

# 光刻物镜主动变形镜像差补偿分析

东立剑 赵磊 张德福 于新峰 倪明阳 李显凌

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** 为补偿光刻物镜由不均匀照明引入的Z5像散,设计了一种主动变形镜,并分析该主动变形镜的像散补偿性能。利用有限元分析方法,建立主动变形镜的有限元模型,得到主动变形镜调节能力、刚体位移误差、固有频率及最大应力等性能。结果表明,主动变形镜在50 N驱动力作用下可以实现镜片表面面形均方根(RMS) 837 nm Z5像散补偿,伴随产生的镜片表面高阶像差仅为RMS 1.124 nm,三个方向刚体平移仅为0.49、0.52、0.13 nm,三个方向的刚体旋转仅为2.21、1.73、1.10 ms,主动变形镜一阶固有频率达到2555 Hz,最大应力为0.852 MPa,满足光刻物镜像差补偿需求。

**关键词** 成像系统;主动光学;像散补偿;有限元分析

**中图分类号** TH74 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.072203

## Aberration Compensation Analysis of Active Deformable Lens in Lithographic Objective Lens

Dong Lijian Zhao Lei Zhang Defu Yu Xinfeng Ni Mingyang Li Xianling

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

**Abstract** An active deformable lens with small coupling error is designed to meet the requirement of astigmatism compensation because of non-uniform illumination in lithographic objective lens. The capability of the active deformable lens is studied. The finite element model is established. Based on the finite element model, adjustment ability, rigid movement error, natural frequency and maximum stress of the active deformable lens are analyzed. Analytic results indicate that the active deformable lens is able to regulate root mean square (RMS) 837 nm astigmatism compensation Z5 with 50 N drive force. The high order aberration only is RMS 1.124 nm. The rigid movement error of translation and rotation are 0.49, 0.52, 0.13 nm, 2.21, 1.73, 1.10 ms, the first order natural frequency is 2555 Hz, and the maximum stress of lens is 0.852 Mpa. The active deformable lens satisfies the requirement of astigmatism compensate in lithographic objective lens.

**Key words** imaging systems; active optics; astigmatism compensation; finite element analysis

**OCIS codes** 220.3740; 220.1000; 110.1080; 110.2960

## 1 引言

193 nm光刻投影物镜曝光系统采用矩形曝光模式,在曝光过程中由于吸收激光能量,使成像质量劣化。像质劣化可分为具有轴对称特性和非轴对称特性的两类。第一类可完全或部分的通过调节机构、像高以及物高进行补偿,而对于具有非轴对称特性的像质劣化则需要通过变形镜等功能性元件进行补偿,因此研究变形镜技术具有重要意义。

主动变形技术起源于欧洲南方天文台,并在天文学领域有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。其主要针对反射镜进行像差校正,通过实时调整光学镜片的位移和变形来抵消重力及温度变化等因素的影响,进而改善光学镜片的的面形误差,提高光学系统成像质量。近年来,主动变形液体透镜的研究也取得了较大的进展,主要集中在薄膜液体透镜和双向电泳透镜和活性水凝胶透镜等方面的研究<sup>[3-5]</sup>,但液体透镜无法实现较大尺寸透镜的主动

收稿日期: 2015-01-19; 收到修改稿日期: 2015-03-18; 网络出版日期: 2015-06-04

基金项目: 国家重大专项02专项(2009ZX02205)

作者简介: 东立剑(1987—),男,硕士,研究实习员,主要从事光机结构设计方面的研究。E-mail: donglj@ciomp.ac.cn

调节,其受重力影响较大。国内在主动光学方面也进行了较深入的研究。最早由苏定强等<sup>[6-7]</sup>开展主动光学实验,并研制成功我国第一个薄镜面主动光学实验系统。长春光机所李宏壮等<sup>[8-11]</sup>针对620 mm口径薄镜面进行了面形校正和系统波像差校正实验。袁文全等<sup>[12]</sup>针对液体透镜进行了主动变形镜的研究。同时变形镜技术也应用于天气预测等其他方面<sup>[13-14]</sup>。但是,大部分主动光学技术研究集中于大口径、拼接技术、薄镜面等领域,对于光刻物镜透射式光学系统的主动光学研究相对较少。

本文主要补偿193 nm光刻物镜非轴对称像质劣化,由矩形曝光引入的像差主要成分是Z5初级像散,针对初级像散补偿进行主动变形镜结构与性能分析。结合光刻物镜使用需求,利用有限元分析方法,建立主动变形镜有限元模型,得到主动变形镜调节能力、刚体位移误差、固有频率以及最大应力等性能,完成主动变形镜的方案设计与性能分析,满足光刻物镜对非对称像散补偿需求。

## 2 主动变形镜工作原理及结构设计

光刻物镜主动变形镜的工作原理主要是通过机械结构进行力的传递使光学镜片产生相反方向的像散,进而补偿由受热不均引起的非对称像差。图1为主动变形镜工作原理图。变形镜主要由光学镜片、支撑结构、驱动器构成。通过两组不同方向的驱动器提供驱动力使支撑结构产生像散变形,经由支撑结构将力传递到光学镜片上,进而使光学镜片产生一定大小的Z5像散,完成光刻物镜非对称像差的补偿。

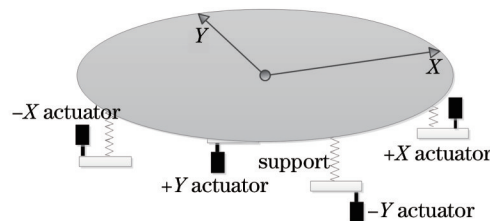


图1 变形镜工作原理图

Fig.1 Principle of active deformable lens

193 nm光刻物镜作为超高精度光学仪器,对系统波像差有着极为苛刻的要求。这就约束变形镜在实现过程中应尽量减少补偿像散过程中伴随产生的误差。误差主要包括光学镜片表面面形的刚体位移和高阶像差。刚体位移的产生会导致镜片表面面形偏离光刻物镜的光轴,影响光刻物镜像质。高阶像差的引入同样会降低光刻物镜成像质量。同时作为光刻物镜整体中的一个组件,其占用空间有限,对驱动器有效位移有着较大限制,这就要求主动变形镜具有较强的像散补偿能力,否则在狭窄空间内无法实现较大像散的补偿,且其固有频率应避开光刻物镜整体的一阶固有频率,以免在调节过程中引起共振。

为了满足上述性能要求,将支撑结构设计为分体式结构,内框用来支撑光学镜片,外框安装驱动器,以周向均匀分布的4个柔性铰链固定连接。柔性铰链如图2所示,关键尺寸为铰链的长 $L$ 、宽 $W$ 、高 $H$ 。其局部坐标系如图所示,该铰链的特点是使光学镜片沿 $Y$ 向、 $Z$ 向刚度大。这样有助于驱动力作用时降低光学镜片表面面形沿 $Y$ 向、 $Z$ 向平移量以及绕 $X$ 、绕 $Z$ 的转动量。

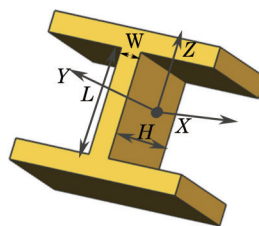


图2 柔性铰链

Fig.2 Flexure hinge

主动变形镜整体方案设计如图3所示,主要由可变形内框、外框、光学镜片、高精度压电驱动器、高精度位移传感器组成。光学镜片尺寸如图4所示。内外框通过四处周向均布的铰链连接,在进行力驱动时,驱动力沿周向分量互相抵消,使内框在产生像散的同时镜片表面面形刚体位移较小。每两处铰链之间分布一个压电驱动器,在 $X$ 方向上布置两个+ $Z$ 方向的压电驱动器,沿 $Y$ 向布置两个- $Z$ 方向压电驱动器进行力的输出。其中 $X$ 轴上驱动器向上推动内框, $Y$ 轴上驱动器向下拉动内框,共同作用使镜框内框产生Z5马鞍状变形,内框与光学镜

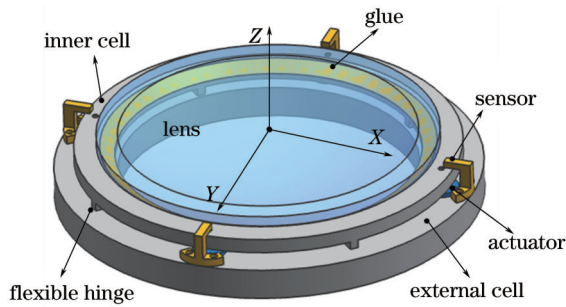


图3 主动变形镜结构模型

Fig.3 Structure model of active deformable lens

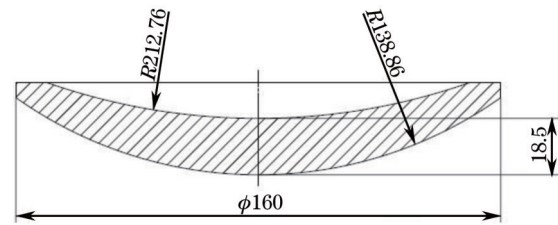


图4 镜片尺寸

Fig.4 Dimensions of lens

片之间采用16点均布胶粘的方式固定,胶层厚度控制在15~30  $\mu\text{m}$ ,进而带动光学镜片产生Z5像散。

### 3 主动变形镜仿真分析

#### 3.1 有限元模型

主动变形镜主要通过驱动器驱动使内框产生一定的变形,通过内框力的传递使镜片产生像散。针对结构模型,简化不必要的结构,建立变形镜的有限元模型如图5所示。材料属性如表1所示。柔性铰链关键尺寸如表2所示。采用四面体10节点单元进行网格划分,为了更准确的体现结构特性,对柔性铰链以及胶层进行网格细化,使离散模型特性更接近真实结构性能。同时采用分割面的方式在内框设定驱动力加载区域,分析过程中在4个驱动位置分别施加5~50 N的驱动力,增量为5 N,并将外框底面固定,分析主动变形镜的性能。

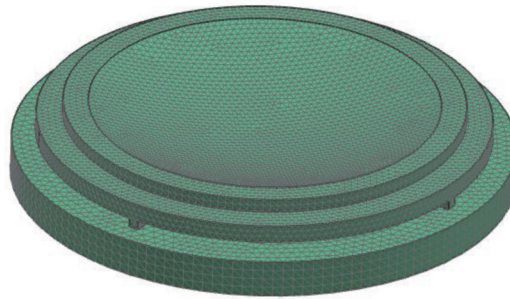


图5 有限元分析模型

Fig.5 Finite element analysis model

表1 材料的物理属性

Table 1 Material properties

Parts	Material	Young modulus /GPa	Poisson ratio	Density /(kg/m <sup>3</sup> )
Cell	430F	200	0.27	7700
Lens	SiO <sub>2</sub>	73	0.17	2205
Glue	RTV	1.5	0.499	1050

表2 主动变形镜柔性铰链尺寸

Table 2 Dimensions of flexure hinge of active deformable lens

Length /mm	Width /mm	High /mm
19	4	4

#### 3.2 主动变形镜性能指标分析

##### 3.2.1 主动变形镜像散补偿能力分析

针对变形镜有限元模型,在周向分布的4个驱动臂分别施加相同的驱动力,得到光学镜片有限元模型每个节点的位移,利用条纹泽尼克多项式拟合光学镜片上表面的面形。图6所示为驱动力为50 N时主动变形镜像差组成成分,主要是Z5像散、Z12二级像散及高阶像差。

图7所示为驱动力与像差成分之间的关系,随着压电驱动器驱动力的增加,产生Z5像散面形均方根(RMS)值随之线性增加,补偿能力为RMS 16.74 nm/N。根据条纹泽尼克多项式拟合可知,Z12属于二级像

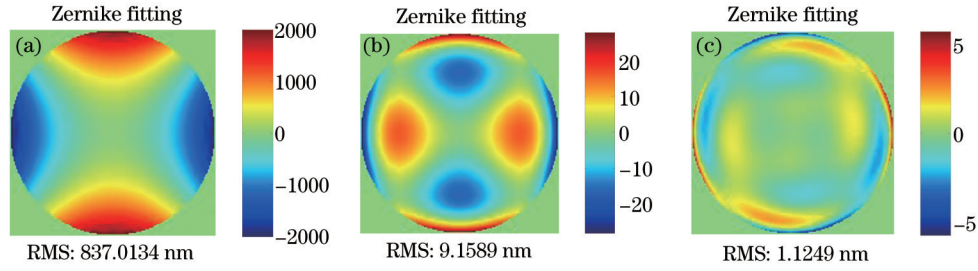


图6 主动变形镜像差。(a) Z5像散RMS值;(b) Z12像散RMS值;(c) Z>6除Z12像散RMS值  
Fig.6 Aberration of active deformable lens. (a) RMS of Z5 astigmatism; (b) RMS of Z12 astigmatism;  
(c) RMS of Z>6 without Z12

散,与Z5存在一定的关系,即此种机构产生一定Z5的同时会伴随一定的Z12,而大部分高阶像散可以通过铰链的设计有效地降低,根据图7可知驱动力与Z12、其余高阶像差的关系为0.183 nm/N、0.022 nm/N。即产生1 nm像散的同时,会产生0.01 nm二阶像散和0.001 nm的高阶像差,其对所需的Z5像散影响可忽略,满足光刻物镜的补偿要求。

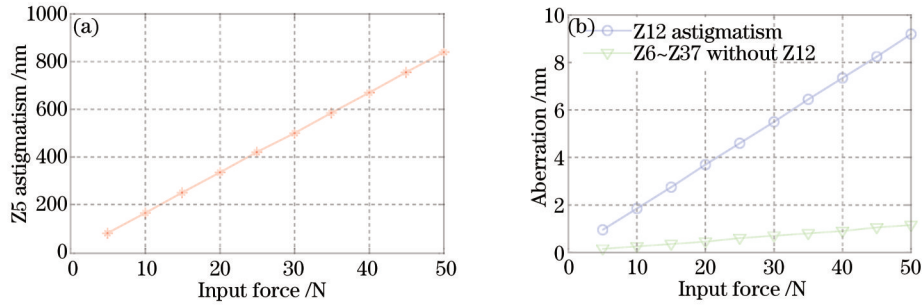


图7 驱动力与像差关系。(a) 驱动力与Z5像散关系;(b) 驱动力与高阶像差关系  
Fig.7 Relationship of drive force and aberration. (a) Relationship of drive force and Z5 astigmatism;  
(b) relationship of drive force and high order aberration

### 3.2.2 主动变形镜刚体位移误差分析

光学镜片刚体位移包括三个坐标方向的平移以及绕坐标系的旋转,不考虑光学镜片本身变形导致的节点位移。光学镜片产生刚体位移会导致其重心偏移,进而影响整个光学系统的成像质量。针对设计的主动变形镜,在周向分布的4个驱动臂上分别施加相同的位移输入,得到光学镜片上表面各节点的原始位置坐标与位移。为方便求解光学镜片上表面的刚体位移,将当前坐标系转换为以球面顶点为原点的笛卡尔坐标系,即将上表面所有节点坐标减去球面顶点坐标值。坐标转换为

$$x_i = x - x_s, \quad y_i = y - y_s, \quad z_i = z - z_s, \quad (1)$$

式中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为原坐标系下各节点初始位置坐标,  $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$  为新坐标系下各节点初始位置坐标,  $x_s$ 、 $y_s$ 、 $z_s$  为光学镜片上表面球面顶点在原坐标系下的位置坐标。

在球面顶点坐标系下,将光学镜片作为刚体考虑,施加驱动力后光学镜片表面面形发生一定刚体位移  $T_x$ 、 $T_y$ 、 $T_z$ 、 $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$ , 变形后拟合球面上各节点与变形前各节点坐标关系为

$$\Delta x_i = T_x + z_i R_y - y_i R_z, \quad (2)$$

$$\Delta y_i = T_y - z_i R_x + x_i R_z, \quad (3)$$

$$\Delta z_i = T_z + y_i R_x - x_i R_y, \quad (4)$$

式中  $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$  分别为球面顶点坐标系下各节点坐标值,  $T_x$ 、 $T_y$ 、 $T_z$  分别为沿  $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$  方向的平移,  $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$  分别为绕  $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$  方向的旋转。  $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$ 、 $\Delta z_i$  分别为光学镜片刚体沿  $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$  坐标方向的平移。

为更准确计算刚体位移,建立偏差函数  $E$ ,定义  $E$  等于有限元分析节点位移与拟合球面节点差值的平方和,一定存在一组刚体位移参数使得偏差函数  $E$  最小:

$$E = \sum_i w_i (dx_i - \Delta x_i)^2 + w_i (dy_i - \Delta y_i)^2 + w_i (dz_i - \Delta z_i)^2, \quad (5)$$

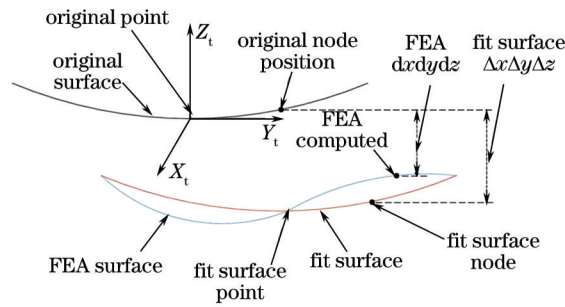


图8 刚体位移与有限元位移关系

Fig.8 Relationship of rigid movement and finite element analysis displacement

$$\frac{\partial E}{\partial T_x} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial T_y} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial T_z} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial E}{\partial R_x} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial R_y} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial R_z} = 0, \quad (7)$$

式中  $dx, dy, dz$  为有限元分析节点位移。以上公式联立求解即可得到镜片表面面形的刚体位移  $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z$ 。进而得到光学镜片的刚体位移与补偿像散之间关系如图9、10所示。

分析图9数据可知,随着补偿像散的增加, $X, Y, Z$ 向刚体平移随之增大,当补偿1 nm像散时,光学镜片会产生 $X$ 方向平移0.00058 nm, $Y$ 方向平移0.00063 nm, $Z$ 方向平移0.00016 nm。分析图10数据可知,随着补偿像散的增加,绕 $X, Y, Z$ 方向旋转随之增大,当补偿1 nm像散时,光学镜片会产生绕 $X$ 方向旋转0.0027 ms,绕 $Y$ 方向旋转0.0021 ms,绕 $Z$ 方向旋转0.0013 ms。刚体位移无论是平移还是旋转,主动变形镜在 $Z$ 方向上变化较小,在 $X, Y$ 方向上更为敏感,但是引入误差与产生像散相差3个数量级,对光刻物镜的工作影响可忽略不计,说明主动变形镜在刚体位移方面满足光刻物镜的使用需求。

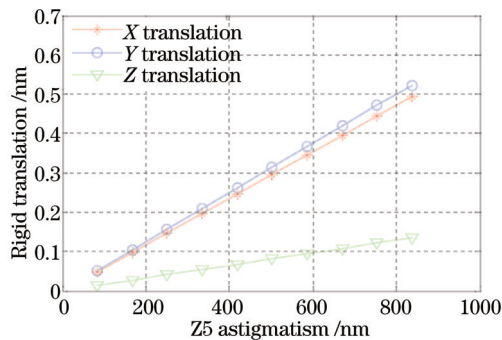


图9 刚体平移与补偿像散关系

Fig.9 Relationship of translation and Z5 astigmatism

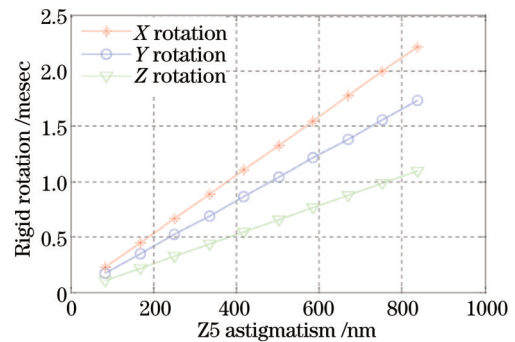


图10 刚体旋转与补偿像散关系

Fig.10 Relationship of rigid rotation and Z5 astigmatism

### 3.2.3 主动变形镜最大应力分析

主动变形镜作为可调光学组件,在光刻物镜整个寿命周期内需要不断调节,结构的最大应力决定着主动变形镜的寿命周期,图11所示为50 N驱动力下主动应力云图。镜框结构最大应力发生在铰链连接处,在驱动过程中,柔性铰链产生一定的扭转,使铰链与内框连接处应力较大,光学镜片最大应力发生在光学镜片中心。驱动力与镜框、光学镜片最大应力之间关系如图12所示,均呈现较强的线性关系,线性度为0.116 MPa/N

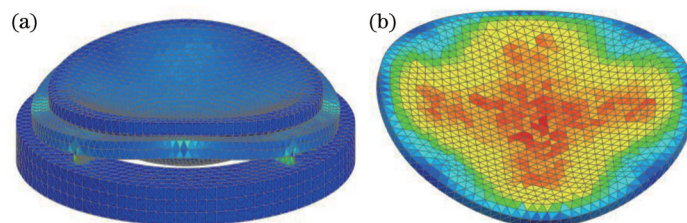


图11 主动变形镜应力云图。(a) 镜框应力云图;(b) 镜片应力云图

Fig.11 Stress distribution of active deformable lens. (a) Stress distribution of cell; (b) stress distribution of lens

和 0.017 MPa/N。当施加 50 N 驱动力时,镜框最大应力为 5.799 MPa,镜片最大应力为 0.852 MPa,均远小于镜框与光学镜片的屈服应力。

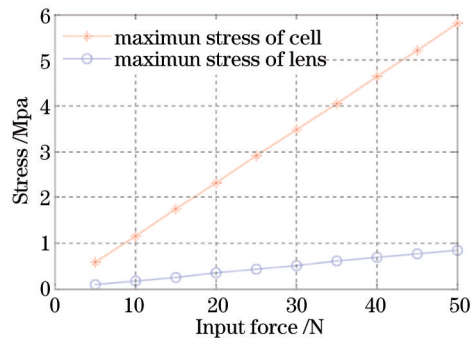


图 12 驱动力与最大应力关系

Fig.12 Relationship of drive force and maximum stress

### 3.2.4 主动变形镜模态分析

为满足光刻物镜工作时的振动环境要求,物镜整体的固有频率需高于 100 Hz,因此作为其中主要部件的主动变形镜固有频率应该更高,至少高于 200 Hz,所以针对主动变形镜结构进行模态分析,得到主动变形镜前六阶固有频率如图 13 所示。

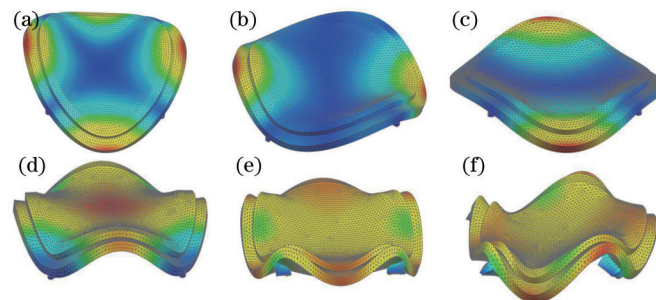


图 13 主动变形镜的固有振型。(a) 一阶振型; (b) 二阶振型; (c) 三阶振型; (d) 四阶振型; (e) 五阶振型; (f) 六阶振型

Fig.13 Natural vibration modes of active deformable lens. (a) First mode; (b) second mode; (c) third mode; (d) fourth mode; (e) fifth mode; (f) sixth mode

分析模态可知,主动变形镜第一阶固有频率约为 2555 Hz,远高于光刻物镜固有频率,避免调节过程中产生共振,其前六阶振型代表了主动变形镜的刚度分布情况,第一阶为马鞍状变形,对应泽尼克像差中的 Z5 初级像散,第二、三阶为倾斜振型,对应泽尼克像差中的倾斜像差,四阶到六阶对应像差中的四叶像散及更高级的像散,说明了主动变形镜刚度分布适合补偿像散,同时通过驱动器控制避免高阶像差的产生,满足光刻物镜的使用需求。

## 4 结 论

为补偿光刻物镜不均匀照明引入的像散,设计一种低伴随误差的主动变形镜。采用铰链连接的方式连接主动变形镜的内框和外框,并在铰链之间分布两组不同方向的驱动器,通过支撑结构进行力的传递,进而补偿光刻物镜所需要的像散。利用有限元分析的方法对主动变形镜的调节能力、刚体位移、模态及最大应力进行分析。分析结果表明,主动变形镜初级像散调节能力为 RMS 16.74 nm/N,伴随产生的高阶像差仅为 RMS 0.001 nm/nm,三个方向刚体平移仅为 0.00058、0.00063、0.00016 nm/nm,三个方向的刚体旋转仅为 0.0027、0.0021、0.0013 ms/nm,主动变形镜一阶固有频率达到 2555 Hz,最大应力为 0.852 MPa,满足光刻物镜的像散补偿需求。

### 参 考 文 献

- 1 Ferrari M, Lemaître G R. Active optics methods for highly aspheric mirrors—manufacturing the quaternary mirror of the OWL project[J]. SPIE, 2000, 4003: 34–42.
- 2 Lemaître G R. Review on active optics methods: what can we do by elastic bending[C]. SPIE, 2010, 7655: 76550A.

- 3 Schneider F, Muller C, Wallrabe U. A low cost adaptive silicone membrane lens[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, 10(4): 044002.
- 4 Wen Qiao, Tsai F S, Cho S H. Fluidic intraocular lens with a large accommodation range[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2009, 21(5): 304–306.
- 5 Son H M, Kim M Y, Lee Y J. Tunable-focus liquid lens system controlled by antagonistic winding-type SMA actuator[J]. *Opt Express*, 2009, 17(16): 14339–14350.
- 6 Su Dingqiang, Cui Xiangquan. Active optics key technology of the new generation telescopes[J]. *Astronomy Evolution*, 1999, 17(1): 1–14.  
苏定强, 崔向群. 主动光学新一代大望远镜的关键技术[J]. *天文学进展*, 1999, 17(1): 1–14.
- 7 Cui Xiangqun, Su Dingqiang, Wang Yanan, *et al.*. Experiment system of LAMOST active optics[C]. *SPIE*, 2004, 5489: 974–985.
- 8 Li Hongzhuang, Lin Xudong, Liu Xinyue, *et al.*. Experiment system of 400 mm thin mirror active optics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(9): 2077–2083.  
李宏壮, 林旭东, 刘欣悦, 等. 400 mm 薄镜面主动光学实验系统[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2077–2083.
- 9 Li Hongzhuang, Zhang Zhenduo, Wang Jianli, *et al.*. Active surface-profile correction of 620 mm thick-mirror based on flotation support[J]. *Acta Optical Sinica*, 2013, 33(5): 0511001.  
李宏壮, 张振铎, 王建立, 等. 基于浮动支撑的620 mm薄反射镜面形主动校正[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0511001.
- 10 Li Hongzhuang, Wang Jianli, Lin Xudong, *et al.*. Active optics experiment system with thin-mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(6): 120–125.  
李宏壮, 王建立, 林旭东, 等. 薄反射镜主动光学实验系统[J]. *光电工程*, 2009, 36(6): 120–125.
- 11 Wang Fuguo, Li Hongzhuang, Yang Fei. Ability of the thin mirror active optics to correct optical astigmatism[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(5): 871–875.  
王富国, 李宏壮, 杨 飞. 薄镜面主动光学对光学像差的校正能力分析[J]. *光子学报*, 2010, 39(5): 871–875.
- 12 Yuan Wenquan, Gong Yan. Study on characteristics of aberrations for an active liquid lens in lithographic objective lens [J]. *Acta Optic Sinica*, 2011, 31(12): 1222003.  
袁文全, 巩 岩. 光刻物镜中主动液体透镜的像差特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1222003.
- 13 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.  
杨华锋, 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.
- 14 Chen Xindong, Zheng Ligong, Luo Xiao, *et al.*. A deformable mirror with 9 actuated points for low order aberration correction design and experiments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322001.  
陈新东, 郑立功, 罗 霄, 等. 校正低阶像差的9点促动变形镜-设计与实验[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322001.

栏目编辑: 韩 峰