

光刻投影物镜 V 形柔性轴向调节机构设计

孙振 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 为了满足光刻投影物镜对轴向调节机构的调节行程大、精度高、结构紧凑等需求,基于三角形换向原理,设计了轴向调节机构。在调节机构中采用 V 形柔性单元换向机构,实现运动的换向和传递。针对机构的调节行程、驱动力、一阶固有频率以及机构传动比的要求,优化了 V 形柔性单元的结构尺寸参数。使用有限元方法分析了 V 形柔性单元的关键尺寸参数对机构性能的影响,得到机构调节行程可达 $\pm 55 \mu\text{m}$,调节精度优于 $\pm 10 \text{ nm}$,一阶固有频率大于 150 Hz。同时仿真分析了该轴向调节机构对光学元件的热变形的影响,在 20 mW 热载荷的作用下,该轴向调节机构导致光学元件面形变化为 0.087 nm[峰谷(PV)值]和 0.013 nm[均方根(RMS)值]。仿真结果证明该轴向调节机构对光学元件面形精度影响极小,满足光刻物镜应用要求。

关键词 成像系统; 光刻投影物镜; 轴向调节机构; V 形柔性单元; 热变形

中图分类号 TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.101101

Design of V-Flexure Axial Adjusting Mechanism of Lithograph Projection Objective

Sun Zhen Gong Yan

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

Abstract An axial adjusting mechanism is designed to meet the requirement of long adjusting distance, high precision and compact structure in projection objective, based on triangular switching principle. V-flexure element is designed to achieve the switching and transmission of motion in adjusting mechanism. The parameters of V-flexure element are optimized to satisfy the requirement of adjusting distance, drive force, frequency and ratio of transmission. The influence of changing V-flexure element parameters on mechanism performance is analyzed by finite element analysis method. The result is that the adjusting distance is $\pm 55 \mu\text{m}$, the adjusting precision is better than $\pm 10 \text{ nm}$ and the frequency is more than 150 Hz. And then thermal deformation of lens is analyzed when the thermal load is 20 mW. The result is that the peak-to-valley (PV) value of the upper surface is 0.087 nm, and the root-mean-square (RMS) value is 0.013 nm. The simulation results show that the influence of axial adjusting mechanism on lens surface figure precision is small. Such an axial adjusting mechanism can satisfy the requirement of lithograph projection objective.

Key words imaging systems; lithograph projection objective; axial adjusting mechanism; V-flexure element; thermal deformation

OCIS codes 110.5220; 120.4640

1 引言

在光刻投影物镜的设计和装调过程中需要严格控制系统波像差以达到成像质量的要求。光刻投影物镜的系统波像差要求在纳米量级,对于物镜的机械及光学制造的要求是极其苛刻的^[1]。为了更好地满足系统波像差要求,在物镜光学系统设计时采用可调元件对系统畸变、远心度、倍率等成像指标进行调节和补偿。常用的补偿器^[2-4]选择原则是选用对某一像差敏感、调节时对其他像差不敏感的光学元件作为补偿器,调节

收稿日期: 2013-06-13; **收到修改稿日期**: 2013-06-17; **网络出版日期**: 2013-09-02

基金项目: 国家重大科技专项 02 专项(2009ZX02005)、科技部中白国际合作项目(2011DFR10010)

作者简介: 孙 振(1987—),男,硕士,助理研究员,主要从事光机结构系统设计及装调等方面的研究。

E-mail: sunzhen176@163.com

该敏感元件的偏心或轴向位置来补偿相应的像差。

在结构上使用调节机构实现光学敏感元件的运动,调节机构在设计时既要保证元件在一个方向运动的同时不引入其他方向的耦合误差,又需考虑加工、装调、运输以及在线工作过程中存在的振动和冲击等因素的影响^[5]。调节机构还应有较高的一阶固有频率,避免在运输和使用过程中的振动干扰引起共振。

本文针对光学元件的轴向调节机构开展设计和分析。在像差补偿过程中,根据光学系统设计指标(光学元件的调节量为 $\pm 50 \mu\text{m}$,调节精度为 $\pm 50 \text{ nm}$,一阶固有频率大于 100 Hz),提出并设计了V形柔性轴向调节机构。基于三角形换向原理设计并优化了V形柔性单元换向结构,实现运动的换向并使调节机构的轴向空间紧凑。V形柔性单元换向结构和镜片支撑结构^[6-7]采用分体结构设计,使调节机构适用于不同镜片支撑结构,通用性强。结合有限元分析方法,分析了V形柔性单元的关键尺寸参数对机构性能的影响。同时仿真分析了轴向调节结构对光学元件的热变形的影响。该轴向调节机构可满足光刻物镜的应用要求。

2 轴向调节机构设计

针对光刻投影物镜系统中的平凹透镜设计轴向调节机构,该镜片尺寸如图1所示。由于该镜片位于物镜系统中间部位,其上下空间位置不允许布置驱动器,需要将驱动器沿径向方向布置,导致驱动器运动方向与调节机构轴向运动方向垂直,需要设计换向结构满足运动的换向和传递。

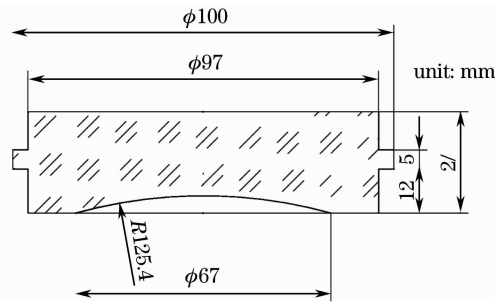


图1 轴向调节机构镜片

Fig. 1 Lens of axial adjusting mechanism

2.1 三角形换向原理

三角形换向是简单、有效的实现运动换向的方法。三角形换向原理示意图如图2所示。在三角形换向机构中改变底边边长 δx ,三角形顶点将沿垂直方向移动 δz 。在刚体条件下有

$$\begin{aligned} z &= C \cdot \sin \theta, \\ x &= C \cdot \cos \theta, \\ \delta z / \delta \theta &= C \cdot \cos \theta, \\ \delta x / \delta \theta &= -C \cdot \sin \theta, \\ \delta z / \delta x &= \frac{\delta z / \delta \theta}{\delta x / \delta \theta} = -\cot \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

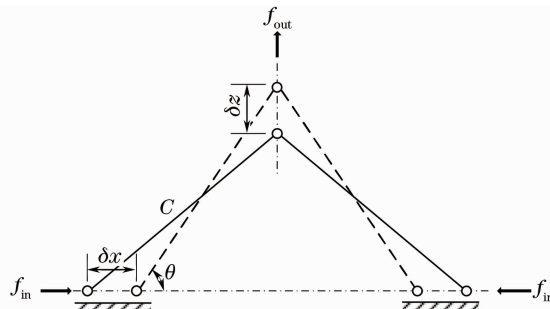


图2 三角形换向原理示意图

Fig. 2 Scheme of the triangular switching principle

式中 C 为三角形边长, θ 为三角形底角。

当 θ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内时, 随着 θ 的增大, $|\partial z / \partial x|$ 逐渐减小, 在 θ 接近 90° 时可得到 $\cot \theta < 1$, 能够实现输出与输入的传动比小于 1, 使机构的调节精度高于驱动器的运动精度。

2.2 轴向调节机构结构设计

在轴向调节机构中, 基于三角形换向原理设计了 V 形柔性单元换向结构, 该结构可将水平运动转换为轴向运动。V 形柔性单元结构如图 3 所示, 采用一体式结构, 包括 4 处十字形铰链、2 处导向铰链、刚性支杆、连接杆等。V 形柔性单元采用对称结构设计, 十字形铰链用于提供绕 x 轴旋转自由度和 z 向刚度。相比于 2 处十字铰链设计而言, 使用 4 处十字铰链是为了减小 V 形柔性单元的整体刚度, 使轴向运动行程更大。导向铰链用于 V 形柔性单元沿 y 轴运动的导向。刚性支杆用于满足结构空间需求, 提供 z 向刚度。连接杆主要用于 V 形柔性单元内部结构连接。3 个 V 形柔性单元成 120° 均布在镜框外围, 通过连接块 2 和 3 分别与镜筒和镜框连接, 在 V 形柔性单元的 1 处作用沿 y 向的驱动力, 经 V 形柔性单元换向, 使镜框做轴向运动。

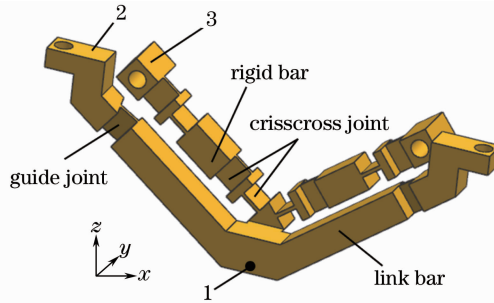


图 3 V 形柔性单元结构

Fig. 3 Structure of V-flexure element

在机构运动时, V 形柔性单元的十字铰链同时受弯曲和扭转作用, 单个铰链可看作悬臂梁结构, 其受力简图如图 4 所示。矩形截面悬臂梁受弯、受扭转时剪切应力的计算公式为

$$\tau_b = \frac{3}{2} \frac{F_s}{hb}, \quad (2)$$

$$\tau_t = \frac{T}{\alpha hb^2}, \quad (3)$$

式中 F_s 为受弯状态下横截面上的剪力, T 为扭矩, h 为铰链长度, b 为铰链厚度, α 为与 h/b 有关的系数。

由(2)、(3)式可以得出, 相对于铰链长度 h 而言, 铰链厚度 b 的变化对扭转应力的影响显著, 进而对调节机构的行程影响显著。

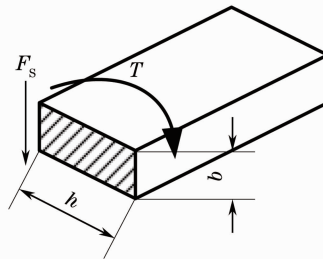


图 4 受力简图

Fig. 4 Schematic of load

轴向调节机构组件模型如图 5 所示, 镜片安装于镜框内部, 镜框与镜筒间通过 3 个 120° 周向均布的 V 形柔性单元连接, 3 个驱动器安装在镜筒上, 沿水平方向作用在 3 处 V 形柔性单元底部。驱动器选用调节时间短、运动精度高的压电陶瓷 (PZT) 驱动器^[8], 其调节时间为 $5 \mu\text{s}$, 调节精度为 5 nm 。

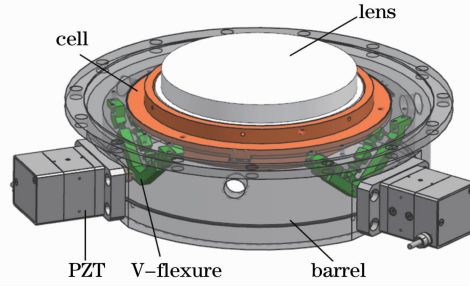


图 5 轴向调节机构组件模型

Fig. 5 Model of axial adjusting mechanism

3 轴向调节机构有限元分析

V形柔性单元是轴向调节机构中最重要的运动部件,由多个铰链串联组成,它是调节机构形成运动自由度和产生应力集中的主要部件。V形柔性单元各部分关键尺寸决定了调节机构的调节行程、固有频率和传动比等性能参数。本文采用有限元分析方法,通过改变V形柔性单元中的刚性杆长度、铰链长度、铰链厚度和V形夹角大小,获得这些关键参数对调节机构性能的影响。选取轴向调节机构V形柔性单元、镜框和镜片等主要部件建立有限元模型。镜框和V形柔性单元材料选用低膨胀合金Invar36,该合金在0~200℃范围内的膨胀系数极低^[9]。有限元模型如图6所示,材料属性如表1所示^[9-10]。

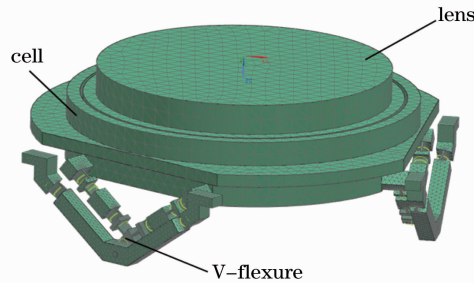


图 6 主要部件的有限元模型

Fig. 6 FEM of main parts

表 1 材料属性表

Table 1 Material properties

Parts	Material	Density / (g/cm ³)	Elastic modulus /GPa	Poisson ratio	Thermal expansion coefficient /K ⁻¹
Lens	SiO ₂	2.2	73	0.17	5.5×10 ⁻⁷
Cell and V-flexure	Invar36	8.12	141	0.3	1.6×10 ⁻⁶

根据机构空间尺寸限制,将各个参数的取值范围限定在表2所示范围内,各参数的初始值选取如表3所示。参照图3所示V形柔性单元结构,有限元分析时在镜筒连接块2处施加固定约束,在V形柔性单元底部1处施加水平载荷。为便于规律统计,在分析过程中仅改变单一参数,其他参数使用初始值,通过改变同一参数下不同的驱动力大小,在达到Invar36合金的屈服强度410 MPa时,获得机构的最大行程和所需驱动力,如图7~10所示。

表 2 各关键参数的取值范围

Table 2 Value range of key parameters

Rigid bar length /mm	Joint length /mm	Joint width /mm	V-angle / (°)
6	3	0.4	85
7	3.25	0.5	90
8	3.5	0.6	95
9	3.75	0.7	100
10	4	0.8	105

表 3 参数初始值

Table 3 Initial values of key parameters

Rigid bar length /mm	Joint length /mm	Joint width /mm	V-angle /($^{\circ}$)
8	3.75	0.6	105

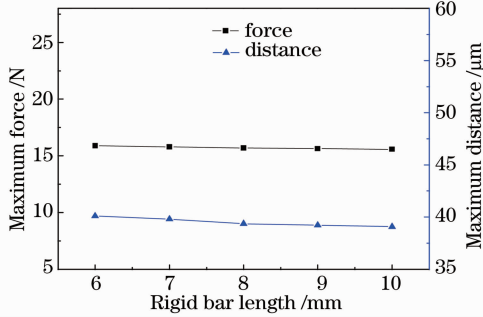


图 7 刚性杆长对驱动力和最大位移的影响
Fig. 7 Influence of changing rigid bar length on maximum force and distance

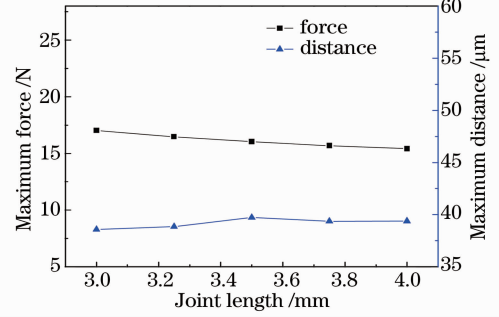


图 8 铰链长度对驱动力和最大位移的影响
Fig. 8 Influence of changing joint length on maximum force and distance

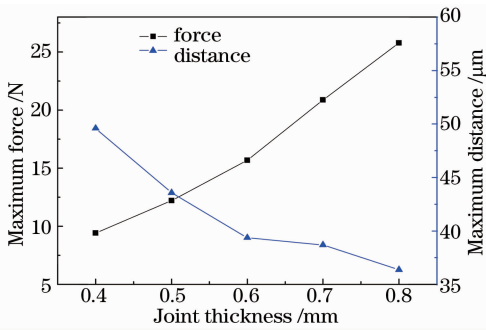


图 9 铰链厚度对驱动力和最大位移的影响
Fig. 9 Influence of changing joint thickness on maximum force and distance

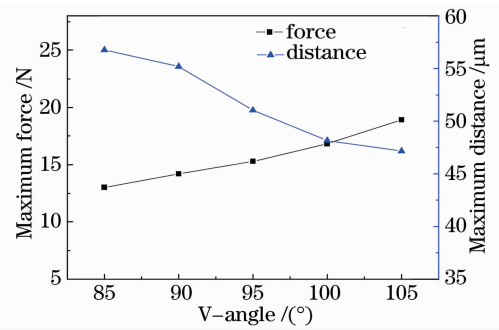


图 10 V 形角度对驱动力和最大位移的影响
Fig. 10 Influence of changing V-angle on maximum force and distance

从图 7~10 可以看出,调节机构的铰链厚度和 V 形角度对调节行程的影响显著,铰链长度和杆长对调节行程的影响微弱。这是因为在材料屈服强度一定的条件下,由剪切应力计算公式可知,铰链厚度增大,铰链变形时所需力和力矩随之增大,弯曲剪切应力显著增加,使机构行程减小;刚性杆长和铰链长度不影响剪切应力,所以这两个参数对机构行程几乎没有影响;V 形角度的增加会改变铰链的受力状态,单个铰链所受扭矩增加,使机构行程减小。可通过减小铰链厚度和 V 形角度,获得较大的调节行程,在空间限制条件下,减小铰链长度和刚性杆长度可以减小调节机构的尺寸,同时对调节行程的影响较小,调节行程最大可达 $\pm 55 \mu\text{m}$ 。

为了满足隔振需求,避免因振动引起调节机构共振而降低物镜成像质量,光刻投影物镜要求调节机构的一阶固有频率大于 100 Hz。对不同参数下机构的一阶固有频率进行分析,如图 11 所示。

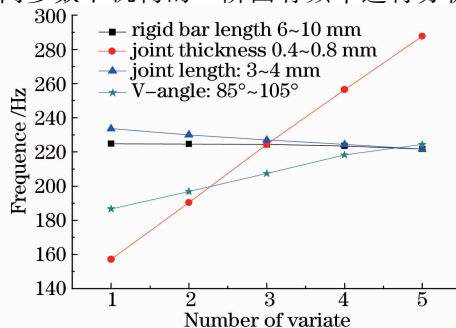


图 11 不同参数下机构一阶固有频率
Fig. 11 Frequencies under different parameters

图 11 显示了不同参数变化对机构一阶固有频率的影响曲线,图中各参数变化时,一阶固有频率始终大于 150 Hz,满足对调节结构一阶固有频率要求的 100 Hz。其中铰链厚度的变化对固有频率的影响最大,柔性单元 V 形角度的影响次之。

调节机构的运动精度同时取决于驱动器的运动精度和机构的传动比,由于压电陶瓷驱动器的运动精度为 5 nm,所以需要考虑 V 形柔性单元的关键参数对机构传动比的影响,进而得到其对轴向调节机构运动精度的影响规律。各个关键参数对机构传动比的影响如图 12 所示。

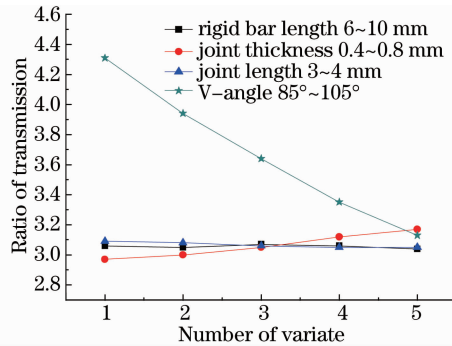


图 12 不同参数下机构传动比

Fig. 12 Ratios of transmission under different parameters

图 12 显示了不同参数变化对机构传动比的影响曲线,其中 V 形角度的变化对机构传动比的影响十分显著,刚性杆长和铰链长度对传动比几乎没有影响。

由以上分析结果可知,通过调节铰链厚度和柔性单元 V 形角度可以改善机构固有频率,调节柔性单元 V 形角度可大幅度调节机构传动比。

4 镜片热变形分析

由于调节机构的镜框与镜筒间仅有 3 处 V 形柔性单元连接,V 形柔性单元结构的铰链处是最小截面位置,其截面尺寸仅为 5 mm×0.5 mm,导致镜框与镜筒间的热传导路径狭窄,使镜片的热传导受到一定制约。为了掌握调节机构对镜片散热的影响,在镜片上作用均匀热载荷,分析镜片表面温度梯度和面形的情况。分析时镜片与镜框间采用环面支撑,在镜片上表面作用 20 mW 均匀热载荷,所有表面的对流换热系数为 5 W/(m²·K),不考虑热辐射和重力的影响,镜片上表面加热前为理想平面。镜片热分布结果如图 13 所示,镜片上表面面形如图 14 所示。

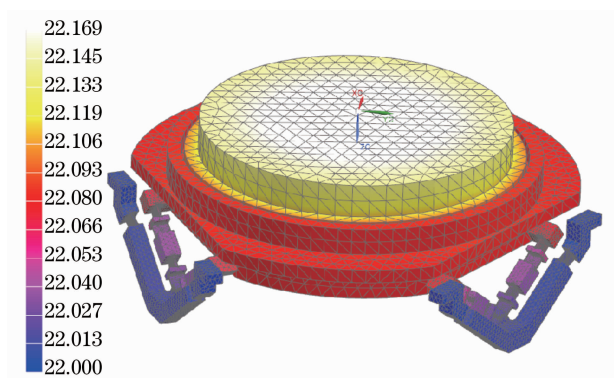


图 13 镜片热分布

Fig. 13 Thermal distribution of lens

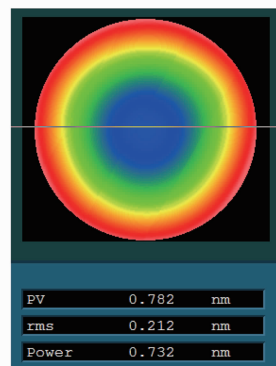


图 14 镜片上表面面形

Fig. 14 Upper surface figure of lens

由图 13, 14 可知,镜片温度分布和变形结果均匀,热载荷引起镜片上表面面形均方根(RMS)值为 0.212 nm,峰谷(PV)值为 0.782nm,其中 Power 为 0.732 nm,可见面形误差主要为 Power 项。Power 被定义为实际波前的最佳拟合球面的矢高值,也称为波前的离较量,通常可通过元件的轴向移动补偿该项面形误

差。去掉 Power 项后, RMS 值为 0.013 nm, PV 值为 0.087 nm, 说明由调节机构的 3 处 V 形柔性单元形成的狭窄热传导路径引入的镜片面形 RMS 值不大于 0.013 nm。

5 结 论

针对光刻投影物镜对轴向调节机构的调节行程大、精度高、结构紧凑等需求, 基于三角形换向原理设计了轴向调节机构。通过对轴向调节机构中的 V 形柔性单元进行优化分析, 得到机构调节行程为 $\pm 55 \mu\text{m}$, 调节精度优于 $\pm 10 \text{ nm}$, 一阶固有频率大于 150 Hz。同时分析了镜片的热变形, 结果表明: 在热载荷作用下, 去掉 Power 项后镜片上表面面形 PV 值为 0.087 nm, RMS 值为 0.013 nm。轴向机构对光学元件面形精度影响极小, 满足光刻物镜应用要求。

参 考 文 献

- 1 Xu Weicai, Huang Wei, Yang Wang, *et al.*. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1122003.
许伟才, 黄 玮, 杨 旺, 等. 投影光刻物镜倍率的公差分析与补偿[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1122003.
- 2 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.
- 3 Wang Rudong, Wang Ping, Tian Wei, *et al.*. Design and analysis of compensation of large aperture optical element for gravity deformation [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 259–263.
王汝冬, 王 平, 田 伟, 等. 大口径光学元件重力变形补偿的设计分析[J]. *中国光学*, 2011, 4(3): 259–263.
- 4 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.
- 5 Guo Kang, Gong Yan, Ni Mingyang, *et al.*. Design of a monolithic apparatus for the fine axial adjusting mechanism 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节机构的设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(s1): s122002.
- 6 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.
- 7 Tian Wei, Wang Ping, Wang Rudong, *et al.*. Simulation and experimental research of 193 nm projection lithography lens supporting [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0816002.
田 伟, 王 平, 王汝冬, 等. 193 nm 光刻投影物镜单镜支撑仿真分析及实验研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0816002.
- 8 Wang Xueliang, Gong Yan. Dynamic performance of the PZT driver used in a 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.
- 9 Qiao Yupeng. The Machinability and Low-Stress Processing of Invar 36 Alloy [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. 2–8.
乔玉鹏. Invar 36 合金的加工性及低应力加工工艺[D]. 大连: 大连理工大学, 2010. 2–8.
- 10 Qiao Yupeng, Kang Renke, Jin Zhuji. Selection of abrasives in precision grinding of Invar 36 alloy [J]. *Diamond and Abrasives Engineering*, 2009, (6): 8–14.
乔玉鹏, 康仁科, 金洙吉. 精密磨削 Invar 36 合金时的磨料选择[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2009, (6): 8–14.