

轴向调节机构中调节力对光学元件面形的影响

郭 抗 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 深紫外光刻投影物镜光学系统对光学元件的面形精度要求极高,物镜中轴向调节机构调节力对光学元件面形的影响不可忽略。针对一种一体化结构的光学元件轴向调节机构,研究了调节力对光学元件面形的影响规律。采用有限元计算的方法分析了调节力与光学元件面形均方根(RMS)值、Code V 标准 Zernike 系数之间的关系,并进一步提出了通过隔离调节力和吸收调节力以减小调节力对元件面形影响的方法。计算结果表明:光学元件面形的 RMS 值和 Zernike 系数随调节力线性变化,调节力不会导致已有像差转变为其他类型的像差,也不会导致新像差的产生;在光学元件与轴向调节机构的支撑镜框之间采用具有吸收调节力功能的柔性结构后,调节前后光学元件面形 RMS 值的变化幅度由 187%降低到了 8%以内,调节力对元件面形的影响得到了有效控制。

关键词 光学器件;调节机构;有限元分析;调节力;面形精度

中图分类号 TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1123001

Effect of Adjusting Force on Surface Figure of Optical Element in Axial Adjustment Mechanism

Guo Kang Gong Yan

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

Abstract Axial adjustment mechanism is applied in deep ultraviolet photolithography objective lens for aberration compensation. Since the surface accuracy of the optical element in the objective lens is rigorous, effect of the adjusting force on the surface figure of optical element in the axial adjustment mechanism cannot be ignored. Regularity between the adjusting force and the surface figure of the optical element is investigated aiming at an axial adjustment mechanism with monolithic configuration. Finite element method is adopted to analyze the relationship between the adjusting force and the root-mean-square (RMS) value, Code V standard Zernike coefficients for the surface figure evaluation of the optical element. Methods for reducing the effect of the adjusting force on the surface figure of optical element are further proposed, which is adjusting force isolation and adjusting force absorption. The calculation results show that the RMS value and the Zernike coefficients linearly change with the adjusting force, and the adjusting force does not cause the existing aberration to transform into other types of aberrations, nor lead to a new generation of aberration. After flexible structure is introduced and set between the optical element and the support mount of the axial adjustment mechanism, the variation amplitude of RMS value reduces from 187% to less than 8%, which indicates that the effect of the adjusting force on the surface figure of optical element is effectively controlled.

Key words optical devices; adjustment mechanism; finite element analysis; adjusting force; surface precision

OCIS codes 110.5220; 120.4640; 220.1000; 240.6700

1 引 言

用于极大规模集成电路制造的深紫外光刻投影物镜具有极高的精度要求,其光学系统的波像在

10 nm 以内^[1]。物镜光学系统由 20~30 片光学元件组成,为了保证系统的波像差,部分光学元件的面形均方根(RMS)值须优于 2 nm。高面形精度对光

收稿日期: 2013-03-28; **收到修改稿日期**: 2013-04-22

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX02005)

作者简介: 郭 抗(1984—),男,博士,助理研究员,主要从事光学元件精密调整机构方面的研究。

E-mail: guok@sklao.ac.cn

学元件的支撑结构和调节机构设计提出了很大的挑战,结构设计时需要考虑多种因素对光学元件面形的影响,如光学元件的自重^[2]、物镜系统内部温度变化^[3-4]、物镜系统外部振动干扰^[5]等。

物镜光学系统中包括 4~6 片可进行轴向调节的光学元件,用于补偿系统的倍率、场曲、像散、畸变和球差等指标。通过调节光学元件的轴向位置,改变光学元件间的间隔,达到改善光学系统波像差的目的。与固定支撑的光学元件相比,用于轴向调节的光学元件的面形还将受到调节机构中调节力的影响。如果在光学元件轴向调节的同时,由于调节力的作用导致光学元件面形变化,元件间隔的改变与元件面形的改变互相耦合,就会使系统波像差的补偿策略变得复杂,增加调节的难度和调节的不确定性。当调节力导致光学元件的面形变化过大时,间隔补偿的效果就会被削弱,甚至达不到改善系统波像差的目的。因此,在面形精度要求极高的光刻投影物镜中,光学元件轴向调节机构的调节力对元件面形的影响不可忽略。

调节力与光学元件面形之间关系的研究主要集中在主动光学领域^[6]。主动光学利用外部调节力改变光学元件的面形,通过主动光学元件的变形产生像差,补偿系统像差。其研究的目的是为了使调节力更有效地改变光学元件的面形,而在光学元件轴向调节机构的研究中,则是为了控制或避免调节力影响光学元件的面形,目前这方面的研究较少。本文针对作者提出的一种一体化结构的光学元件轴向调节机构^[7],开展调节力对光学元件面形影响规律的研究,通过有限元计算得出了调节力与光学元件面形 RMS 值、45 项 Code V 标准 Zernike 系数之间的关系,并进一步提出了减小调节力对元件面形影响的方法,为光学元件轴向调节机构的设计提供了参考。

2 轴向调节机构的结构及光学元件受力分析

光学元件轴向调节机构如图 1 所示。机构主要由镜筒、镜框、光学元件及位于镜筒与镜框之间成 120°周向均布的三个换向结构组成。三个调节力(F_1 、 F_2 、 F_3)沿光学元件的径向方向驱动换向结构,换向结构将各个调节力转换为作用于镜框上的 6 个轴向力和 6 个径向力。当调节力大小相等时,作用于镜框上的各个轴向力的大小相等,安装在镜框上

的光学元件在各轴向力的带动下沿轴向运动。各个径向力沿镜框的径向方向相互抵消,在功能上不会带动光学元件产生轴向运动。三个调节力既可以向里推动换向结构,也可以向外拉动换向结构,使光学元件能够沿轴向上或下降。

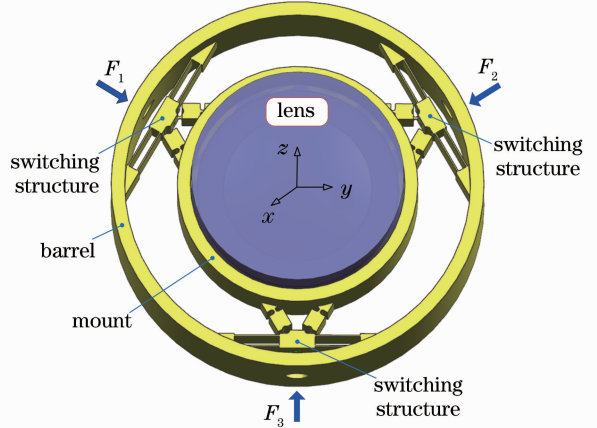


图 1 轴向调节机构结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the axial adjustment mechanism

轴向调节机构中的光学元件为平凹透镜,其结构示意图如图 2 所示。光学元件采用底面环面支撑、侧面胶接固定的方式安装在镜框上。在进行轴向调节时,光学元件的受力主要包括镜片自身的重力 G 以及从镜框传递来的轴向力 $F_a(r, \theta)$ 和径向力 $F_r(r, \theta)$, 径向力 $F_r(r, \theta)$ 会引起光学元件的轴向剪力 $Q_r(r, \theta)$ 。光学元件的受力如图 3 所示。光学元件的变形远小于它的厚度,属于小挠度弯曲问题,其力学模型可表示为^[8]

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

式中 ω 为镜片的挠度, D 为镜片的刚度。镜片从中心到边缘的厚度不一致时, D 是随 r 变化的函数。

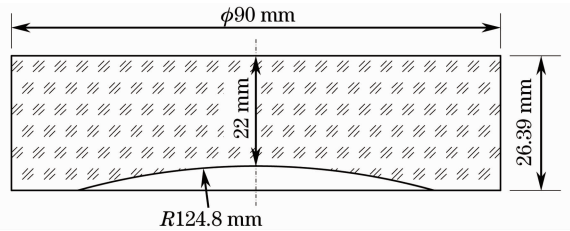


图 2 光学元件结构示意图

Fig. 2 Structure of the optical element

光学元件所受的三种力都将影响光学元件上下表面的面形,其中镜片自身的重力始终影响光学元件的面形,转换自调节力的轴向力和轴向剪力会导

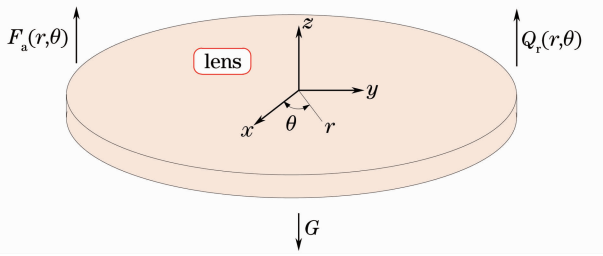


图 3 光学元件受力示意图

Fig. 3 Stress of the optical element

致镜框产生变形,进而影响镜片面形。随调节力大小的改变,轴向力和轴向剪力对光学元件面形的影响程度将发生变化。

3 调节力对面形的影响分析

为了研究调节力对光学元件面形的影响规律,需要建立调节力与光学元件表面变形量之间的关系,并根据光学元件表面的变形量定量地评价光学元件面形的变化程度。调节力到光学元件的力传递路径较长,影响因素复杂,调节力与(1)式中 $F_a(r, \theta)$ 、 $Q_r(r, \theta)$ 之间的关系难以确定,进而难以建立调节力与光学元件表面变形量 w 之间的关系表达式。采用有限元计算的方法分析两者之间的规律。对于光学元件面形变化程度的评价,除了采用表达光学元件整体像差大小的 RMS 值外,还采用了 Zernike 多项式系数,以分析调节过程中光学元件各种像差的变化规律。

分析时,首先在有限元分析软件 ANSYS 中建立轴向调节机构的有限元模型,对模型施加调节力和重力后,通过静力学分析可以得出光学元件上下表面各节点的位移。提取位移值,导入光机耦合分析软件 Sigfit 中,可计算出光学元件上下表面面形的 RMS 值和 45 项 Code V 标准 Zernike 系数。

轴向调节机构的有限元模型如图 4 所示。有限元模型网格划分的密度以网格细化前后,计算结果的变化值在 0.5% 以内为准(例如:当调节力为 35 N 时,镜片网格密度为 3 mm 时,光学元件上表面面形 RMS 值为 0.5064 nm;网格密度为 3.6 mm 时,其 RMS 值为 0.5062 nm)。

定义调节力向里推动换向结构时力的方向为正,向外拉动换向结构时力的方向为负。根据调节时,机构的最大应力值应小于机构所用材料屈服强度的限制条件,取调节力的取值范围为 $[-40 \text{ N}, 40 \text{ N}]$ 。不同调节力条件下,光学元件上表面面形的 45 项 Zernike 系数如图 4 所示,分析时去除了主

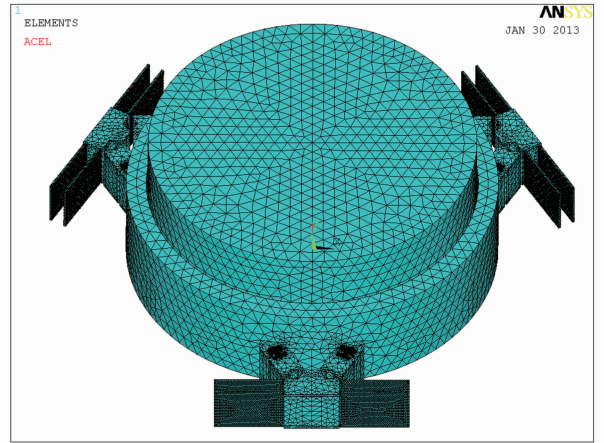


图 4 轴向调节机构有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the axial adjusting mechanism

要反映光学元件整体移动的前三项 Zernike 系数 Z01(平移)、Z02(Y 轴倾斜)和 Z03(X 轴倾斜)。从图 5 可见,调节力主要引起前 21 项 Zernike 系数变化,即光学元件面形的低阶像差。

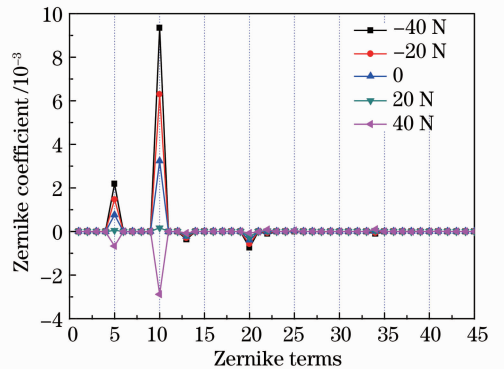


图 5 不同调节力时,光学元件上表面面形 Zernike 系数变化情况

Fig. 5 Variation of the Zernike coefficients for the upper surface of the optical element under different adjusting forces

取 RMS 值及前 21 项 Code V 标准 Zernike 系数作为光学元件面形的主要考察指标,各指标随调节力的变化情况如图 6 所示。光学元件上表面面形的 Zernike 系数中受调节力影响较大的项包括 Z10(30°方向初级三叶像差)、Z05(离焦)、Z20(30°方向二级三叶像差)和 Z13(初级球差),下表面面形的 Zernike 系数中受调节力影响较大的项有 Z10(30°方向初级三叶像差)、Z05(离焦)和 Z13(初级球差)。光学元件面形的 RMS 值和 Zernike 系数均随调节力线性变化。调节力取值范围为 $[-40 \text{ N}, 0]$ 时,图 3 中轴向力和轴向剪力的方向与重力方向相同;

调节力的绝对值越大,光学元件受到的外力越大,RMS 值及 Zernike 系数逐渐增大。调节力取值范围为 $[0, 40 \text{ N}]$ 时,轴向力和轴向剪力的方向与重力方向相反;随着调节力的增大,轴向力和轴向剪力先

小于重力而后逐渐大于重力,光学元件受到的外力也因而先减小后增大,外力方向也发生了改变;部分 Zernike 系数随外力方向变化由正值变为负值,而 RMS 值根据其计算公式的定义保持为正值。

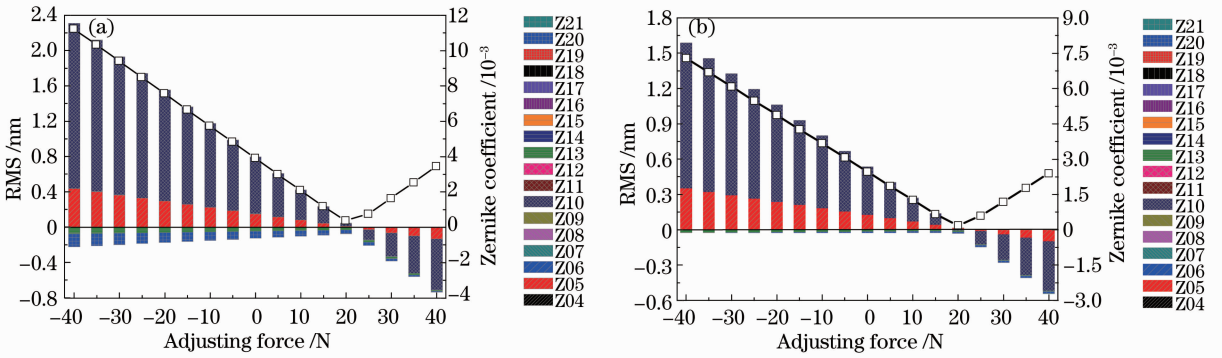


图 6 光学元件面形 RMS 值及 Zernike 系数随调节力变化情况。(a)上表面面形;(b)下表面面形

Fig. 6 Variation of the RMS and Zernike coefficients for the surface figure of the optical element under variable adjusting force. (a) Upper surface figure; (b) lower surface figure

用 Zernike 系数拟合生成 0、40、-40 N 调节力时,光学元件上下表面面形分别如图 7、图 8 所示。比较这几种典型的调节力引起的光学元件表面面形变化情况,调节力只改变了面形 RMS 值的大小,并

不改变面形像差的性质,即调节力既不会导致已有像差转变为其他类型的像差,也不会导致新像差的产生,这从图 6 中 Zernike 系数的变化情况也可以反映出来。轴向调节机构在调节过程中,光学

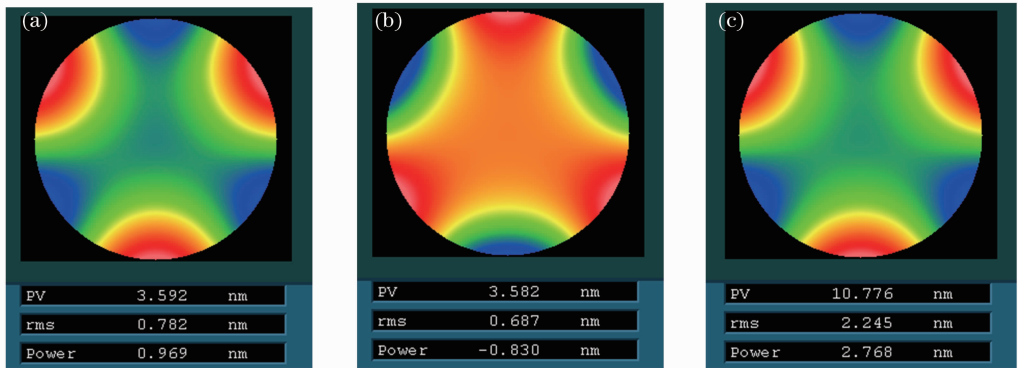


图 7 不同调节力时,光学元件上表面面形。(a) 0; (b) 40 N; (c) -40 N

Fig. 7 Figure of the upper surface under different adjusting forces. (a) 0; (b) 40 N; (c) -40 N

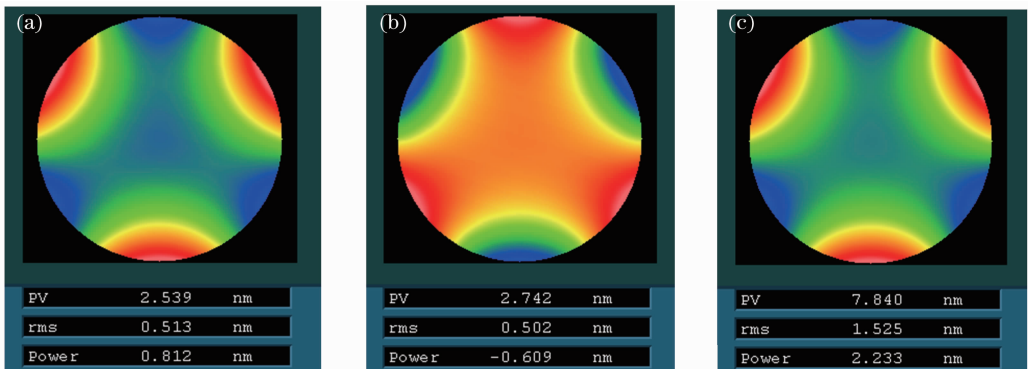


图 8 不同调节力时,光学元件下表面面形。(a) 0; (b) 40 N; (c) -40 N

Fig. 8 Figure of the lower surface under different adjusting forces. (a) 0; (b) 40 N; (c) -40 N

元件上下表面的像差主要表现为三叶像差。从三叶像差的周向分布位置来看,该像差主要是由调节机构中的三个换向结构支撑镜框所引起的。即使是在在机构仅受重力作用(调节力为 0)时,光学元件的初始面形中也存在三叶像差。这主要是由于三个换向结构对镜框形成了三点支撑,导致镜框与光学元件的接触面由环形面支撑变形为三点支撑(镜框与光学元件接触面的变形示意图如图 9 所示),进而导致光学元件初始面形中三叶像差的产生。

轴向调节机构在调节过程中,当调节力为 -40 N 时,光学元件上表面面形的 RMS 值为 2.245 nm ,超

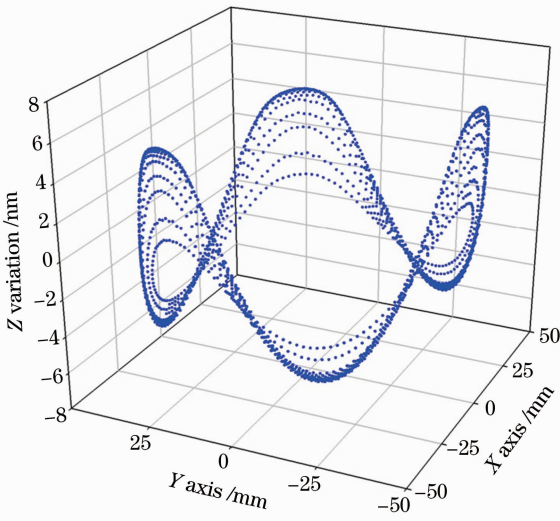


图 9 0 调节力时,镜框与镜片接触面的变形示意图

Fig. 9 Deformation of the contact surface between the mount and optical element under adjusting force of 0

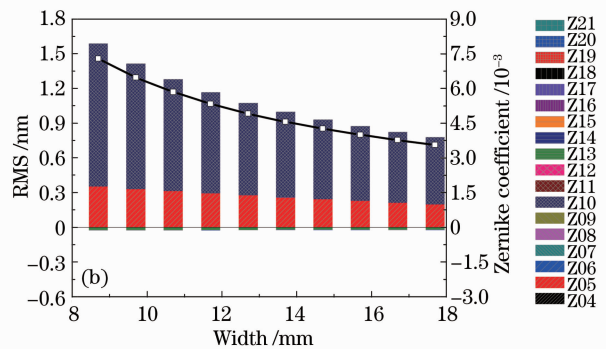
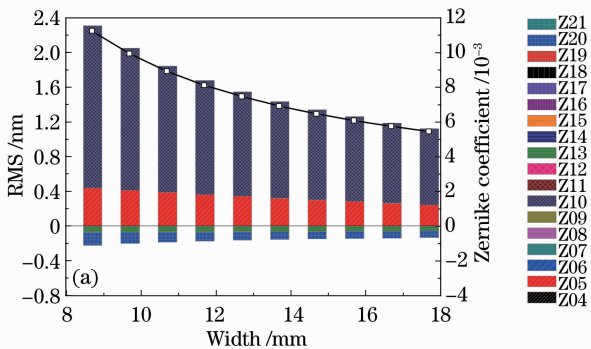


图 10 -40 N 调节力时,光学元件面形 RMS 值及 Zernike 系数随镜框宽度变化情况。(a) 上表面面形;(b) 下表面面形

Fig. 10 Variation of the RMS and Zernike coefficients for the surface figure of the optical element with variable mount width under the adjusting force of -40 N . (a) Upper surface figure; (b) lower surface figure

4.2 吸收调节力

上述光学元件与镜框直接固定连接,镜框上的变形完全传递到光学元件上。若在光学元件与镜框之间设置柔性结构,将能够吸收部分镜框上的变形。

出光学元件面形 RMS 值须优于 2 nm 的设计要求。且与调节力为 0 时 RMS 值为 0.782 nm 相比,元件面形的 RMS 值增大了 187% ,变化幅度过大,难以满足使用要求。需要对调节机构进行适当改进,减小调节力对光学元件面形的影响程度。

4 减小调节力对面形影响的方法

从两个方面来考虑减小轴向调节机构中调节力对光学元件面形 RMS 值的影响:首先,在调节力到光学元件的力传递路径中,减少调节力传入到光学元件,即将调节力隔离在光学元件之外;其次,对于传入到光学元件的调节力,采取适当措施,将调节力吸收,以减弱调节力的影响。

4.1 隔离调节力

光学元件安装在镜框上,镜框作为环形刚体,可用于隔离调节力的传入。镜框的刚度越大,调节力引起镜框的变形越小,进而导致光学元件的变形量也越小。调节力为 -40 N 时,增大镜框的宽度,光学元件上下表面面形 RMS 值及 Zernike 系数的变化情况如图 10 所示。光学元件面形的像差性质不变,RMS 值及 Zernike 系数减小。镜框的初始宽度为 8.7 mm ,加宽 9 mm 后,光学元件上表面面形的 RMS 值为 1.089 nm ,减小幅度为 51.5% 。镜框加宽后,光学元件面形的 RMS 值满足设计要求。但需要指出的是,镜框加宽后,镜框重量增加,调节机构的负载增大,机构的调节行程将有所减小。

进,使之适合于支撑轴向调节机构中的光学元件,并进行两种结构形式下调节力对光学元件面形的影响分析。

柔性支撑镜框的有限元模型如图 11 所示。镜框的宽度为 6.2 mm,光学元件通过底面粘接在 8 个柔性支撑结构的凸台上。光学元件上下表面面形 RMS 值及 Zernike 系数随调节力的变化情况如图 12 所示。光学元件面形的 RMS 值变化较小,调节力为 -40、0、40 N 时,光学元件上表面面形的 RMS 值分别为 0.9007、0.8712、0.9340 nm,调节前后 RMS 值的变化幅度在 8% 以内。可见,在光学元件与镜框之间采用了具有吸收调节力功能的柔性结构后,调节力对光学元件面形的影响得到了有效的控制。该结构中光学元件上下表面面形的 Zernike 系数受调节力影响的项数较多,主要包括 Z05(离焦)、Z07(0°方向初级三叶像差)、Z10(30°方向初级三叶像差)和 Z13(初级球差)。光学元件上下表面最主

要的像差由环面支撑时的三叶像差变为柔性支撑时的离焦,更便于物镜光学系统的像差补偿。

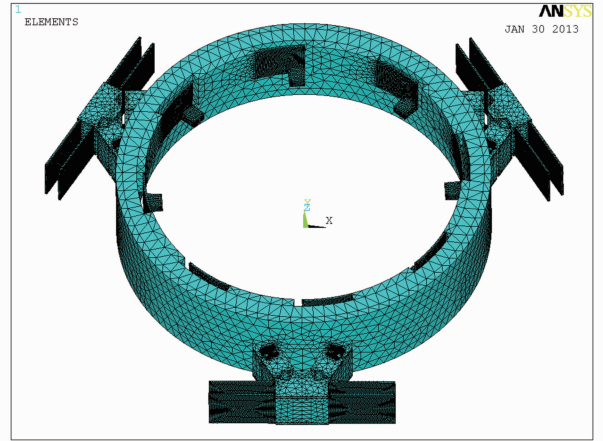


图 11 具有周向弯曲挠性支撑结构的轴向调节机构有限元模型

Fig. 11 Finite element model of the axial adjusting mechanism with circumferential flexure-support structure

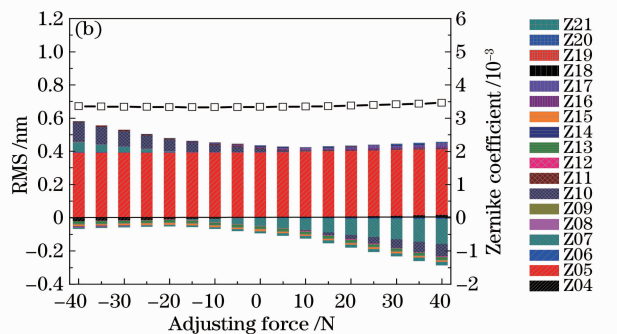
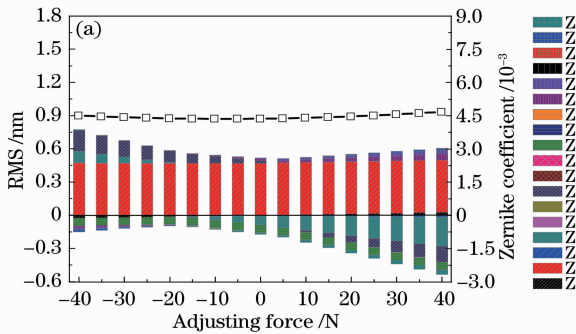


图 12 周向弯曲挠性支撑条件下,光学元件面形 RMS 值及 Zernike 系数随调节力变化情况。(a)上表面面形;(b)下表面面形
Fig. 12 Variation of the RMS and Zernike coefficients for the surface figure of the optical element with variable adjusting force under the circumferential flexure-support. (a) Upper surface figure; (b) lower surface figure

多弹片支撑镜框的有限元模型如图 13 所示。镜框的宽度为 6.2 mm,光学元件通过底面粘接在 8 个柔性弹片的凸台上。光学元件上下表面面形 RMS 值及 Zernike 系数随调节力的变化情况如图 14 所示。光学元件面形的 RMS 值变化很小,调节力为 -40、0、40 N 时,光学元件上表面面形的 RMS 值分别为 0.9490、0.9448、0.9508 nm,调节前后 RMS 值的变化幅度在 1% 以内。光学元件上下表面面形的 Zernike 系数中受调节力影响较大的项包括 Z05(离焦)、Z13(初级球差)和 Z10(30°方向初级三叶像差)。相比于柔性支撑镜框,多弹片支撑镜框引起的光学元件的像差项数更少,且像差更容易补偿。

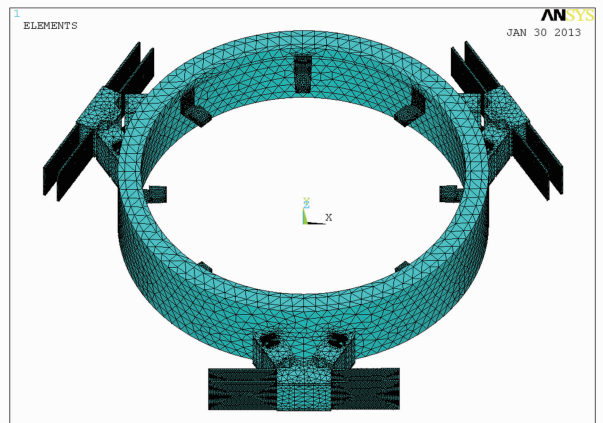


图 13 具有轴向弯曲挠性支撑结构的轴向调节机构有限元模型

Fig. 13 Finite element model of the axial adjusting mechanism with axial flexure-support structure

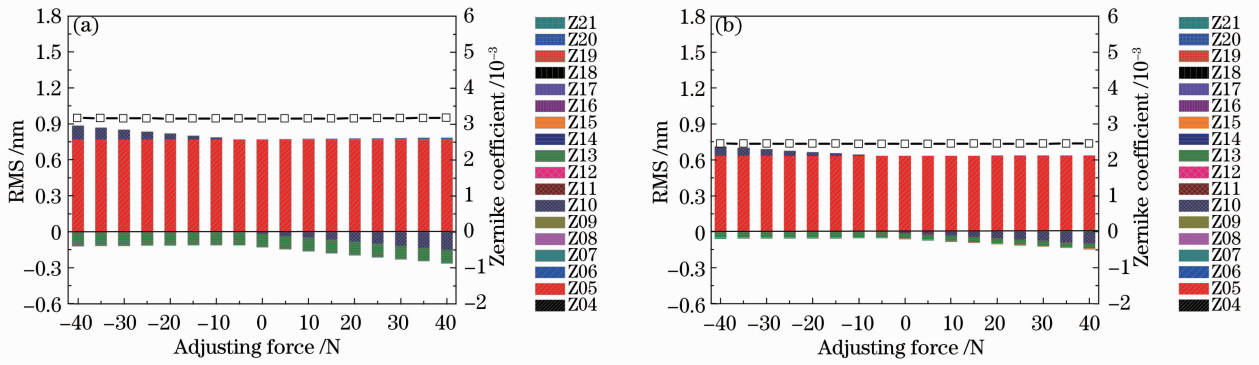


图 14 轴向弯曲挠性支撑条件下,光学元件面形 RMS 值及 Zernike 系数随调节力变化情况。(a)上表面面形;
(b)下表面面形

Fig. 14 Variation of the RMS and Zernike coefficients for the surface figure of the optical element with variable adjusting force under the axial flexure-support. (a) Upper surface figure; (b) lower surface figure

4.3 结果讨论

将上述具有环面支撑镜框、镜框加宽 9 mm 后的环面支撑镜框、柔性支撑镜框、多弹片支撑镜框等结构形式的轴向调节机构进行对比分析。各种支撑条件下,光学元件上下表面面形 RMS 值随调节力变化情况如图 15 所示。环面支撑镜框加宽 9 mm 后,调节力为 0 时的初始面形 RMS 值最小,但调节前后面形 RMS 值的变化幅度(138%)较大,与镜框加宽前相比改善效果不大。具有柔性支撑镜框和多弹片支撑镜框的轴向调节机构,光学元件的面形受调节力的影响均较小,调节前后面形 RMS 值的变

化幅度小(分别为 8%、1%),其 RMS 值保持在 1 nm 以内。虽然具有柔性支撑镜框和多弹片支撑镜框的轴向调节机构在大部分调节行程内,其光学元件的面形 RMS 值大于加宽镜框后的具有环面支撑镜框的轴向调节机构,但其 RMS 值的变化幅度小,更有利于应用于物镜光学系统波像差的补偿。因此,在上述两种减小调节力对光学元件面形影响的方法中,吸收调节力的方法比隔离调节力的方法更有效。在吸收调节力的两种方案中,具有多弹片支撑镜框的轴向调节机构对调节力的减小效果略优于具有柔性支撑镜框的轴向调节机构。

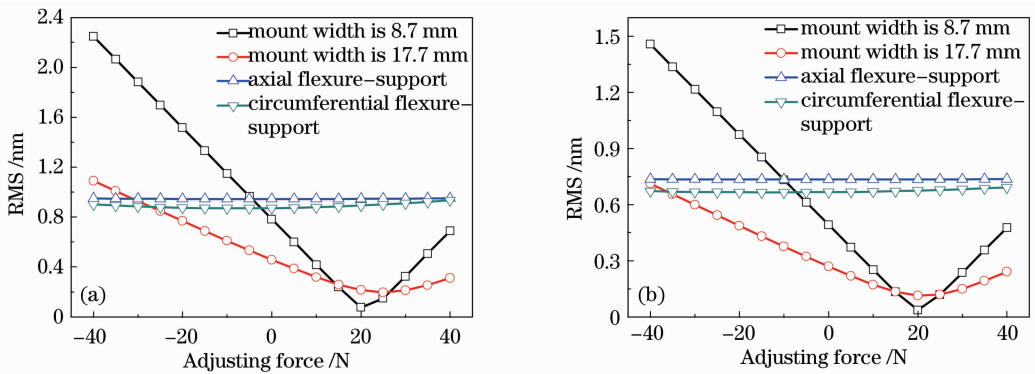


图 15 不同支撑条件下,光学元件面形 RMS 值随调节力变化情况。(a)上表面面形;(b)下表面面形
Fig. 15 Variation of the RMS for the surface figure of the optical element with variable adjusting force under different supports. (a) Upper surface figure; (b) lower surface figure

5 结 论

对一种应用于光刻投影物镜的轴向调节机构中调节力对光学元件面形的影响进行了分析,结果表明:光学元件面形的 RMS 值及标准 Zernike 系数随调节力线性变化,调节力不会导致已有像差转变为其他类型的像差,也不会导致新像差的产生。对两

种减小调节力对元件面形影响方法的分析结果表明:通过增大轴向调节机构中支撑镜框的宽度,可以有效隔离调节力,改善光学元件的面形,其面形 RMS 值减小幅度达 51.5%,但调节前后 RMS 值的变化幅度依然较大;通过在光学元件与轴向调节机构的支撑镜框之间采用具有吸收调节力功能的柔性

结构,调节前后光学元件面形 RMS 值的变化幅度由 187%降低到了 8%以内,有效控制了调节力对元件面形的影响,其调节力为 0 时的初始面形 RMS 值略有增大,可以通过进一步优化设计进行改善。

参 考 文 献

- 1 Tomoyuki Matsuyama, Yasuhiro Ohmura, David M Williamson. The lithographic lens: its history and evolution [C]. SPIE, 2006, 6154: 615403.
- 2 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.
- 3 Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, *et al.*. Effect of temperature change on the surface accuracy of 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.
- 4 Zhao Lei, Gong Yan. Design and 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Guo Kang, Gong Yan, Ni Mingyang, *et al.*. Design of a monolithic apparatus for the axial fine adjustment of optical element [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s122002.
郭 抗, 巩 岩, 倪明阳, 等. 光学元件一体化精密轴向调整机构的设计[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s122002.
- 8 S Timoshenko, S Woinowsky-Krieger. Theory of Plates and Shells [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987. 282—295.
- 9 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.
- 10 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.

栏目编辑: 韩 峰