

DOI: 10.12086/oe.2021.200345

基于介电润湿效应的叠加式液体透镜波前校正

赵 瑞*, 何懿嘉, 陈露楠, 孔梅梅,
陈 陶, 关建飞, 梁忠诚*

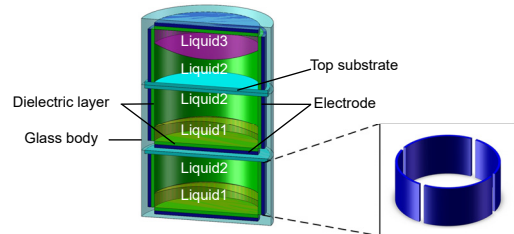
南京邮电大学微流控光学技术研究中心, 江苏 南京 210023

摘要: 设计了一种基于介电润湿效应的叠加式液体透镜, 分析其对含有曲率误差、倾斜误差和活塞误差的畸变波前的校正能力。采用 COMSOL 软件构建叠加式液体透镜模型, 仿真模拟了不同电压组合下液体界面型的变化情况, 获得该叠加式液体透镜内双液体界面的变化范围; 采用 ZEMAX 软件, 借助点扩散函数变化, 分析该透镜对波前任意点处曲率误差、倾斜误差和活塞误差的校正能力。结果表明: 该叠加式液体透镜可以实现同时对不同类型畸变波前的校正, 相应的峰谷值(PV)由校正前 19.7853λ 下降到校正后 0.18λ , 均方根值(RMS)由校正前 5.6638λ 减小到校正后 0.0355λ , 斯特列尔比(SR)由校正前的接近 0 值提高到 0.962 的较理想状态。

关键词: 液体透镜; 介电润湿; 波前校正; 斯特列尔比值

中图分类号: O439

文献标志码: A



赵瑞, 何懿嘉, 陈露楠, 等. 基于介电润湿效应的叠加式液体透镜波前校正[J]. 光电工程, 2021, 48(5): 200345

Zhao R, He Y J, Chen L N, et al. Characteristics of wavefront correction using stacked liquid lens based on electro-wetting-on-dielectric[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(5): 200345

Characteristics of wavefront correction using stacked liquid lens based on electrowetting-on-dielectric

Zhao Rui*, He Yijia, Chen Lunan, Kong Meimei, Chen Tao, Guan Jianfei, Liang Zhongcheng*

Center of Optofluidic Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunication, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract: A stacked liquid lens based on electrowetting-on-dielectric (EWOD) is designed to analyze the ability of correcting the distorted wavefront caused by curvature, tilt, and piston. The model of the stacked liquid lens is constructed by COMSOL software which is used to simulate the change of liquid interface with different voltage combinations, and the change range of the interface. The correction ability of the stacked liquid lens at a certain point in the wavefront is assessed from wavefront image and point spread function (PSF) is got by ZEMAX software. The results show that different types of distorted wavefront can be compensated via the stacked liquid lens. The peak-to-valley (PV) value decreases from 19.7853λ to 0.18λ , and the root mean square (RMS) value is down from

收稿日期: 2020-09-21; 收到修改稿日期: 2021-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61775102, 61905117)

作者简介: 赵瑞(1977-), 女, 博士, 教授, 主要从事基于电润湿理论器件及光电子器件的研究。E-mail: zhaor@njupt.edu.cn

通信作者: 梁忠诚(1957-), 男, 博士, 教授, 主要从事光电子器件与系统, 信息光学及应用, 光信息存储技术、无线光通信技术, 微流控光电子技术, 软物质系统, 光电子学等方面的研究。E-mail: zcliang@njupt.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

5.6638 λ to 0.0355 λ . Concurrently, the Strehl ratio (SR) increased from near 0 to 0.962. The related research results have broad prospects in the field of wavefront correction.

Keywords: liquid lens; electrowetting-on-dielectric; wavefront correction; Strehl ratio

1 引言

自适应光学(Adaptive optics, AO)是一项用于实时校正因大气湍流引起的动态波前畸变,提升光学系统性能的技术,相关概念最早由海尔天文台的 Babcock 于 1953 年提出^[1]。随着研究人员的不断探索,这项技术目前已相当成熟,且在军事与天文领域得到了广泛的应用^[2]。自适应光学系统主要包含波前传感器、计算控制处理器和波前校正器三部分。其中波前校正器作为自适应光学系统的关键器件,在系统性能、制造成本等方面具有决定性因素,从某种意义上讲,波前校正器的发展水平即代表自适应光学的发展水平^[3]。

波前校正器主要分为两类:变形镜与液晶光调制器。变形镜作为研究时间最长、技术最成熟的波前校正器,可分为分离促动器连续表面变形镜、双压电片变形镜、拼接子镜变形镜等多种类型。其工作原理为:在可独立控制的能动物上加装镜面,通过加载电压改变镜面形状,实现对光束相位的控制。但其较多的能动物单元会引起高能耗、大体积、高成本等问题,使变形镜的应用受到了极大的限制^[4-6]。液晶空间光调制器作为波前校正研究领域的热门,通过外部加载电压,使棒状液晶分子旋向发生变化,改变折射率进而改变光程,实现对入射光束相位的调制。具有功耗低、精度高、体积小等诸多优点。鉴于液晶材料的偏振依赖性,校正频率低且响应速度慢等问题^[7-10],研制体积小、填充密度高、响应速度快的空间调制器是大势所趋。

液体透镜作为传统固体透镜的替代品,在可变焦距、光束控制、室内照明及微型化等方面得到了研究人员们的广泛认可。2004 年, Philips 公司发布了首款实用化的基于介电润湿效应的双液体透镜。该装置采用导电水溶液和不导电的绝缘油形成液-液界面,加电压后改变界面的曲率,系统的焦距随之发生变化,该透镜的直径为 4 mm,对应的响应时间仅为 10 ms^[11]。2015 年, Ashtiani 提出了一种电液驱动动态微透镜,其有效电极面密度沿径向增大,使平面器件结构的液体可调透镜处于中心位置,当电压在 0~100 V 变化时,该微透镜焦距相应的在 10.1 mm~5.8 mm 间变化^[12]。2016 年,新加坡国立大学的 Park 课题组报道了一种

基于介电润湿液体棱镜阵列的可调菲涅尔透镜,实现了初步的空间光束指向控制^[13]。紧接着,该课题组将液体棱镜阵列应用于光开关,实现了微流控光学技术在太阳能室内照明领域的设计与优化^[14]。2019 年,韩国明知大学 Chung 课题组发布了一种可调焦距和光圈孔径的多功能液体镜头,该透镜最小焦距可达 -14.76 mm 与 9.04 mm,孔径变化范围为 1 mm~5 mm^[15]。

以液体透镜作为波前调制器的研究发展相对较晚。2006 年, Vuelban 等人提出了一种电毛细驱动的液体变形反射镜,通过电毛细效应改变光程,达到相位调制的效果^[16]。该器件实现了毫秒级响应,并具有较大动态行程,但该器件的使用受限于光束方向。2013 年, Niederriter 等人设计了一种基于介电润湿效应的液体透镜阵列,实现了超过一个波长的畸变波前补偿,包括曲率误差、倾斜误差和活塞误差^[17]。但该设计无法实现多种像差同时校正,适用范围较窄。2017 年, Ashtiani 等人提出了一种电润湿驱动的光学移相器,在 100 V 电压的驱动下,实现了 171°相移^[18],然而,该器件只能用于活塞误差的校正。2019 年,王琼华课题组设计了一种基于介电润湿效应的可变光路调制器,可使光程变化达到 1.15 mm^[19]。2020 年初,本课题组提出了一种用于波前补偿的三液体棱镜阵列,可实现对曲率误差、倾斜误差和活塞误差的校正,但无法实现对三种像差的同时校正^[20]。

本文设计了一种叠加式液体透镜,相较于变形镜,其体积小,无机械运动,易于阵列化,可实现小体积的高密度填充。相较于液晶空间光调制器,两者都是通过介质进行畸变校正,但液体透镜具有无偏振依赖性、响应速度快等优势。该液体透镜独立控制三个不相溶液体的分界面,实现对波前某点上存在的不同种类像差的校正和补偿。首先,仿真模拟液体透镜单元内液液界面面型在不同电压组合下的变化情况;然后,针对系统引入的波前误差,通过调节工作电压来改变液液界面面型,从而实现引入像差的补偿与校正;最后,给出校正后波前的位相分布与点扩散函数分布,判定系统的像差校正能力。相关研究成果有利于推动波前校正技术的发展,将为用于波前校正液体透镜的实现提供了理论依据。

2 结构设计与工作原理

本文设计的叠加式液体透镜共三层, 每层都可视为独立的圆柱体子单元。每个子单元均由直径为 2 mm, 高度为 1 mm 的玻璃腔体构成。腔体底部盖片与内壁沉积电极, 之后表面涂覆介电层。其中, 底部腔体侧壁为四个 1/4 圆弧电极, 中层与顶层侧壁为环形电极。每个圆柱状腔体中分别填充两种不相容的液体, 如图 1(a)所示, Liquid1、Liquid2、Liquid3 分别为 0.01%KCL/1wt%SDS 溶液、正十二烷和[EMIm][NTf2] 离子液体。Liquid1 与 Liquid3 为导电液体, 两者折射率差较大, 而 Liquid2 为非导电液体, 与两种导电液体互不相容, 其折射率与 Liquid3 相近。导电液体与非导电液体在腔体内形成液体界面, Liquid1 与 Liquid2 组成 Lens1 与 Lens2, 可通过控制侧壁与底部电压对界面面型进行控制, 如图 1(b)、1(c)所示, 其较大的折射率差值保证了光线在液体界面处产生足够的偏折;

Liquid2 与 Liquid3 组成的 Lens3 则是通过对侧壁与顶部施加不同的工作电压从而实现对液体界面变化的控制, 如图 1(d)所示, 两液体折射率差极小, 可有效避免因界面变化引起的曲率误差。基于介电润湿效应的棱镜与透镜系统的灵敏度一般在几十个毫秒左右。本课题组在这方面已做了深入研究, 工作原理本文不再赘述^[9,20-21]。

图 2 给出了叠加式液体透镜用于波前校正的工作示意图。图 2(a)中, 存在畸变的初始畸变波前通过叠加式液体透镜, 三个子单元的工作电压独立控制, 分别用于实现对倾斜误差、曲率误差和活塞误差的补偿与校正。图 2(b)~2(d)分别对应为每层单元通过控制液面面型变化对倾斜误差、曲率误差和活塞误差的校正原理图。

具有一定倾斜角度的光线入射到液体界面上, 分别控制四个电极上施加的工作电压, 使腔体内的液体界面呈平面, 并与竖直方向达到一定夹角, 用来校正

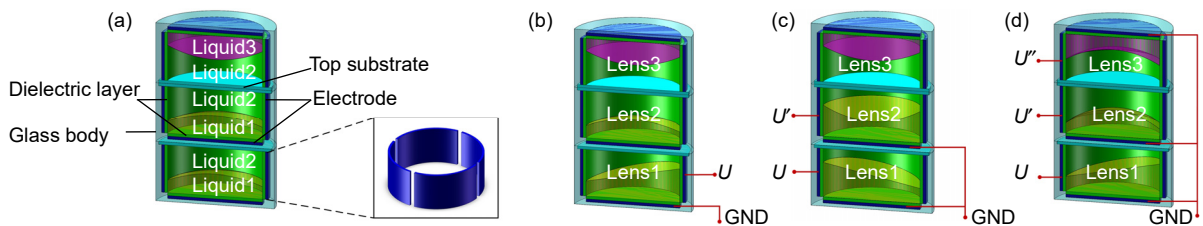


图 1 叠加式液体透镜结构示意图。(a) 液体透镜结构; (b)~(d) 当只对底层棱镜单元施加电压(b), 对底层与中层结构施加电压(c), 对三层结构同时施加电压(d)时, 液体界面变化情况

Fig. 1 Structure of stacked liquid lens. (a) Structures of liquid lens; (b)~(d) When applying voltages to the bottom layer (b), applying voltages to both the bottom and the middle layer (c), and applying voltages to all three layers (d), the states of liquid interfaces is shown

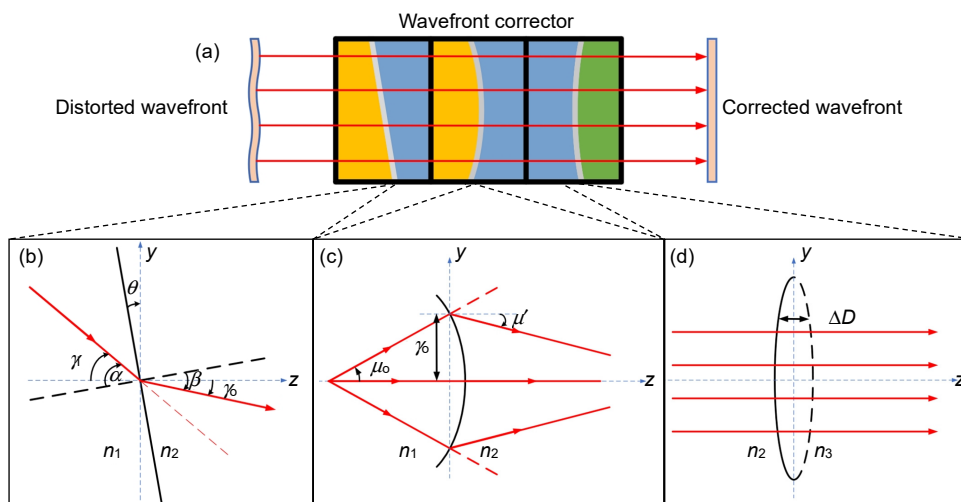


图 2 叠加液体透镜畸变波前校正原理图。

(a) 校正过程; (b) 底层倾斜误差校正; (c) 中层曲率误差校正; (d) 顶层活塞误差校正

Fig. 2 Principle of distorted wavefront correction. (a) Process of correction; (b) Tilt error correction of the bottom layer; (c) Curvature error correction of the middle layer; (d) Piston error correction of the top layer

入射光所具有的倾斜误差:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (1)$$

$$\alpha = \gamma_i + \theta, \quad (2)$$

$$\beta = \gamma_o + \theta, \quad (3)$$

式中: n_1 、 n_2 分别为两液体折射率, θ 为液体界面与 y 轴夹角, α 、 β 为入射角和出射角, γ_i 、 γ_o 为入射光线和出射光线与 z 轴的夹角。当 $\gamma_i = 0$ 时, 光线为平行入射, 无倾斜误差。当 $\gamma_i \neq 0$ 时, 光线存在倾斜误差。通过调节电压, 改变界面倾角 θ , 使 $\gamma_o = 0$, 此时倾斜误差已被校正, 如图 2(b)所示。

若入射光线为发散光或会聚光, 可通过改变界面形状为凸球面或凹球面, 使入射光线聚焦或发散, 最终以平行光出射, 从而达到校正曲率误差的效果。以图 2(c)为例, 入射光线为发散光, 根据矩阵光学的球面介质界面变换矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 \rho} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

结合 ABCD 法则:

$$\begin{cases} y' = ay_0 + b\mu_0 \\ \mu' = cy_0 + d\mu_0 \end{cases}, \quad (5)$$

可得:

$$\begin{cases} y' = y_0 \\ \mu' = \frac{n_2 - n_1}{n_2} \frac{y_0}{\rho} \mu_0 + \frac{n_1}{n_2} \mu_0 \end{cases}, \quad (6)$$

其中: n_1 、 n_2 为 Liquid1、Liquid2 的折射率, ρ 为液体界面曲率, μ_0 、 μ' 为入射光线、出射光线与 z 轴夹

角, y_0 、 y' 为入射光线、出射光线与球面交点到 z 轴的距离。当 $\mu_0 = 0$ 时, 平行光入射, 不存在曲率误差。当 $\mu_0 \neq 0$ 时, 通过改变电压, 控制液面曲率 ρ , 使 $\mu' = 0$, 此时曲率误差已被校正。

当部分波前存在相位超前或滞后时, 可通过改变光程对波前的活塞误差进行校正。如图 2(d)所示, 已知 l_2 、 l_3 分别为 Liquid2 和 Liquid3 的液体厚度, n_2 、 n_3 为两液体折射率, 根据光程定义可得:

$$\sigma_{\text{OPL}} = n_2 l_2 + n_3 l_3. \quad (7)$$

由于腔体内体积一定, 液体界面的变化会改变液体厚度, 当界面从凹面变为凸面时, 得到光程变化量:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{\text{OPL}} &= n_2(l_2 + \Delta D) + n_3(l_3 - \Delta D) - (n_2 l_2 + n_3 l_3) \\ &= (n_2 - n_3)\Delta D, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 ΔD 为液体界面变化宽度, 由此可产生不同的相位延迟以校正活塞误差。

3 仿真结果与数据分析

通过 COMSOL 对本文的叠加式液体透镜建模, 并仿真模拟了不同电压组合下三层液体界面的变化情况, 分析了工作电压与双液体界面面型的关系。具体参数设置如表 1、2 所示。

图 3 给出不同工作电压下叠加式液体透镜腔体内双液体界面面型的变化示意图。图 3(a)为液体透镜的初始状态, 即三层子单元腔体侧壁均未施加电压, 此时底层以及中间层子单元液体界面呈凸球面, 顶层子单元界面则为凹球面。当对底层四等分圆弧电极及中

表 1 COMSOL 参数设置

Table 1 Setting of COMSOL parameters

Parameter	Value	Remarks
Theta1&Theta2	135°	Initial contact angle ([EMIm][NTf2]&Dodecane)
Theta3	140°	Initial contact angle (0.01%KCL/1wt%SDS&Dodecane)
Gamma1&Gamma2	0.011 N/m	Surface tension([EMIm][NTf2]&Dodecane)
Gamma3	0.069 N/m	Surface tension(0.01%KCL/1wt%SDS&Dodecane)
EPSR	2.65	Relative dielectric constant
D_f	1 μm	Dielectric thickness

表 2 液体参数设置

Table 2 Settings of liquid parameters

Liquid	Density/(kg·m ⁻³)	Refractive index	Dynamic viscosity/(cp)
[EMIM][NTf2]	1380	1.4227	32
0.01%KCL/1wt%SDS	1000	1.33	2.7
Dodecane	753	1.4206	1.36

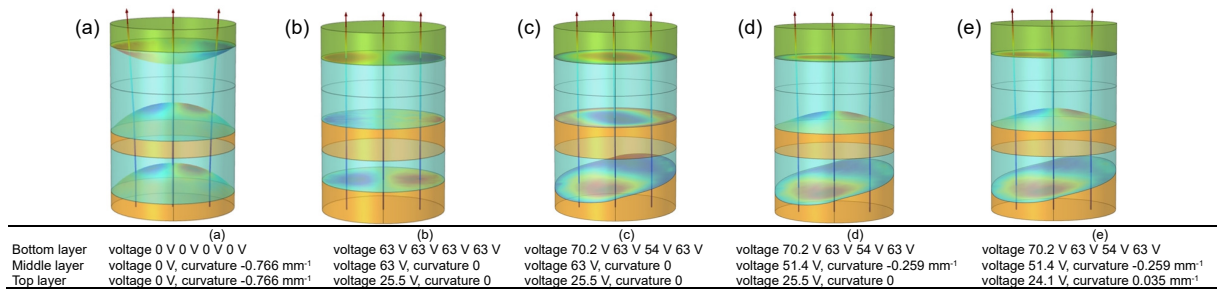


图3 叠加式液体透镜界面面型图。(a) 自然状态下液体界面; (b) 施加电压使三层液体界面呈平面; (c) 改变底层电压; (d) 改变底层与中层电压; (e) 改变全部三层电压

Fig. 3 Interface shape of the stacked liquid lens unit. (a) Liquid interface in natural state; (b) Flat liquid interface by applying voltages; (c) Voltages change in the bottom layer; (d) Voltages change in both the bottom and the middle layers; (e) Voltages change in all three layers

间层侧壁均施加 63 V 工作电压,顶层施加 25.5 V 电压时,三层子单元的双液体界面均呈平面,如图 3(b)所示,此时液体透镜系统对波前畸变不具有校正能力。保持中间层与顶层子单元的工作电压不变,对底层子单元的四等分电极分别施加 70.2 V、63 V、54 V、63 V 电压时,底层子单元腔体内的双液体界面与水平方向成一定夹角,如图 3(c)所示,此时透镜系统可实现对倾斜误差的校正。在图 3(c)的基础上,将中间层子单元的工作电压设为 51.4 V,腔体内双液体界面由平面变成曲率为-0.259 mm⁻¹的凸球面,如图 3(d)所示,此时透镜系统可实现对倾斜误差、负曲率误差的校正。最后,将顶层子单元的工作电压调整为 24.1 V,腔体内双液体界面变成曲率为 0.035 mm⁻¹的凹面,如图 3(e)所示,此时透镜系统可以同时实现对倾斜误差、负曲率误差和相位滞后的校正。

根据图 3 分层式液体透镜腔体内液体界面随工作电压的变化关系,将不同工作电压下的双液体界面曲

率导入 ZEMAX 软件中,进行波前校正性能分析。首先,在 ZEMAX 软件内建立叠加式液体透镜系统,并在系统末端放置一个固体透镜,用于光束会聚。系统建立完成后,对理想波前引入三种像差,波前随之发生畸变。随后,通过改变液体透镜系统各单元相应参数,对畸变进行校正。表 3 显示了系统结构参量,光学系统采用光线波长为 587 nm、通光孔径为 2 mm,其中,Radius 为曲率半径、Thickness 为该面到下一个面的距离、Glass 为材料、Semi-diameter 为透镜孔径半径。表 4 为面 1 与面 2 引入三种像差的相关参数,其中,Norm radius 为有效半径,Zenike1、Zenike3、Zenike4 分别表示活塞误差、倾斜误差和曲率误差。面 4 为非序列面,用来定义液体棱镜单元。

图 4 为 ZEMAX 仿真光路图。为避免液体透镜系统自身产生像差,对三层子单元施加图 3(a)对应电压,使三层子单元腔体内的双液体界面均保持平界面,平行光入射后水平出射,由固体透镜会聚于系统后方一

表 3 系统结构参数

Table 3 Structural parameters of system

	Surf. type	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0
1	Zernike standard phase	Infinity	0		1
2	Zernike standard phase	Infinity	0		1
STO	Standard	Infinity	0		1
4	Non-sequential component	Infinity	-		1
5	Standard	Infinity	0.566	1.33	1
6	Standard	-3.864	0.434	1.4206	1
7	Standard	Infinity	0.478	1.4206	1
8	Standard	28.654	0.522	1.4227	1
9	Standard	Infinity	0		1
10	Standard	-3.291E+011	0.2	BK7	1
11	Standard	-7.752	15.001		1
IMA	Standard	Infinity	-		1

表 4 像差引入参数

Table 4 Introduction of distortions

Surf. type	Norm radius	Zernike 1	Zernike 2	Zernike 3	Zernike 4
1 Zernike standard phase	1	0	0	-15	-5.7
2 Zernike standard phase	0.5	-1E-003	0	0	0

点, 如图 4(a)所示, 此时波前为理想波前。保持电压不变, 分别引入活塞误差、曲率误差和倾斜误差, 理想波前发生畸变, 光束焦距改变并偏离光轴, 如图 4(b)所示。改变三层子单元上的工作电压, 对上述三种像差进行校正, 最终使畸变波前再次恢复到近似理想状态, 如图 4(c)所示。

图 5 为畸变波前校正前后的位相分布图。图 5(a)为理想波前, 其峰谷值(peak-to-valley, PV)为 0.0015λ , 均方根值(root mean square, RMS)为 0.0004λ 。引入三种像差后, 波前发生畸变, PV 值变为 19.7853λ , RMS 值增大到 5.6638λ 。将该畸变波前通过叠加式液体透镜, 依次对曲率误差、倾斜误差和活塞误差进行校正, 如图 5(b)~5(d)所示。校正完成时, 底层棱镜子单元腔体内双液体平界面与壁面的接触角分别为 78.7° 、 90° 、

101.3° 和 90° , 对应的工作电压为 70.2 V 、 63 V 、 54 V 和 63 V ; 中间层透镜单元腔体内双液体界面的曲率为 -0.2588 mm^{-1} , 工作电压为 51.4 V ; 顶层透镜单元腔体内双液体界面的曲率为 0.0349 mm^{-1} , 工作电压为 24.1 V 。最终得到的波前 PV 值下降到 0.18λ , RMS 值减小到 0.0355λ , 如图 5(e)所示。可以看出, 该液体透镜系统实现了对三种像差的有效校正。

图 6 给出了畸变波前校正前后系统像面点扩散函数(point spread function, PSF)的分布情况。图 6(a)显示了波前为理想状态时的点扩散函数图, 此时斯特列尔比(Strehl ratio, SR)为 1。由于引入像差较大, 图 5(b)对应的系统能量过于分散, 斯特列尔比接近 0, 因此点扩散函数分布图像无峰值, 如图 6(b)所示。接着, 将存在三种像差的畸变波前依次进行校正, 图 5(c)~5(e)

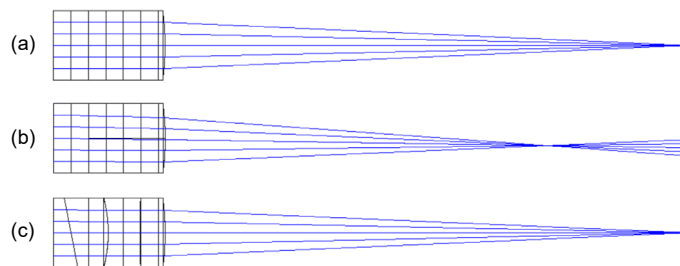


图 4 系统光路图。(a) 理想状态; (b) 携带三种误差; (c) 三种误差校正后
Fig. 4 System optical path. (a) Perfect state; (b) Introducing distortions; (d) Complete correction

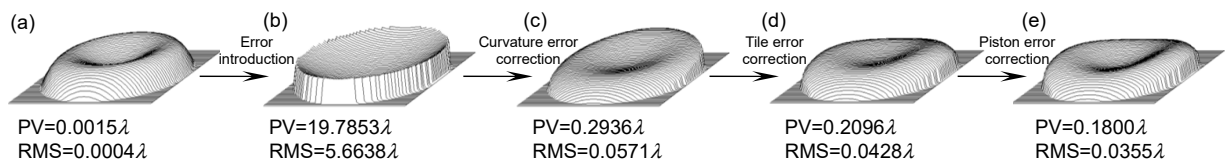


图 5 位相分布图

Fig. 5 Distributions of the phase

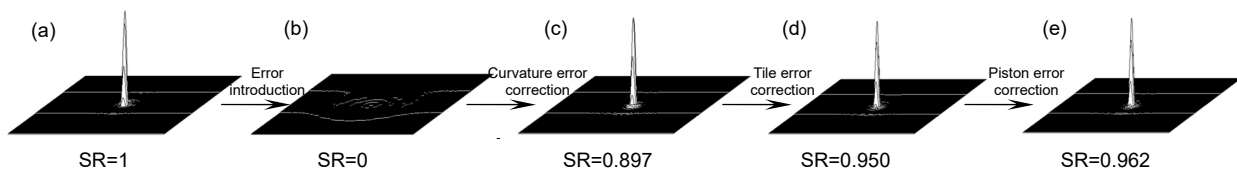


图 6 点扩散函数分布图

Fig. 6 Distributions of the point spread function

的扩扩散函数分布图分别对应图 6(c)~6(e)。可以看出, 经过透镜系统的校正后, 系统能量由极度分散变得集中, PSF 峰值明显提高, 斯特列尔比由开始的近乎零值变为 0.962 接近理想状态。

4 结 论

本文提出了一种基于介电润湿效应的叠加式液体透镜, 用于对畸变波前中的活塞误差、曲率误差和倾斜误差进行校正。使用 COMSOL 软件, 构建了该液体透镜的物理模型, 模拟了不同电压组合下, 液体界面的面形变化, 并通过 ZEMAX 软件, 对其波前校正特性进行了分析。结果表明: 文中所提出的叠加式液体透镜可以对畸变波前做出有效的补偿与校正。经过该叠加式液体透镜的校正后, 畸变波前 PV 值从 19.7856λ 减小到 0.18λ , RMS 值对应地由 5.6638λ 减小到 0.0355λ , 斯特列尔比则从初始的接近 0 值提升到 0.962。

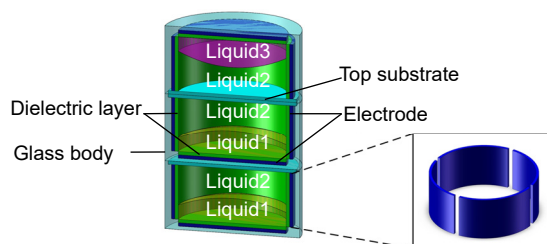
参考文献

- [1] Gao Y F. Research on wavefront correction of two photo microscopy based on adaptive optics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
高玉峰. 基于自适应光学的双光子显微镜波前畸变矫正研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [2] Sun F. Study on high-low order adaptive optics system based on liquid crystal wavefront corrector and deformable mirror[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
孙飞. 液晶—变形镜的高低阶自适应光学系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [3] Cai D M, Yao J, Jiang W H. Performance of liquid-crystal spatial light modulator using for wave-front correction[J]. *Acta Opt Sin*, 2009, **29**(2): 285–291.
蔡冬梅, 姚军, 姜文汉. 液晶空间光调制器用于波前校正的性能[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 285–291.
- [4] Lin X D, Xue C, Liu X Y, et al. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics[J]. *Chin Opt*, 2012, **5**(4): 337–351.
林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. 中国光学, 2012, **5**(4): 337–351.
- [5] Han K N. Comparison between deformable mirror and liquid crystal spatial light modulator for wavefront correction[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
韩柯娜. 变形镜与液晶空间光调制器用于波前校正的对比研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [6] Wei W, Hu X Y, Xie Y J. Aberration correction using MEMS-DM[J]. *Acta Photon Sin*, 2009, **38**(5): 1163–1166.
魏伟, 胡晓云, 谢永军. 利用可变形镜进行像差校正研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(5): 1163–1166.
- [7] Luo H J. Research of phase-only liquid crystal spatial light modulator[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
骆海军. 相位型液晶空间光调制器的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [8] Peng Z H, Cao Z L, Yao L S, et al. The review of liquid crystal wavefront corrector with fast response property[J]. *Sci Sin Phys, Mech Astron*, 2017, **47**(8): 084203.
彭增辉, 曹召良, 姚丽双, 等. 快速响应液晶波前校正器的研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, **47**(8): 084203.
- [9] Yang L X, Zhao R, Kong M M, et al. Beam steering control of liquid prism array based on electrowetting-on-dielectric in three-dimensional space[J]. *Laser Optoelect Prog*, 2019, **56**(16): 162201.
杨龙啸, 赵瑞, 孔梅梅, 等. 介电润湿液体棱镜阵列的三维空间光束指向控制[J]. 激光与光电子学进展, 2019, **56**(16): 162201.
- [10] Cao Z L, Mu Q Q, Hu L F, et al. Characteristics of liquid crystal wavefront corrector[J]. *Acta Photon Sin*, 2008, **37**(10): 2043–2047.
曹召良, 穆全全, 胡立发, 等. 液晶波前校正器特性研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(10): 2043–2047.
- [11] Kuiper S, Hendriks B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **85**(7): 1128–1130.
- [12] Ashtiani O A, Jiang H R. Design and fabrication of an electrohydrodynamically actuated microlens with areal density modulated electrodes[J]. *J Micromech Microeng*, 2015, **26**(1): 015004.
- [13] Clement C E, Park S Y. High-performance beam steering using electrowetting-driven liquid prism fabricated by a simple dip-coating method[J]. *Appl Phys Lett*, 2016, **108**(19): 191601.
- [14] Clement C E, Thio S K, Park S Y. An optofluidic tunable Fresnel lens for spatial focal control based on electrowetting-on-dielectric (EWOD)[J]. *Sens Actuators: B Chem*, 2017, **240**: 909–915.
- [15] Lee J, Park Y, Chung S K. Multifunctional liquid lens for variable focus and aperture[J]. *Sens Actuators: A Phys*, 2019, **287**: 177–184.
- [16] Vuelban E M, Bhattacharya N, Braat J J M. Liquid deformable mirror for high-order wavefront correction[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(11): 1717–1719.
- [17] Niederriter R D, Watson A M, Zahreddine R N, et al. Electrowetting lenses for compensating phase and curvature distortion in arrayed laser systems[J]. *Appl Opt*, 2013, **52**(14): 3172–3177.
- [18] Ashtiani A O, Jiang H R. A liquid optical phase shifter with an embedded electrowetting actuator[J]. *J Microelectromech Syst*, 2017, **26**(2): 305–307.
- [19] Wang Q H, Xiao L, Liu C, et al. Optofluidic variable optical path modulator[J]. *Sci Rep*, 2019, **9**(1): 7082.
- [20] Zhao R, Chen L N, Kong M M, et al. Design and analysis of triple liquid lens array for wavefront compensation[J]. *Laser Optoelect Prog*, 2020, **57**(21): 212202.
赵瑞, 陈露楠, 孔梅梅, 等. 用于波前补偿的三液体透镜阵列的设计分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, **57**(21): 212202.
- [21] Zhao R, Ma J Q, Dang Z Y, et al. Design and analysis of an optical zoom system using electrowetting-based triple liquid lens[J]. *Acta Photon Sin*, 2017, **46**(6): 0622005.
赵瑞, 马建权, 党智勇, 等. 基于介电润湿三液体透镜的变焦光学系统的设计与分析[J]. 光子学报, 2017, **46**(6): 0622005.

Characteristics of wavefront correction using stacked liquid lens based on electrowetting-on-dielectric

Zhao Rui*, He Yijia, Chen Lunan, Kong Meimei, Chen Tao, Guan Jianfei, Liang Zhongcheng*

Center of Optofluidic Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunication, Nanjing, Jiangsu 210023, China



Structures of liquid lens

Overview: Adaptive optics is a technique used to correct the dynamic wavefront distortion caused by atmospheric turbulence and improve the performance of the optical system. As an important part of the adaptive optics system, wavefront corrector directly affects the imaging effect. At present, the most commonly used wavefront correctors are mainly divided into two types: deformable mirror and liquid crystal spatial light modulator. Deformable mirror has been studied for the longest time and has become the most mature technology. Its principle is to install a mirror on the surface of the actuator, changing the shape of the mirror by applying voltage, and then control the beam phase. Due to the high energy consumption, large volume, and high-cost problems caused by more actuators, the application of deformable mirror is greatly limited. The liquid crystal spatial light modulator adjusts the rotation direction of the rod-shaped liquid crystal molecules through the external loading voltage, which changes the refractive index and then increases or decreases the optical path to realize the modulation of the incident beam phase. Low power consumption, high precision, and small size are remarkable advantages of it. However, the polarization dependence, low correction frequency, and slow response speed of liquid crystal materials are the choke of development. The spatial modulator with small volume, high density, and fast response is the general trend.

In this paper, a kind of superimposed liquid lens based on the electrowetting on dielectric is proposed. The distortion wavefront can be corrected by controlling the liquid interface with the effect. It has the dominant position of small volume, easy array, no mechanical motion, no polarization dependence, and fast response speed comparing with the traditional deformable mirror and liquid crystal light modulator. Firstly, according to the theory of electrowetting on dielectric, the structure of the liquid lens system is designed, and the feasibility of the wavefront correction is deduced. Then, the changes of the liquid interface in the liquid lens units with different voltage combinations are simulated in COMSOL software. After that, aberration is introduced into the ideal wavefront of ZEMAX. On the basis of the voltage surface relationship obtained in COMSOL, the working voltage is adjusted to change the liquid interface surface shape, so as to realize the correction of the aberration. Finally, the phase distribution and point spread function distribution of the distorted wavefront correction process are given. The results show that the lens system has a good ability to correct the aberrations introduced at any point of the wavefront, the corresponding peak valley value decreases from 19.7853λ to 0.18λ , the root-mean-square value decreases from 5.6638λ to 0.0355λ , and Strehl ratio increases from near zero value to 0.962. The related research results will promote the development of wavefront correction technology and provide a theoretical basis for the realization of liquid lens for wavefront correction.

Zhao R, He Y J, Chen L N, *et al.* Characteristics of wavefront correction using stacked liquid lens based on electrowetting-on-dielectric[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(5): 200345; DOI: 10.12086/oe.2021.200345

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61775102 , 61905117)

* E-mail: zhaor@njupt.edu.cn; zcliang@njupt.edu.cn