

doi: 10.3788/gzxb20144304.0422005

光刻物镜中光学元件精密轴向调整机构的设计与分析

彭海峰, 孙振

(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, 长春 130033)

摘 要: 柔性铰链与高精度驱动器的结合是实现光学元件轴向精密调节的重要方法. 本文介绍了一种采用柔性铰链的轴向精密调节机构, 推导并得出了其实现精密调节的原理. 通过对应用柔性调节机构的一种典型光机系统的刚度分析, 得到在不超过柔性铰链材料屈服应力情况下, 光学元件的最大轴向位移可以达到 $200\ \mu\text{m}$ 以上; 同时, 对一种典型参量的柔性结构做了模态分析, 得到其一阶固有频率为 $185.1\ \text{Hz}$, 证明了调节机构的固有频率满足工作要求. 分析了驱动力在此种轴向调整机构中对镜片面形的影响, 结果表明: 调整机构在接近最大允许驱动力作用下对镜片面形影响为 $4.41\ \text{nm}$, 说明其对光学元件的面形影响较小. 该研究结果为柔性光学元件轴向调节机构的应用提供了有力依据.

关键词: 光刻物镜; 光学元件; 精密轴向调节; 面形分析; 柔顺铰链; 固有频率特性

中图分类号: TH132

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0422005-5

Design and Analysis of a Precision Axial Adjusting Mechanism for Optical Elements in Lithographic Lens

PENG Hai-feng, SUN Zhen

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

Abstract: The combination of flexure and PZT actuator is a significant method to achieve precision adjustment. A precision adjusting mechanism with flexure hinges was introduced and theoretical calculations were carried out to get the working principle of it. The optimization design and finite element analysis were also taken to acquire the axial stiffness of a typical opto-mechanic structure. The results show that the maximum axial displacement of the optics can be bigger than $200\ \mu\text{m}$ under the yield limit of the material. Secondly, a modal analysis is taken to obtain the natural frequency of the mechanism. The results indicated that the first resonant frequency of the structure is $185.1\ \text{Hz}$. It can be seen that the natural frequency can satisfy the work specification of the lithographic lens. At last, the influence of the applied force of the PZT to the surface figure of an optical element was obtained. The result shows that the influence of the force $F=14\ \text{N}$ to the RMS of the optic element is $4.41\ \text{nm}$. All these results provide useful evidences for the applyment of this mechanism for optic adjusting.

Key words: Lithographic lens; Optics; precision axial adjustment; Surface figure analysis; Flexure hinge; Natural frequency

OCIS Codes: 220.3740; 140.0140; 230.0230; 080.3630; 110.5220

0 引言

近年来,随着科技的发展和社会的进步,对微电子

加工产业的要求也越来越高. 光刻机作为微电子电路生产线的核心装备之一,起着至关重要的作用^[1],同时,其各光学元件的轴向和径向调节行程、准确度等都

基金项目: 国家重大专项基金(No. 2009ZX02205)资助

第一作者: 彭海峰(1986-),男,助理研究员,硕士,主要研究方向为精密光机系统设计. Email: kedapeng1986@163.com

收稿日期: 2013-07-31; 录用日期: 2013-11-08

<http://www.photon.ac.cn>

有着极其苛刻的要求. 由于在投影物镜工作过程中, 需对光学元件进行精密的轴向调节以进行像散及热像差的补偿^[2], 光学元件的轴向精密调节成为必须要解决的关键技术问题之一.

滚珠丝杠、凸轮等传统机械的轴向调节机构存在缝隙、需要润滑、需要经常性的维护且准确度不够高等问题, 很难被单独应用到光学元件的高准确度轴向调节中^[3-4]. 同时, 对精密光机系统来说, 光学元件的精密调节需要极高的位移准确度^[5-8]. 采用柔性机构结合压电驱动器和磁致伸缩驱动器^[9]等高准确度驱动器来实现精密位移调整的技术, 能够实现高准确度位移, 近年来在包括光学精密调焦、调整及自适应光学等光学元件精密调节领域得到了应用, 获得了较好的稳定性和高准确度^[10-14].

本文介绍了一种采用柔顺铰链的环形光学元件精密轴向调节机构, 并对其应用的圆角型铰链主要尺寸与刚度关系、固有频率特性做了分析, 并分析了支撑力在一种典型镜框结构中对镜框面形的影响, 为这种结构得到实际应用起到了参考作用.

1 光学元件精密轴向调节机构介绍

此柔性调节机构的结构设计方案见图 1, 机构由底座, 柔性机构部分, 驱动器作用点和上平台四部分组成, 镜框平稳的放置于上平台上, 驱动器通过换向机构作用于驱动器作用点上, 驱动柔性机构部分发生变形, 带动上平台和镜框一起向上运动. 以获得高准确度的轴向位移调节.

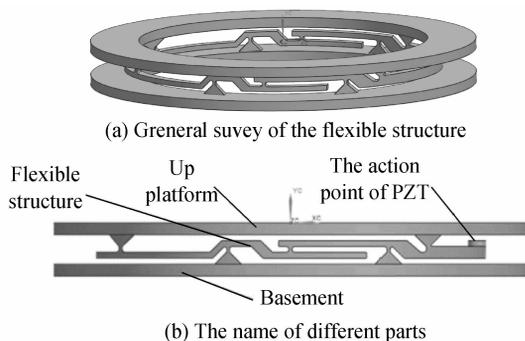


图 1 柔性调节机构示意图

Fig. 1 The structure of the flexible mechanism

柔性精密调整机构的光机系统如图 2, 由光学元件、定位环、镜框、柔性调整机构等几部分组成, 定位环起到定位镜框与柔性调整机构间关系的作用, 镜框平稳的放置于定位环上.

该调节机构是柔性铰链的高准确度性和杠杆原理的结合, 将柔性铰链等效为机械传动铰链, 并将环形机构等效成杆结构, 可以得到该精密轴向调节机构的等效原理如图 3, 镜框放置于 A, E 支点上部的上平台上, 点 B 和点 D 所示的支点的自由度被约束, 驱动力作用

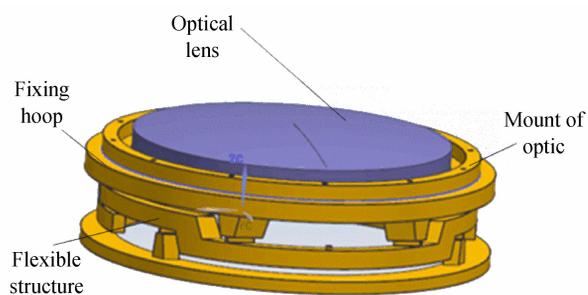


图 2 柔性调节机构光机结构示意图

Fig. 2 The opto-mech structure of the flexible mechanism

于点 F, 带动点 A 和点 E 向同一方向移动, 推导可得, 当

$$\frac{AB}{BC} = \frac{DE}{CD} \quad (1)$$

时, 柔性机构的 z 向位移输出点 A, E 在驱动器作用下, 轴向方向的位移相同, 在这种情况下, 可以实现对光学元件的轴向精密调节. 在实际应用时, 尺寸需在此式基础上予以微调以实现精确的传动比.

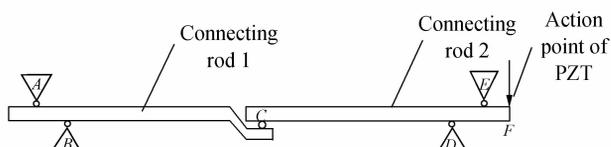


图 3 柔性机构原理简化图

Fig. 3 The principal view of the flexible structure

该柔性调节机构实际应用中可以选择弹性较高的金属材料, 如 60Si2Mn 弹簧钢, 并采用线切割或电火花加工的方法加工. 由于各铰链对力学的灵敏度要求高度一致, 故对加工准确度要求很高.

2 调节机构刚度与模态分析

2.1 调节结构轴向刚度特性分析

利用 NASTRAN 软件 Structure 模块对柔性调节机构进行分析, 在仿真分析中, 设置驱动力分布在 2~14 N 之间, 作用点为图 1(b) 所示的驱动点, 可以得到, 驱动力与轴向位移的关系如图 4, 光学元件的轴向位移分布于 38~122 μm 之间, 驱动力与位移基本呈线性关系.

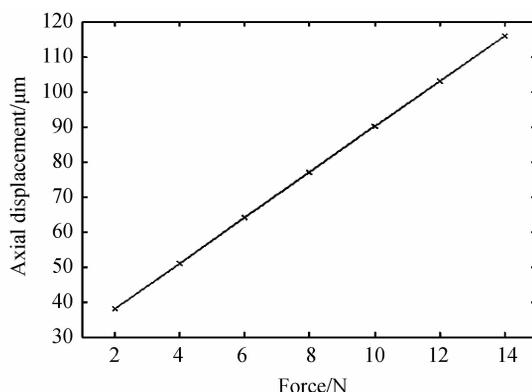


图 4 驱动力与轴向位移的关系

Fig. 4 The force VS the axial displacement

轴向调节机构的轴向刚度可由式(2)获得.

$$k_z = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \quad (2)$$

通过对分析结果的线性拟合可以得到,此轴向调节结构的轴向刚度 k_z 为 0.143×10^6 N/m,驱动力与光学元件轴向位移的关系满足

$$\Delta_{\max} = \frac{F + 3.428}{k_z} \quad (3)$$

由此可见在驱动器驱动力达到 20 N 且不超最大应力情况下,光刻物镜中光学元件的轴向位移可以达到 163 μm 以上,通过精确控制输入力的大小,可以实现对光学元件的大行程高精度调节.

2.2 调节机构最大调节行程分析

在光刻投影物镜中,准确度满足要求下,光学元件的调节行程是一个必须达到重要指标.但随着光学元件轴向位移的增大,柔性铰链部分的变形也增大,与此同时,柔性铰链处的最大应力也随之提高,因此需要对驱动位移与最大应力的关系进行分析.分别设定光学元件轴向位移为 25~200 μm ,步长为 25 μm ,通过力学分析,可以得到光学元件被设定在轴向位移情况下柔性铰链处最大应力的大小.常用作柔性铰链材料的屈服强度指标如表 1.

表 1 调节机构材料属性

Table 1 The yield stress of different materials

Materials	Yield stress/MPa
60Si2Mn	1 176
0Cr18Ni9Ti	210
QBe2	1 475

由分析结果可知,柔性铰链处强迫应力的最大值分布在 51~439 MPa 之间.60Si2Mn 弹簧钢的屈服强度可达 1 176 MPa,可见在不超材料可承受最大应力情况下,输出位移可以达到 200 μm 以上.

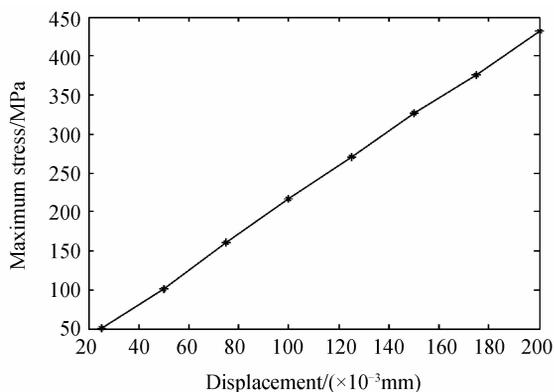


图 5 轴向位移与最大应力的关系

Fig. 5 The force VS the maximum stress

2.3 调节结构模态特性

为了满足光刻投影物镜对振动环境的工作要求,

调节机构的一阶固有频率需大于 120 Hz,因此,需对柔性调节机构进行模态分析.

在 NX-NASTRAN 环境下采用 Lanczos 法,得到调节机构的前三阶振型模态如图 6.

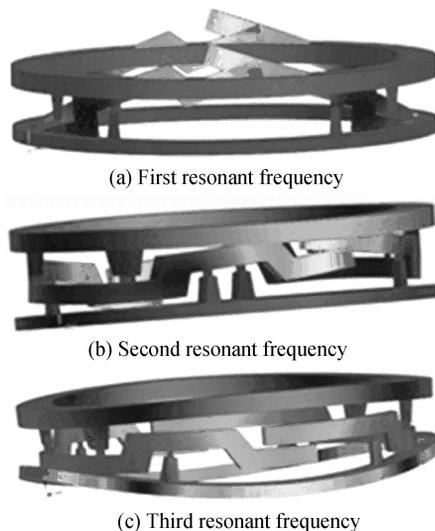


图 6 调节机构各阶模态图

Fig. 6 Schematic diagram of the frequency modes

分析结果见表 2,由此可见,调节机构的前三阶模态固有频率分别为 185.1,659.1 和 862.9 Hz,可见其一阶固有频率大于 120 Hz,可以满足光刻投影物镜的使用要求.

表 2 调节机构前三阶固有频率

Table 2 The first three resonant frequency of the flexible structure

Number of resonant frequency	Resonant frequency/Hz
1	185.1
2	659.1
3	862.9

3 驱动力对光学元件面形的影响

在精密光机系统中,光学元件的面形是一重要参量^[5-8].在光学元件柔性调节光机结构中,驱动器的输出力不可避免地会对光学元件的面型造成影响,在光刻投影物镜系统中,这种影响不可忽略.

对如图 2 所示的一种典型采用环面支撑结构的光机系统作有限元分析,可以得到在此工作状况下,驱动力对光学元件面形的影响.

在有限元仿真中,设置柔性机构材料为 60Si2Mn,镜框材料为殷钢,镜片材料为融石英,光学元件与镜框接触的环面被设置为胶粘状态,对其进行网格划分如图 7(a).光机系统划分网格单元后,共包括单元数 103 948 个.

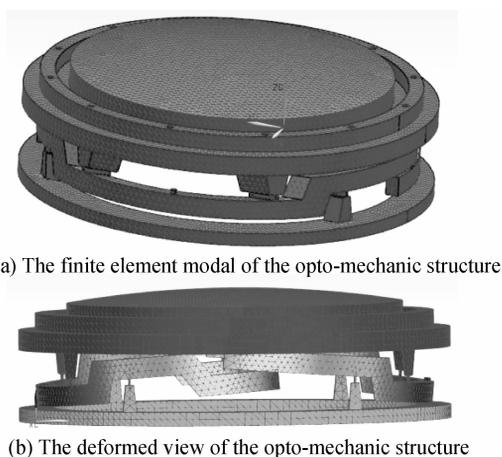


图7 光学元件受驱动力后面形分析

Fig. 7 The surface figure analysis of the optics with the actuating force

以 2 N 为步长, 设定驱动力范围为 2~14 N 之间, 获得了当驱动力在此范围内时, 由图 8 可以看出, 当驱动力 $F=10$ N 时, 元件面形变化值为 3.109 nm; 光学元件面形有效值 (Root Mean Square, RMS) 变化的仿真结果与驱动力的关系如图 9 所示。

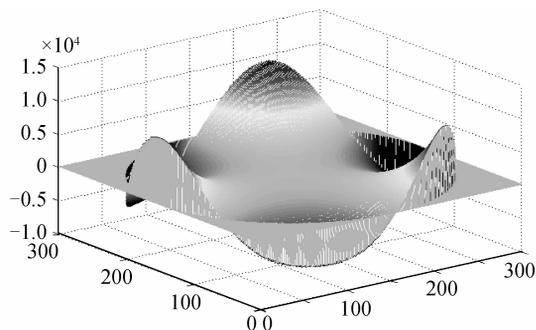
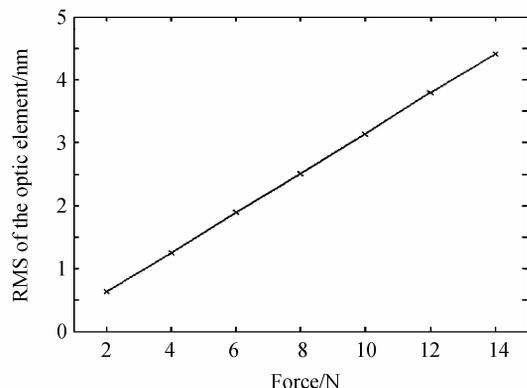
图8 $F=10$ N 时驱动力引起镜片面形变化Fig. 8 The lens aberration with the force $F=10$ N

图9 驱动力与镜片面形 RMS 值的关系

Fig. 9 The force VS the RMS of the optical element

从分析结果可以看出, 随着输入力的增大, 光学元件的面形 RMS 增大, 在输入力达到 14 N 时, 镜片面形变化仅为 4.41 nm, 由此可见, 由于驱动力的作用点远离光学元件, 驱动力对光学镜片面形的影响不大, 可以满足光刻物镜的工作要求。

4 结论

本文对一种采用柔性机构的光学元件轴向调节机构做了介绍, 并通过静力学分析, 证明其最大轴向位移可以达到 200 μm 以上; 同时, 根据模态分析可知, 其一阶固有频率为 185.1 Hz, 大于光刻物镜工作环境允许的固有频率下限。驱动力对镜片面形的仿真结果表明, 随着驱动力增大, 驱动力对镜片面形 RMS 的影响也随之增大, 但驱动力增大到 14 N 时, 其对镜片面形仅为 4.41 nm, 在光刻物镜工作的允许范围内, 可见在此种机构应用情况下, 通过精密调节输入力的大小, 可以实现对光学元件较高准确度且较大行程的精密轴向调节, 以实现对象散的补偿。

参考文献

- [1] FAY B. Advanced optical lithography development, from UV to EUV[J]. *Microelectronic Engineering*, 2002, **61-62**: 11-24.
- [2] XU Wei-cai, HUANG Wei, YANG Wang. Magnification tolercing and compensation for the lithographic projection lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 952-955.
许伟才, 黄纬, 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): 952-955.
- [3] PAROS J M, WEISBORD L. How to design flexure hinges [J]. *Machine Design*, 1965, **37**(27): 151-156.
- [4] TAN Fan-jiao, QIAO Yan-fen, LI Yao-bin, *et al.* Finite element analysis for surface shape deformation of photo electronic thendolite primary mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 756-763.
谭凡教, 乔彦峰, 李耀彬, 等. 光电经纬仪主镜面形变化的有限元分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 756-763.
- [5] LI Fu, RUAN Ping, ZHAO Bao-chang. Study on the surface deformation of flat reflector under gravity load[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **34**(2): 272-275.
李福, 阮萍, 赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 272-275.
- [6] WANG Fu-guo, WANG-Zhi, MING Ming, *et al.* Opto-mechanical structure design, alignment and test of prime focus optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 21-25.
王富国, 王志, 明名, 等. 主焦点式光学系统的光机结构设计及装调检测[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 21-25.
- [7] DUAN Xue-ting, ZHOU Ren-kui, Wu Meng-yuan, *et al.* Distortion alignment method for center shaft supporting large aperture mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 95-98.
段学霆, 周仁魁, 吴萌源, 等. 中心轴支撑大口径反射镜面形装调控制方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(12): 95-98.
- [8] YANG Liang, LI Zhao-hui, ZHANG Li-ping, *et al.* Design of reflector subassembly for lunar-based extreme ultraviolet camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1321-1326.
杨亮, 李朝辉, 张立平, 等. 月基极紫外相机反射镜组件的设计 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1321-1326.
- [9] ZHANG Jing-zhu, XU Cheng, ZHAO Yan-jun. Compliance calculation of a novel flexure hinge [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, **25**(11): 27-32.
张景柱, 徐诚, 赵彦峻. 新型柔性铰链的柔度计算[J]. *工程力学*, 2008, **25**(11): 27-32.

- [10] SUN Li-ning, MA Li, RONG Wei-bin, *et al.* Design and analysis on a 2-DOF nanopositioning stage[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(3): 406-411.
孙立宁, 马立, 荣伟彬, 等. 一种纳米级二维微定位工作台的设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(3): 406-411.
- [11] WANG Xue-liang, GONG Yan. Dynamic performance of the PZT driver used in lithographic objective[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1071-1075.
王学亮, 巩岩. 光刻物镜中压电陶瓷驱动器的动态性能研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(9): 1071-1075.
- [12] QI Ke-qi, Xiang Yang. Development of Phase-shifting device of wavefront aberration detecting stage for lithographic projection objective [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1452-1455.
齐克奇, 向阳. 光刻物镜波像差检测平台移相装置的研制[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1452-1455.
- [13] 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.
- [14] NI Ming-yang, 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]. *红外激光工程*, 2012, **41**(12): 3323-3330.