

小磨头自适应抛光抑制高精度非球面中频误差

张 健¹ 代 雷¹ 王 飞¹ 王立朋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)

摘要 研究了高精度非球面中频误差的抑制方法和磨头抑制特性等问题,提出了一种小磨头自适应抛光抑制中频误差的方法。将铣磨后中频误差明显的非球面进行预抛光,以去除亚表面损伤。使用气囊抛光方法将非球面面形精抛到较高精度。使用自研的双柔性自适应抛光磨头进行多轮抛光抑制精抛后非球面表面残留的中频误差,并使用计算全息(CGH)进行面形检测,直到 Zernike 残差不再收敛。使用此方法成功抛光了一块口径为 150 mm、最大偏离度为 0.183 mm 的熔石英非球面。通过 3 轮中频误差抑制,面形方均根值(RMS)从预抛光后的 76 nm 收敛至 4.5 nm;相应地,Zernike 残差 RMS 由精抛后的 22.72 nm 收敛至 3.46 nm。实验结果表明,该方法可以实现非球面中频误差的快速有效抑制。

关键词 光学制造;中频误差抑制;小磨头自适应抛光;Zernike 残差;非球面

中图分类号 TQ171.684 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0822002

Restraint of Mid-Spatial-Frequency Error Aspheric Surface by Small-Tool Adaptive Polishing

Zhang Jian¹ Dai Lei¹ Wang Fei¹ Wang Lipeng¹

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

Abstract A method is proposed to restrain mid-spatial-frequency errors (MSFE) by iterative small tool polishing, which is based on the research of restraint methods of MSFE, as well as the characteristics of polishing tools for high-accuracy aspheres. An asphere with obvious MSFE after fine grinding is prepared for pre-polishing in order to remove sub-surface damage as well as to control the figure accuracy. Then the aspheric surface is corrected to higher accuracy by bonnet polishing method, which is followed by the restraint of MSFE in the surface using self-made dual-flexible adaptive polishing tool. The restraint of MSFE is not finished until Zernike residual does not converge through CGH testing. An asphere with a diameter of 150 mm and a maximum departure of 0.344 mm from best fit sphere are successfully polished through 3 runs. The form is improved to achieves 4.5 nm RMS from 76 nm RMS and Zernike residual converged from 22.72 nm RMS to 3.46 nm RMS. Results show that the proposed method is useful to realize fast and valid restraint of MSFE for aspheres.

Key words optical fabrication; restraint of mid-spatial-frequency error; adaptive polishing by small tools; Zernike residual; asphere

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 220.1250

1 引 言

随着先进光学制造水平的不断提升,非球面的使用逐渐得到了越来越广泛的应用,特别是以 193 nm (ArF)投影光刻物镜曝光系统为代表的超高精密、超复杂光学系统。为了实现大数值孔径、高像质、高分

辨率、低畸变等性能指标,非球面元件的大量使用已经成为国内外光刻技术发展的主要趋势^[1-6]。光学表面成形技术(CCOS)作为目前实现高精度光学元件加工的主要方法,通过材料去除函数来实现确定性加工,可获得较高的面形收敛率和面形精度,已经

收稿日期: 2013-01-14; 收到修改稿日期: 2013-03-07

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 张 健(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事先进光学制造技术方面的研究。

E-mail: jzhang@sklao.ac.cn

证明了这种方法的有效性^[7-10]。但是,这种方法的特点从根本上决定了它很难修正尺寸小于磨头的中频误差(MSFE),限制了其抑制中频误差的能力^[11]。

从空间频率划分角度讲,光学元件表面面形信息通常被划分为低频、中频和高频三个频段,划分区间和具体应用相关。其中低频面形误差与传统的像差相关,影响点扩散函数的艾里斑大小;中频和低频误差则分别会产生小角度散射和大角度散射,影响能量的传递^[12-13]。因此,能否有效抑制中高频误差,特别是非球面光学元件的中高频误差,对于提高光学系统的性能至关重要。国内外相关研究表明,中高频误差主要是来自于磨头在铣磨和抛光过程中在工件表面产生的一种轨迹误差^[14-15]。Martin等^[16]提出了使用应力盘抛光技术抑制中频误差的方法,并于2004年成功将一块8.4 m, F 数为1.25的大双筒望远镜(LBT)主镜加工至面形精度均方根值(RMS)为18 nm($\lambda = 632.8$ nm)。德国Zeiss公司^[17]综合采用CCOS、离子束精修(IBF)和碳流变抛光(MRF)加工技术来控制光学元件的加工精度,最终中频误差RMS达到0.1 nm。中国科学院光电技术研究所的伍凡等^[15,18-19]对中高频误差的形成机理进行了深入研究,并使用能动磨盘(CCAL)抛光方法抑制非球面主镜中高频误差。戴一帆等^[20-21]分别采用基于熵增理论设计的局部随机加工路径方法和随机路径间距的方法有效抑制了修正抛光中产生的中高频误差,并在一块口径为100 mm的平面镜上进行了实验验证。

但是,由于MRF、IBF成本昂贵、去除率低,一般应用于纳米级精度的提升;CCAL需要外加变力矩产生高次曲面变形匹配非球面,磨盘制作复杂且口径较大,因此通常适用于非球面主镜的加工。为充分发挥小磨头CCOS的特点,提出使用小磨头自适应抛光方法抑制非球面中频误差,在充分发挥气囊抛光高效的面形修正能力的同时^[9],采用自制的双柔性自适应磨头抑制中频误差,最终成功实现了中频误差的有效抑制。

2 磨头设计

2.1 设计原理

由于非球面各点的曲率半径都不相同,因此传统的球面抛光盘无法与其完全匹配,不适合修正非球面中高频误差。因此,如何设计一个能够在数控抛光设备上使用的与非球面表面各点实时紧密接触的抛光磨头,是有效抑制非球面中高频误差的关键因素。通常情况下,磨头按照其软硬程度可以大致分为刚性、柔性和半柔性,如图1所示。刚性磨头的主要特点是只能去除面形误差中的高点;柔性磨头的主要特点是能够同时去除高点和低点;而半柔性磨头兼具刚性和柔性磨头的特点,能够修正尺度比较小的中频误差,满足设计需求。因此,如何优化磨头材料的泊松比、杨氏模量和厚度等参数,在刚性和柔性间进行平衡,是设计抛光磨头的难点。根据薄板理论,由弹性力学理论推导得到磨头在一维空间压力分布为^[22]

$$\begin{cases} p = q_0 + \sum_{\xi} \frac{1}{\frac{1}{D(2\pi\xi)^4} + \frac{1}{D_s(2\pi\xi)^2} + \frac{1}{K_c}} S(\xi) = q_0 + \sum_{\xi} \eta S(\xi), \\ D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \\ D_s = \frac{Eh}{2(1+\nu)}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 p 为抛光压力, q_0 为实际产生的压力大小, D 为抗弯刚度, D_s 为横向剪切刚度, K_c 为抛光层的耐压刚度, ξ 为要抑制的空间频率, η 为抛光压力因子, $S(\xi)$ 为空间频率 ξ 对应的表面面形误差峰谷(PV)值, E 为薄板的杨氏模量, ν 为薄板的泊松比, h 为薄板厚度。

在抑制空间频率 ξ 的过程中,希望薄板的弯曲变形起主要作用,因此当 $D(2\pi\xi)^4 = D_s(2\pi\xi)^2$,可获得薄板弯曲变形与横向剪切变形相等时的临界厚度

$$h = \frac{1}{2\pi\xi} \sqrt{6(1-\nu)}. \quad (2)$$

当薄板厚度小于临界厚度时,薄板变形以弯曲变形为主;反之,以横向剪切变形为主。根据(2)式计算可以得到薄板厚度与空间频率的关系,如图2所示。由图2可知,薄板的临界厚度与空间频率成反比,空间频率越高,所需的薄板厚度越薄。假设薄板为铝合金金属材料,中低频误差空间频率分界为 0.1 mm^{-1} ,可以计算得到薄板的临界厚度为

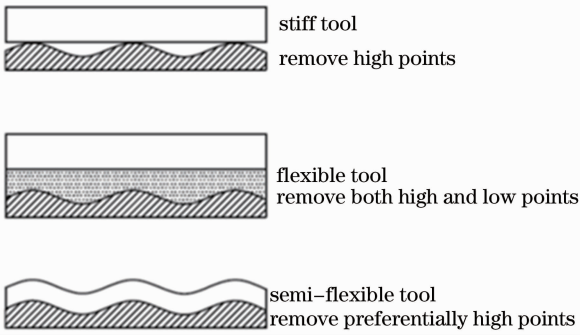


图1 磨头特性示意图

Fig. 1 Schematic diagram of different tools characteristics

3.18 mm。当薄板厚度分别为 0.1、0.5、1、3 mm 时,根据(1)式计算可以得到空间频率与抛光压力因子 η 变化的关系,如图 3 所示。由图 3 可知,磨头具有高滤波特性,即面形误差中的高频分量会被优先抑制。此外,临界空间频率 ξ 随着薄板厚度增大向左平移说明薄板厚度与空间频率范围成正比。但考虑到非球面抛光时,磨头需要实现弯曲变形与非球面表面形状进行匹配,因此薄板应小于临界厚度。

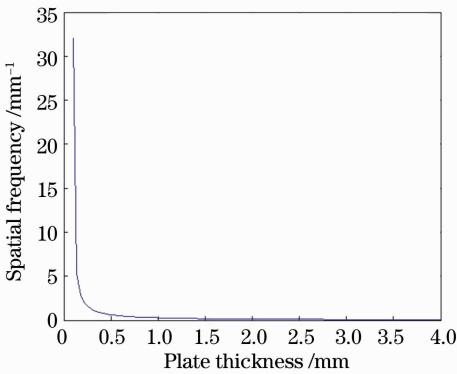


图2 薄板厚度与空间频率的关系

Fig. 2 Relationship between plate thickness and spatial frequency

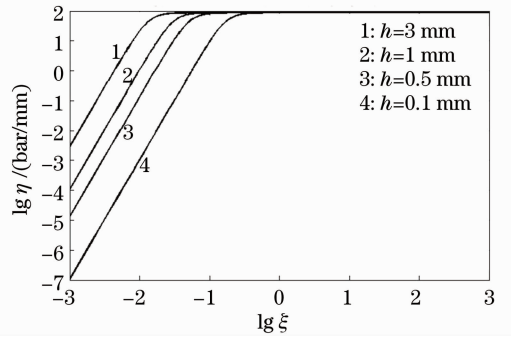


图3 抛光压力与空间频率的关系

Fig. 3 Relationship between polishing pressure and spatial frequency

考虑到抛光层的耐压刚度 K_c ,为使薄板变形能够与非球面相适应,令耐压刚度与薄板的抗弯刚度和横向剪切刚度分别相等,即

$$\frac{1}{k_c} = \frac{1}{4\pi^2 D_s \xi^2}, \quad (3)$$

因此 $\xi = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_c}{D_s}}$, 并且

$$\frac{1}{k_c} = \frac{1}{16\pi^4 D \xi^4}, \quad (4)$$

因此 $\xi = \frac{1}{2\pi} \sqrt[4]{\frac{k_c}{D}}$ 。

令(3)式和(4)式相等,有

$$h = \frac{3E(1-\nu)}{k_c(1+\nu)}. \quad (5)$$

上式就是考虑耐压刚度 K_c 时薄板厚度的临界值,通常薄板厚度小于此临界值。因此(5)式也可以看成一个高通滤波器,即镜子表面的高频信息优于低频信息被抑制。

2.2 设计结果

结合上述原理和实际情况,设计了一种双柔性自适应抛光磨头,如图4所示。该磨头主要包括刚

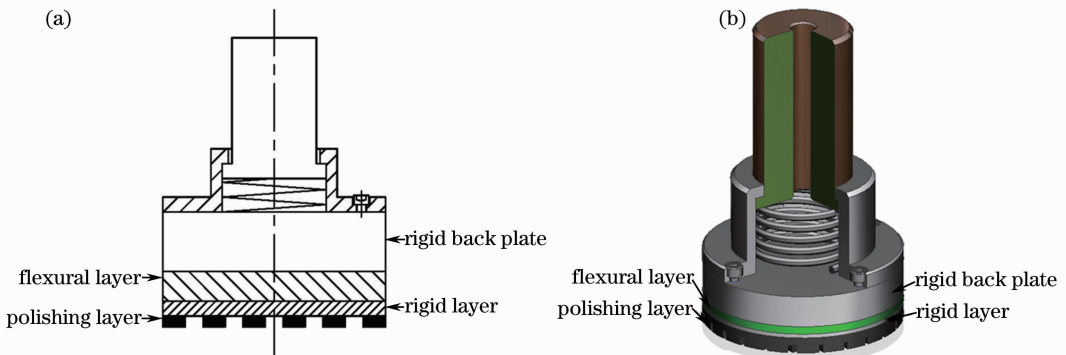


图4 磨头结构示意图。(a)剖面图;(b)立体图

Fig. 4 Schematic of tool structure. (a) Profile map; (b) space pattern

性基底、柔性层、刚性层和抛光层 4 个部分。刚性基底和刚性层的材料都为金属；柔性层的材料为橡胶或者海绵；抛光层的材料为沥青或者聚氨酯等高分子材料。其中，刚性基底厚度为 20~30 mm，通过上面的法兰与抛光主轴保持同步；柔性层是一层厚度为 6 mm 的海绵；刚性层为一层薄铝板，根据前文计算取 0.1 mm。因此，抛光过程中刚性层的弯曲变形起主要作用，在实现与非球面各点相适应的同时，可有效抑制非球面中频误差，提高表面波纹度。

3 实验验证和分析

实验中使用的数控抛光设备分别是英国 Zeeko 公司生产的 IRP600 型气囊抛光设备和德国 Satisloh 公司生产的 SPS-140 预抛设备。非球面面形修正过程中 IRP600 型抛光机使用的是一个标准的 $R=40$ mm 气囊磨头；SPS-140 预抛机使用的是自研抛光磨头，抛光层的曲率半径大小为非球面的最佳拟合球半径 $R=370$ mm，口径为 40 mm。抛光粉采用的是法国 Dirac 公司生产的 1663 型 CeO_2 ，粒度约为 $3 \mu\text{m}$ 。待加工的非球面是一块口径为 150 mm、材料为熔石英的凹非球面，其最大偏离量为 0.183 mm。

为了准确地测量非球面表面面形精度，使用 Zygo VFA 型立式干涉仪进行测量，标准镜头 F 数为 0.75，并使用自制 CGH 图作为零位补偿镜。由于检测过程中 CGH 图会产生成像畸变，因此检测前在镜子表面通过打点的方式进行标记，并建立畸变校正模型，如图 5 所示。为进一步快速提高抛光层与非球面的适应程度，首先使用气囊抛光方法^[9]修正非球面的低频面形，然后再使用自制抛光

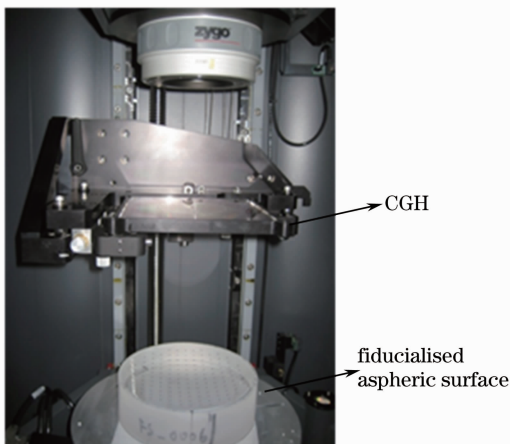


图 5 非球面检测装置图

Fig. 5 Asphere metrology setup

磨头来抑制非球面中频误差，整个抛光过程的流程图如图 6 所示。

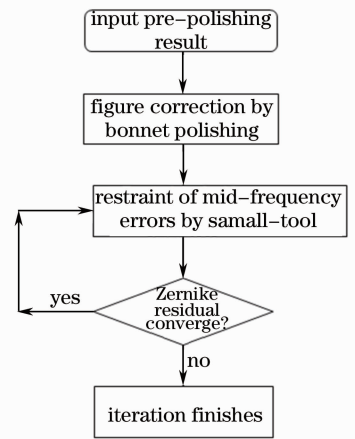


图 6 中频误差抑制流程示意图

Fig. 6 MSFE restraint flow chart

预抛后的非球面面形误差如图 7 所示。由图 7(a) 可知，预抛后的面形峰谷值(PV)约为 560 nm、RMS 值为 76 nm；预抛后的非球面 Zernike 残差如图 7(b) 所示，其 Zernike 残差 RMS 值约为 44 nm。无论是从面形误差图还是从 Zernike 残差图中都可以看到螺旋状波纹痕迹，这主要是由铣磨过程中的螺旋路径轨迹所产生。经过预抛光阶段的大量去除和面形控制，这些螺旋状波纹越发明显，成为中频误差的主要成份。如果这些空间周期在 8~10 mm 左右的中频误差不能有效抑制，不仅会影响精抛过程中的面形收敛效率，而且会最终导致光学系统性能的降低。

根据中频误差抑制流程，首先使用 IRP600 型抛光机进行一次面形精抛，精抛后的面形精度 RMS 达到约 25 nm，如图 8(a) 所示；Zernike 残差 RMS 如图 8(b) 所示，下降至约 23 nm。这主要是因为输入给 IRP600 型抛光机的初始面形中，Zernike 残差中包含了很多低频段的信息，因此随着面形的大幅改善，Zernike 残差明显下降。经过这次精抛后，Zernike 残差 RMS 值与整个面形的 RMS 值基本一致，此时面形中的中频误差占据主导，如果继续使用 IRP600 型抛光机进行气囊抛光，面形收敛效率将会明显降低或者不收敛。因此，根据图 6 所示，开始使用自研磨头抑制中频误差。经过第一轮小磨头抛光，面形误差 RMS 如图 9(a) 所示，约为 19 nm；Zernike 残差 RMS 如图 9(b) 所示，约为 9 nm。将中频误差抑制前后的面形误差图 8(a)、9(a) 和 Zernike 残差图 8(b)、9(b) 分别作比较，可知面形中的螺旋波纹幅值已经大幅减弱，整个面形变得更加平滑。

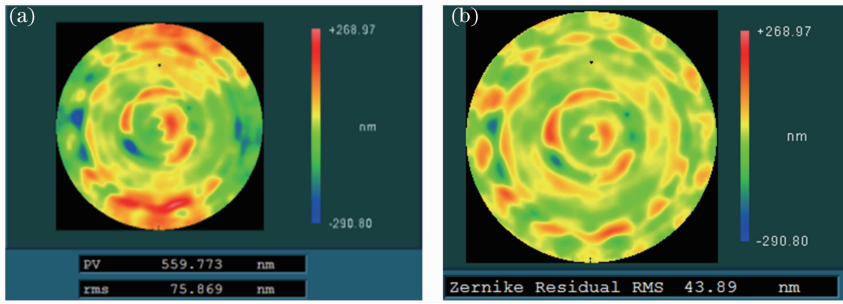


图 7 预抛光结果。(a)面形误差；(b) Zernike 残差

Fig. 7 Pre-polishing results. (a) Error map; (b) Zernike residual

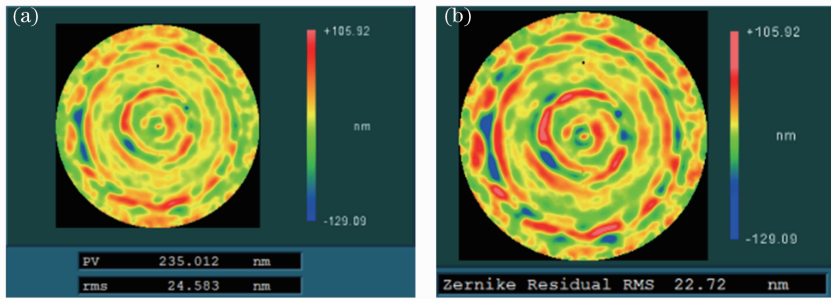


图 8 面形精抛的检测结果。(a)面形误差；(b) Zernike 残差

Fig. 8 Results from corrective polishing. (a) Error map; (b) Zernike residual

接着,再次进行两轮中频误差抑制,结果分别如图 10 和图 11 所示。由图 8~11 可知,整个面形的 Zernike 残差 RMS 值大幅下降,从第一次精抛后的 23 nm 收敛至最终的 3.5 nm,整个收敛比约为 6.6。其中,第一次中频误差抑制后,Zernike 残差收敛比为

2.5。但是随着中频误差修正次数的增多,Zernike 残差收敛比也随之下降,后两轮的收敛比分别为 1.5 和 1.7。将最初的面形输入结果与三轮中频误差抑制的面形结果在 1~10 mm 的二维带通曲线做简单比较,如图 12 所示,再一次证明了这种方法的有效性。

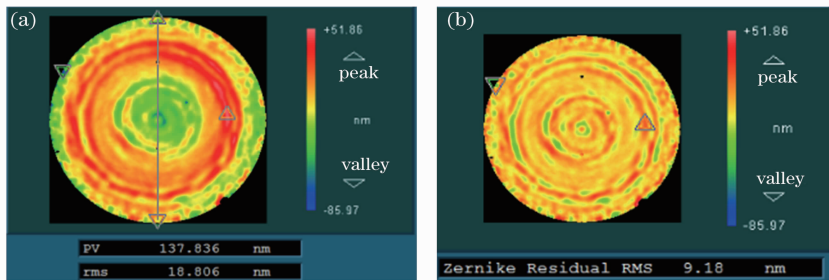


图 9 第一轮中频误差修正后的检测结果。(a)面形误差；(b) Zernike 残差

Fig. 9 Result after the first MSFE removal. (a) Error map; (b) Zernike residual

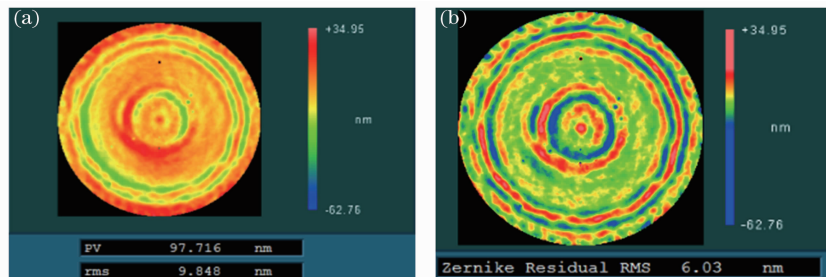


图 10 第二轮中频误差修正后的检测结果。(a)面形误差；(b) Zernike 残差

Fig. 10 Results after the second MSFE removal. (a) Error map; (b) Zernike residual

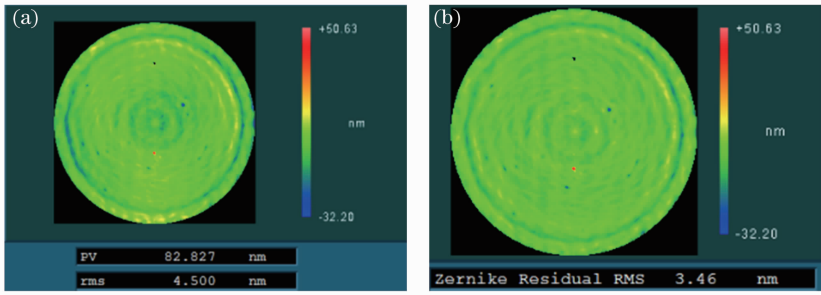


图 11 第三轮中频误差修正后的检测结果。(a) 面形误差; (b) Zernike 残差

Fig. 11 Results after the third MSFE removal. (a) Error map; (b) Zernike residual

为了更加准确地分析这种方法对空间各个频段的影响,将三次中频误差抑制的结果使用功率谱密度(PSD)分布曲线整理,如图 13 所示。可以看出,经过前两次抑制,在整个空间频率范围内,PSD 曲线大幅降低;但是后两次修正,仅仅在小于 3 mm 的空间周期对应的高频部分和大于 10 mm 的空间周期对应的低频部分发生收敛,而在 3~10 mm 的空间周期对应的中频部分却略有发散。因此,经过三次中频误差抑制后加工结束。

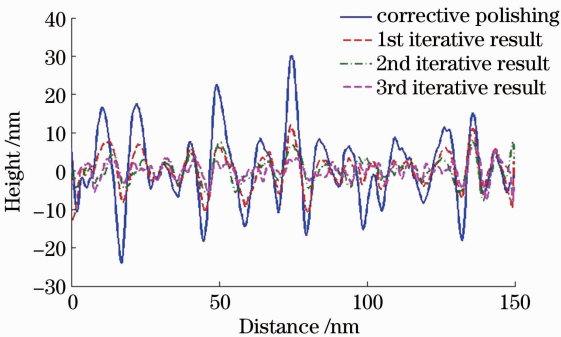


图 12 1~10 mm 的带通滤波结果比较

Fig. 12 Comparison of 1~10 mm band-pass results

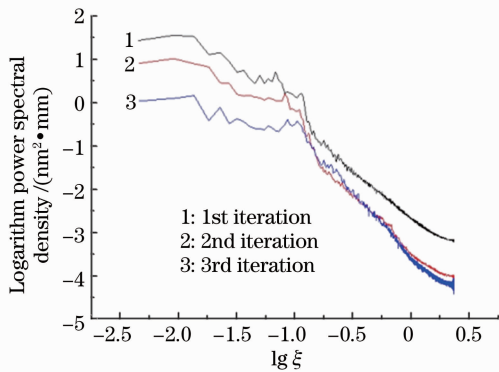


图 13 PSD 曲线结果比较

Fig. 13 Comparison of PSD curves

出了小磨头自适应抛光抑制中频误差的方法,并进行了数值模拟计算和相关实验。基于计算结果,设计并制造了一种双柔性自适应抛光磨头,并使用此磨头通过三轮抛光成功将非球面面形精度 RMS 从预抛光后的 76 nm 收敛至 4.5 nm, Zernike 残差 RMS 从 43.89 nm 收敛至最终的 3.46 nm。初步实验结果表明,小磨头自适应抛光方法不仅有助于非球面全频段面形质量的提高,而且有助于提高高精度非球面元件的加工效率,实验结果为投影光刻镜头和强激光光学系统非球面光学元件的中频误差控制提供了一定的参考。

参 考 文 献

- 1 J Wang, L L Wang. Carbon dioxide gas sensor derived from a 547-hole microstructured polymer optical fiber preform [J]. Opt Lett, 2011, 35(19): 3270-3272.
- 2 Y Ohmura, M Nakagawa, T Matsuyama, *et al.*. Catadioptric lens development for DUV and VUV projection optics [C]. SPIE, 2003, 5040: 781-788.
- 3 Nikon Corp. Projection optical system, exposure device provided with it and manufacture for semiconductor device Japan Patent 2000, 56218 [P]. 2000.
- 4 Burn J Lin. Marching of the microlithography horses: electron, ion, and photon: past, present, and future [C]. SPIE, 2007, 6520: 652002.
- 5 D M Williamson. Remaining challenges in microlithographic optical design [C]. SPIE, 2005, 5874: 58740N.
- 6 Y Ohmura. The optical design for microlithographic lenses [C]. SPIE, 2006, 6342: 63421T.
- 7 R A Jones. Computer-controlled polishing of telescope mirror segments [J]. Opt Engng, 1983, 22(2): 222236.
- 8 R A Jones. Computer-controlled optical surfacing with orbital tool motion [J]. Opt Engng, 1986, 25(6): 256785.
- 9 D D Walker, D Brooks, A King, *et al.*. The 'Precessions' tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces [J]. Opt Express, 2003, 11(8): 958-964.
- 10 H M Pollicove, E M Fess, J M Schoen. Deterministic manufacturing processes for precision optical surfaces [C]. SPIE, 2003, 238-239: 53-58.
- 11 D W Kim, H Martin, J H Burge. Control of mid-spatial-frequency errors for large steep aspheric surfaces [C]. The Optical Society, Optical Fabrication and Testing Conference, June 25, 2012.
- 12 J E Harvey, A Kotha. Scattering effects from residual optical fabrication errors [C]. SPIE, 1995, 2576: 155-174.

5 结 论

针对非球面光学元件存在中频误差的问题,提

- 13 D M Aikens. The origin and evolution of the optics for the National Ignition Facility [C]. SPIE, 1995, 2536: 2—12.
- 14 S C West, H M Martin, R H Nagel, *et al.*. Practical design and performance of the stressed lap polishing tool [J]. Appl Opt, 1994, 33(34): 8094—8100.
- 15 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan, *et al.*. Analysis of polishing errors by tool paths and optimization of tool paths [J]. Acta Optica sinica, 2011, 31(8): 0822003.
施春燕, 袁家虎, 伍 凡, 等. 运动轨迹对抛光误差的影响分析和轨迹优化研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112012.
- 16 H M Martin, B Cuerden, L R Dettmann, *et al.*. Active optics and force optimization for the first 8.4 m LBT mirror [C]. SPIE, 2004, 5489: 550464.
- 17 P Kurz, M Antoni, U Dinger. Optics for EUV Lithography [R]. 2010.
- 18 范 斌. 能动磨盘加工工艺及智能控制研究 [D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2006.
- 19 Zhong Xianyun, Fan Bin, Zeng Zhige, *et al.*. Design simulation and optimization for the flexible displacement support structure based on $\Phi 1.8$ m lightwave reflector [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 32(3): 0322002.
钟显云, 范 斌, 曾志革, 等. $\Phi 1.8$ 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.
- 20 H Hu, Y F Dai, X Q Peng. Restraint of tool path ripple based on surface error distribution and process parameters in deterministic finishing [J]. Opt Express, 2010, 18(22): 22973—22981.
- 21 Y F Dai, F Shi, X Q Peng, *et al.*. Restraint of mid-spatial frequency error in magneto-rheological finishing (MRF) process by maximum entropy method [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(10): 3092—3097.
- 22 P K Mehta, R E Hufnagel. Pressure distribution under flexible polishing tools 21 conventional aspheric optics [C]. SPIE, 1990, 1303. 178—188.

栏目编辑: 张 腾