

文章编号 1004-924X(2015)10-2819-08

## 应用四轴联动磁流变机床加工曲面

李龙响<sup>1,2\*</sup>, 郑立功<sup>1</sup>, 邓伟杰<sup>1</sup>, 王孝坤<sup>1</sup>, 李丽富<sup>1</sup>, 白杨<sup>1,2</sup>, 张学军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**以永磁型磁流变抛光机为基础,提出了在光栅式加工轨迹下结合四轴联动机床(不含抛光轮转动轴)和变去除函数实现磁流变抛光技术确定性加工曲面的方法。讨论了曲面上光栅式加工轨迹等面积规划原则和基于矩阵乘积运算的驻留时间求解算法。分析了磁流变四轴联动机床的机械补偿方式,同时以变去除函数模型为基础从算法上实现了机械的剩余补偿。应用以氧化铈为抛光粉的水基磁流液对口径为80 mm、曲率半径为800 mm的BK7材料凸球面进行了修形验证实验,一次加工(5.5 min)后显示:面形误差分布峰谷值(PV)和均方根值(RMS)从117.47 nm和22.78 nm分别收敛到60.80 nm和6.28 nm。实验结果表明:结合四轴联动的低自由度机床和变去除函数算法补偿的磁流变加工工艺能够有效地实现球面及低陡度非球面等曲面的高效确定性加工,为磁流变抛光在光学制造中的应用提供了有力的支持。

**关键词:**光学制造;磁流变抛光;四轴联动;曲面加工;变去除函数;光栅式轨迹

**中图分类号:**TH161;TN305.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152310.2819

## Magnetorheological finishing for curve surface based on 4-axis machine

LI Long-xiang<sup>1,2\*</sup>, ZHENG Li-gong<sup>1</sup>, DENG Wei-jie<sup>1</sup>,  
WANG Xiao-kun<sup>1</sup>, LI Li-fu<sup>1</sup>, BAI Yang<sup>1,2</sup>, ZHANG Xue-jun<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: leellxhit@126.com

**Abstract:** On the basis of permanent magnet Magnetorheological Finishing (MRF) machine, a magnetorheological finishing method by combining a 4-axis machine with a variable removal function was developed to figure the sphere surface in a raster path. The principle of equal area observed on the raster path and the dwell time algorithm based on matrix multiplication computation were discussed. A mechanical compensating strategy based on the 4-axis machine was analyzed, including machine compensating and algorithm compensating of the variable removal function. By using water based magnetorheological fluid with the polishing powder of cerium oxide, a polishing experiment on a convex made of BK7 material with a diameter of 80 mm and curvature radius of 800 mm was carried out. The experiments show that error values (PV and RMS) have been converged from 117.47 nm and 22.78 nm to

收稿日期:2014-12-15;修订日期:2015-02-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61036015)

60.80 nm and 6.28 nm respectively with just one polishing cycle (5.5 min). The result demonstrates that strategy of variable removal function compensating based on the 4-axis machine can effectively figure the sphere and asphere surfaces determinately by the MRF, which reduces the cost of the MRF machine, and pushes its applications to the usual optical shop.

**Key words:** optical fabrication; magnetorheological finishing; 4-axis machine; curve surface machining; variable removal function; raster path

## 1 引言

磁流变抛光(Magnetorheological Finishing, MRF)作为一种高效的确定性先进光学制造技术<sup>[1]</sup>,具有去除函数稳定、边缘效应小、下表面破坏层小、无复印效应、修形能力强及加工精度高等优点<sup>[1-8]</sup>。在高精度光学表面加工中有着广阔的应用前景。

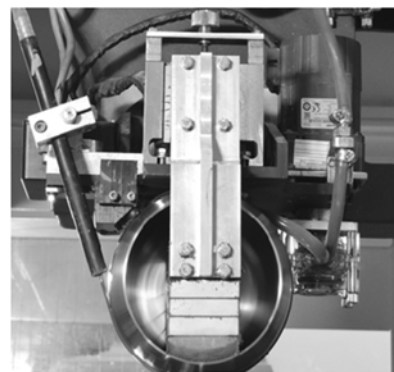
磁流变抛光技术最早由白俄罗斯的 William. Kordonski 等人提出,他们证明了磁流变技术可以用于光学镜面的加工。1996年 Kordonski 与美国罗切斯特光学中心研究人员合作成立了 QED 公司,先后推出了 Q22 系列的磁流变抛光商用设备<sup>[1-4]</sup>。国内以国防科学技术大学李圣怡团队为代表<sup>[5,7]</sup>,多家科研院所及高校对磁流变进行了详细研究,制备了不同型号的磁流变抛光机床。但以上机床一般都是五轴(不包含抛光轮的转动轴)或者五轴以上联动,而且抛光轮一般有 1 个或者 2 个摆动的自由度以实现球面或者非球面加工补偿。这些机械补偿方式取得了良好的效果,但也受到一些因素的制约。首先,当加工曲面时,机床必须是五轴或者五轴以上联动,而磁流变加工对机床每个轴的空间位置分辨率、控制精度以及时间分辨率要求都很高<sup>[7]</sup>,同时随着被加工光学元件面形精度的提升,对机床性能的要求也逐渐提高。这种高性能的五轴或五轴以上联动机床虽然已经可以制造,但价格昂贵,不利于磁流变抛光在一般的光学制造车间中的广泛应用;其次对磁流变循环系统也有较高的要求,必须保证抛光轮的偏摆不会引起喷嘴喷出的磁流变液发生位置移动,循环系统整体稳定性也不能因为抛光轮的摆动而变化,这一点在高精度或者超高精度光学表面加工时尤其值得注意。

对于磁流变抛光等确定性光学加工工艺,其去除函数具有很强的可控性。本文提出采用四轴

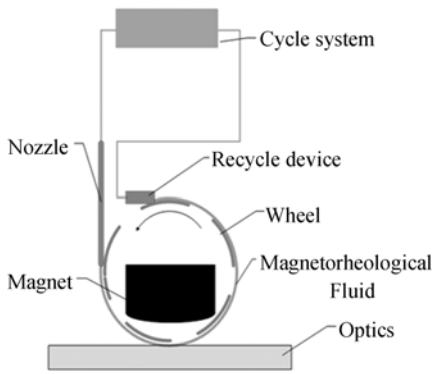
联动机床结合变去除函数,以基于矩阵运算的收敛算法进行曲面加工补偿,进而实现曲面磁流变抛光技术的高精度确定性加工方法。一方面,四轴联动的机床磁流变抛光轮不做偏摆运动,有利于保持磁流变抛光循环系统的稳定性,并可有效地降低了磁流变抛光对机床自由度的要求,减少机床的联动轴有利于提高机床的运动精度等性能,降低磁流变抛光机的制造成本。另一方面,考虑到磁流变抛光去除函数的可控性,根据模型计算和实验测试分析给出去除函数在被加工元件不同位置的去除分布,再结合基于矩阵运算磁流变加工收敛算法<sup>[9-11]</sup>,可较容易地实现磁流变加工曲面的算法补偿。

## 2 磁流变抛光原理及装置

图 1 所示为与白俄罗斯合作研发的永磁型磁流变抛光机,磁流变液在外围的循环系统中以液体形式流动,被喷嘴喷出后由转动的抛光轮带入到抛光区,在抛光区永磁场的作用下变成 Bingham 介质,形成具有一定硬度的缎带凸起,这一凸起对光学工件表面正压力较小,但是剪切力很大,以剪切的方式实现材料的去除。这种永磁型的磁流变抛光设备避免了电磁型抛光轮中电流等控制变量,在



(a) 磁流变抛光设备  
(a) Device of MRF



(b) 磁流变抛光原理图  
(b) Principle of MRF

图 1 磁流变抛光设备及原理

Fig. 1 Machine and principle of MRF

工程应用中更容易实现确定性光学加工。抛光轮直径为 160 mm。

### 3 面形收敛算法

#### 3.1 加工轨迹规划

常见的加工轨迹可以简单的划分为光栅式轨迹和螺旋线轨迹。光栅式加工轨迹在实际工程应用中比螺旋线轨迹更具有普适性,它不仅适用于圆形的光学元件加工,也适用于椭圆形、圆角矩形、六边形及扇形等异形镜加工。因此这里主要分析磁流变曲面加工中光栅式加工轨迹规划。对于球面等曲面采用驻留点等面积规划策略,即在被加工曲面上不同区域相邻的 4 个驻留点面积相等。

以球面为例,圆形光学元件的光栅式轨迹如图 2 所示,图中 D 字形的图案表示磁流变抛光的去除函数,  $x_{rf}$  和  $y_{rf}$  表示去除函数的横纵坐标。

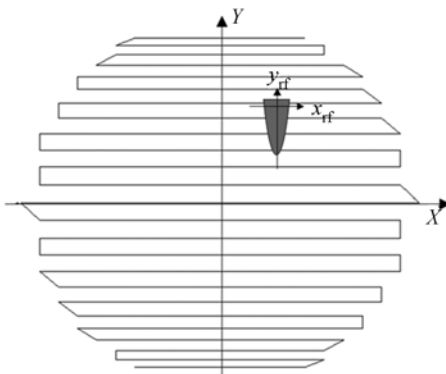
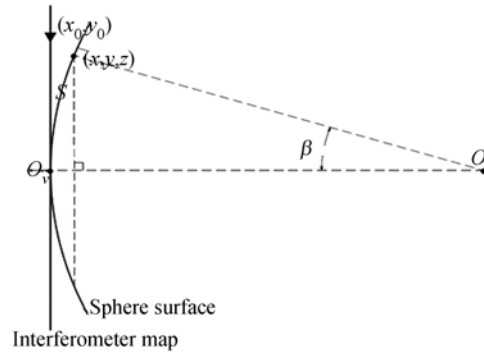
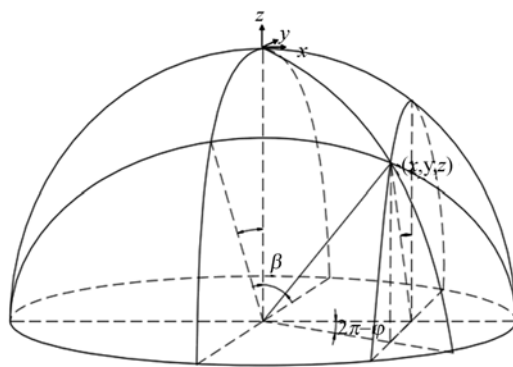


图 2 光学元件上光栅式轨迹的俯视图  
Fig. 2 Planform of raster path

对于常用的 Zygo 等干涉仪,检测球面时干涉仪发出的光线沿着球面的法线入射,得到的面形误差的平面坐标  $(x_0, y_0)$  实际是被检测球面几何坐标  $(x, y, z)$  的展开,如图 3 所示。因此,在面形分布图上进行等密度规划驻留点,再把相应的驻留点对应变换到实际的加工球面上,这样实际球面上的驻留点就是按等面积规划的。面形误差



(a) 干涉图与球面上坐标点的关系剖视图  
(a) Coordinate relation on different maps



(b) 球面上的坐标点  
(b) Coordinate point on sphere

图 3 坐标变换关系图

Fig. 3 Coordinate transform

分布图上规划的驻留点坐标和被检测球面上的驻留点坐标也分别用  $(x_0, y_0)$  和  $(x, y, z)$  表示,如图 3 所示。式(1)和(2)给出了坐标点之间的关系,其中  $O$  是被加工球面的球心,  $O_1$  是被加工球面球冠的顶点,  $\rho$  是被加工球面的曲率半径,  $\varphi$  是图 3 (b)中坐标系  $(x, y)$  对应的极坐标系下的矢角。

$$\beta = \frac{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{\rho}, \tag{1}$$

$$\begin{cases} x = \rho \sin(\beta) \cos(\varphi) \\ y = \rho \sin(\beta) \sin(\varphi) \\ z = -[\rho - \rho \cos(\beta)] \end{cases} \quad (2)$$

3.2 驻留时间求解算法

求解驻留时间采用基于矩阵乘积运算的驻留时间求解算法,其基本思想是把传统的基于图像恢复的反卷积驻留时间求解模型,转化为基于矩阵运算的求解线性方程组的代数运算,文献[9]中详细给出了这种算法的细节,其基本卷积公式为:

$$E(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^N R(x_i - \xi_j, y_i - \eta_j) \cdot T(\xi_j, \eta_j), \quad (3)$$

其中: $R(x_i - \xi_j, y_i - \eta_j)$ 表示磨头驻留在驻留点 $(\xi_j, \eta_j)$ 对去除点(或数据点) $(x_i, y_i)$ 单位时间内的去除量, $T(\xi_j, \eta_j)$ 表示磨头驻留在点 $(\xi_j, \eta_j)$ 的时间, $N$ 则是驻留点总数,求和后说明 $E(x_i, y_i)$ 是磨头依次驻留在所有驻留点后对 $(x_i, y_i)$ 点总的去除量。根据其物理意义可以变换为矩阵的乘积:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1N} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{M1} & r_{M2} & \cdots & r_{MN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

简单描述为 $E=R \times T$ , $R$ 是去除函数矩阵, $M$ 是去除点数量, $N$ 是驻留点数量。 $R$ 矩阵中元素 $r_{ij}$ 和驻留点位置、去除函数分布以及去除点位置有关,可以针对不同的驻留点引入不同的去除函数,并计算出相应的 $r_{ij}$ 。因此,这种算法可以容易地从收敛算法的角度实现变去除函数光学加工。为了高效求解式(4)的稳定非负解,文献[9]给出了SBB结合Tikhonov自适应正则化的快速算法。

4 曲面加工补偿

4.1 理想补偿方式

磁流变抛光加工球面时,较为理想的机械补偿方式的加工轨迹如图4所示,对于球面上任意一点,通过抛光轮有效区最低点的轮半径沿着被加工球面的法线方向,即在图4中线段BA的延长线经过被加工球面的球心。

对于非球面,按最接近球面进行机械补偿的方法和图4中一致。但必须计算出非球面与最接

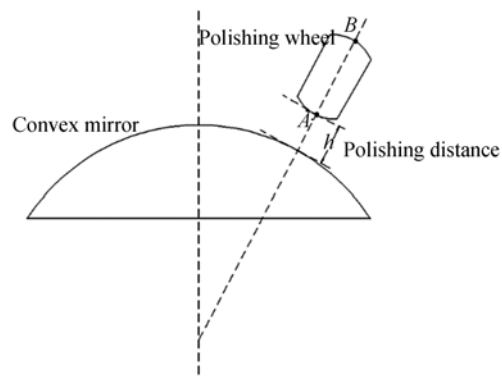


图4 磁流变加工球面的理想机械补偿方式

Fig. 4 Optimal mechanism compensating of sphere

近球面的偏离量分布,进而确保抛光轮与被加工镜面之间有合理的抛光间隙,这一偏离量分布可以在非球面最接近球面拟合时直接得到。

因此,只要能描述磁流变加工曲面时的去除函数分布,结合合适的收敛算法,即可以很好地实现曲面的确定性加工。但是这种补偿方法在光栅式加工轨迹下要求机床必须是五轴(或五轴以上)联动,同时对磁流变循环系统也有较高的要求。本文采用四轴联动机床实现磁流变抛光加工曲面的机械补偿。

4.2 光栅式轨迹下四轴联动机床的机械补偿

图5所示为四轴联动机床(不包含抛光轮的转动轴),给转台加上一个转动轴C即为常见的五轴联动机床。考虑到光栅式加工轨迹能够满足各种几何形状的光学元件加工,因此采用XYZA四轴联动实现光栅式轨迹磁流变曲面加工的机械补偿,其中A轴是绕着X轴的摆动轴,工件坐标系和图5中机床坐标系一致,去除函数在被加工球面或非球面的最接近球面上按光栅式轨迹分

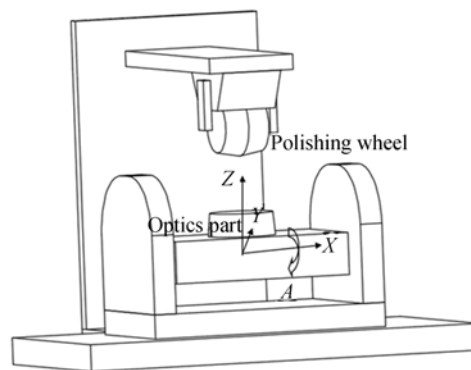
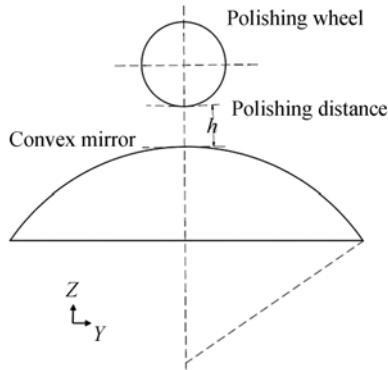


图5 四轴联动机床

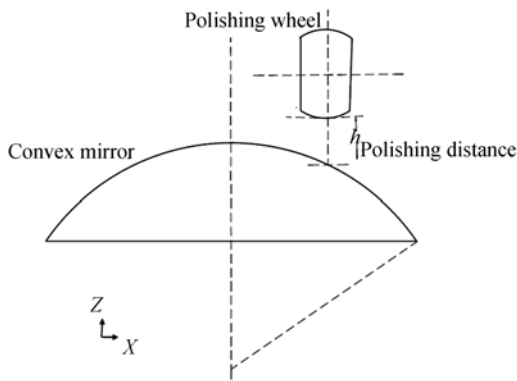
Fig. 5 4-axis machine

布如图 2 所示。

机床四轴联动时 Z-Y 平面内使用 A 轴的摆动和 Z 轴的平移运动实现磁流变加工沿着 Y 方向的补偿,如图 6(a)所示,这种补偿使得去除函数  $y_{rf}$  方向的去除分布不随工件 Y 变化。另一方面,沿着 X 方向则只调整 Z 值保持抛光间隙  $h$  恒定,如图 6(b)所示,在工件上不同的 X 位置去除函数沿着  $x_{rf}$  方向的分布发生变化,因此为了实现磁流变抛光确定性加工,沿着 X 方向必须做出其他方式的补偿以弥补机械补偿的不足。在这种四轴联动机床中,抛光轮不发生摆动,只随着 Z 轴做竖直的平移运动,这对包含喷嘴和回收盒的磁流变循环系统的稳定性非常有利,同时四轴联动有效降低了对机床自由度等性能的要求。



(a) Y 方向  
(a) Y-axis



(b) X 方向  
(b) X-axis

图 6 四轴联动机械补偿

Fig. 6 4-axis mechanism compensating

4.3 变去除函数算法补偿

磁流变抛光去除函数一般通过实验测试获

得,但是实际应用中不可能对所有曲面或者同一曲面的不同位置都做去除函数实验测试,因此需要通过测量有限的去除函数进行合理的近似,使其适用于常见的情况。MRF 去除函数尺寸一般较小<sup>[6,12,13]</sup>(通常小于  $20\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ),去除函数驻留在球面或者非球面上某一位置时,尤其是大中口径光学元件,可以认为去除函数作用区域内的被加工面是一个小平面。

4.2 节机械补偿方式中,沿着 Y 方向的机械补偿使得被加工球面上近似的小平面没有在 Y 方向上引入倾斜,但沿着 X 方向不同,被加工区域的近似小平面的倾斜量则各不相同,其中最大倾斜量和被加工曲面的  $R \#$  成反比。针对 X 方向上不同位置的倾斜,式(5)给出了一种变去除函数的规则,RF 是无倾斜平面测试的去除函数分布,RF'是曲面上某一位置实际的去除函数分布, $T_{rf}$ 是去除函数倾斜因子, $\otimes$ 表示矩阵中对应元素相乘,矢量  $k$  表示图 6(b)所示 X-Z 平面中圆弧上某一位置的切线斜率, $x_{rf}$ 表示去除函数的横坐标。

$$RF' = RF \otimes T_{rf}(k, x_{rf}) \tag{5}$$

对于实际的离散去除函数分布, $T_{rf}$ 可以表示为式(6),元素由半经验公式(7)和(8)给出,C为只和磁流变液及被加工材料相关的常量。在实际应用中尤其是大口径光学系统中,磁流变液和常用光学元件的材料有限,对于特定的磁流变液和被加工材料,只需要进行实验标定并建立相应的数据库即可实现这种变去除函数的工程应用。另外,这一方法也可以延伸到磁流变加工的边缘效应控制等领域。

$$T_{rf} = \begin{bmatrix} & & & & \vdots & & & & & \\ & \delta^{-i} & & \delta^{-2} & \delta^{-1} & 1 & \delta & \delta & & \delta & \\ \cdots & & \delta^{-i} & \cdots & \delta^{-2} & \delta^{-1} & 1 & \delta & \delta & \cdots & \delta & \cdots \\ & \delta^{-1} & & \delta^{-2} & \delta^{-1} & 1 & \delta & \delta & & \delta & \\ & & & & & \vdots & & & & & \end{bmatrix}, \tag{6}$$

$$\delta^i = 1 + Ck x_{rf}^i, \tag{7}$$

$$\delta^{-i} = 1 - Ck x_{rf}^i. \tag{8}$$

以 3.2 节中基于矩阵乘积运算的驻留时间求解算法为平台,应用本节提出的变去除函数分别计算在不同驻留点时  $R$  矩阵中  $r_{ij}$  元素值,就可以实现磁流变抛光变去除函数驻留时间求解,从而进行实际加工。

## 5 加工实例

选择自研的氧化铈质量分数 1% 的水基磁流变液<sup>[12]</sup>对一块工程使用的 BK7 材料的凸球面进行修形实验。凸球面口径为 80 mm, 曲率半径为 800 mm。加工实验磁流变抛光设备基本工艺参数如表 1 所示。

表 1 加工实验工艺参数

Tab. 1 Basic parameters of fabricating process

Parameter	Magnitude	unit
Rotating speed of the wheel	120	r/min
Flowing rate of MR fluid	470	ml/min
Maximum magnetic intensity	$3\ 700 \times 10^{-4}$	T
Polishing distance ( $h$ )	1.1	mm
Environment temperature	20	°C

MR: magnetorheological

首先进行倾斜去除函数标定。图 7 给出了沿  $xrf$  方向被加工平面发生倾斜时的去除函数测试结果, 被加工平面倾斜角度从左至右依次是  $0, 1 \dots 6^\circ$ , 标定的 C 值是 0.833。

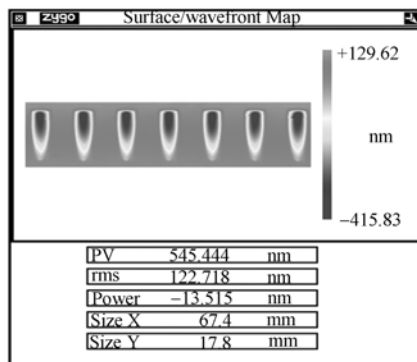


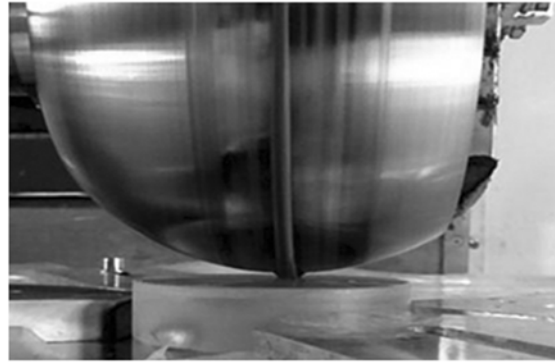
图 7 倾斜去除函数标定: 从左到右依次  $0^\circ, 1^\circ \dots 6^\circ$

Fig. 7 Tilt removal function calibrating:  $0^\circ - 6^\circ$  from left to right.

图 8(a)为实际加工凸球面示意图, 初始面形分布 PV 值为 117.47 nm, RMS 值为 22.78 nm, 如图 8(b)所示。选择光栅式加工轨迹, 相邻 4 个驻留点间的面积取  $1\text{ mm}^2$ , 变去除函数算法补偿的虚拟加工结果如图 8(c)所示, PV 值为 57.39 nm, RMS 值为 4.91 nm。

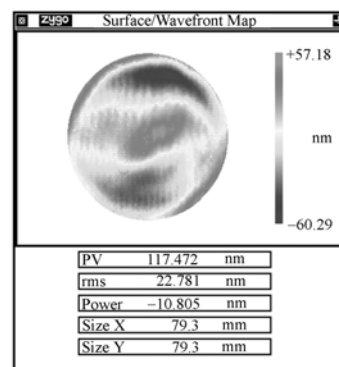
经过 5.5 min 一次实际加工, 结果如图 8(d)

所示, PV 值为 60.80 nm, RMS 值为 6.28 nm。面形粗糙度  $R_a$  值为 0.82 nm。加工后面形残差分布 Y 负方向的边缘有一定的翘边且比仿真结果中的翘边明显, 这是由于去除函数在被加工球面的此边缘上发生了明显变化, 即边缘效应在这个边缘较为严重, 通过控制边缘效应可以很好地



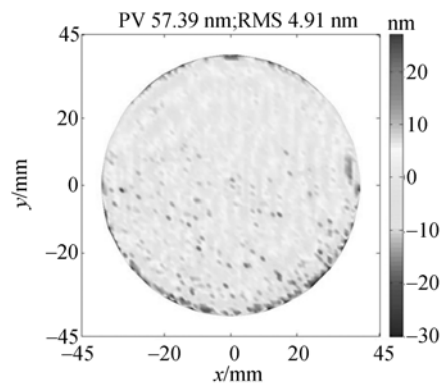
(a) 实际加工图

(a) Practically polishing



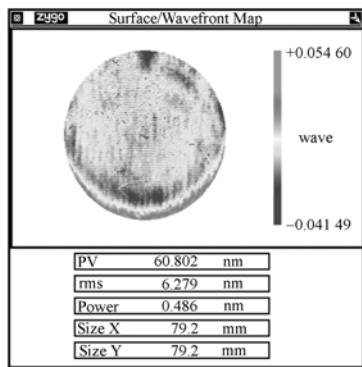
(b) 初始面形分布

(b) Initial surface error



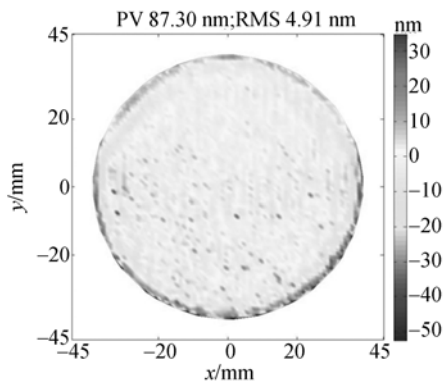
(c) 变去除函数虚拟加工残差分布

(c) Simulation of variable removal function



(d) 实际加工残差分布

(d) Surface error after fabricating



(e) 恒定去除函数虚拟加工残差分布图

(e) Simulation of invariable removal function

图 8 凸球面实例加工

Fig. 8 Convex mirror fabricating

抑制这一翘边<sup>[12]</sup>。除去这一因素,考虑到加工过程中存在的其他误差,实际加工后面形误差分布和预测的结果基本吻合。因此,实验结果表明基于四轴联动机床结合变去除函数的方法可以实现曲面的磁流变高精度确定性加工。

为了更好地说明变去除函数补偿的必要性,给出仅用四轴联动进行机械补偿得到的虚拟加工结果,即直接使用恒定去除函数计算的驻留时间

进行四轴联动机床的实际加工。基于 3.2 节加工收敛算法,首先,利用单一恒定的平面去除函数求解出驻留时间  $T_{inv}$ ;然后,考虑到实际加工中去除函数发生了变化,因此利用变去除函数重新建立去除函数矩阵  $R_{var}$ ;最后,利用前两步得到的驻留时间和去除函数矩阵可以得到虚拟加工的面形残差  $E_{resi}$ ,如式(9)所示, $E_{ini}$ 是初始面形。虚拟加工残差分布  $E_{resi}$ 如图 8(e)所示,PV 值为 87.30 nm, RMS 值为 6.47 nm,这一收敛精度已经低于图 8(d)所示的实际加工结果。因此,应用四轴联动机床进行 MRF 曲面加工时,变去除函数算法补偿是必要的,而且随着被加工球面  $R\#$  的减小,这种必要性逐渐增加。

$$E_{RESI} = E_{ini} - R_{var} \times T_{inv}. \quad (9)$$

## 6 结 论

本文提出了在光栅式加工轨迹下用四轴联动机床结合变去除函数实现磁流变抛光技术确定性加工曲面的方法。研究了四轴联动机床实现曲面加工过程中所涉及的路径规划及收敛算法等磁流变抛光关键技术。分析了磁流变四轴联动机床的机械补偿方式,建立了变去除函数模型,并从算法上实现了机械的剩余补偿。应用自研的水基磁流液对口径为 80 mm 的凸球面进行了修形验证实验,经过一次修形,面形误差均方根值(RMS)从  $1/28 \lambda (\lambda=632.8 \text{ nm})$  收敛到优于  $1/100 \lambda$ 。提出的低自由度机床结合变去除函数的磁流变加工方法收敛快、精度高,达到了复杂机床的加工效果,能够满足实际的工程需求。

本文提出的方法仍有进一步的发展空间。比如,可以进一步考虑三轴联动机床实现磁流变抛光的曲面加工;本文方法应用于高陡度曲面加工时存在抛光轮与被加工镜面可能干涉的问题,仍需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] DANIEL C H. History of magnetorheological finishing [C]. SPIE, 2011, 8016: 1-22.
- [2] JACOBS S D, GOLINI D, HSU Y, *et al.*. Magnetorheological finishing: a deterministic process for optics manufacturing [C]. SPIE, 1995, 2576:

372-382.

- [3] ARIC S, WILLIAM K, MARC T. Magnetorheological finishing of large and lightweight optics [C]. SPIE, 2004, 533: 99-107.

- [4] 康健, 宣斌, 谢京江. 表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 824-833.

KANG J, XUAN B, XIE J J. Manufacture technol-

- ogy status of surface modified silicon carbide mirrors [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6 (6):824-833.
- [5] 吕东喜,王洪祥,黄燕华,等. 光学材料磨削的亚表面损伤预测[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 680-686.  
LU D X, WANG H X, HUANG Y H, *et al.*. Prediction of grinding induced subsurface damage of optical materials[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (3): 680-686. (in Chinese)
- [6] 李圣怡,戴一帆. 大中型光学非球面镜制造和测量新技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2011,51-67.  
LI SH Y, DAI Y F. *New Technology for Manufacturing and Measurement of large and Middle-scale aspheric surfaces* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011,51-67. (in Chinese)
- [7] 李圣怡,彭小强. 光学零件可控柔体制造的理论基础与方法[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(7): 1-9.  
LI SH Y, PENG X Q. Basic theory and method of controllable compliant tools for optic elements manufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(7):1-9. (in Chinese)
- [8] 戴子华,朱永伟,王建彬,等. K9 玻璃亚表面损伤的分步腐蚀法测量[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 287-293.  
DAI Z H, ZHU Y W, WANG J B, *et al.*. Measurement of sub\_surface damage of K9 glass by step-by-step etching method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):287-293. (in Chinese)
- [9] 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, 31 (5):0522001.  
LI L X, DENG W J, ZHANG B ZH, *et al.*. Dwell time algorithm for large optics in magnetorheological finishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 31(5): 0522001. (in Chinese)
- [10] 邓伟杰,郑立功,史亚莉,等. 基于线性代数和正则化方法的驻留时间算法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15 (7): 1009-1015. 13.  
DENG W J, ZHENG L G, SHI Y L, *et al.*. Dwell time algorithm based on matrix algebra and regularization method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7):1009-1015. (in Chinese)
- [11] SRA D K S, DHILLON I S. A non-monotonic method for large-scale non-negative least squares [J]. *Optimization Methods & Software*, 2012, 1: 1-29.
- [12] 白杨,张峰,邓伟杰,等. 磁流变抛光液的配制及其抛光稳定性[J]. *光学学报*, 2014, 34(4):0416001.  
BAI Y, ZHANG F, DENG W J. Preparation of magnetorheological polishing fluid and its polishing stability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (4): 0416001. (in Chinese)
- [13] ELMAR P, MARKUS S. Correlation between influence-function quality and predictability of a computer-controlled polishing process [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(6):063401.
- [14] HAO H, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Research on reducing the edge effect in magnetorheological finishing[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(9):1220-1226.

#### 作者简介:



李龙响(1987—),男,安徽宿州人,2011年于哈尔滨工业大学获得学士学位,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士研究生,主要从事光学磁流变加工和检测方面的研究  
E-mail:lellxhit@126.com

#### 导师简介:



张学军(1968—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,中科院百人计划获得者,主要从事先进光学制造和空间光学系统等方面的研究。E-mail:zxj@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)