 为 CCD 所在的平面。物体和 CCD 所在的两个平面之间的距离为 d 。如果记录条件满足菲涅耳近似条件,那么 CCD

记录面上的物光强分布如下式

$$O(x,y) = \frac{1}{j\lambda d} \exp(jkd) \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2+y^2)\right] \times \iint_{\Sigma} O(x_0,y_0) \exp\left[\frac{jk}{2d}(x_0^2+y_0^2)\right] \cdot \exp\left[-\frac{j2\pi}{2d}(x_0x+y_0y)\right] dx_0 dy_0 \quad (8)$$

设参考光波的分布为 $R(x,y)$, 物光波和参考光波相遇并发生干涉, 则 CCD 所在的 xy 平面上记录的光强分布如式(9)

$$I(x,y) = [O(x,y) + R(x,y)][O(x,y) + R(x,y)]^* = |O(x,y)|^2 + |R(x,y)|^2 + R^*(x,y)O(x,y) + R(x,y)O^*(x,y) \quad (9)$$

文中提出了一种新的全息再现方法, 即将全息图直接输入到电寻址液晶 EALCD 上, 结合计算机进行数字化的处理, 再以光照的形式来实现全息图的再现过程。首先, 将 CCD 上记录的全息图经过图像采集卡进行 A/D 转换, 转换后的图像变为数字信号并被存储在计算机中, 之后把存储在计算机中的全息图写入 EALCD, 最后用参考光照射全息图实现数字再现。设 EALCD 的透过率为 1, 在线性条件下, 全息图的透射系数表达式如下

$$t = t_0 + \beta I(x,y) \quad (10)$$

用参考光照射 EALCD 时, 因为采用 CCD 记录全息图, t_0 可以忽略, 所以在 EALCD 后得到的透射光的复振幅分布表达如下式

$$tR(x,y) = \beta IR(x,y) = \beta R(x,y)|O(x,y)|^2 + \beta R(x,y)|R(x,y)|^2 + \beta |R(x,y)|^2 O(x,y) + \beta R^2(x,y)O^*(x,y) \quad (11)$$

2 菲涅耳数字全息实验研究

系统应用的是最常见的也是最普通的菲涅耳全息图。拍摄菲涅耳全息图时, 物光波本身被直接记录, 因此不需要增加变换透镜或者成镜透镜。菲涅耳全息图的基本特点是全息面与物体之间的距离满足菲涅耳近似条件, 也就是记录平面位于物体衍射光场的菲涅耳衍射区。在进行全息图的记录和再现过程中, 因为物面到记录平面、全息面到再现像面的距离都满足菲涅耳近似条件, 因此光波的传播都可以看成是菲涅耳衍射。

经过反复的实验, 最终选择图 7 所示的实验光路图进物体位移测试, 实验效果较好。

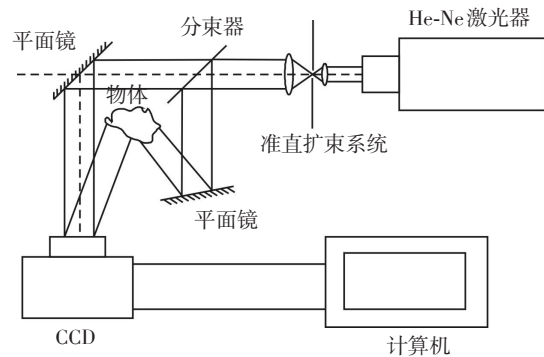


图7 菲涅耳数字全息术记录原理图

如图 7 所示, 该数字全息干涉实验系统的光源选用的是 He-Ne 激光器, 发出的激光束先经由显微物镜和针孔组成的空间滤波器, 空间滤波器主要起到低通滤波和提高系统相干性的作用。然后经过孔径光阑和准直物镜, 通过调整空间滤波器、孔径光阑和准直物镜的相对位置, 使从准直物镜出射为光强分布均匀的平行光, 组成准直扩束系统。准直扩束后的平行光束再经过分束器, 分为两束。其中一束光先经过一个衰减片, 再经由一个反射镜入射到 CCD 靶面上, 作为参考光束; 另一束光同样也经过一个反射镜, 入射到待测物体上, 经过散射和反射, 形成物光束入射到 CCD。为了提高干涉条纹的对比度, 要尽量保证参考光束和测量光束光强相等, 由于测量光束是由被测物体散射回来的光束, 所以在参考光束中加入衰减片, 降低参考光束的光强。最后 CCD 靶面上记录的全息图通过图像采集卡进行 A/D 转换, 全息图以数字的形式存储在计算机中。菲涅耳数字全息术记录装置图如图 8 所示。

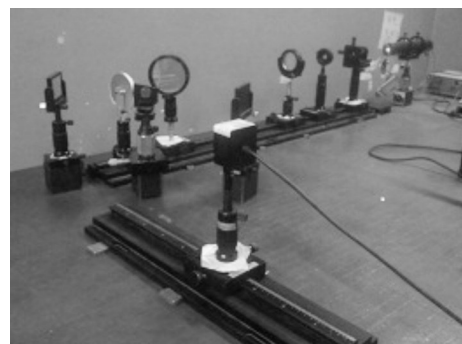


图8 菲涅耳数字全息术记录装置图

在进行菲涅耳数字全息再现时,实验光路的原理图如图9所示。

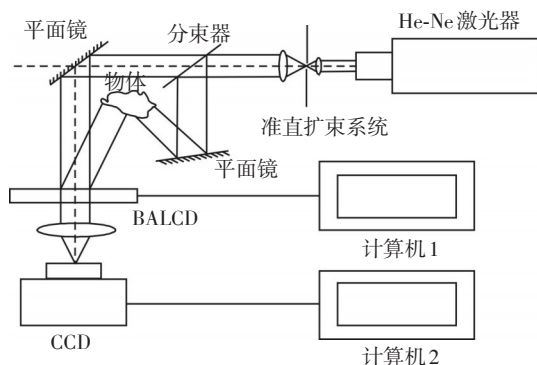


图9 菲涅耳数字全息术再现原理图

菲涅耳数字全息再现过程如下:首先使用遮光板拦住物光,因为再现的过程已经不再需要物光束,只需要参考光束。然后把电寻址液晶EALCD准确复位在最初在记录全息光路图中CCD的位置上,并且在EALCD后面放置一个成像透镜,同时把CCD放置在透镜的后面。当用原参考光束照射EALCD时,通过CCD前后位置的移动接收图像来实现全息再现的过程。菲涅耳数字全息术再现装置图如图10所示。



图10 菲涅耳数字全息术再现装置图

如果通过计算机1写入EALCD的为物体的记录全息图,调节CCD前后的位置,便可在计算机2上观察到原物波的再现像。如果写入EALCD的为物体变形前后的全息干涉图,那么调节CCD和透镜的前后位置,即可在计算机2上观察到干涉条纹图。两幅全息图的相干叠加过程可以通过Matlab软件,利用相应的程序进行叠加。

3 菲涅耳数字全息实验结果及分析

3.1 再现像

根据图8所示的菲涅耳数字全息术装置图,本数字全息实验系统选择一毛硬币作为待测物体,如图11所示。



图11 待测物体

物体到CCD靶面的距离为45 cm,处于菲涅耳衍射区,因此全息图为菲涅耳数字全息图。物光和参考光夹角为 9° ,符合CCD分辨率的要求。一角硬币的正面物光波如图12所示。一角硬币的正面参考光波如图13所示。记录的全息图如图14所示。按照图10所示的菲涅耳数字全息再现装置得到一角硬币的正面再现像如图15所示。

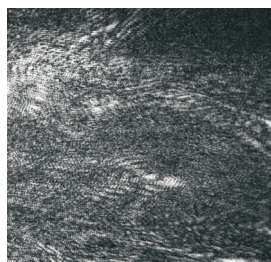


图12 物光波

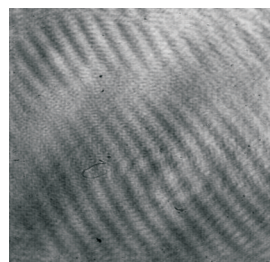


图13 参考光波

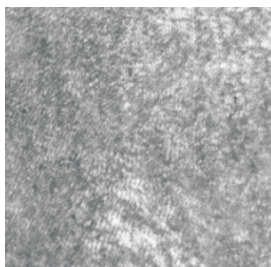


图14 全息图



图15 再现像

3.2 物体位移前后干涉条纹图

位移前的菲涅耳全息图如图16所示。通过微调实验物体底座下边的螺母,使物体产生微小位移,拍摄得到位移后的菲涅耳全息图,如图17所示。

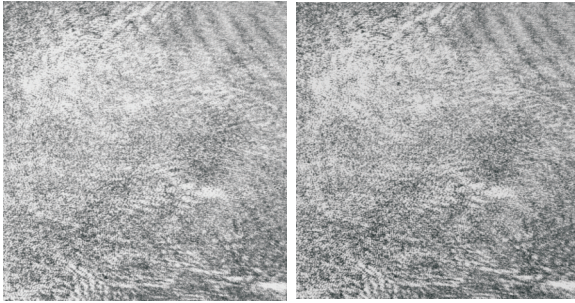


图16 位移前全息图

图17 位移后全息图

位移前与位移后的两幅全息图通过 Matlab 程序叠加后的全息图如图18所示。位移前再现像如图19所示。

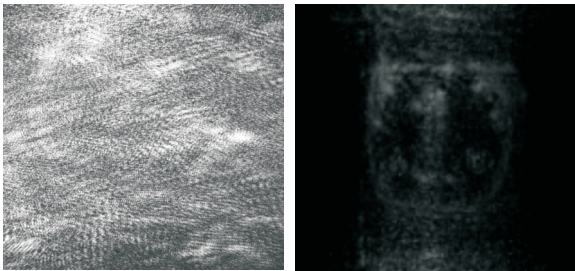


图18 叠加全息图

图19 位移前再现像

位移后的再现像如图20所示。通过 Matlab 程序叠加后的全息图再现干涉条纹如图21所示。

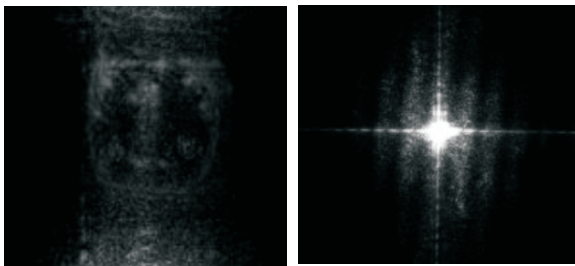


图20 位移后再再现像

图21 再现干涉条纹图

可以从实验结果看出,与物体二维位移量有直接关系的干涉条纹为直条纹。

3.3 位移量的计算与分析

根据干涉条纹图,如图21所示,计算得: $\Delta N_1 = \frac{a}{c} = \frac{0}{8} = 0$, $\Delta N_2 = \frac{b}{c} = \frac{2}{8} = 0.25$, 所以 $\Delta N = \Delta N_1 + \Delta N_2 = 0.25$, $N = N_0 + \Delta N = 5 + 0.25 = 5.25$ 。

根据公式 $d = \frac{\lambda}{2}(N + \Delta N)$ 求解,可以得到物体的位移量为 $d = \frac{\lambda}{2}N = \frac{0.6328}{2} \times 5.25 = 1.6611 \approx 1.66 \mu\text{m}$, 实验结果与实际位移量相符。

4 结 论

将电荷耦合成像器件 CCD 与电寻址液晶 EALCD 相互结合使用,是一个全新的尝试。CCD 作为记录全息图、全息再现像和干涉条纹的全新记录介质;EALCD 则作为再现过程时全息图的存储介质取代传统的全息干板。CCD 与 EALCD 都直接与计算机相关联,用数字的方式记录和处理全息图像,解决了过去不能实时处理的弊端,更便于信息的存储、数字处理和信息的传送。文中针对菲涅耳数字全息进行了系统的实验与分析,以菲涅耳数字全息记录原理为基础,对全息图进行了采集,应用电寻址液晶 EALCD 进行了数字全息的光电实时再现,同时获得了清晰的再现像和全息干涉条纹,实验结果和实际位移量相符,测量精度高,速度快,使得数字全息技术的发展又得以注入了新的元素。

参考文献

- [1] LIU Cheng. Simultaneous measurement of displacement and its spatial derivatives with a digital holographic method[J]. Optical Engineering, 2003, 42(12): 3443-3446.
- [2] 王文生. 现代光学测试技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2013:116-207.
- [3] 孙长库,何明霞,王鹏. 激光测量技术[M]. 天津:天津大学出版社, 2008:77-80.
- [4] J W 顾德门. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚,译. 3版. 北京:电子工业出版社, 2006:40-77.
- [5] 郭俊,王文生. 数字全息干涉术在物体微小变形测量中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6):66-70.
- [6] 张婉怡. EALCD在全息干涉术中的应用[D]. 长春:长春理工大学, 2011.
- [7] 黎南. 数字全息理论及应用研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2007.

- [8] 王杨,于佳. 数字技术在光学全息领域的应用与前景展望[J]. 激光杂志, 2004, 25(4):13-15.
- [9] XU L, MIAO J M, ASUNDL A. Properties of digital holography based on in-line configuration[J]. Opt Eng, 2000, 39(12): 3214-3219.
- [10] JAVID B, NOMURA T. Securing information by use of digital holography[J]. Opt Lett, 2000, 25:28-30.
- [11] 杨坤. 数字全息物体位移测试[D]. 长春:长春理工大学, 2009.
- [12] 杨旭,陈波. 远距离数字离轴全息系统设计和实验分析[J]. 激光杂志, 2016, 37(10):74-77.
- [13] THOMAS J, NAUGHTON, JOHN B, et al. Efficient compression of digital hologram for Internet transmission of three-dimensional images[J]. IEEE, 2002.
- [14] CUCHE E, MARQUET P, DEPEURSING C. Spatial filtering for zero-order and conjugate-image elimination in digital off-axis holography[J]. App Opt, 2002, 39(23):4070-4075.
- [15] 吕且妮,葛宝臻,张以谟. 数字同轴和数字离轴全息系统分析[J]. 光学工程, 2005, 32(2):16-19.
- [16] CUCHE E, BEVILACACQUA F, DEPERURSING C. Digital holography for quantitative phase contrast imaging[J]. Appl Opt, 1999, 38:6994-7001.
- [17] 周灿林. 数字全息干涉位移场分离研究[J]. 光电子·激光, 2016, 27(2):191-197.

(上接第38页)

- plex dynamical networks with disturbance[J]. Advances in Difference Equations, 2015, 2015(1): 356-359.
- [14] HAN M, ZHANG M, ZHANG YM. Projective synchronization between two delayed networks of different sizes with nonidentical nodes and unknown parameters[J]. Neurocomputing, 2016, 171(C):605-614.
- [15] XU B B, HUANG Y L, WANG J L, et al. Passivity of linearly coupled reaction-diffusion neural networks with switching topology and time-varying delay[J]. Neurocomputing, 2016, 182(10):274-283.
- [16] LI Y, LI C D. Complete synchronization of delayed chaotic neural networks by intermittent control with two switches in a control period[J]. Neuro-computing, 2016, 173 (P3): 1341-1347.
- [17] NADERI B, KHEIRI H. Exponential synchronization of chaotic system and application in secure communication [J]. Optik, 2016, 127(5): 2407-2412.
- [18] KONG W Z, ZHOU Z, JIANG B, et al. Assessment of driving fatigue based on intra/inter-region phase synchronization[J]. Neuro-computing, 2017, 219(30):474-482.
- [19] YANG C, HUANG L H. Finite-time synchronization of coupled time-delayed neural networks with discontinuous activations[J]. Neuro-computing, 2017, 249(12):64-71.
- [20] WANG J A, MA X H, WEN X Y, et al. Pinning lag synchronization of drive-response complex networks via intermittent control with two different switched periods[J]. Statistical Mechanics and its Applications, 2016, 461 (30): 278-287.
- [21] JIANG S Q, CAI G L, CAI S J, et al. Adaptive cluster general projective synchronization of complex dynamic networks in finite time[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2017, 46(18): 161-163.
- [22] WANG S G, ZHENG S, ZHANG B W, et al. Modified function projective lag synchronization of uncertain complex networks with time-varying coupling strength[J]. Optik, 2016, 127(11): 4716-4725.
- [23] XU Y H, ZHOU W N, FANG J A, et al. Topology identification and adaptive synchronization of uncertain complex networks with adaptive double scaling functions[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2011, 16(11): 3337-3343.
- [24] DU H Y. Function projective synchronization in complex dynamical networks with or without external disturbances via error feedback control[J]. Neurocomputing, 2016, 173 (26): 1443-1449.