

光刻投影物镜中动镜 X-Y 向柔性调节机构设计

杨超^{1,2}, 朱咸昌¹, 金川^{1,2}, 胡松^{1*}

¹中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对光刻投影物镜中动镜 X-Y 向调节机构精度高、行程小、结构紧凑的需求, 提出了一种 X-Y 向一体式调节机构。所提机构基于四连杆调节原理, 利用内外圈独立分布的 X-Y 向柔性铰链, 无需解耦即可实现 X/Y 向高精度调节。首先根据投影物镜中动镜的调节精度和行程, 完成所提机构的结构设计; 然后运用有限元分析法仿真分析所提 X-Y 向柔性调节机构的性能。分析结果表明: 所提机构调节行程大于 $\pm 20 \mu\text{m}$, X 向、Y 向的刚度值分别为 $0.542 \mu\text{m}/\text{N}$ 、 $0.671 \mu\text{m}/\text{N}$; 单 X、Y 向开环驱动时, 垂直方向耦合误差与主方向移动量之比分别为 6.86%、4%; 模态大于 100 Hz。最后, 对所提调节机构进行了性能测试实验, X 向重复定位精度为 36.3 nm, Y 向为 41.7 nm; 调节过程中, 角度偏移小于 $0.5''$ 。实验结果表明, 所提柔性调节机构能够满足光刻投影物镜像质补偿对 X-Y 向高精度调节要求。

关键词 成像系统; 光刻物镜; 像质补偿; 动镜; X-Y 向调节机构; 柔性铰链

中图分类号 TH703

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0411002

Design of X-Y Flexible Adjustment Mechanism for Moving Mirror in Lithographic Projection Objective

Yang Chao^{1,2}, Zhu Xianchang¹, Jin Chuan^{1,2}, Hu Song^{1*}

¹State Key Laboratory of Optical Technologies for Micro-Fabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Aiming at the requirements of high precision, small stroke, and compact structure of X-Y direction adjustment mechanism of moving mirror in lithography projection objective, an X-Y direction integrated adjustment mechanism is proposed. Based on the four-bar adjustment principle, the proposed mechanism uses X-Y flexure hinges with independent inner and outer rings to realize high-precision adjustment in X/Y direction without decoupling. First, the structure design of the proposed mechanism is completed according to the adjustment accuracy and stroke of the moving mirror in the projection objective; then, the performance of the proposed X-Y flexible adjusting mechanism is simulated and analyzed by using the finite element analysis method. The analysis results show that the adjustment stroke of the mechanism is greater than $\pm 20 \mu\text{m}$. The stiffness values in X direction and Y direction are $0.542 \mu\text{m}/\text{N}$, $0.671 \mu\text{m}/\text{N}$, respectively; the ratio of the vertical coupling error to the displacement in the main direction is 6.86% and 4%, respectively; the mode is greater than 100 Hz. Finally, the performance test of the proposed adjustment mechanism is carried out, the repeated positioning accuracy in X direction and Y direction is

收稿日期: 2021-02-05; 修回日期: 2021-03-24; 录用日期: 2021-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(61875201, 61975211, 62005287)、四川省杰出青年科技人才(2020JDJQ0005)、四川省中央引导地方科技发展项目(2020ZYD020)

通信作者: husong@ioe.ac.cn

36.3 nm and 41.7 nm, respectively. During the adjustment process, the angle offset is less than 0.5". The experimental results show that the proposed flexible adjustment mechanism can meet the high-precision adjustment requirements of X-Y direction for image quality compensation of lithographic projection objective.

Key words imaging systems; lithography objective; image quality compensation; moving mirror; X-Y direction adjustment mechanism; flexible hinge

1 引言

光刻投影物镜在装配和工作过程中出现的误差会造成系统波像差偏离设计值^[1-3]。为了满足系统波像差的要求,提高成像质量,在设计时一般选用可调光学元件作为补偿器^[4],通过调节机构使光学元件做 X-Y 向精密运动来补偿相应的像差,这些可调光学元件称为动镜^[5]。机构的调节量一般为微米级,调节精度为百纳米级^[6]。传统刚性传动机构构件间存在着间隙、摩擦和磨损,难以满足现有高精度要求。柔性机构是以柔性铰链代替传统运动部件,根据元件弹性变形的特性来传递运动、力或能量的机械装置。相比刚性调节机构,柔性机构运动分辨率高、制造工艺简单且无摩擦、不需润滑^[7],在制造、精度调节和装配空间上有着显著的优势,因而广泛应用于半导体设备^[8-9]、精密光学仪器^[10]、生物医药^[11]、光学遥感^[12-13]、超精密加工^[14]等领域。

Li 等^[15]用 24 个柔性铰链组合设计了一个二维移动平台,在 117 μm 的工作行程内达到了 2 μm 的定位精度。Hale^[16]研制了用于极紫外系统 X-Y 向二自由度柔性机构。Ryu 等^[17]基于柔性机构设计了一种 X-Y- θ_z 三自由度运动硅片工作台,并分析了机构的输入-输出位移关系和刚度特性。王华等^[18]运用柔性并联机构研制了 X-Y- θ_z 三自由度的调节机构。赵磊等^[19]基于 6 连杆机构结合柔性铰链,设计了一种应用于光刻物镜的 X-Y 向微动调节机构, X/Y 方向运动的原理误差分别为实际量的 8.22% 和 6.68%。孙振等^[20]基于三角换向原理设计了 V 形柔性单元机构,同时分析了该机构对光学元件热变形的影响。陈华男等^[21]将柔性二级减速机构应用在动镜调节机构中,提高了调节定位精度。上述柔性机构多采用多自由度解耦实现平移运动,不易实现 X-Y 向独立控制,未能满足高精度投影光刻物镜实时像质补偿的要求。

针对光刻投影物镜中动镜空间尺寸小、调节精度高特点,本文基于柔性铰链提出了一种无需解耦的一体式 X-Y 向调节机构,并对研制的机构进行了实验验证。

2 X-Y 向柔性微动调节机构的结构设计

2.1 X-Y 向柔性调节结构原理

光刻物镜中动镜 X-Y 向调节机构的特点是行程小 (20 μm), 运动精度较高 (优于 50 nm), 并要求运动中无空回误差、无颗粒和油脂污染。因为常规铰链在运动过程中的摩擦会产生颗粒污染, 所以采用圆形切口柔性铰链代替传统的旋转副实现高精度位移量传递。针对光刻物镜中动镜高精度实时偏心调节的需求, 本实验组基于柔性铰链的特性, 设计了一种 X-Y 向调节机构, 等效简图如图 1 所示。

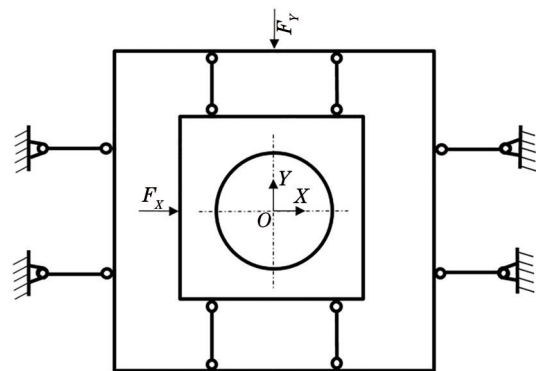


图 1 X-Y 向柔性调节机构等效简图

Fig. 1 Equivalent diagram of X-Y direction flexible adjustment mechanism

根据平面机构的自由度公式^[22], 可知

$$N_{\text{DOF}} = 3n - (2P_1 + P_h), \quad (1)$$

式中: N_{DOF} 为机构自由度数目; n 为机构中活动构件的数量; P_1 为低副数量; P_h 为高副数量。由图 1 可知, 所提机构中活动构件的数量为 10, 转动副低副数量 $P_1=16$, 高副数量 $P_h=0$, 经过运算可知, 该机构自由度数目 $N_{\text{DOF}}=-2$, 表明所提等效机构过约束, 在驱动力 F_x 和 F_y 的作用下, 机构中心不会发生移动。但该机构由内外两层独立的柔性铰链替代转动副构成, 基于柔性铰链的弹性特点, 在 F_x 的作用下, 机构内圈会产生 X 向微小位移, 带动透镜产生

X 向位移; 在 F_Y 的作用下, 外圈产生 Y 向微小位移, 带动内圈与透镜同时向 Y 向运动。

圆形切口柔性铰链如图 2 所示, 横截面为矩形, t 、 h 、 b 分别为单轴双圆弧柔性铰链的最小厚度、高度

及宽度, R 为圆弧半径, θ_m 为圆弧的圆心角。

在 X 轴截取高度为 a , 长度 $\Delta x = \Delta(R \sin \theta)$, 宽度为 b 的微元, 在力矩 M_z 的作用下柔性铰链的变形 α_z ^[23] 为

$$\alpha_z = \frac{12M_z}{EbR^2} \int_{-\theta_m}^{\theta_m} \frac{\cos \theta}{\left(\frac{t}{R} + 2 - 2\cos \theta\right)^3} d\theta = \frac{12M_z}{EbR^2} f_1, \quad (2)$$

$$f_1 = \int_{-\theta_m}^{\theta_m} \frac{\cos \theta}{\left(\frac{t}{R} + 2 - 2\cos \theta\right)^3} d\theta = \frac{8\gamma^4(2\gamma + 1) \tan \frac{\theta_m}{2}}{(4\gamma + 1)^2 \left[1 + (4\gamma + 1) \tan^2 \frac{\theta_m}{2}\right]} + \frac{4\gamma^3(6\gamma^3 + 3\gamma + 1) \tan \frac{\theta_m}{2}}{(4\gamma + 1)^2 \left[1 + (4\gamma + 1) \tan^2 \frac{\theta_m}{2}\right]} + \frac{12\gamma^4(2\gamma + 1)}{(4\gamma + 1)^{5/2}} \arctan \left(\sqrt{4\gamma + 1} \tan \frac{\theta_m}{2} \right), \quad (3)$$

式中: $\gamma = \frac{R}{t}$; E 为材料弹性模量。弓形柔性铰链的转动刚度的表达式为

$$k_1 = \frac{EbR^2}{12f_1}. \quad (4)$$

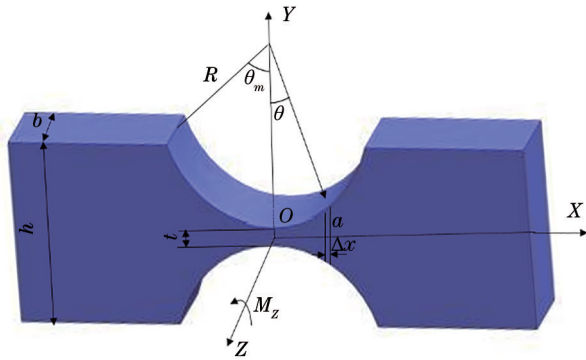


图 2 圆形切口柔性铰链

Fig. 2 Round notch flexible hinge

由(4)式可知, 转动刚度与宽度、弹性模量呈线性递增关系, 与最小厚度 t 呈曲线递增关系, 且增速随 t 的增大而增大, 与半径 R 、圆心角 θ_m 呈曲线递减关系; 根据需要将柔性铰链设计成 X/Y 向刚度较小、Z 向刚度较大的形式, 防止机构在 X/Y 向运动时引起 Z 向的运动和偏摆。因此设计的柔性铰链在小转角范围内仅存绕 Z 轴摆动一个自由度, 故可将其等效为转轴为 Z 轴的单轴转动副。

2.2 X-Y 向柔性调节机构的结构设计

将圆形切口柔性铰链代替传统的转动副得到的 X-Y 柔性微动调节机构如图 3 所示。X 向、Y 向

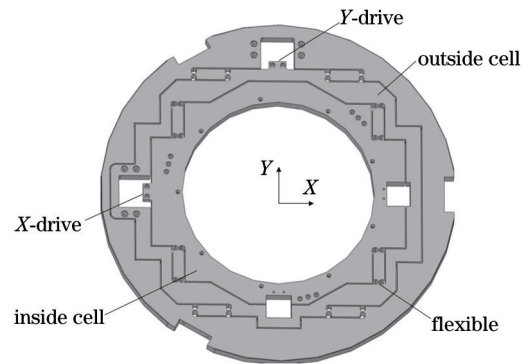


图 3 X-Y 方向微动机构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of micro-movement mechanism in X-Y direction

铰链分为内外两层, 且铰链正交布置。每个方向上对称布置 8 个柔性环节, 除了起到能微小变形实现 X/Y 两个方向运动外还具有各自的导向作用, 以保证两个运动方向独立互不干涉。X 向驱动器驱动内层铰链结构实现 X 向运动, Y 向驱动器驱动外层铰链结构实现 Y 向运动。X-Y 向柔性调节机构为一体式的镜框外环和镜框内环, 结构紧凑, 可通过慢走丝线切割或电化学腐蚀等方法进行加工。

压电陶瓷驱动透镜在 X、Y 两个方向上分别进行运动时, 采用柔性铰链作为各机构之间位移量的传递介质, 所设计的 X-Y 向柔性调节机构三维模型如图 4 所示。首先由各自方向上的压电陶瓷驱动柔性铰链产生变形, 使连接透镜的机构内圈分别在相应方向上移动, 结合电容传感器闭环控制, 实现镜片的高精度位移调节。所提机构选用压电陶瓷

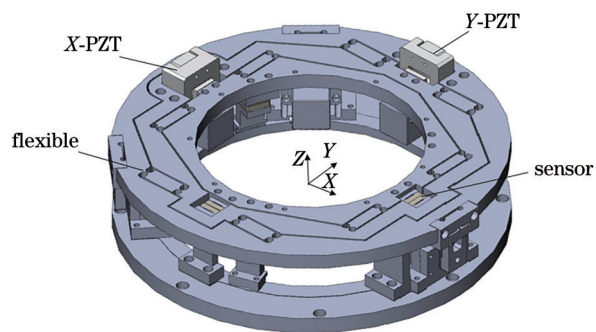


图4 X-Y向柔性调节机构三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of X-Y direction flexible adjustment mechanism

(PZT,PI公司,N-111.2A型)驱动器,开环移动精度为5 nm,移动范围为0~10 mm,驱动器推力和拉力分别为50 N和70 N。电容传感器为PI公司的D-100型电容传感器。

3 X-Y向柔性微动调整机构的仿真分析

3.1 机构静力学分析

在完成机构设计后,基于已知压电陶瓷驱动器驱动力等参数,需要分析机构的刚度、运动方向上的行程,同时评估机构平面内单X/Y方向运动时Y/X方向上的耦合误差,以便建立误差函数进行补偿。最后,为满足光刻投影物镜中动镜对振动环境的要求,考虑运输和使用过程中振动干扰引起共振的情况,还需对微动调节机构的模态进行分析。仿真时,铰链的材料为金属65 Mn。金属65 Mn的物理参数如表1所示。

表1 材料属性
Table 1 Material properties

Material	Density / (g·cm ⁻³)	Elastic Modulus /GPa	Poisson ratio
65 Mn	7.82	211	0.288

根据所设计的柔性微动结构,在ANAYS软件中采用六面体网格建立整体结构的有限元模型,如图5所示。在中间圆形区域,增加质量为0.8 kg的质量点,模拟装入镜片后的情形。仿真时将外框固定,在X方向、Y方向上施加驱动力模拟压电陶瓷驱动器的驱动过程,上板柔性铰链内圈的位移变形结果如图5所示,即光学元件随内圈一起运动的位移值。

图6为X方向上的驱动力与位移大小的关系,其中Max-x、Min-x和Max-y、Min-y分别为相同驱

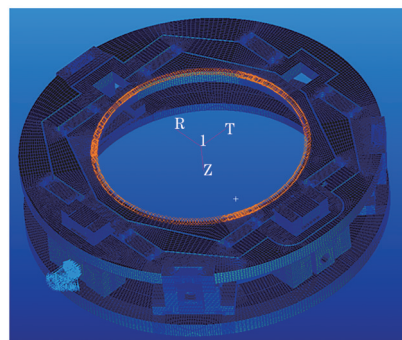


图5 有限元计算模型

Fig. 5 Finite element calculation model

动力下X方向和Y方向最大驱动位移量、最小驱动位移量。从图中可以看出,当压电陶瓷 F_x 的力在 $[-40\text{ N}, 40\text{ N}]$ 之间变化时,柔性铰链内圈X方向位移大小约为 $60\ \mu\text{m}$,能够驱动镜片的行程为 $60\ \mu\text{m}$ 。Y方向上的位移大小与驱动力的关系如图7中Max-y和Min-y所示。当压电陶瓷 F_y 的力在 $[-40\text{ N}, 40\text{ N}]$ 之间变化时,能够驱动镜片的行程为 $51\ \mu\text{m}$ 。考虑到可靠性等因素,可以使用的行程为 $40\ \mu\text{m}$,可以满足该X-Y柔性微动调节机构调节行程 $\pm 20\ \mu\text{m}$ 的设计要求。

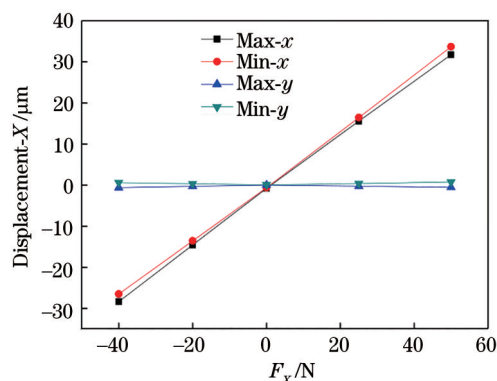


图6 F_x 和位移大小之间的关系

Fig. 6 Relationship between F_x and displacement

机构刚度为单位驱动力引起机构目标位移的大小。根据机构的运动原理,X向驱动器与Y向驱动器工作时,机构中柔性铰链产生变形,从而带动镜框内框和镜片分别沿X方向、Y方向运动。因此,从图6和图7中可以看出,机构圈圆周处位移随着驱动力的增大而线性增大,X方向、Y方向内位移大小与驱动力之比的刚度曲线为线性的。X方向、Y方向的刚度值分别为 $0.752\ \mu\text{m}/\text{N}$ 和 $0.638\ \mu\text{m}/\text{N}$ 。

由于铰链机构的影响,单向移动会引起其余方向的相关位移变化,这个寄生位移称为机构耦合误

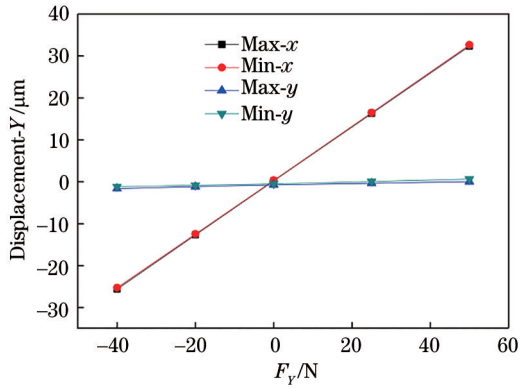


图 7 F_y 和位移量之间的关系

Fig. 7 Relationship between F_y and displacement

差。通过仿真仅受 X/Y 方向上作用力时镜片在 Y/X 方向上的位移量,可以评估各个方向上的耦合误差大小。X 向驱动下 Y 方向上的耦合误差位移量与驱动力的关系如图 6 中 Max-y 和 Min-y 所示。从图中可以看出, X 向驱动力引起 Y 方向位移误差在 $3 \mu\text{m}$ 以内;从图 7 中 Max-x 和 Min-x 可知, Y 方向驱动力

引起内框中心 X 方向位移误差在 $2 \mu\text{m}$ 以内。分析数据可知, X 方向、Y 方向的耦合误差量与移动量的比值为 6.86% 和 4%。若用电容传感器分别检测光学元件 X 方向与 Y 方向的实际误差量,并反馈给驱动器构成闭环控制,则耦合误差能得到有效控制。

3.2 机构模态分析

通过自由模态分析,可以掌握机构的固有频率和阵型。光刻投影物镜工作时振动环境要求调节机构整体的固定频率高于 100 Hz。提高机构的固有频率不仅可以避开环境共振,还可以提升机构动态性能和测量稳定性。对所提调节机构进行仿真,得到的前 6 阶模态结果如图 8 所示,得到的前 6 阶固有频率如表 2 所示。第 1 阶固有频率为 103.73 Hz,表明设计的机构不易发生谐振,满足机构设计对环境稳定性的要求,还拥有较快的实时响应,保障光刻机在曝光过程中波像差校正的实时性。

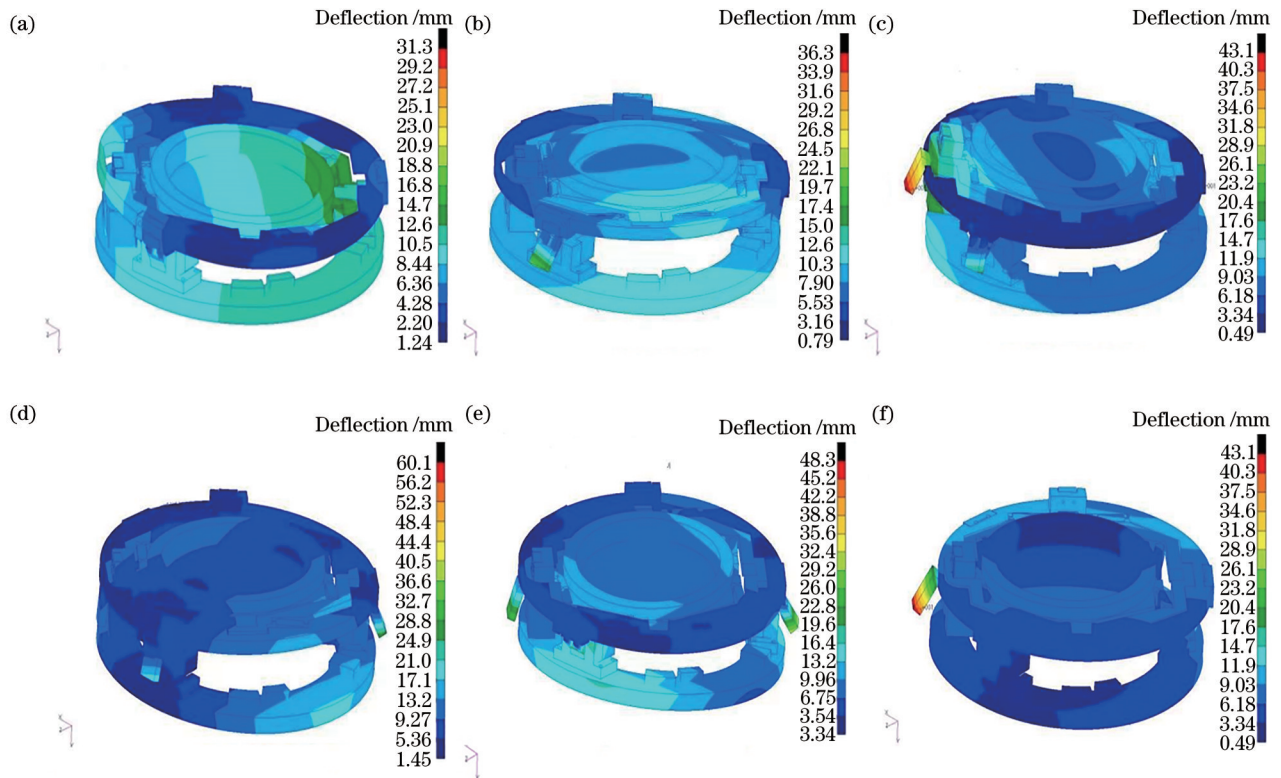


图 8 X-Y 柔性微调调整机构的固有振型。(a) 1 阶模态; (b) 2 阶模态; (c) 3 阶模态; (d) 4 阶模态; (e) 5 阶模态; (f) 6 阶模态

Fig. 8 Natural vibration modes of X-Y flexible micro adjustment mechanism. (a) First mode; (b) second mode; (c) third mode; (d) fourth mode; (e) fifth mode; (f) sixth mode

4 实验分析

为初步验证 X-Y 向调节机构设计的合理性,加

工了一套 X-Y 向调节机构。考虑到光刻物镜中透镜加工周期长、成本高及工程研制的风险性,使用同等质量的模拟透镜装配在设计机构中进行机构性能

表 2 机构的前 6 阶固有频率

Table 2 First 6 natural frequencies of mechanism

Mode	1	2	3	4	5	6
Frequency /Hz	103.73	110.94	118.29	134.98	140.20	201.16

测试实验,主要测试重复定位精度和方向偏移误差。实验平台搭建在恒温装调间内,环境温度保持在 $(22\pm 1)^\circ\text{C}$,光路基座为钢质气浮隔振平台。图 9 为实验装置图。实验系统主要由被测的 X-Y 向调节机构、双频激光干涉仪、自准直仪、模拟透镜组成,其中双频激光干涉仪是作为基准测量调节机构重复定位精度的仪器;自准直仪测量 X/Y 调节过程中角度偏移量。

工作时,压电陶瓷驱动柔性机构带动透镜在 X/Y 方向运动,随后支撑面内环附近各个方向上分布的电容传感器对镜片在对应方向上的实际移动量进行测量,并将其反馈给相应的压电陶瓷驱动器完成闭环控制,实现对动镜移动量的高精度要求。

首先进行机构重复定位精度实验,X/Y 单向测试行程为 $100\ \mu\text{m}$,测量时,压电陶瓷驱动 X-Y 向柔性调节机构在全行程 $100\ \mu\text{m}$ 以内以 $20\ \mu\text{m}$ 的步长分 5 段步进,依次经过 $P_1\sim P_6$ 点,并进行 200 个周期的往返运动,运动过程示意图如图 10 所示。双频激光干涉仪具有亚纳米级测量精度,将其测量的实际移动量作为基准,确定机构闭环驱动后的重复定位精度。X 向驱动时得到 $P_1\sim P_6$ 点定位精度结果如图 11

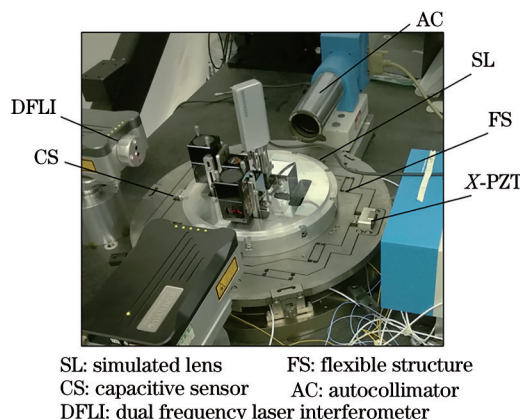


图 9 X-Y 向调节机构性能测试实验装置图

Fig. 9 Experimental device diagram of X-Y direction adjusting mechanism performance test

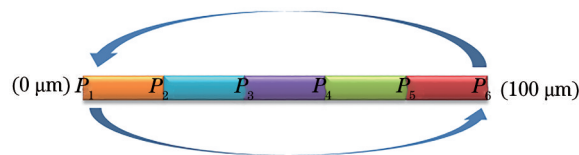


图 10 X/Y 向往返运动过程示意图

Fig. 10 Schematic diagram of X/Y reciprocating motion process

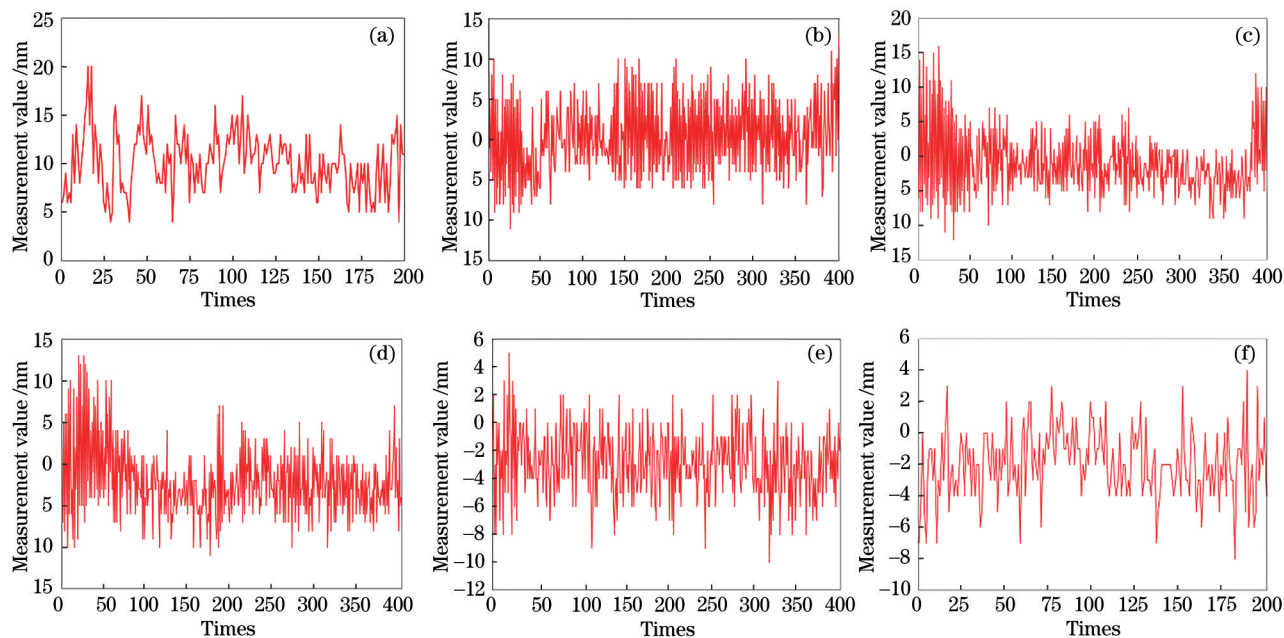


图 11 X 向驱动重复定位精度测试结果。(a) P_1 点; (b) P_2 点; (c) P_3 点; (d) P_4 点; (e) P_5 点; (f) P_6 点

Fig. 11 Test results of repeated positioning accuracy of X-direction drive. (a) P_1 point; (b) P_2 point; (c) P_3 point; (d) P_4 point; (e) P_5 point; (f) P_6 point

所示, Y 向驱动时定位精度结果如图 12 所示。将双频干涉仪测量的 PV 值作为测量结果, 测量的 3σ 最大值为动镜重复定位精度: X 向定位精度为 $36.3 \text{ nm}(3\sigma)$; Y 向定位精度为 $41.7 \text{ nm}(3\sigma)$ 。

通过自准直仪检测全行程的调节过程角度偏移, 评估调节机构运动直线性, 实验结果如图 13 所

示。计算表明, 全行程范围内角度 θ_x 和 θ_y 分别为 $0.37''(\text{PV})$ 和 $0.41''(\text{PV})$ 。根据实验数据可知: 单向驱动时, X/Y 向定位存在误差, 但结果表明重复定位精度均优于 50 nm , 各自方向上的偏移角度优于 $0.5''$ 。误差主要由机构的加工误差、驱动的控制误差、环境的影响组成。

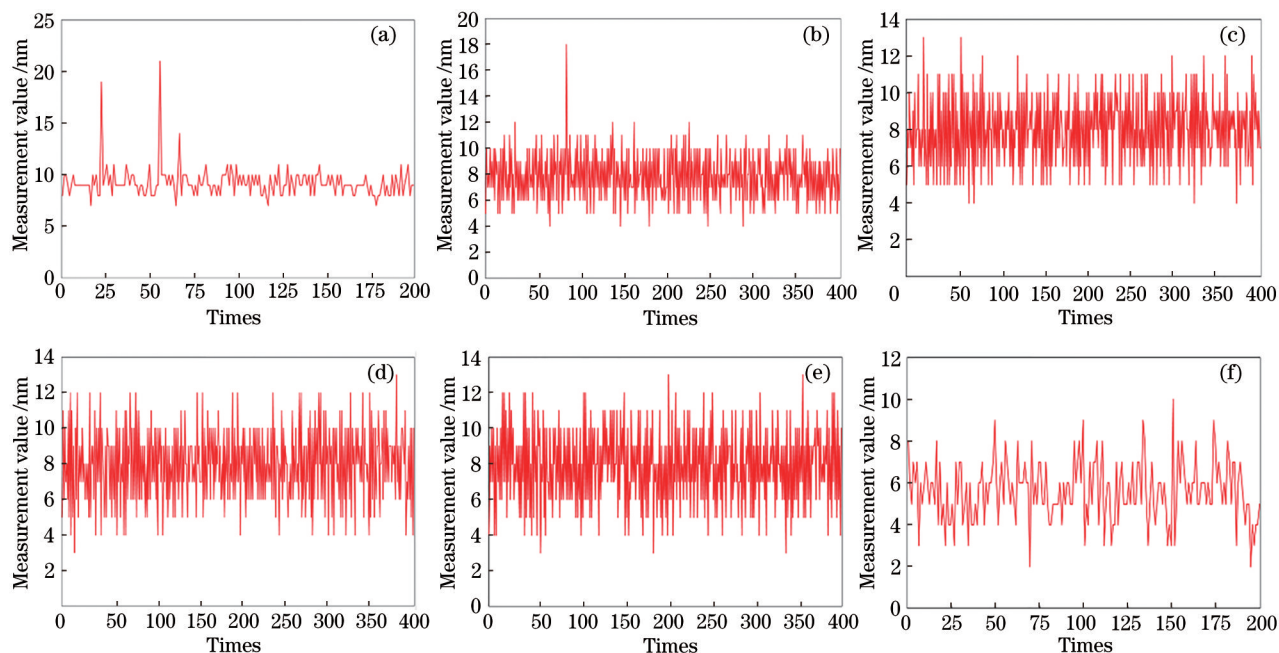


图 12 Y 向驱动重复定位精度测试结果。(a) P_1 点; (b) P_2 点; (c) P_3 点; (d) P_4 点; (e) P_5 点; (f) P_6 点

Fig. 12 Test results of repeated positioning accuracy of Y-direction drive. (a) P_1 point; (b) P_2 point; (c) P_3 point; (d) P_4 point; (e) P_5 point; (f) P_6 point

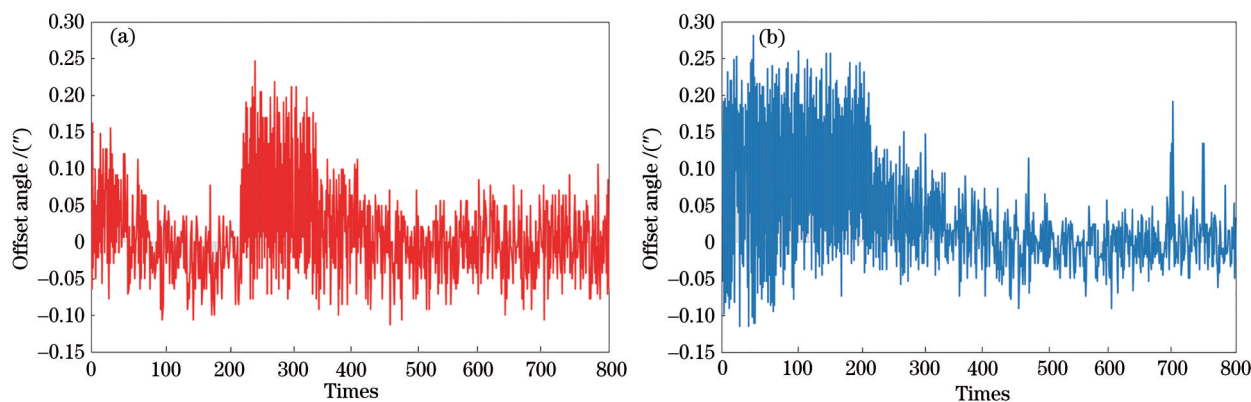


图 13 X、Y 向全行程驱动偏移角度测试结果。(a) X 方向角度偏移测量值; (b) Y 方向角度偏移测量值

Fig. 13 Test results of X, Y direction full stroke drive offset angle. (a) X direction angular offset measurement value; (b) Y direction angular offset measurement value

4 结 论

基于柔性铰链, 设计一种可用于光刻投影物镜波像差补偿的新型 X-Y 向精密调节机构。所提机构利用内外圈独立分布的 X-Y 向柔性铰链, 无需解

耦即可实现 X/Y 向高精度调节。仿真分析了所提机构运动方向的行程、刚度、耦合误差和固有频率。实验结果表明, 所提调节机构的重复定位精度优于 50 nm , 全行程范围内偏移角度小于 $0.5''$, 设计的 X-Y 向柔性调节机构结构简单、可靠性高, 能够满足高

精度投影光刻物镜对 X-Y 方向偏心调节机构的需求。

参 考 文 献

- [1] Xu W C, Huang W, Yang W. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 112203.
许伟才, 黄玮, 杨旺. 投影光刻物镜倍率的公差分析与补偿[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 112203.
- [2] Guo P, Zhou J, Ding X Y, et al. Method to solve assembly misalignment of two-reverse system based on vector wave aberration theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0722002.
郭攀, 周军, 丁晓宇, 等. 基于矢量波像差理论的两反系统装配失调解算方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0722002.
- [3] Li Y Q, Liu Y, Liu L H. Effect of thermal deformation on imaging performance for 16 nm extreme ultraviolet lithography objective[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0122001.
李艳秋, 刘岩, 刘丽辉. 16 nm 极紫外光刻物镜热变形对成像性能影响的研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0122001.
- [4] Guo K, Gong Y. Effect of adjusting force on surface figure of optical element in axial adjustment mechanism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1123001.
郭抗, 巩岩. 轴向调节机构中调节力对光学元件面形的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1123001.
- [5] Feng M C, Xu L, Wang Y J. Collimation factors and performance analysis based on Michelson interferometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 132201.
冯明春, 徐亮, 王玉杰. 基于迈克耳孙干涉仪的准直因素及性能分析研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 132201.
- [6] Fukagawa Y, Shinano Y, Nakamori M. Optimum adjustment for distortion in semiconductor lithography equipment[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2008, 2(3): 378-384.
- [7] Yu J J, Pei X, Bi S S, et al. State-of-arts of design method for flexure mechanisms[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(13): 2-13.
于靖军, 裴旭, 毕树生, 等. 柔性铰链机构设计方法的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(13): 2-13.
- [8] Yong Y K, Lu T F. Kinetostatic modeling of 3-RRR compliant micro-motion stages with flexure hinges [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, 44(6): 1156-1175.
- [9] Zhao L, Liang C, Zhang D F, et al. Forward kinematics of 3-RRR flexure parallel mechanism used in lens micro-adjustment[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1373-1381.
赵磊, 梁超, 张德福, 等. 基于 3-RRR 结构的光学元件柔顺微动调整机构的位姿正解[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1373-1381.
- [10] Liu H, Liu W Q, Feng R, et al. Novel design and analysis of a flexible mechanism of moving mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 184-189.
柳华, 刘伟奇, 冯睿, 等. 新型全柔性动镜机构的设计与分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 184-189.
- [11] Gao P, Yan G Z, Wang Z W, et al. Flexible locomotion system for gastrointestinal microrobots [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 541-549.
高鹏, 颜国正, 王志武, 等. 肠道微机器人柔性运动系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 541-549.
- [12] Wang Z S, Zhai Y, Mei G, et al. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1833-1841.
王忠素, 翟岩, 梅贵, 等. 空间光学遥感器反射镜柔性支撑的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1833-1841.
- [13] Lu Y F, Fan D P, Fan S X, et al. Design of two-axis elastic support for fast steering mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(12): 2574-2582.
鲁亚飞, 范大鹏, 范世珣, 等. 快速反射镜两轴柔性支撑设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(12): 2574-2582.
- [14] Kim H S, Kim E J, Song B S. Diamond turning of large off-axis aspheric mirrors using a fast tool servo with on-machine measurement[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 146(3): 349-355.
- [15] Li Y M, Xu Q S. Design and analysis of a totally decoupled flexure-based XY parallel micromanipulator[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(3): 645-657.
- [16] Hale L. Principles and techniques for designing precision machines[R]. Oak Ridge: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1999.
- [17] Ryu J W, Gweon D G, Moon K S. Optimal design of a flexure hinge based XYφ wafer stage[J]. *Precision Engineering*, 1997, 21(1): 18-28.
- [18] 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.

- 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[J]. 测试技术学报, 2007, 21(4): 295-300.
- [19] Zhao L, Gong Y, Zhao Y. 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.
- [20] Sun Z, Gong Y. Design of V-flexure axial adjusting mechanism of lithograph projection objective[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 101101. 孙振, 巩岩. 光刻投影物镜 V 形柔性轴向调节机构设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 101101.
- [21] Chen H N, Guo K, Zhang L H, et al. Designing for flexure-based X-Y adjusting mechanism of lithograph projection objective[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(6): 50-56. 陈华男, 郭抗, 张玲花, 等. 光刻投影物镜中 X-Y 向柔性调节机构设计[J]. 光电工程, 2015, 42(6): 50-56.
- [22] Sun H, Sun Z M. Mechanical principle[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 13-15. 孙恒, 陈作模. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 13-15.
- [23] Zuo X Y, Liu X M. Calculation and analysis of rotational stiffness for three types of flexure hinges [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1725-1728. 左行勇, 刘晓明. 三种形状柔性铰链转动刚度的计算与分析[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1725-1728.