

## 空间光调制器像素结构对波前重建的影响

肖昭贤, 温金鹏, 赵自新, 樊晨

引用本文:

肖昭贤, 温金鹏, 赵自新, 等. 空间光调制器像素结构对波前重建的影响[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2151–2157.

XIAO Zhao-xian, WEN Jin-peng, ZHAO Zi-xin, et al. Impact of spatial light modulator pixel structure on wavefront reconstruction[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2151–2157.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2151>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于液晶空间光调制器的多焦菲涅尔透镜

Multifocal Fresnel lens based on liquid crystal spatial light modulator

*光学精密工程*. 2016, 24(10s): 156–161 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0156>

### 弹光和电光级联的组合相位调制型椭偏测量术

Phase-modulated ellipsometry combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation

*光学精密工程*. 2016, 24(4): 690–697 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162404.0690>

### 基于飞秒激光的可运动微结构加工与旋转驱动

Fabrication and rotation driving of movable microstructures based on femtosecond laser

*光学精密工程*. 2020, 28(3): 584–590 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0584>

### 全光纤结构的石墨烯电吸收调制器

All-fiber graphene electro-absorption modulator

*光学精密工程*. 2016, 24(9): 2117–2125 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162409.2117>

### 硅-有机复合集成电光调制器的优化与制备

Optimal design and preparation of silicon-organic hybrid integrated electro-optic modulator

*光学精密工程*. 2020, 28(10): 2138–2150 <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2138>

文章编号 1004-924X(2020)10-2151-07

# 空间光调制器像素结构对波前重建的影响

肖昭贤<sup>1\*</sup>, 温金鹏<sup>1</sup>, 赵自新<sup>2</sup>, 樊晨<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 西安交通大学 机械工程学院机械制造系统国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 在利用液晶空间光调制器液晶分子等效折射率的变化实现光波前的动态调控, 从而进行光学非球面的零位干涉测量时, 液晶空间光调制器独立单元中像素离散化的尺度、单元结构的填充比例以及电控数字位阶都直接影响到波前调控精度。本文基于菲涅耳衍射原理以及离散傅里叶变换算法, 使用物理光场数值分析软件 VirtualLabTM 分析了像素独立单元对液晶空间光调制器重建补偿波面精度的影响, 建立波面经空间光调制器调制传播至待测表面的仿真模型, 评估像素结构因素对波前重建的理论算法本底误差及构成像素结构的多因素耦合误差, 重点关注像素尺寸采样频率与波前最大空间频率的匹配问题, 提出根据重建波前理论模型反推选取符合高精度测量要求的空间光调制器, 可有效降低动态检测系统的成本需求。理论计算得到制约空间光调制器重建高精度波面(RMS=0.01 $\lambda$ )的因素与液晶分子响应的自身非线性以及基底空间不一致密切相关。

**关键词:** 光波前调控; 液晶空间光调制器; VirtualLabTM; 像素结构; 奈奎斯特定理

**中图分类号:** O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202810.2151

## Impact of spatial light modulator pixel structure on wavefront reconstruction

XIAO Zhao-xian<sup>1\*</sup>, WEN Jin-peng<sup>1</sup>, ZHAO Zi-xin<sup>2</sup>, FAN Chen<sup>2</sup>

(1. *Institute of Systems and Engineering, China Academy of Engineering and Physics, Mianyang 621999, China;*

2. *State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: 412xiaozx@caep.cn*

**Abstract:** The change of the equivalent refractive index of liquid crystal molecules in liquid crystal spatial light modulators has been used to achieve dynamic control of optical wavefronts, thus realizing zero position interference measurements of optical aspheric surfaces. However, the pixel pitch, filling ratio of the cell structure, and gray-level number directly affect the accuracy of wavefront control. This study is based on Fresnel diffraction theory and the discrete Fourier transform algorithm. The physical light field was analyzed using a numerical analysis software, VirtualLabTM. The influence of pixel-independent units on the reconstruction compensation wavefront precision of the liquid crystal

**收稿日期:** 2020-02-25; **修订日期:** 2020-04-02.

**基金项目:** 中国工程物理研究院创新发展基金 2019 年度培育项目(No. PY2019039); 国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 5175404)

spatial light modulator was investigated, and a simulation model of the wavefront propagating through the spatial light modulator to the surface to be measured was established. The theoretical algorithm's background error of wavefront reconstruction caused by the pixel structure factor was evaluated, and the multifactor coupling error of the image structure was determined by focusing on the sampling frequency of pixel size and the maximum space of the wavefront. For the frequency matching problem, a spatial light modulator was selected to meet the requirements of high-precision measurement according to the theoretical model of the reconstructed wavefront, thereby effectively reducing the cost of the dynamic detection system. Theoretical calculation shows that the factors that restrict the spatial light modulator in reconstructing the high-precision wavefront (root mean square error of  $0.01\lambda$ ) are closely related to the nonlinearity of the liquid crystal molecular response and the inconsistency of the substrate space.

**Key words:** light wavefront control; liquid crystal spatial light modulator; VirtualLabTM; pixel structure; Nyquist's theorem

## 1 引言

液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)<sup>[1]</sup>是由在空间上二维阵列排布的独立单元构成,基于液晶的电控双折射原理,它可以在光信号或电信号随时间和空间变化的驱动和控制下,对光波的振幅、相位、波长、偏振态和相干性进行调制,是在光逻辑运算、光互联、实时光学信息处理等系统中的关键器件<sup>[2]</sup>。LC-SLM 具有空间分辨率高、可编程控制、质量轻等优点<sup>[3]</sup>,在材料的显微处理<sup>[4]</sup>、全息三维成像<sup>[5-6]</sup>、空间光束整形和脉冲整形<sup>[7-8]</sup>、波前传感器<sup>[9]</sup>及自适应光学<sup>[10]</sup>等领域有着广泛应用。

在传统的计算全息(Computer-generated Holography, CGH)补偿检测中,非球面与计算全息实体具有一一对应关系,应用通用性较差,而且制造工艺程序复杂、成本高、周期长。科研人员尝试利用 LC-SLM 对光波相位近似连续调制的能力,作为 CGH 的记录介质,从而实现光学非球面元件的动态计算全息补偿检测。

南京理工大学的朱日宏教授等人<sup>[11-12]</sup>自 2004 年起提出使用液晶电视实时测量非球面的方法,探究了液晶电视的光学性质及它应用于非球面检测的可行性。西安工业大学韩军等人<sup>[13-15]</sup>利用 LC-SLM 重建波面的 PV 值为  $0.420\ 3\lambda$ , RMS 值为  $0.091\ 4\lambda$ 。哈尔滨理工大学的周昊<sup>[16]</sup>基于 LC-SLM 搭建泰曼格林型干涉光路,对口径为 50 mm 和 52 mm 的两个凹抛物面镜进行了检

测,证明了 LC-SLM 作为 CGH 记录介质实时动态灵活测量非球面方法的可行性。2019 年国防科技大学<sup>[17]</sup>提出了一种使用 LC-SLM 作为可重新配置波前形状的多级干涉图型计算机生成全息图(ICGH)的方法,对非球面和自由曲面进行动态零位测量,提高了测试的灵活性和效率。

非球面动态检测的精度直接取决于 LC-SLM 波前重构的精度。目前,制约 LC-SLM 取代实体记录介质,实现高精度波前调控的主要因素包括 LC-SLM 的像素结构因素、液晶分子响应的自身非线性以及基底空间的不一致性。中科院上海光机所刘世杰等人<sup>[18-20]</sup>基于菲涅耳衍射原理以及离散傅里叶变换算法,重点分析了像素结构因素的影响,精确地仿真波面经 SLM 调制并传播到待测表面的过程,从而获得待测元件处补偿波面误差。在此基础上,本文使用德国 LightTrans 公司研发的物理光学数值分析软件 VirtualLabTM 中 LC-SLM 模块对像素尺寸、填充因子比例及灰度等级对补偿波面的重建精度进行了研究,通过理论分析获得了算法本底误差及多因素耦合误差,从而建立了 LC-SLM 高精度波前重建的前提条件。

## 2 仿真原理及模型

利用 SLM 动态检测非球面的基本原理如下:SLM 作为 CGH 的记录介质,平面波入射至 SLM 靶面,经调制产生被测光学面的补偿波面。调制函数也就是计算全息图,传统的计算全息

图是被相位刻蚀在实体介质上,而 SLM 则是通过液晶分子偏转,实现离散相位编码输出。

假定被测光学镜面为球面镜,那么理想的补偿波面为:

$$\varphi(u, v) = \frac{\pi}{\lambda R} (u^2 + v^2). \quad (1)$$

由文献[16]可知,补偿波面逆向传播距离为  $z$  时,通过光线追迹此平面内波前的理想相位分布为:

$$\varphi(x, y) = k \times [\sqrt{(z-r)^2 + x^2 + y^2} - (r-z)]. \quad (2)$$

该相位分布即是计算全息图相位,被包裹调制在  $[-\pi, \pi]$  后,编码加载至 SLM 上。图 1(a) 为 VirtualLabTM 软件中构建的波前重建系统光学系统 3D 视图,图 1(b) 为 SLM 波前重构及检测系统光学流程。

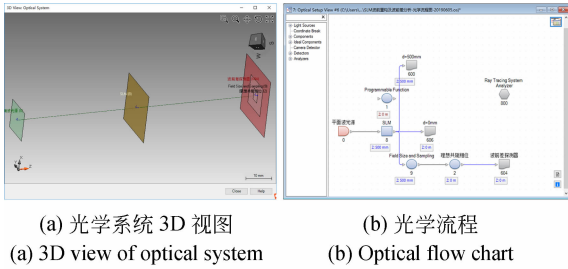


图 1 VirtualLabTM 仿真  
Fig. 1 VirtualLabTM simulation

SLM 上的初始光场为  $U(x, y) = A e^{i\varphi(x, y)}$ , 其中  $\varphi(x, y)$  即为公式(2)所表示的相位分布。光场进行菲涅尔正向传输,光场分布为:

$$U(u, v) = [P_z^{\text{Fresnel}} U(x, y)](u, v) = \frac{A}{i} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right) \times \left[ F\left( U(x, y) \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] \right) \right] \left( \frac{k}{2\pi z} u, \frac{k}{2\pi z} v \right), \quad (3)$$

其中:  $F$  为傅里叶变换,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。

获得复振幅  $U(u, v) = A' e^{i\varphi(u, v)}$ , 提取其相位分布  $\varphi(u, v)$ 。虽然菲涅尔传输算法本身存在固有计算误差,但在满足采样定理的前提下,  $\varphi(u, v)$  极限接近于  $\varphi(x, y)$ 。

实体 SLM 由大量像素独立单元构成,具有一定的尺寸、填充因子比例及电子器件固有的灰

阶量化级次。前两项可直接通过设置参数实现;而灰阶量化级次采用 Hard Quantization 方法,其表达式如下:

$$\varphi(x, y)' = \begin{cases} \varphi & (Q = 0) \\ \left\lfloor \frac{2\pi}{Q} \times \text{Round}\left[\frac{Q(\varphi + \pi)}{2\pi}\right] - \pi \right\rfloor & (Q \neq 0) \end{cases}, \quad (4)$$

其中  $Q$  为量化级次,  $\text{Round}[\ ]$  为取整符号。

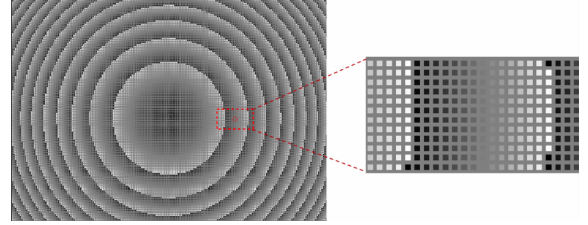


图 2 仿真系统叠加像素结构后实际相位分布  
Fig. 2 Phase distribution of simulation system after superposing pixel structure

像素结构因素被调制叠加到连续相位中,获得实际的相位分布  $\varphi(x, y)'$ , 如图 2 所示。经菲涅尔正向传输,提取实际的补偿波面相位分布  $\varphi(u, v)'$ 。实际补偿波面光场  $A' e^{i\varphi(u, v)'}$  通过与理想共轭光场  $A' e^{-i\varphi(u, v)}$  相乘,提取相位误差,得到:

$$\varphi_{\text{error}}(u, v) = \varphi(u, v)' - \varphi(u, v). \quad (5)$$

分别用  $PV(\varphi_{\text{error}})/\lambda$  (Peak-to-Valley of Wavefront Error /  $\lambda$ ) 和  $\text{RMS}(\varphi_{\text{error}})/\lambda$  (RMS of Wavefront Error /  $\lambda$ ) 值表征相位误差。

### 3 仿真结果

明确仿真系统中传输距离  $z = 500$  mm, 使用红光波长  $\lambda = 632.8$  nm, 理想球面波半径  $r = 100$  mm。

#### 3.1 系统原始误差

实体介质计算全息可以是连续的,但是使用数字仿真技术,即使是理想的波前相位分布也会被数字化离散。同时菲涅尔算法中使用离散傅里叶变换,空域的采样间距、空域有限的采样范围以及频域的采样间距都会给计算结果带来误差<sup>[21]</sup>。经过光场传输,携带算法本身以及数字离散引起的误差,生成存在系统原始误差的理想补偿波面。通过理想补偿波面光场与其共轭光场相乘,提取相位获得系统原始误差,结果如图 3 所示。

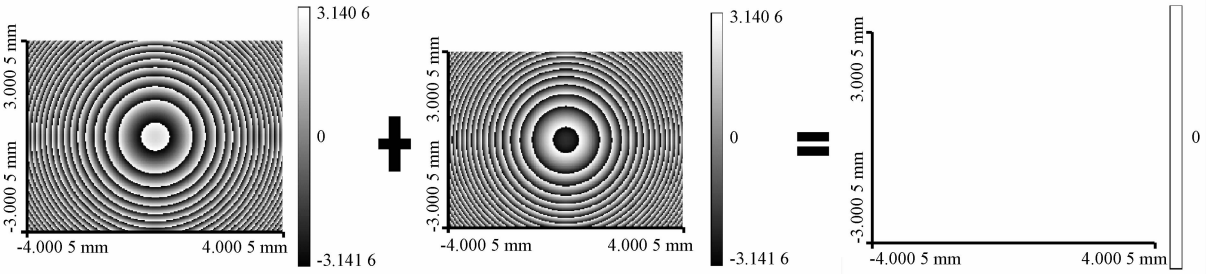


图 3 8 mm×6 mm 靶面系统原始误差计算示意图

Fig. 3 Original error calculation diagram of 8 mm×6 mm target system

表 1 SLM 不同靶面尺寸对应的系统原始误差

Tab. 1 Original errors of SLM system with different target sizes

靶面尺寸/mm×mm	PV( $\varphi_{\text{error}}$ )/ $\lambda$	RMS( $\varphi_{\text{error}}$ )/ $\lambda$
12×9	0.004 5	0.000 8
10×7.5	0.004 5	0.000 8
8×6	0.004 5	0.000 8
6×4.5	0.005 1	0.000 9
4×3	0.010 2	0.001 5

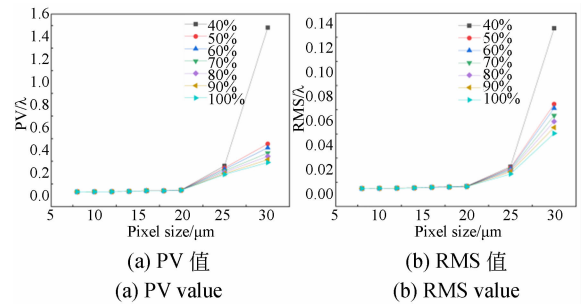
在计算系统原始误差时,设计的像素尺寸为  $1 \mu\text{m}$ 。从图 3 可以看出,8 mm×6 mm 靶面尺寸系统补偿波面的原始误差振幅部分处处相等,相位结果近似于零。从表 1 可知:靶面尺寸越小,系统原始误差反而越大;当靶面尺寸大于 8 mm×6 mm 时,系统原始误差几乎不变。因此,本文在 SLM 靶面尺寸为 8 mm×6 mm 的条件下开展仿真工作,同时忽略由仿真系统引入的原始误差。

### 3.2 像素结构因素误差

目前,同类相位型空间光调制器最小的像素尺寸可达  $3.74 \mu\text{m}$ ,但价格高昂,因此在光学工程领域常用的 SLM 像素尺寸仍不小于  $6 \mu\text{m}$ 。仿真过程中,设定像素尺寸分别为 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30  $\mu\text{m}$ , 设定填充因子比例分别为 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%, 设定灰阶量化级次分别为  $2^4, 2^5, 2^6, 2^7, 2^8$ 。在 VirtualLabTM 软件中搭建仿真系统并进行扫描计算,获得补偿波面误差的 PV 和 RMS 值,分别如图 4 和图 5 所示。

设定灰阶量化级次为  $2^8$ , 补偿波面误差 PV 值随像素尺寸的变化情况图 4(a) 所示,图中每一条曲线对应 SLM 不同填充因子比例,图 4(b) 则表示补偿波面误差的 RMS 值。可以看出,不论是补偿波面误差的 PV 值还是 RMS 值,在总体趋势上均是随像素尺寸的增大而增大,和图 4(a)、4(b) 相似的地方仍然是  $20 \mu\text{m}$  存在增长拐点,区别在于像素尺寸小于  $20 \mu\text{m}$  时,灰阶量

表示补偿波面误差的 RMS 值。可以看出,不论是补偿波面误差的 PV 值还是 RMS 值,在总体趋势上均是随像素尺寸增大而增大,当像素尺寸小于  $20 \mu\text{m}$  时, PV 值为  $0.03\lambda \sim 0.05\lambda$ , RMS 值为  $0.005\lambda \sim 0.007\lambda$ , 均能满足高精度补偿波前的要求,且填充因子比例对补偿波面误差的影响较小;但是,像素尺寸一旦超过  $20 \mu\text{m}$ , PV 值和 RMS 值开始显著增大,并且填充因子比例不同曲线的增长斜率也不同,也就是填充因子比例越低,补偿波面误差增长得越快。

图 4 灰阶量化级次为  $2^8$ , 补偿波面误差的 PV 值和 RMS 值Fig. 4 PV and root mean square values of compensating wave surface error with gray-level number of  $2^8$ 

设定填充因子比例为 100%, 补偿波面误差 PV 值随像素尺寸的变化情况如图 5(a) 所示,图中每一条曲线对应 SLM 不同灰阶量化级次,图 5(b) 则表示补偿波面误差的 RMS 值。可以看出,不论是补偿波面误差的 PV 值还是 RMS 值,在总体趋势上均是随像素尺寸的增大而增大,和图 4(a)、4(b) 相似的地方仍然是  $20 \mu\text{m}$  存在增长拐点,区别在于像素尺寸小于  $20 \mu\text{m}$  时,灰阶量

化级次对补偿波面误差的影响已经相对明显。不难理解,离散级次会直接影响着波前调控精度。

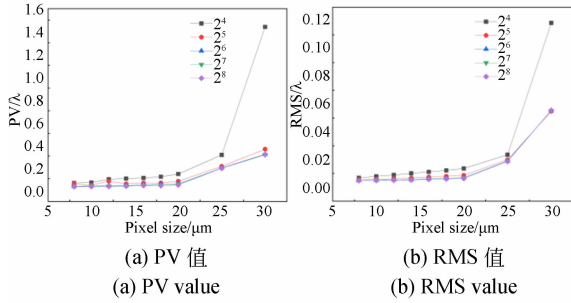


图 5 填充因子比例为 100%, 补偿波面误差的 PV 值和 RMS 值

Fig. 5 PV and RMS values of compensating wave surface error with filling factor ratio of 100%

### 4 分析与讨论

由上文的仿真结果可知,补偿波面误差随像素尺寸的变化存在“拐点”。本文中仿真的 SLM 像素尺寸为 8 mm × 6 mm,对于球面波而言,式(2)中的 φ(x, y)加载到 SLM 调制全息图的口径即为 D=8 mm。不难得到,这类对称相位分布的最大空间频率位于边缘处。首先获得 φ(x, y)的微分函数,公式如下:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \text{diff}(\varphi(x, y), x) = \frac{1}{2\pi} \text{diff}(\varphi(x, y), y), \quad (6)$$

其中 diff()函数表示求取微分。得到 ω<sub>max</sub> = f(4, 4) = 15.8/mm,根据奈奎斯特采样定理,SLM 像素尺寸理论的最大值为  $\frac{1}{2\omega_{\max}} \approx 31.6 \mu\text{m}$ 。在仿真计算中“拐点”出现在 20 μm,而  $\frac{1}{3\omega_{\max}} \approx 21.1 \mu\text{m}$ ,也就是说理论的双倍采样并不能满足补偿波面的高精度要求,至少得 3 倍以上。

本文补充计算了像素尺寸为 48 μm 时的补偿波面误差,设定填充因子比例为 100%,量化灰度级次为 2<sup>8</sup>,计算误差的 PV 值和 RMS 值,结果如表 2 所示。像素尺寸为 48 μm 时,对应的采样倍数仅为 1.32。从表中看出,在满足采样定理的条件下,随着采样倍数的增加,补偿波面的精度也

在提高;当采样倍数大于 3 时,精度趋于一个缓慢增加的过程,此时已能够满足高精度测量的要求。而在不满足采样定理的情况下,补偿波面误差 PV 值和 RMS 值急剧增长,可见决定补偿波面误差真正的“拐点”,出现在满足理论奈奎斯特采样频率对应的空间分辨率。

表 2 不同像素尺寸对应的补偿波面误差

Tab. 2 Compensating wavefront errors with different pixel sizes

像素尺寸/μm	PV(φ <sub>error</sub> )/λ	RMS(φ <sub>error</sub> )/λ
20	0.044 2	0.006 4
25	0.184 2	0.016 9
30	0.289 7	0.050 5
48	23.538	5.204 2

在满足以上条件的基础上,填充因子比例及灰阶量化级次的影响并不显著,不作为决定性因素。那么,只要计算出被测光学曲面的最大空间频率,适当提高采样倍数,例如 3 倍,就能选择出合适特性参数的 SLM 以实现高精度动态测量。这种方法可以有效降低成本,不盲目追求像素尺寸小、填充因子比例高、灰度量级次高的调制器件。

### 5 结论

本文基于菲涅耳衍射原理以及离散傅里叶变换算法,使用物理光场数值分析软件 VirtualLabTM 对 LC-SLM 重建补偿波面精度进行了系统研究,获得了像素结构因素的理论算法本底误差及多因素耦合误差。针对主要由像素采样尺寸带来的误差“拐点”问题,结合重建波面空间频率,提出在满足奈奎斯特定理的基础上,根据被测波面最大空间频率恰当选择符合特性参数的 LC-SLM,可降低构建曲面动态检测系统的成本。而且,有赖于电子刻束和微纳制造技术的发展,液晶空间光调制器的像元尺寸完全能够提供高精度动态测量的基本条件。由于空间频率的限制,如何提高 LC-SLM 的动态调制范围是接下来非常重要的研究方向,后续工作更应该关注液晶分子响应的自身非线性以及基底空间不一致性带来的调控误差。

## 参考文献:

- [1] 赵达尊,张怀玉. 空间光调制器[M]. 北京:北京理工大学出版社,1992.  
ZHAO D Z, ZHANG H Y. *Spatial Light Modulator* [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1992. (in Chinese)
- [2] SATO K, TAKANO K. New type of electroholographic display system using LCDs[C]. *Proc SPIE* 4864, *Three-Dimensional TV, Video, and Display*, 2002, 4864: 114-121.
- [3] 蔡冬梅,薛丽霞,凌宁,等. 液晶空间光调制器相位调制特性研究[J]. *光电工程*, 2007, 34(11): 19-23.  
CAI D M, XUE L X, LING N, *et al.*. Characteristics of phase only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(11): 19-23. (in Chinese)
- [4] KUANG Z, PERRIE W, LEACH J, *et al.*. High throughput diffractive multi-beam femtosecond laser processing using a spatial light modulator[J]. *Applied Surface Science*, 2008, 255(5): 2284-2289.
- [5] 曾震湘,郑华东,卢小仟,等. 空间光调制器曲面拼接实现全息三维显示视角拓展[J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 227-233.  
ZENG ZH X, ZHENG H D, LU X Q, *et al.*. Viewing angle enlargement in holographic 3D display by spatial light modulators tiling in curved configuration[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 227-233. (in Chinese)
- [6] 刘洪顺,王喆,胡琪,等. 基于空间光调制器的层析成像技术[J]. *中国光学*, 2019, 12(6): 1338-1347.  
LIU H SH, WANG ZH, HU Q, *et al.*. Tomography technology based on spatial light modulator [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1338-1347. (in Chinese)
- [7] WEINER A M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(5): 1929-1960.
- [8] SINCLAIR G, LEACH J, JORDAN P, *et al.*. Interactive application in holographic optical tweezers of a multi-plane Gerchberg-Saxton algorithm for three-dimensional light shaping [J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1665-1670.
- [9] ARINES J, DURÁN V, JAROSZEWICZ Z, *et al.*. Measurement and compensation of optical aberrations using a single spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15287-15292.
- [10] LI C, XIA M L, MU Q Q, *et al.*. High-precision open-loop adaptive optics system based on LC-SLM[J]. *Optics Express*, 2009, 17(13): 10774-10781.
- [11] 白雪莲. 液晶电视用于计算全息非球面测试技术的研究[D]. 南京:南京理工大学,2004.  
BAI X L. *Study on The Measurement Technology of CGH Aspheric Surface with LCD TV* [D]. Nanjing: Nanjing University of technology, 2004. (in Chinese)
- [12] 席庆奎. 实时计算全息技术与误差理论分析研究[D]. 南京:南京理工大学,2007.  
XI Q K. *Research on the Error Theory and Application of the Real-time Computer-generated Holograms*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [13] 韩军,郑婷,聂亮,等. 基于空间光调制器的波面重建优化方法研究[J]. *光子学报*, 2011, 40(9): 1413-1418.  
HAN J, ZHENG T, NIE L, *et al.*. Optimization method of reconstruct wavefront based on spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(9): 1413-1418. (in Chinese)
- [14] 郑婷. 基于 SLM 的 CGH 非球面检测技术研究[D]. 西安:西安工业大学,2012.  
ZHENG T. *Research on CGH Aspheric Testing Technology Based on SLM* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012. (in Chinese)
- [15] 张瑾. 基于 SLM 的标准波面重建算法研究[D]. 西安:西安工业大学,2010.  
ZHANG J. *Research of Standard Wavefront Reconstruction Algorithm Based on Spatial Light Modulator*[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2010. (in Chinese)
- [16] 周昊. 基于液晶空间光调制器计算全息检测非球面方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.  
ZHOU H. *A Method for Testing Aspheric Surface Using Computer Generated Hologram Based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator* [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [17] XUE S, CHEN S Y, TIE G P, *et al.*. Adaptive null interferometric test using spatial light modulator for free-form surfaces[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8414-8428.

- [18] MA X, LIU S, ZHANG Z, *et al.*. Error analysis of standard wave-front reconstruction based on spatial light modulator [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2016, 155: 101553M.
- [19] LIU S J, XU L B, MA X, *et al.*. Study on measurement accuracy of active optics null test systems based on liquid crystal spatial light modulator and laser interferometer [C]. *SPIE Optical Metrology. Proc SPIE 10329, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X, Munich, Germany*, 2017, 1032: 103290A.
- [20] 马啸, 刘世杰, 张志刚, 等. 空间光调制器像素尺寸对非球面检测误差影响分析 [J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 214-220.
- MA X, LIU SH J, ZHANG ZH G, *et al.*. Impact of spatial light modulator pixel pitch on the accuracy of aspheric testing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 214-220. (in Chinese)
- [21] VOELZ D G. *Computational Fourier Optics* [M]. Bellingham: SPIE, 2011: 63-82.

#### 作者简介:



肖昭贤(1993—),男,四川达州人,硕士,助理工程师,2015年于重庆大学获得学士学位,2018年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事动态零位干涉测量及结构设计方面的研究。E-mail: 412xiaozx@caep.cn