

# $\Phi$ 300 mm 平面标准镜高精度支撑关键技术

方斌 田伟 王汝冬 朱岩 张永凯 王飞

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, 超精密光学工程研究中心, 吉林 长春 130033

**摘要** 为保证大口径平面面形的高精度检测, 必须对大口径平面标准镜自身的精度进行严格控制。在考虑标准镜自身重力的作用下, 通过有限元方法仿真分析了不同粘胶位置以及不同镜框支撑方式下参考面面形的变化。根据分析结果, 设计了口径 300 mm 的平面标准镜支撑方式, 镜片采用 12 点粘胶与镜框固定, 镜框下表面采用旋转补偿的方式寻找最优支撑方案。对加工完成的  $\Phi$  300 mm 平面标准镜进行了集成装配, 装配结果显示支撑引入的参考面面形变化约为 1.294 nm [均方根(RMS)值], 与仿真分析结果吻合, 并且满足大口径平面检测的检测需求。

**关键词** 光学设计; 光学检测; 平面标准镜; 有限元法; 参考面面形

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.092203

## Key Technique in Supporting of $\Phi$ 300 mm Aperture Reference Flat Mirror

Fang Bin Tian Wei Wang Rudong Zhu Yan Zhang Yongkai Wang Fei

Engineering Research Center of Extreme Precision Optics, State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** In order to ensure the high measuring precision of large-aperture flat mirror, the accuracy of the large-aperture reference flat mirror must be controlled strictly. The influence of different distribution of adhered spots and different support schemes on the shapes of reference flat mirror are analyzed by means of finite element method (FEM) under gravitational conditions. A kind of support pattern of 300 mm aperture reference flat mirror is designed. The mirror is supported by 12 adhered spots, and the best supporting method of mirror frame by rotation compensation is researched. The  $\Phi$  300 mm reference flat mirror is assembled according to the analysis above. The assembly results indicate that the change of optical surface due to supporting is nearly 1.294 nm of root mean square (RMS), which coincides with the analysis and satisfies the requirement of shape precision of the large aperture reference flat mirror.

**Key words** optical design; optical test; reference flat mirror; finite element method; shape of reference surface

**OCIS codes** 220.4840; 230.4040; 240.6700

## 1 引言

随着微电子加工制造业的发展, 核心器件的刻线分辨率已经由纳米级向亚纳米级逼近, 刻线的分辨率主要取决于光刻物镜的光学性能。要实现如此高的光刻分辨率, 光刻投影物镜的光学元件面形精度要达到纳米量级<sup>[1]</sup>。这些高精度的面形一般是通过菲索干涉仪进行检测的, 作为菲索干涉仪面形检测的基准, 标准镜的精度直接决定了检测的精度<sup>[2]</sup>, 为了检测光刻投影物镜中一些大口径的平面, 大口径平面标准镜是必不可少的。

大口径平面标准镜的面形精度不仅取决于标准镜本身的加工精度, 还需要镜片的高精度支撑技术。对于高精度的大口径平面标准镜而言, 由于其本身质量较大, 在重力作用下不同的支撑固定方式会对标准镜的参考面面形造成很大影响<sup>[3]</sup>。为此, 对在重力作用下的大口径立式平面标准镜进行不同支撑方式下参考面面形的变化研究, 对于高精度的平面标准镜研制具有重要的指导意义。

收稿日期: 2015-04-13; 收到修改稿日期: 2015-05-15; 网络出版日期: 2015-08-13

基金项目: 国家科技重大专项-02 专项基金(2009ZX02205)

作者简介: 方斌(1990—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事光学仪器结构设计与分析方面的研究。

E-mail: hitfangbin@163.com

目前,国内外很多科研人员已经对不同形状及口径、不同支撑装卡方式和不同工况下的镜片面形变化进行了研究<sup>[3-11]</sup>。文献[3-4]采用有限元方法对设计的标准镜头在不同支撑方式下的重力变形以及温度变形进行了仿真分析和对比研究;文献[6]从系统级的光学性能出发,仿真分析了重力作用对整个标准镜系统的透射波前的影响;文献[7]对口径为300 mm的平面标准镜的稳定性进行了分析,并分析了它对测量精度的影响;文献[8-9]研究了温度变化对不同支撑方式下的镜片面形的影响,并对仿真结果进行了比较。

文献[3]对镜片在侧面和底面支撑下的面形变化进行了对比分析,得出了侧面支撑参考面变形量更小的结论,而文献[4]在此基础上,分析了在侧面粘胶支撑技术中,胶点数目、胶层大小等因素对参考面面形的影响,但是并没有分析胶层分布位置的变化对参考面面形的影响,此外,文献[3-4]虽然分析了支撑方式对参考面面形的影响并总结了规律,但是仅停留在仿真分析层面,并没有进行实验验证。

为了实现300 mm口径平面标准镜的高精度支撑,本文在总结前人研究经验的基础上,主要针对胶层分布位置变化以及镜框的支撑方式对参考面面形的影响进行了研究,并进行了实验验证。

## 2 大口径平面标准镜光机结构设计

整个标准镜由光学镜片、内框、外框以及三个安装球头组成,如图1所示。

常用的高精度镜片支撑方式主要有压圈法和粘胶法两种<sup>[12]</sup>,其中压圈法结构简单,但它由于受到压圈平面度加工的限制,使得支撑精度较低;另一方面由于压圈与镜片之间较容易出现应力集中,使得耐冲击能力较差;此外,由于压圈与镜片之间的热膨胀系数差异较大,所以其易受温度变化的影响。而粘胶法由于胶层具有较小的模量和较大的延伸率,不会对镜片造成太大应力<sup>[9]</sup>,耐冲击和温度变化性能较强。因此,为实现标准镜参考面的高精度支撑,这里选择了胶粘法对镜片进行支撑。

整个系统分为内外两层结构,内层由内框和光学镜片组成,内框侧面有12个注胶孔,通过侧面12点胶结的方式把标准镜镜片和镜框粘结起来,如图2所示。

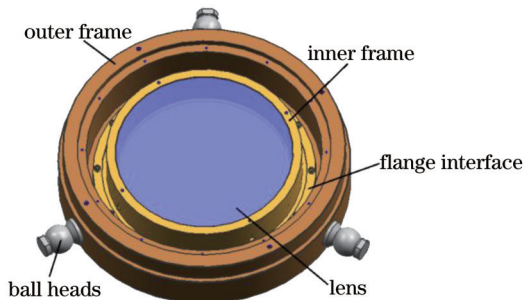


图1 平面标准镜光机结构

Fig.1 Opto-mechanical structure of reference flat mirror

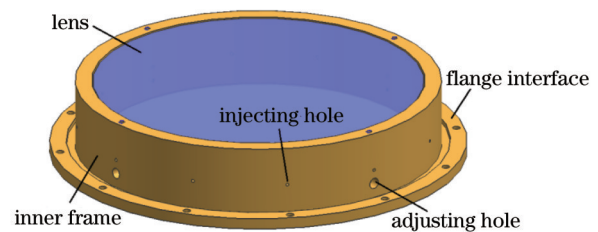


图2 标准镜镜片和内框粘结示意图

Fig.2 Sketch of bonded mirror and frame

胶结透镜后的镜框通过接口法兰的下表面与外框接口法兰的上表面接触,并通过12个螺钉固定。为了保证平面标准镜在使用过程中的面形精度,标准镜镜片和镜框之间采用低应力的室温硫化型硅橡胶(RTV硅胶),对于光学镜片来说,综合考虑光学材料的机械性能和环境适应性,选择进口熔石英作为标准镜的光学玻璃材料,对于镜框来说,为防止材料残余内应力导致的镜片变形,选择固溶处理后的铝合金材料。材料参数如表1所示。

表1 材料参数表

Table 1 Material parameters

Material	Density /( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Elasticity modulus /GPa	Poisson ratio
Silica	$2.201 \times 10^3$	72.7	0.16
RTV glue	$1.1 \times 10^3$	20	0.49
Aluminum Alloy	$2.7 \times 10^3$	70.6	0.33

## 3 高精度支撑技术中关键参数分析

### 3.1 粘胶位置对参考面面形的影响

为了研究粘胶位置沿光轴方向上下变化对镜片面形变化产生的影响,利用UG Nastran对不同粘胶位置

的镜片进行建模以及有限元仿真,如图3所示,为了保证网格的回转对称性,网格划分采用了3D扫略网格划分,整个模型共划分为119937个节点,96988个六面体单元。对胶层的外表面添加固定约束,胶层内表面添加与镜片外圆之间的面对面粘约束,对整个结构施加重力场。通过Nastran计算重力作用下的上下表面变形,得到上下表面的节点信息。

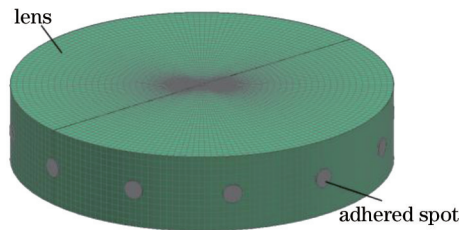


图3 标准镜有限元模型

Fig.3 Finite element model of reference flat mirror

Nastran有限元分析所得镜片上下表面的节点信息不仅包含了光学表面的面形变化,也包含了镜片整体的刚体位移等变化,而且其位移方向(重力方向)与面形的变化方向(球面法向)不同,因此有限元分析的结果需要进行数据处理。

由于Zernike多项式中的各项与光学设计中的Seidel像差中的各项存在对应关系,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,能够独立反映面形变化中各类像差的大小,因此得到了广泛的应用,其表达式为<sup>[13]</sup>

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

式中  $P_{nm}(\rho) = \sum_{j=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^j (n-j)!}{j! (\frac{n+m}{2} - j)! (\frac{n-m}{2} - j)!} \rho^{n-2j}$ ,  $m \leq n$ ,  $n$  为径向级次,  $m$  为方位角频率,  $\rho$  为归一化半径。对仿

真分析的数据进行Zernike拟合,拟合的过程采用标准Zernike多项式对面形进行拟合,阶数为  $n=m=12$ ,总项数为91项。最后,将拟合出的Zernike系数导入到Metropro软件中,对仿真结果进行分析。

假设镜片的几何中心面为零位,下面对12个胶点中心所处平面分别位于零位中心面偏上2、4、6 mm,以及零位中心面偏下2、4、6 mm时,镜片参考面的自重变形进行了分析,如图4所示。

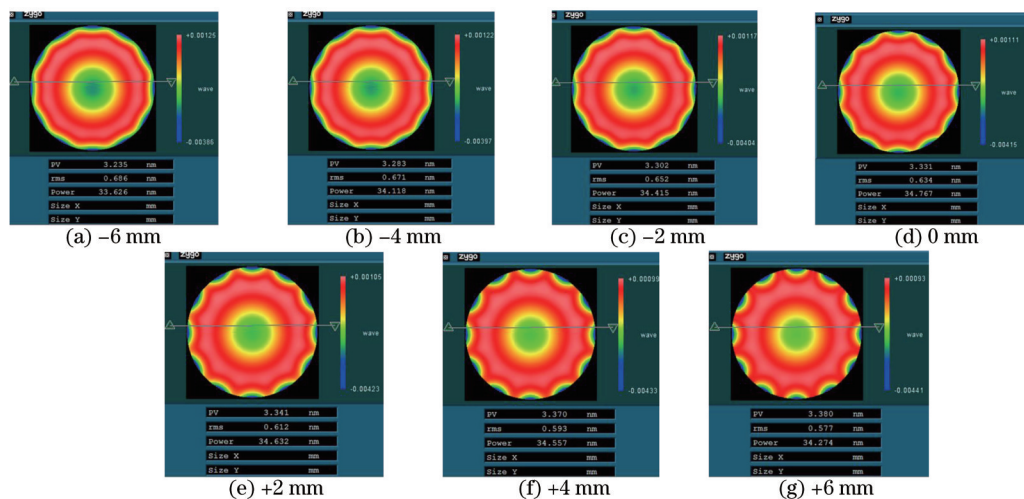


图4 胶点位置不同对参考面面形的影响

Fig.4 Influence of different distribution of adhered spots on reference surface shapes

对参考面面形数据进行分析,如图5所示。由数据分析可知,粘胶位置(12个胶点中心所处平面)距离参考面越远,对参考面引入的面形变化峰谷(PV)值越小,因此注胶点应该越往下越好。但是与此同时可以看到,当胶点位置沿光轴方向上下变化,由镜片中心偏上6 mm到偏心下6 mm时,参考面的Power值变化较大,均方根(RMS)误差约为1.1 nm,而去除Power项之后,镜片面形RMS值变化仅0.1 nm。

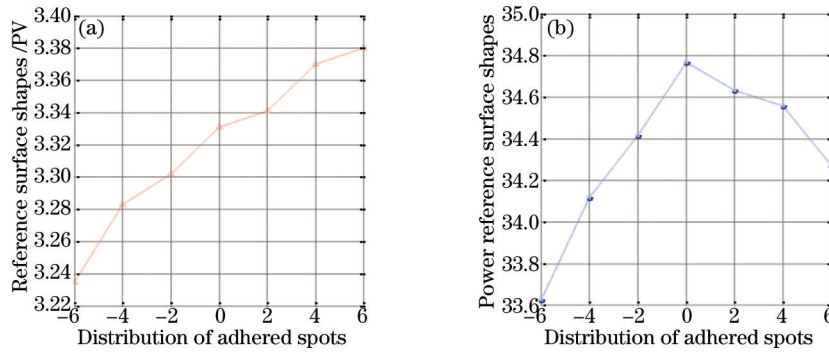


图5 参考面面形数据分析。(a) 参考面面形; (b) 参考面 Power 项

Fig.5 Analysis of data of reference surface shapes. (a) Reference surface shape; (b) power of reference surface

在实际使用中,由于粘胶位置变化引入的参考面面形变化多为 Power 项,可以通过绝对检测技术<sup>[3]</sup>,标定参考面的 Power 值,作为系统误差补偿掉。因此,可以认为胶点位置沿光轴方向上下移动对参考面面形影响很小,可以忽略。

### 3.2 镜框的支撑方式对透镜面形的影响

对于 300 mm 平面标准镜而言,镜片通过 12 点粘胶固定在内框上,而内框通过下表面与外框的法兰接口固定,由于镜片和内框的自重较大,加上内框下表面和外框法兰接触面加工存在误差,不是理想的平面与平面接触,对于高精度(纳米级)的透镜,镜框的变形会传递到透镜上,从而影响透镜的面形精度<sup>[4]</sup>,因此对镜框的支撑方式进行了研究。在 12 点粘胶,胶层位于镜片中心分布的情况下,分别分析了内框底面均匀支撑、底面 3 点支撑、底面 6 点支撑时镜片的面形变化。

首先,对镜框、胶层以及镜片建立了如图 6 所示的有限元模型并进行了网格划分。

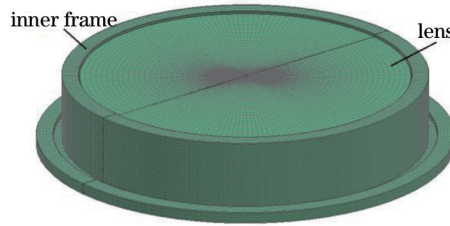


图6 镜框、胶层、镜片的有限元模型

Fig.6 Finite element model of lens frame, mirror and adhere spots

通过将有限元仿真数据进行数据处理和 Zernike 拟合之后,将参考面面形信息导入 Metropro 软件中,进行数据分析,图 7 给出了对镜框底面进行不同方式支撑下的参考面面形的分布情况。

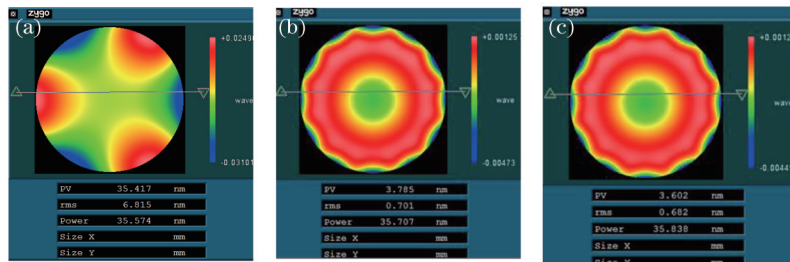


图7 内镜框处于不同支撑状态下镜片参考面面形。(a) 底面 3 点支撑; (b) 底面 6 点支撑; (c) 底面均匀支撑

Fig.7 Reference surface shape with inner lens frame under support schemes. (a) Supported by 3 points; (b) supported by 6 points; (c) supported by surface

从图 7 中可以得出,镜框支撑方式的不同对标准镜变形的均匀性影响比较大,支撑点越多参考面变形越小。表 2 详细地列出了上述 3 种镜框支撑方式下,参考面的面形的峰谷(PV)值、RMS 值的大小(去除 Power 值)。计算分析的结果表明,镜框的不同支撑方式下参考面的面形变化较大,采用 6 点以上的支撑以及均匀支撑可以明显地减小参考面的面形变化。

表2 镜框不同支撑方式下参考面面形

Table 2 Reference surface shapes of reference mirror with lens frame under different support schemes

Support schemes	PV /nm	RMS /nm
Supported by 3 points	35.417	6.815
Supported by 6 points	3.785	0.701
Supported by surface	3.602	0.682

在实际设计中,虽然会对内框底面和外框上表面的平面度进行控制,但是实际加工后两个表面仍然不会是两个理想的平面,因此当两者进行安装接触时,接触形式应该介于3点支撑(因为3点确定一个平面)和均匀支撑之间,也就是说镜片的面形精度应该在0.682~6.815 nm(RMS)之间,为了使标准镜的参考面面形尽量小,应该使内框底面的支撑点尽量多。这里根据实际可操作性,考虑安装时旋转内框和外框之间的角度,通过旋转补偿的方式,寻找内框下表面与外框上表面的最佳支撑方案,使得参考面面形最小。

#### 4 集成装配实验

根据前面的理论分析和仿真计算,对300 mm平面标准镜进行了集成装配,主要过程为:

1)为了监测支撑方式对标准镜参考面面形引入的变化,在集成装配前,采用基于运动学支撑的单镜支撑技术<sup>[10-11]</sup>对标准镜镜片的绝对面形进行检测,检测结果如图8所示,集成装配前参考面面形为9.808 nm(RMS)。

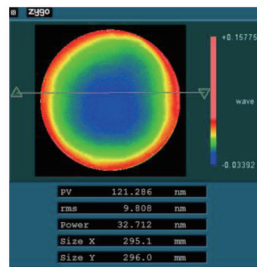


图8 集成装配前参考面面形

Fig.8 Reference surface shapes of reference mirror before assembling

2)对内框和镜片进行12点均匀胶粘固定,待胶层固化后,再将内框与外框进行固定,对于内框和外框来说,利用Zeiss的三坐标对两个接触面的平面度进行检测,检测方式为对接触平面取内外两圈(每圈8个点)打点检测,检测结果如图9和图10所示。

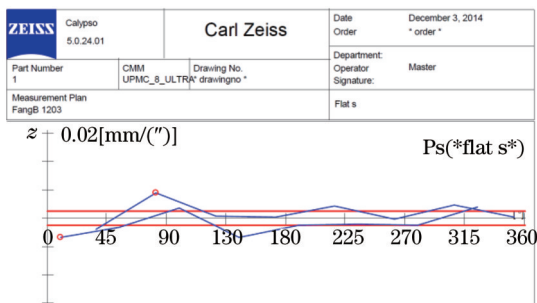


图9 内框接触面平面度

Fig.9 Flatness of contact surface of inner lens frame

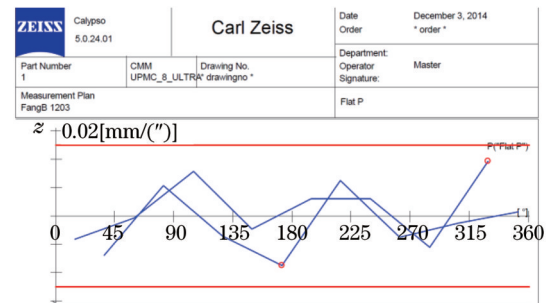


图10 外框接触面平面度

Fig.10 Flatness of contact surface of outer lens frame

内框接触面总体的平面度为32  $\mu\text{m}$ ,加工表面存在较大马鞍形变化。马鞍形的高点之一位于检测点的90°附近。

外框接触面总体平面度为7.331  $\mu\text{m}$ ,加工表面也存在马鞍形变化,高点也位于检测点的90°附近。

由前面的分析可知,当内框和外框接触面直接按照当前角度进行安装时,由于两者的平面度不同(PV值不同),高低点之间不能互补,导致内框下表面出现不均匀的多点支撑,该支撑方式对镜片来说不一定是最佳的,可能会引入较大的面形变化,因此下面按照接触面旋转不同角度安装时,对参考面的面形进行了检测,检测光路如图11所示。



图 11 参考面面形检测光路

Fig.11 Optical path for the detection of reference surface shapes

当内框接触面与外框接触面按照不同角度安装时,测量其面形如图 12 所示。

通过对数据进行分析可知,当内框与外框之间相对旋转 $45^\circ$ 时,集成装配后的参考面的面形最小,约为 $9.883\text{ nm(RMS)}$ 。

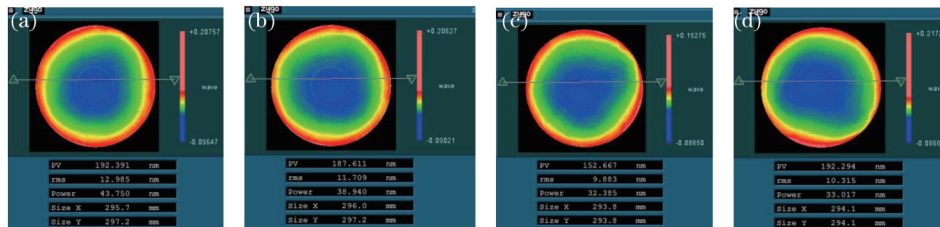
图 12 内框和外框按照不同角度安装时参考面面形。(a) 直接对应安装;(b) 旋转 $10^\circ$ 安装;(c) 旋转 $45^\circ$ 安装;(d) 旋转 $90^\circ$ 安装

Fig.12 Reference surface shapes under different installation angles of inner frame and outer frame. (a) Install directly;

(b) install after  $10^\circ$  rotation; (c) install after  $45^\circ$  rotation; (d) install after  $90^\circ$  rotation

为了监测支撑对参考面面形造成的影响,利用 Metropro 软件,将集成装配后的最终面形与集成装配前参考面的面形进行点对点相减,结果如图 13 所示,支撑对参考面引入的面形变化为 $1.294\text{ nm(RMS)}$ ,介于 $0.682\sim 6.815\text{ nm(RMS)}$ 之间,而且与均匀支撑引入的面形变化 $0.682\text{ nm(RMS)}$ 较为接近,与仿真分析数据吻合度较好。

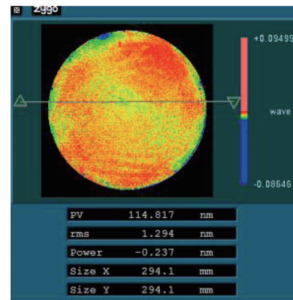


图 13 支撑对参考面面形的影响

Fig.13 Influence of different support schemes on reference surface shape

## 5 结 论

本文从工程实际出发,研究了 $300\text{ mm}$ 口径平面标准镜在高精度支撑技术中的关键参数,通过建立大口径光学元件胶结紧固系统的有限元模型,分析了不同粘胶位置、不同支撑方式等关键参数对参考面面形的影响。按照分析结果对 $\Phi 300\text{ mm}$ 平面标准具进行了集成装配,装配结果为支撑对参考面引入的面形变化约为 $1.294\text{ nm(RMS)}$ ,与仿真分析数据吻合,且满足了大口径平面标准镜面形精度的要求。

## 参 考 文 献

- 1 Miao Erlong, Zhang Jian, Gu Yongqiang, *et al.*. Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 1235-1240.

苗二龙,张 健,谷勇强,等.用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J].中国激光,2010,37(8): 1235-1240.

- 2 Xue Donglin. Manufacture and application of large aperture standard transmission spheres[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0616001.  
薛栋林. 大口径标准球面镜组研制与应用[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0616001.
- 3 Wu Xuhua, Chen Lei, Wang Lei. Design and test of reference mirror in  $\Phi$  300 mm interferometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1235-1240.  
武旭华, 陈磊, 王磊.  $\Phi$  300 mm干涉仪参考镜的设计及测试[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1235-1240.
- 4 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(3): 1172-1175.  
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(3): 1172-1175.
- 5 Shao Ping, Xia Lan, Qiao Zhanfeng, *et al.*. All-metal fixture scheme design for large aperture optical element[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 112302.  
邵平, 夏兰, 乔战峰, 等. 大口径平面光学元件的全金属装夹方案设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 112302.
- 6 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.
- 7 T Takatsuji, S Osawa, Y Kuriyama, *et al.*. Stability of the reference flat used in Fizeau interferometer and its contribution to measurement uncertainty[C]. SPIE, 2003, 5190: 431-439.
- 8 Xu Rongwei, Liu Liren, Liu Hongzhan, *et al.*. Support schemes and thermal deformation analysis of large aperture interferometer mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 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, 2005, 25(6): 809-815.
- 9 Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, *et al.*. Effect of temperature change on the surface accuracy of bonded lens[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0808002.  
王汝冬, 田伟, 王平, 等. 温度变化对胶粘结透镜面形精度的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0808002.
- 10 Tian Wei, Wang Pin, Wang Rudong, *et al.*. Simulation and experimental research of 193 nm projection lithography lens supporting[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0816002.  
田伟, 王平, 王汝冬, 等. 193 nm 光刻投影物镜单镜支撑仿真分析及实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0816002.
- 11 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.
- 12 Paul R Yoder. Opto-Mechanical Systems Design[M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang, Transl. 3<sup>rd</sup> edition. Beijing: China Machine Press, 2008.  
约德. 光机系统设计[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- 13 Robert R Shannon, James C Wyant. Applied Optics and Optical Engineering[M]. Revertport: Academic Press, 1992.

栏目编辑: 何卓铭