光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021060302

支撑变形对亚纳米级面形检测精度的影响

刘　绚[1,2]，贾　辛[1*]，付韬韬[1]

（1. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 光刻投影物镜中透物镜的面形精度是影响光学系统成像质量的关键因素之一，而支撑变形是影响面形精度的一个非常重要的因素。为提高大口径透镜的光学检测复现性，设计了一种整体式柔性支撑结构，分析了重力作用下弹片数量和各尺寸参数等对透镜面形精度及复现精度的影响。分析结果表明：增加弹片数量、减小支撑距离透镜中心的距离及增大弹片厚度可使透镜的变形减小；可以通过缩短弹片长度、增加弹片厚度及弹片数量来提高复现精度。根据各影响因素与复现性的关系分析得到的优化参数下的复现精度为0.21 nm rms，能够满足深紫外光刻投影物镜中透镜的高精度面形要求。

关键词： 支撑变形；支撑结构；面形精度；复现性分析

中图分类号： TN703　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0747－07

Influence of Support Deformation on Sub-Nano Level Surface Shape Detection Accuracy

LIU Xuan[1,2], JIA Xin[1], FU Taotao[1]

（1. Institute of Optics and Electronics of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN）

Abstract: The surface shape accuracy of the transparent objective lens in the lithographic projection objective is one of the key factors affecting the imaging quality of the optical system, and the support deformation is a very important factor affecting the surface shape accuracy. In order to improve the reproducibility of the optical inspection of the large-aperture lens, an integral flexible support structure was designed, and the influence of the number of shrapnel and various dimensional parameters on the surface accuracy and reproducibility of the lens under the action of gravity was analyzed. The analysis results show that: increasing the number of shrapnel, reducing the distance between the support and the center of the lens and increasing the thickness of the shrapnel can reduce the deformation of the lens. The reproduction accuracy can be improved by shortening the length of the shrapnel, increasing the thickness of the shrapnel and the number of shrapnel. According to the analysis of the relationship between the influence factors and the reproducibility, the reproducibility under the optimized parameters is 0.21 nm rms, which can meet the high-precision surface shape requirements of the lens in the deep ultraviolet lithography projection objective.

Key words: support deformation; supporting structure; surface shape accuracy; reproducibility analysis

收稿日期：2021－06－03.

*通信作者：贾　辛

0 引言

光刻技术等先进光学技术的飞速发展，对光学元件的检测要求越来越高，光学元件的精度要求已经达到了亚纳米量级。干涉仪是进行光学元件面形检测的主要仪器，其利用干涉原理测量待测面的面形。光学元件的面形精度不仅与元件自身的加工质量有关，还与其支撑方式和工作环境等有密切的关联，在不同支撑方式下，重力变形对光学元件面形精度的影响不同。因此，考虑到光学元件自重的影响，对其支撑方式的研究具有重要意义[1]。

支撑方式主要有压圈法支撑、粘胶法支撑、运动学支撑及多点支撑等。在大多数传统的光学系统中，光学元件的面形要求不高，镜片主要是用刚性镜框来支撑，元件上方通过压圈压紧，但压紧光学元件的力会使元件产生应力双折射现象，使其支撑精度降低[2-3]。粘胶法支撑是通过粘胶剂将光学元件胶结在镜框中的一种支撑方法，可以简化结构并且应力分布较均匀，但胶粘接元件时引入的应力不可忽略，并且不能消除环境引起的应变带来的影响[4-7]。运动学支撑以理论最少的点接触来约束光学元件的运动，使元件具有期望的自由度，能够在不产生过约束的条件下同时具有良好的定位精度，即能够隔离外界载荷以及能有效减小由于温度变化所引起的热变形的优点[8]。多点支撑[9]形式多样，其中基于quasi-kinematic原理的柔性支撑结构[10-12]由于具有支撑刚度高、温度适应性强，结构简单等优点，广泛应用于透镜支撑结构中。武东城等[13]基于弹性力学中的薄板变形理论分析了三点支撑下的有限元模型，从薄板扩展到中厚板，分析了自重变形量大小与元件的材料、径厚比及形状的关系。赵磊等[14]提出了一种轴向多点柔性支撑，径向通过可调式螺杆来保证元件无偏移的支撑结构，分析了在所设计支撑结构的支撑下重力、热载荷及径向定位力影响下的元件面形变化。彭海峰等[15]在其基础上研究了整体式多点支撑结构的主要参数对自重作用下透镜面形的影响。华洋洋等[16]采用与镜框一体的三点主支撑和放置于镜框内的柔性辅助支撑实现共同支撑，研究了重力、热载荷对元件面形的影响。赵磊等[17]提出一种在轴向和径向都具有挠性的整体式多点柔性支撑结构，讨论了在该支撑结构下重力及热载荷作用对光学元件面形的影响。对于大口径光学元件，传统的压圈法支撑和粘胶法支撑由于温度适应性较差，难以满足高精度光学元件面形精度的要求。因此，愈来愈多的大口径透镜采用运动学支撑和多点支撑中的柔性支撑结构。文献[13-17]基于设计的柔性支撑结构，讨论了自重对透镜面形精度的影响，而在实际进行光学元件检测时，需多次重复装配，由于人为因素的存在，在实际操作过程中改变了光学元件的接触状态，导致支撑应力分布不均匀，因此，设计的透镜支撑结构应该具有一定消除人为装配误差的能力以提高面形检测的复现性。

基于光学元件检测过程中的高复现性需求，本文以设计的一种典型的整体式弹性支撑结构为基础，仿真分析了重力作用下支撑结构各参数对透镜面形精度的影响及存在随机误差力作用时各参数对元件面形的复现性影响，可以为高复现性面形检测支撑结构的设计提供参考。

1 透镜的支撑结构设计

1.1 整体式支撑结构模型

本文所用透镜为一块弯月形透镜，其形状及尺寸参数如图1所示，透镜直径 $\Phi=247.5$ mm，凸面曲率半径 $R_1=199.94$ mm，凹面曲率半径 $R_2=482.18$ mm，镜片中心厚度 $H_1=51$ mm。

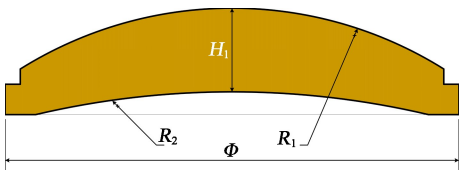
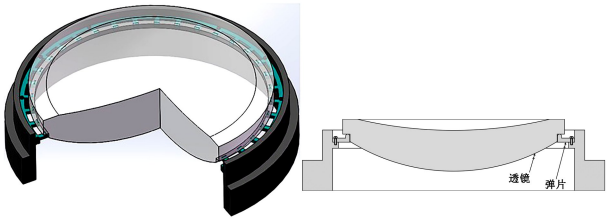


图1 弯月透镜外形示意图

如图2所示，透镜的支撑结构由弯月形透镜、镜框、整体式L形弹片、固定螺钉组成。柔性支撑片和镜框之间通过12个沿镜框内环均匀分布的螺钉实现连接，将弯月形透镜放置在整体式L形弹片上，由微分头实现调心和定位。由于弹片具有一定的轴向柔度，在支撑光学元件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，弯月形透镜的自身重力也能相对均匀地作用在各个L形弹片上，因而可放宽对L形弹片的加工精度要求[14]。同时，在温度变化时支撑结构能够提供径向自由，允许光学元件膨胀收缩而避免产生接触应力，保护了元件的面形。弯月形透镜的材料为熔石英，整体式L形弹片的材料为弹簧钢60Si2Mn，镜框材料为铝合金7050，具体的参数如表1所示。



(a)　正面 1/4 剖视图　　(b)　结构示意图

图 2　透镜支撑结构图

表 1　材料参数表

材料	杨氏模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
Fused silica	72.7	0.17	2 200
60Si2Mn	206	0.29	7 740
7050	72	0.33	2 830

1.2　支撑结构的设计参数

整体式 L 形弹片结构如图 3 所示，各弹片允许光学元件沿重力方向存在一定的变形量，变形量的大小由弹片的数量和各个尺寸参数共同决定。支撑点的数量越少，每个弹片的轴向位移越大，整体式 L 形弹片的轴向刚度越小，光学元件对温度变化的顺应性越好，放宽了弹片加工时的精度要求，但同时光学元件的面形会变差，并且支撑结构的固有频率会降低。相反，支撑点的数量越多，每个弹片的轴向位移越小，整体式 L 形弹片的轴向刚度越大，光学元件对温度变化的顺应性会变差，对弹片加工时的精度要求提高，但同时光学元件的变形会变小，并且支撑结构的固有频率会提高。在实际设计时，首要考虑的是光学元件的面形情况，为了保证透镜的面形，在满足支撑结构固有频率的前提下，考虑工艺与经济性等因素，合理平衡弹片的数量和弹片的各尺寸参数以保证弯月形透镜的自重能够相对均匀地作用在各个柔性支撑点上，柔性支撑点数量应尽可能多，以降低整体式 L 形弹片的轴向刚度，进而达到提高光学元件面形精度的目的。

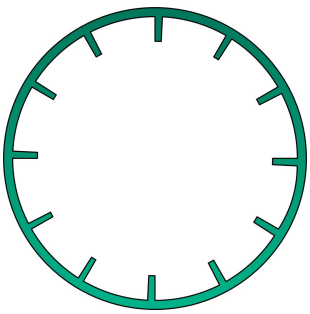


图 3　整体式 L 形弹片结构

根据柔性支撑点的变形需求建立了支撑点的物理模型，将 L 形弹片等效为集中载荷作用在自由端的悬臂梁模型，如图 4 所示，等效模型图如图 5 所示。整体式柔性支撑的主要尺寸参数包括 L 形弹片的径向长度 l，宽度 h，厚度 b，各参数对柔性支撑整体刚度的影响不同。

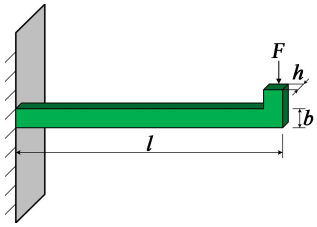


图 4　弹片等效悬臂梁模型

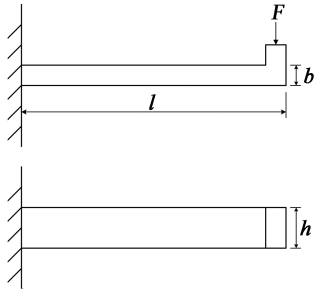


图 5　等效模型图

假设弯月形透镜的自重均匀地作用在各个 L 形弹片上，根据光学元件在重力方向的力学平衡条件，每个 L 形弹片的运动端受到的载荷为

$$F=\frac{G}{n} \tag{1}$$

式中，G 为光学元件的重力，n 为 L 形弹片的数量。

根据悬臂梁集中载荷作用在自由端的挠度计算式可知，自由端受力后的变形量为

$$\omega=\frac{Fl^3}{3EI} \tag{2}$$

式中，E 为整体式柔性支撑的杨氏模量，I 为截面的惯性矩。

L 形弹片的宽度沿着径向长度方向的变化量很小，在计算时可以近似认为截面是恒定的，进而根据矩形惯性矩的计算公式可以得到：

$$I=\frac{hb^3}{12} \tag{3}$$

根据式(1)～(3)，得到 L 形弹片自由端的变形量为

$$\omega=\frac{4Gl^3}{Ehb^3n} \tag{4}$$

由式(4)可知，L 形弹片自由端位移量 ω 与弹片数量成反比，与柔性支撑片的径向长度 l 和柔性支撑片的厚度 b 分别成三次方的正、反比关系，与柔性支撑

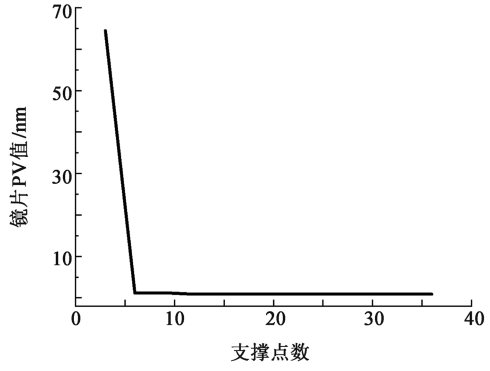
片的宽度 h 成反比。根据以上关系，得到一组优化前的参数：$l=4$ mm，$h=5$ mm，$b=3$ mm。

2 重力对透镜面形精度的影响

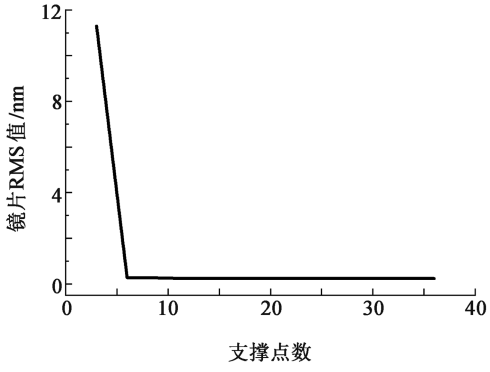
弯月形透镜的自重均匀地作用在各个柔性 L 形弹片上，同时柔性支撑会对光学元件产生反作用力，弯月形透镜在自重和柔性支撑结构的作用下面形发生变化进而影响光学检测结果。本文设计的支撑结构，在 ANSYS 中对光学元件进行自重作用下的面形精度仿真分析时，假设光学元件放置在整体式 L 形弹片上前的面形为无变形的理想面形，整个系统处于水平放置状态，所加载荷为光学元件自身的重力，约束条件为镜框底面固定约束，各柔性 L 形弹片顶端与弯月形透镜的下表面之间为接触约束，镜框与弹片及螺钉相互绑定。

2.1 弹片数量对透镜面形精度的影响

根据优化前的参数，各柔性支撑点距离弯月形透镜中心距离 t 为 118.75 mm 时，弹片数量与透镜面形的关系如图 6 所示。可以看出，在弯月形透镜及支撑结构各尺寸参数不变的情况下，随着弹片数量的增加，光学元件的面形逐渐变好，自重作用下的镜面变形量逐渐减小。



(a) 弹片数目与镜面 PV 值的关系



(b) 弹片数目与镜面 RMS 值的关系

图 6 弹片数量与透镜面形的关系

2.2 弹片各参数对透镜面形精度的影响

弹片数目为 36，改变弹片的各尺寸参数，分析各参数对弯月形透镜面形精度的影响。

在 L 形弹片径向长度 $l=4$ mm，宽度 $h=5$ mm，各柔性支撑点位置与弯月形透镜中心距离为 $t=118.75$ mm 的情况下，厚度 b 从 1 mm 变化至 5 mm，得到的柔性支撑片的厚度 b 与透镜面形的关系如图 7。随着厚度的增加，光学元件的 RMS 值从 0.27 nm 减小到 0.22 nm，可以看出，在其他条件不变的情况下，厚度的增加能够使透镜的面形变好。

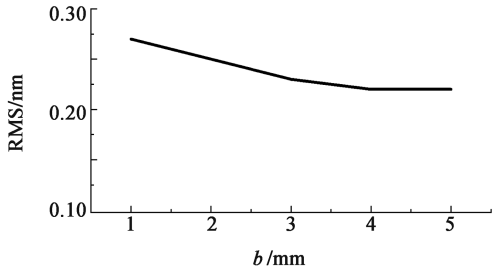


图 7 支撑片厚度与透镜面形的关系

$l=4$ mm，$b=3$ mm，$t=118.75$ mm，h 从 4.5 mm 变化至 7 mm，得到 h 与透镜面形的关系如图 8 所示；$b=3$ mm，$h=5$ mm，$t=118.75$ mm，l 从 3 mm 变化至 10 mm，得到 l 与透镜面形的关系如图 9 所示。可以看出，宽度和长度变化对光学元件面形影响不大。

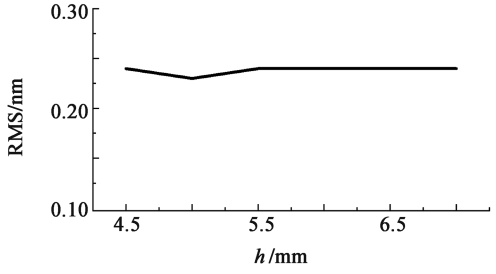


图 8 支撑片宽度与透镜面形的关系

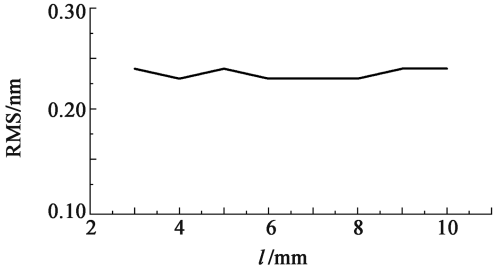


图 9 支撑片长度与透镜面形的关系

$l=4$ mm，$b=3$ mm，$h=5$ mm，受透镜外形限制，t 只能在 117.75～123.75 mm 之间，取 t 从 118.75 mm 变化至 122.75 mm，得到 t 与透镜面形

的关系如图 10 所示。随着距离增加，光学元件的 RMS 值从 0.22 nm 增大到了 0.31 nm，因此，距离的增加会使透镜的面形变差。

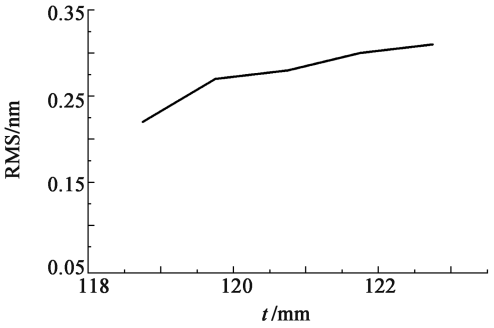


图 10　支撑点与透镜中心距离与透镜面形的关系

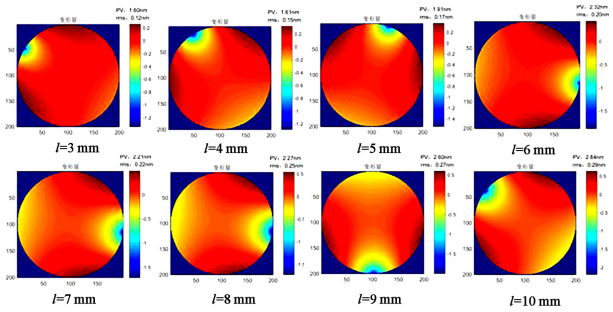
因此，在可行的条件下减小支撑点与透镜中心距离及增大弹片厚度可使透镜的面形变好。

3　透镜面形的复现性分析

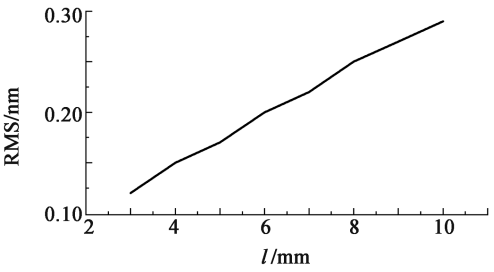
在实际检测时，人为因素会降低面形检测的复现性。因此，在仿真分析时，应加上随机误差力来模拟弹片的数量和弹片的各尺寸参数及材料的选择对复现精度的影响。复现性是指在改变了测量条件下，同一被测量的测量结果之间的一致性。本文将理想支撑和存在随机误差力支撑的面形仿真结果点对点相减来验证复现精度。

3.1　弹片数量和各尺寸参数对复现精度的影响

参数条件和变化范围与第 2 章中一致，另外在

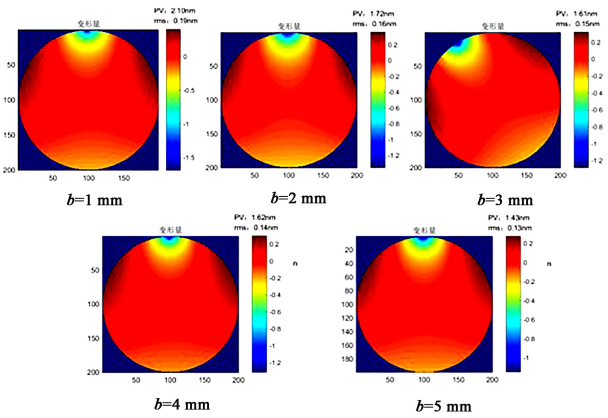


（a）　复现性仿真结果

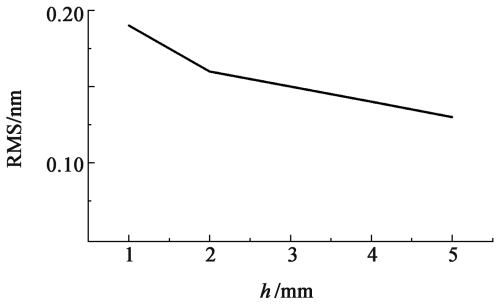


（b）　弹片长度与复现性的关系

图 11　弹片长度对复现精度的影响

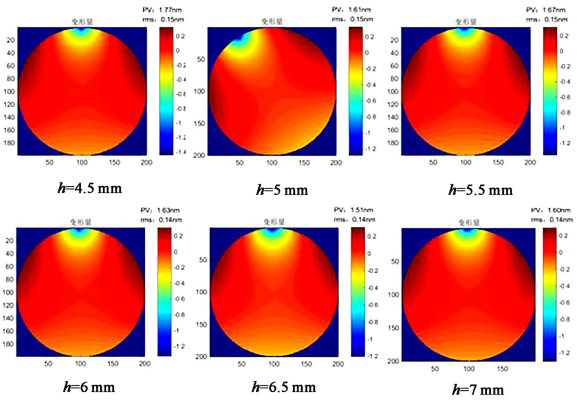


（a）　复现性仿真结果

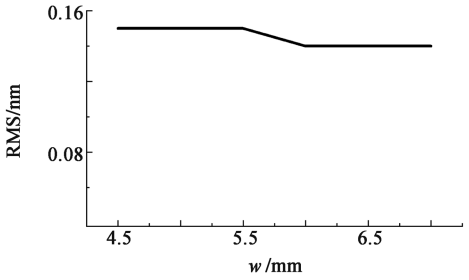


（b）　弹片厚度与复现性的关系

图 12　弹片厚度对复现精度的影响

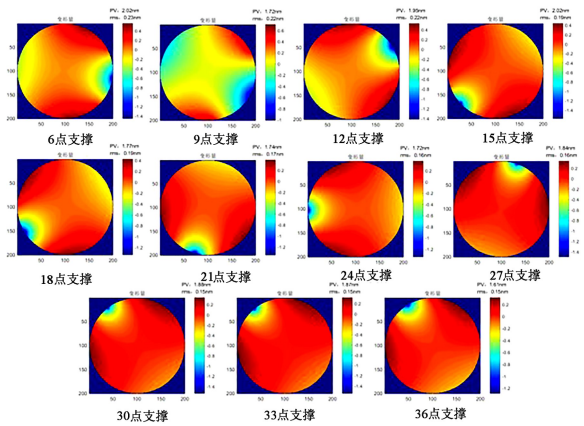


（a）　复现性仿真结果

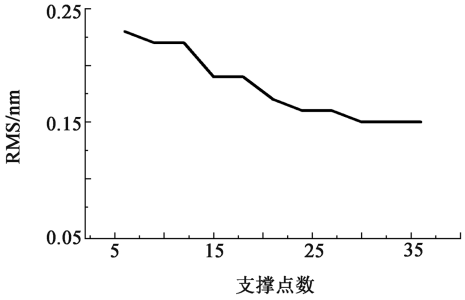


（b）　弹片宽度与复现性的关系

图 13　弹片宽度对复现精度的影响

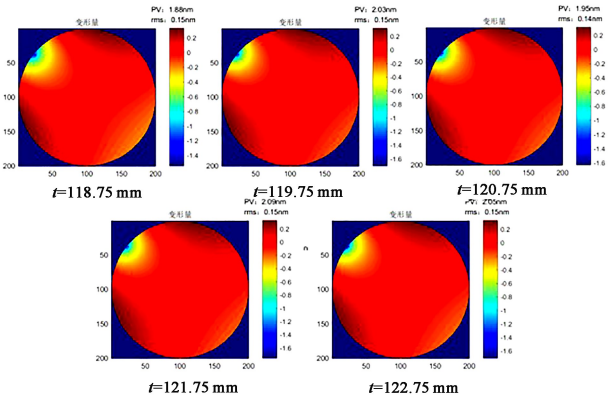


(a) 复现性仿真结果

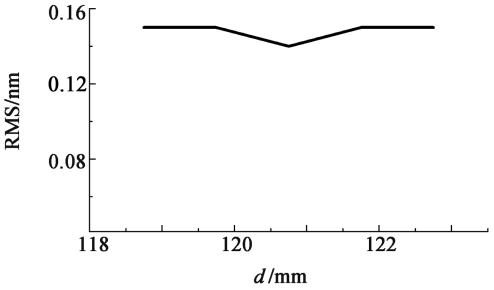


(b) 弹片数目与复现性的关系

图 14 弹片数目对复现精度的影响



(a) 复现性仿真结果



(b) 支撑距离透镜中心距离与复现性的关系

图 15 支撑距离透镜中心距离对复现精度的影响

单个柔性支撑点上施加 0.5 N 载荷，得到各参数对透镜复现精度的影响如图 11～15。随着弹片长度从 3 mm 增加到 10 mm，复现精度从 0.12 nm rms 降低至 0.29 nm rms；弹片厚度从 1 mm 增加到 5 mm，复现精度从 0.19 nm rms 提高至 0.13 nm rms；弹片宽度从 4.5 mm 增加到 7 mm，复现精度从 0.15 nm rms 提高至 0.14 nm rms；弹片数目从 6 增加到 36，复现精度从 0.23 nm rms 提高至 0.15 nm rms；柔性支撑点距离透镜中心的距离从 118.75 mm 增加到 122.75 mm，复现精度维持在 0.15 nm rms 左右。因此，可以通过缩短弹片的长度，增加弹片的厚度及弹片的数量来提高复现精度。

3.2 镜框和弹片材料对复现精度的影响

$l=5$ mm，$b=5$ mm，$h=5$ mm，$l=119$ mm，弹片数目 36。镜框的备选材料考虑了铝合金 7A09 和 7050，与透镜线膨胀系数相近的铟钢 4J32，不锈钢 303 和 304，参数如表 2，在同样仿真条件下的复现精度如表 3，镜框材料选择不锈钢的复现精度比铝合金高。

表 2 镜框备选材料参数表

材料	7A09	7 050	4J32	303	304
杨氏模量 E/GPa	71	72	150	197	194
泊松比	0.3	0.33	0.3	0.27	0.3
密度/(kg·m^{-3})	2 900	2 830	8 300	7 980	7 930

表 3 镜框备选材料复现精度

材料	7A09	7 050	4J32	303	304
复现精度 RMS 值/nm	0.11	0.11	0.08	0.07	0.07

根据以上结论镜框材料选择不锈钢 304，分析弹片材料对复现性的影响。备选材料考虑了 65Mn，60Si2Mn，50CrVA 三种弹簧钢，参数如表 4，各材料在同样仿真环境下的复现精度如表 5，三种材料复现精度基本相同。由于 65Mn 本身热过敏性及 60Si2Mn 本身材料性质的原因，在长时间工作后变形增大，会导致透镜的变形加大，因此，选择寿命更好的 50CrVA。

表 4 弹片备选材料参数表

材料	65Mn	60Si2Mn	50CrVA
杨氏模量 E/GPa	206	206	210
泊松比	0.3	0.29	0.25
密度/(kg·m^{-3})	7 850	7 740	7 850

表 5 弹片备选材料复现精度

材料	65Mn	60Si2Mn	50CrVA
复现精度 RMS 值/nm	0.07	0.07	0.07

根据对弹片的数量，弹片的各尺寸参数和镜框和弹片材料对复现性的影响分析，得到优化结果：

$l=10$ mm，$b=3$ mm，$h=5$ mm，$t=119$ mm，弹片数目 36，材料为 50CrVA 弹簧钢，镜框材料为 304 不锈钢（如表 6 所示），在以上情况下弹片与透镜面接触，线接触，点接触时的复现精度分别为 0.25，0.25，0.21 nm rms 如图 16 所示。

表 6　支撑结构材料表

结构组件	弯月形透镜	弹片	镜框
材料	Fused silica	50CrVA	304

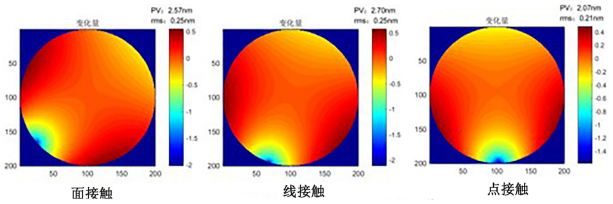


图 16　面、线、点接触时的复现精度

4　结论

本文设计了一种适用于大口径透镜的整体式柔性支撑结构，以直径为 247.5 mm，镜片中心厚为 51 mm 的弯月形透镜为例，分析了重力作用下弹片数量和各尺寸参数等对透镜面形精度及复现精度的影响。结果表明：弹片的数量增加，减小弹片自由端点与透镜中心的距离及增大弹片厚度可使透镜的变形变小；可以通过缩短 L 形弹片的径向长度，增加弹片的厚度及弹片的数量来提高复现精度。根据弹片数量和各尺寸参数及镜框和弹片材料与复现性的关系分析得到的优化参数下的复现精度为 0.21 nm rms，可以为高精度光学元件的支撑设计提供借鉴和参考。

参考文献：

[1]　丁　玲，王　涛，杨洪波，等. 高精度标准镜支撑结构的研究与设计[J]. 红外与激光工程，2014，43(4)：1172-1175.
Ding Ling，Wang Tao，Yang Hongbo，et al. Investigation and design for structure of high-precision reference mirror[J]. Infrared and Laser Engineering，2014，43(4)：1172-1175.

[2]　Sudoh Y. Correction member，retainer，exposure apparatus，and device fabrication method：US6909493[P]. 2003-03-14.

[3]　Watson D C，Novak T W. Kinematic lens mounting with distributed support and radial flexure：US6239924[P]. 2003-12-25.

[4]　李　福，阮　萍，赵葆常，等. 胶固紧平面反射镜的有限元分析[J]. 光学技术，2006，32(6)：896-899.
Li Fu，Ruan Ping，Zhao Baochang，et al. Finite element analysis of the plane mirror fastened by adhesive[J]. Optical Technique，2006，32(6)：896-899.

[5]　张　健，刘伟奇，王汝冬，等. 自重变形对超高精 Fizeau 干涉仪的光学性能影响[J]. 光学学报，2011，31(7)：112-116.
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)：112-116.

[6]　朱　岩，田　伟，方　斌，等. 高面形精度标准镜自重变形的补偿技术[J]. 长春理工大学学报，2016，39(4)：12-16.
Zhu Yan，Tian Wei，Fang Bin，et al. Compensation technique for gravity deformation of high precision standard mirror[J]. J. of Changchun University of Science and Technol.，2016，39(4)：12-16.

[7]　方　斌，田　伟，王汝冬，等. Φ300 mm 平面标准镜高精度支撑关键技术[J]. 激光与光电子学进展，2015，52(9)：273-279.
Fang Bin，Tian Wei，Wang Rudong，et al. Key technique in supporting of Φ300 mm aperture reference flat mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2015，52(9)：273-279.

[8]　王大志，何　凯，杜如虚. 精密机械运动学结构设计方法的若干新进展[J]. 机械设计与研究，2011，27(3)：1-4.
Wang Dazhi，He Kai，Du Ruxu. Recent progresses on the kinematic structural design method of the precision machines[J]. Machine Design and Research，2011，27(3)：1-4.

[9]　王云涛，陈　磊，陈　佳，等. 基于多点可调支撑 Φ300 m 平面重力变形校正研究[J]. 应用光学，2020，41(4)：801-809.
Wang Yuntao，Chen Lei，Chen Jia，et al. Distortion correction research by gravity for 300 mm-aperture flat based on multi-point adjustable support[J]. J. of Appl. Optics，2020，41(4)：801-809.

[10]　赵勇志，曹玉岩，韩西达，等. 大口径透镜柔性支撑结构设计与分析[J]. 长春理工大学学报，2018，41(5)：6-12.
Zhao Yongzhi，Cao Yuyan，Han Xida，et al. Design and mechanical analysis of the flexible mounting structure for the large aperture lens[J]. J. of Changchun University of Science and Technol.，2018，41(5)：6-12.

[11]　Yoder，Paul. Optical-Mechanical Systems Design[M]. Washington：CRC Press，2006.

[12]　马　磊，曹佃生，刘承志. 大口径透镜多点柔性支撑结构设计与分析[J]. 光电工程，2015，42(5)：88-94.
Ma Lei，Cao Diansheng，Liu Chengzhi. Design and analysis on multi-points flexible supporting structure of large-aperture lens[J]. Opto-Electronic Engineering，2015，42(5)：88-94.

[13]　武东城，高松涛，吴志会，等. 高精度光学平板在三点支撑下自重变形的研究[J]. 光学学报，2015，35(12)：149-157.
Wu Dongcheng，Gao Songtao，Wu Zhihui，et al. Gravity deformation of high-precision optical flat under three-point support[J]. Acta Optica Sinica，2015，35(12)：149-157.

[14]　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)：224-229.
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)：224-229.

（下转第 759 页）

[11] 安　冬，国凌明，邵　萌，等. 基于暗通道先验的自适应超像素去雾算法[J]. 控制与决策，2020，35(8)：1929-1934.
An D，Guo L M，Shao M，et al. An adaptive superpixel defogging algorithm based on dark channel prior[J]. Control and Decision，2020，35(8)：1929-1934.

[12] 陈　永，卢晨涛. 基于超像素分割和暗亮通道结合的单幅图像去雾[J]. 激光与光电子学进展，2020，57(16)：239-247.
Chen Y，Lu C T. Single image dehazing based on superpixel segmentation combined with dark-bright channels[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2020，57(16)：239-247.

[13] Tang X，Sun J，He K. Guided image filtering[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2013，35(6)：1397-1409.

[14] 徐　晶，刘　鹏，唐降龙. 大气光估计对单幅图像去雾复原的影响[J]. 智能计算机与应用，2012，2(3)：68-71.
Xu J，Liu P，Tang X L. Impact on single image haze removal caused by the estimation of atmospheric light[J]. Intelligent Computer and Applications，2012，2(3)：68-71.

[15] 张国权，李战明，李向伟，等. HSV 空间中彩色图像分割研究[J]. 计算机工程与应用，2010，46(26)：179-181.
Zhang Guoquan，Li Zhanming，Li Xiangwei，et al. Research on color image segmentation in HSV space[J]. Computer Engineering & Applications，2010，46(26)：179-181.

[16] Tarel J，Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]// IEEE Inter. Conf. on Computer Vision，2009：2201-2208.

[17] Berman D，Treibitz T，Avidan S. Non-local image dehazing[C]// IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition，2016：1674-1682.

[18] 刘海波，汤群芳，杨　杰. 去雾图像质量客观评价方法研究[J]. 量子电子学报，2016，33(1)：20-28.
Liu H B，Tang Q F，Yang J. Research of objective assessment method for defogged image quality[J]. Chinese J. of Quantum Electron.，2016，33(1)：20-28.

作者简介：

何柯辰(1996－)，男，遂宁人，硕士研究生，主要从事图像处理方面的研究；

刘　奇(1966－)，男，成都人，博士，教授，研究生导师，主要从事信号与信息处理、生物医学工程方面的研究。

(上接第 753 页)

[15] 彭海峰，巩　岩，赵　磊. 光刻投影物镜中柔性多弹片支撑方式的性能分析[J]. 光电工程，2013，40(2)：71-75.
Peng Haifeng，Gong Yan，Zhao Lei. Performance index analysis of the support of lithographic lens with multi flexural brackets[J]. Opto-Electronic Engineering，2013，40(2)：71-75.

[16] 华洋洋，巩　岩. 光刻物镜高精度挠性结构镜框设计及分析[J]. 光电工程，2013，40(7)：39-43.
Hua Yangyang，Gong Yan. Design and analysis for the high-precision lens flexible structure of lithography objective lens[J]. Opto-Electronic Engineering，2013，40(7)：39-43.

[17] 赵　磊，彭海峰，于新峰，等. 具有整体径向挠性的光学元件多点均匀支撑结构[J]. 光电工程，2015，42(10)：43-48.
Zhao Lei，Peng Haifeng，Yu Xinfeng. et al. Lens support structure of multi point equal supporting with wholly radical freedom[J]. Opto-Electronic Engineering，2015，42(10)：43-48.

作者简介：

刘　绚(1997－)，女，四川资阳人，硕士研究生，主要从事光学检测方面的研究；

贾　辛(1982－)，男，博士，副研究员，硕士生导师，主要从事亚纳米级面形检测方面的研究。

(上接第 746 页)

Song Zhenqing. The control system design of DMD high frame rate dynamic scene simulator[D]. Xi'an：Xidian University，2017.

[13] 刘　龙. 基于 DMD 的动态同步高帧频投影技术研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2020.
Liu Long. Research on dynamic synchronous high frame rate projection technology based on DMD[D]. Xi'an：Xidian University，2020.

[14] Texas Instruments. DLP® Discovery™ DLPC410 DMD Digital Controller[EB/OL]. (2020-02)[2021-04-20]. https://www.ti.com.cn/.

[15] Texas Instruments. DLP7000 DLP® 0.7 XGA 2x LVDS Type A DMD[EB/OL]. (2019-6)[2021-04-20]. https://www.ti.com.cn/.

[16] Xilinx. FIFO Generator v13.2 Product Guide[EB/OL]. (2017-10)[2021-04-20]. https:// china.xilinx.com/.

作者简介：

张　林(1997－)，男，江苏泰兴人，硕士研究生，主要研究方向为嵌入式数字系统设计；

胡丹峰(1978－)，男，安徽蚌埠人，硕士，副教授，主要研究方向为嵌入式系统应用和生物医学信号处理。