

# 光刻物镜中主动液体透镜的像差特性研究

袁文全 巩岩

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要** 为了对光刻物镜的像差进行补偿,设计了一种主动液体透镜,并分析了该主动液体透镜变形过程中的像差变化特性。用去离子水、氟化锂设计了一种主动液体透镜,在考虑重力及静水压力的情况下,分别计算了一点至六点均布、各点均匀施加荷载作用下镜片的变形;然后对变形镜片的挠度进行了 Zernike 多项式拟合,得到了各标准 Zernike 多项式系数所表示的像差与机械挤压力之间的函数关系。计算表明:主动液体透镜的各标准 Zernike 多项式系数值随受力大小呈强线性关系;除一点受力变形外,在多点受力变形情况下主动液体透镜像差的前三项均为 piston, defocus 及  $n$ -foil;主动液体透镜对 piston 项及 defocus 项这两种像差的调节能力随受力点的增加有增强趋势,而对其他类型像差的调节能力则呈下降趋势。

**关键词** 主动光学;自适应光学;主动变形透镜;像差补偿;有限元法;泽尼克多项式拟合

**中图分类号** TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1222003

## Study on Characteristics of Aberrations for an Active Liquid Lens in Lithographic Objective Lens

Yuan Wenquan Gong Yan

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** In order to compensate aberrations of lithographic objective lens, an active liquid lens is developed, and characteristics of the aberrations varying of the active liquid lens is analyzed. The active liquid lens is constituted of deionised water and LiF. Firstly, considering the gravity and hydrostatic pressure, the forces are evenly applied to one to six points which are equally settled, and the deflection of lens is calculated; Secondly, deflection of the deformable lens is fitted with Zernike polynomials, and the functional relation between the aberrations expressed by standard Zernike polynomials and mechanical forces is established. The results show that: relation between the standard Zernike polynomial coefficients of active liquid lens and forces acted on it is strongly linear; First three aberrations of the active liquid lens are piston, defocus, and  $n$ -foil under multi-points forces except one point; With number of the force points increasing, defocus and piston regulating abilities of active liquid lens are of increasing trend, while the other kinds of aberrations regulating abilities are of downward trend.

**Key words** active optics; adaptive optics; active deformable lens; aberration compensation; finite element method; Zernike polynomials fitting

**OCIS codes** 220.1000; 220.1080; 110.5220

## 1 引 言

高精度投影光刻机的光刻物镜在装配及长时间工作过程中,会因装配过程中产生的应力、工作过程中的旋转不对称受热而引起掩模板、镜片等光学元件的变形,使光路系统产生旋转不对称的像差,从而导致光刻系统性能下降。解决的方案之一是在光阑附近添加一个主动变形透镜<sup>[1]</sup>,通过主动透镜的变

形来产生像差,进而补偿系统像差。目前较为流行的主动变形透镜是液体透镜,根据其结构型式和调节方式的不同,可分为机械式浸润透镜<sup>[2,3]</sup>、薄膜液体透镜<sup>[4~8]</sup>、电致浸润透镜<sup>[9]</sup>、双向电泳透镜<sup>[10~13]</sup>和活性水凝胶微透镜<sup>[14]</sup>等。由于这些液体透镜主要利用液体表面张力的性质进行液体透镜表面的曲率改变,实现焦距调节,进而改善系统的像质。当液

收稿日期: 2011-06-13; 收到修改稿日期: 2011-07-07

基金项目: 国家 02 专项基金项目(2009ZX02005)资助课题。

作者简介: 袁文全(1982—),男,硕士,助理研究员,主要研究方向为精密光机结构设计与分析等方面的研究。

E-mail: yuanwenquan@tom.com

体透镜的尺寸过大时,由于重力作用远大于表面张力对液体的影响,液体表面会形成平面而无法进行调节,因此常规的主动液体透镜口径不能太大,一般在几百微米到十几毫米之间。而对于口径数百毫米的光刻物镜光学元件来说,显然无法直接采用该技术进行像差补偿。当前一种新做法<sup>[1]</sup>是在薄膜液体透镜基础上,采用刚度较大的光学玻璃薄板代替薄膜来制成一种大口径的主动液体透镜,并采用机械方法挤压光学玻璃薄板,使透镜表面的面形发生改变而产生像差,进而实现系统像差补偿。

而在主动液体透镜的像差控制方面,只有了解透镜在受力情况下的像差变化特性,才能有效地对其像差进行控制,来准确补偿整个光学系统的像差。另外由于 Zernike 多项式与光学像差有一定对应关系,并且容易与光学中惯用的 Seidel 像差函数建立联系,过去的主动光学元件的设计中,也通常采用 Zernike 多项式来分析主动光学元件的校正能力<sup>[15~16]</sup>。但有关主动光学元件校正过程中的各项 Zernike 多项式系数与机械调节力之间的对应关系,则研究较少。本文采用去离子水、氟化锂两种光学材料设计了一种 193 nm 深紫外工作波长下的主动液体透镜,分别计算了 1~6 点均布、各点均匀施加载荷作用下镜片的变形,并对变形结果进行了 66 项标准 Zernike 多项式拟合,建立了该型式液体透镜在主动调节过程中各标准 Zernike 多项式系数所表示的像差与机械挤压力之间的函数关系,并对各标准 Zernike 多项式系数所表示像差的影响程度作了归纳分析。

## 2 主动液体透镜像差的分析原理

### 2.1 主动液体透镜的结构

在进行主动液体透镜设计时,应选择工作波长下折射率接近的液体介质及光学玻璃,以尽量减小变形过程中流固界面之间由于折射率不同带来的额外像差影响,如在 193 nm 深紫外工作波长下,去离子水与氟化锂的折射率均接近 1.44。因此,以这两种材料作为基材设计了一种 193 nm 工作波长下的主动液体透镜。

主动液体透镜的结构简图如图 1 所示,上下两块平面圆形薄板状氟化锂玻璃镜片中间充满去离子水;去离子水通过一个漏斗状储液池与大气相连,其液面比薄板之间的水层略高;两块镜片之间、下层镜片与镜框之间均采用垫片连接,上层镜片与镜框之间采用螺纹压圈压实,以实现整个结构的紧固。多个机械式促动器安装在镜框的底部,通过促动器挤

压下层镜片,使该镜片产生变形,从而产生像差来进行系统像差的补偿。由于产生变形使去离子水的液面变化较小,因此上层镜片因受力变化导致的变形可忽略不计。另外,该设计中需要注意的是:由于氟化锂具有一定的水溶性,因此主动液体透镜内的去离子水与外界是连通的,并缓缓流动进行更新以保证其折射率不变;且整个主动液体透镜结构作密封防漏处理,以防止去离子水的渗漏。

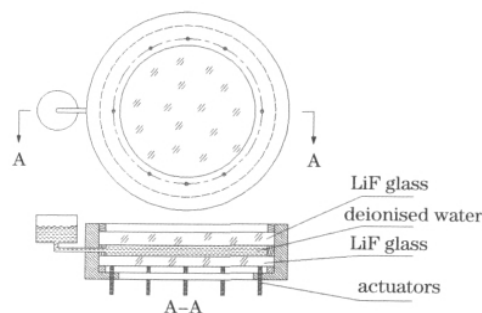


图 1 主动液体透镜示意图

Fig. 1 Sketch of active liquid lens

### 2.2 下层镜片的物理模型

由于主动液体镜片的变形在下层镜片上产生,其像差也主要由该镜片贡献,因此研究该镜片的变形规律即可获知整个主动液体透镜的像差特性。图 2 为圆柱坐标系下的下层镜片物理模型,该镜片采用薄板结构假设,其周围为固支边界条件,受到垂直向下的重力  $G$ 、去离子水产生的静水压力  $q(r, \theta)$  及由一个或者多个促动器产生的竖直向上的挤压力  $Q(r, \theta)$ 。

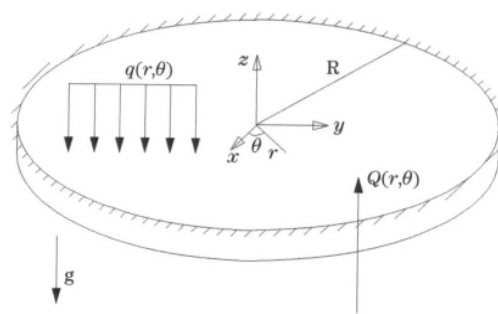


图 2 下层玻璃薄板的物理模型

Fig. 2 Physical model of bottom lens

这样,下层玻璃镜片变形的挠度方程可表示为

$$D \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \omega = Q(r, \theta) - G - q(r, \theta), \quad (1)$$

式中  $\omega$  为下层镜片的挠度,  $D$  为下层镜片的刚度。而其边界条件为

$$\omega \Big|_{r=R} = 0, \quad \frac{\partial \omega}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0. \quad (2)$$

可依据(1),(2)式对下层镜片变形的挠度进行分析,常规的求解方式有解析方法和数值求解方法,本文采用数值求解方法中的有限单元法对下层镜片变形的挠度进行计算。

### 2.3 变形面的 Zernike 多项式拟合

实际上,主动液体透镜中下层镜片变形的挠度并不直接反映其像差变化,因此需要将挠度值转化为一种光学像差的表达方式来进行透镜像差特性评价。另一方面,Zernike 多项式表示的基底函数系在单位圆上加权正交,其系数相互独立,有利于消除偶然误差的影响,并且其系数易与光学设计中惯用的 Seidel 像差建立联系。这样,可以采用 Zernike 多项式表达的像差对有限元分析的结果进行拟合,然后对 Zernike 多项式系数进行分析,以获得主动液体透镜主动调节过程中的各种像差变化规律。

下层镜片变形的挠度可以用  $k$  项标准 Zernike 多项式表示为

$$\omega(x, y) = q_1 Z_1(x, y) + q_2 Z_2(x, y) + \dots + q_k Z_k(x, y), \quad (3)$$

式中  $q_i (i = 1, 2, \dots, k)$  为标准 Zernike 多项式系数,  $Z_i(x, y) (i = 1, 2, \dots, k)$  为点  $(x, y)$  处标准 Zernike 多项式,  $\omega(x, y)$  为点  $(x, y)$  处的挠度值。

对于计算得出下层镜片上  $m$  个离散点的挠度  $\omega_i(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, m)$ , 令

$$a_{ij}(x, y) = Z_j(x_i, y_i), \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (4)$$

并代入(3)式可得矛盾方程组:

$$\begin{cases} a_{11}q_1 + a_{12}q_2 + \dots + a_{1k}q_k = \omega_1 \\ a_{21}q_1 + a_{22}q_2 + \dots + a_{2k}q_k = \omega_2 \\ \vdots \\ a_{m1}q_1 + a_{m2}q_2 + \dots + a_{mk}q_k = \omega_m \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $m \gg k$ 。

求解(5)式即可得到各项标准 Zernike 多项式系数,常用的求解方法有最小二乘法<sup>[18]</sup>、Gram-Schmidt 正交化方法<sup>[19]</sup>、Householder 变换法<sup>[20]</sup>及广义逆矩阵法<sup>[21]</sup>等。本文利用 Householder 变换法进行计算,整个变形面的标准 Zernike 多项式拟合流程如图 3 所示。

## 3 主动液体透镜像差变化的计算

### 3.1 主动液体透镜的分析模型

主动液体透镜的结构分析模型如图 4 所示,其

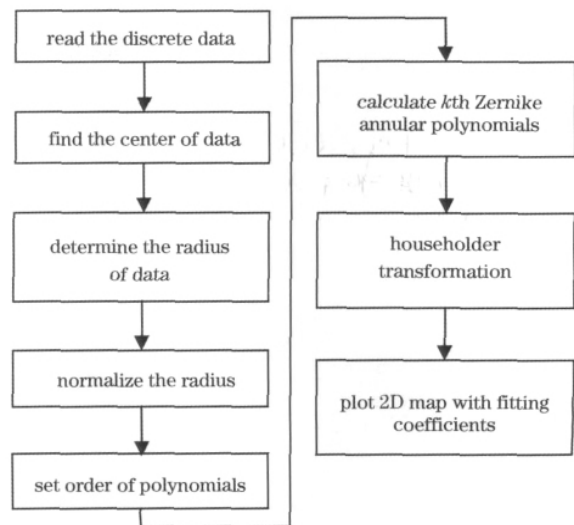


图 3 Zernike 多项式拟合流程图

Fig. 3 Flow chart of Zernike polynomials fitting

中图 4(a)为整个主动液体透镜的结构图,图中各关键尺寸如表 1 所示,而图 4(b)~(g)中的 $\oplus$ 分别表示了下层镜片上促动器的位置布置点,即各促动器的均匀分布在直径为  $(d+D)/2$  的圆上; $n=1, 2, \dots, 6$  分别表示有  $n$  个促动器的均匀分布状态,后续各图中的表示方法与此相同。

整个主动液体透镜通光部分采用氟化锂和去离子水,具体物理性能参数如表 2 所示。

表 1 动液体透镜的关键尺寸

Table 1 Key dimensions of the active fluid lens

$D$	$d$	$H$	$\Delta h$
0.2	0.14	0.005	0.005

表 2 材料物理性能

Table 2 Physical properties of materials

Materials	Density / $(\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Young module / Pa	Poisson's ratio
LiF	$2.63 \times 10^3$	$6.48 \times 10^{10}$	0.225
Deionised water	$1.0 \times 10^3$		

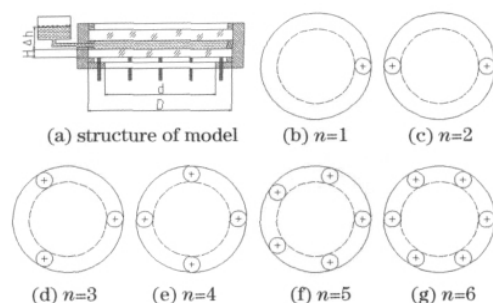


图 4 主动液体透镜的分析模型

Fig. 4 Analysis model of the active fluid lens

### 3.2 下层变形镜片的有限元分析

由于下层变形镜片的径厚比大于 10,因此这里采用二阶壳单元对该镜片的变形进行分析。在单元网格的划分过程中,采用逐步加倍细化网格的办法对镜片变形进行分析,并以网格细化前后计算结果的偏差相对值小于 0.01%作为网格是否合适的准则。计算结果显示在网格尺寸为 0.001m 附近有

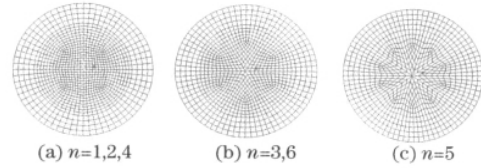


图 5 模型的网格划分  
Fig. 5 Meshes of model

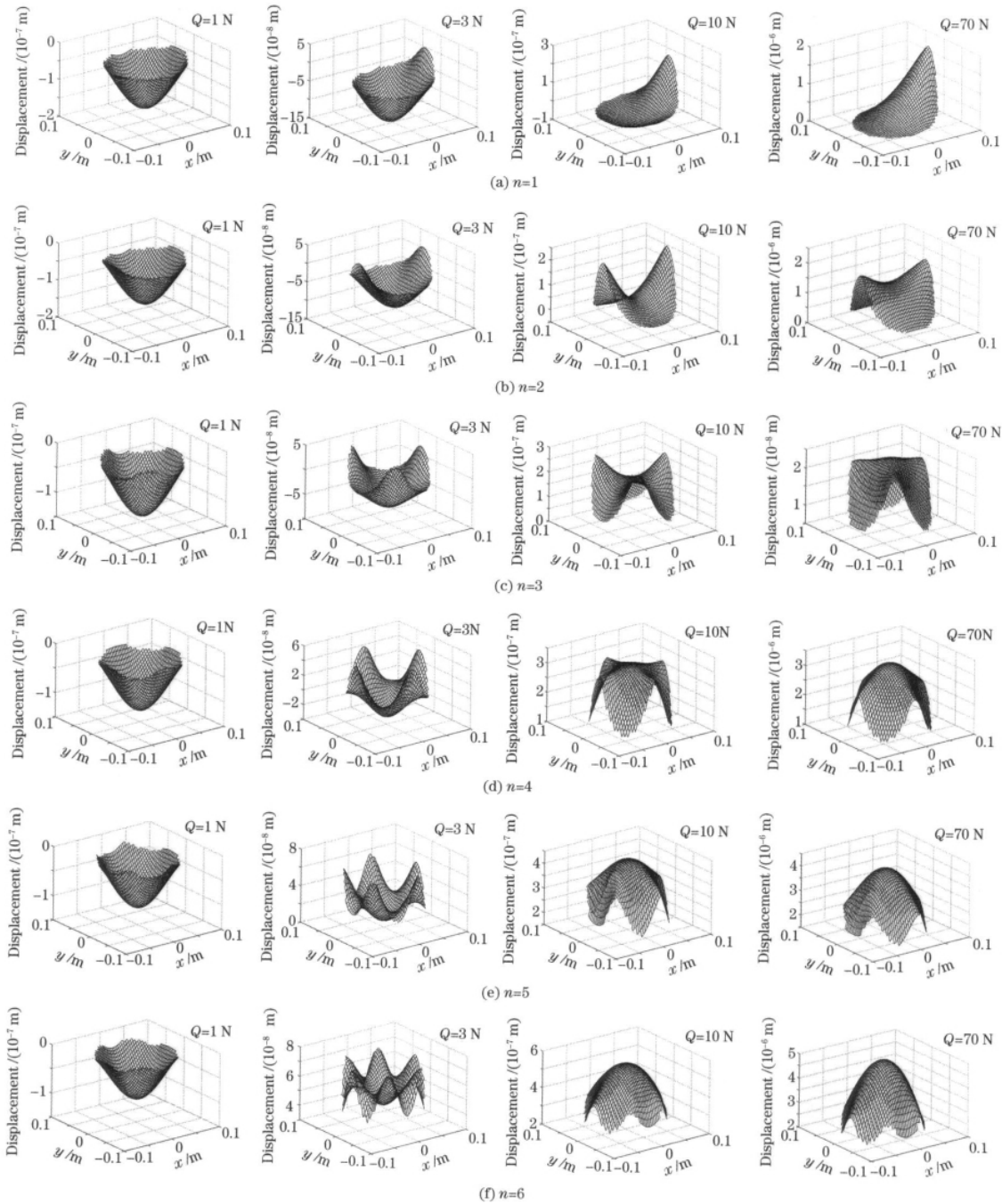


图 6 有效口径内镜片的挠度变化  
Fig. 6 Deflection of lens in effective aperture

较好的数值结果,由于此时网格过于致密,图5绘制了网格尺寸为0.01 m时的该种网格划分方法,其中镜片在一点、两点及四点均匀受力变形时共用同一种网格模型,如图5(a)所示,3点和6点均匀受力时也共用同一种网格模型,如图5(b)所示,5点均匀受力时为单独一种网格模型,如图5(c)所示。

根据氟化锂材料的强度分析,在点力小于70 N的情况下,其材料不会发生破坏,因此这里分别分析了点状挤压力0~70 N,步长为1 N情况下下层镜片的变形。图6则显示了1~6点(图中 $n=1,2, \dots, 6$ )、挤压力在1,3,10及70 N情况下,下层变形镜片中有有效通光口径 $d$ 以内部分的挠度。

### 3.3 下层镜片变形量的标准 Zernike 多项式拟合

采用 Householder 变换法对下层镜片有效通光口径内的挠度进行66项标准 Zernike 多项式拟合,可得出一点到六点均匀受力、挤压力0~70 N且步长为1 N情况下各标准 Zernike 多项式系数与机械挤压力的函数关系。从计算结果来看,各标准 Zernike 多项式系数与机械挤压力之间具有较强的线性关系,因此可以采用最小二乘法计算出标准 Zernike 多项式系数的变化量与机械挤压力变化量之间的比值 $C$ ,并将该值作为衡量各项像差的调节

能力。由于 Zernike 多项式系数过多,这里仅绘制了 $C$ 的绝对值大于 $1 \times 10^{-9}$  m/N所对应标准 Zernike 多项式系数与机械挤压力的函数关系,具体如图7所示;并依照其绝对值的大小顺序及对应标准 Zernike 多项式系数统计如表3所示。图7图例中的项数及表3中的 terms 项均对应标准 Zernike 多项式的项次。

### 3.4 结果讨论

通过分析计算结果,发现各标准 Zernike 多项式系数所表示的像差随受力变化情况具有如下特点:

- 1) 在一点及多点均布受力变形情况下,各标准 Zernike 多项式系数变化随受力大小呈强线性关系;
- 2) 除一点受力变形( $n=1$ )外,其他多点受力变形情况下( $n=2,3, \dots, 6$ ),主要影响标准 Zernike 多项式系数中的前三项均为第1项(piston)、第5项(defocus)及第 $1 + \sum_{i=1}^n i$ 项(n-foil);实际上由于标准 Zernike 多项式系数与初始坐标选取具有相关性,因此当所选坐标系绕轴向旋转改变时,标准 Zernike 多项式系数中的第 $\sum_{i=0}^n (i+1)$ 项(n-foil)也是重要影响项。

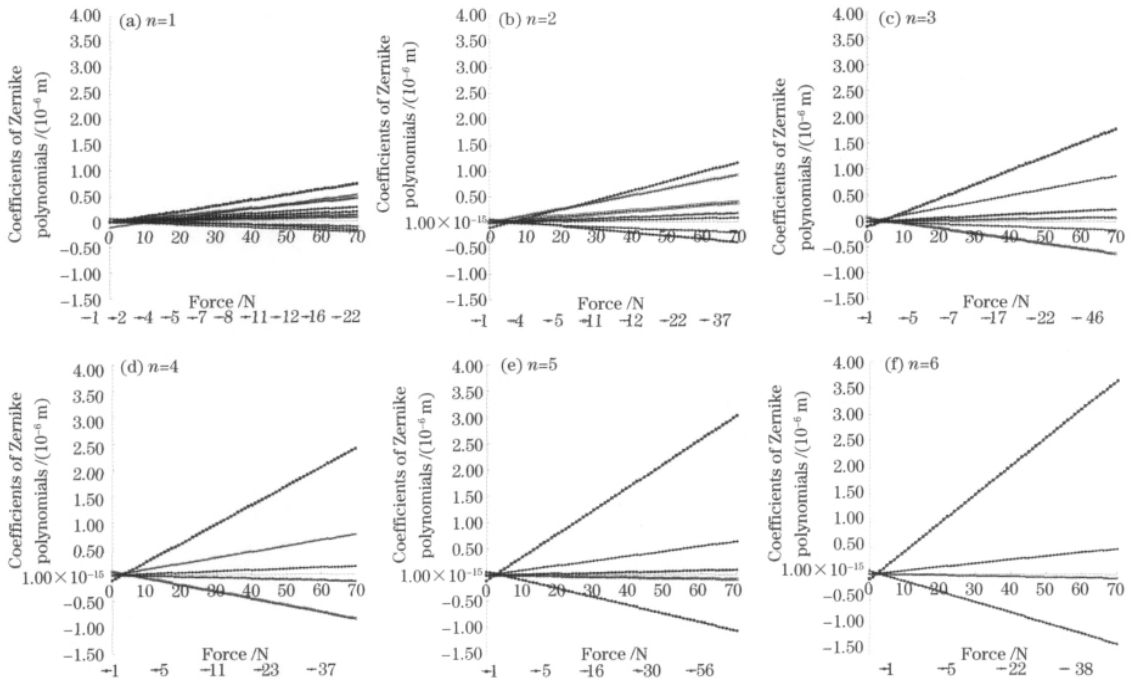


图7 各项标准 Zernike 多项式系数随受力变化

Fig. 7 Coefficients of standard Zernike polynomials changing with force varying

表 3  $C$  值 ( $|C| > 1 \times 10^{-9}$  m/N) 统计表  
Table 3 Statistics of  $C$  ( $|C| > 1 \times 10^{-9}$  m/N)

Item	$n=1$		$n=2$		$n=3$	
	Terms	$C/(10^{-9} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1})$	Terms	$C/(10^{-9} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1})$	Terms	$C/(10^{-9} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1})$
1	2	10.40	1	17.80	1	26.70
2	1	8.91	4	13.00	7	12.50
3	4	6.50	5	-6.52	5	-9.81
4	7	4.17	11	5.46	22	3.42
5	5	-3.26	12	-2.95	17	-2.41
6	8	-2.92	22	2.43	46	1.18
7	11	2.72	37	1.12		
8	16	1.80				
9	12	-1.48				
10	22	1.21				

Item	$n=4$		$n=5$		$n=6$	
	Terms	$C/(10^{-9} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1})$	Terms	$C/(10^{-9} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1})$	Terms	$C/(10^{-9} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1})$
1	1	35.60	1	44.60	1	53.40
2	5	-13.00	5	-16.30	5	-19.60
3	11	10.90	16	9.02	22	6.85
4	37	2.23	56	1.35	38	-1.13
5	23	-1.82	30	-1.35		
6						
7						
8						
9						
10						

3) 各项标准 Zernike 多项式系数对应的像差变化能力随着受力点数的增加具有分化趋势。在下层镜片的变形过程中,随着受力点的增加,标准 Zernike 多项式系数中第 1 项 (piston) 及第 5 项 (defocus) 的变化能力随受力点的增加而增强,表现为其对应的  $C$  的绝对值有增大趋势,即随受力点的增加,主动液体透镜对 piston 项及 defocus 项这两种像差的调节能力有增强趋势;而其它的标准 Zernike 多项式系数的变化能力随受力点的增加而减弱,表现为其对应的  $C$  的绝对值有减小趋势,即主动液体透镜对除 piston 项、defocus 项外其他像差的调节能力随受力点的增加有减弱趋势。因此还可以预见,当受力点数  $n$  趋于无穷(即下层镜片环面受力)时,主动液体透镜的像差主要为 piston 项及 defocus 项。

#### 4 结 论

采用去离子水、氯化锂两种光学材料设计了一种 193 nm 波长下工作的主动液体透镜,在考虑重力及静水压力的情况下,分别计算了 1~6 点均布、各点均匀施加载荷作用下镜片的变形;基于 Zernike

多项式系数易与光学设计中惯用的 Seidel 像差建立联系,对变形结果进行了 66 项标准 Zernike 多项式拟合,建立了该型式液体透镜在主动调节过程中各标准 Zernike 多项式系数所表示的像差与多点机械挤压力之间的函数关系,计算分析表明:主动液体透镜的各标准 Zernike 多项式系数值随受力大小呈强线性关系;除一点受力变形( $n=1$ )外,其他多点受力变形情况下( $n=2,3,\dots,6$ ),主动液体透镜主要受影响像差的前 3 项均为 piston、defocus 及  $n$ -foil;主动液体透镜各项标准 Zernike 多项式系数对应的像差变化能力随着受力点数的增加具有分化趋势,具体表现在主动液体透镜对 piston 项及 defocus 项这两种像差的调节能力随受力点的增加有增强趋势,而其他类型像差的调节能力则呈下降趋势。

#### 参 考 文 献

- Olaf Conradi, Sascha Bleidistel, Markus Hauf *et al.*. Projection objective of a microlithographic projection exposure apparatus [P]. United States: US 2008/0239503 A1, 2008. 10
- Cheng Huichuan, Xu Su, Liu Yifan *et al.*. Adaptive mechanical-wetting lens actuated by ferrofluids[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(8): 2118~2121
- Xu Su, Liu Yifan, Ren Hongwen *et al.*. A novel adaptive mechanical-wetting lens for visible and near infrared imaging[J].

- Opt. Express*, 2010, **18**(12): 12430~12435
- 4 F. Schneider, C. Müller, U. Wallrabe. A low cost adaptive silicone membrane lens[J]. *J. Optics A: Pure & Appl. Opt.*, 2008, **10**(4): 044002
  - 5 Wen Qiao, Frank S. Tsai, Sung Hwan Cho. Fluidic intraocular lens with a large accommodation range [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(5): 304~306
  - 6 Son Hyung Min, Kim Min Young, Lee Yun Jung. Tunable-focus liquid lens system controlled by antagonistic winding-type SMA actuator [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(16): 14339~14350
  - 7 Xu Su, Ren Hongwen, Lin Yeong-Jyh *et al.*. Adaptive liquid lens actuated by photo-polymer [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 17590~17595
  - 8 Hongwen Ren, David Fox, P. Andrew Anderson *et al.*. Tunable-focus liquid lens controlled using a servo motor[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(18): 8031~8036
  - 9 M. Vallet, B. Berge. Electrowetting of water and aqueous solutions on poly(ethylene terephthalate) insulating films[J]. *Polymer*, 1996, **37**(12): 2465~2470
  - 10 Ren Hongwen, Wu Shin Tson. Tunable-focus liquid microlens array using dielectrophoretic effect [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(4): 2646~2652
  - 11 Cheng Chih Cheng, C. Alex Chang, J. Andrew Yeh. Variable focus dielectric liquid droplet lens [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(9): 4101~4106
  - 12 S. Kuiper, B. H. W. Hendriks. Variable-focus liquid lens for miniature cameras [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(7): 1128~1130
  - 13 T. Krupenkin, S. Yang, P. Mach. Tunable liquid microlens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(3): 316~318
  - 14 Liang Dong, Abhishek K. Agarwal, David J. Beebe *et al.*. Adaptive liquid microlenses activated by stimuli-responsive hydrogels[J]. *Nature*, 2006, **442**(7102): 551~554
  - 15 Ning Yu, Yu Hao, Zhou Hong *et al.*. Experimental research on spatial fitting capability to Zernike aberrations of 20-element bimorph deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1756~1760
  - 16 宁禹, 余浩, 周虹等. 20单元双压电片变形镜对 Zernike 像差空间拟合能力的实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1756~1760
  - 17 Huang Shengyang, Jiang Zongfu, Xi Fengjie *et al.*. Correction of low order Zernike aberrations by curvature adaptive optics system [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2010, **22**(11): 2521~2526
  - 18 黄盛扬, 姜宗福, 习锋杰等. 曲率型自适应光学系统对低阶 Zernike 像差校正能力[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(11): 2521~2526
  - 19 Yang Huafeng, Rao Changhui, Zhang Yudong *et al.*. Adaptive optics system based on combinational deformable mirror for improving wavefront spatial correction capability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 587~593
  - 20 杨华峰, 饶长辉, 张雨东等. 一种提高波前空间校正能力的组合变形镜自适应光学系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 587~593
  - 21 Qi Bo, Chen Hongbin, Liu Shunfa. Regression analysis of wavefront fitting using Zernike polynomial[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2007, **15**(3): 396~400
  - 22 亓波, 陈洪斌, 刘顺发. Zernike 多项式波面拟合的回归分析方法[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(3): 396~400
  - 23 Chen Xu, Yuan Wenquan, Feng Yutao *et al.*. Study of the error of the reference lens in absolute spherical testing and the thermal deformation model establishment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0212002
  - 24 陈旭, 袁文全, 冯玉涛等. 绝对检验参考镜误差分析与热变形模型建立[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0212002
  - 25 Liu Hui, Yu Qinghua, Pei Yuntian. Light-weighted structure contrast and deformation analysis of the large mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(11): 70~74
  - 26 刘辉, 于清华, 裴云天. 大口径反射镜轻量化结构比较及面形分析[J]. *光电工程*, 2009, **36**(11): 70~74
  - 27 Wu Zhiyun, Zhang Qican. Carrier removal method in fringe projection profilometry using Zernike polynomials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412011
  - 28 吴志云, 张启灿. 用泽尼克多项式消除三维轮廓术中的条纹载频[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0412011

栏目编辑: 谢婧