

LCSLM 相位调制特性及其在非球面测量中的应用

马文超^{1,2}, 申文^{1,2}, 胡栋挺^{1,2}, 刘新宇^{1,2}, 赵子云^{1,2}, 曹朔^{1,2}, 苏宙平^{1,2},
朱华新^{1,2}, 张逸新^{1,2}, 陈国庆^{1,2}, 胡立发^{1,2*}

¹江南大学理学院, 江苏 无锡 214122;

²江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122

摘要 液晶空间光调制器(LCSLM)在非显示领域有着广泛的应用。利用夏克哈特曼波前探测器对 LCSLM 的相位调制特性进行测量,结果表明,低阶 Zernike 模式的线性相位调制范围相对较大,随着调制范围的增加,衍射效率下降明显。对 LCSLM 用于非球面面形测量的可能性进行初步探讨,为扩展非球面面形检测方法提供一种全新的思路。

关键词 光学器件;液晶空间光调制器;夏克哈特曼波前探测器;Zernike 模式;面形测量;非球面

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.222301

Phase Modulation Characteristics of LCSSLM and Its Applications in Aspheric Surface Measurements

Ma Wenchao^{1,2}, Shen Wen^{1,2}, Hu Dongting^{1,2}, Liu Xinyu^{1,2}, Zhao Ziyun^{1,2},
Cao Shuo^{1,2}, Su Zhouping^{1,2}, Zhu Huaxin^{1,2}, Zhang Yixin^{1,2}, Chen Guoqing^{1,2}, Hu Lifa^{1,2*}

¹School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

²Jiangsu Provincial Research Center of Light Industry Opto-Electronic Engineering and Technology,
Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract A liquid crystal spatial light modulator (LCSSLM) has a wide range of applications in the non-display field. In this study, the phase modulation characteristics of LCSSLM are evaluated using a Shack-Hartmann wavefront detector. The results denote that the linear phase modulation range of the low-order Zernike mode is relatively large, and the diffraction efficiency significantly decreases as the modulation range increases. Furthermore, the possibility of using LCSSLM for performing aspherical surface measurements is discussed, which provides a new approach for expanding the method of aspheric surface shape detection.

Key words optical devices; liquid crystal spatial light modulator; Shaker-Hartmann wavefront detector; Zernike mode; surface measurement; aspheric surface

OCIS codes 230.3720; 160.3710; 010.1080

1 引言

液晶空间光调制器(LCSLM)越来越多地应用于自适应光学、光学测量、光镊、激光光束整形、光信息处理等领域中^[1-7]。LCSLM 光学元件面形测量方面的应用非常有意义。传统测量非球面的光学方法非常多,基于计算全息(CGH)的干涉测量法是其

中重要的一种^[7-10],CGH 的制作包括掩模、光刻,成本比较高。因此近年来,研究者将可编程控制的 LCSLM 用于光学元件的面形测量,替代传统的 CGH,并引起了人们的关注^[11-18]。2000 年, Olivier 等^[11]基于哈特曼探测器的原理,开发了液晶哈特曼扫描系统,利用可编程控制的液晶电视(LCTV)来产生子孔径,用于测量大口径非球面的面形,与传统

收稿日期: 2019-04-24; 修回日期: 2019-04-29; 录用日期: 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61475352)

* E-mail: hanweimian@163.com

的夏克哈特曼探测器相比有更高的精度。2005年,本课题组对 LCTV 用于光学元件面形测量进行了室内的测试和理论探讨^[13-14]。不过 LCTV 因透过率低、占空比大、像素尺寸大,应用受限。近年来,随着液晶显示技术的发展,LCSLM 的性能有了很大的提高,基于硅基液晶(LCOS)的 LCSLM,在像素尺寸、像素数、反射率、占空比、响应速度等关键参数方面具有很大的优势,这促进了它在光学测量方面的应用。

非球面或自由曲面在光学系统中具有特殊的优势,其加工过程中的面形检测也是非常重要的环节,关系到面形质量和最终光学系统的成像质量。尽管有很好的应用前景,但由于 LCSLM 的像素密度没有传统的 CGH 基板分辨率高,因此难以获得光学元件面形测量所需要的大动态范围。针对该问题,需从两方面进行研究,一方面,研究基于 LCOS 的 LCSLM 的相位调制特性,研究其产生不同 Zernike 模式面形的能力,同时,对其衍射效率进行分析,以使其满足实际应用需要;另一方面,需对非球面或自由曲面的面形检测方法进行初步研究。

由此本文介绍 LCSLM 调制特性测量的实验装置,并提出进行在线检测时的实验光路,探究其相位调制特性及在非球面测量中的应用。

2 实验

图 1 中,光纤光源发出的光经过透镜 L1 准直,偏振片 P 起偏后,其偏振方向与液晶分子的长轴取向一致;透过 P 的偏振光经过分光棱镜 BS1 分光,其中一半经过反射到达 LCOS;经过 LCOS 反射的光再一次经过 BS1,其透射光经过中心波长 649.7 nm 的滤光片滤波后为准单色的光,其半峰全宽(FWHM)为 9.4 nm,峰值透过率为 57.3%;透射光经过透镜 L2 到达分光棱镜 BS2,其中透射光进入 CCD1 成像,而反射的部分经过 L3 后到达夏克哈特

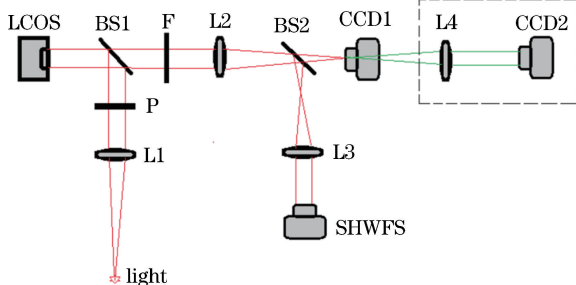


图 1 LCSLM 的自适应光学系统

Fig. 1 Adaptive optical system of LCSLM

曼波前探测器(SHWFS)进行波前测量。其中,透镜 L1 的焦距为 150 mm,口径为 25.4 mm;透镜 L2 的焦距为 150 mm,口径为 25.4 mm;透镜 L3 和 L4 的焦距都为 100 mm,口径为 50.8 mm;SHWFS 的入瞳口径为 4.76 mm。当移开 CCD1 后,虚线部分中的相机 CCD2 可以看到 LCOS 面板上的灰度图案。

波前探测器采用 Thorlab 公司的 WFS30-7AR 型波前探测器,SHWFS 的口径 $D_{\text{SHWFS}}=4.76$ mm,微透镜口径为 150 mm,焦距为 5.2 mm;CCD 分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $11.34 \text{ mm} \times 7.13 \text{ mm}$ 。

LCSLM 采用 BNS 公司的 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 纯相位 LCSLM,像素尺寸为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,面板尺寸为 $7.68 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$ 。如图 2 所示,SHWFS 测量的有效区域约为 LCOS 上图案的 93%左右,其中图 2(a)为 LCOS 上施加的某一灰度图,图 2(b)为在 CCD2 上拍摄得到的 LCOS 上施加的图案。

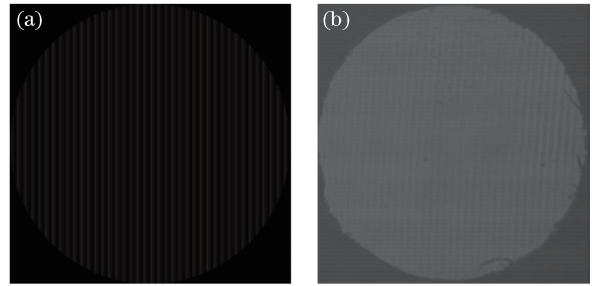


图 2 实验图片。(a)施加给 LCOS 的图片;
(b)CCD2 拍摄的图案

Fig. 2 Experimental pictures. (a) Picture applied to LCOS; (b) picture taken by CCD2

3 实验结果

利用图 1 的光路,在 LCSLM 上施加不同 Zernike 模式的灰度图,用 SHWFS 对调制的相位进行测量,对前 35 项 Zernike 模式在不同幅值下的响应进行测量。为显示方便,本文对施加反方向的 Zernike 面形时测量得到的波面峰值和谷值之间的差(PV)、均方根值(RMS)取负,结果如图 3 所示。图 3(a)为 LCOS 上施加不同 Zernike 模式时,SHWFS 测量得到的波前 PV 值随 LCOS 上施加的模式系数的变化,其中 x 轴为 Zernike 模式项数, y 轴为 Zernike 系数, z 轴为 SHWFS 测量得到的 LCOS 的响应。由于测量光路和其中的光学元件本身存在波前畸变,因此,为消除系统误差,将测量的结果减去不加灰度时的静态畸变,这样得到更接近实际的 LCOS 响应。

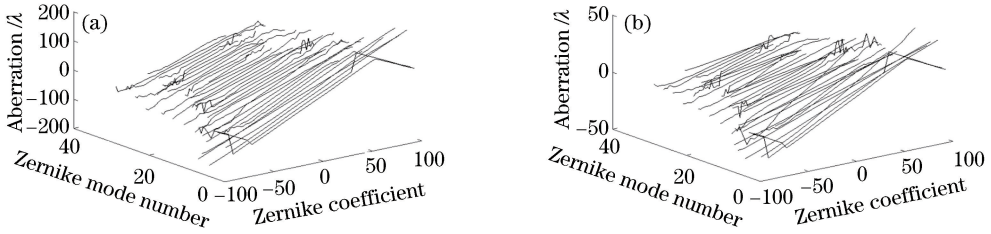


图3 LCOS上施加不同 Zernike 模式时, SHWFS 的测量值随模式系数的变化。

(a) SHWFS 测量得到的波前 PV; (b) SHWFS 测量得到的波前 RMS

Fig. 3 Measured values of SHWFS as a function of mode factor when different Zernike modes are applied to LCOS.

(a) Wavefront PV measured by SHWFS; (b) wavefront RMS measured by SHWFS

图 3 (b) 为 LCOS 上施加不同 Zernike 模式时, SHWFS 测量得到的波前 RMS 值随 LCOS 上施加的模式系数的变化。图中 λ 为波长。从图中可以看出, 不同 Zernike 模式下, 当施加的灰度图幅度在 LCOS 的响应范围内时, 测量得到的响应随施加灰度图的幅值线性增加, 超过其响应时, 局部波面变化较陡的区域内, 一个波长对应的像素数较少, 导致衍射效率降低, SHWFS 测量结果误差较大, 导致呈现非线性的变化。

为进一步确定 LCOS 对不同 Zernike 模式的响应区间, 可以基于 2 点判断标准: 首先, 利用 SHWFS 测量得到的波前要施加在 LCOS 上的灰度对应的理论波前面形一致; 其次, 它们之间还应该有很好的线性关系。本文对比了每一项 Zernike 模式测量的 PV 和 RMS 的结果, 并计算了相对误差。由于 PV 值的误差容易受到边缘个别像素误差的影响, 因此采用 RMS 的相对误差来判断各 Zernike 模式的动态范围。图 4 为其中几项典型的 Zernike 模式, 横轴为

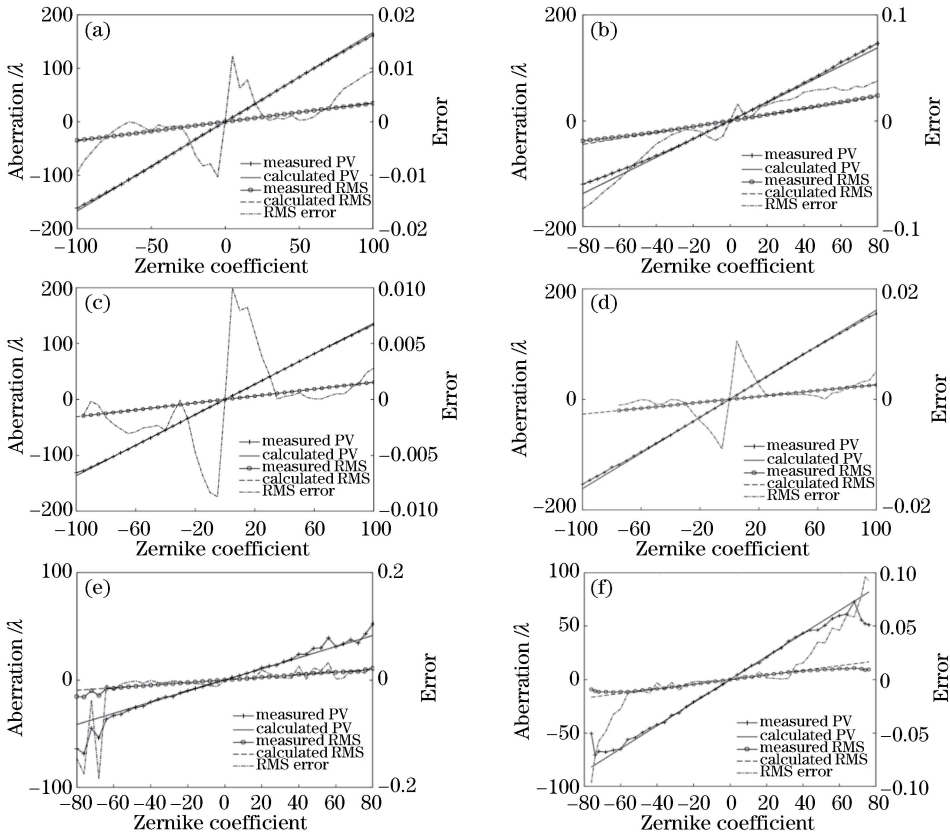


图 4 部分 Zernike 模式下, 理论值和测量值的对比。(a) 第 3 项测量结果; (b) 第 4 项测量结果; (c) 第 5 项测量结果;

(d) 第 6 项测量结果; (e) 第 25 项测量结果; (f) 第 34 项测量结果

Fig. 4 Comparisons between theoretical and measured values in partial Zernike modes. (a) Measured results of 3rd term; (b) measured results of 4th term; (c) measured results of 5th term; (d) measured results of 6th term; (e) measured results of 25th term; (f) measured results of 34th term

施加在 LCOS 上不同模式的 Zernike 系数,纵坐标有两个,左边为测量和理论的结果, λ 为波长;右边为 RMS 的相对误差,相对误差的计算为实际误差除以理论值。在幅值小时,即使绝对误差较小,也可能有较大的相对误差。从图中可以看出低阶模式一般都有较好的线性响应,随着 Zernike 模式的径向级次的升高,动态范围变小。

动态范围的具体统计结果如图 5 所示,图中横坐标为 Zernike 模式项数,纵坐标为其对应的动态范围,即 Zernike 系数,以图 4 中各项的相对误差 5%、10%、15% 为标准,分别统计正、负幅值方向上的动态范围。正负方向上的动态范围基本一致,且随着 Zernike 模式的径向级次的升高,动态范围有所减小,但并不是单调降低,这和不同模式下局部区域,特别是边缘部分波前变化的梯度有关。值得注意的是,LCSLM 应用于自适应光学系统中时,即使它有一定的误差,但只要具有很好的线性响应,这种误差是可以在闭环校正的过程中被修正,最终同样可以得到高分辨率成像的效果。

对每一项测量得到的 Zernike 系数的响应情况

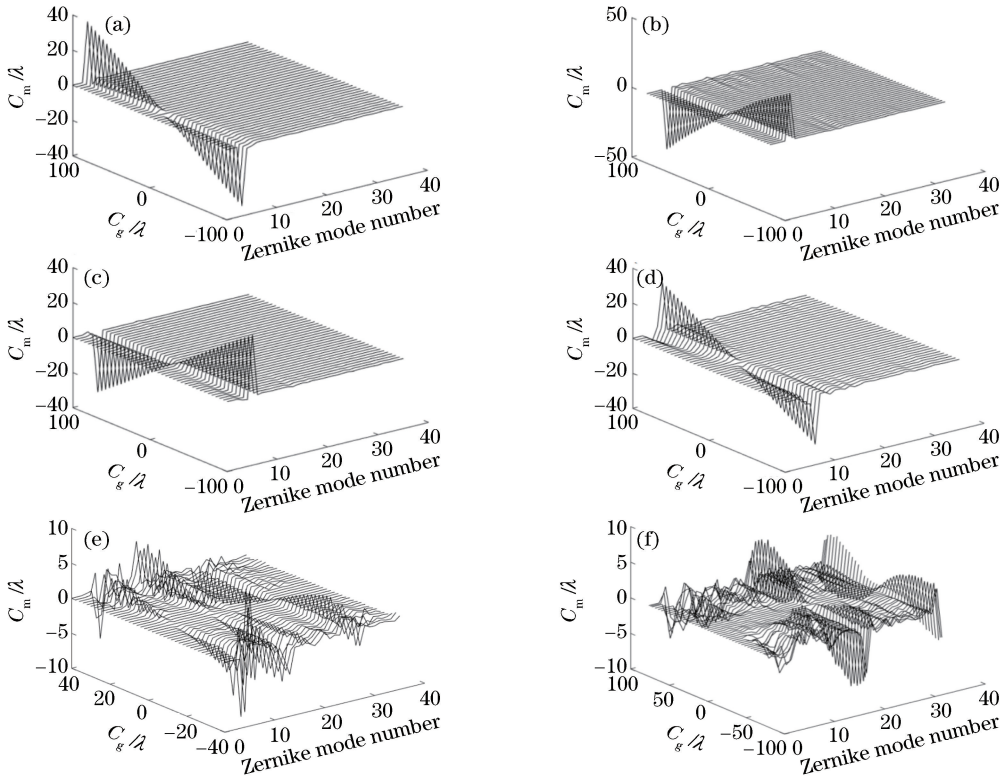


图 6 在 LCOS 上施加不同 Zernike 模式且其系数 C_g 的大小不同时,SHWFS 测量得到的波面 Zernike 系数 C_m 。(a)第 3 项测量结果;(b)第 4 项测量结果;(c)第 5 项测量结果;(d)第 6 项测量结果;(e)第 25 项测量结果;(f)第 34 项测量结果
Fig. 6 Zernike coefficient C_m measured by SHWFS when different Zernike modes are applied on LCOS and coefficient C_g is different. (a) Measured results of 3rd term; (b) measured results of 4th term; (c) measured results of 5th term; (d) measured results of 6th term; (e) measured results of 25th term; (f) measured results of 34th term

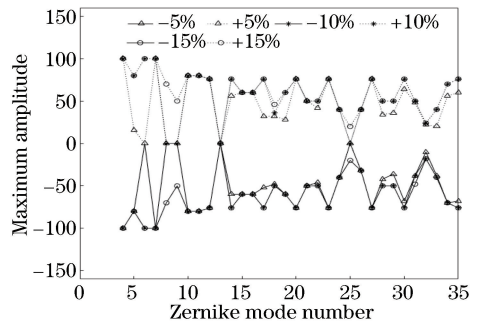


图 5 以相对误差 5%、10%、15% 为标准,LCOS 上能施加不同 Zernike 模式时的最大幅度
Fig. 5 Maximum amplitude when different Zernike modes can be applied to LCOS with relative errors of 5%, 10%, and 15%

进行比较,图 6 为部分 Zernike 模式下测量得到的系数,并将结果分别与图 4 中的测量结果对应。 x 轴为 LCOS 上施加的 Zernike 系数,即 C_g , y 轴为 Zernike 模式项数, z 轴为测量得到的 Zernike 系数的幅值,即 C_m 。从图 6(a)~(d)可以看出,低阶的 Zernike 模式,其响应具有线性特性,而且对应模式的响应占主导地位,且其他模式的系数不明显;

但在高阶的情况下,即使在线性响应的区域,也有其他 Zernike 模式的混频。

4 分析与讨论

LCSLM 在应用中,除了其相位调制特性外,一个重要的特性是衍射效率。衍射效率低时,其应用会受到较大的限制。例如,在光学元件加工过程中进行检测时,由于光学元件的加工未完成,表面比较粗糙,且没有镀膜,反射率低,此时进行光学表面面形检测时,则能量损失大,信噪比会比较低,导致测量精度降低。因此,要考虑 LCSLM 在大相位调制量下的衍射效率问题。入射偏振光的偏振方向与 LCSLM 中液晶的取向夹角为 α_{pol} 时,能被液晶相位调制的能量为 $I^{[1]}$, I 可表示为

$$I = I_0 \cos^2(\alpha_{\text{pol}}), \quad (1)$$

式中: I_0 为入射偏振光的光强; α_{pol} 为偏振方向与液晶分子长轴夹角。

液晶产生闪耀光栅,其衍射效率可以表示为^[2]

$$\eta_{\text{gra}} = \left[\frac{\sin(\pi/q)}{\pi/q} \right]^2, \quad (2)$$

式中: q 为一个波长的倾斜中像素的数目。

对于 LCSLM 来说,像素之间的条纹场效应会导致其衍射效率降低^[3],衍射效率的计算公式为

$$\eta_t = \left(1 - \frac{\Delta_F}{\Delta} \right)^2 = \left[1 - \frac{a(d/p)}{N_a} \right]^2, \quad (3)$$

式中: a 为系数,设置为 0.3; d 为液晶层厚度,约为 3 μm ; p 为像素的尺寸,为 15 μm ; N_a 为一个波长内平均的像素数目。

因此,由(1)~(3)式可以计算总衍射效率 η_{LCOS} ^[4] 为

$$\eta_{\text{LCOS}} = I \cdot \beta_{\text{lig}} \cdot \eta_{\text{gra}} \cdot \eta_t, \quad (4)$$

式中: β_{lig} 为 LCOS 的反射率。由于玻璃、氧化铟锡(ITO)膜、取向膜、液晶等的吸收,及硅基板没有镀高反射率的介质膜,因此,会存在能量损失,对于本实验中用到的 Meadow Lark 公司 512 pixel \times 512 pixel 的纯相位 LCOS,反射率 β_{lig} 为 71%。

图 7 为不同幅值倾斜下测量得到的光点相对初始光斑的偏移量,图中 0th 为初始光斑的位置,1st 为一级衍射光斑的位置,Xth 为 X 级衍射光斑的位置。图 8(a)为衍射效率随施加灰度图的幅值的变化情况;与图 8(a)对应,将横坐标转换成相应的量化级次(QL)后,图 8(b)为衍射效率随量化级次的变化情况,理论和实验的结果基本一致。需要指出的是,实验中衍射效率的计算为倾斜后 1 级衍射光

点的光强除以未加任何图片时 0 级光点的光强。从图 7 来看,随着施加倾斜的系数增加,即使理论上一个波长内的像素减少了,但光点的偏移仍然具有很好的线性特性。当倾斜的幅值比较小时,测量得到的衍射效率较高;当倾斜的系数达到 100 时,衍射效率降低到 52.5%;当倾斜系数达到 210 时,衍射效率只有 8.4%,其他级次的光点亮度明显增强。另外,从图 7 测量得到的光点衍射结果来看,实际上是 LCOS 产生的倾斜太大,已经超出本实验中 SHWFS 的动态范围,导致大倾斜时测量结果的错误。因此,LCOS 产生的相位调制较大时,衍射效率会降低,但所产生的波前精度没有降低。倾斜项具有这一特点,以此类推,其他 Zernike 模式也具有相同的特性。另外,从实际应用来看,衍射效率决定系统对入射光的利用效率,在自适应光学天文观测、光学元件加工过程中的应用中,对入射光能量损失要求严格,因此,衍射效率低会限制 LCOS 的应用范围,从而决定了 LCOS 的调制范围。

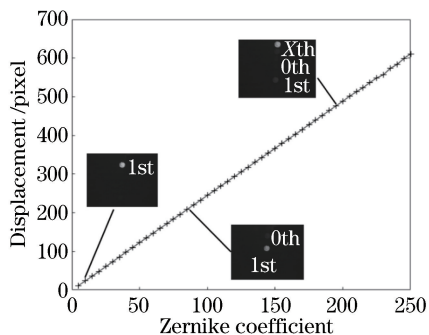


图 7 倾斜项不同幅值时光点的偏移

Fig. 7 Offset of light spot when tilt mode has different amplitudes

5 基于液晶的补偿面形产生

从上述结果来看,512 pixel \times 512 pixel 的 LCSLM 产生的相位调制幅度实际上已远超干涉仪的探测范围,甚至超出了 SHWFS 的动态范围。这一特点使它在自适应光学成像、光学元件面形测量、光束整形等方面的应用具有很好的前景。本文利用 LCSLM 产生补偿面形,来对非球面光学元件面形进行测量。非球面的公式^[5]为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + A_1r^4 + A_2r^6 + \dots + A_n r^n + \dots, n \in \mathbb{Z}, \quad (5)$$

式中: $r^2 = x^2 + y^2$; $c = 1/R$, R 为顶点曲率半径; A_n 为 n 次项系数; $k = -e^2$ 为二次曲面常数, e 为二次

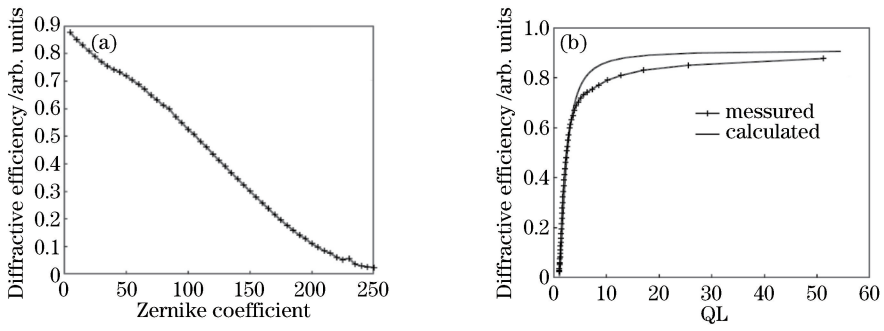


图 8 倾斜项不同幅值时的衍射效率。(a)衍射效率随系数的变化;(b)衍射效率随 QL 的变化

Fig. 8 Diffraction efficiency at different amplitudes of tilt mode. (a) Diffraction efficiency as a function of coefficient; (b) diffraction efficiency as a function of QL

曲面的偏心率。以文献[19]中的非球面为例, $k = -1.514$, 顶点曲率半径为 2880 mm, 内径为 180 mm, 外径为 1000 mm。最大非球面度最小时的最佳匹配球面的半径为 2913.68 mm, 此时, 最大非球面度达到 0.1138 mm。

对于自由曲面或非球面的检测,除了传统的干涉法,人们还在探索基于 SHWFS 等新的面形检测方法^[20-24]。2016年, Furukawa 等^[26]开发了一套利用 SHWFS 测量非球面的装置,测量精度 RMS 达到 5.8 nm, 重复精度 RMS 达到 0.75 nm。因此, SHWFS 在测量动态范围、精度、空间分辨率方面具有很好的平衡性,可以用于光学元件的在线检测。因此,本课题组提出采用图 9 所示的光路进行非球面面形测量。光路中单色点光源发出的球面波到达分光棱镜 BS 后,反射部分进入 LCOS; LCOS 上施加有全息图,经过 LCOS 反射后,反射光再一次经过 BS,透射部分到达待测非球面,然后光线经过全息图后,沿着垂直方向到达非球面,它们将沿原路返回;被非球面反射后第三次经过 BS,透过准直透镜 L1 进入夏克哈特曼波前探测器 WFS。图 10(a) 为非球面面形;图 10(b) 为对应的去除最佳匹配球面后的非球面度;图 10(c) 为 512 pixel × 512 pixel

的相位型全息图, x 和 y 为非球面在横纵坐标的长度。理想情况下,如果没有系统误差,待测非球面的面形完美, WFS 中探测到的是平面波;而当非球面与理想非球面相比存在误差时, WFS 中将探测到非球面。此光路的优点在于利用可编程的 LCOS 来产生 CGH, 替代了传统的 CGH 高成本加工方式。同时,用 WFS 替代干涉仪,可以用于非球面加工时,在精抛光之前的粗抛光过程中的在线检测。用 LCOSLM 进行非球面检测时,考虑到测量的范围达到 0.1138 mm, 衍射效率将会降低, 因此,可以采用分辨率更高的 LCOS, 或者采用拼接测量的方法,即先进行区域测量, 然后进行总体波面的拼接。

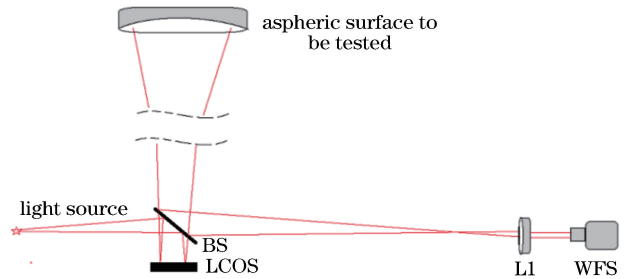


图 9 非球面面形测试光路原理图

Fig. 9 Principle of optical path of aspherical surface measurement

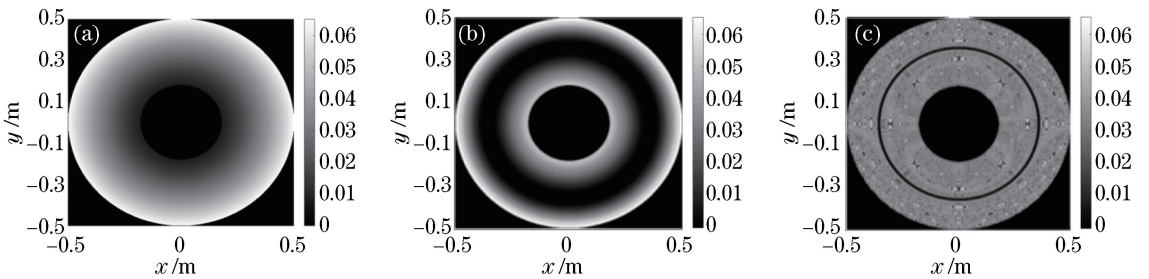


图 10 非球面面形及其测试全息图。(a)非球面面型;(b)去除最佳匹配球面后的面形;(c)相位型全息图

Fig. 10 Aspherical surface shapes and its test hologram. (a) Aspherical surface shape; (b) surface shape after removing best matched spherical surface; (c) phase hologram

6 结 论

基于 LCOS 的 LCSLM 的相位调制特性,研究了其产生不同 Zernike 模式面形的能力,找出其相位调制范围,同时,对其衍射效率进行了分析。实验结果表明,在不同 Zernike 模式下,当施加的灰度图幅度在 LCOS 的响应范围内时,测量得到的响应随施加灰度图的幅值呈线性增加;超过其响应时,衍射效率降低,导致非线性的变化。同时,还对非球面或自由曲面的面形检测方法进行初步研究,利用 LCOS 可编程产生 CGH,这为非球面面形检测提供一种全新的思路。

参 考 文 献

- [1] Ahderom S, Raisi M, Lo K, *et al.* Applications of liquid crystal spatial light modulators in optical communications [C] // 5th IEEE International Conference on High Speed Networks and Multimedia Communication (Cat. No. 02EX612), July 3-5, 2002, Jeju Island, Korea. New York: IEEE, 2002: 239-242.
- [2] Hu L F, Xuan L, Liu Y J, *et al.* Phase-only liquid-crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6403-6409.
- [3] Kirby A K, Love G D. Fast, large and controllable phase modulation using dual frequency liquid crystals [J]. *Optics Express*, 2004, 12(7): 1470-1475.
- [4] Hands P J W, Tatarkova S A, Kirby A K, *et al.* Modal liquid crystal devices in optical tweezing: 3D control and oscillating potential wells [J]. *Optics Express*, 2006, 14(10): 4525-4537.
- [5] Nie Y M, Ma H T, Li X J, *et al.* Generation of dark hollow femtosecond pulsed beam by phase-only liquid crystal spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21): 4174-4179.
- [6] Zhang Z C, You Z, Chu D P. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e213.
- [7] Shen W, Ma W C, Hu D T, *et al.* Effect of temperature on LUT and response speed of liquid crystal wavefront corrector [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(11): 911-917.
申文, 马文超, 胡栋挺, 等. 温度对液晶波前校正器响应速度及 LUT 的影响研究 [J]. *液晶与显示*, 2018, 33(11): 911-917.
- [8] Liu H, Lu Z W, Li F Y, *et al.* Design of a novel hologram for full measurement of large and deep convex aspheric surfaces [J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3120-3126.
- [9] Li F Z, Zhao J L, Li R G, *et al.* Design and fabrication of CGH for aspheric surface testing and its experimental comparison with null lens [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7656: 765643.
- [10] Li S J, Zhang J, Liu W G, *et al.* Measurement investigation of an off-axis aspheric surface via a hybrid compensation method [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(28): 8220-8227.
- [11] Olivier S, Laude V, Huignard J P. Liquid-crystal Hartmann wave-front scanner [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(22): 3838-3846.
- [12] Tiziani H J, Haist T, Liesener J, *et al.* Application of SLMs for optical metrology [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4457: 72-81.
- [13] Cao Z L, Xuan L, Hu L F, *et al.* Effects of the space-bandwidth product on the liquid-crystal kinoform [J]. *Optics Express*, 2005, 13(14): 5186-5191.
- [14] Cao Z L, Xuan L, Hu L F, *et al.* Investigation of optical testing with a phase-only liquid crystal spatial light modulator [J]. *Optics Express*, 2005, 13(4): 1059-1065.
- [15] Zhao W C, Su X Y, Liu Y K, *et al.* Testing an aspheric mirror based on phase measuring deflectometry [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(10): 103603.
- [16] Ares M, Royo S, Sergievskaya I, *et al.* Active optics null test system based on a liquid crystal programmable spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(32): 6201-6206.
- [17] Guo C F, Su X Y, Chen W J, *et al.* Quantitative measurement of large-aperture aspheric surfaces by off-axis Ronchi test [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(2): 165-169.
- [18] Fan D. A new method for testing the asphere surface with a liquid crystal spatial light modulator [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 599/600/601: 27-31.
- [19] Li J F. Calculation and application of the best-fit sphere in root mean square of the gradient of the asphericity method [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(10): 1550-1556.
李俊峰. 非球面度梯度均方根法确定最佳比较球面

- 及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10): 1550-1556.
- [20] Koch J A, Presta R W, Sacks R A, *et al.* Experimental comparison of a Shack-Hartmann sensor and a phase-shifting interferometer for large-optics metrology applications [J]. Applied Optics, 2000, 39(25): 4540-4546.
- [21] Greivenkamp J E, Smith D G, Gappinger R O, *et al.* Aspheric metrology with a Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4419: 1-4.
- [22] Burge J H. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2576: 258-269.
- [23] Ge R, Shen W, Liu C, *et al.* Distance-power index weighted centroid detection algorithm for Shack-Hartmann wavefront sensors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 040401.
- 葛睿, 申文, 刘超, 等. 夏克-哈特曼波前探测器的距离-幂指数加权质心探测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040401.
- [24] Shi Y P, Liu C L. Positioning accuracy improvement of spot centroid for Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 081201.
- 师亚萍, 刘缠牢. 提高夏克-哈特曼波前传感器光斑质心的定位精度 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 081201.
- [25] Burge J H, Zhao C Y, Dubin M. Measurement of aspheric mirror segments using Fizeau interferometry with CGH correction [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7739: 773902.
- [26] Furukawa Y, Takaie Y, Maeda Y, *et al.* Development of one-shot aspheric measurement system with a Shack-Hartmann sensor [J]. Applied Optics, 2016, 55(29): 8138-8144.