

夹紧力作用下镜面变形及夹紧重复性研究

周连生 于新峰 张巍

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 利用有限元方法对运动学支撑夹紧力引起的镜片光学表面变形进行静力学分析,并应用 Zernike 多项式对镜片表面的变形进行了拟合。结果表明,夹紧力作用下镜片表面产生的几种主要像差为 Defocus、Pri Trefoil 和 Pri Hexafoil。光学检测过程中,运动学支撑结构的重复装配误差可能会影响检测精度,因此分析了运动学支撑夹紧重复性对镜面面形的影响。以夹紧力大小、夹紧力径向位置、夹紧力周向位置变化引起的镜面表面峰谷(PV)值和均方根(RMS)值的变化作为评价夹紧重复性的依据。分析结果表明,镜片表面的 PV 值和 RMS 值变化不明显,说明所设计的运动学支撑结构在多次重复性的检测中允许装配过程存在一定的误差。

关键词 光学设计; 镜面变形; 运动学支撑; 夹紧力; 夹紧重复性; 有限元法; Zernike 多项式

中图分类号 TN305.7 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.012203

Investigation of Surface Deformation under Clamping Force and Clamping Repeatability

Zhou Liansheng Yu Xinfeng Zhang Wei

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

Abstract Geometrical deformation of lens surface caused by kinematic mount clamping force is analyzed with finite element method and lens surface displacements are extracted and fitted with Zernike polynomials. Analytical results show that Defocus, Pri Trefoil and Pri Hexafoil are the main aberrations under clamping force. During the process of optical testing, repeating assembly of the kinematic mount apparatus may influence the testing accuracy, so relations between assembly repeatability and surface deformation are also investigated. In order to evaluate the repeatability for assembling, variations of peak valley (PV) and root mean square (RMS) values changed with clamping force and clamping placement in circumferential and radial direction are also shown in this paper. The results indicate that PV and RMS values do not obviously change as clamping force and clamping placement change, which means that slight assembly errors of the kinematic mount apparatus are allowed.

Key words optical design; deformation of lens surface; kinematic mount; clamping force; assembly repeatability; finite element method; Zernike polynomials

OCIS codes 220.3740; 240.6700; 110.3000

1 引言

近年来,随着光刻机分辨率的不断提高,对光刻投影物镜的系统结构设计及装调也提出了更为严苛的要求,镜片支撑结构作为结构设计的主要设计工作之一也面临着更加巨大的挑战。支撑结构在能够保证投影物镜正常工作的前提下,还要尽量减小对于镜片表面面形的影响,以保证投影物镜具有较高的成像质量。与同类方法比较,运动学支撑结构在不产生过约束的情况下,具有可靠的定位精度,良好的隔绝冲击载荷以及可减小温度变化引起的热变形的特性,可以实现较好的支撑面形;同时运动学支撑结构可以避免现阶段多数光刻投影物镜中采用的多弹片支撑结构中遇到的无应力耐紫外光学结构胶的研制与胶粘工艺探索的问题,降低了支撑结构的设计难度。

收稿日期: 2014-03-16; 收到修改稿日期: 2014-05-23; 网络出版日期: 2014-11-14

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 周连生(1987—),男,硕士,研究实习员,主要从事光机结构设计与分析方面的研究。

E-mail: zhoulian200608@126.com

运动学支撑结构中,镜片与支撑结构之间采用夹紧的方式固定,因而夹紧力对于镜片面形的变化会产生一定影响。应用有限元方法对镜面变形进行分析已经成为一种有效的手段^[1-3],尤其是针对由温度不均匀引起的热变形^[4-7],以及重力作用下引起的镜片表面变形^[8]的分析。

采用有限元的方法对镜片在运动学支撑结构夹紧力的作用下产生的变形进行了分析。对于由夹紧力引起的镜片面形变化的评价,除计算通光孔径内光学表面的峰谷(P-V)值和均方根(RMS)值变化外,还对镜片的面形变化进行了Zernike多项式拟合,分析了由夹紧力引起的透镜表面的像差;并且,还对光学检测过程中夹紧力的重复性影响进行了分析,即在夹紧力及夹紧位置变化的情况下镜片表面PV值和RMS值的变化情况。

2 运动学支撑结构简介

根据运动学原理设计了一种静定结构,该结构可以使得镜片的六个自由度被完全约束而又不产生过约束,此时的支撑方式为运动学支撑。运动学支撑的主要优点在于能够实现镜片的低应力支撑,并且在镜片受热径向膨胀时不产生约束反力,进而可以有效地保证镜片高精度面形。

如图1所示,与镜片较近的3个弹性球铰视为具有3个旋转自由度的弹簧,与镜片较远的3个弹性转铰视为仅具有1个旋转自由度的弹性件,两者通过串联的方式连接组成一个支撑座,3个支撑座沿镜片周向均匀分布并以并联的方式夹紧镜片。正是由于弹性球铰和弹性转铰的作用,才能够保证镜片受热径向膨胀时,不产生约束反力。

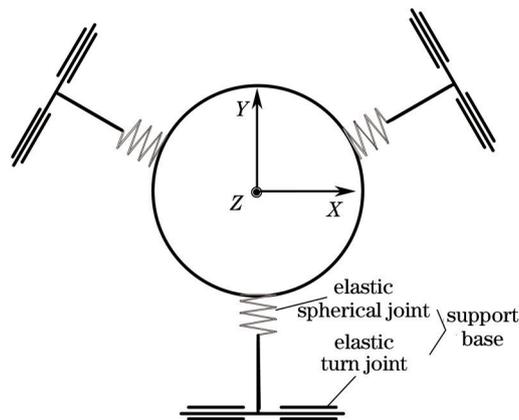


图1 镜片运动学支撑方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of kinematic mount method

3 夹紧力作用下镜面变形分析

3.1 夹紧力作用下镜面变形的有限元分析

运动学支撑结构主要通过夹紧的方式实现光学元件的固定。如图2所示,所分析的透镜模型为凸凹镜片,凸面和凹面的通光孔径分别为257、242 mm,曲率半径分别为212.76、519.72 mm。透镜的边缘有一圈凸缘,既利于支撑结构的夹持,也能够减小夹紧力对面形的影响。夹紧位置为周向均匀布置的三点,夹紧力为110 N。

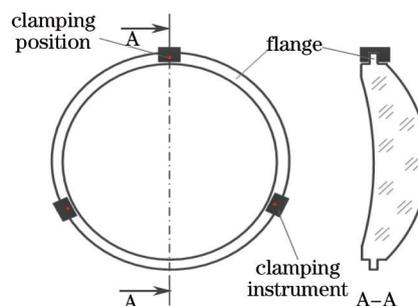


图2 透镜的几何模型及夹紧位置

Fig.2 Geometry and clamping positions of lens

采用ICEM CFD软件对镜片进行网格划分,并在有限元软件ANSYS中进行分析。透镜材料的物理属性在表1中给出。由于所计算的物理模型为小变形情况,镜面变形的RMS值通常小于1 nm,因此在计算前进行了网格独立性的验证,以消除网格尺寸对于计算结果的影响,逐步减小网格划分的尺寸,当两套网格计算结果相差小于0.01%时,即认为网格尺寸对计算结果已经没有影响。用于计算的有限元网格如图3所示。

表1 材料物理属性

Table 1 Physical property of materials

Material	Young's modulus/GPa	Poisson's ratio	Density/(g/cm ³)
SiO ₂	73.08	0.17	2.19

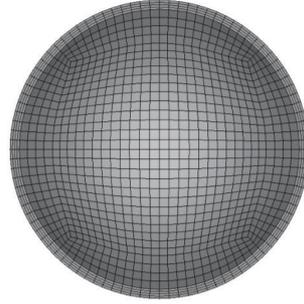


图3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

图4和图5分别为在夹紧力作用下,透镜凸凹面的变形情况。由于受到夹紧力的影响,靠近运动学支撑结构的位置较光轴附近产生了较大的变形,而在光轴附近并未产生变形。通光孔径范围内凸凹表面最大的变形量分别为3.02、5.68 nm,且均靠近通光孔径的边缘,表明凸缘结构在一定程度上减小了夹紧力对于面形的影响。

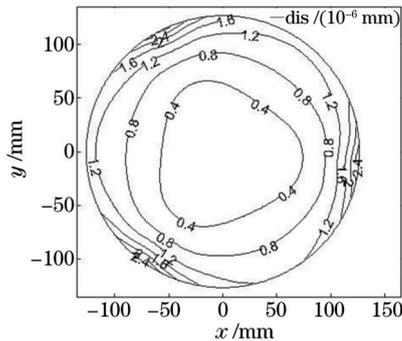


图4 透镜凸面位移

Fig.4 Convex surface displacements

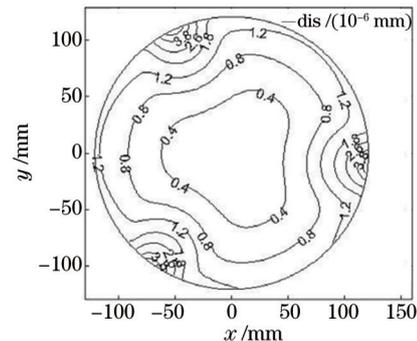


图5 透镜凹面位移

Fig.5 Concave surface displacements

3.2 Zernike 多项式及面形拟合

由于Zernike多项式中的各项与光学设计中常用的Seidel像差中各项存在着对应关系,并且各项在归一化的单位圆中正交,不同的多项式系数相互独立,能够独立反映出各项对于面形的贡献,因而得到了广泛的应用^[9-10]。其表达式为^[11]

$$z(r, \theta) = \sum_n \sum_m [A_{nm} P_{nm}(\rho) \cos(m\theta) + B_{nm} P_{nm}(\rho) \sin(m\theta)], \quad (1)$$

其中

$$P_{nm}(\rho) = \sum_{j=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^j (n-j)!}{j! \left(\frac{n+m}{2} - j\right)! \left(\frac{n-m}{2} - j\right)!} \rho^{n-2j}, \quad (2)$$

式中 A_{nm}, B_{nm} 为系数, $m \leq n$, n 为径向级次, m 为方位角频率, ρ 为归一化半径。值得注意的是,除了需要对半径进行归一化以外,还需对Zernike多项式中的各项进行另一种归一化,即使得各项在单位圆内的RMS值等于1,因此对于各项Zernike多项式系数,还需要乘以以下系数

$$\begin{cases} \sqrt{n+1}, & m=0, \\ \sqrt{2(n+1)}, & m \neq 0. \end{cases} \quad (3)$$

对于一个光学表面,计算得到的有限元节点位移并不代表光学表面的变形,一般情况下光学软件接收的光学表面变形为镜面法向的变形。因此需要对得到的有限元节点位移进行修正。具体过程如下,首先去除表面刚体位移,然后将去除刚体位移的位移转换为镜片法向方向的位移。得到光学表面的变形后,获得PV值 V_{PV} 和RMS值 V_{RMS} :

$$V_{PV} = \left| \max(d_{s_i}) - \min(d_{s_j}) \right|, \quad (4)$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n'} (d_{s_i} - \bar{d}_s)^2}{n' - 1}}, \quad (5)$$

式中 d_{s_i} 、 d_{s_j} 分别为第 i 、 j 个采样点沿镜面法向方向的位移量, \bar{d}_s 为表面所有采样点的算术平均值, n 为采样点的总数。

去掉镜面刚体位移后透镜凸面和凹面的PV和RMS值在表2中给出,由夹紧力引起的凸凹表面的RMS值均小于1 nm,说明在透镜的边缘加工出一圈凸缘,能够有效减小夹紧力对于通光孔径内透镜表面面形的影响。对光学表面变形拟合,拟合过程中取 $n=8$, $m=6$,共41项Zernike多项式进行拟合。通过Zernike拟合能够分离出由夹紧变形引入的像差类型,表3中给出了夹紧力引起的几种主要的像差,以及去除此种像差后的PV和RMS值。表3中的所有数值均为与波长的比值,所应用的波长为193 nm。各个像差的大小规定为 $\sqrt{A_{nm}^2 + B_{nm}^2}$,其中 A_{nm} 和 B_{nm} 分别为(1)式中各项系数。

表2 透镜凸面和凹面的PV和RMS值

Table 2 PV and RMS values of concave and convex surface

	PV/(10^{-6} mm)	RMS/(10^{-6} mm)
Convex surface	3.412	0.5264
Concave surface	3.727	0.5389

表3 夹紧力引起的主要像差

Table 3 Main aberrations caused by clamping force

unit: $10^{-3} \times 1/\lambda$

Aberration	Magnitude	Convex surface		Magnitude	Concave surface	
		Residual RMS	Residual PV		Residual RMS	Residual PV
Input		2.727	17.676		2.792	19.313
Defocus	-4.574	1.222	11.366	-4.320	1.285	12.897
Pri Trefoil	3.083	0.800	8.342	2.769	0.850	10.406
Pri Spherical	-0.900	0.712	8.342	-0.375	0.833	10.406
Sec Trefoil	1.255	0.637	7.769	1.0828	0.774	9.839
Pri Hexafoil	2.526	0.316	4.689	2.424	0.441	6.928

镜片在夹紧力作用下,产生的像差主要有Defocus、Pri Trefoil和Pri Hexafoil。其中Defocus项是在三点夹紧力的合力作用下产生的,为主要像差;而Pri Trefoil和Pri Hexafoil是由于夹紧力为三点夹持,在三点附近区域,镜片面形变化较大,从而出现较大的Pri Trefoil和Pri Hexafoil像差。

4 夹紧重复性对面形的影响

在对镜片面形进行重复检测的过程中,夹紧力大小及夹紧位置的变化可能会对镜片面形产生一定的影响,进而影响检测精度。为了研究装配过程重复性对于镜面面形的影响,分析了夹紧力大小的变化,夹紧位置沿径向的变化以及夹紧位置沿圆周方向的变化对于镜面面形的影响。

在分析的过程中,保持三点支撑中两点的夹紧力大小和位置不变,只改变第三个支撑点夹紧力的大小以及沿径向和圆周方向的作用位置,以考察上述三种因素对于面形的影响。给定夹紧力 F 的变化范围 ΔF 为原夹紧力大小的95%~105%,径向夹紧力位置变化范围为沿径向偏离原作用位置-0.4~0.4 mm。以夹紧位

置偏离原作用位置的弧长对应的圆心角作为沿圆周向的变化尺度,给定的变化范围为 $0\sim 0.5^\circ$ 。

图6~8给出了透镜表面PV和RMS值与夹紧力大小、径向夹紧位置、周向夹紧位置的关系。图6表明,透镜表面PV和RMS值与夹紧力大小呈线性关系,且透镜表面的PV值在夹紧力减小时的变化率小于夹紧力增大时的变化率,而镜面的RMS值在整个范围内的变化率一直不变。总体而言夹紧力越大,镜片表面的RMS值越大。当夹紧力变化10%时,透镜表面的RMS值变化约为 0.02 nm 。图7给出了透镜表面PV和RMS值与夹紧力径向位置的关系,通过表中数据及曲线趋势可知,在夹紧位置径向变化的范围内,PV和RMS值基本不变。而图8中数据表明镜片表面的PV和RMS值也不随着夹紧位置周向的变化而改变。

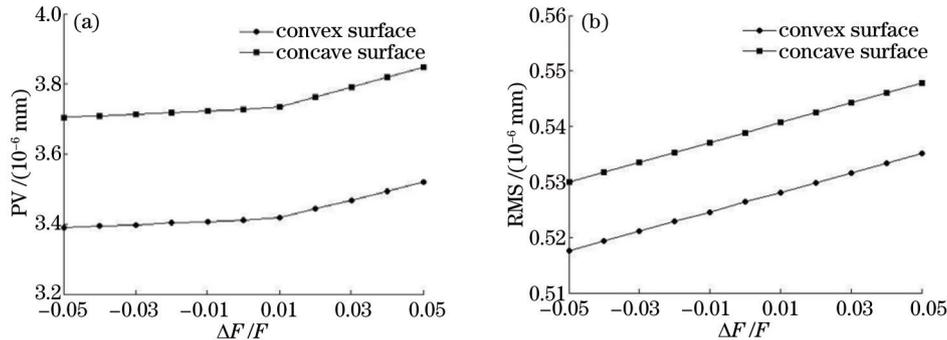


图6 镜面PV和RMS值随夹紧力大小变化。(a) PV值随夹紧力大小变化;(b) RMS值随夹紧力大小变化

Fig.6 PV and RMS values of lens surface versus clamping force. (a) PV value versus clamping force; (b) RMS value versus clamping force

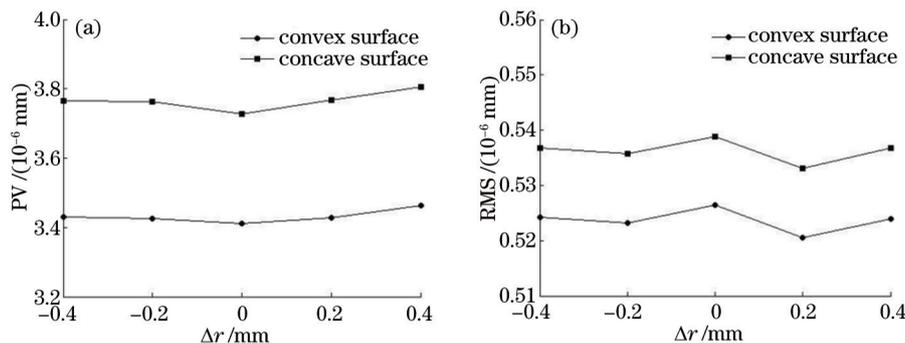


图7 镜面PV和RMS值随径向夹紧位置变化。(a) PV值随径向夹紧位置变化;(b) RMS值随径向夹紧位置变化

Fig.7 PV and RMS values of lens surface versus clamping position in radial direction. (a) PV value versus clamping position in radial direction; (b) RMS value versus clamping position in radial direction

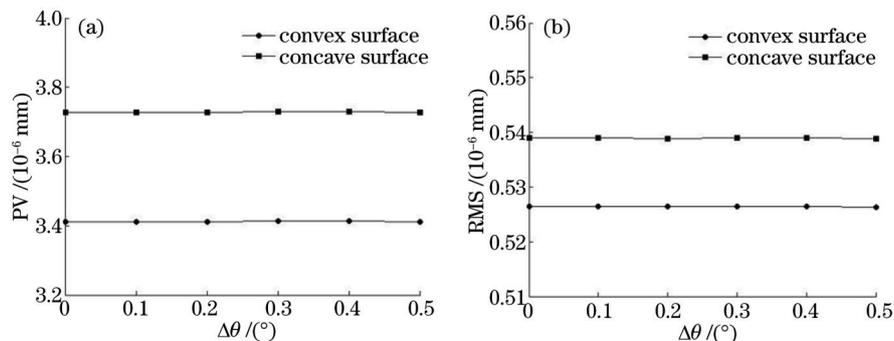


图8 镜面PV和RMS值随周向夹紧位置变化。(a) PV值随周向夹紧位置变化;(b) RMS值随周向夹紧位置变化

Fig.8 PV and RMS values of lens surface versus clamping position in circumferential direction. (a) PV value versus clamping position in circumferential direction; (b) RMS value versus clamping position in circumferential direction

综上所述,在透镜重复检测的过程中,动力学支撑结构的夹紧力大小和夹紧装配位置允许有一定的误差,而不影响检测结果。这一分析结论表明运动学支撑结构具有良好的镜片支撑面形重复性。

5 结 论

主要分析了所设计的运动学支撑结构的夹紧力对透镜表面面形的影响。在满足所要求的支撑条件下,运动学支撑结构引起的镜片表面的RMS值变化小于1 nm,满足设计要求。应用Zernike多项式对光学表面的变形进行了拟合,分析结果表明由夹紧力引起的主要像差分别为Defocus、Pri Trefoil和Pri Hexafoil。并且针对光学检测过程中重复检测的装配误差,分析了夹紧力大小,夹紧力径向位置以及周向位置变化对透镜面形的影响。分析结果表明,所设计的运动学支撑结构具有良好的镜片支撑面形重复性,允许一定的装配误差而不影响光学检测结果。

参 考 文 献

- 1 Li Anhu, Li Zhizhong, Sun Jianfeng, *et al.*. Optimization design of radial support for large-aperture rotating and tilting prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1212005.
李安虎,李志忠,孙建锋,等. 大口径旋转偏摆棱镜径向支撑优化设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1212005.
- 2 Wang Deen, Dai Wanjun, Zhang Junwei, *et al.*. Position-setting stress control of the square-aperture piezoelectricity film deformable mirror[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 012203.
王德恩,代万俊,张军伟,等. 方口径压电薄膜变形镜夹持应力控制研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 012203.
- 3 Zhong Xianyun, Fan Bin, Zeng Zhige, *et al.*. Design simulation and optimization for the flexible displacement support structure based on ϕ 1.8 m lightweight reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322002.
钟显云,范斌,曾志革,等. ϕ 1.8 m轻质镜能动磨盘技术抛光的柔性限位支撑设计仿真与优化分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322002.
- 4 Toshiharu Nakashima, Yasuhiro Ohmura, Taro Ogata, *et al.*. Thermal aberration control in projection lens[C]. SPIE, 2008, 6924: 69241V.
- 5 Scott Halle, Michael Crouse, Aiqin Jiang, *et al.*. Lens heating challenges for negative tone develop layers with freeform illumination: A comparative study of experimental versus simulated results[C]. SPIE, 2012, 8326: 832607.
- 6 Zhou Qiong, Jiang Zongfu, Xi Fengjie. Study of thermal deformations induced optical aberrations for Al_2O_3 mirror in an optical system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1002001.
周琼,姜宗福,习峰杰. 光学系统中白宝石分光镜的热变形像差分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1002001.
- 7 Zhou Qiong, Jiang Zongfu, Xi Fengjie. Designing of scaling model and study of thermal deformation compensation for inner optical system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0402008.
周琼,姜宗福,习峰杰. 内光路系统的缩放模型及其热变形像差的波前预补偿[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0402008.
- 8 Li Fu, Ruan Ping, Zhao Baochang. Study on the surface deformation of flat reflector under gravity load[J]. *Acta Photonica 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.
- 9 Chen Hua, Yang Huaijiang, Yu Xinfeng, *et al.*. Simulated and experimental study of laser-beam-induced thermal aberrations in precision optical system[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(18): 4370-4376.
- 10 Tang Yuke, He Xiaohai, Tao Qingchuan. Research on the point spread function of microscope based on the zernike polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 169-175.
唐玉科,何小海,陶青川. 基于泽尼克多项式的显微镜点扩展函数研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 169-175.
- 11 Max Born, Emil Wolf. *Principles of Optics*[M]. London: Pergamon Press Ltd, 1970. 523-532.