

文章编号:1004-4213(2011)09-1413-6

基于空间光调制器的波面重建优化方法研究

韩军¹, 郑婷¹, 聂亮¹, 安毓英²

(1 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710032)

(2 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

摘 要:针对不同非球面面形的实时检测需求,研究了基于空间光调制器的标准波面重建技术.基于空间光调制器波面重建的原理设计了干涉测量系统,依据空间光调制器的自身特点选取修正离轴计算全息编码方式实现对标准球波面的编码.针对实验中空间光调制器作为全息再现介质引起重建波面质量下降问题,提出了错位叠加优化方案,并将这一过程进行了模拟实验.结果表明,基于错位叠加方法的重建波面均方差值提高了近 4.45 倍.研究成果为非球面检测过程中标准波面的获取提供了可靠的理论基础.

关键词:计算全息;干涉测量;面形检测;编码;空间光调制器;波面重建

中图分类号:O438.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114009.1413

0 引言

由于非球面光学元件的诸多优点,因而被广泛用于航空、航天、天文光学、国防军事等高科技领域,但非球面的加工和高准确度检测困难限制了它的发展.非球面检测的方法通常有多种,其中最重要的方法是干涉测量法.传统的干涉法需要一个标准的非球面参考元件作为标准样板,而标准的非球面元件有加工困难,成本高昂等缺陷.

随着计算全息技术的发展而出现的计算全息干涉法,是用一个制作的全息图来再现理想参考波面,并把它作为检测基准.然而,传统的计算全息技术的缺点之一是无法进行实时的显示,因为制作出来的计算全息图需要被缩拍到照相胶片(全息底片)上或在玻璃基板上采用光学微加工技术进行刻蚀.每一个待检的非球面对应一个特定的“标准样板”,当更换不同类型的非球面镜头时,必须重新制作标准样板,费时费力,不能满足实时性检测的要求.

近年来,随着计算机技术和空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)技术的发展,SLM被广泛应用于光电信号的显示、处理系统^[1-2].集成薄膜晶体管阵列液晶显示器(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display, TFT-LCD)是一种新型的 SLM 显示器件,具有位相调制和振幅调制的能力.由于 SLM 具有光学调制特性好、功耗低、响应速度

快、体积小等优点,因此被越来越广泛地应用于光电混合信息处理系统^[2].利用 SLM 代替传统的全息干板(照片),将计算机生成的计算全息图通过外接口传送至 SLM,利用它对光波的调制实现全息再现.该技术可以解决传统计算全息无法实现的实时显示问题,具有很大的优越性^[3-4].因此,如果把 SLM 作为计算全息的显示介质用于非球面检测,就可以实现对光学非球面面形检测的实时化.

但是,SLM 除了具有上述优点之外,还具有一个显著特点就是其像素之间固有的栅格结构,将导致加载到 SLM 上的有效信息,由于受到栅格结构的阻挡而丢失,使得原本分辨率不高的 SLM 上记载的信息量再次下降.为了能够在有限分辨率情况下提高再现波面的质量,本文针对 SLM 固有的栅格结构对重建波面的影响,提出了一种改进的再现方法.

1 基于 SLM 的波面重建原理

像全息图^[5]波前再现装置如图 1.当用准直平行光照射全息图时,在透镜 L_1 的后焦面上(即图中衍射面)上就产生全息图的频谱图.衍射面上放置空间滤波器时,该系统就成为带通系统,像面上所得到的波面是全息图衍射波的带通滤波输出.一般只让第 $(k, 0)$ 级衍射波通过,以保证在透镜 L_2 的像面上恢复所需要的物光波 $f(x, y)$.

基金项目:西安市科技创新支撑计划基金(No. CXY09021)资助

第一作者:韩军(1966-),男,教授,博士,主要研究方向为光电测试技术、光学薄膜技术. Email:hanjun513@126.com

通讯作者:郑婷(1986-),主要研究方向为计算全息的应用、非球面检测技术. Email:zhengting0211@163.com

收稿日期:2011-03-18;修回日期:2011-05-16

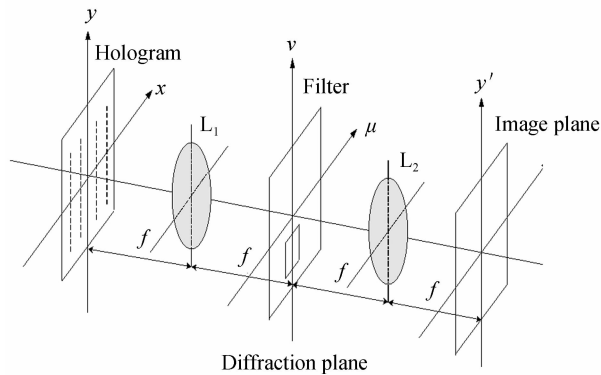


图1 像计算全息再现光路

Fig. 1 Schematic of the reconstruction of the CGH

在分析了像全息图再现的基础上,本文利用SLM所具有的实时再现功能,设计了基于SLM的波面重建的实现与检测系统,如图2.

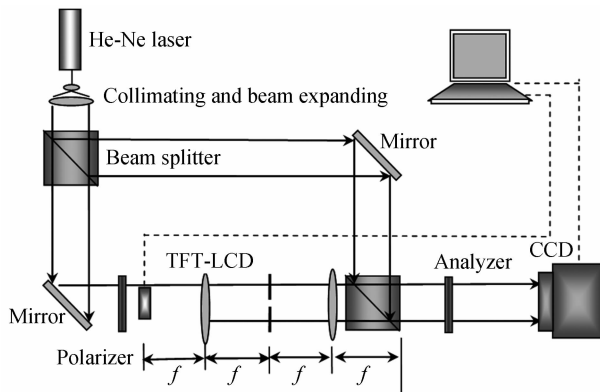


图2 测量实际再现波面准确度

Fig. 2 Test actual precision of wave surface

本文采用马赫-曾德尔干涉仪测量再现波面准确度. 在干涉仪的一臂上引入 $4f$ 空间滤波系统,通过滤波消除像素结构带来的衍射效应的影响. 图中由氦氖激光器出射的光束经分束器分为两束,分别经扩束、准直为平行光束. TFT-LCD放置在 $4f$ 成像系统的输入面上(透镜 L_1 的前焦面),并与计算机连接,其输入图像可由微机控制刷新; CCD放置在 $4f$ 系统的输出面之后,接收的图像信号可存储在微机中. L_1 的后焦面和 L_2 的前焦面重合,在该面上放置一个光阑A,只让计算全息图的一级谱通过. 来自干涉仪另一臂的平行光束经分束器入射到CCD上,可与TFT-LCD的输出像在CCD靶面上干涉形成干涉条纹. 通过对干涉条纹分析处理,获得再现光波准确度.

2 黑栅结构对重建波面的影响

与传统全息干板相比,SLM的分辨率较低,所能显示的信息受到限制,直接影响了再现像的质量,从而会影响非球面形检测的准确度.

2.1 SLM的像素结构

SLM的像素单元是由互相绝缘的行电极和列电极构成的,在行、列电极交点上使用了大规模的集成电路技术制作的薄膜晶体管,其行电极、列电极和显示像素分别接到薄膜晶体管的栅、源、漏三极上. 当对像素所在的行、列电极同时加载电信号时,则相应场效应管接通,像素被点亮^[6]. 考虑到实际像素的周期位置分布,则行电极和列电极也呈周期性排列并且相互垂直. 由于光电效应的干扰,加载到行电极和列电极上的光信号会引入噪音,因此需要在行、列电极上镀有一层透光率为0的金属镀层,这样便形成了一个二维的黑栅结构,如图3.

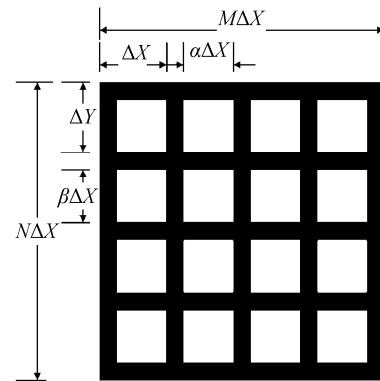


图3 SLM的像素结构

Fig. 3 Pixel texture of SLM

本文用开口率和单个像素的尺寸来表征SLM的黑栅结构. 设SLM的像素尺寸为 $\Delta X \times \Delta Y$, 单个像素的透光孔尺寸为 $\alpha \Delta X \times \beta \Delta Y$, SLM的开口率(Aperture Ratio, AR)定义为单个像素的有效显示面积与像素面积的比值,即

$$AR = \frac{\alpha \Delta X \times \beta \Delta Y}{\Delta X \times \Delta Y} \times 100\%$$

SLM的分辨率和开口率是SLM的两个主要结构参量. 在一定大小的全息面上,像素间距越小,分辨率越大,再现的波面越精确. 当开口率小时,接收面上呈现以阵列分布的多个像,随着开口率的增大,阵列分布像的光强减弱,当开口率足够大时,阵列分布像的光强减小到人眼不能分辨,就能在接收面中心得到单个的再现像,这是理想的情况.

2.2 SLM黑栅结构的衍射像

由于SLM中“黑栅”的存在,引入了多个衍射像,使光学再现像的质量受到极大的影响,并给后续光路或电路的处理引入困难,这就是“黑栅效应”^[7-8]. 光学信息处理中,在SLM输出或输入的一侧,迎着入射光的方向观察,可以看到一个很亮的点阵;当SLM置于输入面时,经平行入射光照射,在输出谱平面上,不仅有处于中心的与零频相对应的

亮点,还有均匀分布的很亮的点阵.论文将这一效应进行了模拟,如图 4 所示是 SLM 黑栅效应引起的阵列分布的多个衍射像.理论分析表明,在输出谱面上,各级衍射谱的相对分布是相同的,不会影响全息图的频谱分布.

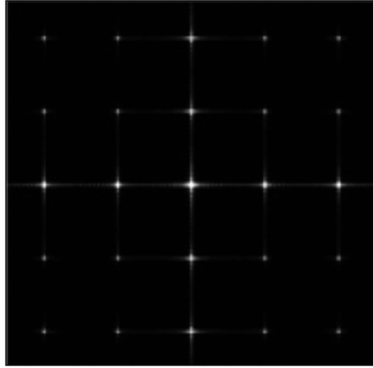
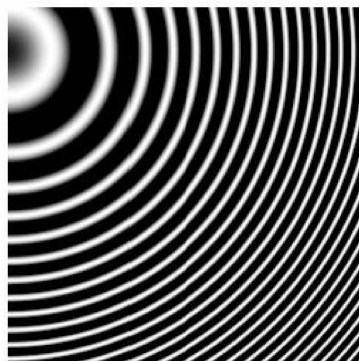
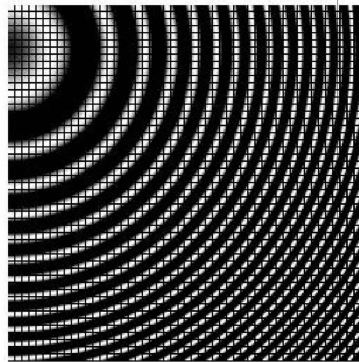


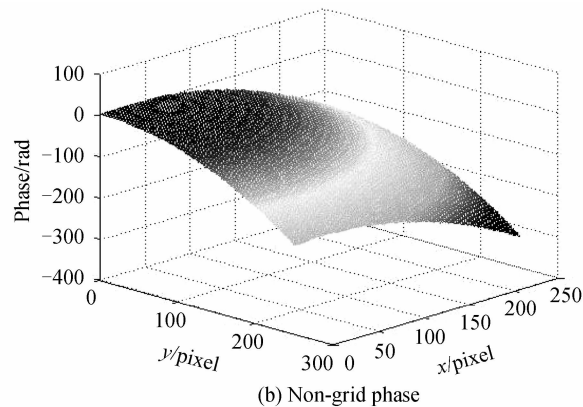
图 4 SLM 的像素结构的衍射阵列
Fig. 4 The diffraction array of the pixel texture of SLM



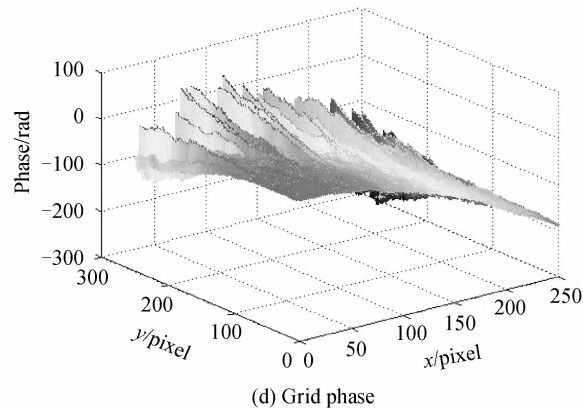
(a) Non-grid hologram



(c) Grid hologram



(b) Non-grid phase



(d) Grid phase

图 5 SLM 黑栅效应对波面重建的影响

Fig. 5 Influence of SLM grid structure

位数据;通过位相解包裹得到重建的球面波,如图 5(b).这样就实现了无栅格结构影响的标准球面波面型的全息再现.

现在选用相同的编码方法和原理,对栅格结构进行模拟,并模拟将计算全息图加载其上时对重建球面波的影响.这样就获得了基于栅格结构影响的重建球面波,如图 5(d).

从上述模拟得到的重建球面波面形很容易看

出,SLM 固有的栅格结构对重建波面有很大的影响,如何将这一影响有效地消除是本文研究工作的重点.

2.3 SLM 黑栅效应对波面重建的影响

由于黑栅的存在,使得制作好的全息图加载到 SLM 上实时显示时,必定有部分信息被黑栅阻挡,从而造成了信息的丢失,使得全息图分辨率降低,进而使得再现像的准确度受到了很大的影响.

既然黑栅的存在导致加载到 SLM 上全息图信息的丢失,从而影响到再现像的准确度,本文首先将黑栅结构对重建波面的影响进行了模拟.选用了修正离轴参考光中的博奇编码方式对无栅格结构影响的球面波计算全息图进行模拟并对其再现.首先通过 MATLAB 平台进行编码,获得了球面波计算全息图,如图 5(a);再将上述得到的球面波计算全息图进行二维傅里叶变换得到其空间频谱图,并确定空间频谱图的一阶信号,进而对空间频谱图的一阶信号进行过滤;将分离出的一阶信号进行二维傅里叶逆变换,计算出每个像素点所对应的相

位数据;通过位相解包裹得到重建的球面波,如图 5(b).这样就实现了无栅格结构影响的标准球面波面型的全息再现.

3 基于 SLM 重建波面的优化方法

考虑到计算全息图加载到 SLM 上实时显示时,由于受到其空间结构的限制,必将有部分信息被阻挡,从而使再现波面质量受到一定程度的影响.因

此,如果将被阻挡的信息表达出来,一方面间接提高了SLM的分辨率,另一方面也提高了重建波面的质量.

3.1 计算全息干涉图错位叠加法

现提出的计算全息图错位叠加法是通过将全息图在SLM上显示的位置进行两维的空间定量平移,这样先后两次得到的计算全息图被黑栅结构阻挡到的信息是不同的,所以就可以用前后两组得到的计算全息图叠加实现信息的相互补充,最终得到较为理想的重建波面.

为了实现错位叠加过程,现将上述SLM的空间结构进行定量的平移.由于本文所选的SLM是西安光机所XGA系列的TSLM-023,分辨率是 1024×768 ,其像元尺寸是 $26 \mu\text{m}$,开口率是67%,通过计算可得到黑栅宽度是 $4.718 \mu\text{m}$,为了简化模拟过程,并将其近似为 $5 \mu\text{m}$.将 $r=5 \mu\text{m}$ 进行归一化,则 ΔX 所对应的值为 $4 \mu\text{m}$, $\alpha\Delta X$ 所对应的值是 $1 \mu\text{m}$,这样就将原来的一个像素划分成 5×5 个子像素,其中透光部分占 4×4 个子像素,其余9个不透光的子像素用以黑栅结构的描述,透光部分的数值为1,不透光部分的数值为0,如图6(a).

现将其空间结构向右、向下分别移动2个单位,得到的空间结构如图6.

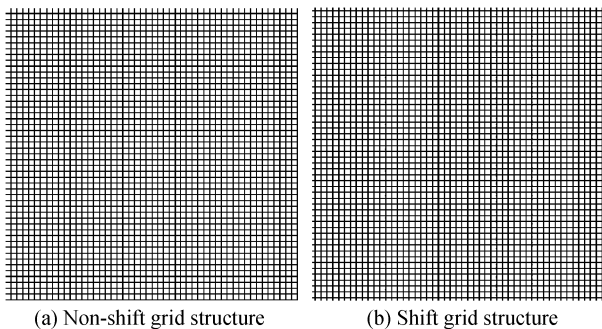
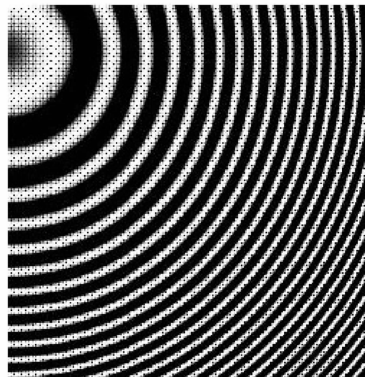


图6 错位栅格模拟

Fig.6 Simulate of shift grid structure

通过观察图6(a)的第一行第一列与图6(b)的第一行第一列的位置,很容易发现二维的黑栅结构



(a) Dislocation superposition hologram

发生了明显的错位,错位量能够准确的保证为两个单位,而且这个错位量能够依据试验需要进行相应的改变.

3.2 提高波面质量流程

选用修正离轴参考光编码的球面波,并对上述过程进行了模拟,具体步骤为:

1)首先依次获取SLM的原空间结构图和错位后的空间结构图,且将其分别定义为i图和ii图;

2)将i图与计算全息球面波进行点乘,即透光部分用1乘以全息图所在位置的信息,全息图所在位置将被复制,不透光部分用0乘以全息图所对应的位置,则全息信息将被覆盖,这样,就得到加载了二维黑栅结构的计算全息图I,其结果和实际将计算全息图加载到SLM上时的模拟效果一致;

3)同理将ii图与计算全息球面波做点乘,即得到加载了二维黑栅结构的计算全息图II;

4)将计算全息图I和计算全息图II进行叠加,得到球面波信息互补的新计算全息图III;

5)将上述得到的全息干涉图III进行两维傅里叶变换得到其空间频谱图;

6)确定空间频谱图的一阶信号并产生频率过滤器,对空间频谱图的一阶信号进行过滤;

7)将分离出的一阶信号进行两维傅里叶逆变换;

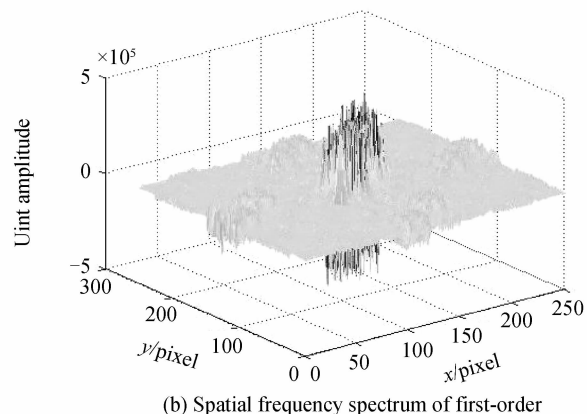
8)计算出每个像素点对应的相位数据;

9)通过位相解包裹得到基于全息图信息互补后的重建球面波面形.

4 重建波面模拟实验结果

4.1 模拟实验结果

在进行模拟前,为了能够确切说明此方案能够提高重建波面质量,应将理想全息图分别加载到原栅格和错位栅格上,将得到的两幅全息图进行叠加,进而模拟重建波面.图7为基于上述错位叠加后的重建波面情况.



(b) Spatial frequency spectrum of first-order

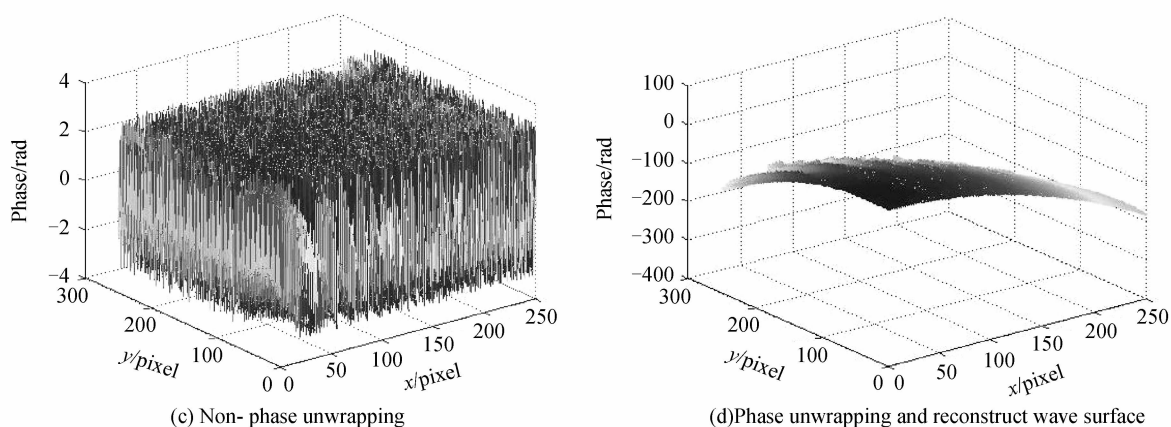


图7 错位叠加重建波面

Fig.7 Dislocation superposition reconstruct wave surface

4.2 实验结果分析

从实验模拟结果来看,基于错位叠加后的波面面形虽然与理想波面存在一定差别,但是通过将基于错位叠加后的波面面形图与加载栅格(错位)全息图重建波面面形进行比对,容易发现前者波面的面形较后者波面面形得到了一定程度的改善、提高。

目前常用的评价波阵面的质量指标有两个,即峰谷值偏差 E_{PV} 和均方根偏差 E_{RMS} 。

因此,现在通过计算得到上述三组重建波面的峰谷值偏差 E_{PV} 和均方根偏差 E_{RMS} 来进行说明,见表1。

表1 基于错位叠加优化方法的波面重建结果对比
Table 1 Comparison of the reconstruction wavefront based on the dislocation optimization methods

Type	CGH I	CGH II	CGH III
Index			
E_{PV}	260.085 0	286.209 8	72.850 6
E_{RMS}	3.868 3	3.939 8	0.876 8

从表1中可以看出,栅格全息图重建波面和错位栅格全息图重建波面的峰谷值偏差 E_{PV} 大致相同,这些数据说明了栅格结构确实对计算全息重建波面面形带来了影响;而错位叠加全息图重建波面的峰谷值偏差 E_{PV} 明显有较大程度的改善,大约降低到原始栅格全息图重建波面峰谷值偏差的四分之一左右。均方根偏差 E_{RMS} 由起初的3.9左右降低到0.8768,即错位叠加后重建波面的均方根偏差 E_{RMS} 比前者提高了近4.45倍。从各个波面的不同峰谷值偏差 E_{PV} 和均方根偏差 E_{RMS} 均可以说明基于错位叠加方法的重建波面准确度得到了修正和提高。

错位叠加重建波面面形的提高,说明了计算全息图中的被SLM空间结构阻挡的信息通过错位叠加的方法实现了信息补偿,因而这种方法一方面提高了重建波面的质量,另一方面这种方法间接提高了SLM分辨率。

5 结论

本文针对不同非球面面形干涉检测过程中标准波面获取的困难,提出了基于SLM的标准波面重建的优化方法。选用SLM取代传统的全息干板作为计算全息图的实时再现介质,实现了“标准波面”的实时获取。对SLM像素结构及其影响作了分析,将黑栅结构对重建波面的影响进行了模拟,结果显示重建波面质量有所下降。提出利用错位叠加的优化方法提高重建波面质量,即将同一幅全息图加载到栅格位置不同的SLM上面实现信息的互补,从而将计算全息图上的波面信息尽可能地完整表达出来。研究结果表明这种方法确实可以提高基于SLM重建波面的质量。

参考文献

- [1] KAWAMOTO H. The history of liquid crystal displays[J]. *Proceedings of IEEE*, 2002, **90**(4): 460-500.
- [2] GUNTHER W, SVEN K, HARTMUT G, *et al.* Liquid crystal display as spatial light modulator for diffractive optical elements and the reconstruction of digital holograms [C]. *SPIE*, 2001, **4596**: 182-190.
- [3] HU Li-fa, LI Xuan, LIU Yong-jun, *et al.* Phase-only liquid crystal spatial light modulator for wavefront correction with high precision [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(26): 6403-6409.
- [4] ZHANG Xiao-jie, LIU Xu, LI Hai-feng. Parameters study of liquid crystal device as holographic recording medium [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2007, **41**(9): 1519-1522.
张晓洁,刘旭,李海峰.液晶器件作为全息记录介质的参量研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2007, **41**(9): 1519-1522.
- [5] REN Xiu-yun, CHENG Xin, HAN Yu-jing, *et al.* Imaging properties of the computer-generated holograms based on spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 110-113.
任秀云,程欣,刘轩,等.基于空间光调制器的计算全息成像特性[J]. *光子学报*, 2005, **34**(1): 110-113.
- [6] 李莎. 基于 TFT-LCD 再现的计算全息再现研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [7] CHEN Qian-rong, ZHOU Jin-peng, LI Quan. Disturbance of

- diffraction of TFT-LCD pixels structure on optical information processing[J]. *Apply La Ser*, 2003, **23**(1): 37-40.
陈前荣,周金鹏,黎全. 光学信息处理中 TFT-LCD 像素结构衍射的干扰[J]. *应用激光*, 2003, **23**(1):37-40.
- [8] LI Sha, LIU Xu, ZHANG Xiao-jie. Black-matrix effect of liquid crystal display in reconstructing computer-generated hologram[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(8): 41-45.
李莎,刘旭. 计算全息再现中 LCD 黑栅效应的研究[J]. *光电工程*, 2007, **34**(8):41-45.
- [9] SU Ping, KANG Guo-guo, TAN Qiao-feng, *et al.* Estimation and optimization of computer-generated hologram in null test of freeform surface[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7**(25): 1-4.
- [10] LIU Hua, LU Zhen-wu, LI Feng-you, *et al.* Analysis for property of CGH on spherical surface used for aspheric surface testing[J]. 2004, **31**(7): 38-41.
刘华,卢振武,李凤有,等. 用于非球面检测的球面计算全息图特性分析[J]. *光电工程*, 2004, **31**(7):38-41.

Optimization Method of Reconstruct Wavefront Based on Spatial Light Modulator

HAN Jun¹, ZHENG Ting¹, NIE Liang¹, AN Yu-ying²

(1 *School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China*)

(2 *School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

Abstract: A wavefront reconstruction method was proposed based on spatial light modulator (SLM) to achieve the requirement of real-time testing of different aspheric surfaces. An interference measurement system based on SLM wavefront reconstruction was designed, in which the computer-generated hologram (CGH) encoding method was chosen according to the intrinsic properties of SLM. To resolve the quality degradation problem of the reconstructed wavefront, a dislocation optimization method was proposed. The process is verified through simulation, and the results showed that the RMS of the reconstructed wavefront was improved by 4.45 times.

Key words: Computer-Generated Hologram(CGH); Optimization; Wavefront test; Coding; Spatial Light Modulator(SLM); Wavefront reconstruction