

文章编号 1004-924X(2013)06-1425-09

# 光刻投影物镜中的透镜 X-Y 柔性微动调整机构

赵磊\*, 巩岩, 赵阳

(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:**针对光刻投影物镜中透镜 X-Y 调整机构调整量程小、调整精度高的特点,提出了一种基于柔性铰链的 X-Y 微动调整机构,并将其应用在光刻投影物镜模型中进行了实验验证。首先,基于机构自由度和机构瞬心等概念介绍了该机构的工作原理。然后,用柔性铰链代替传统铰链完成了该机构的结构设计,并对该机构的运动方向刚度、位移输入-输出比以及固有频率和阵型等进行了仿真分析。分析结果表明:该机构 X,Y 方向的刚度值为  $1.99 \mu\text{m}/\text{N}$  和  $1.96 \mu\text{m}/\text{N}$ , X,Y 方向的位移输入-输出比值分别为  $-2.5$  和  $-2.56$ , 机构 X,Y 方向运动的原理误差分别为实际量的  $8.22\%$  和  $6.68\%$ 。最后,将研制的 X-Y 微动调整机构用于光刻投影物镜验证模型中,给出了 X-Y 调整机构补偿前后的系统波像差。结果显示:模型补偿前后的系统波像差 RMS 分别为  $50.864 \text{ nm}$  和  $25.933 \text{ nm}$ 。由此表明,本文设计的柔性微动调整机构补偿效果明显,能够满足光刻投影物镜高精度 X-Y 调整补偿要求。

**关键词:**光刻物镜;柔性铰链;微动调整机构;系统波像差

**中图分类号:** TN305.7; TH74 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132106.1425

## Flexure-based X-Y micro-motion mechanism used in lithographic lens

ZHAO Lei\*, GONG Yan, ZHAO Yang

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

\* Corresponding author, E-mail: zhaol@sklao.ac.cn

**Abstract:** A novel X-Y micro-motion mechanism was proposed based on a flexure hinge to meet the demand of the lithographic lens for X-Y adjusting mechanism with a small range and a high precision, then it was applied to the lithographic lens model to testify its performance. Firstly, the working principle of the mechanism was introduced based on the concept of mechanism degree of freedom (DOF) and instant center. Then, the structure of the mechanism was designed by using the flexure hinge instead of tradition hinge and the motion rigidity of mechanism, the ratio of input and output for displacement and its natural frequency and modes were all analyzed. The analysis results show that the rigidity values of mechanism X and Y are  $1.99 \mu\text{m}/\text{N}$  and  $1.96 \mu\text{m}/\text{N}$  respectively, the ratio of input and output for displacement in X and Y axes are  $-2.5$  and  $-2.56$ , respectively, and the principle errors in X and Y axes are  $8.22\%$  and  $6.68\%$ , respectively of its useful displacement. Finally, the mechanism was used in the lithographic lens systems to prove its performance, and the wavefront aberrations of the lens system were tested. The experiment results indicate that the wavefront aberrations

收稿日期:2012-10-12;修订日期:2012-12-05.

基金项目:国家重大科技专项基金资助项目(No. 2009ZX02205)

tions of the systems before and after the mechanism adjusting compensations are 50.864 nm and 25.933 nm respectively. The X-Y flexural mechanism has good performance of aberration compensation, and it can satisfy the requirements of lithographic lens for high precision X-Y micro adjusting.

**Key words:** lithographic lens; flexure hinge; micro adjusting mechanism; system wavefront aberration

## 1 引言

柔性机构是以柔性铰链代替传统运动铰链,采用柔性元件的弹性变形而非刚性元件的运动来传递或转换运动、力或能量的非装配一体式机构<sup>[1]</sup>。相对于由刚性零件和运动副构成的传统传动部件,柔性机构具有运动分辨率高、无摩擦、无需润滑、制造工艺简单等优点,因而在半导体加工制造<sup>[2-6]</sup>、精密操作<sup>[7]</sup>、空间光学遥感<sup>[8-10]</sup>、精密和超精密加工<sup>[11]</sup>等领域具有广泛的应用。

工程领域对柔性机构需求的不断增加,加快了国内外学者对柔性机构的研究。Lobontiu<sup>[12-13]</sup>对一维自由度柔性机构的输入-输出关系和运动刚度进行了研究。Ryu<sup>[5]</sup>设计了用于硅片工作台 X-Y- $\theta_z$  三自由度运动的柔性机构,分析了机构的输入-输出位移关系,建立了该机构的刚度模型。Yong Y. K<sup>[6]</sup>设计了基于柔性 3-RRR 并联机构的 X-Y- $\theta_z$  三自由度调整机构,研究了该机构的输入-输出关系,建立了该机构的运动学模型。Hale L C<sup>[14]</sup>研制了用于极紫外系统中反射镜的 X-Y 调整二自由度柔性机构。Pham H H 和 Chen I M<sup>[15]</sup>研究了对称冗余单自由度机构和 3-RRR 三自由度机构的刚度。S. Park<sup>[16]</sup>等人建立了六自由度柔性机构的运动学模型,得到了该机构位移的输入-输出关系。张宪民<sup>[17]</sup>等人研制了基于柔性 3-RRR 机构的 X-Y- $\theta_z$  三自由度调整机构。孙立宁<sup>[18]</sup>等人对柔性 Stewart 结构并联机器人进行了研究,建立了系统的整体刚度模型。上述研究在柔性机构设计时大都受空间尺寸的限制,而在紧凑型、高精度柔性机构方面的研究相对较少。

本文针对光刻物镜中透镜 X-Y 微动调整机构空间尺寸紧凑、调整精度高、调整量程小等特点,提出了一种基于柔性铰链的 X-Y 紧凑型微动调整机构,并将它应用于光刻物镜模型进行了实验验证。

## 2 X-Y 柔性微动调整机构的工作原理

X-Y 柔性微动调整机构等效的传统机构运动简图如图 1 所示,该 X-Y 调整机构为平面运动机构,根据平面机构的自由度公式<sup>[19]</sup>,有:

$$DOF = 3n - (2P_l + P_h), \quad (1)$$

其中: $n$  为机构中活动构件的数量, $P_l$  为低副数量, $P_h$  为高副数量。

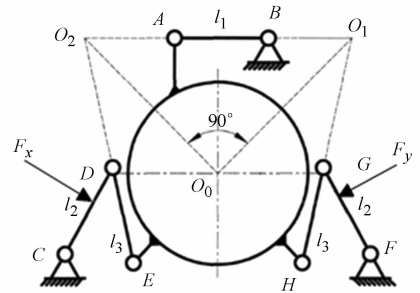


图 1 X-Y 微动调整机构运动简图

Fig. 1 X-Y micro-motion mechanism

由图 1 可知,该机构中连杆数量  $n=6$ ,转动副平面低副数量  $P_l=8$ ,平面高副的数量  $P_h=0$ ,代入公式(1)得到该平面机构的自由度  $DOF=2$ ,因此实现确定运动该机构需要 2 个原动件。本文研制的 X-Y 调整机构为实现平面内 X 方向和 Y 方向的移动,分别在垂直于连杆 CD 和连杆 GF 方向上设置有 2 个固定在机架上的驱动器。

定义机构的坐标系如图 2 所示,坐标原点位于图中结构的圆心处,X 轴与水平轴成  $45^\circ$ 且正方向指向左上方,Y 轴与水平轴成  $45^\circ$ 且正方向指向右上方。

X-Y 调整机构中与内部运动件相连的 3 个连杆 AB、DE、GH 分别提供沿连杆轴向的运动约束。当驱动器  $F_x$  单独作用时,连杆 DE 提供输入位移量,此时机构的瞬心位于连杆 AB 和 HG 的交点  $O_1$  处,因此整个内部运动件将绕着  $O_1$  转动。由于调整机构 X 方向的调整量( $\pm 50 \mu\text{m}$ )相对瞬心圆心连线  $O_1 O_0$  (50 mm)非常小,故可以认

为此时调整机构将沿着 X 轴方向线性前进或后退,如图 2(a)所示。同理,可以得到当驱动器  $F_y$  单独作用时,调整机构将沿着 Y 轴方向前进或后退,如图 2(b)所示。通过合理调整两个驱动器的输入位移量,调整机构可以实现其行程范围内任意 X,Y 位移量的运动合成。

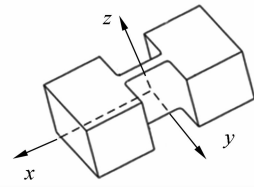
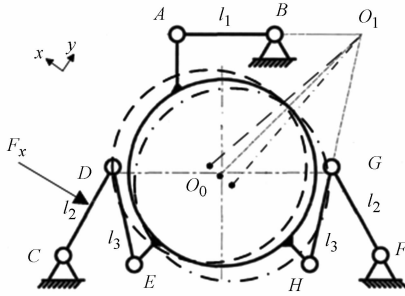


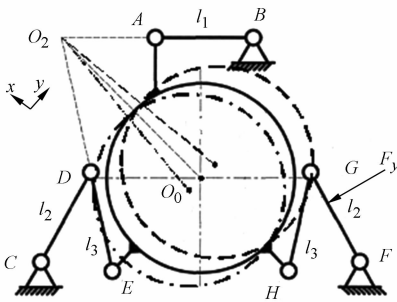
图 3 直梁圆角型柔性铰链

Fig. 3 Corner-filleted flexure hinge



(a) X 方向运动工作原理图

(a) Principle of movement in X axis



(b) Y 方向运动工作原理图

(b) Principle of movement in Y axis

图 2 X-Y 微动调整机构工作原理图

Fig. 2 Principle of X-Y micro-motion mechanism

### 3 X-Y 柔性微动调整机构的结构设计

本文研制的 X-Y 柔性微动调整机构主要用于高精度光刻物镜中光学透镜的精密调整,其调整行程相对较小( $\pm 50 \mu\text{m}$ ),但其运动精度很高( $\pm 50 \text{ nm}$ ),并且要求运动过程中不产生颗粒污染和油脂污染,因此采用柔性铰链构成的柔性机构作为调整机构。本文采用直梁圆角型柔性铰链代替传统的转动副,直梁圆角型柔性铰链如图 3 所示。如图所示,其局部坐标系中绕 Z 轴方向的转动柔度比其它方向的移动柔度和转动柔度都大,因此在小转角范围内可将该铰链近似等效为转轴为 Z 轴的单轴转动副。

将直梁圆角型柔性铰链代替传统的转动副,得到的 X-Y 柔性微动调整机构如图 4 所示。X-Y 柔性调整机构为一体化的镜框外环和镜框内环结构,镜框外环和内环之间通过左右两侧 2 个折叠连杆组和上部的直连杆连接,整个机构可以通过慢走丝线切割或电化学腐蚀等方法进行加工。驱动器 1 和驱动器 2 的力作用点位于折叠连杆组外侧的连杆上,力的方向垂直于外侧连杆。

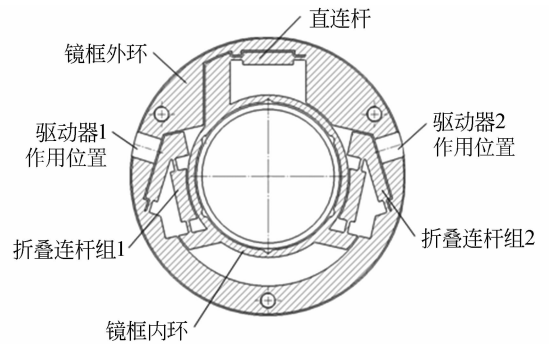


图 4 X-Y 柔性微动调整机构示意图

Fig. 4 X-Y flexure micro-motion mechanism

X-Y 柔性调整机构在物镜中的安装示意图如图 5 所示。通过 3 个周向均布的微分头实现镜筒与镜框外环的连接,从而实现镜框外环作为固定机架的功能。两个压电驱动器固定在镜筒上,并通过驱动器接头将输入力作用在折叠连杆组外侧的连杆上。

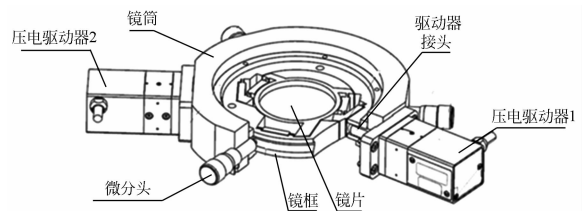


图 5 X-Y 微动调整机构剖视图

Fig. 5 Cut-away view of X-Y flexure micro-motion mechanism

## 4 X-Y 柔性微动调整机构的仿真分析

在已知镜片调整行程的前提下确定压电驱动器驱动力和驱动行程的大小,需要分析机构在运动方向上的刚度和输入-输出的位移关系。同时为了补偿机构引入的运动误差,需要建立机构运动过程中所需位移量与误差位移量的函数关系。最后,为了满足工作时光刻物镜中透镜对振动环境的要求,还需要对柔性微动调整机构的固有频率和各阶阵型进行分析。

柔性微动调整机构有限元模型的坐标系与结构设计的坐标系相同,即坐标原点为镜片圆心, $X$ 轴与水平轴成  $45^\circ$ 且正方向为左上方, $Y$ 轴与水平轴成  $45^\circ$ 且正方向为右上方。分析时,镜片、镜框的材料分别为熔石英和钢,其具体参数如表 1 所示。

表 1 材料参数表

Tab.1 Parameters of materials

材料名称	弹性模量 $E/$ $\times 10^{10}$ Pa	泊松比 $\nu$	$\rho/$ $\times 10^3$ kg $\cdot$ m $^{-3}$
熔石英	7.3	0.17	2.2
钢	14.1	0.259	8.05

### 4.1 X-Y 柔性微动调整机构的刚度分析

根据机构的运动原理,驱动器 1 作用时,镜片沿  $X$  轴方向运动,驱动器 2 工作时,镜片沿  $Y$  方向运动。因此,机构  $X, Y$  方向的刚度分别为镜片  $X, Y$  方向的位移量与相应驱动器 1、驱动器 2 输入力值之比。

机构刚度分析时,将镜片与镜框接触处进行网格配对,固定镜框外环,载荷垂直作用在折叠连杆组的外侧连杆上,得到机构在  $X$  方向和  $Y$  方向上的变形分别如图 6 和图 7 所示。

分析时,驱动器作用力为  $0 \sim 50$  N, 递增量为 5 N, 观察结果分别为镜片中心沿  $X$  向和  $Y$  向的移动量。将分析后的数据整理后得到输入力与输出移动量的曲线分别如图 8 和图 9 所示。由图 8 可知,镜片中心的输出移动量随驱动器 1 的输入力线性递增,机构  $X$  方向上的刚度值为 1.99

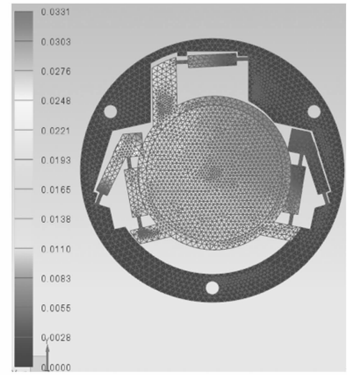


图 6 驱动器 1 引起的镜片  $X$  方向运动图

Fig. 6 Lens movement in  $X$  axis due to force from actuator 1

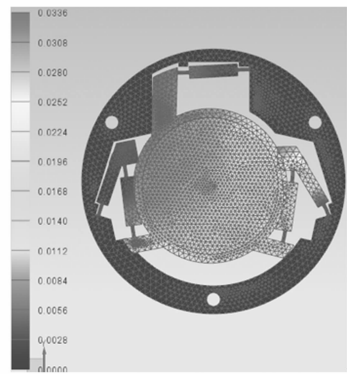


图 7 驱动器 2 引起的镜片  $Y$  方向运动图

Fig. 7 Lens movement in  $Y$  axis due to force from actuator 2

$\mu\text{m}/\text{N}$ 。由图 9 可知,镜片中心的输出移动量随驱动器 2 的输入力线性递增,机构  $Y$  方向上的刚度值为  $1.96 \mu\text{m}/\text{N}$ 。

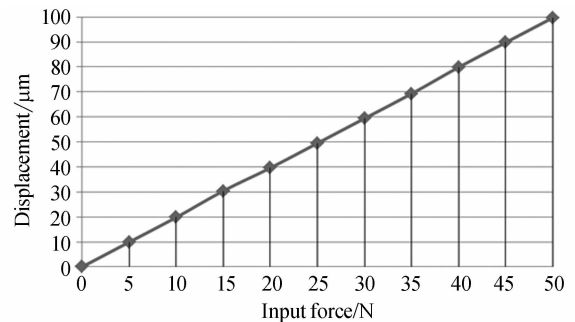


图 8 镜片  $X$  方向移动量与输入力的曲线

Fig. 8 Relationship of  $X$  axis movement and input force from actuator 1

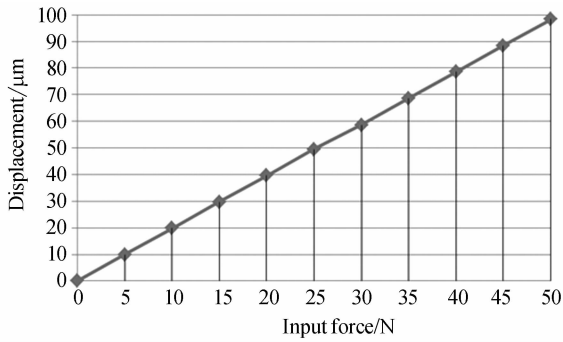


图 9 镜片 Y 方向移动量与输入力的曲线

Fig. 9 Relationship of Y axis movement and input force from actuator 2

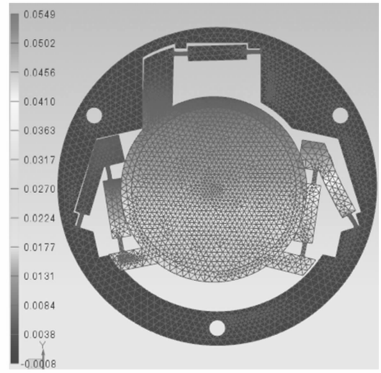


图 11 驱动器 2 位移引起的镜片 Y 方向运动图

Fig. 11 Lens movement in Y axis due to displacement of actuator 2

### 4.2 X-Y 柔性微动调整机构的位移输入-输出传动关系分析

当驱动器 1 作用时,镜片沿 X 轴方向运动,当驱动器 2 工作时,镜片沿 Y 方向运动。因此,机构 X,Y 方向的位移输入-输出比分别为驱动器 1、驱动器 2 的输入移动量与相应的镜片 X,Y 方向输出位移量的比值。

分析时,将镜片与镜框接触处进行网格配对,固定镜框外环,强迫位移垂直作用在折叠连杆组的外侧连杆上,得到机构在 X,Y 方向上的变形分别如图 10 和图 11 所示。

号表示驱动器 1 前进时镜片沿 X 轴负方向移动。由图 13 可知,镜片中心 Y 向输出移动量与驱动器 2 的输入位移呈线性关系,机构的位移输入输出比为-2.56,其中负号表示驱动器 2 前进时镜片沿 Y 轴负方向移动。

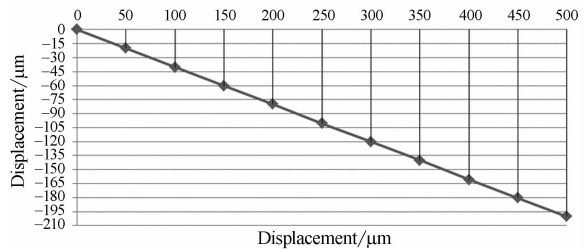
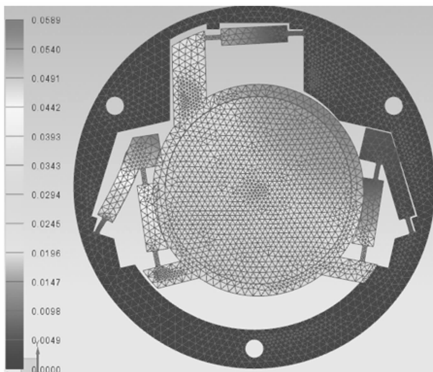


图 10 驱动器 1 位移引起的镜片 X 方向运动图

Fig. 12 Relationship between X axis movement and input displacement of actuator 1

图 10 驱动器 1 位移引起的镜片 X 方向运动图  
Fig. 10 Lens movement in X axis due to displacement of actuator 1

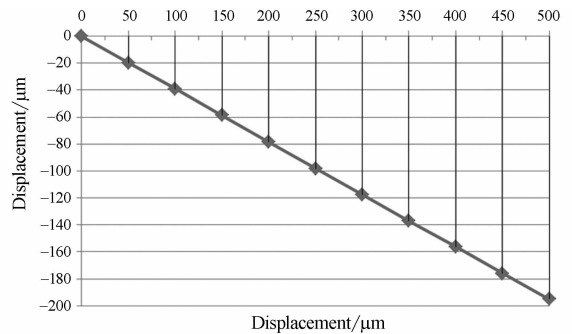


图 13 镜片 Y 方向移动量与输入位移的曲线

Fig. 13 Relationship between Y axis movement and input displacement of actuator 2

本文分析时,驱动器的输入位移为 0~500  $\mu\text{m}$ ,递增量为 50  $\mu\text{m}$ ,观察结果分别为镜片中心沿 X 向和 Y 向的移动量,将分析后的数据整理后得到 X 向和 Y 向上输入力与输出移动量的曲线,分别如图 12 和图 13 所示。由图 12 可知,镜片中心 X 向输出移动量与驱动器 1 的输入位移呈线性关系,机构的位移输入-输出比为-2.5,其中负

### 4.3 X-Y 柔性微动调整机构的误差分析

驱动器 1 作用时,镜片的实际运动为绕着瞬时心  $O_1$  转动,等效为沿 X 方向的移动。因此,需要

分析镜片实际运动引入的 Y 方向误差情况。分析时,将镜片与镜框接触处进行网格配对,并固定镜框外环,然后在折叠连杆组 1 的外侧连杆处垂直加载强迫位移,其中强迫位移为 0~0.5 mm,递增量为 0.05 mm,得到镜片 X 方向的移动量以及引入的 Y 方向的误差量,如图 14 所示。分析数据可知,镜片 Y 方向的误差量与 X 方向的移动量比值的理论误差为 8.22%。

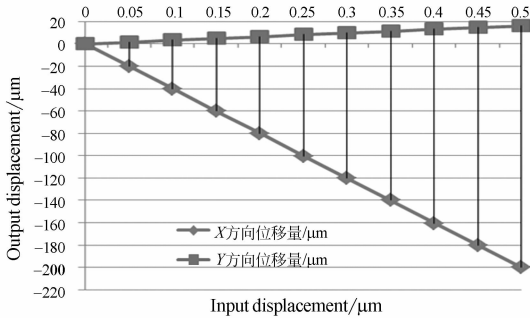


图 14 驱动器 1 输入位移引起的 X 方向移动量和 Y 方向误差

Fig. 14 X axis movement and Y axis error caused by input displacement of actuator 1

同理,驱动器 2 作用时,镜片的实际运动为绕着瞬心  $O_2$  转动,等效为沿 Y 方向的移动。因此,需要分析镜片实际运动引入的 X 方向误差情况。分析得到镜片 Y 方向的移动量以及引入的 X 方向误差量,如图 15 中所示。分析数据可知,镜片 X 方向的误差量与 Y 方向的移动量比值的理论误差为 6.68%。

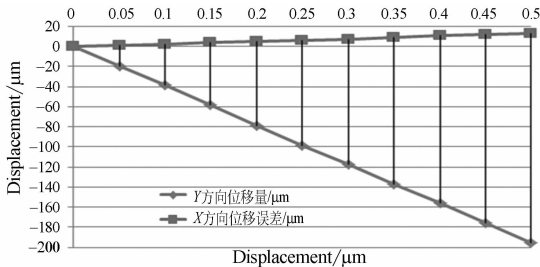


图 15 驱动器 2 输入位移引起的 Y 方向移动量和 X 方向误差

Fig. 15 Y axis movement and X axis error caused by input displacement of actuator 2

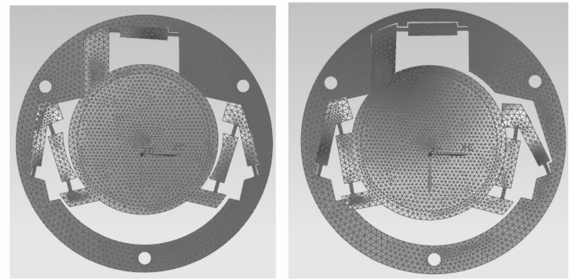
柔性微动调整机构在 X, Y 方向移动时,引入的理论误差分别为运动量的 8.22% 和 6.68%,当 X, Y 方向的移动量均为  $\pm 50 \mu\text{m}$  时,引入的误差

量分别为  $\pm 4.11 \mu\text{m}$  和  $\pm 3.34 \mu\text{m}$ 。实际操作时,通过 X, Y 方向上的电容传感器实测误差数值,然后通过闭环控制实现误差的修正。

#### 4.4 X-Y 柔性微动调整机构的模态分析

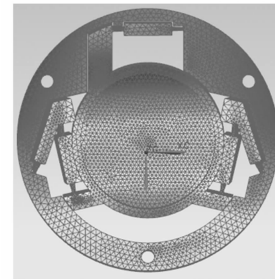
为满足光刻投影物镜工作时的振动环境要求,物镜整体的固有频率须高于 100 Hz,而对 X-Y 柔性微动调整机构的固有频率要求更高,因此本文在满足一定裕量前提下,取设计目标为一阶固有频率大于 250 Hz。

在 NX NASTRAN 环境下采用 Lanczos 法,对 X-Y 柔性微动调整机构进行了模态分析,得到机构的前 6 阶振型如图 16 所示,得到机构的前 6

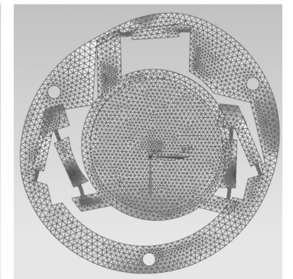


(a) 一阶阵型  
(a) First mode

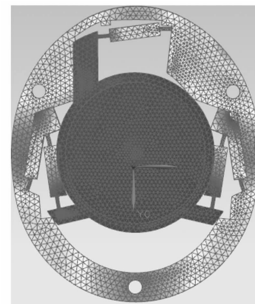
(b) 二阶阵型  
(b) Second mode



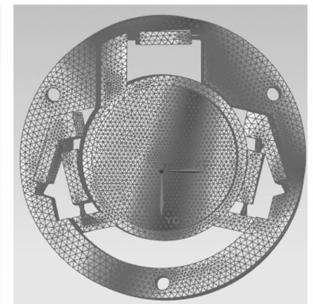
(c) 三阶阵型  
(c) Third mode



(d) 四阶阵型  
(d) Forth mode



(e) 五阶阵型  
(e) Fifth mode



(f) 六阶阵型  
(f) Sixth mode

图 16 X-Y 柔性微动调整机构的固有振型

Fig. 16 Natural vibration modes of X-Y flexure mechanism

阶固有频率如表 2 所示。其中,第一阶固有频率为 471.3 Hz,满足机构设计时的振动要求。

表 2 机构的前六阶固有频率

Tab.2 The first 6 order natural frequencies for struture

固有频率阶数	固有频率/Hz
一阶	471.3
二阶	493.2
三阶	1 170
四阶	1 250
五阶	1 708
六阶	2 007

### 5 实验分析

本文研制的 X-Y 柔性微动调整机构及光刻物镜验证模型分别如图 17 和图 18 所示。光刻物镜验证模型中的第 3 片透镜为 X-Y 调整补偿透镜,调整机构的驱动器 1 和驱动器 2 均选用 PI 公司的 NEXLINE 压电式驱动器,它的运动行程为 10 mm,驱动力为 50 N,运动精度为 5 nm。按照机构的刚度和位移的输入-输出关系,该驱动器可以满足调整机构行程为±50 μm、精度为±50 nm 的设计要求。

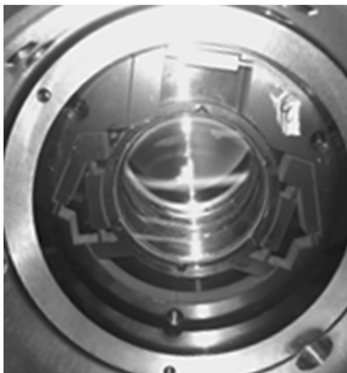


图 17 X-Y 柔性微动调整机构

Fig.17 Prototype of X-Y flexure mechanism

为了验证 X-Y 柔性微动调整机构的补偿效果,用 ZYGO 干涉仪对光刻物镜验证模型补偿前后的波像差进行了实测,如图 19 所示。光刻物镜验证模型按照各镜片的间隔、偏心、倾斜公差装调后,在 ZYGO 干涉仪下得到补偿前的系统波像差如图 20 所示。由图可知,系统波像差 RMS 值为 50.864 nm。

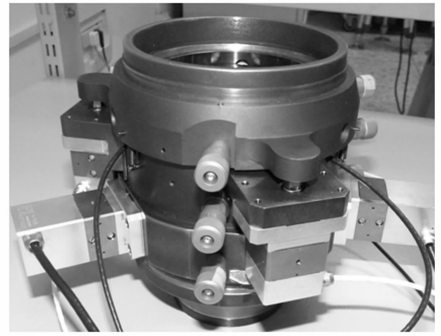


图 18 光刻物镜验证模型

Fig.18 Prototype of lithography lens model

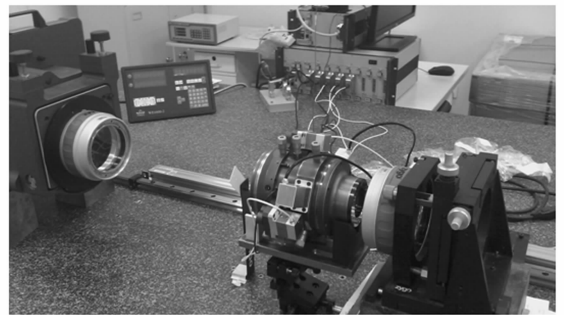


图 19 ZYGO 干涉仪测量系统波像差

Fig.19 Wave front error tested by ZYGO interferometer

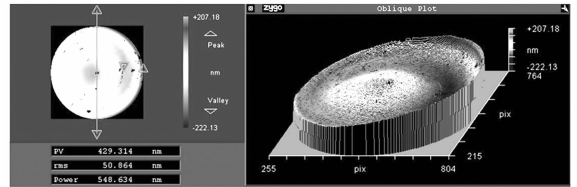


图 20 ZYGO 干涉仪测得补偿前的系统波像差

Fig.20 Testing results of wavefront error before compensation

将所得的 Zernike 多项式系数和补偿参数代入到光学系统的灵敏度矩阵中,得到 X-Y 调整补偿镜第 3 片透镜的调整量:X 方向的偏心补偿量为+0.03 mm,Y 方向的偏心补偿量为+0.012 mm。

根据本文研制机构的位移输入-输出关系,得到驱动器 1 和驱动器 2 的驱动量,然后用 ZYGO 干涉仪检测补偿后光学系统的波像差,结果如图 21 所示。由图可知,系统波像差 RMS 为 25.933 nm,从而证明了本文研制的 X-Y 柔性微动调整机构的正确性和可行性。



- [16] PARK S, YANG S. A mathematical approach for analysing ultra-precision positioning system with compliant mechanism [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164-165: 1584-1589.
- [17] 王华,张宪民,邓俊广. 基于压电陶瓷驱动的精确定位平台研究测试技术学报[J]. 测试技术学报, 2007, 21(4): 295-300.  
WANG H, ZHANG X M, DENG J G. Research on a precision positioning stage based on piezoelectric actuators [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2007, 21(4): 295-300. (in Chinese)
- [18] 孙立宁,董为,杜志江. 基于大行程柔性铰链的并联机器人刚度分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 90-95.  
SUN L N, DONG W, DU ZH J. Stiffness analysis on a wide-range flexure hinge-based parallel manipulator [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(8): 90-95. (in Chinese)
- [19] 孙恒,陈作模. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.  
SUN H, SUN Z M. *Mechanical Principle* [M]. Beijing: High Education Press, 2000. (in Chinese)

## 作者简介:



赵磊(1982-),男,山东蒙阴人,工学硕士,助理研究员,主要从事光机结构设计方面的工作。E-mail: zhaol@sklao.ac.cn



赵阳(1982-),男,吉林长春人,博士,助理研究员,主要从事光学设计与光学装调的工作。E-mail: juvenus-xx@126.com



巩岩(1968-),男,吉林梅河口人,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为传感器技术、光机电一体化技术。E-mail: gongy@sklao.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)