

文章编号 1004-924X(2010)08-1715-07

光学镜面磁流变抛光的后置处理

宋 辞,戴一帆,彭小强,石 峰

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要:分析了自行研制的磁流变抛光机床 KDMRF-1000 的拓扑结构以及坐标变换关系,对其进行了运动求解,建立了光学镜面的磁流变抛光后置处理算法模型。针对机床四轴联动的特点,对建立的磁流变抛光后置处理模型进行了近似处理。以球面镜的后置处理为例,推导了具有普适性的以光栅扫描方式加工光学镜面的后置处理算法,同时分析了这种近似处理引入的误差,仿真了其对不同口径和不同相对口径球面镜的影响,得到了这种近似处理算法对球面镜的加工范围。最后,对一块口径为 200 mm,相对口径为 1:1.6 的 K9 材料球面镜进行了磁流变抛光实验,在不考虑边缘效应的情况下其面形误差的 PV 值和 RMS 值分别达到了 65 nm 和 9 nm 以下,有效地验证了后置处理算法模型的准确性以及四轴联动近似处理的可行性。该算法对各类形状和大小光学镜面加工均有参考意义。

关键词:光学镜面;磁流变抛光;后置处理;四轴联动

中图分类号:TQ171.684 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101808.1715

Post processing for magnetorheological finishing of optical mirrors

SONG Ci, DAI Yi-fan, PENG Xiao-qiang, SHI Feng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The topological structure and coordinate transformation of Magnetorheological Finishing (MRF) machine tool KDMRF-1000 were analyzed and its kinematics was calculated, then the post processing algorithm model of MRF for an optical lens was established. According to the characteristic of four-axis linkage machine tool, the model was treated approximately. By taking the post processing of a spherical lens as an example, a post processing algorithm that can be used for a raster tool path was deduced and the errors imported by this approximate treatment were analyzed. By simulating the effect of the algorithm on the spherical lenses with different apertures and relative apertures, the polishing range of this algorithm was achieved. Furthermore, a spherical part (K9, 200 mm in diameter, $f=640$ mm) was polished by MRF, experimental results show that obtained errors are less than 65 nm PV and 9 nm RMS in excluding the edge effect. This experiment proves the veracity of post processing algorithm and the feasibility of four-axis linkage approximate treatment. The work done in this paper has an important purpose for polishing the optical lenses with different apertures and shapes.

Key words: optical mirror; Magnetorheological Finishing (MRF); post processing; four-axis linkage

收稿日期:2009-11-05;修订日期:2010-01-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50775215, No. 50875256);国防科技大学研究生创新资助项目(No. B090302)

1 引言

20 世纪 70 年代,前苏联传热传质研究所的 W. I. Kordonski 提出将磁流变液应用于机械加工,90 年代,W. I. Kordonski 与美国 Rochester 大学光学制造中心合作并提出了确定性磁流变抛光技术。磁流变抛光技术是将电磁学、流体动力学理论以及分析化学相结合而提出的一种光学零件加工方法,该技术利用磁流变抛光液在磁场中的流变性对工件进行抛光^[1-5]。磁流变液在抛光轮的转动下被循环带入抛光区域,在该区域,磁流变抛光液在高强度的梯度磁场的作用下,成为具有粘塑性的 Bingham 介质,变硬,粘度变大,形成具有一定形状的“柔性抛光模”(磁流变抛光液在磁场中形成的凸起缎带),当“柔性抛光模”流经工件与运动盘形成的小间隙时,工件表面会产生很大的剪切力,从而实现对其表面材料的去除^[6-10]。

作为一种新的确定性去除方法,磁流变抛光技术综合了磁流变液循环控制、数控技术以及计算机控制光学表面成形等诸多技术。为了保证去除函数在光学零件上进行准确驻留,必须使去除函数在光学零件表面具有准确的定位,因此数控技术对加工高精度的光学零件起着至关重要的作用。通常,进行磁流变抛光时要保持去除函数的形状和大小的相对稳定性,才能确保光学材料表面的确定性去除,这就要求磁流变抛光液同光学零件之间始终保持一致的截流状态。正因为这样,对不同形状的光学零件,就需要抛光轮能够实时地适应光学零件的面形,使得抛光轮的抛光轴的方向处于抛光点的法线方向上。基于这样一种考虑,机床的后置处理算法就成为实现确定性磁流变抛光技术的一个重要基础,它对提高机床控制精度,控制去除函数稳定性以及提高抛光面形精度都具有非常重要的作用。

本文基于自行研制的磁流变抛光机床 KDMRF-1000,通过建立机床的坐标变换关系对机床进行了运动求解,推导了进行光学镜面磁流变抛光的后置处理算法模型。由于受机床实际数控系统联动轴数的限制,磁流变抛光机床只能采用四轴联动近似来实现不同光学零件的面形插补。本

文以球面镜的后置处理为例,对四轴联动近似处理引入的误差进行了详细分析,得出了采用这种近似处理进行球面镜磁流变抛光的加工范围,最后经过实际的球面镜磁流变抛光实验,验证了这种近似处理算法的可行性。该算法对加工各类形状和大小的光学零件都具有重要的参考价值和指导意义。

2 机床运动求解

2.1 磁流变抛光机床坐标系的建立

分析磁流变抛光机床 KDMRF-1000 的结构,可以看出其抛光轮的两条摆动轴线在空间是相互垂直的。为了描述磁流变抛光机床的运动,建立如图 1 所示的机床坐标系,其中坐标系 $OXYZ$ 为机床坐标系,坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 为与工件固联的工件坐标系,抛光轮的走位数据在该坐标系中给出; $O_t X_t Y_t Z_t$ 为与抛光轮固联的坐标系,称为抛光轮坐标系,其原点设在抛光轮的最低点,坐标轴方向与机床坐标系一致; $O_b X_b Y_b Z_b$ 为与回转轴 B 固联的坐标系,其坐标轴方向与机床坐标系一致,原点 O_b 为回转轴 A 在 $O_b X_b Y_b Z_b$ 上的投影与回转轴 B 的交点; $O_a X_a Y_a Z_a$ 为与回转轴 A 固联的坐标系,其坐标轴方向与机床坐标系一致,原点 O_a 为回转轴 B 在 $O_a X_a Y_a Z_a$ 上的投影与回转轴 A 的交点^[1,6]。

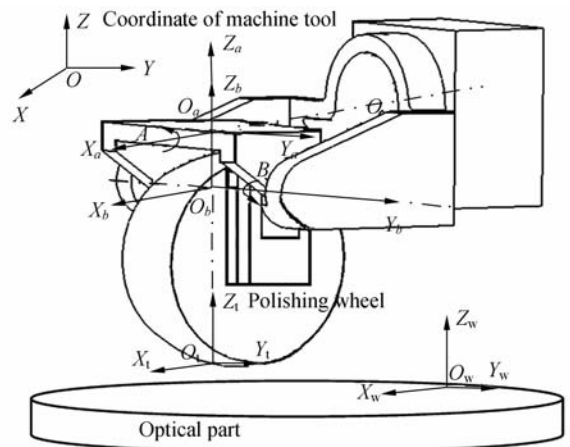


图 1 磁流变抛光机床 KDMRF-1000 坐标系

Fig. 1 Coordinate systems of KDMRF-1000

2.2 磁流变抛光机床的运动计算

设机床在初始状态时,动轴 B 与 Y 轴平行,动轴 A 与 X 轴平行,工件在工作台上,工件坐标系与机床坐标系方向一致,抛光轮坐标系与工件坐标系原点重合。设回转轴 A 的原点 O_a 与回转轴 B 的原点 O_b 的距离为 R_l ,回转轴 B 的原点 O_b 与抛光轮坐标系原点 O_t 的距离为 R_m 。在抛光轮坐标系中,抛光点和抛光轮的方向矢量分别为 $[0\ 0\ 0]^T$ 和 $[0\ 0\ 1]^T$ 。当抛光轮从初始状态抛光到某一驻留点时,在工件坐标系中抛光点和抛光轮的方向矢量分别为 $\mathbf{r}_p(p_x, p_y, p_z)$ 和 $\mathbf{u}(u_x, u_y, u_z)$,此时,机床平动轴相对于初始状态的位置为 $\mathbf{r}_s(s_x, s_y, s_z)$,回转轴 A, B 相对于初始状态的角度分别为 θ_A 和 θ_B (角度的正负根据右手定则确定)。令 $\mathbf{r}_1 = \overline{O_b O_a}$, $\mathbf{r}_m = \overline{O_t O_b}$, $|\mathbf{r}_1| = R_l$, $|\mathbf{r}_m| = R_m$,则由坐标变换关系,有:

$$\begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z & 0 \end{bmatrix}^T = \mathbf{T}(\mathbf{r}_s) \cdot \mathbf{R}_X(\theta_A) \cdot \mathbf{T}(-\mathbf{r}_1) \cdot \mathbf{R}_Y(\theta_B) \mathbf{T}(-\mathbf{r}_m) [0\ 0\ 1\ 0]^T, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} p_x & p_y & p_z & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{T}(\mathbf{r}_s) \cdot \mathbf{R}_X(\theta_A) \cdot \mathbf{T}(-\mathbf{r}_1) \cdot \mathbf{R}_Y(\theta_B) \mathbf{T}(-\mathbf{r}_m) [0\ 0\ 1\ 0]^T, \quad (2)$$

上式中, \mathbf{T} 和 \mathbf{R} 分别为平移与回转运动的齐次坐标变换矩阵,它们为:

$$\mathbf{T}(-\mathbf{r}_m) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -R_m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_Y(\theta_B) = \begin{bmatrix} \cos \theta_B & 0 & \sin \theta_B & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_B & 0 & \cos \theta_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}(-\mathbf{r}_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -R_l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_X(\theta_A) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_A & -\sin \theta_A & 0 \\ 0 & \sin \theta_A & \cos \theta_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{r}_s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & s_x \\ 0 & 1 & 0 & s_y \\ 0 & 0 & 1 & s_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由式(1)和式(2)可以得到 KDMRF-1000 的运动变换为:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_B \\ -\sin \theta_A \cos \theta_B \\ \cos \theta_A \cos \theta_B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x - R_m \sin \theta_B \\ s_y + (R_l + R_m \cos \theta_B) \sin \theta_A \\ s_z - (R_l + R_m \cos \theta_B) \cos \theta_A \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式(1)和式(2)即为抛光轮双摆动机床的运动变换,它表达了抛光轮相对于工件位置与方向随机床的运动变化。实际加工中只要将光学零件的面形数据赋给 $\mathbf{u}(u_x, u_y, u_z)$ 和 $\mathbf{r}_p(p_x, p_y, p_z)$,即可由上述方程计算满足加工要求的机床回转角度 θ_A 和 θ_B 及平动位移 s_x, s_y 和 s_z 。由式(1)和式(2)可以得到抛光轮双摆动机床各轴的运动坐标为:

$$\theta_A = \arctan(-u_y/u_z) \quad -\pi/2 \leq \theta_A \leq \pi/2, \quad (5)$$

$$\theta_B = \arcsin(u_x) \quad -\pi/2 \leq \theta_B \leq \pi/2, \quad (6)$$

$$s_x = p_x + R_m \sin \theta_B, \quad (7)$$

$$s_y = p_y - (R_l + R_m \cos \theta_B) \sin \theta_A, \quad (8)$$

$$s_z = p_z - (R_l + R_m \cos \theta_B) \cos \theta_A, \quad (9)$$

3 磁流变抛光后置处理

3.1 后置求解

磁流变抛光技术是利用磁流变液在通过高强度梯度磁场时变成具有粘塑性的 Bingham 介质,形成具有一定形状的“柔性抛光模”(磁流变液在磁场中形成的缎带凸起)来实现对工件表面的材料去除的^[2-3]。在抛光的过程中,总是预先取得去除函数(即抛光斑点)。由于抛光斑点是由流过抛光轮下端的磁流变液切入工件表面一定的深度(通常定义沿垂直于光学工件表面方向上磁流变液压入工件的深度为切深)进行截流而被动形成的,因此在对光学零件的抛光过程中要保证其截流状态同获取抛光斑点时一致才能保证去除函数的时间和空间不变性。为了保持截流状态的一致

性,在加工过程中就必须保证两点:一是磁流变液的缎带切深保持不变,二是抛光轮的方向矢量同工件保持固定的拓扑关系。这个拓扑关系就是使得抛光轮的方向矢量同光学零件所在的平面垂直。在对光学镜面进行磁流变抛光时,在抛光点处的小范围内,球面的面形可以近似看成一个平面,因此为了保证去除函数的一致性,除了保持切深不变,还必须使抛光轮的方向矢量 $\mathbf{u}(u_x, u_y, u_z)$ 处于光学镜面上抛光点的法线方向。只有这样,才能确保加工过程同获取去除函数时具有同样的截流状态,也才能实现光学镜面面形误差的确定性去除。

在对光学镜面进行后置处理求解时,只需要知道抛光点 $\mathbf{r}_p(p_x, p_y, p_z)$ 和抛光轮的方向矢量 $\mathbf{u}(u_x, u_y, u_z)$, 代入方程(5)、(6)、(7)、(8)、(9)就可以解出机床各运动轴的坐标。

假设光学镜面的面形满足方程:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2, \quad (10)$$

由于抛光点在光学镜面上,故抛光点 $\mathbf{r}_p(p_x, p_y, p_z)$ 必然满足该方程,所以存在下式:

$$P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 = R^2. \quad (11)$$

由于经过光学镜面上的抛光点 $\mathbf{r}_p(p_x, p_y, p_z)$ 的法线方程为:

$$\frac{x - P_x}{2P_x} = \frac{y - P_y}{2P_y} = \frac{z - P_z}{2P_z}, \quad (12)$$

在抛光过程中,抛光轮的方向矢量位于光学镜面上抛光点的法线上,因此方向矢量 $\mathbf{u}(u_x, u_y, u_z)$ 满足法线方程,即:

$$\frac{u_x - P_x}{P_x} = \frac{u_y - P_y}{P_y} = \frac{u_z - P_z}{P_z}. \quad (13)$$

同时,方向矢量 $\mathbf{u}(u_x, u_y, u_z)$ 存在下述关系:

$$u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 = 1. \quad (14)$$

实际加工中,抛光点在平面 $O_w X_w Y_w$ 上的位置是人为给定的,即 P_x 和 P_y 已知,这样,根据方程(5)、(6)、(7)、(8)、(9)联立方程(11)、(13)、(14)就能解出抛光轮要达到指定抛光点所需的各轴运动坐标:

$$\begin{cases} \theta_A = \arctan(-P_y / \sqrt{R^2 - P_x^2 - P_y^2}) \\ \theta_B = \arcsin(P_x / R) \\ s_x = p_x + R_m \sin \theta_B \\ s_y = p_y - (R_l + R_m \cos \theta_B) \sin \theta_A \\ s_z = \sqrt{R^2 - P_x^2 - P_y^2} + (R_l + R_m \cos \theta_B) \cos \theta_A \end{cases}, \quad (15)$$

3.2 四轴联动近似插补

在进行光学镜面的磁流变抛光时,光学镜面的面形误差一般都不呈回转对称分布,或者说光学镜面的非回转对称误差在其面形精度达到一定要求后会表现得越来越明显。而光学加工中经常采用的加工方式有两种:螺旋线扫描方式和光栅扫描方式。由于螺旋线扫描方式是一种常用于面形误差呈回转对称分布的光学零件的加工手段,不具有普适性,其加工轨迹的后置处理只需将轨迹点的坐标值代入方程(15)求解以及通过磁流变抛光机床的四轴联动即可实现,在此不再赘述。光栅扫描方式则是一种不受面形误差分布影响的通用加工方法,其原理如图 2 所示。

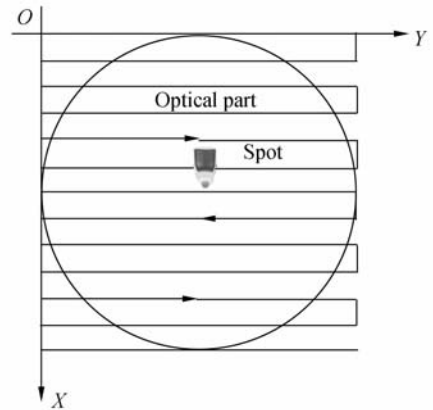


图 2 光栅扫描方式原理图

Fig. 2 Schematic diagram of raster tool path

显然,机床在对每一行进行抛光时,其抛光点的 X 坐标值是不发生变化的;同时,当机床结束每行的抛光并从当前行切换到下一行时,抛光点的 Y 坐标值是不发生变化的。根据光栅扫描方式的上述特点,结合对光学镜面的后置处理求解可知:在对光学镜面进行 Y 方向的行扫描时, P_x 的值是不变的,而 P_y 和 P_z 的值是实时变化的。如果将每行中各抛光点的 P_x 、 P_y 和 P_z 的值代入式(15)进行运动坐标求解,就可以得知在进行光学镜面每行的抛光过程中 θ_B 和 S_x 是不发生变化的,而只有 θ_A 、 θ_Y 和 S_z 的值发生变化,因此在进行 Y 方向的行扫描加工时,只需要 Y 、 Z 、 A 三轴联动就可以实现球面的精确插补。而去除函数在从当前行中的抛光点切换到下一行中的抛光点的过程中, P_y 的值是不变的,但 P_x 和 P_z 的值是改变的,这时将前后两个抛光点的 P_x 、 P_y 和 P_z 代

入式(15)进行运动坐标求解,可以看出机床的 θ_A 、 θ_B 、 S_x 、 S_y 以及 S_z 的都要发生变化,即去除函数在由当前行的抛光点切换到下一行的抛光点时,必须通过 X 、 Y 、 Z 、 A 、 B 五轴联动才能进行球面的精确插补。实际机床虽然拥有5个自由度,但是由于四轴联动的限制,要采用五轴联动来实现去除函数在扫描行之间的准确切换是不可能的。

为了使得现有的磁流变抛光机床能够实现去除函数在扫描行之间的切换,本文采用四轴联动进行了近似插补,即在进行扫描行的切换过程中只采取 X 、 Y 、 Z 、 B 四轴联动而保持 A 轴不动。假设扫描的行距为 L ,扫面行的切换总是发生在光学镜面的边缘,即 $P_y=r$,那么根据式(15)就可以求得采用四轴联动近似引入的角度 θ_A 的误差值为:

$$\Delta\theta_A = \arctan(-P_y/\sqrt{R^2-r^2-P_x^2}) - \arctan(-P_y/\sqrt{R^2-r^2-(P_x-L)^2}), \quad (16)$$

3.3 近似处理的误差分析

为了准确分析扫描行切换时四轴联动引入的误差,本文以一块口径为200 mm,相对口径为1:1.6的球面镜的后置处理求解为例进行了仿真研究。设定光栅扫描加工方式的行距为 $L=1$ mm。其中磁流变抛光机床的参数为 $R_l=110$ mm, $R_m=250$ mm, 球面镜的参数为 $r=100$ mm, $R=640$ mm。

利用式(16)可以求出行扫描过程中由于 A 轴不动而引入角度 θ_A 的误差曲线,如图3所示。横坐标表示扫描行的 X 坐标值,纵坐标表示角度 θ_A 的误差值。根据图中的曲线可以看出, P_x 的绝对值越大,离光学镜面的中心越远,角度 θ_A 的误差值就越大,所以采用四轴联动近似处理而引入的误差最大值势必出现在光学球面的边缘处。

通过前面的分析以及文献[2]和[3]中建立的磁流变去除函数的数学模型可知,在对平面光学零件进行抛光时,只要确定了抛光轮的方向矢量,那么去除函数的形状和大小受磁流变液形成的缎带切深的影响就较大,即去除函数对缎带切深比较敏感。而在对球面甚至非球面等光学零件进行磁流变抛光时,去除函数的敏感方向是位于镜面上抛光点的法线方向。由于采用四轴联动近似处理,角度的误差值必然会对实际的加工精度造成

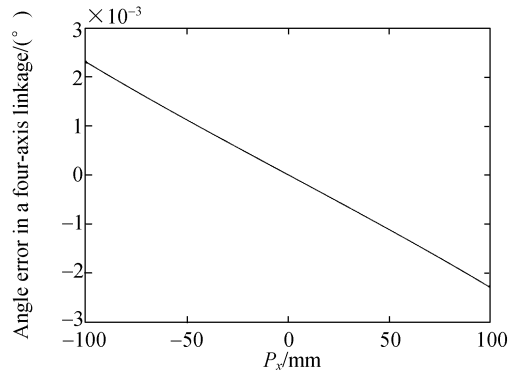


图3 角度的误差同位置的关系曲线

Fig. 3 Curve of angle error and position

一定的影响。为了准确分析角度误差对加工精度的影响,这里将角度的误差值转化为去除函数的敏感方向即抛光点的法线方向上的距离误差值。定义抛光轮走位误差为机床的实际抛光点与理论抛光点的距离在理论抛光点法线方向上的投影的最大值。通过对不同口径和不同相对口径的光学球面的走位误差进行仿真,可以得到四轴联动近似引入的误差对不同光学球面的影响大小,结合实际加工对误差的要求,就可以进一步得到通过四轴联动近似的方法加工光学球面的加工范围。

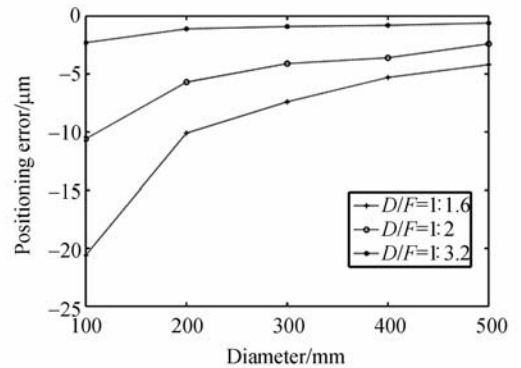


图4 抛光轮定位误差同口径、相对口径的关系曲线

Fig. 4 Positioning error of "polishing tool" vs aperture and D/F

图4中的走位误差曲线表明了,在相同口径的球面近似插补中,相对口径越大,走位误差越大,即面形越陡,走位误差越大;而在相同相对口径时,口径越大,走位误差越小。对于直径300 mm的抛光轮和斜率不是很大的表面,通常使得走位误差值在20 μm 以下,才能确保加工过程中去除函数的形状以及大小的变化较小。通过图4的曲

线,可以准确得到采用这种四轴联动近似的方法加工 100 mm 口径的球面镜的最大相对口径大概在 1 : 1.6 左右。图 5 是采用四轴近似处理算法仿真出的口径为 200 mm,相对口径为 1 : 1.6 的光学球面。

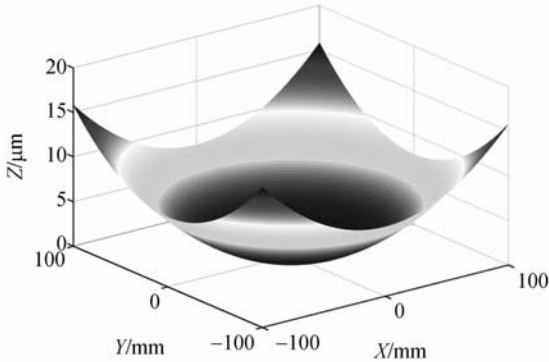


图 5 200 mm 口径球面元件的机床走位三维仿真图
Fig. 5 Three-dimension positioning simulation map of optical sphere (200 mm in diameter)

4 磁流变抛光实验

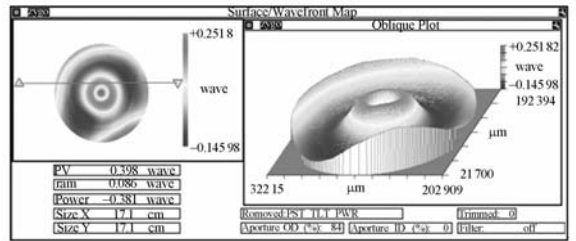
根据前面的误差分析,本文利用 KDMRF-1000 机床对一块口径为 200 mm,相对口径为 1 : 1.6, K9 材料球面镜进行了修形抛光实验。由图 4 的抛光轮走位误差曲线可以得出,其走位误差大概在 10 μm 左右,属于实验能够接受的范围。实验中将扫描行距取为 1 mm,于是球面镜有 201 个扫描行。图 6 显示了球面镜磁流变抛光的实际过程。由于磁流变抛光在抛光光学零件的边缘时,不能形成完整的去除函数,因此存在边缘



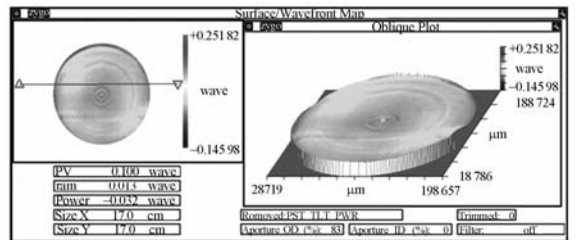
图 6 口径 200 mm 球面镜的磁流变抛光过程
Fig. 6 MRF process of spherical lens(200 mm in diameter)

效应。为了说明球面镜后置处理近似算法的有效性而不考虑边缘效应造成的影响,这里取全口径的 85%即 170 mm 进行对比实验。

图 7 显示了球面镜抛光前后的面形误差分布,抛光前球面镜面形误差的 PV 值为 0.398λ(λ = 0.632 8 μm),RMS 值为 0.086λ;通过磁流变抛光后球面镜面形误差的 PV 值达到了 0.100λ,RMS 值则达到了 0.013λ。球面镜磁流变抛光实验的成功,验证了磁流变抛光后置处理算法模型的正确性和四轴联动近似处理的可行性。



(a) 抛光前
(a) Before polishing



(b) 抛光后
(b) After polishing

图 7 抛光前后球面镜的面形误差图

Fig. 7 Surface errors of spherical lens before and after polishing

5 结 论

通过分析 KDMRF-1000 磁流变抛光机床的结构,得到了机床各运动轴的坐标变换关系,建立了光学镜面的磁流变抛光后置处理模型,并针对机床四轴联动的特点,对建立的磁流变抛光后置处理模型进行了近似处理。

以球面镜的后置处理算法为例,推导了具有普适性的光栅扫描方式加工光学零件的处理方法,分析了这种近似处理引入的误差,并通过仿真得出了这种近似处理方法对球面镜加工的范围。

最后对一块口径为 200 mm,相对口径为

1:1.6的K9材料球面镜进行了磁流变抛光实验,取得了良好的效果,验证了后置处理模型的准

确性以及四轴联动近似处理的可行性,为加工各种形状和大小的光学镜面提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 余顺周,姚英学.气囊抛光数控机床后置处理算法的研究[J].机械制造,2007,45(510):16-18.
YU SH ZH, YAO Y X. Research on post processing algorithm for NC bonnet tool polishing machine [J]. *Machiner*, 2007,45(510):16-18. (in chinese)
- [2] 彭小强,戴一帆,李圣怡.磁流变抛光的材料去除数学模型[J].机械工程学报,2004,40(4):67-70.
PENG X Q, DAI Y F, LI SH Y. Material removal model of magnetorheological finishing [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(4): 67-70. (in chinese)
- [3] 张峰,张学军.磁流变抛光数学模型的建立[J].光学技术,2000,26(2):190-192.
ZHANG F, ZHANG X J. Foundation of mathmatics model of magnetorheological finishing [J]. *Optical Technique*, 2000,26(2):190-192. (in chinese)
- [4] 杨力.先进光学制造技术[M].北京:科学出版社,2001,9.
YANG L. *Advanced Optical Manufacturing Technique* [M]. Beijing: Science Press, 2001, 9. (in Chinese)
- [5] POLLICOVE H M, FESS E M, SCHOEN J M. Deterministic manufacturing processes for precision optical surfaces [J]. *SPIE*, 2003, 5078:90-96.
- [6] 周济,周艳红.数控加工技术[M].北京:国防工业出

版社,2002.

- ZHOU J, ZHOU Y H. *Numerical Control Machining Technique* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in chinese)
- [7] 尤伟伟,彭小强,戴一帆.磁流变抛光液的研究[J].光学精密工程,2004,12(3):330-334.
YOU W W, PENG X Q, DAI Y F. MR fluids for finishing use [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3): 330-334. (in Chinese)
- [8] 张峰,余景池,张学军,等.磁流变抛光技术[J].光学精密工程,1995,7(5):1-7.
ZHANG F, YU J CH, ZHANG X J, *et al.*. Magnetorheological finishing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 7(5): 1-7. (in Chinese)
- [9] 张峰,张斌智.磁流体辅助抛光工件表面粗糙度研究[J].光学精密工程,2005,13(1):34-38.
ZHANG F, ZHANG B ZH. Surface roughness of optical elements fabricated by magnetic fluid-assisted polishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 34-38. (in Chinese)
- [10] 石峰,戴一帆,彭小强,等.高精度光学表面磁流变修形[J].光学精密工程,2009(8):1859-1864.
SHI F, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Magnetorheological finishing for high-precision optical surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1859-1864. (in chinese)

作者简介:



宋 辞(1983-),男,四川资阳人,博士研究生,2001年于国防科技大学获得学士学位,主要研究方向为光学镜面的磁流变抛光技术。E-mail: sunicris@163.com



彭小强(1977-),男,江西宁都人,博士,副教授,主要研究方向为精密工程和先进光学制造技术。E-mail: pxq@sina.com.cn

导师简介:



戴一帆(1966-),男,江苏南京人,博士,教授,1988年于国防科技大学获得学士学位,1995年于莫斯科航空学院获得博士学位,主要研究方向为精密工程与计算机控制。E-mail: dyf@nudt.edu.cn



石 峰(1980-),男,辽宁人,博士,主要从事磁流变抛光技术的研究。E-mail: sf.wind@yahoo.com