

应用五轴离子束修正超高陡度镜面

马占龙 谷勇强 彭利荣 王高文

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 为了验证离子束修正超高陡度镜面的能力,对采用五轴离子束加工超高陡度镜面的问题进行了分析研究和加工实验。根据现有检测条件制定了实验方案并对面形数据进行了处理;对超过机床五轴加工摆轴行程区域的驻留时间进行了补偿;建立了离子束五轴加工后置处理算法,根据该算法编制了数控程序生成软件,并通过实验验证了生成的数控程序的正确性;最后进行了超高陡度镜面的五轴离轴加工实验,经过5轮迭代加工后,元件面形由初始的峰谷(PV)值为57.983 nm、均方根(RMS)值为9.406 nm,收敛PV值为11.616 nm,RMS值为1.306 nm,总收敛比达到7.20。实验结果表明:采用五轴离子束加工超高陡度镜面的方案可行,并且获得了较高的收敛效率和加工精度,同时验证了离子束离轴镜加工的可行性。

关键词 光学制造;离子束;超高陡度;面形修正

中图分类号 TH161;TQ171.6+ **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0622001

Ultra-Gradient Mirror Figuring by 5-Axis Ion Beam

Ma Zhanlong Gu Yongqiang Peng Lirong Wang Gaowen

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

Abstract In order to verify the machining capability of ultra-gradient mirror figuring by ion beam, the figuring of ultra-gradient mirror by 5-axis ion beam is investigated. First, based on the existence measure condition, the experiment scheme is presented and the surface figure data is processed. The dwell time of the area exceed the machine range is compensated. Then the post processing for 5-axis ion beam figuring machine is established, the numerical control generate software is programed based on the post processing, and the correctness of the numerical control program is verified through experiment. Finally, the off-axis figuring experiment of ultra-gradient mirror by 5-axis ion beam is carried out, and through five iterations, the surface figure is improved from initial condition: the peak valley (PV) value is 57.983 nm, the root mean square (RMS) value is 9.406 nm to final condition: PV value is 11.616 nm, RMS value is 1.306 nm. Convergence ratio reaches 7.20. The results indicate that ultra-gradient sphere mirror can be figured by 5-axis ion beam figuring machine to achieve high efficiency and precision, and the figuring of off-axis mirror by ion beam figuring is verified at the same time.

Key words optical fabrication; ion beam figuring; ultra-gradient; surface figuring

OCIS codes 220.4610; 220.5450

1 引 言

离子束修形作为一种非接触式光学加工方法,具有加工精度高、去除函数稳定、面形收敛速度快、无边缘效应和亚表面损伤等特点,广泛应用于超高精度光学元件的加工^[1-3]。

离子束修形同样采用了现代光学制造领域广为人知的计算机控制表面成型技术的基本理论,根据材料去除量精确控制离子束在光学元件不同位置处的运动轨迹和驻留时间来实现。材料去除量可以表示为去

收稿日期:2014-11-19;收到修改稿日期:2015-01-26

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介:马占龙(1983—),男,硕士,助理研究员,主要从事超高精度光学元件加工方面的研究。

E-mail: mzlcutmt@126.com

除函数和驻留时间的二维卷积,而材料去除量和去除函数均为已知量,驻留时间就可以通过反卷积计算求得^[4-7]。在离子束修形过程中,去除函数除了受到屏栅电压和电流等工艺参数的影响外,还与入射角度有关,对于平面和低陡度镜面,入射角不变或者变化很小,去除函数基本保持不变,采用三轴运动加工即可。而对于高陡度镜面,为了保证任意加工点处的入射角度不变,进而确保去除函数稳定,普遍采用五轴运动系统来控制离子源与光学元件之间的相对运动,使离子束能始终沿着光学元件表面法线方向入射。由于五轴运动系统的技术难度相比三轴系统要高,2008年德国IOM实验室的Haensel T等^[8]首先对采用线性三轴离子束系统修正高陡度曲面进行了研究,通过实验法获得了离子束去除效率同入射角度的变化关系,并建立了带有补偿系数的驻留时间模型,使用束径1.0 mm(半峰全宽)的离子束将一口径13.5 mm、曲率半径10.44 mm的凸球面镜的面形精度[均方根(RMS)值]由4.5 nm提升到了0.6 nm。2010年国防科技大学的廖文林等^[9]对不同入射角下离子束修形材料去除特性进行了理论分析和实验研究,确定了去除效率与入射角的非线性关系,提出了补偿面形误差和补偿驻留时间两种方式,通过实验将一口径21.3 mm、曲率半径16 mm的凸球面镜面形精度(RMS值)由13.1 nm提升到了5.9 nm。但是,上述实验均是在小口径元件上进行的,对于大口径超高陡度镜面的三轴加工,考虑到离子源结构尺寸和加工靶距的限制,在加工镜面边缘时可能出现离子源与镜面干涉的情况,此时,解决方案包括减小离子源结构尺寸、加大加工靶距或采用5轴加工方式。而本实验室现有一台五轴离子束加工机床,因此,本文将在不改变离子源结构尺寸和加工靶距的情况下采用五轴加工方式进行超高陡度镜面的加工实验,验证离子束修正超高陡度球面镜的能力。

2 超高陡度镜面五轴加工实验

2.1 实验方案

本实验室现有菲索干涉仪和子孔径拼接干涉仪两种面形检测手段,对于超高陡度镜面,菲索干涉仪受到 F 数更小的标准具的限制,而子孔径拼接干涉仪的检测精度又不高。因此,提出了如图1所示的实验方案,选取一小口径低陡度球面镜,采用菲索干涉仪正常检测,检测位置如图1(a)所示,保证检测精度,加工时将其镶嵌到的加工工装中,加工位置如图1(b)所示,此时即可获得超高陡度球面镜加工的实验效果。

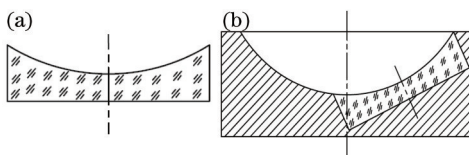


图1 实验方案示意图。(a)检测位置;(b)加工位置

Fig.1 Sketch of experiment scheme. (a) Position of measurement; (b) position of process

2.2 面形数据处理

由图1可知,加工坐标系和检测坐标系不同,因此需要将检测坐标系下的结果转换到加工坐标下,而离子束是沿法向方向去除误差高点的,在坐标变换过程中,只需考虑镜面各点坐标值的变换即可,面形误差本身不需要变换。建立如图2所示的检测和加工坐标变换示意图,其中 $Y'O'Z'$ 为检测坐标系, YOZ 为加工坐标系,对 $Y'O'Z'$ 进行旋转和平移得到元件在 YOZ 坐标系下的面形数据^[10-11]。

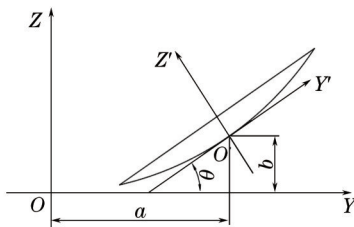


图2 检测和加工坐标变换示意图

Fig.2 Sketch of measurement and process coordinate transformation

设 O' 点在 YOZ 坐标系中的坐标为 (a, b) , $O'Y'$ 与 OY 的夹角为 θ ,则 $Y'O'Z'$ 坐标系下的任意点在 YOZ 坐标系下的坐标可以用以下坐标变换关系求得:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \text{Trans}(0, a, b) \cdot \text{Rot}(X, \theta) \cdot \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a \\ 0 & 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \cos \theta - Z' \sin \theta + a \\ Y' \sin \theta + Z' \cos \theta + b \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

实验用光学元件为一口径 105 mm、曲率半径-100 mm 的凹球面镜,初始面形检测结果如图 3(a)所示,峰谷(PV)值 57.983 nm、RMS 值 9.406 nm(100 mm 口径、1 mm 高通滤波、去毛刺)。工装设计完成后, $a=55.5$ mm、 $b=16.82$ mm, $\theta=33.71^\circ$,坐标变换后面形结果如图 3(b)所示,为一偏离中心的椭圆区域。

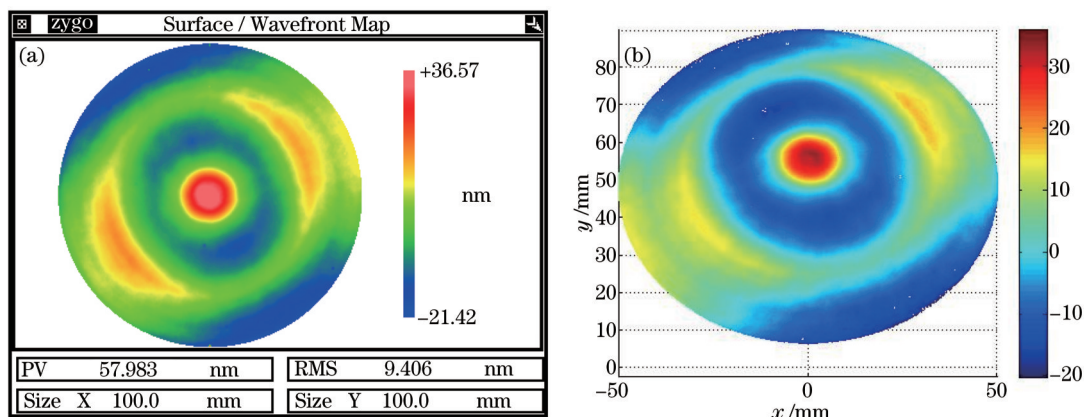


图 3 初始面形。(a) 检测结果; (b) 坐标变换后结果

Fig.3 Initial surface figure. (a) Result of measurement; (b) result after coordinate transformation

2.3 驻留时间补偿

图 4 为按实际尺寸绘制的 XOZ 平面内离子源摆角示意图,从图中可以看出实验要求机床转轴的运动范围能够达到 $2.04^\circ \sim 65.38^\circ$ ($a \sim d$ 点),而实验室现有离子束机床的 A, B 轴转角范围为 $\pm 30^\circ$,只能转到元件上 b 点所示的位置,对于 $b \sim d$ 点所对应的区域只能保持靶距 h 不变按 30° 进行加工,如 c 点所示,而此时由于离子源不再沿光学元件法线方向入射,去除函数将发生改变,导致求解的驻留时间存在问题,收敛效果变差。因此,需要对五轴加工中超过 $\pm 30^\circ$ 区域的驻留时间进行补偿。

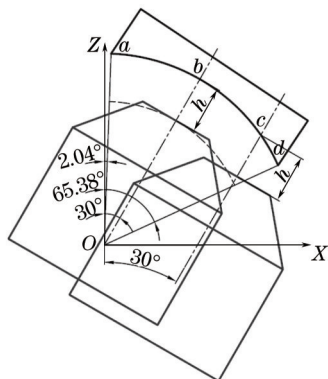


图 4 离子源摆角示意图

Fig.4 Swing angle of ion beam source

根据计算机控制表面成型理论,离子束的修形过程可以描述为^[9]:

$$H(x, y) = R(x, y) ** D(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x - x', y - y') D(x', y') dx' dy' \quad (2)$$

式中 $H(x,y)$ 为材料去除量, $R(x,y)$ 为离子束去除函数, $D(x,y)$ 为各点驻留时间。

由于光学元件的面形为离散点构成,(2)式可以离散为:

$$H(x,y) = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J R(x-x'_i, y-y'_j) D(x'_i, y'_j) \Delta x' \Delta y', \quad (3)$$

式中 I 和 J 为面形离散网络的数量。

通过(3)式求得的驻留时间仅适用于垂直入射或入射角较小的情况,即平面镜或低陡度球面镜。对于高陡度球面镜就需要对入射角引起的去除函数变化进行补偿,可以得到:

$$H(x,y) = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J R_{\theta}(x-x'_i, y-y'_j, \theta) D'(x'_i, y'_j) \Delta x' \Delta y' = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J K(\theta) R(x-x'_i, y-y'_j) D'(x'_i, y'_j) \Delta x' \Delta y'. \quad (4)$$

在离子源参数不变的条件下,去除速率只是入射角 θ 单一变量的函数,而当离子束沿平行光轴方向加工时,入射角 θ 只与点 (x,y) 的坐标有关,即对于加工点 (x,y) , $K(\theta)$ 为定值,并与驻留点无关,可以写为 $K(x,y)$,因此(4)式就可以简化为:

$$H(x,y) = K(x,y) \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J R(x-x'_i, y-y'_j) D'(x'_i, y'_j) \Delta x' \Delta y', \quad (5)$$

此时,对(2)式进行反卷积计算,得到未做角度补偿时的驻留时间分布,随后通过(5)式对得到驻留时间进行补偿:

$$D'(x,y) = D(x,y) / K(x,y). \quad (6)$$

本实验的离子源配置为 30 mm 栅网和 10 mm 光阑,选取的主要工艺参数为:屏栅电压 800 V、屏栅电流 25 mA、加速栅电压 100 V 和靶距 25 mm;在此条件下获得的去除函数如图 5(a)所示,其直径为 19.9 mm、半峰全宽为 7.81 mm、峰值去除率为 $0.315 \mu\text{m}/\text{min}$ 、体积去除率为 $20.4 \times 10^{-3} \text{mm}^3/\text{min}$ 。采用现有 IBFCAM 软件计算得到的第一轮驻留时间分布如图 5(b)所示,驻留时间总计 8.7 min。通过自行编制的驻留时间补偿软件计算得到的角度分布和补偿系数分布如图 6 所示,从图中可以看出摆角 30° 范围内对应的补偿系数为 1,超过 30° 的区域随着角度的增加,补偿系数增大。经补偿后的驻留时间分布如图 7 所示,驻留时间总计 8.03 min。

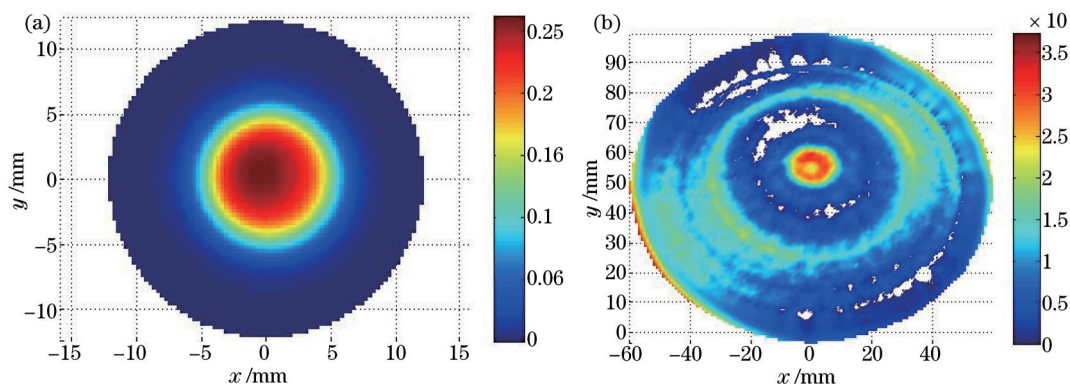


图 5 (a)去除函数及(b)第一轮驻留时间分布

Fig.5 (a) Removal function and (b) dwell time of the first round

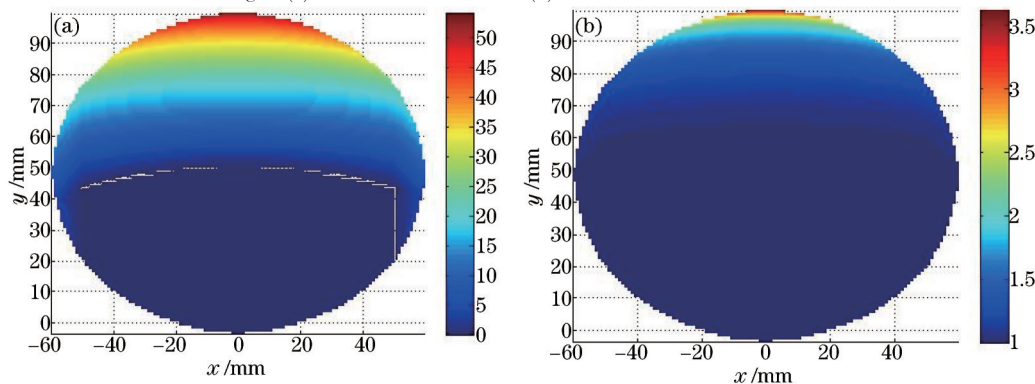


图 6 (a)角度及(b)补偿系数分布

Fig.6 Distribution of (a) angle and (b) compensation coefficient

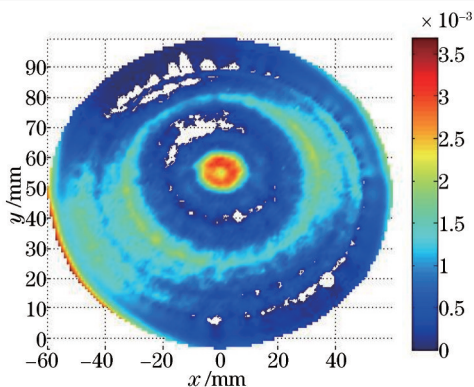


图 7 补偿后驻留时间分布

Fig.7 Dwell time distribution after compensation

2.4 五轴加工数控程序

2.4.1 五轴加工后置处理算法

现有IBFCAM软件无法生成图7驻留时间所示的离轴数控加工程序,必须重新编制数控程序生成软件控制离子束五轴加工过程中离子源的运动轨迹,将离子源的位置和方向矢量以及计算得到驻留时间转化为离子束机床的五轴加工数控程序,这就需要建立离子束五轴加工后置处理算法。

根据离子束机床结构及各运动轴定义建立如图8所示的机床坐标系,其中 $O_w X_w Y_w Z_w$ 为与工件固联的工件坐标系,计算得到的离子源位置数据在该坐标系中给出,其坐标方向与机床坐标系一致; $O_i X_i Y_i Z_i$ 为离子源坐标系,其原点为离子源顶点,其坐标方向与机床坐标系一致; $O_m X_m Y_m Z_m$ 为与A、B轴固联的坐标系,其原点 O_m 为A、B轴的交点,其坐标方向与机床坐标系一致。则其运动关系即离子源坐标系 $O_i X_i Y_i Z_i$ 相对于工件坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 的变换关系^[12]。

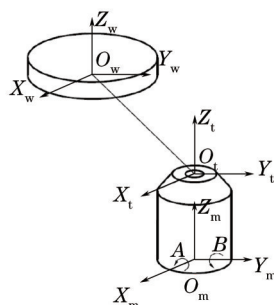


图 8 离子束机床坐标系

Fig.8 Coordinate of ion beam figuring machine

机床在初始状态时,A、B轴的转角为0,离子源坐标系原点与工件坐标系原点重合。设 O_i 与 O_m 的距离为 d ,在离子源坐标系中,抛光点的位置和离子源的方向矢量分别为 $[0\ 0\ 0]^T$ 和 $[0\ 0\ 1]^T$,当离子源从初始状态抛光到某一点时,机床平动轴相对于初始状态的位置为 (X, Y, Z) ,转轴A、B相对于初始状态的角度分别为 α 和 β ,此时,在工件坐标系中抛光点的位置和离子源的方向矢量分别为 $r_p(x_p, y_p, z_p)$ 和 $u(i, j, k)$ 。对机床运动链进行坐标变换,可得:

$$\begin{bmatrix} x_p & y_p & z_p & 1 \end{bmatrix}^T = T(r_s - d) \cdot R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot T(d) \cdot [0\ 0\ 0\ 1]^T, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i & j & k & 0 \end{bmatrix}^T = T(r_s - d) \cdot R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot T(d) \cdot [0\ 0\ 1\ 0]^T, \quad (8)$$

式中 T 和 R 分别为平移和回转运动的齐次坐标变换矩阵。

由(7)、(8)式可以得到离子束机床的运动变换为

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X + d \sin \beta \\ Y - d \sin \alpha \cos \beta \\ Z - d + d \cos \alpha \cos \beta \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \beta \\ -\sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

在实际加工过程中只需将光学元件的形状离散数据赋给 $r_p(x_p, y_p, z_p)$ 和 $u(i, j, k)$, 即可由上式求得满足加工要求的机床平动轴位移 X, Y, Z 和转轴角度 A, B :

$$\begin{cases} \alpha = -\arctan(j/k) \\ \beta = \arcsin(i) \\ X = x_p - d \sin \beta \\ Y = y_p + d \sin \alpha \cos \beta \\ Z = z_p + d - d \cos \alpha \cos \beta \end{cases}. \quad (11)$$

对于口径为 D , 曲率半径为 R 的凹球面方程为

$$z = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} - \sqrt{R^2 - (D/2)^2} \quad \left(-\frac{D}{2} \leq x \leq \frac{D}{2}, -\frac{D}{2} \leq y \leq \frac{D}{2}\right). \quad (12)$$

点 $r_p(x_p, y_p, z_p)$ 满足球面方程(12)式, 并且球面在该点法向量为

$$\left[F_x(x_p, y_p, z_p), F_y(x_p, y_p, z_p), F_z(x_p, y_p, z_p) \right] = \left(\frac{-x_p}{\sqrt{R^2 - x_p^2 - y_p^2}}, \frac{-y_p}{\sqrt{R^2 - x_p^2 - y_p^2}}, -1 \right), \quad (13)$$

$$(i, j, k) = \left(\frac{x_p}{R}, \frac{y_p}{R}, \frac{\sqrt{R^2 - x_p^2 - y_p^2}}{R} \right). \quad (14)$$

则抛光到凹面镜任意点时机床各轴的运动坐标为

$$\begin{cases} \alpha = -\arctan\left(y_p / \sqrt{R^2 - x_p^2 - y_p^2}\right) \\ \beta = \arcsin(x_p / R) \\ X = x_p - d \sin \beta \\ Y = y_p + d \sin \alpha \cos \beta \\ Z = z_p + d - d \cos \alpha \cos \beta \end{cases}. \quad (15)$$

2.4.2 数控程序验证实验

根据上述后置处理算法自行编制数控程序生成软件, 为了验证生成的数控程序的正确性, 以一口径 105 mm、曲率半径 291 mm 的熔石英凸球面镜为例进行了离子束五轴加工实验。经 4 轮调试、加工迭代, 实验结果如图 9 所示, 初始面形 PV 值为 111.708 nm、RMS 值为 10.765 nm, 加工后面形 PV 值为 30.126 nm、RMS 值为 0.718 nm, 收敛效果明显, 自行编制的数控程序生成软件可以用于高精度镜面的离子束加工。

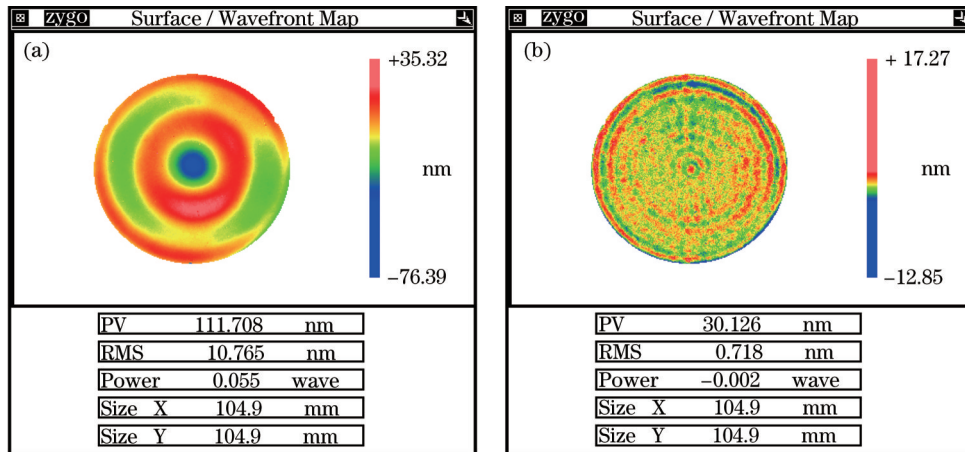


图 9 数控程序验证实验。(a) 初始面形; (b) 加工后面形

Fig.9 Demonstration test of numerical control program. (a) Initial surface figure; (b) surface figure after machining

2.5 实验结果

上述工作完成后即可进行超高陡度镜面的五轴加工实验,实验过程如图 10 所示,从图中可以看出实验过程为超高陡度离轴加工。经 5 轮迭代加工后实验结果如图 11 所示,面形收敛为 PV 值为 11.616 nm、RMS 值为 1.306 nm(100 mm 口径、1 mm 高通滤波、去毛刺),总收敛比达到 7.20。

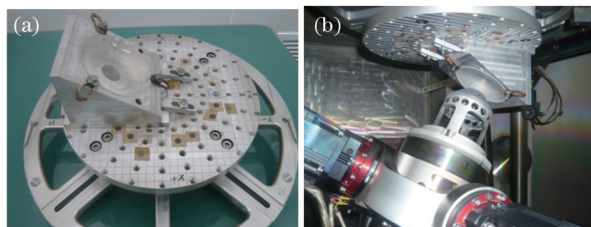


图 10 超高陡度镜面的五轴加工实验示意图。(a) 元件装夹;(b) 实验过程

Fig.10 Experiment of ultra-gradient mirror figuring by 5-axis ion beam. (a) Element clamping; (b) experiment process

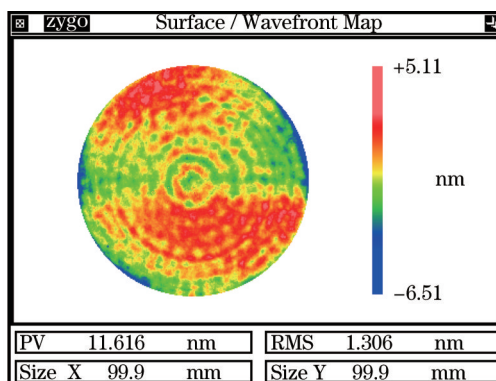


图 11 实验结果

Fig.11 Experiment result

3 结 论

本文对五轴离子束加工超高陡度镜面所涉及的问题进行了分析研究,采用对超过机床五轴加工摆轴行程区域的驻留时间进行补偿的方式进行了超高陡度镜面的五轴离轴加工实验,经过 5 轮迭代加工后,元件面形由初始的 PV 值为 57.983 nm,RMS 值为 9.406 nm;收敛 PV 值为 11.616 nm,RMS 值为 1.306 nm,总收敛比达到 7.20。实验结果表明:采用五轴离子束加工超高陡度镜面的方案可行,并且获得了较高的收敛效率和加工精度,同时验证了离子束离轴镜加工的可行性。

参 考 文 献

- 1 Dai Yifan, Zhou Li, Xie Xuhui, *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by ion beam[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1131-1135.
戴一帆,周 林,解旭辉,等.应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J].光学学报,2008,28(6):1131-1135.
- 2 Marcel D, Michael Z, Frank A, *et al.*. Ion beam figuring (IBF) for high precision optics[C]. SPIE, 2010, 7591: 75910Y.
- 3 Ma Zhanlong, Sui Yongxin. Large optical surface error figuring by ion beam[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0122001.
马占龙,隋永新.应用离子束修正大面积误差光学元件[J].光学学报,2014,34(1):0122001.
- 4 Liu Jian, Wang Shaozhi, Zhang Linghua, *et al.*. Computer control ultra-smooth polishing high order rotary symmetrical aspheric lens [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(8): 0816001.
刘 健,王绍治,张玲花,等.数控超光滑加工高次回转对称非球面镜[J].中国激光,2013,40(8):0816001.
- 5 Zhang Jian, Dai Lei, Wang Fei, *et al.*. Restraint of mid-spatial-frequency error aspheric surface by small-tool adaptive polishing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0822002.
张 健,代 雷,王 飞,等.小磨头自适应抛光抑制高精度非球面中频误差[J].光学学报,2013,33(8):0822002.
- 6 Liu Zhenyu, Luo Xiao, Deng Weijie, *et al.*. Multi-mode optimization for large optical aspheric mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2791-2797.

- 刘振宇, 罗 霄, 邓伟杰, 等. 大口径非球面的组合加工[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 2791-2797.
- 7 Li Longxiang, Deng Weijie, Zhang Binzhi, *et al.*. Dwell time algorithm for large aperture optical element in magnetorheological finishing[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0522001.
- 李龙响, 邓伟杰, 张斌智, 等. 大口径光学元件磁流变加工驻留时间求解算法[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0522001.
- 8 Haensel T, Nickel A, Schindler A. Ion beam figuring of strongly curved surfaces with a (x,y,z) linear three-axes system[C]. Optical Fabrication and Testing. Optical Society of America, 2008: JWD6.
- 9 Dai Yifan, Liao Wenlin, Zhou Lin, *et al.*. Ion beam figuring of high-slope surfaces based on figure error compensation algorithm[J]. Appl Opt, 2010, 49(30): 6630-6636.
- 10 Li Ruigang, Zheng Ligong, Zhang Feng, *et al.*. Computer controlled manufacturing during fine grinding stage of highly steep off-axis asphere with large aperture[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(5): 633-639.
- 李锐刚, 郑立功, 张 峰, 等. 大口径高陡度离轴非球面精磨阶段的数控加工[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 633-639.
- 11 Liao Wenlin, Dai Yifan, Zhou Lin, *et al.*. Ion beam figuring for rectangular off-axis aspheric mirrors[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(1): 100-104.
- 廖文林, 戴一帆, 周 林, 等. 离子束抛光加工矩形离轴非球面镜[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(1): 100-104.
- 12 Song Ci, Dai Yifan, Peng Xiaoqiang, *et al.*. Post processing for magnetorheological finishing of optical mirrors[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1715-1721.
- 宋 辞, 戴一帆, 彭小强, 等. 光学镜面磁流变抛光的后置处理[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1715-1721.

栏目编辑: 韩 峰