

光刻物镜中透镜高精度支撑结构的设计及分析

赵磊 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 光刻投影物镜中透镜的面形精度是影响光学系统成像质量的关键因素之一。为实现透镜面形精度均方根(RMS)值优于 2 nm 的高精度指标,提出一种轴向多点挠性支撑、径向三点可调式定位的光学透镜支撑结构。基于自重变形对支撑结构进行优化设计,深入分析在此支撑结构下自重和热载荷对透镜面形影响。结果表明,重力引起的透镜上表面面形 RMS 值为 0.186 nm,下表面面形 RMS 值为 0.15 nm。热载荷引起的上表面面形 RMS 值为 0.55 nm,下表面面形 RMS 值为 0.54 nm。采用这种透镜的支撑结构,能够满足光刻投影物镜中透镜的高精度面形要求。

关键词 光学器件;光刻投影物镜;透镜支撑结构;自重变形;热变形

中图分类号 TH703 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0922001

Design and Analysis for the High-Precision Lens Support Structure of Objective Lens for Lithography

Zhao Lei Gong Yan

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

Abstract The surface-profile precision of objective lens for lithography is a key factor which influences the imaging quality. In order to achieve the root-mean-square (RMS) value of lens surface-profile accuracy which is better than 2 nm, a novel lens support structure with multi-points axial flexible support and three-point length-changeable radial holding is proposed, and then structure optimization by the influence of gravity deformation compensation is realized. Finally, the finite element analysis of lens deformation due to gravity and thermal load is done. The results are as follows: for the deformation of lens surface caused by gravity, profile RMS of the upper surface is 0.186 nm, while RMS of the lower surface is 0.15 nm; for the deformation of lens surface caused by thermal load, profile RMS of the upper surface is 0.55 nm, while RMS of the lower surface is 0.54 nm. The results indicate that the lens supporting structure can meet high-precision requirements of surface profile of the objective lens for lithography.

Key words optical devices; objective lens for lithography; lens support structure; gravity deformation; thermal deformation

OCIS codes 110.3960; 130.3120; 230.3120; 120.4640

1 引言

随着光学加工、制造和集成技术的不断发展以及光学系统高分辨率、低像差等性能要求的不断提高,对光学元件面形精度的要求越来越高,需要对重力、热载荷等引起的镜片面形进行严格控制。以光刻投影物镜中透镜自重对镜片面形的变形为例,为保证透镜使用状态下面形精度均方根(RMS)值优

于 2 nm 的高精度指标,需要综合考虑镜片加工、装调、结构设计等各个阶段。在镜片加工阶段,需要考虑使用状态下的支撑方式对重力变形的影响,完成前期加工修正;在物镜装调阶段,需要实测镜片的面形,通过调整镜片的间隔、倾斜和偏心完成后期调整补偿;在透镜的支撑结构设计阶段,也需要综合考虑镜片前期加工修正的工艺性、经济性以及加工、使用

收稿日期: 2012-03-29; **收到修改稿日期:** 2012-04-20

基金项目: 国家重大专项基金(2009ZX02205)资助课题。

作者简介: 赵磊(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事光机结构设计方面的研究。E-mail: zhaol@sklao.ac.cn

不同工况下镜片面形的复现性等因素。

大多数的传统光学系统中,由于镜片的面形要求不高,并且镜片的尺寸相对较小,关于加工、检测和使用等工况下支撑状态不同引起的镜片自重变形,以及镜片热载荷引起的变形等方面研究相对较少。仅在大口径空间反射镜支撑^[1~7]、高精度干涉仪中的透镜支撑^[8~11]和光刻投影物镜中的透镜支撑领域等^[12,13]有少量的文献报道。其中大口径空间反射镜的支撑相对透镜的支撑,不受通孔口径的限制,其支撑结构的空间布局相对自由。干涉仪中的透镜支撑,由于工作中不存在长时间高能激光照射,其热载荷镜片面形变形相对宽松。而光刻投影物镜中的透镜支撑,则需要对镜片自重面形和热载荷面形进行严格控制,但该方面的研究只有少量的专利文献报道,其中 Watson 等^[12]提出了一种三点主支撑、多点辅助支撑、主支撑上方通过压片压紧镜片的透镜支撑机构。但是该结构为防止透镜径向位移压紧镜片的力很大,引起镜片的应力双折射很大甚至破坏镜片,Sudoh^[13]提出了一种三点主支撑、多点辅助支撑、主支撑和辅助支撑上方均通过压片压紧镜片的结构。但是其主支撑、辅助支撑和压片均为单独结构,安装调试困难,并且该结构整体径向挠性不足对镜片热变形的顺应性不好。

本文针对光刻投影物镜中透镜的高精度支撑技术,提出了一种轴向整体式多点弹片支撑、径向三点可调式定位的光学透镜支撑结构,并对该支撑结构进行了优化设计,最后分析了该支撑结构在自重、热变形、径向定位力等工况下的面形变化情况。这种透镜高精度支撑结构设计和分析方法,可为高精度光学仪器的结构设计提供借鉴和参考。

2 透镜的支撑结构设计

所用透镜为一凸凹透镜,如图 1 所示,透镜直径 $\phi=141$ mm,凸面曲率半径 $R_1=136$ mm,凹面曲率半径 $R_2=330$ mm,镜片中心厚 $d=20$ mm,为方便透镜的定位在透镜边缘设计有一圈 V 形环槽,透镜材料为熔石英。

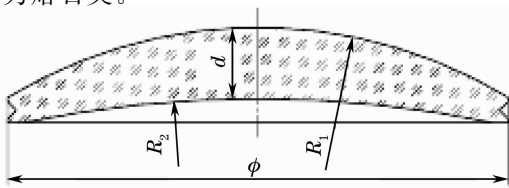


图 1 透镜外形示意图

Fig. 1 Structure of the lens

透镜支撑结构主要由镜片、镜框、T 形弹片和镜筒组成,如图 2 所示。镜框与镜筒之间通过 3 个周向均布的 T 形弹片实现连接。具体操作时,首先通过螺钉实现镜框与 3 个 T 形弹片的固定,然后通过镜筒周边上平均分布的 3 个精密微分头实现镜框组件的调心,最后通过螺钉固定 T 形弹片和镜筒,从而最终实现镜片的支撑、调心和固定。

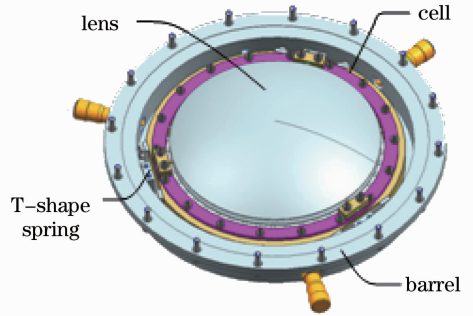


图 2 镜片支撑结构示意图

Fig. 2 Lens support structure

用于镜片支撑和固定的镜框结构如图 3 所示,镜框由整体式弹片、固定环、上压片和 3 个径向可调式螺杆组成。整体式弹片安放在固定环上,然后通过上压片压紧,3 个可调式螺杆固定在上压片上,螺杆可沿径向方向移动。具体操作时,将镜片支撑在整体式弹片上,通过专用工装实现镜片的调心,最后通过 3 个可调式螺杆压紧镜片的 V 形环槽实现镜片与镜框的固定。

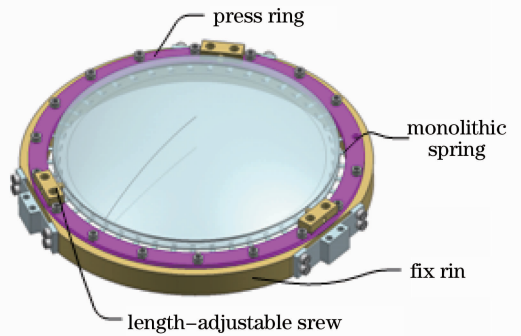


图 3 镜框组件示意图

Fig. 3 Structure of the cell subassembly

3 基于自重补偿的结构参数优化

透镜支撑时,透镜自重作用在整体式弹片上,整体式弹片的示意图如图 4 所示,在整体式环状结构上通过线切割的方式加工出多个悬臂式弹片,由于各处悬臂式弹片均具有一定的轴向柔度,支撑透镜时弹片会产生一定的轴向变形,因此即使各弹片高度方向上存在一定的尺寸误差,透镜的自重也能相

对均匀地作用在各个弹片上,从而放宽了弹片加工时的精度要求。

镜片、镜框连接弹片和镜筒的材料分别为熔石英、60Si2Mn 和 Y1Cr18Ni9,其具体的参数如表 1 所示。

表 1 材料参数表

Table 1 Material parameters of the structure

Material	Modulus of elasticity E /Pa	Poisson's ratio μ	Coefficient of thermal expansion $\alpha/(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$
Fused silica	73	0.17	0.58
60Si2Mn	201	0.26	11.5
Y1Cr18Ni9	197	0.27	17.1

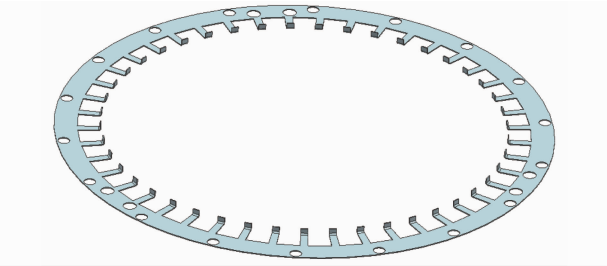


图 4 整体式弹片示意图

Fig. 4 Structure of the monolithic support spring

通过合理优化弹片点数和弹片尺寸参数,可以保证透镜自重均匀作用在各处弹片上。弹片点数越少,单个弹片的轴向柔度越大,则整体式弹片的轴向刚度就越小,对加工精度的要求就越松,但同时透镜面形对其影响会变差,并且整体结构的固有频率也会降低。反之,弹片点数增多,单个弹片的轴向柔度越少,整体式弹片的轴向刚度就越大,对弹片的加工精度要求越高,但同时会提高整体结构的固有频率。实际操作时,首先考虑镜片的面形指标,保证弹片支撑点数尽可能多,然后在满足结构固有频率的前提下,考虑加工工艺和经济型等,合理增大各个弹片的轴向柔度。基于上述原则,选取弹片数量为 45 个,设定弹片尺寸参数优化的目标:透镜自重时弹片轴向变形目标量为 $15 \mu\text{m}$ 。

为满足弹片轴向变形的目标数值,建立了各弹片支撑结构的物理模型,为集中载荷作用在自由端的悬臂梁模型,如图 5 所示。

根据悬臂梁集中载荷作用在自由端的挠度计算公式,得到自由端的挠度为

$$\nu = \frac{Fl^3}{3EI}, \quad (1)$$

式中 F 为作用在自由端上的载荷, E 为材料的弹性模量, I 为截面的惯性矩, l 为悬臂梁的长度。

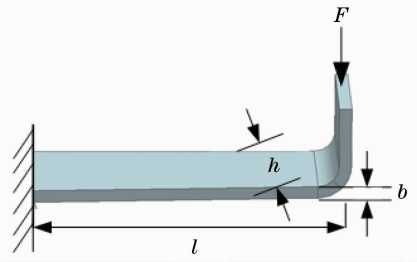


图 5 弹片简化模型

Fig. 5 Simplified model of the spring

悬臂梁的宽度沿着长度方向的变化量很小,计算时可以认为截面为等横截面,根据矩形惯性矩的计算公式,可以得到

$$I = \frac{hb^3}{12}, \quad (2)$$

式中 h 为悬臂梁的宽度, b 为悬臂梁的平均厚度。

根据透镜轴向方向力的平衡条件,得到弹片自由端载荷 F 为

$$F = \frac{G}{n}, \quad (3)$$

式中 G 为透镜的重力, n 为支撑弹片的个数。

根据(1)~(3)式,得到悬臂梁自由端的挠度为

$$\nu = \frac{4Gl^3}{Ehb^3n}. \quad (4)$$

由(4)式可知,弹片的轴向位移量 ν 与弹片点数 n 成反比,与弹片长度 l 的三次方成正比,与弹片厚度 b 的三次方成反比,与弹片宽度 h 成反比。当 $n = 45$ 时,考虑优化目标轴向变形量为 $15 \mu\text{m}$,得到优化后的一组弹片参数为弹片长度 $l = 7.75 \text{ mm}$,弹片宽度 $h = 2.5 \text{ mm}$,弹片厚度 $b = 0.3 \text{ mm}$ 。

4 透镜的面形精度分析

本文提出的光刻物镜中透镜的支撑结构,在实际安装调试阶段,首先将透镜放置在整体弹片上,镜片调心后再通过 3 个可调式螺杆固定透镜,因此需要分析整体弹片支撑条件下透镜自重引起的面形变化,以及螺杆定位力引起的透镜面形变化。同时,光刻投影物镜的工作时需要高能激光长时间照射,会导致因热载荷而发生透镜面形变化,因此也需要对透镜的热变形进行分析。

4.1 透镜自重的面形精度分析

自重面形仿真分析时,取透镜水平放置状态,施加载荷为透镜自身的重力,约束条件取各弹片顶端与镜片下表面线面接触,并将 T 形弹片的底部完全约束,利用 NX NASTRAN 求解器得到镜框组件的变形云图,如图 6 所示。

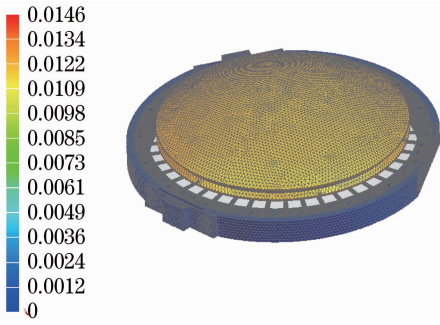


图 6 重力引起的镜框组件变形云图

Fig. 6 Deformation contour of the cell subassembly caused by gravity

将透镜上下表面变形前后的数据进行分析整理,得到支撑状态下重力引起的透镜上下表面变形图,如图 7 所示,其中上表面面形峰-谷(PV)值为 0.89 nm,RMS 为 0.186 nm,透镜下表面面形 PV 值为 0.8 nm,RMS 值为 0.15 nm。

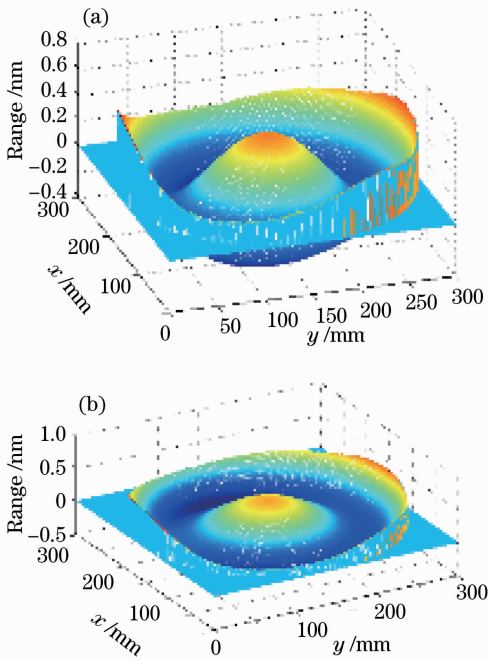


图 7 重力引起的镜片面形变化。(a) 上表面重力面形图；(b) 下表面重力面形图

Fig. 7 Lens-surface deformation caused by gravity. (a) Upper surface deformation caused by gravity; (b) lower surface deformation caused by gravity

4.2 透镜径向定位力的面形精度分析

透镜通过整体式弹片支撑后,为实现空间 6 个自由度的完全约束,需要在透镜径向上通过三处可调螺杆压紧镜片上的 V 形环槽进行定位,因此需要考虑径向定位力引起的透镜面形情况。以 3 个螺杆定位力均为 0.71 N 为例,分析了透镜上、下表面的

面形变化情况,得到的变形情况如图 8 所示,其中透镜上表面面形 PV 值为 5 nm,RMS 值为 0.78 nm,透镜下表面面形 PV 值为 4.8 nm,RMS 值为 0.75 nm。由图 8 可知,由于三个周向均布力的作用,透镜产生了类似三叶像差的变形,并且定位力对透镜的面形变化非常敏感,因此实际操作时,需要严格控制三处螺杆定位力的大小,满足镜片定位的前提下,定位力越小越好。

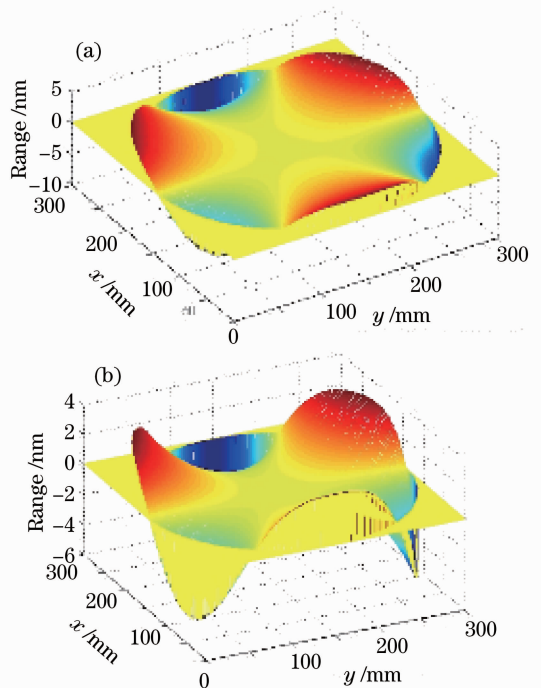


图 8 径向定位力引起的镜片面形变化。(a) 径向定位力引起的上表面变形图；(b) 径向定位力引起的下表面变形图

Fig. 8 Lens-surface deformation caused by radical fixing force. (a) Upper surface deformation caused by radical fixing force; (b) lower surface deformation caused by radical fixing force

4.3 透镜热载荷的面形精度分析

光刻投影物镜工作时,镜片对入射激光的吸收导致自身温度升高,产生热变形,透镜变形过程中与支撑结构相互作用产生热应力,因此会对透镜光学表面的面形产生很大的影响。对透镜进行热分析时,考虑激光在透镜中的实际吸收情况,选取透镜上、下表面吸收的热量均为 20 mW,同时考虑光刻物镜外部的水冷装置,将支撑结构与外界的对流换热系数设为 $60 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$,在 NX THERMAL/FLOW 环境下得到透镜的温度分布如图 9 所示,其中透镜的温度梯度为 $0.367 \text{ }^\circ\text{C}$,透镜温度分布沿中心向四周递减。

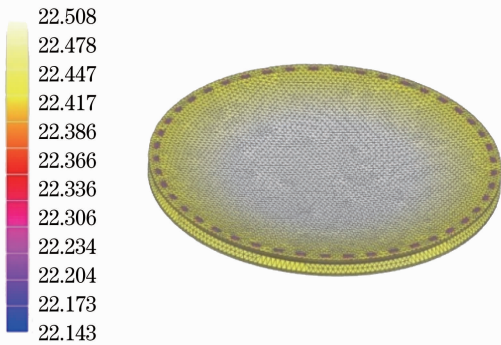


图9 热载荷引起的透镜温度分布图

Fig. 9 Temperature distribution of the lens caused by thermal load

将透镜和支撑结构的温度分布结果导入 NX NASTRAN 环境下,并将 T 形弹片的底部完全约束,得到由于温度不同引起的镜框组件变形图,如图 10 所示。

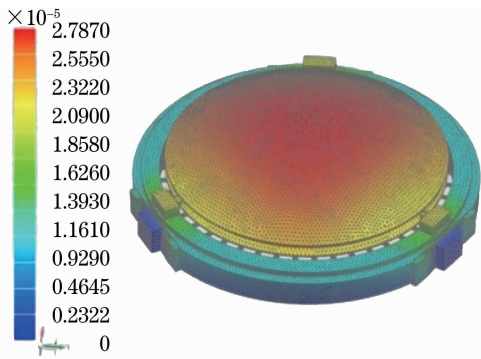


图 10 热载荷引起的镜框组件变形图

Fig. 10 Cell subassembly deformation caused by thermal load

将透镜上下表面变形前后的数据进行分析整理,得到热载荷引起的透镜上下表面变形图,如图 11 所示,其中上表面面形 PV 值为 3.547 nm, RMS 值为 0.55 nm,下表面面形 PV 值为 3.29 nm, RMS 值为 0.54 nm。

5 结 论

针对光刻投影物镜中透镜的高精度面形要求,介绍了一种轴向多点挠性支撑、径向三点可调式定位的光学透镜支撑机构。基于自重补偿对支撑结构的整体弹片进行了设计,分析了在该支撑结构下重力、定位力、热载荷等工况下对透镜面形的影响。结果表明,由于重力引起的上表面面形 PV 值为 0.89 nm, RMS 值为 0.186 nm,下表面面形 PV 值为 0.8 nm,

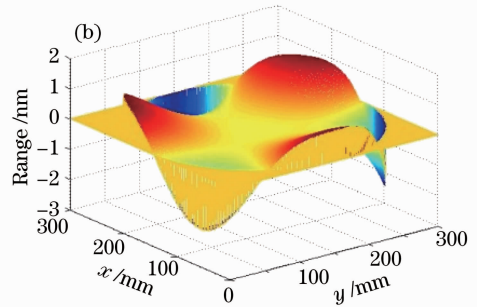
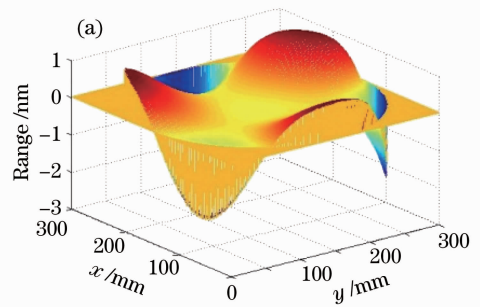


图 11 热载荷引起的镜片面形变形。(a)热载荷引起的上表面变形图;(b)热载荷引起的下表面变形图

Fig. 11 Lens-surface deformation caused by thermal load. (a) Upper surface deformation caused by thermal load; (b) lower surface deformation caused by thermal load

RMS 值为 0.15 nm;由于热载荷引起的上表面面形 PV 值为 3.547 nm, RMS 值为 0.55 nm,下表面面形 PV 值为 3.29 nm, RMS 值为 0.54 nm。本文提出的透镜支撑结构,可以满足光刻投影物镜中透镜面形精度 RMS 优于 2 nm 精度指标,可以为高精度光学元件的支撑技术提供借鉴和参考。

参 考 文 献

- Chen Fulin, Zhang Jingxu, Wu Xiaoxia *et al.*. Supporting structure of 620 mm thin primary mirror and its active surface correction[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(5): 1022~1029
陈夫林, 张景旭, 吴小霞 等. 620 mm 薄镜面的主动支撑结构及面形校正[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(5): 1022~1029
- Zeng Chunmei, Guo Peiji, Yu Jingchi. Deformation and analysis on correction of 0.5 m ultra-thin mirror with active support[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 570~578
曾春梅, 郭培基, 余景池. 0.5 m 超薄镜主动支撑面形校正及实验[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(3): 570~578
- Yan Yong, Jia Jiqiang, Jin Guang. Design of new type spaceborne light-weighted primary mirror support [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2008, **16**(8): 1533~1539
闫勇, 贾继强, 金光. 新型轻质大口径空间反射镜支撑设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(8): 1533~1539
- Dong Jjihong, Wang Kejun, Li Yanchun *et al.*. Lightweight design of large-aperture SiC primary mirrors for space remote sensors[J]. *Chinese Optics*, 2011, **4**(2): 118~123
董吉洪, 王克军, 李延春 等. 空间遥感器中大口径 SiC 主镜的轻

- 量化设计[J]. 中国光学, 2011, **4**(2): 118~123
- 5 Wang Fuguo, Yang Hongbo, Yang Fei *et al.*. Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(6): 877~880
王富国, 杨洪波, 杨 飞 等. 大口径主镜轴向支撑点位置优化分析[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(6): 877~880
- 6 Wang Yang, Zhang Jingxu. Optimization and analysis for the support of the large aperture telescope primary mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(1): 107~113
王 洋, 张景旭. 大口径望远镜主镜支撑优化分析[J]. 光电工程, 2009, **36**(1): 107~113
- 7 Yang Xianwei, Wu Qingwen, Li Shusheng *et al.*. Thermal design of space optical remote sensor[J]. *Chinese Optics*, 2011, **4**(2): 139~146
杨献伟, 吴清文, 李书胜 等. 空间光学遥感器热设计[J]. 中国光学, 2011, **4**(2): 139~146
- 8 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
- 9 Wang Ping, Tian Wei, Wang Rudong *et al.*. Rotation chuck test for removing chuck error of optical surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812004
王 平, 田 伟, 王汝冬 等. 旋转支撑法去除元件面形测量的夹持误差[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0812004
- 10 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
- 11 Xu Rongwei, Liu Liren, Liu Hongzhan *et al.*. Support schemes and thermal deformation analysis of large-aperture interferometer mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **25**(6): 809~815
徐荣伟, 刘立人, 刘宏展 等. 大型干涉仪镜子的支承设计与温度变形分析[J]. 光学学报, 2003, **25**(6): 809~815
- 12 D. C. Watson, W. T. Novak. Kinematic Lens Mounting with Distributed Support and Radial Flexure [P]. US Patent, 6239924, 2003-12-25
- 13 Y. Sudoh. Correction Member, Retainer, Exposure Apparatus, and Device Fabrication Method [P]. US Patent, 6909493, 2003-03-14

栏目编辑: 何卓铭