

液晶空间光调制器的波前模拟及波前校正

柯熙政, 韩柯娜*

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 设计并搭建了一种基于复合型液晶空间光调制器(LC-SLM)的自适应光学原理校正系统,其中一个空间光调制器用于波前模拟,另一个用于波前校正。利用 Zygo 干涉仪对畸变波前进行了检测,通过程序计算获得了畸变波前的共轭波前,产生了相应的灰度图,将其加载到 LC-SLM 以进行畸变波前补偿,实现了静态波前校正。计算得到的斯特列尔比由校正前的 0.3795 增大到 0.8268,环围灰度平均值由校正前的 382.75 增大到 1164.5,光斑亮度聚集情况明显改善。相比纯相位空间光调制器,复合型空间光调制器节约了成本,适合实验室批量使用。

关键词 激光光学; 液晶空间光调制器; 波前模拟; 波前校正; 波前共轭; 相位屏

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.051403

Wavefront Simulation and Wavefront Correction of Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Ke Xizheng, Han Kena*

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract A kind of adaptive optical principle correction system based on compound liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM) is designed and built. One spatial light modulator is used for wavefront simulation and the other for wavefront correction. The Zygo interferometer is used to detect the distorted wavefront. The conjugate wavefront of the distorted wavefront is obtained by the program calculation, and the corresponding gray image is generated, which is loaded into the LC-SLM to compensate the distortion wavefront, and the static wavefront correction is realized. The calculated Strehl-ratio increases from 0.3795 before correction to 0.8268, and the mean value of the ring girth gray increases from 382.75 before correction to 1164.5, and the luminance aggregation of the spot is obviously improved. Compared with the pure phase space light modulator, the composite space light modulator saves costs and is suitable for laboratory batch use.

Key words laser optics; liquid crystal spatial light modulator; wavefront simulation; wavefront correction; wavefront conjugation; phase screen

OCIS codes 140.3535; 140.5960

1 引言

空间激光通信系统中的光束由于受到大气湍流的影响而引起接收端光束波前畸变,影响光通信的质量,目前普遍采用自适应光学技术^[1-2]对光束进行校正。大气扰动是自适应光学的主要校正对象^[3],其核心器件——波前校正器变形镜,由于价格昂贵、制造技术复杂、驱动器行程有限等,应用范围受到限制^[4-6]。液晶空间光调制器(LC-SLM)作为动态衍

射光学器件,具有成本低、功耗低、分辨率高、每个像素单元可独立编程控制等特点^[7],其中纯相位空间光调制器使用最为广泛。

LC-SLM 在自适应光学技术、激光光束整形、全息三维显示及光学测量等领域均有很大的应用前景^[8]。姜文汉^[9]应用自适用光学技术来实现光束波前畸变校正, Hu 等^[10]将液晶相位调制器应用于光学成像系统和大气湍流模拟等研究中,并利用 LC-SLM 进行相位调制再现球面计算全息图的

收稿日期: 2018-08-29; 修回日期: 2018-09-10; 录用日期: 2018-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(61377080, 60977054)

* E-mail: 437054926@qq.com

实验来研究光学检测^[11]。McGlamery^[12]采用两个512×512相位型LC-SLM组成波前控制系统,对光波的波前误差进行了复现和精确控制。上述实验均采用纯相位空间光调制器,价格较为昂贵,复合型空间光调制器作为振幅和相位均可编码的器件,在自适应光学中采用较少,导致其使用方法及实验内容不足,使得复合型空间光调制器的应用受到限制。

本文对复合型LC-SLM作为波前校正器和波前发生器进行畸变波前的模拟和校正的实验研究,采用波前相位共轭等理论和实验相结合的研究方法,探究了复合型LC-SLM用于波前模拟及波前校正的使用及性能,旨在为复合型空间光调制器在自适应光学技术中的研究提供实验依据。

2 实验原理

2.1 波前模拟原理

LC-SLM用于波前模拟的实现过程如下:将制作的相位屏灰度图加载到LC-SLM上,其灰度图像中含有模拟波像差所需要的相位信息,控制LC-SLM使其对光波波前进行调制,用于实现LC-SLM对波前模拟的探究。

LC-SLM分为反射型和透射型。本文实验采用反射型,结构如图1所示,主要由覆盖玻璃、透明电极、向列型液晶、阵列电极等组成^[13]。

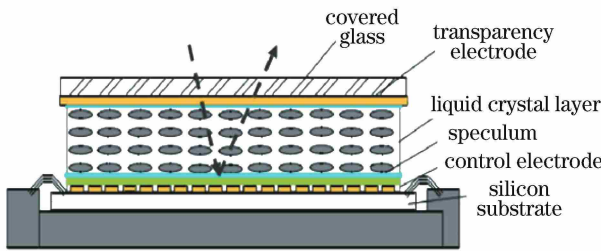


图1 反射型LC-SLM结构

Fig. 1 Structure of reflective LC-SLM

在LC-SLM中,设液晶分子长轴方向平行于基板轴方向且非寻常折射率为 n_e ,垂直长轴方向的寻常折射率为 n_o ,沿 z 轴方向入射的线偏振光在外电场的作用下,使得液晶分子沿着电场方向偏转,这时液晶分子的等效折射率 n_{eff} 可以表示为

$$n_{eff} = n_o n_e / \sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}, \quad (1)$$

(1)式取决于液晶分子长轴和 x 轴的夹角 θ 。

波长为 λ 的线偏振光通过厚度为 d 的液晶层后,产生的相位差 ψ 可以表示为

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{-d/2}^{d/2} [n_{eff}(\theta) - n_o] dz, \quad (2)$$

可以看出,通过改变电场的分布就可以控制出射光波的相位差,从而对光波的相位进行调制^[14]。

LC-SLM采用256阶的灰度图像来控制液晶分子的驱动电压,因此对相位屏进行灰度处理,使其成为与LC-SLM具有同等分辨率的灰度图像,加载到LC-SLM上对光波进行控制。具体实现示意图及实验光路设计图如图2所示,采用CCD相机进行光斑采集。

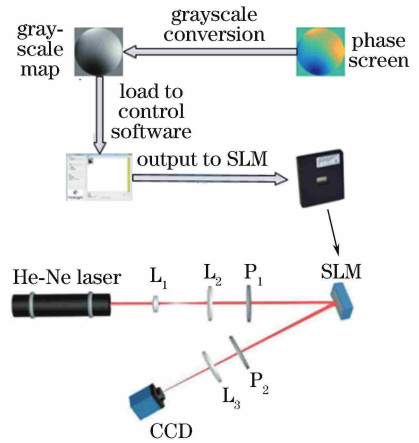


图2 LC-SLM灰度图加载及波前模拟示意图

Fig. 2 LC-SLM grayscale image loading and wavefront simulation diagram

2.2 波前校正原理

基于光学相位共轭原理,利用空间光调制器进行静态波前校正。根据波前共轭原理,光波在传输过程中产生的畸变波前可通过对接收波的复振幅取共轭的方式进行补偿。假设接收波的复振幅的表达式为

$$\psi(r, t) = |\psi(r, t)| \exp [i\phi(r, t)], \quad (3)$$

式中 $|\psi(r, t)|$ 和 $\phi(r, t)$ 分别为接收波的振幅和相位, $r = \{x, y\}$ 是垂直于光波传播方向内的位置矢量, r 为大小, t 为时间。波前共轭校正原理为使发射波的复振幅变为

$$\begin{aligned} A(r, t) &= \alpha \psi^*(r, t) = \\ &= \alpha |\psi(r, t)| \exp [-i\phi(r, t)] = \\ &= |A(r, t)| \exp [iu(r, t)], \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $|A(r, t)|$ 和 $u(r, t)$ 分别为校正后发射光波的振幅和相位, α 为实系数。因此波前共轭条件包含相位共轭 $u(r, t) = -\phi(r, t)$ 和振幅调制 $|A(r, t)| = \alpha |\psi(r, t)|$ ^[15]。

假设光波沿着 z 轴方向传播,则波前共轭原理示意图如图3所示。

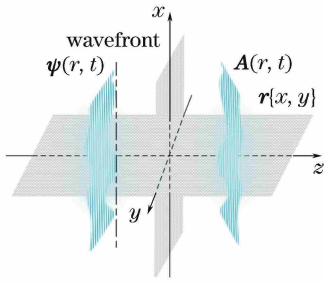


图3 波前共轭原理图

Fig. 3 Schematic of wavefront conjugation

采用波前相位共轭原理,利用 Zygo 干涉仪将畸变波前相位用泽尼克多项式系数的形式给出,将畸变波前相位表示为 $\phi(m, n)$, m, n 表示泽尼克阶数,计算获得畸变波前的共轭波前 $-\phi(m, n)$,再通过程序转换生成灰度图,加载到空间光调制器上对畸变波前进行校正。

3 仿真实验及评价指标

3.1 仿真实验

综合上述实验原理,对整个实验过程进行仿真分析。所采用的激光波长为 632.8 nm,束腰半径为 5 mm,产生的畸变光斑以及校正后的光斑三维立体图和二维灰度图如图 4 所示。

从图4可以看出,校正前光斑畸变严重,光强损

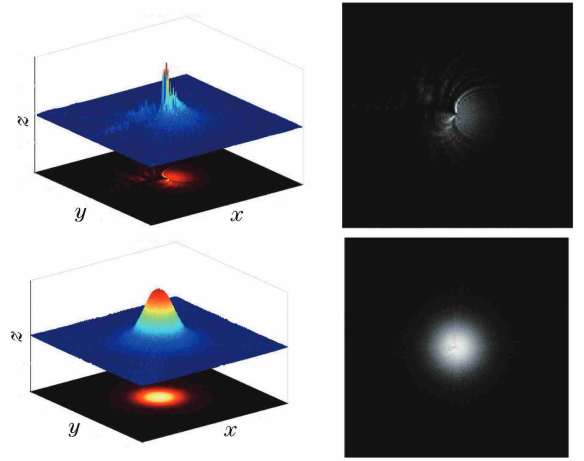


图4 畸变光斑及校正光斑仿真。畸变光斑(a)三维图和(b)二维灰度图;校正光斑(c)三维图和(d)二维灰度图
Fig. 4 Distorted and corrected spot simulation. (a) Three-dimensional image and (b) two-dimensional grayscale image of distorted spot; (c) three-dimensional image and (d) two-dimensional grayscale image of corrected spot

失较大,光斑形状也发生较大扭曲;经过校正后,光斑光强更加会聚,形状也恢复得较好。

仿真实验所用原理校正示意图如图 5 所示,其中, $u = E(x, y, z)$ 为初始光波电场表达式, $-\phi(m, n)$ 为畸变波前相位, $\phi(m, n)$ 为共轭波前相位。

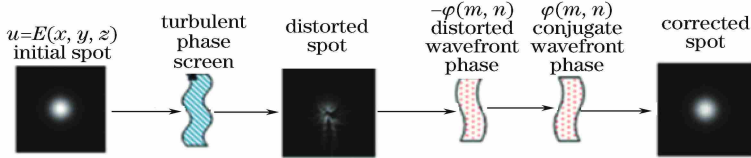


图5 利用波前共轭原理的静态波前校正原理图

Fig. 5 Schematic of static wavefront correction using wavefront conjugation

3.2 评价指标

不论成像系统还是激光发射系统,斯特列尔比都与具体应用中的性能评价标准相一致,因此斯特列尔比常被用作自适应光学领域通用的性能评价标准^[16]。斯特列尔比的定义为

$$S_{SR} = \frac{I(x_0, y_0)}{I_0(x_0, y_0)}, \quad (5)$$

式中 $I(x_0, y_0)$ 为畸变波前远场光斑峰值强度, $I_0(x_0, y_0)$ 为理想波面远场光斑峰值强度。

此外,选用像清晰度评价函数 S_1 作为评价指标,进一步评价系统的性能指标。具体定义为^[17]

$$S_1 = \iint I^2(x, y) dx dy, \quad (6)$$

式中 $I(x, y)$ 为畸变波前远场光斑光强分布。

斯特列尔比越接近于 1,说明光斑的实际校正结果越好;像清晰度评价函数 S_1 反映了成像面上光斑亮度的聚集程度,其值越大表示光斑亮度越集中,光斑效果越好。

像清晰度评价函数从定义上表示为空间坐标的连续积分,在实际的使用中需要进一步离散化处理,表示为

$$S_1 = \iint I^2(x, y) dx dy = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij}, \quad (7)$$

式中 I_{ij} 是图像矩阵第 i 行第 j 列的灰度取值, $M \times N$ 为所选图像区域大小。

对仿真结果进行分析可知,斯特列尔比由校正前的 0.3116 增加到 0.8910,提升较明显;所选光斑区域大小为 30×30 ,以环围灰度平均值^[18]作

为评价函数 S_1 的量化指标,经过计算,环围灰度平均值由校正前的 213.09 增加到 1472.5。理论分析表明,通过校正光斑,亮度聚集情况得到了明显改善。

4 实验及结果分析

4.1 SLM 规格及相位调制

采用波长为 632.8 nm 的激光光源,利用两个反射型空间光调制器分别进行波前模拟及波前校正实验,实验所使用的是北京杏林睿光科技有限公司生产的反射型空间光调制器(RL-SLM-R2),参数如表 1 所示。

表 1 空间光调制器器件参数

Table 1 Device parameters of spatial light modulator

Item	Key specifications	Parameter
	Array size	0.78
	Pixel pitch / μm	12.3
	Resolution / (pixel \times pixel)	1280 \times 1024
RL-SLM-	Fill factor /%	90
R2	Reflectivity /%	>70
	Bit depth /bit	8
	Frame rate /Hz	60
	Operating wavelength /nm	400-700
	Target damage threshold /($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	2
	Phase / retardance range @ 532 nm	0-2 π

本文采用复合型空间光调制器,具有相位调制模式和振幅调制模式^[19],由于波前模拟和波前校正要使空间光调制器处于相位调制模式,所以在进行实验之前要将空间光调制器控制在相位调制模式下。实验光路如图 6 所示。

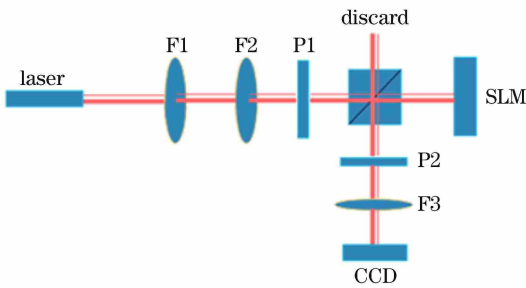


图 6 空间光调制器的相位调制实验光路

Fig. 6 Optical path diagram of phase modulation experiment of SLM

采用 He-Ne 激光器,激光经透镜 F1 和 F2 扩束准直后,进入分光棱镜分束,一束丢弃,一束到达 SLM 再反射回来,再经过透镜 F3 进入 CCD 进行光束采集。

利用 MATLAB 编程,计算图像 A[图 7(a)]的

相位信息并生成灰度图[图 7(b)],加载到 SLM 上,调节起偏器和检偏器,直到 CCD 采集到清晰的图像[图 7(c)],说明此时 SLM 处于相位调制模式。

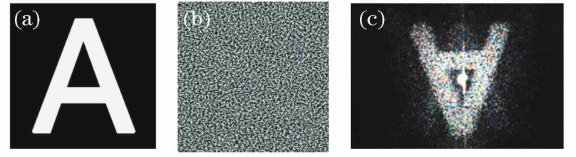


图 7 空间光调制器的相位调制实验过程。(a)图像 A; (b)图像 A 的相位图;(c) CCD 采集的经 SLM 调制的图像

Fig. 7 Phase modulation experimental process of SLM. (a) Image A; (b) phase diagram of image A; (c) SLM modulated image collected by CCD

4.2 实验光路的设计与搭建

在实验中,LC-SLM1 用于加载相位屏产生大气湍流,模拟畸变波前;LC-SLM2 用于加载共轭波前信息进行波前校正。具体光路图设计如图 8 所示。

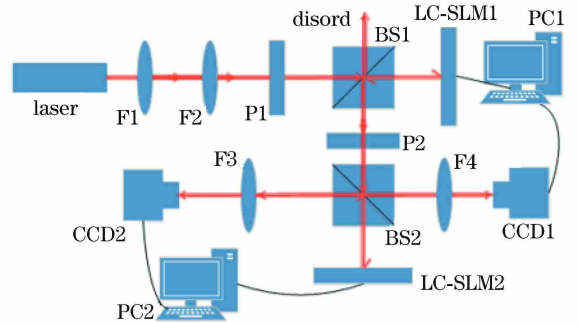


图 8 LC-SLM 用于波前模拟和波前校正的实验光路

Fig. 8 Experimental optical path for wavefront simulation and wavefront correction by LC-SLM

具体实验过程如下:首先激光光源经过 F1 和 F2 扩束准直,出射光为平行光,然后经起偏器 P1,通过分光棱镜 BS1 分为两束,一束丢弃,另一束进入加载有相位屏的 LC-SLM1,被调制后波前产生畸变;经检偏器 P2,再通过分光棱镜 BS2 分为两束,一束进入 CCD1 采集畸变光斑,另一束通过 LC-SLM2 校正畸变波前,最后通过 CCD2 采集校正后的光斑。

实际搭建的光路中为了方便操作使用了一台 CCD 来记录畸变光斑以及校正后光斑的采集情况,并加入了衰减片、光阑等辅助器件。

4.3 LC-SLM 用于波前模拟

实验中采用 LC-SLM1 加载相位屏来模拟静态大气湍流,从而产生畸变波前。LC-SLM 所加载的 15 阶泽尼克相位屏灰度图和用干涉仪所测得的畸

变波前波面图如图 9 所示,测得模拟的波前相位峰谷(PV)值为 1.0103λ (λ 为波长),对比干涉仪测得的 LC-SLM 实际波像差和泽尼克多项式生成的波前相位可知,LC-SLM 能够产生连续光滑的波像差,可以较好地实现波前模拟。

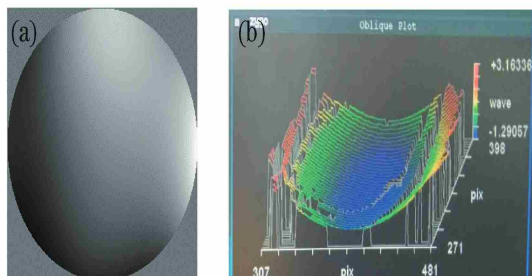


图 9 波前模拟所用的相位屏以及畸变波形图。

(a) 15 阶泽尼克相位屏灰度图;(b)畸变波前三维波面图
Fig. 9 Phase screen and distortion waveform for wavefront simulation. (a) 15th order Zernike phase screen grayscale image; (b) three-dimensional wavefront map of distorted wavefront

本文利用 LC-SLM 厂家提供的干涉法,在光源波长为 632.8 nm、上述实验环境情况不变的情况下,测得 LC-SLM 的最大调制相位范围为 2.4π ,所使用的 LC-SLM 工作波长为 400~700 nm,一般来说,LC-SLM 相位调制范围在短波长范围时会增加,

在长波长范围时相位调制能力会变差。

4.4 LC-SLM 用于波前校正

实验中采用 LC-SLM2 进行波前校正,利用干涉仪测得畸变波前的泽尼克系数,由于空间光调制器通过灰度图对光波进行调制,故将测得的波前数据转化为相应的校正灰度图,再加载到空间光调制器上进行校正,具体实现过程如下:根据被测畸变波前的相位信息,计算泽尼克多项式的系数,取不同级次的泽尼克多项式进行线性组合,即可重构出畸变波前。求出畸变波前的共轭波前,通过程序生成相应的灰度图加载到 LC-SLM 上,即可实现对畸变波前的校正。

实验中利用 CCD 采集畸变光斑及校正后的光斑图,并进行对比分析,光源的初始光斑及校正前后的光斑图如图 10 所示。

对比校正前后的光斑可以看出,经过相位屏调制后的光斑波前产生畸变,从而导致光斑不完整,验证了利用空间光调制器加载相位屏对波前进行模拟的可行性;经过校正的光斑亮度虽有部分变化,但是总体趋向完整,校正效果较好。经过分析计算,斯特列尔比也由校正前的 0.3795 增加到 0.8268,得到了明显改善;同样选取光斑区域大小为 30×30 ,求得环围灰度平均值由校正前的 382.75 增加到 1164.5,光斑亮度聚集情况得到明显改善,和仿真实验数据结果相近,与理论分析相符合,校正效果较好。



图 10 CCD 采集的光斑图。(a)初始光斑;(b)畸变光斑;(c)校正后的光斑

Fig. 10 Spot pattern collected by CCD. (a) Initial spot; (b) distorted spot; (c) corrected spot

5 结 论

利用复合型空间光调制器进行波前模拟及波前校正的研究,从理论分析、仿真和实验方面分别进行了对比分析研究,利用相位屏加载实现了波前模拟,该方法同时也可用于透射式空间光调制器;采用光学共轭原理实现了波前校正,校正效果较好,与理论相符合。充分利用了空间光调制器校正单元多的特点,复合型空间光调制器相比纯相位空间光调制器大大节约了实验成本,且实验效果较好。由于实验条件的限制,本次实验还有可以提升的地方。随着

液晶器件的发展,自适用光学中的空间光调制器将会更加满足作为波前模拟及波前校正的要求。

参 考 文 献

- [1] Restaino R, Andrews R, Martinez T, *et al.* Adaptive optics using MEMS and liquid crystal devices[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, 10(6): 064006.
- [2] Farrell T C. Fast simulation of Strehl loss due to phase aberration for the sizing of adaptive optics in laser communications system design [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(1): 64-70.

- [3] Jiang W H. Overview of adaptive optics development [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170489.
姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. *光电工程*, 2018, 45(3): 170489.
- [4] Cheng T, Liu W J, Yang K J, *et al.* Decoupling control algorithm based on Laplacian eigenfunction for Woofer-Tweeter adaptive optics system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0905003.
程涛, 刘文劲, 杨康健, 等. 基于拉普拉斯本征函数的 Woofer-Tweeter 自适应光学系统解耦控制算法[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0905003.
- [5] Dou R S, Giles M K. Closed-loop adaptive-optics system with a liquid-crystal television as a phase retarder [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(14): 1583-1585.
- [6] Kirsch J C. Modulation characteristics of the Epson liquid crystal television [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(5): 963-970.
- [7] Yao K N, Wang J L, Liu X Y, *et al.* Closed-loop adaptive optics system with a single liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 17216-17226.
- [8] Zhang H X, Zhang J, Qiao Y J, *et al.* Wavefront generation and error compensation of liquid crystal spatial light modulator [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(5): 838-842.
张洪鑫, 张健, 乔玉晶, 等. 液晶空间光调制器波前模拟及误差补偿[J]. *光电子 • 激光*, 2013, 24(5): 838-842.
- [9] Jiang W H. Adapted optical technology [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, 28(1): 7-13.
姜文汉. 自适应光学技术[J]. *自然杂志*, 2006, 28(1): 7-13.
- [10] Hu L F, Xuan L, Liu Y J, *et al.* Phase-only liquid crystal spatial light modulator for wavefront correction with high precision [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6403-6409.
- [11] McKnight D J, Johnson K M, Serati R A. 256×256 liquid-crystal-on-silicon spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(14): 2775-2784.
- [12] McGlamery B L. Restoration of turbulence-degraded images [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(3): 293-297.
- [13] Zhang H X. Study on testing method of phase liquid crystal spatial light modulator and wavefront correction [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 18-22.
张洪鑫. 相位型液晶空间光调制器特性测试方法及波前校正研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 18-22.
- [14] Li X Z, Han C S, Wen M, *et al.* Research on wavefront distortion compensation based on liquid crystal space light modulator [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(2): 187-191.
李祥之, 韩诚山, 文明, 等. 基于液晶空间光调制器的波前畸变补偿研究[J]. *激光与红外*, 2011, 41(2): 187-191.
- [15] Jin D H. Research on wavefront correction based on stochastic parallel gradient descent algorithm [D]. Changsha: University of National Defense Science and Technology, 2006: 3-4.
靳冬欢. 基于随机并行梯度下降算法的波前校正技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006: 3-4.
- [16] Vorontsov M A, Carhart G W, Cohen M, *et al.* Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, 17(8): 1440-1453.
- [17] Zhou R Z, Yan J X, Yu X, *et al.* Adaptive optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996: 15-17.
周仁忠, 闫吉祥, 俞信, 等. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 15-17.
- [18] Wu J L, Ke X Z. Adaptive optics correction of wavefront sensorless [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030103.
吴加丽, 柯熙政. 无波前传感器的自适应光学校正[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030103.
- [19] Cheng Y, Huang D J, Fan W. Beam shaping capability of amplitude spatial light modulator by electrical addressing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0405001.
程煜, 黄大杰, 范薇. 电寻址振幅型空间光调制器的光束整形能力[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0405001.