

文章编号 1004-924X(2013)08-2000-08

基于运动学支撑的透镜光学表面面形及其复现性

于新峰¹, 巩岩^{1*}, 倪明阳¹, 秦硕^{1,2}

(1. 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;
2. 空军航空大学, 吉林 长春 130021)

摘要:根据高精度投影光刻物镜的特点,提出了一种运动学支撑结构,并采用实验结合有限元分析的方法研究了该支撑结构引起的透镜光学表面变形以及重复装配过程中透镜光学表面面形的复现性。首先,介绍了运动学支撑结构的原理及镜面变形分析的方法。然后,应用 Zernike 多项式拟合实测和有限元分析得到的面形,并用两种方法对运动学支撑结构夹持力引起的透镜光学表面面形进行对比,以验证有限元分析模型的正确性。同时,分析了考虑重力情况下运动学支撑结构导致的透镜光学表面变形。最后,用实验的方法测量了运动学支撑结构在重复装配过程中透镜光学表面面形的复现性。实验和分析结果显示,由运动学支撑结构夹持力引起的透镜光学表面面形均方根(RMS)值的实测值为 1.004 nm,分析值为 0.974 nm,夹持力及重力综合作用下导致的透镜表面 Fringe Zernike 拟合面形 RMS 值为 2.538 nm,产生的主要像差为离焦、初级三叶像差和二级三叶像差,重复装配过程中引起的透镜光学表面面形的复现性标准差为 0.645 nm。得到的结果表明,所设计的运动学支撑结构能够保证透镜光学表面面形在重复装配过程中有良好的复现性。

关键词:投影物镜;运动学支撑结构;光学表面面形;夹持力;复现性;有限元法;Zernike 多项式

中图分类号: TN305.7; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132108.2000

Optical surface figure of lens under kinematic mount apparatus and its reproducibility

YU Xin-feng¹, GONG Yan^{1*}, NI Ming-yang¹, QIN Shuo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Aviation University of Air Force, Changchun 130021, China)

* Corresponding author, E-mail: gongy@sklao.ac.cn

Abstract: On the basis of characteristics of high precision projection objectives, a kinematic mount apparatus was proposed. In order to evaluate the performance of the kinematic mount apparatus, the geometrical deformation and the optical surface figure reproducibility of a lens caused by the kinematic mount apparatus were investigated with Finite Element Method(FEM) and experiments. Firstly, the working principle of kinematic mount apparatus was introduced and the analysis method for surface deformation was also given. Then, surface deformations from the experiment and the finite element analysis were fitted with Zernike polynomials and obtained results by the two methods were compared

收稿日期:2013-02-08;修订日期:2013-04-13.

基金项目:国家重大专项基金资助项目(No. 2009ZX02205);中俄科技合作专项基金资助(No. 2100DFR10010)

for verifying the feasibility of the FEM. Furthermore, the optical surface deformation of the lens caused by the kinematic mount apparatus under the gravity was also explored. Finally, the reproducibility of optical surface figure of lens during a repeating assembly of the kinematic mount apparatus was also given with the experiment method. The experiment and FEM results indicate that RMS values caused by clamping force are 1.004 nm and 0.973 nm, respectively, and that induced both by clamping force and gravity are 2.538 nm. Moreover, the Power, Pre Trefoil and Sec Trefoil are the main aberrations of surface deformation, and the optical surface figure reproducibility of lens is 0.645 nm during the repeating assembly. These results mean that the kinematic mount apparatus can keep the optical surface figure in a good reproducibility.

Key words: projection objective; kinematic mount apparatus; optical surface figure; clamping force; reproducibility; finite element method; Zernike polynomials

1 引 言

随着高精度投影光刻机分辨率的不断提高,对投影光刻物镜的支撑结构提出了更加苛刻的要求,即在保证光刻机稳定工作的前提下,要尽量减小支撑结构对透镜光学表面面形的影响,以保证投影物镜具有较高的成像质量。为了满足高精度面形的要求,许多学者在研究过程中提出采用柔性支撑的方式。单云霄等^[1]利用 V 型结构设计、叠加理论和对称布置方法设计了一种新型的柔性铰链,建立了铰链的数学模型,研究了这种新型柔性铰链的性能。李琳等^[2]设计了一种空间曲线切口式柔性铰链。王忠素等^[3]针对遥感器反射镜在空间中复杂且恶劣的环境,设计了一种具有良好热稳定性和刚度的柔性支撑。王平等^[4]针对干涉仪标准镜中光学元件的高精度定位,设计了一种柔性支撑镜框,研究了该结构的力学模型、结构参数、定位精度和透镜变形。而对于投影光刻物镜的支撑结构,为了能够有效提高透镜抵抗温度、冲击和振动的能力,多采用柔性支撑。在现有的投影光刻物镜中,部分采用多点弹片支撑结构,支撑结构与透镜间的固定方式为胶粘。因此需要研制特殊的无应力耐紫外光学结构胶以及解决胶粘工艺的问题。而本文给出的运动学支撑方式,透镜与支撑结构之间的固定采用夹紧的方式,不需要再去单独解决无应力耐紫外光学结构胶以及胶粘工艺的问题。

针对透镜光学表面面形变化的分析,有限元方法已经成为一种有效的手段。陈华等^[5]分析了由环境温度变化而引起的透镜光学表面变形,为

高精度面形检测的实施提供了参考。谭凡教等^[6]应用有限元方法分析了光电经纬仪在不同倾角下镜面及其支撑系统的自重变形,得出了镜面及其支撑系统在各个俯仰高度上的变形位移。黎明等^[7]以热光学分析为基础,对复杂环境下光学窗口的玻璃厚度进行了优化设计。吴清文等^[8]分析了重力作用下透镜光学表面的变形以及像差成分,并提出了提高成像质量的改进措施。

本文根据高精度投影物镜的特点,提出了一种运动学支撑方式,并进行了相应的实验和分析。该运动学支撑结构属于弹性支撑的一种,能够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减小温度变化引起的热变形的特性。本文采用实验结合有限元分析的方法,对透镜在运动学支撑结构下产生的变形进行了分析,并对运动学支撑结构下透镜表面面形的复现性进行了实验测量。

2 运动学支撑结构介绍

运动学支撑方式根据运动学原理,采用一种静定结构来保证透镜的 6 个自由度在被完全约束的同时又不产生过约束。能够实现透镜的近似无应力支撑状态,在径向方向的挠度能够保证镜体结构在透镜受热时顺应伸缩,进而保持高精度面形。

整个支撑结构的原理如图 1 所示,与透镜较远的 3 个弹性球铰可看作具有 3 个旋转方向自由度的弹簧,与镜框较远的 3 个弹性转铰可等效为仅有 1 个旋转方向自由度的弹性件。柔性球铰和柔性转铰通过串联的方式连接,组成一个支撑座。

3 个支撑座通过夹持的方式与透镜连接,夹持位置沿透镜圆周方向均布,并在同一轴向位置,夹持方式为水平夹持,3 个支座以并联的方式支撑透镜。

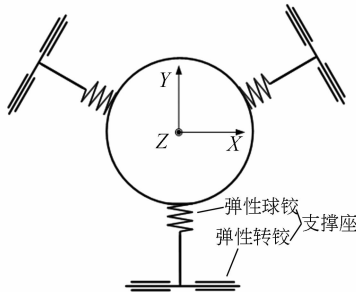


图 1 透镜运动学支撑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of kinematic mount apparatus

3 运动学支撑下镜面变形分析方法

3.1 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,因此得到广泛的应用^[9-10]。其表达式如下^[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:

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

式中: $m \leq n$, n 为径向级次, m 为方位角频率, ρ 为归一化半径。拟合的过程中采用 Fringe Zernike 多项式对镜面变形进行拟合。分析中给出的结果均为去掉刚体位移后的结果。

3.2 运动学支撑下透镜面形的分析流程

运动学支撑结构主要通过夹持的方式实现光学元件的固定,因而起到固定作用的夹持力会对透镜的面形产生一定的影响。本文分析的透镜模型为平晶,透镜的通光孔径为 140.8 mm,厚度为 27.38 mm。为了能够准确地建立有限元分析模型,采取了如图 2 所示的技术路线。首先对运动学支撑模型进行简化,如支撑结构与光学元件间交界面的处理以及边界条件的给定等。其次,提

取透镜表面面形的 RMS 值,与实测结果对比,如果不符合,则需要对建立的有限元模型进行修正。在透镜表面 RMS 相符情况下,分别对检测面形和分析面形进行 Zernike 多项式拟合,然后分析实测和分析得到的透镜光学表面面形主要像差是否属于同一个类型,或主要像差的 Zernike 系数是否大致相同,如果大致相同,则说明有限元模型能够准确反应实际过程。这样应用同样的有限元分析方法即可对透镜面形进一步分析。

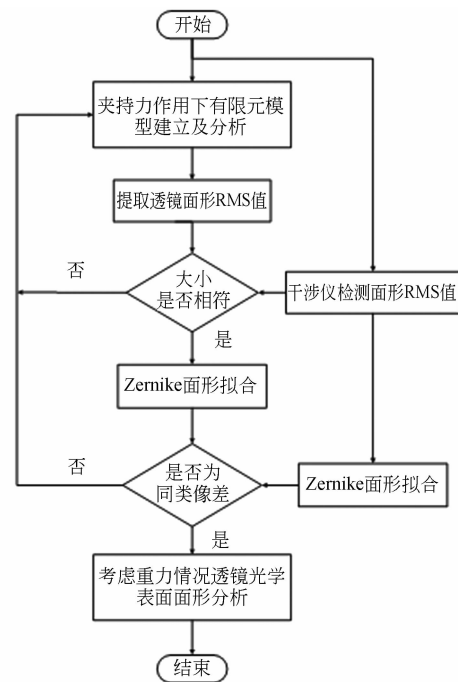


图 2 夹持力作用下镜面变形分析路线

Fig. 2 Flow diagram of lens surface deformation analysis under clamping force

4 运动学支撑下透镜面形检测实验与分析

4.1 夹持力作用下透镜面形检测实验

本实验在精密温控实验室中进行,实验过程中测量的环境温度变化为 $(22 \pm 0.05)^\circ\text{C}$,所用的仪器为 Zygo 公司的相移式 Fizeau 立式干涉仪。图 3 和图 4 分别为所测量的运动学支撑元件以及实验测量装置。由于透镜初始面形的存在,使得检测结果与仿真结果不具有可比性。为了消除初始面形的影响,采用了如下实验方案:分别测量施加夹持力前后透镜表面面形,以施加夹持力后的

检测面形减去施加夹持力前的检测面形,则所得到的面形为单独考虑夹持力对理想透镜面形的影响。同时,由于前后数据相减,去除了重力以及干涉仪标准具本身面形对检测结果的影响。因此,通过此方案得到的检测面形为透镜在夹持力作用下的面形。

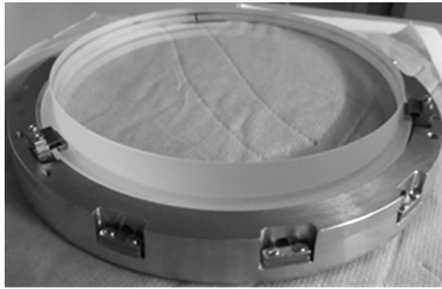


图 3 运动学支撑元件
Fig. 3 Element of kinematic mount

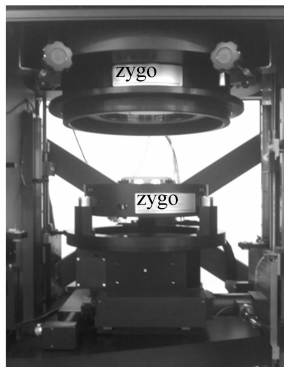


图 4 干涉仪检测系统
Fig. 4 Interferometer system

4.2 检测面形与有限元分析面形的对比分析

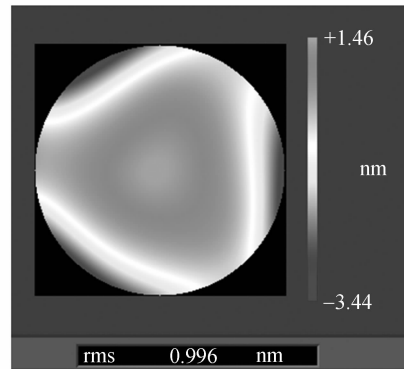
在检测的过程中温度,气流,振动等都会对检测结果产生影响^[12],为了消除每次测量过程中环境因素的影响,所取的数据为测量稳定后 20 次测量数据的平均。同时由于在装配运动学支撑结构的过程中存在装配误差,所以还进行了多次重复装配,所取结果为多次重复装配结果的平均,消除了装配误差的影响。

表 1 给出了实际检测和有限元分析得到的透镜光学表面面形的峰谷(PV)值和均方根(RMS)值。从表中可以看出,有限元分析得到的透镜光学表面面形的 PV 和 RMS 值均小于实测过程中得到的 PV 和 RMS 值,其中两者的 RMS 值更接

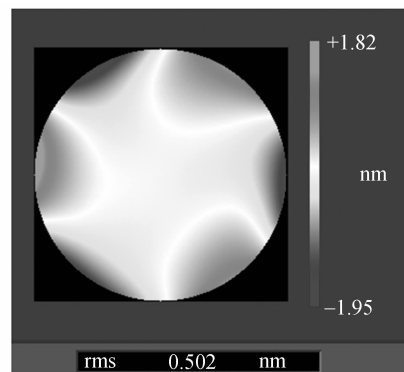
近,而 PV 值有较大的差距。PV 值是由表面最高点最低点决定的,极易受到随机误差的干扰,如灰尘、划痕及被检验镜的边缘效应等,常常不能代表光学表面的情况;而 RMS 值是全波前上平均误差的表征,更加合理。由此通过 RMS 值的比较可以看出实验和有限元分析得到的结果相符。

表 1 透镜实际检测和有限元分析得到的 PV 和 RMS 值
Tab. 1 PV and RMS values of lens surface from experiment and analysis (nm)

	PV	RMS
Experiment	7.242	1.004
Simulation	5.007	0.974

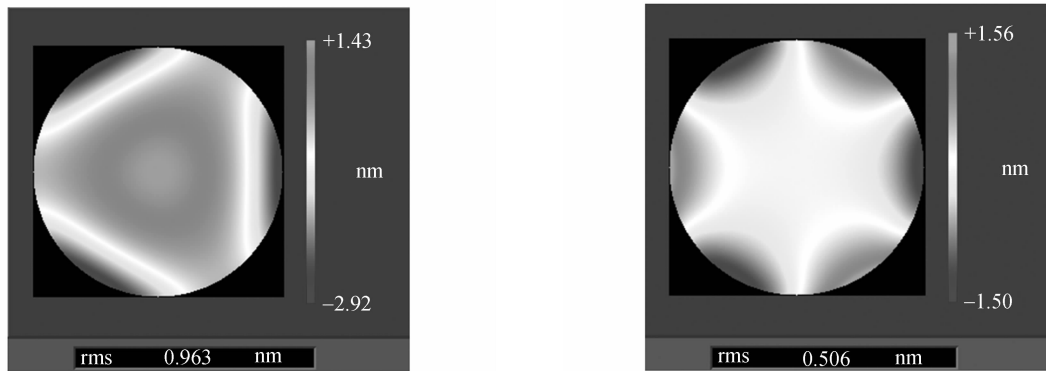


(a)Fringe Zernike 拟合面形
(a)Fringe Zernike polynomial fit surface figure



(b)去掉 power 后的 Fringe Zernike 拟合面形
(b)Fringe Zernike polynomial fit surface figure minus power

图 5 实测面形的 Fringe Zernike 拟合面形
Fig. 5 Fringe Zernike polynomial fit surface figure from experiment



(a)Fringe Zernike 拟合面形
(a)Fringe Zernike polynomial fit surface figure
(b)去掉 power 后的 Fringe Zernike 拟合面形
(b) Fringe Zernike polynomial fit surface figures minus power

图 6 有限元分析得到的 Fringe Zernike 拟合面形

Fig. 6 Fringe Zernike polynomial fit surface figures from finite element analysis

分别对实测面形和有限元分析得到的面形进行 36 项 Fringe Zernike 拟合,图 5 和图 6 分别给出了实测和分析的拟合面形以及去 Power 后的面形。比较图 5 和图 6 中拟合面形的 RMS 值和表 1 中的实测值以及分析值,两者之间差别分别为 0.80%和 0.92%,说明拟合后的面形能够反应真实面形。

由图 5 和图 6 可以看出,实测和有限元分析得到的拟合面形除了 RMS 值接近外,形变的分布也非常接近。

Zernike 多项式拟合能够分离出由夹持力引入的像差类型。通过比较实测和有限元分析得到面形几种主要像差的 Zernike 多项式系数,可进一步验证有限元分析模型的正确性。表 2 中给出了夹持力引起的几种主要像差的 Zernike 多项式系数和去除相应的像差后剩余的 RMS 值。其中,所有数值均为与波长的比值,应用的波长为 632.8 nm,当 m 不等于零时,各个像差的大小规定为 $Magnitude = \sqrt{A_{mn}^2 + B_{mn}^2}$,其中 A_{mn} 和 B_{mn} 分别为式(1)中各项系数。

表 2 夹持力引起的几种主要像差系数比较

($10^{-3} \times 1/\lambda$)

Tab. 2 Comparison of Zernike coefficients of main aberrations caused by clamping force

Aberration	Experiment		Analysis		Difference of aberration coefficients from experiment and analysis
	Magnitude	Residual RMS	Magnitude	Residual RMS	
Input		1.587		1.537	
Power	-2.361	0.793	-2.239	0.815	5.17%
Pri Trefoil	2.173	0.194	2.251	0.079	-3.59%
Sec Trefoil	0.371	0.162	0.207	0.033	44.20%

通过上述实测结果和仿真结果之间比较,Power 和 Pri Trefoil 的 Zernike 系数差别分别为 5.17%和 -3.59%,而 Sec Trefoil 的差别较大,为 44.2%。因而从主要像差 Power 和 Pri Trefoil 的比较说明,所建立的有限元分析模型能够较准确反应真实的物理过程,然而对像差 Sec Trefoil 的比较说明,仿真与实验之间存在着一定

的差异,但由于像差 Sec Trefoil 占的比重小,所以并不影响实验与仿真之间的吻合程度,说明所建立的有限元模型能够反应实际物理过程。

4.3 自重情况下透镜光学表面面形分析

上述对运动学支撑结构夹持力导致的透镜光学表面的面形进行的分析并没有考虑重力的影响。由于初始面形的影响,实验过程中的检测结

果并不能给出考虑重力情况下运动学支撑结构导致的光学表面面形的变化。但基于上述经过实验验证的有限模型,可以对考虑重力情况下运动学支撑结构导致的面形变化进行分析,给出具有参考价值的结果。

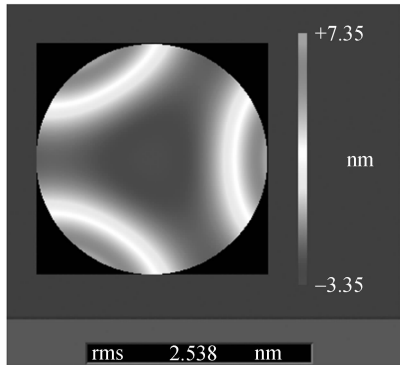


图 7 重力作用下的 Fringe Zernike 拟合面形

Fig.7 Fringe Zernike polynomial fit surface considering gravity

图 7 给出了考虑重力情况下运动学支撑结构导致的光学表面面形的 Fringe Zernike 拟合面形。由图中可以看出,透镜在重力以及夹持力共同作用下,光学表面 Fringe Zernike 面形的 RMS 值为 2.538 nm。

表 3 中给出了几种主要的像差,以及去除此种像差后剩余的 RMS 值。与表 2 相同,表 3 中的所有数值均为与波长的比值,所应用的波长为 632.8 nm。经分析,产生的几种主要像差与夹持力单独作用下的几种像差基本相同,都为 Power 和 Pri Trefoil、Sec Trefoil。

表 3 透镜表面面形 RMS 值及主要相差

($10^{-3} \times 1/\lambda$)

Tab.3 RMS values of lens surface and its main aberrations

Aberration	Magnitude	Residual RMS
Input		4.155
Power	5.034	2.964
Pri Trefoil	8.292	0.367
Sec Trefoil	0.676	0.306

5 运动学支撑下透镜面形的复现性实验及分析

在透镜光学表面面形精修的过程中,需要根

据检测结果对透镜面形进行再次精修。为了保证面形精修精度,需要保证支撑结构在重复装配的过程保证面形具有较高的复现性。

复现性定义为在改变了的测量条件下,同一被测量的测量结果之间的一致性。在多次对运动学支撑结构重复装配的过程中,由于人为装配误差的存在(如夹持点位置,夹持力大小改变等等),实际上改变了透镜的支撑条件。若要提高面形的复现精度,就需要设计的运动学支撑结构具有良好的定位精度以及消除人为装配误差的能力,因此在实验过程中,着重考察了运动学支撑结构下透镜面形的复现性。

所用仪器仍为 Zygo 公司的相移式 Fizeau 立式干涉仪,共进行了 10 次重复装配实验。对于重复装配过程中引起面形的变化采用以下处理方法:首先对 10 次测量得到的透镜光学表面面形进行平均,得到平均面形;然后用各次测量面形与平均面形做差,得到相减后透镜光学表面残余面形的 RMS 值,这个 RMS 值的大小可以反映重复装配过程中导致的面形变化。图 8 给出了各次重复装配实验过程中透镜光学表面面形 RMS 值的变化情况。

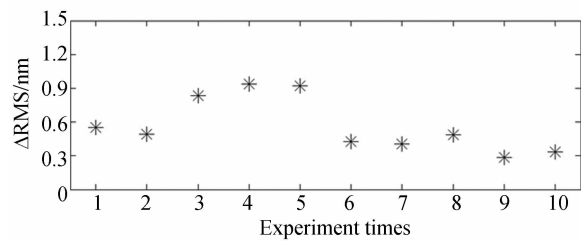


图 8 各次重复装配透镜表面面形与平均面形 RMS 值的差值

Fig.8 Difference of RMS values between repeating assembly and average optical surface figure

给出了复现性的定义,然而对于复现性定量的描述则用复现性标准差 S_r 表示,它的计算方法可由贝塞尔公式给出:

$$S_r = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}, \quad (3)$$

式中: x_i 为第 i 次测量结果; \bar{x} 为 n 次测量结果的算术平均值。对于透镜光学表面复现性标准差的计算则采用:

$$S_r = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta RMS_i^2 / (n-1)}, \quad (4)$$

式中: ΔRMS_i 为第 i 次重复装配透镜表面面形与平均面形 RMS 值的差值, S_r 则为评价重复性标准。经计算可得到重复装配过程中的复现性标准差为 0.645 nm, 能够满足对复现性的要求。

6 结 论

针对投影光刻物镜高精度面形的要求, 提出了一种运动学支撑结构, 并进行了分析和实验验证。首先, 介绍了运动学支撑结构以及透镜面形分析的方法。然后, 对所建立的有限元模型进行了验证, 并分析了重力作用下运动学支撑结构引

起的透镜光学表面像差。最后, 通过实验分析了运动学支撑结构下透镜光学表面面形的复现性。结果表明, 有限元分析得到的结果能够和实验吻合良好, 实测和仿真得到的夹持力引起的透镜光学表面面形 RMS 值分别为 1.004 和 0.973 nm, 考虑重力情况下引起的透镜光学表面面形 RMS 值为 2.538 nm, 产生的几种主要的像差分别为 Power、Pri Trefoil 和 Sec Trefoil。针对运动学支撑结构下透镜光学表面面形的复现性实验表明, 透镜表面的复现性标准差为 0.645 nm, 所设计的运动学支撑结构能够保证透镜光学表面面形具有良好的复现性。

参考文献:

- [1] 单云霄, 陈长征, 刘磊, 等. 柔性铰链的有限元法设计与分析[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 146-154.
SHAN Y X, CHEN CH ZH, LIU L, *et al.*. Design and analysis of flexure hinge by finite element method [J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(2): 146-151. (in Chinese)
- [2] 李琳, 杨勇. 空间曲线切口式柔性铰链的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2192-2198.
LI L, YANG Y. Design of flexure hinges with space curve notches [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2192-2198. (in Chinese)
- [3] 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.
WANG ZH S, ZHAI Y, MEI G, *et al.*. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1833-1841. (in Chinese)
- [4] 王平, 田伟, 王汝冬, 等. 标准镜的高精度柔性支撑镜框的优化设计[J]. 中国光学, 2011, 4(4): 380-387.
WANG P, TIAN W, WANG R D, *et al.*. Optimized design of high precision flexure-support barrel for reference sphere [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(4): 380-387. (in Chinese)
- [5] 陈华, 史振广, 隋永新, 等. 干涉检测中环境温度引起的镜面变形分析[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 1-5.
CHEN H, SHI ZH G, SUI Y X, *et al.*. Thermal deformation analysis of optical surfaces caused by environmental temperature during interferometric testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 1-5. (in Chinese)
- [6] 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.
TAN F J, QIAO Y F, LI Y B, *et al.*. Finite element analysis for surface shape deformation of photo-electronic theodolite primary mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 756-763. (in Chinese)
- [7] 黎明, 吴清文, 余飞. 基于热光学分析的光学窗口玻璃厚度的优化[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 210-213.
LI M, WU Q W, YU F. Optimization of optical window glass thickness based on thermal optical analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 210-213. (in Chinese)
- [8] 吴清文, 卢铎, 王家骥, 等. 自重作用下中心支撑主反射镜面形变化研究[J]. 光学精密工程, 1996, 4(4): 23-28.
WU Q W, LU E, WANG J Q, *et al.*. Study on the surface figure changes of primary mirror centrally supported under gravity load [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(4): 23-28. (in Chinese)
- [9] 侯溪, 伍凡, 杨力, 等. 中心遮拦干涉图的圆泽尼克拟合对计算赛德尔像差的影响分析[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 54-60.
HOU X, WU F, YANG L, *et al.*. Effect of central obscuration interferograms fitted with Zernike circle polynomials on calculating Seidel aberrations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(1): 54-60. (in Chinese)
- [10] 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.

TANG Y K, HE X H, TAO Q CH. Research on the point spread function of microscope based on the Zernike polynomials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1):169-175. (in Chinese)

[11] JAMES C. *Applied Optics and Optical Engineering*[M]. Revert: Academic Press, 1992.

[12] 谷勇强,苗二龙,隋永新. 双球面法标定立式参考

球面的精度分析[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 527-533.

GU Y Q, MIAO E L, SUI Y X. Accuracy analysis on calibrating vertical spherical reference by two-sphere method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):527-533. (in Chinese)

作者简介:



于新峰(1987—),男,内蒙古奈曼人,硕士,研究实习员,2009年、2011年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光机结构设计及分析方面的研究。E-mail: yu_xfeng@126.com



倪明阳(1985—),男,山东菏泽人,硕士,助理研究员,2007年、2009年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光机结构设计方面的研究。E-mail: mingyang.neal@gmail.com



巩岩(1968—),男,吉林梅河口人,博士,研究员,博士生导师,主要从事光机电一体化技术方面的研究。E-mail: gongyi@sklao.ac.cn



秦硕(1979—),男,湖南长沙人,博士后,讲师,2005年、2008年于空军工程大学分别获得硕士、博士学位,主要从事自动控制方面的研究。E-mail: qinshuo666@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)