

调节力对偏心调节机构中透镜面形的影响

张德福 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 针对深紫外光刻投影物镜的像质补偿要求,对偏心调节时的透镜进行受力分析,基于柔度矩阵法设计了一种柔性多弹片透镜支撑结构,研究了透镜面形随调节力的变化规律,采用有限元法分析了调节力与透镜面形峰谷(PV)值、均方根(RMS)值和 Fringe Zernike 多项式系数之间的关系。计算结果表明:调节时通过降低调节力的大小,可以控制面形劣化程度。采用具有吸收调节力功能的柔性支撑结构后,在 50 N 的驱动力偏心调节时,透镜上表面面形 PV 值和 RMS 值分别为 2.704 nm 和 0.528 nm,透镜下表面面形 PV 值和 RMS 值分别为 2.984 nm 和 0.571 nm。透镜面形的 PV 值、RMS 值及 Fringe Zernike 多项式系数随调节力线性变化,但是调节力不会改变各种像差的性质,它引入的透镜像差主要为像散。

关键词 光学器件;深紫外光刻;投影物镜;像差补偿;偏心调节机构;调节力;面形

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0716004

Effect of Adjusting Force on Surface Figure of Lens in Eccentric Adjusting Mechanism

Zhang Defu 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 For aberration compensation requirement of projection objective lens in deep ultraviolet lithography, the stress analysis of the lens in eccentric adjusting is carried out. A kind of lens supporting with multi-flexure is designed based on compliance matrix method. Regularity between the adjusting force and the surface figure of the lens is investigated. Relationship among the adjusting force, the peak valley (PV) value, the root mean square (RMS) value and Fringe Zernike coefficients of the lens are analyzed using the finite element method. The results show that the aberration can be restricted by reducing the adjusting force. By using flexible support mechanism for absorbing adjusting force, the PV value and RMS value of the upper surface of the lens are 2.704 nm and 0.528 nm, the lower surface are 2.984 nm and 0.571 nm respectively in full stroke eccentric adjusting. The PV value, the RMS value and Fringe Zernike coefficients of the lens vary linearly with the adjusting force. The adjusting force does not change the nature of the aberration. The aberration is mainly astigmatism.

Key words optical devices; deep ultraviolet lithography; projection lens; aberration compensation; eccentric adjusting mechanism; adjusting force; surface figure

OCIS codes 110.5220; 120.4640; 220.1000

1 引 言

用于极大规模集成电路(ULSI)制造的深紫外(DUV)光刻投影物镜的精度要求很高^[1-2]。但是,在装配及长时间工作过程中,会因自重^[3]、装配应力、系统外部振动^[4]、温度和气压变化^[5]等导致光刻

系统性能下降。为了补偿由上述原因导致的部分彗差和像散等旋转不对称误差,通过调节投影物镜的部分透镜的位置进行补偿^[6-8]。然而,传统的光学支撑结构在工作状态下并不能调节透镜的位置^[9],有必要设计专用的偏心调节机构。通常,投影物镜

收稿日期: 2013-10-31; 收到修改稿日期: 2013-12-02

基金项目: 国家科技重大专项基金(2009ZX02205)

作者简介: 张德福(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事光学精密仪器结构设计方面的研究。

E-mail: zhangdf@sklao.ac.cn

中包括 3~10 个用于偏心补偿的透镜。

与固定支撑的透镜相比,用于偏心调节的透镜的面形不但受到重力影响,而且受到偏心调节力的影响。当环境不变时,重力对面形的影响一定,面形随着调节力的变化而变化。如果面形受调节力影响过于敏感,偏心补偿的效果会被削弱,系统的波像差甚至不能得到改善。因此,有必要分析调节力对面形的影响水平。目前,针对调节力与透镜面形之间关系的研究主要集中在主动变形透镜领域,如光学玻璃薄板液体透镜^[10]、薄膜液体透镜^[11]、机械式浸润透镜^[12]、像散补偿平面镜^[13]等。主动光学利用外部调节力改变透镜的面形,而偏心调节则需要降低调节力对透镜面形的影响。

本文基于柔度矩阵法设计了一种具有吸收调节力功能的柔性多弹片透镜支撑结构,用于一体式偏心调节机构中以减小调节力对透镜面形的影响。开展了调节力与透镜面形峰谷(PV)值和均方根(RMS)值之间的变化规律的研究,推导了系统的调节力敏感度矩阵,为透镜偏心调节和机构设计提供参考。

2 机构组成

偏心调节机构中的透镜采用平凸透镜,其结构如图 1 所示。透镜的直径 $\phi=160$ mm,凸面曲率半径 $R=320.16$ mm,中心厚 $d=20.16$ mm,材料为熔石英,参数如表 1 所示^[14]。

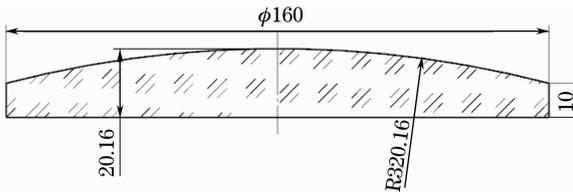


图 1 透镜结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of the lens

透镜偏心调节机构主要由镜筒、镜框、透镜和柔性支链组成,如图 2 所示。材料为殷钢,性能参数如表 1 所示^[14]。镜框与镜筒之间通过 4 个成 90° 径向均布的柔性支链连接,其尺寸如图 3 所示,结构参数如表 2 所示。除透镜外,该机构可由整块殷钢材料经电火花线切割加工。镜筒作为固定机架,两个压电驱动器成 90° 安装在镜筒外圆周上。相应地,在圆周上成 90° 布置两个电容位移传感器。驱动力通过支链传递到镜框,推动镜框运动。图 2 中的所有柔性铰链都是转动铰链。在镜框上布置 8 个柔性弹片支撑透镜。通过合理调节两个驱动器的输入位移

量,机构可以实现设计要求的平面范围内的偏心调节。在工作状态下,由于支撑的弹片并不能对透镜进行偏心调节,需要通过驱动器驱动图 2 中的柔性支链实现偏心调节。

表 1 材料参数表

Table 1 Parameters of materials

Material	Young's modulus $E / (10^{10} \text{ Pa})$	Poisson's ratio ν	Density $\rho /$ $(10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$
Fused silica	7.3	0.17	2.2
Invar	14.1	0.259	8.05

表 2 结构参数表

Table 2 Parameters of structure

Parameter	Value
l_1 / mm	7
l_2 / mm	18
l_3 / mm	9
l_4 / mm	9
l_5 / mm	15.5
l_6 / mm	14.8
l_7 / mm	24
l_8 / mm	9
l_9 / mm	105.515.5

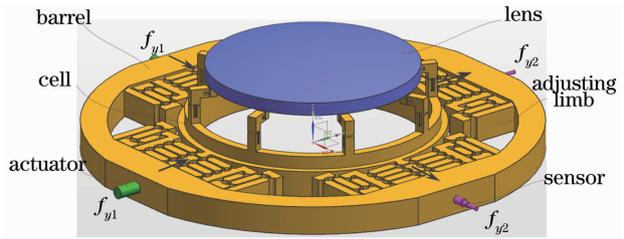


图 2 偏心调节机构

Fig. 2 Eccentric adjusting mechanism

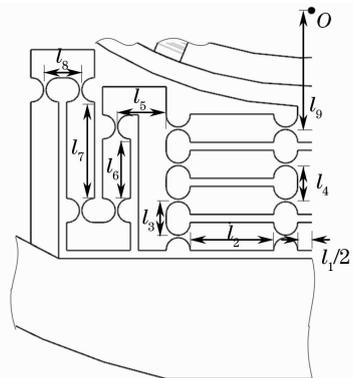


图 3 支链结构参数

Fig. 3 Parameters of the limbs structure

3 透镜受力分析与支撑结构设计

3.1 偏心调节时透镜受力分析

在偏心调节时,透镜的受力包括透镜自身的重

力(\mathbf{G})、弹片的支撑力(\mathbf{F})以及从镜框传递进来的径向调节力(f_{x1} 、 f_{x2} 、 f_{y1} 、 f_{y2})，如图2和图4所示。这三种力都将影响透镜上下表面的面形。当结构确定后，重力和支撑力对面形的影响一定，面形随着调节力大小的改变而改变，因此下面分析调节力对面形的影响。 f_{x1} 和 f_{y1} 是驱动力，既可以向内推动机构，也可以向外拉动镜框，使透镜能够实现平面内的

前进和后退。定义向内推动机构时力的方向为正，朝外拉动时为负。当 f_{x1} 单独驱动时， $f_{x1} = f_{x2}$ ，透镜沿着 X 轴平移。当 f_{x1} 和 f_{y1} 同时驱动时，透镜可以实现4个象限的平移，并有 $f_{x1} = f_{x2}$ ， $f_{y1} = f_{y2}$ 。所以，通过控制调节力 f_{x1} 和 f_{y1} ，可以实现矩形工作空间内的 XY 调节。

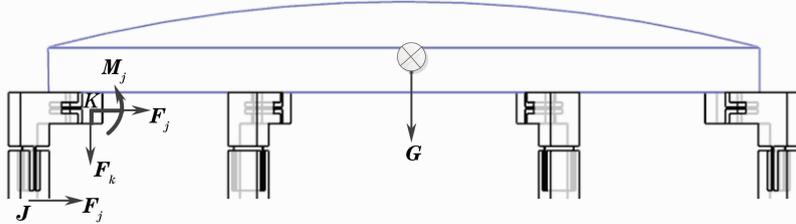


图4 支撑结构与受力示意图

Fig. 4 Sketch of the supporting structure and the force

3.2 透镜支撑结构设计

如果透镜与镜框直接固连，镜框变形将完全传递到透镜上。如果在透镜与镜框之间设置柔性结构，就可以吸收镜框上的变形^[2,9,15]。为了分别吸收镜框径向变形和轴向变形，同时考虑加工的经济性和可行性，每个支撑弹片由一个沿着径向的柔性铰链和一个沿着轴向的柔性铰链串联组成。每个铰链两侧设计了限位结构，对于径向和轴向载荷有过载保护的功能，所有弹片通过电火花线切割在整体殷钢镜框上加工而成。设计的柔性支撑弹片如图4所示，每个铰链如图5所示。透镜支撑时弹片会产生轴向变形，即使弹片之间在高度方向上存在误差，透镜的重力也能均匀地作用在各弹片上，从而降低对弹片加工时高度一致性的要求。通过合理优化支撑弹片结构尺寸和数量可以确保各弹片承重均匀性，进而提升面形质量。下面分别确定支撑弹片结构尺寸和数量。

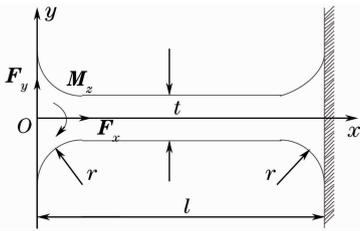


图5 铰链结构参数

Fig. 5 Parameters of the flexure hinge

由图5可知，当铰链沿着 xy 平面法线方向的厚度一定时，其几何尺寸由铰链切口处的宽度 t ，铰链切口半径 r 和切口长度 l 决定。通过分析单个铰链在外力/力矩作用下的转动柔度，即可对铰链进行合理的设计。以弹片 JK 为例，偏心调节时弹片受力如

图4所示。镜框上 J 点受到水平驱动力 \mathbf{F}_J 的作用，将 \mathbf{F}_J 向 K 化简， J 端固定， K 端看成自由端。 K 端的支撑弹片受到水平力 \mathbf{F}_J 、重力分量 \mathbf{F}_k 和弯矩 \mathbf{M}_j 作用。透镜上和 K 处配合的区域受力与弹片相反。根据柔度、载荷和位移之间的关系^[16]，

$$\boldsymbol{\delta} = \mathbf{C}\mathbf{F} = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{x\theta} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{y\theta} \\ C_{\theta x} & C_{\theta y} & C_{\theta\theta} \end{bmatrix} \mathbf{F}, \quad (1)$$

式中 C_{xx} 表示在铰链自由端 x 方向上施加的单位集中力在 x 方向产生的位移， C_{xy} 表示在铰链自由端 y 方向上施加的单位集中力在 x 方向产生的位移， $C_{x\theta}$ 表示在铰链自由端绕着 z 轴方向上施加的弯矩在 x 方向产生的位移，其他柔度系数的含义依次类推。 $\mathbf{F} = [\mathbf{F}_x \mathbf{F}_y \mathbf{M}_z]^T$ 为 $O-xy$ 平面内施加在铰链上 O 点的载荷。令铰链 J 和 K 在局部坐标系 $J-xy$ 和 $K-xy$ 中的柔度分别为 \mathbf{C}_J 和 \mathbf{C}_K ，将柔度 \mathbf{C}_K 从坐标系 $K-xy$ 变换到坐标系 $J-xy$ 下，

$$\mathbf{C}_K^J = \mathbf{T}_K^J \mathbf{C}_K (\mathbf{T}_K^J)^T, \quad (2)$$

则自由端 K 相对于固定端 J 的柔度为，

$$\mathbf{C}_{KJ} = \sum_{i=1}^2 \mathbf{C}_i^J = \sum_{i=1}^2 \mathbf{T}_i^J \mathbf{C}_i (\mathbf{T}_i^J)^T, \quad (3)$$

式中 \mathbf{C}_i^J 表示铰链 i 在坐标系 $J-xy$ 中的柔度， \mathbf{C}_i 表示铰链 i 在其局部坐标系中的柔度。 \mathbf{T}_i^J 是从铰链 i 的局部坐标系到坐标系 $J-xy$ 的柔度变换矩阵。同理，可以得到其他支撑弹片自由端的挠度，进而得到 n 个支撑弹片的并联柔度，

$$\mathbf{C} = \left[\sum_{i=1}^n (\mathbf{C}_{KJ,i})^{-1} \right]^{-1}, \quad (4)$$

从而由(1)式可以求得透镜位移，

$$\delta = CF. \quad (5)$$

由于(1)式中的柔度系数方程比较复杂,为便于观察参数 l, r, t 对 C 中柔度系数的影响,将该方程绘成曲线如图 6 所示。可见,当 r 一定时, t 对柔度系数 C_{xx} 、 C_{yy} 、 $C_{y\theta}$ 和 $C_{\theta\theta}$ 的影响比 l 大;当 l 一定时, t 对柔度系数 C_{xx} 、 $C_{y\theta}$ 和 $C_{\theta\theta}$ 的影响比 r 大, t 对柔度系数 C_{yy} 的影响比 r 小;当 t 一定时, l 对柔度系数 C_{xx} 和 $C_{\theta\theta}$ 的影响更大, r 对 C_{yy} 的影响更大, l 和 r 对 $C_{y\theta}$ 的影响都比较大。结构优化的目标是得到最优化的面形,故通过分析面形对弹片尺寸的敏感程度来确定最终结构。当长度 l 从 4 mm 变化到 16 mm 时,透镜上表面的 PV 值从 22.175 nm 变化到 53.386 nm, RMS 值从 6.159 nm 变化到 14.156 nm。当 l 大于 10 mm 时,面形劣化速率加快。当弹片厚度 t 从

0.2 mm 变化到 0.8 mm 时,上表面的 PV 值从 63.189 nm 变化到 18.953 nm, RMS 值从 18.158 nm 变化到 6.231 nm。当 t 大于 0.5 mm 时,其对面形的改善速度变缓。当弹片倒角半径 r 从 0.1 mm 变化大 0.5 mm 时,面形 PV 值从 35.325 nm 变化到 27.934 nm, RMS 值从 11.416 nm 变化到 8.124 nm,面形变化幅度不大。当弹片宽度 w 从 3 mm 变化到 10 mm 时,透镜上表面的 PV 值从 41.148 nm 变化到 22.904 nm, RMS 值从 17.812 nm 变化到 6.109 nm。其中,上表面面形对 l 和 t 的变化敏感度更高,偏心调节时镜框上最大应力对 r 的变化敏感,宽度 w 除了影响面形外,还影响线切割加工的难易程度。综合考虑,取

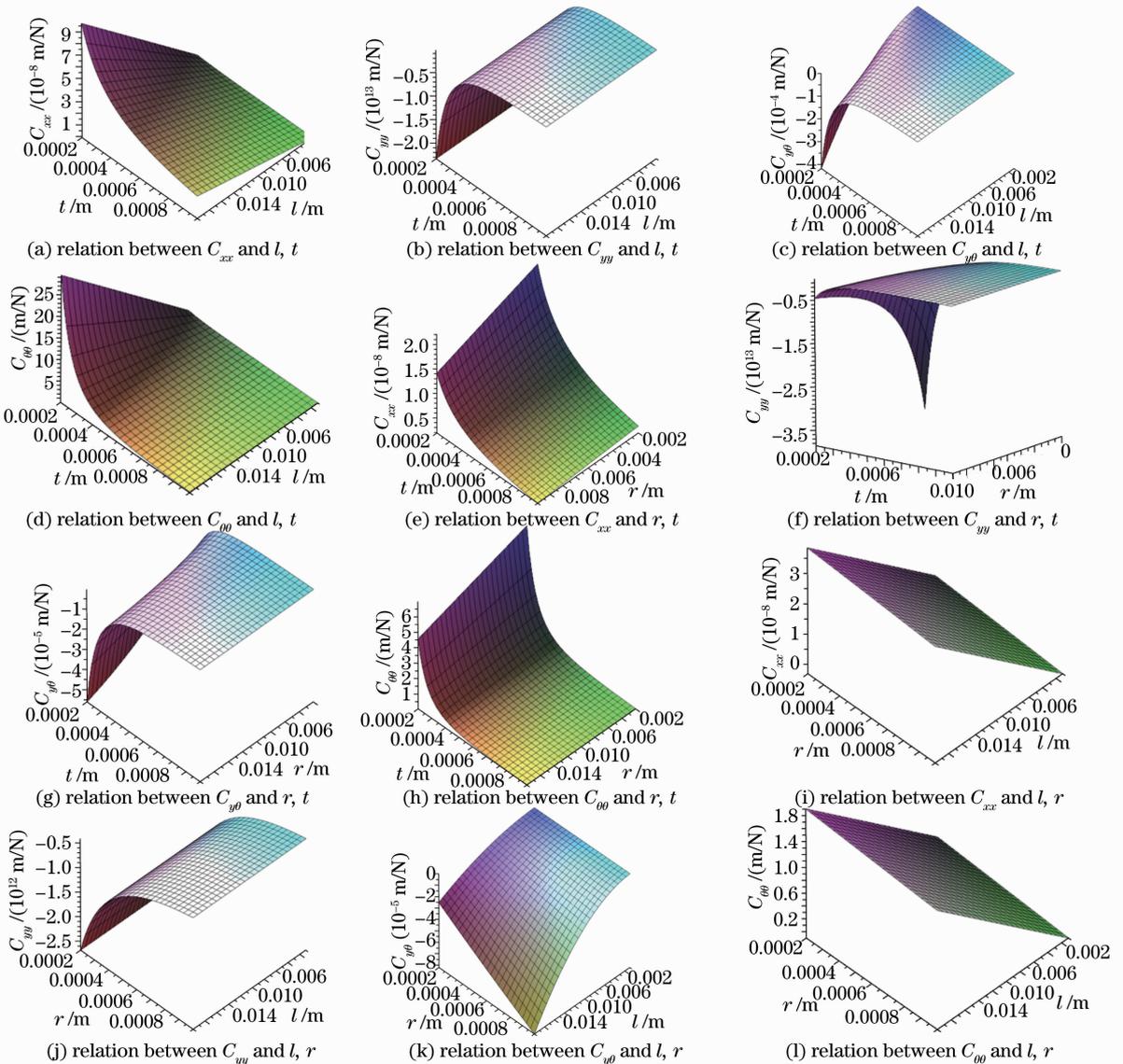


图 6 铰链柔度与结构尺寸的关系

Fig. 6 Relationship between compliance and structure size of the flexure hinge

$w=7 \text{ mm}, t=0.5 \text{ mm}, r=0.5 \text{ mm}, l=10 \text{ mm}$ 。

确定了支撑弹片结构尺寸之后再确定其数量。当弹片数量越多时,整体弹片的轴向刚度越大,单个弹片的轴向柔度越小,对弹片加工的高度一致性要求越高,透镜的面形越好,同时提高机构的固有频率^[9]。当弹片数量 n 分别取 3,4,6,8,12,16,24 时,透镜上表面的面形 PV 值从 44.015 nm 变化到 25.148 nm, RMS 值从 16.516 nm 变化到 6.348 nm。透镜下表面的 PV 值从 49.905 nm 变化到 26.046 nm, RMS 值从 17.148 nm 变化到 6.617 nm。当 n 大于 8 时,增加弹片的数量对面形的改善变得缓慢,只会增加工艺上的难度和加工成本。所以,支撑弹片数量不是越多越好,故取 $n=8$ 。此时,透镜的上表面 PV 值和 RMS 值分别为 27.934 nm 和 8.124 nm,透镜下表面的 PV 值和 RMS 值分别为 29.614 nm 和 8.484 nm,且面形主要为 Power。

4 透镜偏心调节引入的像差分析

物镜在集成装配和安装运输阶段可能会偏心移动,从而导致水平像移,同时光线产生角偏差。图 7 中由透镜偏心导致的像移量为^[17]

$$\epsilon \cong \frac{D_i}{2NA_{im}} \cdot \Delta\theta_i, \quad (6)$$

其中,

$$\Delta\theta_i = \frac{\Delta x_i}{f_i}, \Delta x_i = \frac{\Delta x_1}{1-m}, \quad (7)$$

则有

$$\epsilon \cong \frac{D_i}{2NA_{im}} \cdot \frac{\Delta x_1}{1-m} \cdot \frac{1}{f_i}, \quad (8)$$

式中 NA_{im} 为像面数值孔径, D_i 为光束直径, $\Delta\theta_i$ 为角偏差, f_i 为焦距, Δx_i 为焦点偏心量, Δx_1 为透镜偏心量, m 为放大率。对于设计好的透镜,其 NA_{im} 、 f_i 、 m 是定值,假定照明是确定的,则 D_i 也是确定的,可见,像移 ϵ 和偏心量 Δx_1 成正比,所以可以通过减小

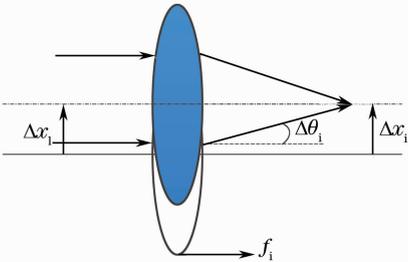


图 7 透镜偏心移动导致的水平像移

Fig. 7 A lateral image shift caused by lateral motion of a lens

偏心量减小像移。

为了降低偏心补偿时调节力对像差的影响,首先建立其与像差之间的数学模型。这里仍然选取 Fringe Zernike 多项式作为像质评价函数,推导调节力敏感度矩阵^[18]。然后分析光学元件的像差,得到 37 项 Zernike 多项式系数。接着利用敏感度矩阵,计算出调节力的方向和大小,最后调节光学元件。调节力和像差之间的关系可以用数学模型表示为

$$\mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{F} = \Delta \mathbf{Z}, \quad (9)$$

其中,

$$\Delta \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \Delta Z_1 \\ \vdots \\ \Delta Z_m \end{bmatrix}, \Delta \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \vdots \\ \Delta F_n \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial z_1}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial z_1}{\partial f_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial z_m}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial z_m}{\partial f_n} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 $\Delta \mathbf{F}$ 为调节力增量, $\Delta \mathbf{Z}$ 为光学元件的像差变化量, \mathbf{A} 为灵敏度矩阵,它表示光学元件像差对调节力的敏感程度。当偏心调节机构设计完成后,只要偏心调节力不超出调节行程,灵敏度矩阵就唯一确定,因此在机构设计阶段就可以计算出该系统的灵敏度矩阵,一方面通过分析像差对调节力的敏感程度,优化结构设计;另一方面控制调节力的大小,指导偏心调节,使调节后的面形满足光学设计指标。当像差已知时,根据敏感度矩阵可以计算需要的调节力。

为了定量地评估调节力引入像差种类和大小,分析偏心调节力与 Zernike 系数表示的各种像差之间的规律。首先在 NX NASTRAN 中建立机构的有限元模型,施加边界约束和载荷,提取仿真结果中的透镜上下表面的节点位移。然后导入到光机耦合分析程序中,生成 37 项 Fringe Zernike 多项式系数,导入到 Metropro 中,计算得到面形 PV 值和 RMS 值。根据不同调节力时的 Zernike 系数绘制曲线,并找出各类像差随调节力的变化规律,从而通过控制调节力控制引入的像差大小,为投影物镜多镜框集成提供参考。以 Y 向调节为例,作用力范围为 $[0, +50 \text{ N}]$,增量为 10 N,计算得透镜上下表面 RMS 值、PV 值和 Zernike 系数随调节力的变化情况如图 8、图 9 和图 10 所示。分析时剔除了代表透镜刚体位移的 Z1(piston)、Z2(tilt)和 Z3(tilt)前三项 Zernike 系数。根据透镜上下表面面形 Zernike 系数和调节力,按照(9)~(11)式求出系统调节力敏

感度矩阵如图 11 所示。当调节力为 50N 时的透镜上下表面面形如图 12 所示。调节力和调节行程、耦

合误差、最大应力之间的关系如表 3 所示。

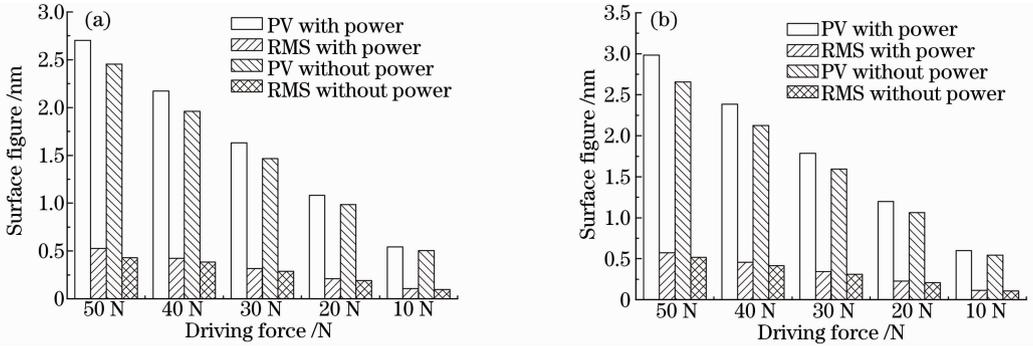


图 8 不同调节力时的上下表面面形值。(a) 上表面；(b) 下表面

Fig. 8 Upper and lower surface figure under different adjusting forces. (a) Upper surface; (b) lower surface

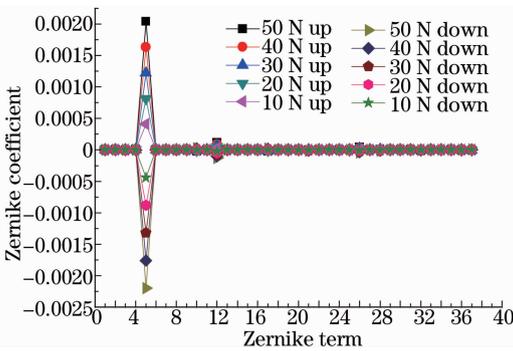


图 9 不同调节力时的上下表面 Zernike 系数
Fig. 9 Zernike coefficients of upper and lower surface under different adjusting forces

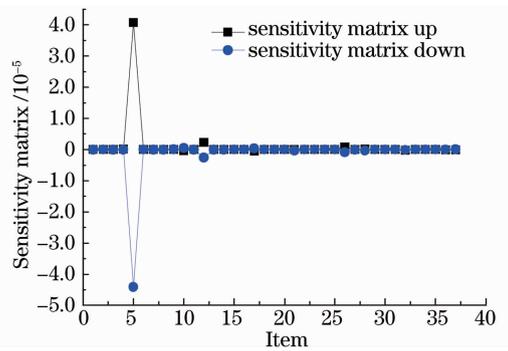


图 11 系统的调节力敏感度矩阵

Fig. 11 Sensitivity matrix about the adjusting force

由图 8、图 9 和图 10 可知，透镜面形的 RMS 值、PV 值和 Zernike 系数均随调节力线性增大。调节力可以改变面形 RMS 值和 PV 值的大小，但是不能改变像差的种类。由调节力导致的像质劣化主要体现在低阶像差，即 Zernike 系数的 Z1~Z12 项。上下表面面形的 Zernike 系数中受调节力影响较大的项包括 Z5 (Pri Astigmatism) 和 Z12 (Sec Astigmatism)。由图 11 可知，透镜上下表面面形中一阶和二阶像散对调节力敏感，其他像差对调节力变化不敏感。由图 12 可知，50 N 调节力时，透镜上表面的 RMS 值和 PV 值分别为 0.528 nm 和 2.704 nm。下表面 RMS 值和 PV 值分别为 0.571 nm 和 2.984 nm。调节引入的透镜上下表面的像差主要表现为像散。从其周向分布知，主要由调节机构中的 4 个导向支铰挤压镜框所引起。从表 3 中可见，随着调节力增大，Y 向调节行程、X 向位移、Z 向位移和机构上最大应力均线性增大，但是 X 向耦合误差和 Z 向耦合误差百分比基本不变，并且都远小于 1%。因此，机构接近完全解耦，便于偏心调节时应用闭环控制进行补偿。

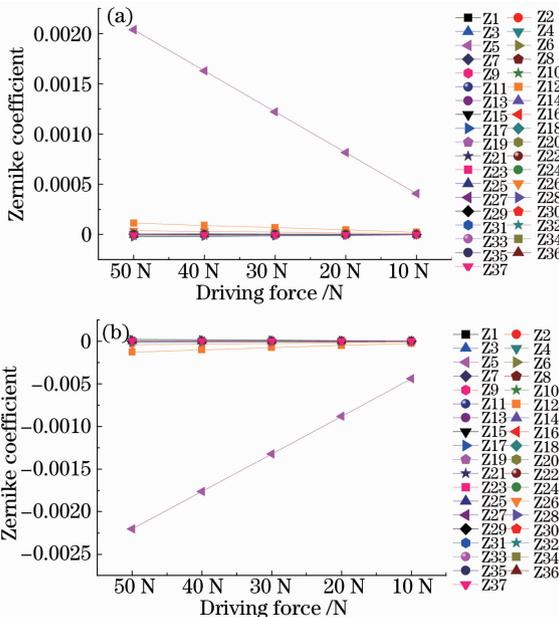


图 10 Zernike 系数随调节力线性变化。

(a) 上表面；(b) 下表面

Fig. 10 Zernike coefficients vary linearly with the adjusting force. (a) Upper surface; (b) lower surface

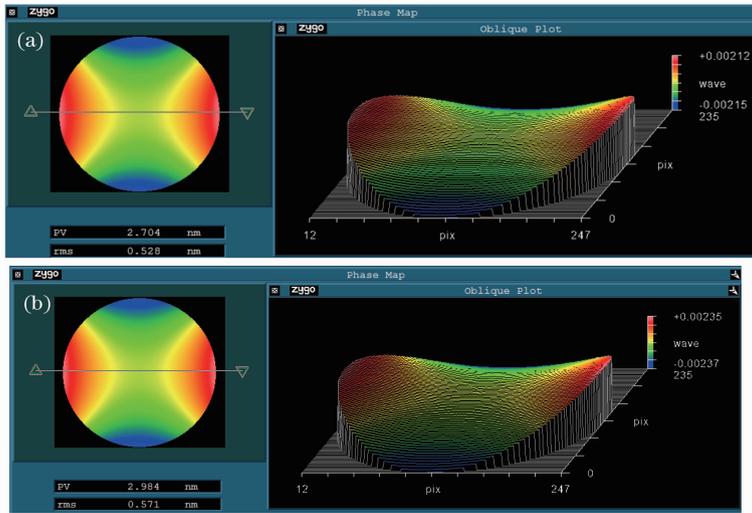


图 12 调节力为 50 N 时的透镜上下表面面形。(a) 上表面；(b) 下表面

Fig. 12 Upper and lower surface figure of the lens when the adjusting force is 50 N. (a) Upper surface; (b) lower surface

表 3 调节力和调节行程、耦合误差、最大应力之间的关系

Table 3 Relationship among the adjusting force, the adjusting stroke, the coupling error and the maximal stress

Adjusting force /N	Y-displacement / μm	X-displacement / ($10^{-3} \mu\text{m}$)	Z-displacement / ($10^{-3} \mu\text{m}$)	X coupling error / $10^{-3} \%$	Z coupling error / $10^{-3} \%$	Maximum stress /MPa
50	40.997	1.448	6.946	3.532	16.943	29.13
40	32.797	1.159	5.557	3.534	16.944	23.30
30	24.598	0.869	4.168	3.533	16.944	17.48
20	16.399	0.579	2.779	3.531	16.946	11.65
10	8.199	0.290	1.389	3.537	16.941	5.825

5 结 论

投影物镜在长期曝光工作条件下,由于折射率发生了变化,像质会变差,需要使用 XY 偏心调节机构对像质进行补偿。分析了调节力对偏心调节机构中透镜面形的影响。归纳出了透镜面形随偏心调节力变化的规律,推导了系统的调节力敏感度矩阵。结果表明:1) 透镜面形的 PV 值、RMS 值及 Fringe Zernike 系数随调节力线性变化,但是调节力不会改变像差的性质。2) 调节力引入的透镜像差主要为像散,且上下表面变形趋势一致。Zernike 系数中受调节力影响大的项主要是 Z5 和 Z12。3) 在 $[0, 50 \text{ N}]$ 驱动力范围内,机构可以实现 $0 \sim 30 \mu\text{m}$ 行程调节,并将透镜上表面面形 PV 值和 RMS 值分别控制在 2.704 nm 和 0.528 nm 以内,将透镜下表面面形 PV 值和 RMS 值分别控制在 2.984 nm 和 0.571 nm 以内。通过分析偏心调节力对单透镜面形的影响程度,确保补偿后的像差满足设计指标要求。该分析方法适用于由多个光学元件组成的复杂光学系统的集成和调节,从而降低整个光学系统的装配或调节的复杂度。不但为透镜偏心补偿和调节

机构的设计提供了参考,而且为高 NA 光刻投影物镜光学系统的装调提供了一种思路。

参 考 文 献

- 1 T Matsuyama, Y Ohmura, D M Williamson. The lithographic lens: its history and evolution[C]. SPIE, 2006, 6154: 615403.
- 2 Ni Mingyang, Gong Yan. Precise lens support and adjustment technology for DUV lithographic projection objective[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(s): 390-399.
倪明阳, 巩岩. 深紫外光刻投影物镜镜片精密支撑/调整技术[J]. 光学精密工程, 2011, 19(s): 390-399.
- 3 Zhang Jian, Liu Weiqi, Wang Rudong, *et al.*. Effect of gravity deformation on optical performance of super-accuracy Fizeau interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0712001.
张健, 刘伟奇, 王汝冬, 等. 自重变形对超高精度 Fizeau 干涉仪的光学性能影响[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0712001.
- 4 Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, *et al.*. Analysis of vibration effect to surface figure measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112001.
王汝冬, 田伟, 王平, 等. 振动对面形测量误差的影响分析[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112001.
- 5 Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, *et al.*. Effect of temperature change on the surface accuracy on bonded lens[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0808002.
王汝冬, 田伟, 王平, 等. 温度变化对胶粘结透镜面形精度的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0808002.
- 6 Ni Mingyang, Gong Yan. Transmission ratio analysis for a lateral adjustment barrel in DUV projection lens[J]. Infrared and

- Laser Engineering, 2012, 41(12): 3323—3330.
- 倪明阳, 巩 岩. 深紫外投影物镜偏心调整机构的传动比分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3323—3330.
- 7 M Trunz, R Hilgers, E Merz, *et al.*. Optical imaging device, particularly an objective, with at least one optical element US; 6191898[P]. 2001-02-20.
- 8 Zhao Lei, Gong Yan, Zhao Yang. Flexure-based X-Y micro-motion mechanism used in lithographic lens [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1425—1433.
- 赵 磊, 巩 岩, 赵 阳. 光刻投影物镜中的透镜 X-Y 柔性微动调整机构[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1425—1433.
- 9 Zhao Lei, Gong Yan. Design an analysis for the high-precision lens support structure of objective lens for lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0922001.
- 赵 磊, 巩 岩. 光刻物镜中透镜高精度支撑结构的设计及分析[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0922001.
- 10 Yuan Wenquan, Gong Yan. Study on characteristics of aberrations for an active liquid lens in lithographic objective lens [J]. Acta Optica 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.
- 11 S Xu, H Ren, Y Lin, *et al.*. Adaptive liquid lens actuated by photo-polymer[J]. Opt Express, 2009, 17(20): 17590—17595.
- 12 S Xu, Y Liu, H Ren, *et al.*. A novel adaptive mechanical-wetting lens for visible and near infrared imaging [J]. Opt Express, 2010, 18(12): 12430—12435.
- 13 Sun Zhen, Gong Yan. Performance of aberration compensation of lens active optics[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(8): 118—122.
- 孙 振, 巩 岩. 透镜主动光学的像差补偿性能[J]. 光电工程, 2012, 39(8): 118—122.
- 14 P R Yoder. Opto-Mechanical Systems Design (3rd) [M]. Florida; CRC Press, 2006.
- 15 Wang Ping, Tian Wei, Wang Rudong, *et al.*. Optimized design of high precision flexure-support barrel for reference sphere[J]. Chinese Optics, 2011, 4(4): 380—387.
- 王 平, 田 伟, 王汝冬, 等. 标准镜的高精度柔性支撑镜框的优化设计[J]. 中国光学, 2011, 4(4): 380—387.
- 16 N Lobontiu. Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges [M]. Florida; CRC Press, 2003.
- 17 K Schwertz, J H Burge. Optomechanical Design and Analysis [M]. Bellingham; SPIE Press, 2012.
- 18 Yang Xiaofei, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. Alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system by using gradual aberration optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(1): 115—120.
- 杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元. 用像差逐项优化法装调离轴三反射镜光学系统[J]. 光学学报, 2004, 24(1): 115—120.

栏目编辑: 韩 峰