

文章编号:1007-2780(2018)11-0911-07

温度对液晶波前校正器响应速度及 LUT 的影响研究

申 文^{1,2}, 马文超^{1,2}, 胡栋挺^{1,2}, 刘新宇^{1,2}, 苏宙平^{1,2}, 朱华新^{1,2}, 张秀梅^{1,2},
阙立志^{1,2}, 朱卓伟^{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:温度起伏会对液晶器件的相位调制特性、响应速度有影响,从而影响到自适应光学系统中的液晶波前校正器的相位调制精度。针对该问题,本文研究了温度对 512×512 像素的硅基液晶波前校正器(LCOS)的 LUT(look-up table)的影响,正是由于 LUT 的变化导致其相位调制特性不同;实验测量了不同温度下 LCOS 的时间和相位响应特性,由此计算了对应的 LUT,利用最小二乘拟合方法对得到的数据进行拟合,给出了 $16 \sim 26^\circ\text{C}$ 范围内的关系式,利用此关系式可以获得该温度范围内不同温度下合理的 LUT。我们在 LCOS 上施加闪耀光栅灰度图后,对不同 LUT 下入射光束的衍射效率分别进行测量,结果表明我们利用关系式内对应温度下的 LUT 取代 LCOS 中固定值的 LUT 方法可以克服温度的起伏带来的影响,提高 LCOS 的相位调制能力。本方法对于液晶器件在自适应光学、显示等领域的应用也有帮助。

关键词:液晶波前校正器;相位调制;自适应光学

中图分类号: O753⁺.2; O439 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/YJYXS20183311.0911

Effect of temperature on LUT and response speed of liquid crystal wavefront corrector

SHEN Wen, MA Wen-chao, HU Dong-ting, LIU Xin-yu, SU Zhou-ping, ZHU Hua-xin,
ZHANG Xiu-mei, QUE Li-zhi, ZHU Zhuo-wei, ZHANG Yi-xin, CHEN Guo-qing, HU Li-fa*

(1. School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic
Engineering and Technology, Wuxi 214122, China)

Abstract: The temperature variation can affect the phase modulation characteristics and response speed of the liquid crystal wavefront corrector of adaptive optics, thereby affect its phase modulation accuracy. To solve this problem, the influence of temperature on the LUT (look-up table) of a 512×512 pixel silicon-based liquid crystal wavefront corrector (LCOS) was measured experimentally and analyzed. It is due to the change of the LUT induced by temperature that changed the phase modulation

收稿日期:2018-06-28;修订日期:2018-08-14.

基金项目:国家自然科学基金(No.61475152)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61475152)

* 通信联系人, E-mail: hulfifa@ciomp.ac.cn

characteristics of the LCOS. The experimental measurements of temporal and phase response of the LCOS were conducted at different temperatures. And the corresponding LUTs were calculated. We used the method of least squares fitting to fit the obtained results and obtained an expression for LUTs in the range of 16 to 26 °C. As a result, we can get a reasonable LUT at arbitrary temperature ranged from temperature range. We use the blazed grating generated by liquid crystal to verify the diffraction efficiency of the incident beam. The results indicate that our method can overcome the effects of temperature variations and improve the phase modulation capability of the LCOS by using the LUT at the corresponding temperature instead of a fixed one. Our results are valuable for fields, such as liquid crystal adaptive optics, display and so on.

Key words: liquid crystal spatial light modulator; phase modulation; adaptive optics

1 引言

液晶能够实现对入射光的振幅、相位和偏振态的控制,越来越广泛地应用于非显示领域,例如,波前校正(Wavefront correction)、光学相控阵中光束指向(Beam steering)、激光光束整形(Laser beam shaping)、产生涡旋光束、显微镜中产生结构光、光镊中用来产生空心光束、光学元件面形测量^[1-3]等等。液晶以其相位调制准确、可编程控制、无机械运动和结构紧凑的优点,引起了人们的高度重视^[4],在光学领域表现出良好的应用前景^[5-6]。特别是在自适应光学领域,液晶波前校正器是基于一种反射式的硅基液晶(Liquid crystal on silicon, LCOS),与传统的变形镜相比,它突出的优点是像素密度高、相位调制精度高。

在自适应光学应用中,一天内不同时间段、甚至不同季节进行实验时,不可避免存在环境温度的起伏;如果在外场进行实验,温度起伏会更剧烈。将安装了 LCOS 的自适应光学系统置于库德(Coude)房内,可以适当地降低温度的波动,但仍然存在室温附近小范围内的起伏可能。然而液晶材料对温度的影响比较敏感,温度的起伏会导致其响应速度、相位调制深度、特别是查找表(Look-up table, LUT)发生变化,从而影响 LCOS 的相位调制精度等电光特性,而这些特性对于 LCOS 的应用非常关键。另一方面,商用的 LCOS 一般没有控温装置,而 Meadowlark 公司的 LCOS 也只有加温装置,防止温度过低;同时,商业 LCOS 的 LUT 在出厂时是某一室温和波长下设置好,实验时一般没有改变。由此可见,一般的 LCOS 不具备克服温度起伏的能力,有必要针

对该问题进行研究。

温度的变化会影响液晶材料和器件的特性^[7-8]。2004 年 Li 等人对液晶材料的折射率随温度变化的特性进行了研究,并建立了四参数的数学模型^[9]。2010 年 Lin 等人测量了不同温度下液晶材料的阈值电压的变化情况^[10]。2013 年 Hong 等人测量了垂直取向的 LCOS 在不同温度下的电光特性,给出了在 30~70 °C 范围内 LCOS 响应时间的测量结果^[11]。2016 年, Kim 提出了与温度有关特性的电路模型^[12],利用该模型可以预测液晶显示器件在任意温度下的光学响应特性。同年, Zhang 等人利用升高温度来提高 LCOS 的响应时间特性^[13]。

从已有的研究可见,人们对液晶的温度依赖性已经有了广泛的研究,但对于克服该问题的方法研究的较少。因此,我们对 LCOS 的 LUT 温度特性进行详细研究,通过实验测量和数据分析,找出其在室温附近一定温度范围内 LUT 的变化规律。在此基础上,可以根据 LCOS 环境温度的变化来给出合理的 LUT,补偿温度起伏导致 LUT 的变化,从而提高其波前校正精度。

2 相位调制与时间响应测试

在对 LCOS 的测量中,一般采用干涉仪对液晶波前校正器的相位调制特性进行测量,但干涉条纹受室内气流干扰明显,因此,本文采用偏振光干涉法来进行测量^[14],其中激光光束直径小,受室内湍流影响小。测量液晶的时间响应和相位延迟特性时,所采用的实验光路如图 1 所示,光源采用 635 nm 半导体激光器,激光光束透过偏振片 P1 变成光矢量沿偏振片透光轴方向振动的线偏

振光,经分光镜(BS)分光后一路光进入 LCOS,经过调制后其反射光再次经过 BS,透射光经过偏振片 P2 后,o 光和 e 光发生干涉,利用小孔光阑 Pd 滤除其他表面反射的杂光,并利用衰减片 F 进行光强衰减后,用光电探测器(Kight sensitive detector)接收,并将光强信号输出给示波器(Oscilloscope),示波器型号为 SIGLENT SDS1102CNL,采样频率 100 MHz。由于本实验中的 LCOS 为纯相位调制型,为了保证它的电光响应测量的准确,两个偏振片的偏振方向和液晶取向角度关系如图 1 中的插图所示,偏振片 P1 与 LCOS 成 45° ,且 P1 和 P2 成 90° 。

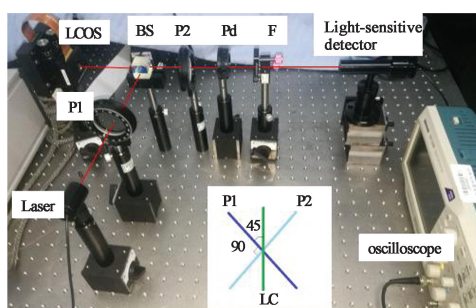


图 1 偏振干涉法光路。P1,P2:偏振片的偏振方向; LC:液晶的取向。

Fig.1 Polarization interferometry optical layout. P1, P2: the polarization direction of polarizer; LC: the alignment direction of liquid crystal molecular.

如图 1 中所示,当振片 P1 和 P2 相互正交,且均与液晶 SLMCLSLM 的光轴成 45° 角时,根据偏振光学的原理,光强由 o 光和 e 光的相位差表示,可表示为:

$$I = I_{\max} \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right), \quad (1)$$

其中, δ 表示位相差, I 表示光强, $I_{\max}$ 表示最大光强值。由公式(1)可得:

$$\delta = 2 \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_{\max}}}, \quad (2)$$

考虑到背景杂光干扰,以及起偏角和检偏角无法精确满足度等情况及一些误差,我们在结果中对光强采取归一化处理:

$$\eta = \frac{I_1 - I_{\text{bac}}}{I_0 - I_{\text{bac}}} \times 100\%, \quad I_{\text{norm}} = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3)$$

其中: I_{norm} 为归一化光强, I_{bac} 为背景光强。因

而可以通过实验测的光强 I ,从而得到相位的变化曲线 δ 。在 LCOS 上施加不同的灰度图,从而改变液晶调制器中液晶层上的电压,对入射光的相位进行调制。记录液晶在不同温度、不同灰度间的响应数据,并进行处理,从而得到不同温度下 LCOS 的相位、响应速度等特性。温度的调控通过对环境温度进行适当的温控来完成,温度的测量误差小于 0.5°C ,为了保证测量的精度,我们在每一环境温度下都进行了 3 次重复测量。

3 结果与分析

3.1 温度对液晶波前校正器响应时间的影响

利用图 1 的光路进行 LCOS 的响应时间测量。LCOS 的驱动信号如图 2 中实线所示,给 LCOS 交替施加 0 和 255 两个单一灰度值的 512×512 像素的灰度图,且 0 灰度级代表低电平,255 灰度级代表高电平,每幅灰度图的施加持续时间为 40 ms,与 LCOS 响应时间相比足够长,因此,在 0~255 灰度和 255~0 灰度转换的时候,我们能测量得到上升和下降阶段的响应时间,如图 2 中 23°C 测得的曲线所示。

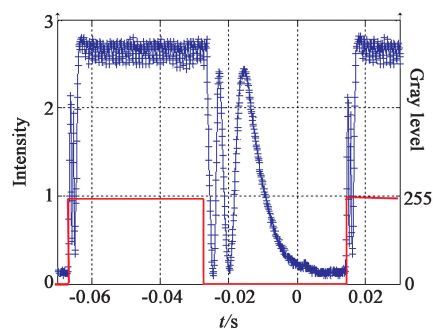


图 2 23°C 在灰度值为 0 和 255 切换时液晶调制的光强变化

Fig.2 Light intensity variation modulated by LC switched between 0 and 255 at 23°C

在自适应光学系统中,我们关注液晶波前校正器的响应时间,响应时间越长,系统的波前校正能力越差,因此,人们主要考虑较长的液晶下降时间,而不考虑相对很短的液晶上升时间。我们对 $16 \sim 30^\circ\text{C}$ 温度范围内不同温度下的 LCOS 的响应时间进行了测试。结果如图 3 所示。图 3 中横坐标是温度,纵坐标是液晶的下降时间。在实验中,我们每个温度下测了 3 组实验数据,对它们取

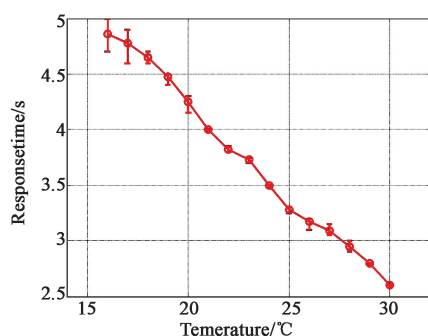


图3 不同温度下液晶波前校正器的平均响应时间

Fig.3 Average response time of liquid crystal wavefront correctors at different temperature

平均得到该温度下的响应时间,图3中用圆圈表示;每组实验的与平均值的偏离值在图中用幅度表示。从图3中可以看出,随着温度的升高,响应时间越来越短,响应时间从16℃的4.86 ms降低到了30℃时的2.60 ms,且响应时间随温度近似呈线性变化,该变化趋势与Huang等人的结果一致^[15]。

3.2 温度对液晶波前校正器相位调制量的影响

利用图1的光路进行相位调制特性测量时,与3.1中LCOS的驱动信号不同,依次对LCOS施加灰度值为0,1,2,...255的256幅灰度图,对应外加电压对液晶进行连续调制,每幅灰度图的保持时间为100 ms,与LCOS响应时间相比该时间足够长,以保证LCOS灰度响应到位。并且对在同一灰度下示波器测得的多个光强数据进行平均,以减少噪声的影响,进一步提高该灰度下光强响应测量精度。对每一个灰度内的光强数据取平均后,得到256个灰度值与相应的平均光强关系,如图4所示,横坐标是液晶校正器上施加的灰度图的灰度级,纵坐标是对应灰度下光强的平均值(average intensity)。再根据公式(2)和(3)得到灰度值与相位调制量的关系(以波长为单位),如图5所示,横坐标是液晶校正器上施加的灰度级,纵坐标是16℃时该灰度下对应的相位延迟,我们称之为相位调制量(D_p)。

对室温附近温度16~26℃范围内LCOS响应进行测试,得到每个温度下的调制量,如图6所示,横坐标是温度,纵坐标表示该温度下的相位调制量的3次测量结果的均值,结果表明随着温度的升高,相位调制量在下降,从16℃时的2.121降低到26℃时的1.921。

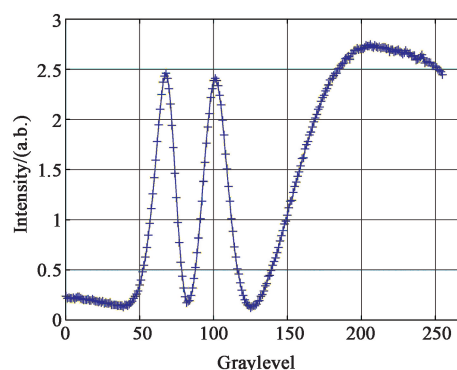


图4 液晶在不同灰度级下的光强响应

Fig.4 Intensity response of LC at different gray scale

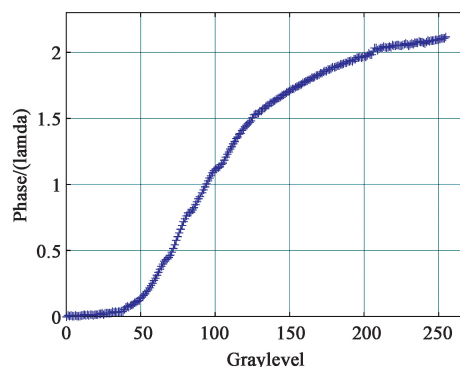


图5 灰度级与相位关系图

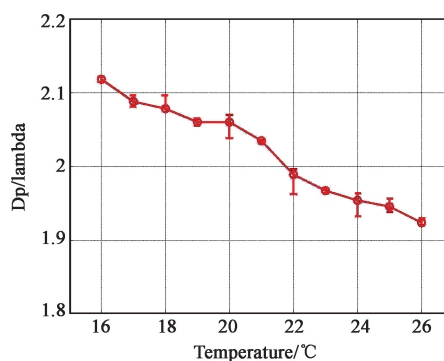
Fig.5 Phase retardation as a function of gray level
Intensity response of LC at different gray scale

图6 不同温度下液晶波前校正器的相位调制深度

Fig.6 Phase modulation depth of the liquid crystal wavefront corrector at different temperatures

3.3 不同温度下LCOS的LUT

对测量得到的数据进行处理,计算得到LCOS灰度与相位关系如图7所示。需要说明的是,1/32的最小相位调制步长满足波前校正的精

度,同时也为过压驱动数据处理减少计算时间,因此,取一个波长内的量化级次数目为 32,灰度 32 级及以上的用来进行过压驱动。由此,得到图 7 中 16 °C 下的 LCOS 的 LUT;其中横坐标是对应图片的灰度级,纵坐标是 LCOS 上实际施加的驱动的灰度值。从图 7 中看到,所得到的灰度级远大于 32,这是因为我们的 LCOS 在 635 nm 波长处有较大的相位调制深度,另外,超过 31 的灰度级都可以用做过压驱动。

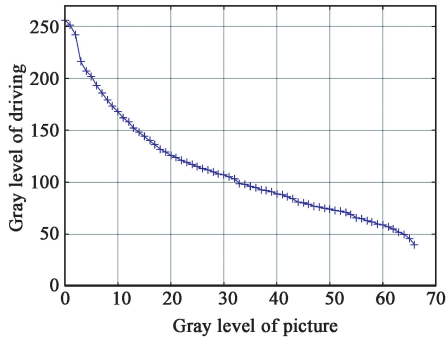


图 7 实际灰度图与量化级次

Fig.7 Actual grayscale and quantization levels

图 8 给出了温度 16~26 °C 范围内的 LUT, x 轴是 LCOS 上施加的图片的灰度级, y 轴是温度, z 轴是驱动 LUT 查表得到的 LCOS 内部实际施加的驱动灰度级。从图 8 可见,对两个温度下的 LUT 取相同的纵坐标,即 z 轴的灰度值都为 150 时,室温在 18 °C 时加载到 LCOS 上的灰度级为 13, 22 °C 时灰度级为 11, 实际精度应有 2 个灰度级次差别,如若两组实验使用同一温度下的 LUT 曲线载入实验,在一个波长范围内会有约 6% 的误差,如果实验温度差异更大,误差也会增大。从曲线趋势发现,不同温度下 LUT 的变化趋势类似,主要的差别出现在温度较高、灰度级大的地方。从前面的结果我们看出,不同的温度下相位调制量是有差异的,而且得到 LUT 也不尽相同。本实验通过最小二乘法,拟合不同温度下的 LUT 曲线,对其规律做进一步探究。我们通过最小二乘法曲面拟合方法得到如公式(4)给出的关系式,得出图 8 中的拟合曲面。

$$Z = Z_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 + A_4x^4 + A_5x^5 + B_1y + B_2y^2 + B_3y^3 + B_4y^4 + B_5y^5, \quad (4)$$

其中:图片的灰度级 x 范围是 $0 \leq x \leq 60$, 温度 y 的范围是 $16 \text{ °C} \leq y \leq 26 \text{ °C}$, 驱动的灰度级 z 的

范围是 $0 \leq Z \leq 255$, 且 $Z_0 = 8\ 028.220\ 85$, $A_1 = -15.406\ 3$, $A_2 = 0.737\ 56$, $A_3 = -0.020\ 41$, $A_4 = 2.838\ 92\text{E-}4$, $A_5 = -1.557\ 66\text{E-}6$, $B_1 = -1\ 839.406\ 36$, $B_2 = 172.840\ 44$, $B_3 = -8.054\ 92$, $B_4 = 0.186\ 23$, $B_5 = -0.001\ 71$ 。根据以上的公式,我们可以计算得到温度区间 $16 \text{ °C} \leq y \leq 26 \text{ °C}$ 内任一温度下的 LUT;需要指出的是,利用公式(4)得到的是实数,我们可以四舍五入得到整数的驱动的灰度级 Z ;再进一步,如果灰度级的数据 Z 有超过 255 的数据,则直接赋值 255,如果灰度级的数据 Z 有小于 0 的,则直接赋值为 0;最终得到 LUT 的灰度级数据。

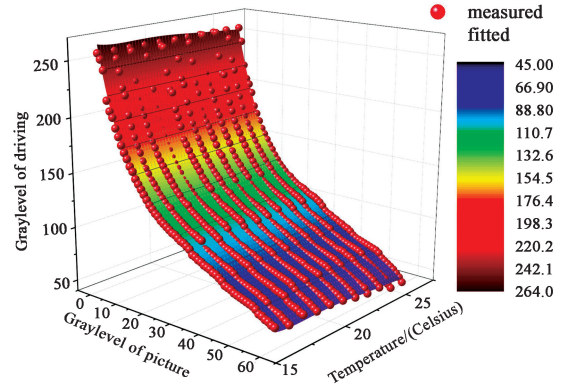


图 8 不同温度下的 LUT 测量值和拟合曲面

Fig.8 Measured and fitted results at different temperature

为了验证 LUT 的精确性对实验的影响,可以通过不同温度下,在 LCOS 上加载相同的闪耀光栅图案对入射光进行调制,然后通过测量一级衍射光的衍射效率;也可以通过在某一温度下,加载相同的闪耀光栅图案时,比较不同 LUT 的差别,越合理的 LUT,所对应的一级衍射光强越强;这两种验证方法实际上等效的,我们采用了后者;实验时,光路与图 1 不同之处在于,用 CCD 相机替代功率计,另外只用一个偏振片 P2,且调整 P2 的偏振方向到与 LCOS 中液晶取向相同。我们在 LCOS 上施加 30 个波长的灰度图,在相机上得到零级和一级的衍射光点,在相机上分别选择合理的区域,去背底噪音后求和,分别得到一级和零级的光强,将一级的光强除以零级和一级光强的总和定为衍射效率。实验是在室温 20 °C 时进行的,通过分别加载 16, 18, 20, 24 °C 的 LUT 时相机得到的衍射图像,计算出它们的衍射效率,并将衍射效率数据拟合,如图 9 所示。

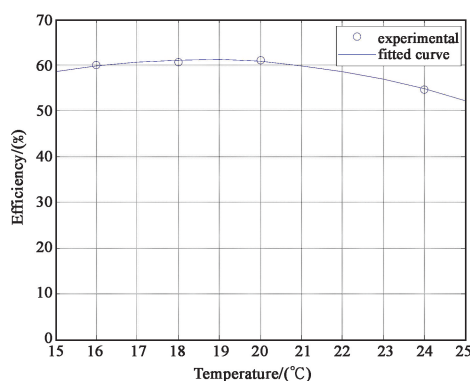


图9 在固定温度为 20 °C 下不同 LUT 的一级衍射效率对比

Fig. 9 Comparison of diffraction efficiency of different LUTs loaded at 20 °C

由图 9 可见,不同的 LUT 得到的衍射效率并不相同,只有与室温 20 °C 对应的 LUT 才具有最高的衍射效率。在 20 °C 时衍射效率最高为 61.1%,而我们实验也是在 20 °C 附近测量,所以在液晶的对应温度下采用对应的 LUT 衍射效率最高,当温度偏离 4 °C 时,衍射效率为 54.8%,误差为 6.4%。因此,环境温度的波动会对 LCOS 的相位调制会有一定的影响,如果能根据实际温

度加载对应的 LUT 而不是采用固定的 LUT 进行实验,可以提高 LCOS 的相位响应精度。

4 结 论

本文通过实验测量了 BNS 512 × 512 型 LCOS 的时间响应特性和相位调制特性,实验结果表明下降响应时间从 16 °C 的 4.86 ms 降低到了 30 °C 时的 2.60 ms;另外,随着温度的升高,相位调制量会降低,从 16 °C 时的 2.12λ 降低到 26 °C 时的 1.92λ 。同时,计算得到了 16 °C 到 26 °C 温度范围内的不同 LUT 数据,对 LUT 数据进行最小二乘拟合得到公式(4);在 16~24 °C 实验范围内,固定某一温度,对 LCOS 加载温度不相对应的 LUT 时,液晶的衍射效率低于其匹配温度下的衍射效率,液晶校正器的衍射效率最大误差为 6.4%;利用公式(4)可以获得该温度范围内任一温度下合理的 LUT 曲线,通过这种根据工作环境温度动态调整 LCOS 的 LUT,我们可以提高 LCOS 的相位调制精度,避免温度起伏带来的影响。本研究不仅对 LCOS 有帮助,对基于液晶的其他器件也有很好的参考价值。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] LOUSSERT C, DELABRE U, BRASSELET E. Manipulating the orbital angular momentum of light at the micron scale with nematic disclinations in a liquid crystal film [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(3): 037802.
- [3] REN Y X, XIE G D, HUANG H, *et al.* Adaptive optics compensation of multiple orbital angular momentum beams propagating through emulated atmospheric turbulence [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2845-2848.
- [4] BATES B, MILLER C. Liquid crystal television in speckle metrology [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(14): 2816-2817.
- [5] 郑贤良,刘瑞雪,夏明亮,等.液晶自适应光学视网膜校正成像技术研究[J].中国光学,2014,7(1):98-104.
ZHENG X L, LIU R X, XIA M L, *et al.* Retinal correction imaging system based on liquid crystal adaptive optics [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 98-104. (in Chinese)
- [6] 曹召良,李小平,宣丽,等.液晶自适应光学的研究进展[J].中国光学,2012,5(1):12-19.
CAO Z L, LI X P, XUAN L, *et al.* Recent progress in liquid crystal adaptive optical techniques [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 12-19. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] LI J, GAUZA S, WU S T. Temperature effect on liquid crystal refractive indices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(1): 19-24.
- [9] LI J, GAUZA S, WU S T. High temperature-gradient refractive index liquid crystals [J]. *Optics Express*, 2004, 12(9): 2002-2010.

- [10] LIN Y Q, FENG S M, CHENT. Temperature effect on threshold voltage and optical property of twisted nematic liquid crystal with applied different voltages [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, 121(18): 1693-1697.
- [11] HONG S, LIAO E, STOVER M, *et al.* The E-O curve and phase shift of LCoS panel at different temperature and wavelength[C]//*Proceedings of SPIE 8913, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging*. Beijing, China: SPIE, 2013: 891311.
- [12] KIM J M, LEE D G, LEE S W. Temperature-dependent behavioral model of active-matrix liquid crystal displays for all types of liquid crystals [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(9): 881-887.
- [13] ZHANG Z C, XU H, YANG H N, *et al.* Temperature-dependent optical response of phase-only nematic liquid crystal on silicon devices [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(11): 111601.
- [14] 张亚超, 胡立发, 彭增辉, 等. 液晶波前校正器过驱动矩阵的测量方法研究[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(5): 709-715.
ZHANG Y C, HU L F, PENG Z H, *et al.* Method for characterizing the overdrive-matrix of a liquid crystal wavefront corrector [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 709-715. (in Chinese)
- [15] HUANG Y G, HE Z Q, WU S T. Fast-response liquid crystal phase modulators for augmented reality displays [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32757-32766.

作者简介: 申文(1993—), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 主要从事液晶器件及自适应光学中图像处理研究。E-mail: shenwenjiangnan@163.com
胡立发(1974—), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授, 2003 年于东北大学获得博士学位, 主要从事液晶光学方面的研究。E-mail: hulifa@ciomp.ac.cn