

径向预紧力对反射镜重力变形的补偿作用

贾树强¹ 黄 玮¹ 徐象如^{1,2} 姚长呈^{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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对精密反射镜的重力变形,提出了一种基于径向预紧力的变形补偿方法。以高数值孔径(NA)投影光刻物镜中的反射镜为研究对象,建立了反射镜的受力模型,定性分析了径向预紧力对反射镜重力变形的影响规律。利用有限元分析方法得到了在不同径向预紧力作用下反射镜的面形变化,通过数据拟合分析了径向预紧力与面形误差及其泽尼克系数之间的关系。分析结果表明:径向预紧力主要影响反射镜面形的球差项和三叶像差项;随着径向预紧力的增大,补偿后的面形误差呈现先减小后增大的趋势,当径向预紧力约为25 N时,由于重力导致的面形误差由2.009 nm减小为0.462 nm,补偿结果最优。通过实验测量了重力和预紧力作用下反射镜的面形误差,当径向预紧力为25 N时重力导致的反射镜面形误差减小了0.988 nm,从而验证了分析过程和补偿方法的正确性。

关键词 光学器件; 表面变形; 面形补偿; 预紧力; 有限元方法

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0422006

Compensation Effect of Radial Preload on Mirror Deformation Caused by Gravity

Jia Shuqiang¹ Huang Wei¹ Xu Xiangru^{1,2} Yao Changcheng^{1,2}

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A compensation method based on radial preload is presented in order to decrease the surface deformation of a precision mirror caused by gravity. By taking the mirror used in a high numerical aperture (NA) lithographic objective lens as a research object, a force analysis model is established. The influence law of surface deformation affected by the radial preload is analyzed qualitatively under the action of gravity. Surface deformation of the mirror is obtained under the condition of different preloads by the finite element method. The relationship between radial preload and surface deformation is analyzed through data fitting as well as the relationship between the radial preload and the Zernike coefficient. The analysis results show that the radial preload mainly influences the spherical aberration and the trefoil aberration of the mirror surface, and the compensated surface deformations of the mirror first increase and then decrease with the increase of radial preload. The root mean square value of the mirror surface deformation decreases from 2.009 nm to 0.462 nm, which is the optimal compensation result. Moreover, the mirror surface deformation is measured experimentally under the action of gravity and the radial preload, and the experimental results indicate that the mirror surface deformation caused by gravity decreases by a mean of 0.988 nm when the radial preload is about 25 N. The validity of the analysis process and the compensation method are confirmed.

Key words optical devices; surface deformation; deformation compensation; preload; finite element method

OCIS codes 230.4040; 120.6650; 220.1000

收稿日期: 2015-11-23; 收到修改稿日期: 2015-12-09

基金项目: 国家重大科技专项(2012ZX02701001-007)

作者简介: 贾树强(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: shuqiangjia@163.com

1 引 言

减小光学元件面形误差是提高光机系统性能的重要途径。光机系统中的内应力是影响光学元件面形精度的关键因素,它的产生主要与装配应力和热应力(工作过程中由于温度变化导致的)有关。合理的结构设计和装配工艺设计是减小系统内应力的重要手段。

为了减小装配应力和热应力等因素导致的面形变化,光机系统设计过程中常采用运动学约束结构。运动学约束是指一个物体的6个空间自由度都被唯一限制,不存在过约束或者欠约束的情况。柔性双脚架构成的三点支撑结构是典型的运动学约束结构,因其具备支撑精度高、系统对称、结构紧凑以及可显著减小光机结构中的最大内应力等优点,受到了国内外学者的广泛关注。一些文献^[1-4]介绍了柔性双脚架运动学约束结构在主动光学元件支撑、中小口径光学元件支撑、非圆形及大口径反射元件支撑等领域的应用。不同形式的柔性双脚架结构的参数优化设计、受力变形分析和装配工艺等 in 相关文献^[5-7]中得到了研究。柔性结构的动力学模型也已得到推导^[8]。随着对柔性双脚架结构的深入研究和性能改善,该结构将广泛应用于天文望远镜、空间离轴三反相机和光刻机等领域。

由于柔性双脚架组成的运动学约束结构只有3个支撑点,光学元件自身重力导致的面形变化较为显著,目前主要通过设计轻量化结构^[9-11],优化支撑位置^[12-13]或重力补偿^[14]等措施降低重力的影响,其中轻量化设计和支撑位置优化受光学元件材料和结构限制。通过对柔性双脚架支撑的圆形反射镜进行实验和分析,发现通过施加背离圆心方向的径向预紧力可改善重力对光学元件面形的影响,目前尚未见文献对该方面的研究进行报道。

本文以高数值孔径(NA)光刻投影物镜中的反射镜为研究对象,提出基于径向预紧力的重力变形补偿措施,采用柔性双脚架组成的运动学约束结构对反射镜进行支撑。建立有限元模型,对不同径向预紧力下的反射镜的面形变化进行仿真分析,确定径向预紧力与反射镜面形变化的均方根(RMS)值之间的关系。最后,通过实验测量径向预紧力对反射镜面形变化的补偿作用,验证仿真结果的正确性。通过研究径向预紧力改善重力对面形的影响,为精密反射镜支撑结构的设计提供参考。

2 光学元件的受力变形分析

针对高NA投影光刻物镜中的反射镜的面形精度和稳定性要求设计了如图1所示的运动学支撑结构,每个双脚架可分别约束两个空间自由度,因此光学元件的空间6个自由度被3个双脚架结构唯一限制,不存在过约束现象。

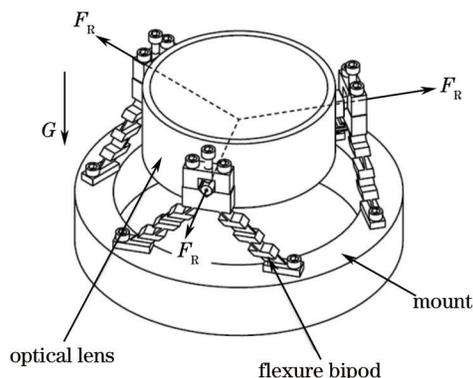


图1 反射镜运动学支撑结构示意图

Fig.1 Kinematic support structure of the mirror

在3个支撑点处施加大小相等、方向背离直径方向的预紧力,此时的反射镜受力如图2所示,分别为光学元件重力 G 、与重力方向相反的支撑力 F_B 和背离直径方向的预紧力 F_R 。研究的光学元件虽然不属于薄圆板模型的范畴,但其表面变形趋势与薄圆板模型一致,为了定性确定由于重力和径向预紧力对反射镜面变形的影响,简化模型如图3所示。

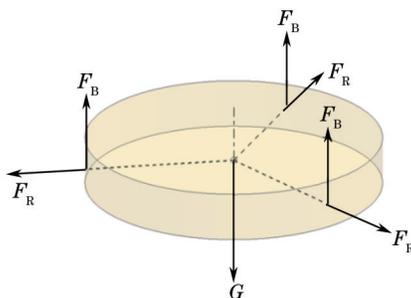


图2 反射镜受力示意图

Fig.2 Schematic diagram of force acting on the mirror

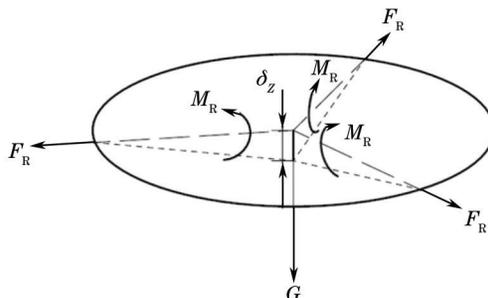


图3 简化模型

Fig.3 Simplified model

通过材料力学中的能量法^[15]分析径向力对光学元件受力变形的影响,弹性体受力变形后重力 G 和径向力 F_R 在作用方向上的位移分别为 δ_{z0} 和 δ_{r0} ,由弹性体变形能 U 等于外力所做的功之和可知

$$U = G\delta_{z0} + F_R\delta_{r0} . \quad (1)$$

由于光学元件在外力作用下处于弹性变形范围内,根据材料力学相关理论,弹性体在外力作用下的变形能与外力的加载次序无关。如图3所示,将力的作用分为两个阶段:第一阶段,施加重力 G ,光学元件受力变形,重力作用位移为 δ_z ;第二阶段:施加径向力 F_R ,变形完成之后 F_R 在其作用方向上的位移为 δ_{r0} ,在这个过程中存在附加力矩 M_R , $M_R = F_R\delta_z$,其转角为 δ_θ ,附加力矩的作用释放了第一阶段的部分变形能。综上可得

$$U = G\delta_z + F_R\delta_{r0} - F_R\delta_z\delta_\theta . \quad (2)$$

(1)式和(2)式联立可得

$$\delta_{z0} = \delta_z \left(1 - \frac{F_R\delta_\theta}{G} \right) . \quad (3)$$

从(3)式中可以看出:存在径向预紧力作用时,光学元件在重力方向上变形量小于重力单独作用时的变形量;径向预紧力越大,光学元件在重力方向上的变形量越小。

3 结构建模

为了分析径向预紧力对反射镜面形的影响,针对如图1所示的柔性双脚架运动学约束结构建立有限元分析模型,对结构中的螺栓孔、倒角等微小结构进行简化处理,忽略螺栓等只用于施加夹紧力而无定位支撑作用的零件,简化后的有限元分析模型如图4所示。利用 ABAQUS 软件进行仿真计算,通过拟合反射镜表面节点的坐标数值和相对位移量,得到反射镜面形变化的 RMS 值。在仿真计算过程中除了重力的作用外,在支撑块圆柱端面施加背离反射镜重心的径向预紧力。

柔性双脚架支撑结构有限元模型中的各零件所采用的材料及其主要力学特性如表1所示。其中, Al2024 材料的杨氏模量和密度都较低,适合制造轻型柔性结构,但其屈服极限和抗疲劳能力较差,设计时应进行强度校核。熔石英具有加工性能好、热膨胀系数低等优点,是现代光刻机中应用最广的光学材料。

表 1 材料特性

Table 1 Materials' property

	Material	Density $/(g \cdot cm^{-3})$	Young's modulus $/(E/MPa)$	Poisson's ratio
Mount/support block/flexure bipod	Al(2024)	2.77	73100	0.33
Optical lens	Fused silicon	2.205	73000	0.17

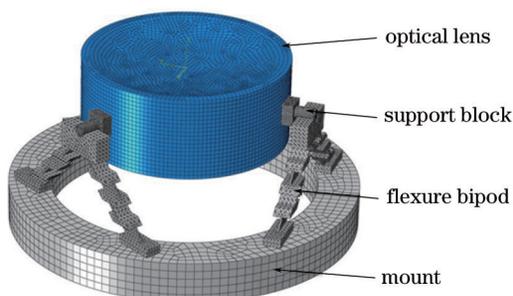


图 4 柔性双脚架支撑结构有限元模型

Fig.4 Finite element model of the support structure composed of flexure bipods

4 仿真分析和结果讨论

建立双脚架支撑结构的有限元分析模型后,设定材料属性和约束模型。为了分析在重力作用下径向预紧力对反射镜面形 RMS 值的影响,对有限元模型整体施加重力载荷,重力方向与光轴方向平行,在 3 个支撑块圆柱端面分别施加大小相等,沿端面外法线方向的预紧力。从仿真计算结果中提取光学元件变形后表面节点的坐标数值和相对位移量,通过 Matlab 软件和 MetroPro 软件进行数据处理,得到在重力和径向预紧力的共同作用下反射镜面形的峰谷值(PV)和 RMS 值。当径向预紧力大小为 0 N 时,反射镜在重力单独作用下的面形拟合结果如图 5 所示;在有限元模型中设置重力载荷为 0 N,对径向预紧力单独作用下的反射镜进行仿真分析,结果如图 6 所示。

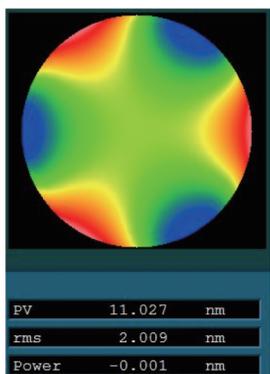


图 5 重力单独作用时的反射镜面形

Fig.5 Surface figure of the mirror under independent action of gravity

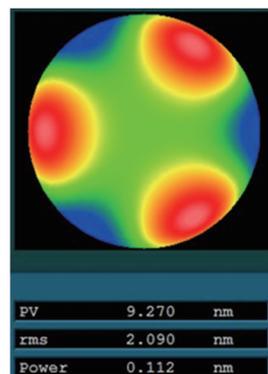


图 6 径向预紧力单独作用时的反射镜面形

Fig.6 Surface figure of the mirror under independent action of preload

在 Matlab 软件中通过数据拟合得到重力和预紧力分别单独作用时反射镜面形的前 36 项泽尼克多项式系数,如图 7 所示。从图 7 中可以看出,当重力单独作用时,主要影响反射镜面形泽尼克多项式系数的第 9、10 和 19 项,即反射面的低阶球差、低阶三叶像差和高阶三叶像差;当径向预紧力单独作用时,主要影响反射镜面形泽尼克多项式的第 9、10、19、30 项,亦即反射面的低阶球差、低阶三叶像差和高阶三叶像差。

从图 5、图 6 中可以看出,重力单独作用时反射镜面形最大位移的位置与预紧力单独作用时面形最小位移的位置相对应,因此采用合适的预紧力可补偿由于重力导致的面形变化。分别对径向预紧力大小为 5, 10, 15, ..., 60 N 时的载荷工况进行仿真计算,重力和预紧力共同作用下的反射镜面形如图 8 所示。

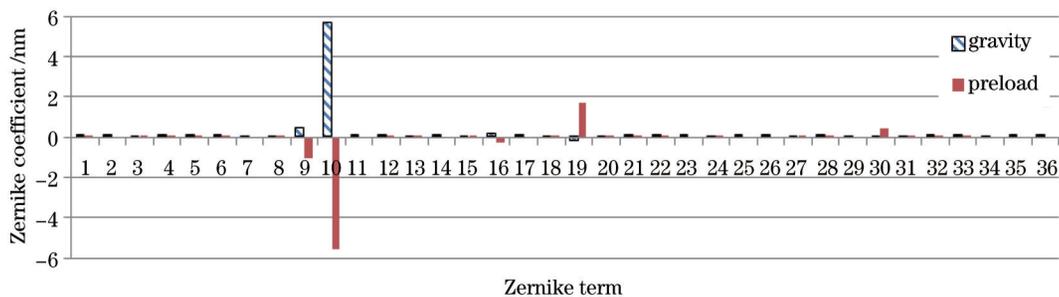


图 7 重力和预紧力分别作用下的泽尼克系数

Fig.7 Zernike coefficient under independent action of gravity and preload

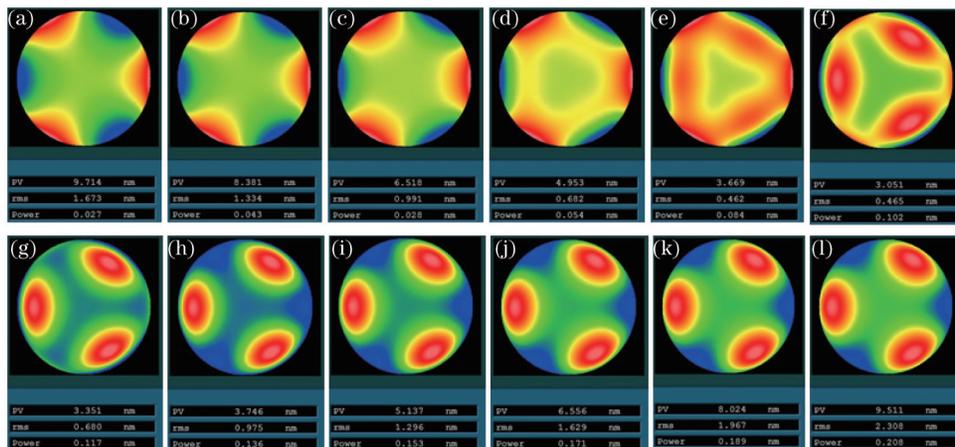


图 8 重力和预紧力共同作用时反射镜面形。预紧力为(a) 5 N; (b) 10 N; (c) 15 N; (d) 20 N; (e) 25 N; (f) 30 N; (g) 35 N; (h) 40 N; (i) 45 N; (j) 50 N; (k) 55 N; (l) 60 N

Fig.8 Surface figure of the mirror under the interaction of gravity and preload. Preload F_R is (a) 5 N; (b) 10 N; (c) 15 N; (d) 20 N; (e) 25 N; (f) 30 N; (g) 35 N; (h) 40 N; (i) 45 N; (j) 50 N; (k) 55 N; (l) 60 N respectively

从图 5 和图 8 所示结果可以看出,在重力和径向预紧力的共同作用下,反射面的泽尼克面形都是旋转对称的三叶形状。当径向预紧力改变时,面形变化的 RMS 值和 PV 值变化曲线如图 9 所示,从图 9 中可以看出,随着径向预紧力的增大,由于重力导致的反射镜面形变化的 RMS 值和 PV 值都呈先减小后增大的趋势;径向预紧力过大时,反射镜面形出现劣化现象。由此可知:合适的径向预紧力对重力导致的面形变化具有补偿作用,当径向预紧力约为 25 N 时,补偿效果最好,反射镜由于重力导致的面形变化由 2.009 nm 补偿到 0.462 nm,改善了 1.547 nm。

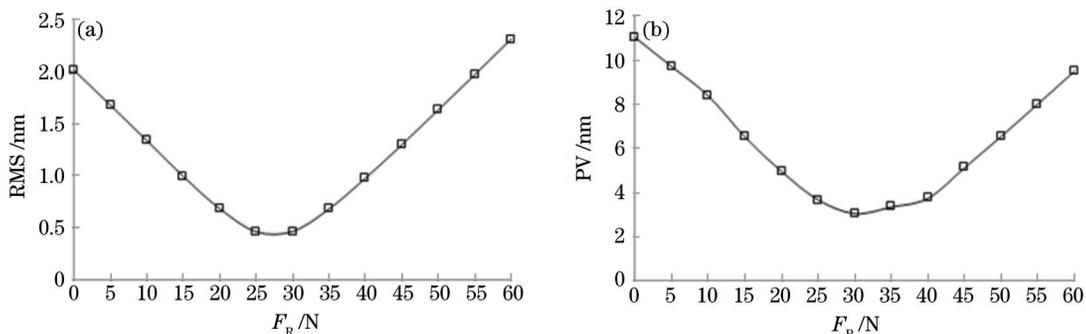


图 9 反射镜面形(a) RMS 值和(b) PV 值变化曲线

Fig.9 Plots of (a) RMS and (b) PV of surface figure of the mirror

为了进一步深入研究径向预紧力对重力导致的面形变化的影响规律,通过数据拟合得到重力和预紧力共同作用时反射镜面形的前 36 项泽尼克多项式系数,并与重力单独作用的情况进行对比,如图 10 所示。径向预紧力的变化会较显著影响面形泽尼克系数的第 9 项(低阶球差)、第 10 项(低阶三叶像差)、第 16 项(高阶球

差)、第19项(高阶三叶像差)和第30项(高阶三叶像差)的数值,具体影响规律如图11所示。

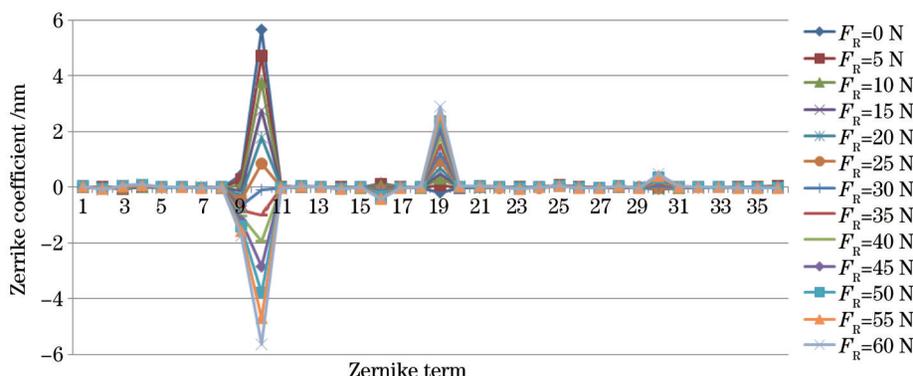


图10 不同预紧力作用下的反射镜面形泽尼克多项式系数

Fig.10 Zernike coefficient of surface figure under the action of different preloads

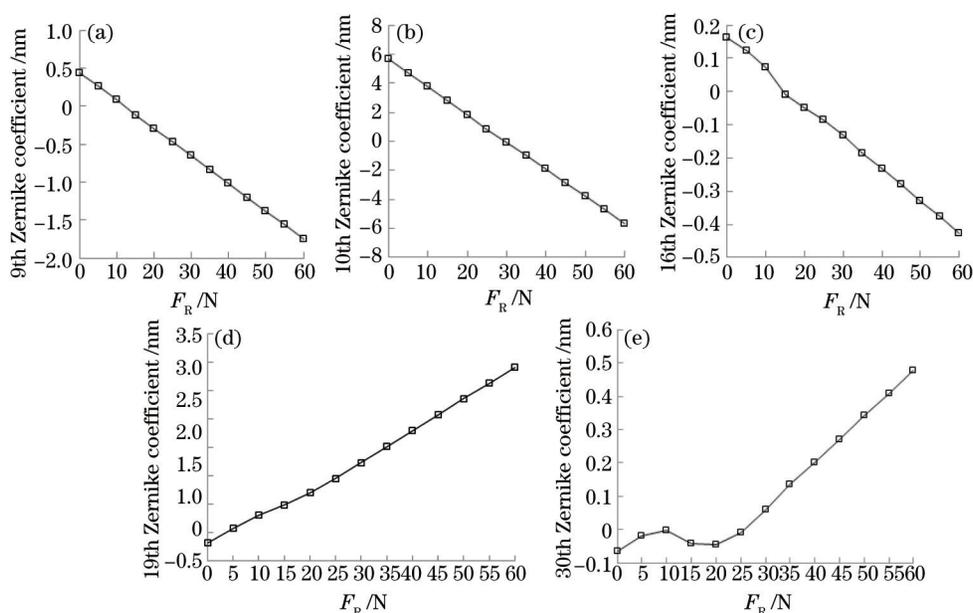


图11 各项泽尼克系数随预紧力的变化曲线。(a)第9项泽尼克系数;(b)第10项泽尼克系数;(c)第16项泽尼克系数;
(d)第19项泽尼克系数;(e)第30项泽尼克系数

Fig.11 Plots of Zernike coefficients versus preload. (a) 9th Zernike coefficient; (b) 10th Zernike coefficient; (c) 16th Zernike coefficient;
(d) 19th Zernike coefficient; (e) 30th Zernike coefficient

从图11可以看出,随着径向预紧力的增大,第9、10、16项泽尼克系数数值呈现出线性减小的变化规律;第19项泽尼克系数呈现出线性增加的变化规律;第30项泽尼克系数在预紧力小于25 N时呈现小幅值的起伏现象,当预紧力大于25 N时,泽尼克系数线性增加。由于泽尼克面形的RMS值与泽尼克系数的绝对值大小有关,图10中对面形影响权重较大的第9、10、16、19项泽尼克系数的绝对值均呈现先减小后增大的趋势,故随着径向预紧力的增大,由于重力导致的反射镜面形变化的RMS值呈现出先减小后增大的趋势。

5 实验验证

为了便于施加径向预紧力,设计过程中在柔性双脚架上采用V形槽结构,V形槽可相对于支撑块的圆柱面产生相对位移。针对仿真计算所得最优径向预紧力,对双脚架运动学支撑装置进行装配,装配过程如图12所示。装配之前首先测定柔性双脚架的等效弹性系数,通过线性驱动器使柔性双脚架发生弹性变形,当弹性变形达到设定值时,用螺栓压紧固定块,然后卸载线性驱动器,此时双脚架就会沿光学元件径向产生反作用力。先后在3个双脚架结构的支撑位置重复此过程,完成径向预紧力的施加。

使用Zygo公司4 inch(1inch=2.54 cm)球面检测干涉仪实测反射镜面形,测量结果如图13所示,其中图13

(a)所示为重力单独作用时反射镜的面形实测值,图 13(b)为径向预紧力为 25 N 时反射镜的面形实测值。

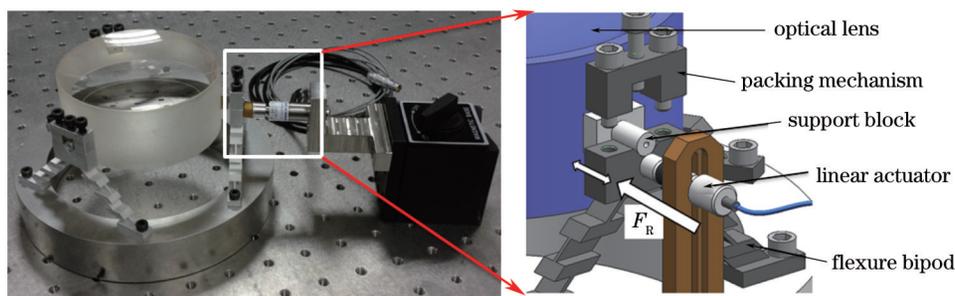


图 12 径向预紧力施加装置示意图

Fig.12 Schematic diagram of applying radial preloads

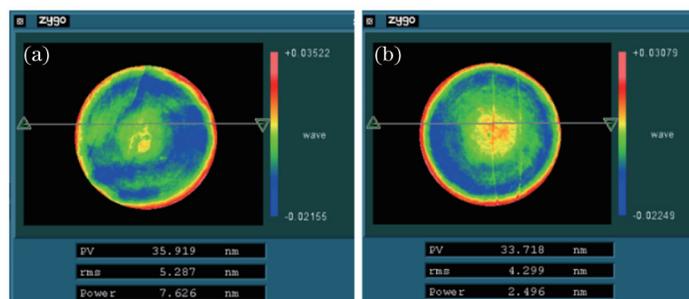


图 13 反射镜面形测量结果。(a) 重力作用下测量结果; (b) 重力和预紧力共同作用下测量结果

Fig.13 Experiments results of surface figure. (a) Result under the action of gravity; (b) result under the interaction of gravity and preload

从图 13 中可以看出,当重力单独作用时,反射镜面形 RMS 值为 5.287 nm;当施加 25N 的径向预紧力时,反射镜面形 RMS 值为 4.299 nm。通过径向预紧力的补偿作用,反射镜面形 RMS 值改善了约 0.988 nm,与仿真结果中的改善量 1.547 nm 存在差异。由于实验过程中,施加的径向预紧力存在误差,装配过程中会产生附加应力,以及未考虑反射镜初始面形对测量结果的影响等原因,导致实验结果与仿真结果存在差异,但仍一定程度上验证了分析过程和分析结果的正确性,即合适的径向预紧力可补偿由于重力导致的面形误差。

6 结 论

以高 NA 投影光刻物镜中的反射镜及其支撑装置为研究对象,分析了在重力和径向预紧力作用下反射镜的受力变形情况,讨论了径向预紧力对于重力导致的反射镜面形变化的补偿作用。建立了柔性双脚架支撑装置的有限元模型,仿真分析了不同径向预紧力对反射镜面形的补偿作用,通过数据拟合得到了径向预紧力对柔性双脚架三点支撑的反射镜面形的补偿规律,即:柔性双脚架运动学支撑的反射镜在重力作用下,随着径向预紧力的增大,补偿后的面形 RMS 值呈现先减小后增大的趋势,当径向预紧力取值约为 25 N 时,补偿结果最优。通过实验验证了分析过程和最优补偿结果的正确性。在光学系统中,采用径向预紧力补偿面形误差时应考虑可能导致的应力双折射现象。

参 考 文 献

- 1 Marie Laslandes, Emmanuel Hugot, Marc Ferrari, *et al.*. Mirror actively deformed and regulated for applications in space: design and performance[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 091803.
- 2 Gong Hui, Chen Wei, Zhou Feng. The vibration suppression designing for large aperture assembly in launch environment[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(3): 40-47.
宫 辉, 陈 伟, 周 峰. 大口径反射镜组件发射段环境的防振设计[J]. *航天返回与遥感*, 2015, 36(3): 40-47.
- 3 Isaac Weingrod, Catherine Y Chou, Buck Holmes, *et al.*. Design of bipod flexure mounts for the IRIS spectrometer[C]. *SPIE*, 2013, 8836: 88360Q.
- 4 Zhang Limin, Wang Fuguo, An Qichang, *et al.*. Application of bipod to supporting structure of minitype reflector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 438-443.

- 张丽敏, 王富国, 安其昌, 等. Bipod 柔性结构在小型反射镜支撑中的应用[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(2): 438-443.
- 5 Hagyong Kihm, Ho-Soon Yang. Design optimization of a 1-m light weight mirror for a space telescope[J]. Optical Engineering, 2013, 52(9): 091806.
- 6 Wang Hui, Zhou Feng, Wang Liping, *et al.*. Analysis and metrology of reproducibility of high-precision optic mount[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1208001.
王 辉, 周 烽, 王丽萍, 等. 高精度光学元件支撑装置面形复现性分析与测量[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208001.
- 7 Wei-Cheng Lin, Shenq-Tsong Chang, Sheng-Hsiung Chang, *et al.*. Alignment and assembly process for primary mirror subsystem of a spaceborne telescope[J]. Optical Engineering, 2015, 54(11): 115109.
- 8 Nicolae Lobontiu, Ephraim Garcia. Two-axis flexure hinges with axially-located and symmetric notches[J]. Computers & Structures, 2003, 81(13): 1329-1341.
- 9 Kang-Soo Park, Jun Ho Lee, Sung-Kie Youn. Lightweight mirror design method using topology optimization[J]. Optical Engineering, 2005, 44(5): 053002.
- 10 C Y Chan, Y C Chen, S T Chang, *et al.*. Study of bonding positions of isostatic mounts on a lightweight primary mirror[C]. SPIE, 2012, 8516: 85160M.
- 11 Haeng-Bok Lee, Jin-Young Suk, Jong-In Bae. Trade study of all-SiC lightweight primary mirror and metering structure for spaceborne telescope[C]. SPIE, 9574: 95740D.
- 12 Dai Xiaolin, Xian Hao, Tang Jinlong, *et al.*. Designing of lateral support system for an 8 m active thin mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0622004.
戴晓霖, 鲜 浩, 唐金龙, 等. 8 m 能动薄主镜侧支撑设计[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0622004.
- 13 Hu Haifei, Luo Xiao, Xin Hongwei, *et al.*. Layout optimization of equal-force supports for ultra-large optical fabrication[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0422003.
胡海飞, 罗 霄, 辛宏伟, 等. 超大口径光学制造均力支撑布局优化[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0422003.
- 14 Lijuan Yang, Tingwen Xing. Selection of the compensation quantity to the lens deformation caused by gravity[C]. SPIE, 2014, 9281: 92811G.
- 15 Nie Yuqin, Meng Guangwei. Mechanics of materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 268-272.
聂毓琴, 孟广伟. 材料力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 268-272.

栏目编辑: 史 敏