

文章编号 1004-924X(2010)07-1460-08

# 应用多模式组合加工技术修正 大口径非球面环带误差

李俊峰<sup>1,2</sup>, 谢京江<sup>1</sup>, 宋淑梅<sup>1</sup>, 陈 亚<sup>1</sup>, 宣 斌<sup>1,2</sup>, 王 朋<sup>1,2</sup>, 陈晓苹<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了满足大口径非球面光学元件加工的需求, 提出了用多模式组合加工(MCM)技术修正大口径非球面反射镜环带误差的方法。本文讨论的 MCM 技术以经典加工工艺为基础, 采用抛光盘的多工位加工和抛光模式的组合完成光学元件的抛光, 实现对光学表面中低频段误差的有效控制。介绍了 MCM 技术的重要组成部分 JP-01 抛光机械手的工作原理, 分析了 MCM 的工作模式。采用 MCM 技术对  $\Phi 1\ 230\ \text{mm}$  的非球面反射镜进行环带误差的修正, 给出了镜面形检测结果。实验结果表明, MCM 技术可以有效地控制光学表面的中低频误差, 使光学表面误差得到有效收敛, 从而显著提高抛光效率。目前, 采用 MCM 技术加工  $1\sim 2\ \text{m}$  口径的同轴非球面, 其精度可以达到  $30\ \text{nm(RMS)}$ 。

**关键词:** 大口径光学元件; 环带误差; 多模式组合加工; 机械手

**中图分类号:** TH743; TQ171.684 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1460

## Zonal error removal for large aspheric with multi-mode combined manufacture technique

LI Jun-feng<sup>1,2</sup>, XIE Jing-jiang<sup>1</sup>, SONG Shu-mei<sup>1</sup>, CHEN Ya<sup>1</sup>,  
XUAN Bin<sup>1,2</sup>, WANG Peng<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-ping<sup>1,2</sup>

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** In order to satisfy the requirements of large mirrors for the fabrication precision, the removal of zonal errors for a large aspheric is analyzed with the Multi-mode Combined Manufacture (MCM) technique in this study. The MCM technology discussed is based on the traditional fabrication theory, in which the multi-mode machining combined the multiple polishing of the laps is used to finish the optical component to control the low and middle frequency errors effectively of the optical surface. The principle of JP-01 polishing manipulator which is an important part of the MCM technology is presented, and the working mode of MCM is analyzed in detail. Finally, the MCM technology is used to deal with the zonal error of an aspheric with the aperture of  $1\ 230\ \text{mm}$ . The experimental results show that

收稿日期: 2010-03-29; 修订日期: 2010-05-31.

基金项目: 中科院三期知识创新工程资助项目

the MCM technology can control the low and middle frequency errors of the optical surface effectively, constrain the surface error and improve the polishing efficiency observably. At present, the precision of a large on-axis mirror with the aperture of 1-2 m has reached 30 nm(RMS). These results prove that the MCM can be one of the important technologies for the development of the large mirror manufacture.

**Key words:** large mirror; zonal error; multi-mode combined manufacture; manipulator

## 1 引言

随着我国航天、航空及天文等科技领域的不断发展,对大口径、高精度非球面反射镜的需求不断增加。在大口径望远系统中,大口径深焦比非球面反射主镜具有缩短系统长度,减轻系统质量,有效提高光学系统的空间观测分辨率,获得高质量的光学图像信息等优点,因此它在天文望远镜、空间光学系统等领域得到日益广泛的应用。但是,随着非球面光学元件口径和相对孔径的增大,其相应的非球面度梯度也加大,由此增加了加工难度,给非球面加工工艺带来了一定的挑战。

在大型非球面加工领域,我国对加工工艺的研究起步比较晚,现在采用的主要加工方法有:经典抛光、计算机控制小工具抛光(CCOS)<sup>[1-2]</sup>、计算机控制能动盘抛光(CCAL)、离子束抛光<sup>[3]</sup>、磁流变抛光等,但是技术水平与国外一些国家还有较大的差距。至今,我国在高精度大口径非球面单镜加工领域的加工能力在1~2 m级水平,而国外一些国家的加工水平相对较高。如最具有代表性的美国亚利桑那大学光学技术中心通过子孔径拼接技术研制的GMT望远系统主镜,该主镜通过7块直径为8.4 m的圆形单镜拼接,直径达25 m;此外,该中心还研制了JWST、MMT等大口径望远系统主镜。法国REOSC公司在大口径光学加工领域也具有非常高的技术水平,完成了许多重大工程项目的光学元件研制工作,例如,ESO 3.6 m望远镜主镜,4块VLT系统和2块GEMINI系统8 m主镜,SOFIA 2.7 m轻量化主镜等<sup>[4-9]</sup>。随着光学需求及光学加工技术的不断发展,与其相适应的高精度数控机床(CNC)加工系统已经成为现代光学加工的主要技术装备之一,高精度智能化的工业机器人已经被应用于非球面光学元件的抛光,使得机器人抛光成为光学加工的一种重要技术手段。

针对目前大口径反射主镜制备中存在的问题,本文研究了利用多模式组合加工技术修正大口径同轴非球面反射镜环带误差的方法,该方法可有效控制光学表面的中、低频误差,在修正环带误差时表现出较高的去除效率。

## 2 MCM 技术

对于非球面来说,其加工难度主要是由所设计的表面与比较球面沿径向上的轴向偏差所引起的,非球面的加工难度系数可定义为 $dy$ <sup>[4]</sup>,可由公式(1)表示。从公式中可以看出加工的难度与光学元件相对孔径的三次方成反比,与二次项系数 $k$ 成反比,就是说相对孔径越大, $dy$ 的值越小,加工的难度就越大。表1列举了国外几种大型望远镜主镜参数及加工难度系数。

$$dy = \frac{8(f/D)^3}{k}, \quad (1)$$

其中, $k$ 为非球面二次项系数, $f$ 为非球面的焦距, $D$ 为非球面的通光孔径。

表1 几种大型望远镜参数指标  
Tab.1 Parameters of large telescopes

Telescope	EURO50	KECK	CELT	GMT
Primary mirror diameter/m	50.4	10	30	25.7
Primary mirror $f$ -ratio	$f/0.85$	$f/1.75$	$f/1.50$	$f/0.7$
Segment size/m	2	1.8	0.5	8.4
Conic constant	-0.999 4	-1.644	-1.525	-0.998 3
$dy$	4.92	26.1	17.7	2.75

随着被加工反射镜口径和相对孔径的增加,加工的难度逐渐加大,为了保证加工的质量和周期,需要不断改进加工工艺来满足加工需求。多模式组合加工技术MCM(Multi-mode Combined Manufacturing technology)<sup>[10]</sup>就是在经典加工工艺基础上改进的一种针对大口径非球面反射镜制

备的工艺方法,该项技术可以有效控制光学表面的中低频误差,在修正环带误差时表现出较高的去除效率。

## 2.1 光学表面误差

光学表面误差按空间频域可分为低频误差(面形误差)、中频误差(波纹度)和低频误差(粗糙度)。对于同轴光学元件来说,按表面误差不规则度可分为对称性表面误差和非对称性表面误差。

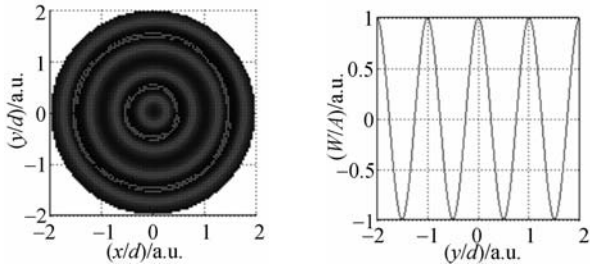


图 1 环带误差分布曲线

Fig. 1 Distribution curves of zonal error

在大口径同轴非球面加工中,特别是大相对孔径的非球面,由于非球面度和非球面度梯度都比较大,利用传统的修带法加工时,抛光盘的面形与非球面的面形不能够很好地吻合,经常会出现典型的对称性环带低频误差,其分布形态可近似认为是余弦状分布,其数学表达式可用公式(2)表示,表面误差分布如图 1 所示。

$$W = A \cdot \cos\left(2\pi \frac{y}{d}\right), \quad (2)$$

其中, $A$  为光学表面误差幅值, $d$  为表面误差的空间域周期。

## 2.2 MCM 理论

多模式组合加工工艺是通过不同抛光形式及运动模式的组合来完成光学元件加工的。本文讨论的多模式组合加工以经典加工工艺为基础,采用多个抛光盘在工件的不同位置实现多工位同时加工,从而提高抛光效率,实现对表面误差进行全频段控制。本文涉及的 MCM 技术主要是以 DJ1600 型修带抛光机和自行研制的新的 JP-01 型抛光机械手为基础搭建起的抛光实验平台。DJ1600 抛光机最大加工工件直径为 1 600 mm,主要由工作台和摆架两部分组成。工作台主轴可以连续旋转无级变速,工作台可沿导轨前后移动,摆架采用曲柄连杆结构。JP-01 型抛光机械手整

体机构采用了柱坐标形式,加工过程中采用  $\rho\theta$  的运动控制方式, $\rho, \theta$  控制可以实现工件表面任意轨迹的运动,JP-01 数控抛光机械手实物如图 2 所示。



图 2 JP-01 数控抛光机械手

Fig. 2 JP-01 NC polishing manipulator

### 2.2.1 多模式组合单抛光盘去除特性分析

JP-01 型抛光机械手作为多模式组合工艺的工作单元之一,其抛光盘材料去除特性基于 Preston 方程理论,即工件表面某一点的材料去除量  $\Delta z$  可以表示为:

$$\Delta z = K p v \Delta t, \quad (3)$$

其中, $K$  为材料去除常数; $p$  为  $t$  时刻工件上某点  $A$  的压强; $v$  为  $t$  时刻工件上点  $A$  与抛光盘的相对速度。

在这里,抛光盘接触区域范围内各点的压强按一种改变了的余弦状分布,其数学表达形式可由公式(4)表示

$$p = p_0 \left[ \cos\left(\frac{ax}{r} \times 2\pi\right) \right]^b, \quad (4)$$

式中: $x$  为抛光盘上点到抛光盘中心距离; $r$  为抛光盘半径; $a, b$  为压强分布变量, $0 < a < 0.25$ 。

在接触区域内,根据受力平衡可得

$$\iint_S p ds = F, \quad (5)$$

其中, $S$  为抛光盘接触区域面积, $F$  为机械手施加给抛光盘的压力。利用公式(5)可以计算出抛光盘中心点的压强  $p_0$ 。

图 3 给出了抛光机械手运动简图, $O_1$  为工件旋转中心, $O_2$  为抛光盘旋转中心, $O_3$  为机械手摆动伸缩中心。以工件旋转中心点  $O_1$  建立直角坐标系,工件转速为  $\omega_g$ ,机械手摆盘转速为  $\omega_m$ ,抛光盘转速为  $\omega_p$ ,抛光盘半径为  $r$ ,抛光盘偏心距为  $e$ ,抛光盘中心距工件中心位置距离为  $L$ ,工件上

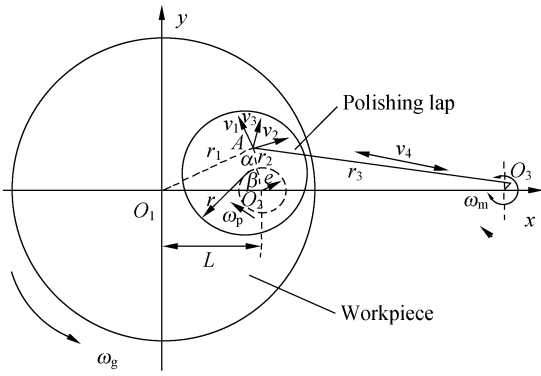


图 3 抛光机械手运动简图

Fig. 3 Movement of polishing manipulator

一点 A 相对于  $O_1$  的速度为  $v_1$ , 抛光盘上 A 点相对于  $O_2$  的速度为  $v_2$ , 相对于  $O_3$  的速度为  $v_3$ , 机械手径向速度为  $v_4$ , A 距  $O_1$  和  $O_2$  的距离分别为  $r_1$  和  $r_2$ , 工件上一点 A 相对于抛光盘的瞬时速度  $v$  可表示为:

$$v = [(v_{1x} + v_{2x} + v_{3x} + v_{4x})^2 + (v_{1y} + v_{2y} + v_{3y} + v_{4y})^2]^{1/2}, \quad (6)$$

把式(4)和(6)代入式(3)中可以得到材料的去除特性函数  $\Delta z$ :

$$\Delta z = K p_0 \left[ \cos\left(\frac{\alpha x}{r} \times 2\pi\right) \right]^b [(v_{1x} + v_{2x} + v_{3x} + v_{4x})^2 + (v_{1y} + v_{2y} + v_{3y} + v_{4y})^2]^{1/2} \Delta t, \quad (7)$$

在处理大口径非球面环带误差时,若半径为  $r$  的抛光盘做定点无偏心抛光,则  $v_3 = v_4 = 0, e = 0$ , 对于图中 A 点,其相对运动速度为:

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \bar{v}_1 = \bar{v}_2 \\ v_{1x} &= r_1 \omega_g, \\ v_{2x} &= r_2 \omega_p \end{aligned} \quad (8)$$

沿  $x, y$  轴分解,在三角形  $O_1 A O_2$  中  $O_1 A$  和  $O_1 O_2$  的夹角为  $\theta, O_1 A$  与  $O_2 A$  的夹角为  $\alpha, A O_2$  与  $O_1 O_2$  的夹角为  $\beta$ , 则有

$$\begin{aligned} v_{1x} &= -r_1 \omega_g \sin \theta, v_{1y} = r_1 \omega_g \cos \theta \\ v_{2x} &= r_2 \omega_p \sin \beta, v_{2y} = r_2 \omega_p \cos \beta, \end{aligned} \quad (9)$$

且有

$$r_1 = \sqrt{(r_1 \cos \theta - L)^2 + (r_1 \sin \theta)^2}, \quad (10)$$

由余弦定理可得

$$\cos \alpha = -\cos(\theta + \beta) = -\frac{r_1^2 + r_2^2 - L^2}{2r_1 r r_2}, \quad (11)$$

设  $\omega_p / \omega_g = m$ , 代入式(6)后整理得

$$v = \omega_g [r_1^2 (1 - m)^2 + 2r_1 L m (1 - m) \cos \theta + L^2 m^2]^{1/2}, \quad (12)$$

由于所施加的压力  $F$  不大,抛光盘中心与边缘的压力差很小,故认为抛光盘的压力分布是均匀的,则  $Kp$  为常量,且  $dt = d\theta / \omega_g$ , 则该环带上的材料去除分布可以表示为:

$$\begin{aligned} z_1(r_1) &= Kp \int_{-\theta_0}^{\theta_0} [r_1^2 (1 - m)^2 + \\ &2r_1 L m (1 - m) \cos \theta + L^2 m^2]^{1/2} d\theta, \end{aligned} \quad (13)$$

其中  $\theta_0 = \arccos\left(\frac{r_1^2 + L^2 - r^2}{2r_1 L}\right), L - r < r_1 < L + r$ .

若半径为  $r$  的抛光盘做定点带偏心抛光,则  $v_3 = v_4 = 0$ , 同理,可以推导出材料去除分布特性为:

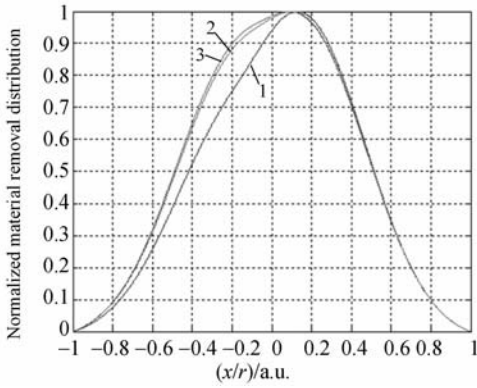
$$z_2(r_1) = \begin{cases} z_1(r_1), & |r_1 - L| < r - e \\ \frac{r_1 - (L - r - e)}{2r} z_1(r_1), & L - r - e < r_1 < L - r + e \\ \frac{(L + r + e) - r_1}{2e} z_1(r_1), & L + r - e < r_1 < L + r + e \end{cases} \quad (14)$$

经计算机仿真,可以得到抛光盘所覆盖区域的材料去除特性曲线。图 4(a)和(b)分别给出了转速比和抛光位置不同情况下,抛光区域径向归一化材料的去除特性曲线,其中横坐标是以抛光盘的旋转中心为中心所做径向坐标归一化,纵坐标为材料去除量归一化,每条曲线所对应的参数如表 2 所示,其它未给出参数均为 0。通过改变抛光盘与工件之间的转速比及抛光盘与工件中心的相对位置可以改变曲线峰值的强弱。从材料去除特性曲线上可以看出,由于工件自转,抛光盘材料去除最多的位置不是在接触区域的中心,而是在抛光盘与工件接触面积最大的环带位置。

表 2 抛光参数

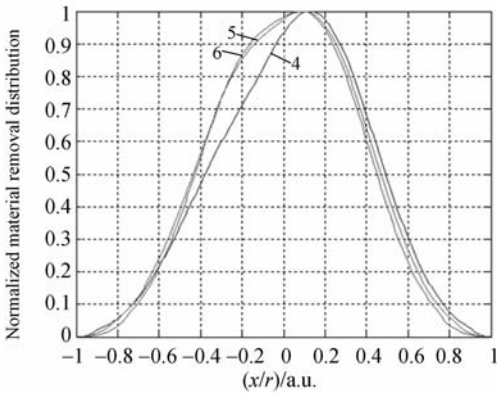
Tab. 2 Polishing parameters

	$\omega_p$ (r/min)	$\omega_g$ (r/min)	$L$ /mm	$r$ /mm	$e$ /mm
1	50	2	400	60	0
2	120	2	400	60	0
3	120	2	300	60	0
4	50	2	400	60	5
5	120	2	400	60	10
6	120	2	300	60	15



(a) 无偏心定点抛光归一化材料去除特性

(a) Normalized material removal without eccentricity



(b) 带偏心定点抛光归一化材料去除特性

(b) Normalized material removal with eccentricity

图 4 归一化材料去除特性

Fig. 4 Normalized material removal distributions

2.2.2 多模式组合加工模式分析

本文讨论的多模式组合加工是在工件的不同位置利用多个抛光盘同时加工光学表面。利用多个抛光盘可以使抛光过程具有更多的参数及模式选择能力,通过每一个做简单运动模式的抛光盘的综合作用,实现工件表面复杂误差的修正。

多模式组合加工中 JP-01 型机械手的抛光盘采用了不同的抛光路径:(a) 定点;(b) 切向运动;(c) 径向运动等,本文在 2.2.1 节已经对抛光盘的一些去除特性进行了分析。抛光盘的运动形式可采用行星式运动和平转动两种方式,这里选择了平转动方式。每一个抛光盘在不同的工位有不同运动姿态,针对不同的误差形态所选择的抛光盘的尺寸也不同。

在加工过程中,环带状误差是最常出现的表面误差之一,如图 1 所示的情况,如果只利用传统

的单个抛光盘进行逐个环带的修正,由于抛光盘去除特性与实际的误差分布形态存在不完全吻合,可能使抛光盘边缘或中心材料去除较多,这样容易产生更高空间频率的表面环带误差,该种误差的图形解释如图 5 所示,这种更高空间频率表面误差的产生对成像系统或能量系统都是有害的。

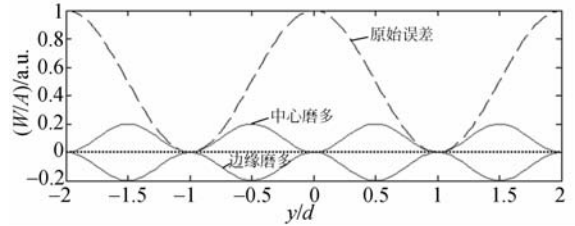


图 5 截面误差曲线(单抛光盘定点抛光)

Fig. 5 Profile error curves (single polishing lap)

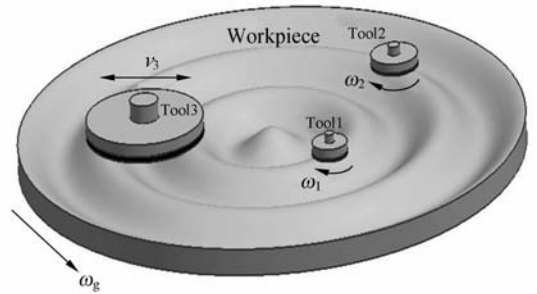


图 6 抛光盘运动简图

Fig. 6 Movement of polishing laps

图 6 为一种常用的修正环带误差的多模式组合加工技术中的抛光盘运动简图。在此抛光模式中,采用 2 个与环带误差宽度相匹配的抛光盘进行逐带的定点修正,去除高环带部分残余误差,根据表面环带误差确定去除模型中抛光盘的抛光参数;同时利用一个直径能够覆盖两个环带宽度的大抛光盘在光学元件的表面做径向的往复运动。当大抛光盘不自转, $\omega_3=0$  时,对于大抛光盘与工件接触区域上的任意一点 B 的相对运动速度可表示为:

$$v_B = \sqrt{v_3^2 + v_g^2}, \tag{15}$$

又由于  $v_3 \gg v_g$ , 则有  $v_B \approx v_3$ , 因此,根据公式(3)可以近似认为做径向运动的抛光盘材料去除是均匀的。大抛光盘与各个环带的高点接触,使各个环带有更高的材料去除效率,这样的径向往复运动可以抑制更高空间频率表面误差的出现,起平

滑各环带误差的作用,做径向运动抛光盘对环带误差的去除作用可由图 7 表示。

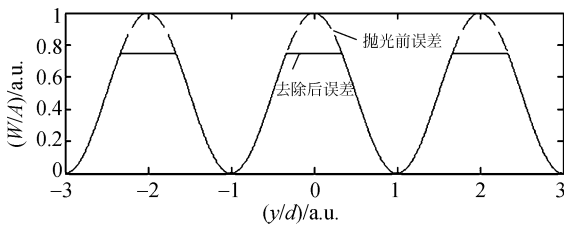


图 7 截面误差曲线(径向运动抛光盘抛光)

Fig. 7 Profile error curves (polishing lap with radial movement)

对于带有典型环带误差的表面来说,按照图 6 所示的抛光模式进行抛光后,其表面误差变化可表示为:

$$W_{\text{after}} = W_{\text{begin}} - Z_1 - Z_2 - Z_3, \quad (16)$$

其中,  $W_{\text{begin}}$ ,  $W_{\text{after}}$  分别为抛光前后的表面误差,  $Z_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为第  $i$  个抛光盘的材料去除函数。

通过计算机仿真,可以得出利用多模式组合加工去除环带误差的加工效果,如图 8 所示。

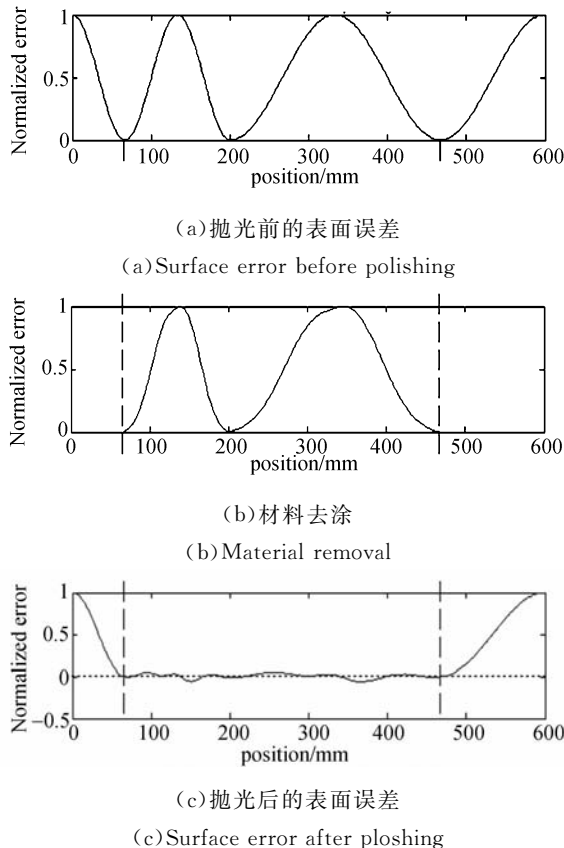


图 8 环带误差的材料去除

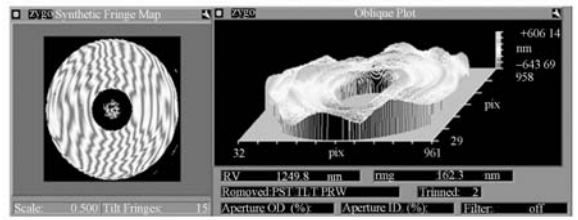
Fig. 8 Material removal for zonal error

按照如图 6 所示的抛光模式,根据工件表面误差选择合适的抛光盘参数及抛光模式参数,应用 MCM 技术在理论上可以提供与元件表面误差较为吻合的材料去除函数,最终得到比较平滑的表面。

### 3 抛光实验及数据分析

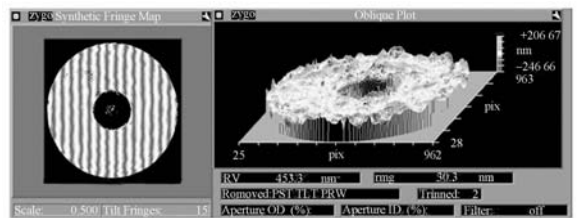
以 DJ1600 型修带抛光机与 JP-01 型抛光机械手搭建起来的抛光实验平台为基础,加工了一口径为 1 230 mm,  $F$  数为 1.5 的双曲面反射镜,其加工难度系数  $d_y=26.47$ ,最大非球面度及非球面度梯度分别为 0.088 mm, 1.74  $\lambda/\text{mm}$  ( $\lambda=633 \text{ nm}$ ),可见该非球面的加工难度比较大。在该非球面抛光初期,由于 JP-01 机械手正处于实验阶段,此阶段只采用 DJ1600 型修带抛光机去除部分的加工余量;在机械手实验完成之后,在此基础上利用上述的多模式组合形式对光学表面误差进行了进一步的修正。

图 9(a), (b) 为非球面面形误差的阶段性检测结果,其中图 9(a) 给出了利用单轴修带抛光机抛光得到的检测结果,此时的面形误差的 RMS 值为 162 nm 左右。但是,由于非球面度的梯度比较大,利用这种传统的修带抛光法产生了比较严重的环带误差。图 9(b) 为在图 9(a) 面形误差



(a) 修带抛光检测结果

(a) Test result by zonal polishing



(b) 多模式组合抛光检测结果

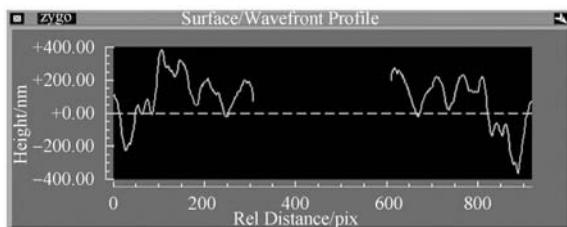
(b) Test result by MCM

图 9 面形误差检测结果

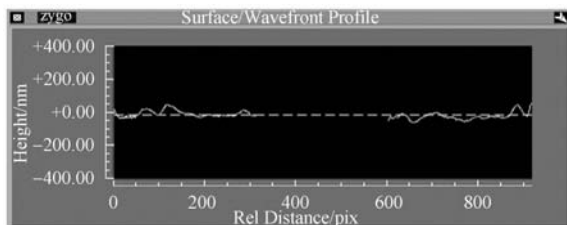
Fig. 9 Test results of surface errors

的基础上针对所产生的环带误差利用多模式组合加工处理而得到的检测结果,此时面形误差的 RMS 值约为 30 nm。

图 10(a),(b)给出了两种抛光检测结果中的截面误差分布曲线。从得到的检测结果可以看出,多模式组合加工技术有效地去除了环带误差,抑制了更高空间频率表面误差的产生。在此抛光过程中,面形误差由 162 nm 收敛到 60 nm 时,累计抛光时间大约为 75 h;由 60 nm 收敛到 30 nm 时,累计抛光时间大约为 50 h。可见,该种多模式组合处理方法具有很高的材料去除效率,可快速有效地收敛面形误差。



(a) 利用单抛光盘抛光的截面误差  
(a) Profile error by single lap



(b) 利用多模式组合加工的截面误差  
(b) Profile error by MCM

图 10 截面误差曲线

Fig. 10 Profile error curves

上述研究结果表明,对于大相对孔径光学元件,采用传统的修带抛光工艺可以有效收敛面形

#### 参考文献:

- [1] 王毅,倪颖,余景池. 小型非球面数控抛光技术研究[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(10): 1527-1533.  
WANG Y, NI Y, YU J C. Computer-controlled polishing technology for small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1527-1533. (in Chinese)
- [2] 王权陡,余景池,张峰. 数控抛光中不同运动方式下小抛光盘抛光特性之比较[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(5): 73-80.

误差,但容易产生典型的环带误差;而使用多模式组合加工处理后,有效地去除了光学元件的环带误差,收敛了表面中低频段误差。因此, MCM 技术是修正大口径深焦比非球面环带误差的有效方法之一,其主要的技术特点有:

(1)多模式组合加工采用多个抛光盘同时加工,显著地提高了抛光效率,缩短了加工周期。

(2)多模式组合加工采用多种加工模式同时工作,可以有效地降低光学元件中低频表面误差,提高光学表面的质量。

(3)多模式组合加工中抛光机械手具有更高的灵活性和抛光参数选择能力,特别适用于大口径、高陡度非球面反射镜的制备。

## 4 结 论

本文研究的多模式组合加工技术采用抛光盘的多工位加工和多种抛光模式的组合实现了光学表面环带误差的处理,有效地控制了光学表面的环带误差,显著地提高了抛光的效率。该加工工艺对大口径光学元件的加工切实可行,缩短了加工周期。目前,采用 MCM 技术加工大口径同轴非球面的精度可以稳定达到 30 nm (RMS)水平。本文的工作还提示可在所述工作的基础上通过大量的抛光实验来建立完整的抛光数据库,针对加工过程中出现的复杂表面误差形式确定多模式组合加工模式及抛光参数,以实现更高精度的确定性加工。另外,本文研究的多模式组合加工技术是以经典加工工艺为基础的,该项技术还具有很大的研究和探索空间,例如,可以尝试把其它抛光技术作为多模式组合加工工艺的组成部分之一,从而使其具有更强的模式及抛光参数选择能力。

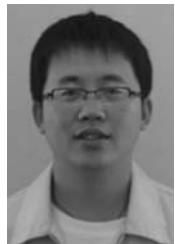
WANG Q D, YU J C, ZHANG F. Comparing the feature of small polishing tools in different movement style [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 73-80. (in Chinese)

[3] 焦长君,李圣怡,王登峰,等. 离子束加工光学镜面的材料去除特性[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(10): 1520-1526.

JIAO C J, LI S Y, WANG D F, et al.. Material removal property in ion figuring process for optical components [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1520-1526. (in Chinese)

- [4] WOOK D, KIM S W. Static tool influence function for fabrication simulation of hexagonal mirror segments for extremely large telescopes[J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 910-917.
- [5] 丁凌艳, 戴一帆, 陈善勇. 平面子孔径拼接测量技术[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 978-985.  
DING L Y, DAI Y F, CHEN S Y. Experiments of sub-aperture stitching interferometry for flat mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 978-985. (in Chinese)
- [6] STAHL H P. JWST mirror technology development results[J]. *SPIE*, 2007, 6671: 667102.
- [7] WALKER D D, BEAUCAMPA T H, DOUBROVSKI V, *et al.*. Commissioning of the first precessions 1.2 m CNC polishing machines for large optics[J]. *SPIE*, 2006, 6288: 62880P.
- [8] KELM A, BOERRET R, SINZINGER S. Modeling of the polishing process for aspheric optics [J]. *SPIE*, 2008, 7102: 71020H.
- [9] ARKWRIGHT J, BURKE J, GROSS M. A deterministic optical figure correction technique that preserves precision-polished surface quality[J]. *Optics Express*, 2008, 18(16): 13901-13907.
- [10] LI J F, XUAN B. Multi-mode combine manufacturing technology for large aperture aspheric mirrors [J]. *SPIE*, 2007, 6721: 67210W.

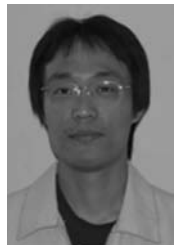
#### 作者简介:



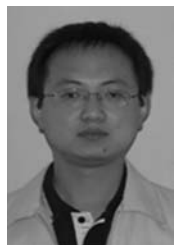
**李俊峰**(1980—),男,吉林长春人,博士研究生,2005年于长春理工大学获得学士学位,主要从事大口径非球面多模式组合加工技术的研究。E-mail: ljf220@sohu.com



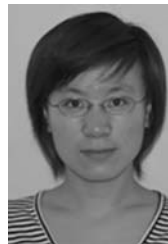
**陈亚**(1975—),男,辽宁新民人,助理研究员,1999年于长春光机学院获得学士学位,主要从事大尺寸光学元件轻量化技术方面的研究。E-mail: chenya@ciomp.ac.cn



**宣斌**(1983—),男,江苏南通人,博士研究生,2005年于浙江大学获得学士学位,主要从事光学检测及中频误差方面的研究。E-mail: xbjst@sina.com



**王朋**(1980—),男,河北保定人,博士研究生,2005年于河北工业大学获得学士学位,主要从事光学加工机械、抛光机械手等方面的研究。E-mail: wpeng605@126.com



**陈晓苹**(1983—),女,吉林四平人,博士研究生,2006年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学元件表面强化技术的研究。E-mail: chenxiaopingapple@163.com



**宋淑梅**(1963—),女,吉林人,研究员,硕士生导师,主要从事大口径非球面先进加工与检测技术方面的研究。E-mail: smsong@ciomp.ac.cn

#### 通信作者:



**谢京江**(1954—),男,北京人,研究员,博士生导师,主要从事先进光学精密加工与检测方面的研究。E-mail: jjxie@ciomp.ac.cn