

数控超光滑加工高次回转对称非球面镜

刘 健 王绍治 张玲花 王君林

(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 为了实现高次回转对称非球面的全口径超光滑加工,对磨头的运动控制算法进行了研究。介绍了超光滑加工的基本原理以及相应数控机床的机构,并对其光学表面的创成方式进行了描述。为了精确控制磨头的运动轨迹,提出了非球面驻留点的等误差递推求解算法进而分析了轨迹误差。计算了磨头位于不同位置时去除率的分布情况,并建立了驻留时间数学求解模型。在自研设备上对口径为 150 mm,非球面度为 $116 \mu\text{m}$ 的样件进行了超光滑加工。表面粗糙度方均根值由 $1.523 \pm 0.045 \text{ nm}$ 降低至 $0.399 \pm 0.0238 \text{ nm}$ 且分布均匀。实验结果表明,利用该算法可以精确控制磨头的运动轨迹,从而保证表面粗糙度的均匀一致。

关键词 光学制造;超光滑表面;磨头控制算法;非球面

中图分类号 TH161 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0816001

Computer Controlled Ultra-Smooth Polishing High Order Rotary Symmetrical Aspheric Lens

Liu Jian Wang Shaozhi Zhang Linghua Wang Junlin

(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 realize full aperture ultra-smooth polishing on the high order rotary symmetrical aspheric surface, the polishing head controlling algorithm is studied. The basic theory of ultra-smooth polishing technology and the computer numerical control machine mechanism are introduced. And the optical surface generating method is also described. Then, a kind of equal error recurrence algorithm is proposed which is used in solving dwell points and controlling polishing head path. And the path error is also analyzed. The polishing removal rate distribution of different positions is calculated and the dwell time mathematical solving model is established. Finally, an experiment for polishing an aspheric lens with a aperture of 150 mm and a asphericity of $116 \mu\text{m}$ is carried out on the self-research machine. The root-mean-square of surface roughness is reduced from $1.523 \pm 0.045 \text{ nm}$ to $0.399 \pm 0.0238 \text{ nm}$. The result indicates that the algorithm described in this paper could improve the precision of asphere polishing path and the uniformity of the roughness distribution.

Key words optical fabrication; ultra-smooth surface; polishing head controlling algorithm; aspheric surface

OCIS codes 220.4610; 220.1250; 220.5450; 240.5770

1 引言

光学和微电子技术的不断发展,对光学元件的表面质量提出了越来越高的要求。例如工作波长在短波波段的光学系统,要求光学元件要具有极高的面形精度和极低的表面粗糙度(超光滑表面)以达到良好的成像质量^[1-3]。另外,由于非球面元件具有提高系统的成像质量、矫正多种像差、提高系统鉴别能力及光学性能等诸多优点,在光学设计时得到了

广泛应用^[4-6]。综上所述,超光滑表面加工技术,特别是非球面元件的超光滑加工技术逐渐成为一个亟待解决的问题。

结合浮法抛光技术^[7]、射流抛光技术^[8]及传统小工具抛光技术^[9]的优点开展了微射流超光滑加工技术的研究并自行研制了相应的超光滑加工机床^[10]。超光滑加工工艺作为光学元件加工工艺路线的一个关键环节,其基本工艺要求是降低光学元

收稿日期: 2013-02-06; 收到修改稿日期: 2013-03-22

基金项目: 国家科技重大专项项目(2009ZX02205)

作者简介: 刘 健(1983—),男,硕士,助理研究员,主要从事超光滑表面加工技术方面的研究。

E-mail: emailtolijian@126.com

件表面粗糙度且保证粗糙度分布均匀一致,这要求抛光过程中磨头轨迹控制精确且不同位置处的材料去除稳定均匀^[11]。

本文在超光滑加工工艺特点及相应表面创成方式的基础上,研究了实现回转对称高次非球面光学元件超光滑加工的磨头运动控制问题。为了精确控制磨头的运动轨迹,提出了非球面驻留点的递推求解算法并对其路径误差进行分析。同时,研究了磨头位于不同位置时的去除率分布情况并建立了求解驻留时间的数学模型。

2 加工原理及表面创成方式

2.1 加工原理

超光滑加工的基本原理如图 1 所示:抛光液以射流的方式从磨头底部的微孔流出后沿径向流动,磨头高速旋转带动抛光液运动产生的动压力使磨头与光学表面之间产生数微米的液膜间隙。抛光液的动压力带动磨料微粒在液膜中运动并不断碰撞工件表面的微观隆起,工件表面原子在磨料微粒的撞击作用下脱离工件主体,从而实现光学表面微观不平部分分子级甚至原子级去除。

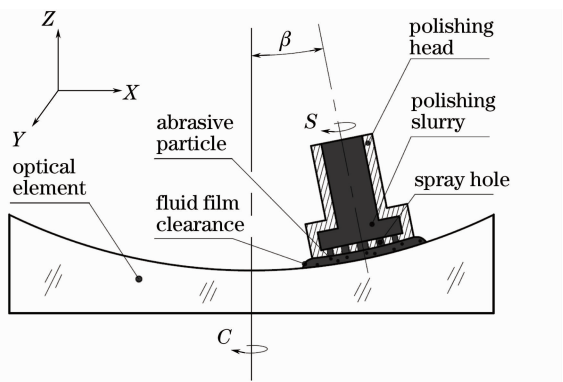


图 1 超光滑加工原理图

Fig. 1 Schematic of ultra-smooth polishing

2.2 表面创成方式

超光滑加工机床为三轴联动数控机床,其机构如图 2 所示。机床可控轴为线性轴 X 轴、Z 轴、绕 Y 轴方向摆动的 B 轴、绕 Z 轴方向转动的 C 轴及电主轴。工件装卡在工作台上,在 C 轴带动下以设定速度匀速旋转;磨头安装在电主轴轴端,加工过程中以设定旋转速度 C_p 匀速;线性轴 X、Z 及摆动轴 B 为联动轴。通过 X 轴及 Z 轴在水平和垂直方向的运动带动磨头按照被加工件的母线形状运动,同时控制 B 轴角度从而创成出被加工光学表面。

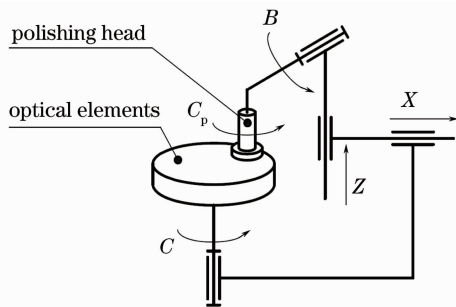


图 2 超光滑机床机构简图

Fig. 2 Mechanism sketch of ultra-smooth polishing machine

对于回转对称非球面,磨头的运动轨迹即为非球面母线,

$$z = f(x) = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + \sum_{i=2}^n \alpha_i x^{2i}, \quad (1)$$

式中 $c = 1/R_0$ 为顶点曲率, R_0 为顶点曲率半径。 k 为圆锥系数, $k < -1$ 时为双曲面; $k = -1$ 时为抛物面; $-1 < k < 0$ 时为椭球面; $k = 0$ 时为球面; $k > 0$ 时为扁椭球面。

如图 1 所示,磨头位于某一驻留点时,摆轴的运动角 β 等于该点的切线与 X 轴正向的夹角。对(1)式求导,可得非球面任意一点斜率

$$\kappa(x) = f'(x) = \frac{c^3 x^3}{[1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}]^2 \cdot \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + \frac{2cx}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + 2 \sum_{i=2}^n i \alpha_i x^{2i-1}. \quad (2)$$

根据(2)式可得磨头位于任意位置处时摆轴的摆动角为 $\beta = \arctan \kappa(x)$ 。

为保证去除量稳定,需要精确控制机床的 X、Z 及 B 轴运动量,使得磨头轴线与被加工件法线时刻保持一致。同时精确控制磨头进给速度以保证表面较为均匀地去除从而控制表面各点粗糙度的均匀性。

3 非球面驻留点精确求解

3.1 驻留点求解

磨头的运动轨迹为非圆曲线,可采用等误差弦线递推计算的方式求解其轨迹驻留点,驻留点间采用直线逼近的方式。弦高误差 δ 定义为连接非球面母线

上任意相邻两驻留点的直线段 $P_i P_{i+1}$ 与该段非球面母线 $f(x)$ 最大距离。为便于后文的描述,首先分析圆弧情况下的弦高误差。由解析几何理论可知弦高

$$\delta = R \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right), \quad (3)$$

式中 R 为曲率半径, θ 为该圆弧的圆心角。变换(3)式可得到

$$\theta = 2 \arccos \left(1 - \frac{\delta}{R} \right). \quad (4)$$

(4)式表明弦高误差一定的情况下,圆心角 θ 为曲率半径 R 的单调递减函数。进一步地,可分析非球面母线的情况。图 3 为驻留点求解原理图,非球面上的任意一点 $P_i(x, y)$, 其法线 l_i 与光轴 OZ 的交点 O_i 即为该点曲率圆的圆心。曲率圆的曲率半径

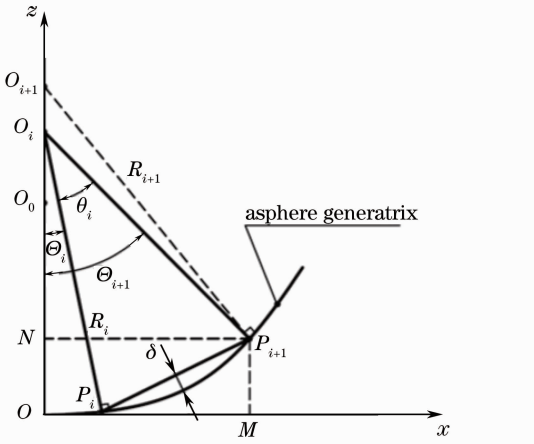


图 3 驻留点求解原理图

Fig. 3 Schematic of solving dwell points

$$R_i = |P_i O_i| = \sqrt{x_i^2 + [b_i - f(x_i)]^2}, \quad (5)$$

式中 b_i 为曲率圆圆心的纵坐标,

$$b_i = f(x_i) - v_i x_i = f(x_i) + \frac{x_i}{\kappa(x_i)}, \quad (6)$$

式中 v_i 为法线 l_i 的斜率, $\kappa(x_i)$ 为当前点切线斜率。

根据(5)式及(6)式可以得到非球面任意位置处的曲率半径

$$R_i = \begin{cases} \frac{1}{c}, & x_i = 0 \\ \sqrt{x_i^2 + \left[\frac{x_i}{f'(x_i)} \right]^2}, & 0 < x_i \leq \frac{D}{2} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 D 为口径。根据(7)式得出非球面各位置处的曲率半径 R_i 随 x 的变化规律,如图 4 所示。由图 4 可知,非球面母线上各点的曲率半径是关于 x 的递减函数。

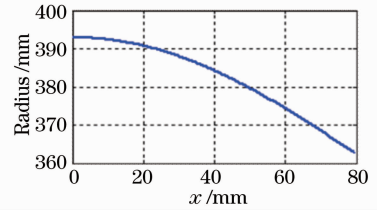


图 4 非球面曲率半径分布

Fig. 4 Radius distribution of aspheric surface

(4)式及(7)式的单调性表明,点 P_i 对应的圆心角 θ_i 小于点 P_{i+1} 对应的圆心角 θ_{i+1} 。因而可以根据 P_i 预测 P_{i+1} ,同时保证微弧 $P_i P_{i+1}$ 的误差 $\epsilon_i \leq \delta$ 。进而可以由工件中心至边缘递推各驻留点位置,并保证精度。综上,求解驻留点的递推算法求解流程如图 5 所示。

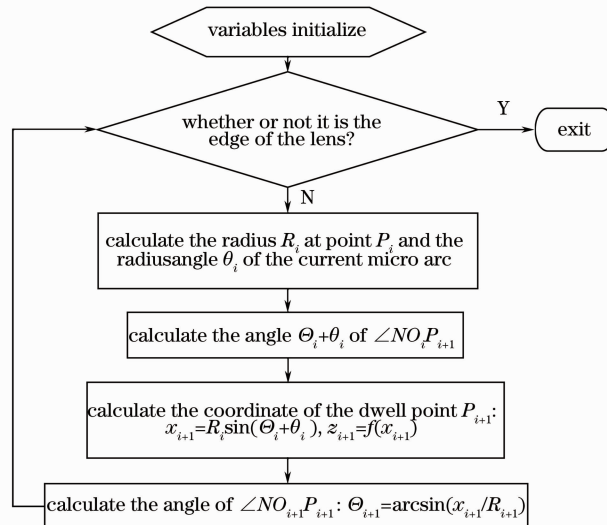


图 5 驻留点递推算法流程

Fig. 5 Process of the dwell points recursion algorithm

3.2 轨迹误差分析

图6为非线性误差的描述, P_i 和 P_{i+1} 为相邻两驻留点, $P(\tau)$ 为理想直线插补路径。三轴联动时, 由于摆转轴 B 的原因磨头在两相邻驻留点间并不能时刻与工件垂直, 从而形成线性插补路径 $P'(\tau)$ 。因而, 磨头的运动轨迹误差 E 中除了存在

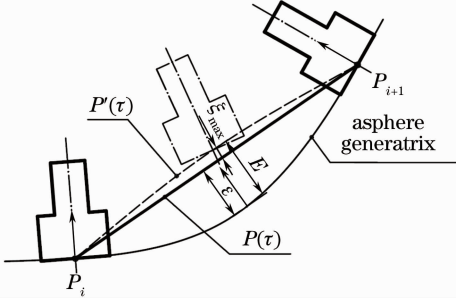


图6 非线性误差描述

Fig. 6 Expression of non-linear error

3.1 节中驻留点求解时的线性误差之外, 还存在非线性误差 ξ 。线性误差 ϵ 可以按照其最大值 δ 来估算, 下面着重定量分析非线性部分。

非线性误差为曲线 $P'(\tau)$ 上的点到直线 $P(\tau)$ 的最大距离, 定义为

$$\xi = \min \| P'(\tau) - P(\tau) \|_2. \quad (8)$$

为定量计算非线性误差, 需要通过后置处理计算将磨头位姿信息转换至机床坐标系。其推导过程可以参考文献[12], 由于篇幅的限制不再赘述。设摆轴长度为 L , 某一时刻摆轴角度为 β 。则可通过

$$\begin{cases} x_m = x - L \sin \beta \\ z_m = z + L \cos \beta \end{cases}, \quad (9)$$

将磨头中心点的移动量转化为摆轴中心的移动量 (x_m, z_m) 。

另设两驻留点间的驻留时间为 t_i , 则程序执行期间 τ 时刻的机床的坐标值为

$$\begin{cases} x'_m(u) = x_{m,i} + (x_{m,i+1} - x_{m,i})u \\ z'_m(u) = z_{m,i} + (z_{m,i+1} - z_{m,i})u, \quad u = \frac{\tau}{t_i}, \quad 0 \leq u \leq 1. \\ b'(u) = b_i + (b_{i+1} - b_i)u \end{cases} \quad (10)$$

根据(9)式和(10)式以及(8)式描述的非线性误差计算原理, 即可以计算出磨头轨迹误差。图7为编程允差 $\delta = 1 \mu\text{m}$ 时截取的一段误差分布图。由图7可知, 轨迹误差 $E < 1.15 \mu\text{m}$, 其中最大非线性误差 $\xi_{\max} < 0.15 \mu\text{m}$ 且随驻留点位置变化增幅很小。另外, 当编程允差 δ 减小时, 总轨迹误差可以控制到更小, 因而可以满足工艺要求。

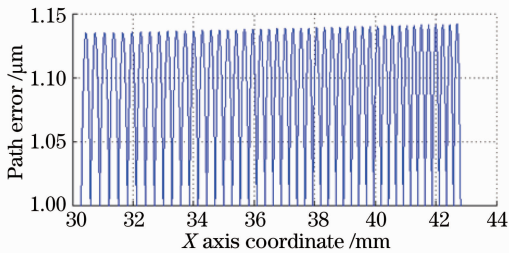


图7 轨迹误差分布情况

Fig. 7 Distribution of path error

作台上, C 轴以角速度 ω_1 匀速旋转; 磨头以角速度 ω_2 匀速旋转。当磨头驻留在工件某一点时, 磨头与工件二者的运动构成行星式运动关系。

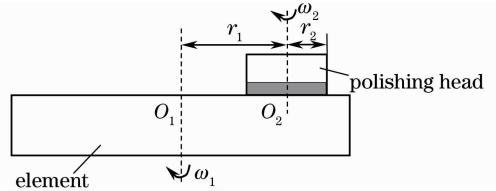


图8 磨头与工件运动关系

Fig. 8 Kinematic relationship between polishing head and optical element

文献[9]给出了类似运动方式下的磨头去除率函数,

$$R(r) = \frac{\eta P r_2 \omega_1}{2\pi}.$$

$$\int_{-\theta_0}^{\theta_0} [\gamma^2 (1+n)^2 + s^2 e^2 - 2kse(1+s) \cos \theta]^{1/2} d\theta, \quad (11)$$

式中 η 为工艺参数, P 为磨头与工件之间的压强, r_1 为公转半径, r_2 为磨头半径, $s = \omega_2/\omega_1$ 为转速比, $e = r_1/r_2$ 为偏心率, $\gamma = r/r_2$, 积分上限 θ_0 的取值为

4 去除率计算及驻留时间优化

4.1 去除率计算

为了控制材料的去除量保证全口径粗糙度的均匀性, 还需进一步控制磨头的运动速度。图8为的磨头与工件运动关系图, 加工过程中工件装卡在工

$$\theta_0 = \begin{cases} \pi, & r_1 \leq r_2 \text{ and } r \leq r_2 - r_1 \\ 0, & r_1 > r_2 \text{ and } r < r_2 - r_1 \\ \arccos\left(\frac{r_1^2 + r^2 - r_2^2}{2r_1 r}\right), & \text{others} \end{cases} \quad (12)$$

按照第 2 节所述的表面创成方式,磨头位于母线上不同驻留点时构成了一组偏心率 e 随驻留位置变化的行星运动。图 9 为磨头位于不同驻留点时的归一化去除率曲线(转速比 $n = -6$, 偏心率 $e \in [0, 6]$)。

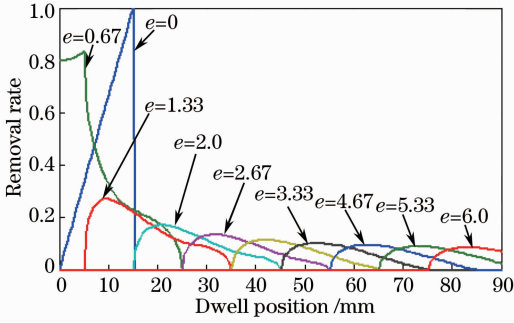


图 9 磨头去除率曲线
Fig. 9 Removal rate curves

4.2 驻留时间求解

由图 9 可知,磨头位于不同驻留点的去除率函数是不同的,因此需要对磨头位于不同位置处的驻留时间进行计算,从而实现整个面的去除量的均匀一致。记磨头中心位于驻留点 r_i 时,磨头对于工件上各点的去除率为 $R_i(r)$, 将其写为矩阵形式为 $\mathbf{R}_i = [R_{i1} \cdots R_{iM}]'$, $i = 1, \dots, N$, 其中 N 为驻留点数, M 为计算点数。设不同位置处的驻留时间向量为: $\mathbf{T} = [t_1 \cdots t_N]'$ 。因此,磨头沿母线方向的去除量 $\mathbf{H} = [h_1 \cdots h_M]'$ 可以描述为

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{M1} & \cdots & R_{MN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_N \end{bmatrix}, \quad (13)$$

可简记为矩阵方程 $\mathbf{H} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{T}$ 。由于上述方程往往不存在精确解,因而需要计算其近似解使得残余误差 $\mathbf{E} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{T} - \mathbf{H}$ 的方均根值(RMS) 最小。可以描述为带非负约束(\mathbf{T} 为非负矩阵)的最小二乘优化问题^[13]:

$$\begin{cases} \min \|\mathbf{H} - \mathbf{R} \cdot \mathbf{T}\|_2 \\ \mathbf{T} \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

超光滑加工采用的加工方式为均匀去除方式,其目标去除量 \mathbf{H} 为常量。使用非负最小二乘算法即可得到驻留时间 \mathbf{T} 。得到磨头不同位置时的驻留时间需要进行滑动平均处理。最后,可计算出磨头的进给速度

$$v = \begin{cases} v_{\max}, & t = 0 \\ \frac{d}{t}, & t > 0 \end{cases}, \quad (15)$$

式中 v_{\max} 为超光滑机床限定的最高速度; d 为驻留时间计算时的采样间隔。由于驻留点网格与采样点网格不一致,因此 3.1 节中计算得到的驻留点需通过插值计算映射至采样点网格。

5 超光滑加工实验

为了验证算法的正确性和有效性,在自行研制的超光滑加工机床上对口径 $D=150$ mm、顶点曲率半径 $R_0=392.9465$ mm、最大非球面度为 $116 \mu\text{m}$ 、 $k=0, n=7$ 的高次非球面进行了超光滑加工实验。加工时磨头与工件轴转速比为 $6:1$, 编程允差为 $0.1 \mu\text{m}$, 驻留点数为 1250。加工前粗糙度均方根偏差为 $R_q=1.523 \pm 0.045$ nm (Zygo NewView700 型白光干涉仪, $10\times$ 物镜, 4 次相位平均)。图 10(a) 为其典型表面微观形貌, 由图 10(a) 可知, 样品表面存在非常明显的纵横交错的划痕。

经过几轮超光滑抛光, 样品典型的微观形貌演如图 10(b) 所示。由图 10(b) 可知, 样品表面纵横交

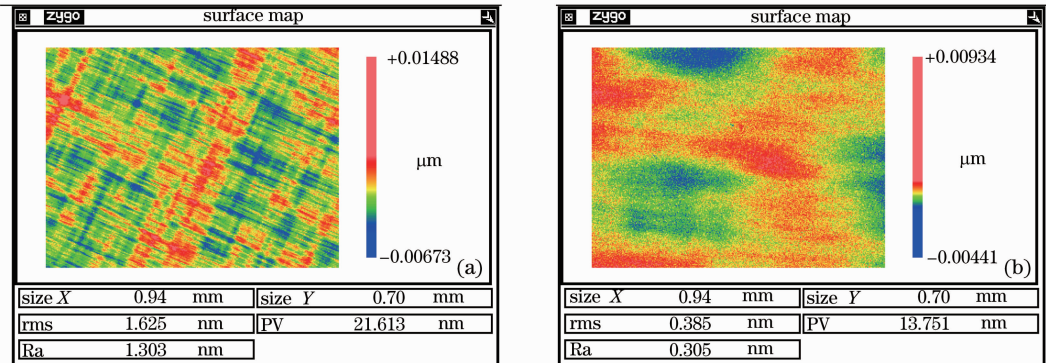


图 10 加工前后典型表面形貌。(a) 抛光前; (b) 抛光后

Fig. 10 Typical surface topography before and after polishing. (a) Before polishing ; (b) after polishing

错的划痕完全消失,呈现出较为光滑细腻的表面形貌。为了评价加工后样品表面粗糙度及其均匀一致性,在全口径范围按 4×4 网格方式均匀选取16个区域进行采点测量,每个区域随机采样5个点并计算粗糙度的平均值及标准差。图11为非球面全口径范围内的粗糙度分布情况。经统计计算,加工后样品表面的粗糙度为 $R_q = 0.399 \pm 0.0238$ nm。

图12为该非球面加工前后的面形检测结果(Zygo Veri Fire),RMS分别为4.311 nm和7.375 nm。由图12可知,样件加工前的中高频成分在加工后基本被去除。经分析,面形误差的微小变化是加工、检测过程的重复装夹误差等因素造成,

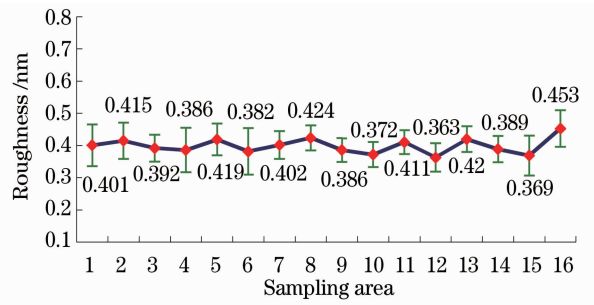


图 11 加工后表面粗糙度分布

Fig. 11 Distribution of roughness after polishing

该变化量在工艺允许范围内可以通过离子束修形工艺进行修正。

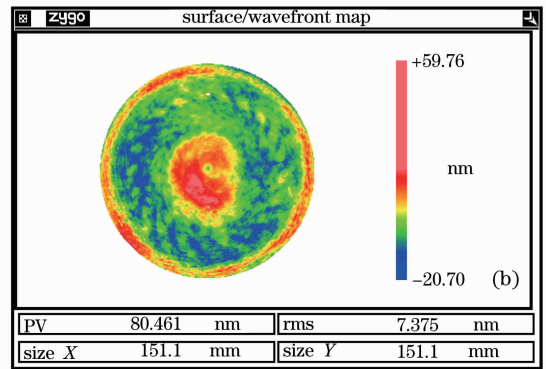
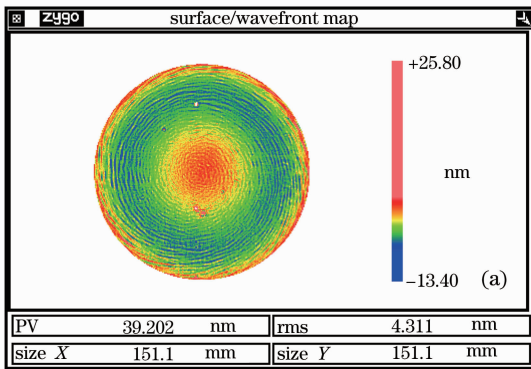


图 12 加工前后面形。(a) 抛光前;(b) 抛光后

Fig. 12 Surface map before and after polishing. (a) Before polishing ; (b) after polishing

6 结 论

针对非球面光学元件超光滑加工的磨头运动路径控制问题,提出了非球面母线驻留点递推求解算法。该算法可以精确控制磨头的运动轨迹。为了控制超光滑后光学表面粗糙度的均匀性,对磨头位于不同驻留点位置时的去除率进行了模拟计算,继而在此基础上建立驻留时间矩阵方程求解模型以用非负最小二乘算法求解。基于上述算法,在自研的超光滑加工机床上进行验证实验并获得了超光滑非球面表面。此非球面镜口径为150 mm,非球面度为 $116 \mu\text{m}$ 。经过超光滑抛光,表面粗糙度RMS由1.523 nm降低至0.399 nm且粗糙度分布较为均匀;面形误差RMS由4.311 nm变为7.375 nm,该变化量可在后续的离子束工艺中进行修正。

参 考 文 献

1 Ma Zhanlong, Liu Jian, Wang Junlin. Development and application of ultra-smooth optical surface polishing technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 082202.
马占龙, 刘 健, 王君林. 超光滑表面加工技术发展及应用[J].

激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 082202.

2 Jin Jingcheng, Jin Chunshui, Deng Wenyuan, *et al.*. Testing method for optical supersmooth substrate surface by atomic force microscopy[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1108003.
靳京城, 金春水, 邓文渊, 等. 超光滑光学基底表面原子力显微镜测试方法[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1108003.
3 Yang Lin, Zheng Xianliang, Chen Bo. Calculation of resolution for EUV telescope based on surface roughness of mirrors[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(11): 2565-2572.
杨 林, 郑贤良, 陈 波. 基于反射镜表面粗糙度计算极紫外望远镜分辨率[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2565-2572.
4 Wang Xiaokun. Fabrication and testing of large aperture off-axis aspheric mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 011201.
王孝坤. 大口径离轴碳化硅非球面反射镜加工与检测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 011201.
5 Pan Ri, Yang Wei, Wang Zhenzhong, *et al.*. Controlled bonnet polishing system for large aspheric lens[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1344-1348.
潘 日, 杨 炜, 王振忠, 等. 大口径非球面元件可控气囊抛光系统[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1344-1348.
6 Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Testing convex asphere by subaperture stitching interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2022-2026.
王孝坤, 郑立功, 张学军. 子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2022-2026.
7 Gao Honggang, Cao Jianlin, Chen Xingdan. Float polishing Subnanometer-Smooth surface[J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15

- (6); 824-825.
- 高宏刚, 曹建林, 陈星旦. 浮法抛光亚纳米级光滑表面[J]. 光学学报, 1995, 15(6): 824-825.
- 8 Fang Hui, Guo Peiji, Yu Jingchi. Analysis of material removal mechanism in fluid jet polishing by finite element method[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(2): 218-223.
- 方 慧, 郭培基, 余景池. 液体喷射抛光技术材料去除机理的有限元分析[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(2): 218-223.
- 9 Dai Yifan, Shang Wenjin, Zhou Xusheng. Effect of the material of a small tool to the removal function in computer control optical polishing[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(2): 97-101.
- 戴一帆, 尚文锦, 周旭升. 计算机控制小工具抛光技术中磨盘材料对去除函数的影响[J]. 国防科学技术大学学报, 2006, 28(2): 97-101.
- 10 Li Xianling. Design of CNC non-contact super-smooth polishing machine for optical component [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(4): 719-726.
- 李显凌. 数控非接触式超光滑光学元件加工机床的设计[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(4): 719-726.
- 11 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(8): 0822003.
- 12 Peng Fangyu, Ma Jiyang, Wang Li, *et al.*. Post-processing algorithm based on total differential method for multi-axis machine tools with arbitrary Configuration [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 42(13): 121-126.
- 彭芳瑜, 马吉阳, 王 力, 等. 任意结构多轴数控机床后置处理的全微分求解算法 [J]. 机械工程学报, 2012, 42(13): 121-126.
- 13 Zhang Yunfei, He Jianguo, Wang Yajun, *et al.*. Analysis of dwell time algorithm based on optimization theory for computer controlled optical surfacing[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3239-3244.
- 张云飞, 何建国, 王亚军, 等. 计算机控制光学抛光驻留时间求解中两类优化算法的分析[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3239-3244.

栏目编辑: 张 腾