

文章编号: 1001- 2486(2009) 02- 0103- 04

# 基于矩阵运算的光学零件磁流变加工的驻留时间算法\*

石峰, 戴一帆, 彭小强, 宋 辞

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 提出了一种光学零件磁流变加工的驻留时间计算方法。该算法以矩阵运算为基础, 首先确定工件上各个控制节点的高度余量, 并将磁流变抛光模对各控制节点的材料去除能力体现到去除矩阵中, 然后利用非负最小二乘法求解驻留时间向量。采用该算法在自行研制的磁流变抛光机床上进行抛光实验, 经过 2 次迭代加工后, 有效口径为 145mm 的球面镜 P-V 值达到 40.5nm (约为  $\lambda/15$ ), RMS 值达到 5nm (约为  $\lambda/125$ ), 表面粗糙度  $R_a$  值达到 0.57nm。

**关键词:** 磁流变抛光; 计算机控制光学表面成型 (CCOS); 驻留时间算法

中图分类号: TH161 文献标识码: A

## Dwell Time Algorithm Based on Vector for MRF Process of Optics

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

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

**Abstract:** A dwell time algorithm for magnetorheological finishing (MRF) process of optics is developed in this paper. Firstly, the vector of residual heights of the control nodes is calculated, and the removal rate of the “polishing spot” at each control node is written into a removal matrix. Then, a nonnegative least-squares method is used to obtain the optimal solution of the dwell time. With this algorithm, a spherical surface (145mm aperture) is polished on the MRF machine developed by ourselves. After two iterations, PV values  $\lambda/15$ , RMS values  $\lambda/125$ , and  $R_a$ , 0.57nm.

**Key words:** Magnetorheological Finishing (MRF); Computer Controlled Optical Surfacing (CCOS); dwell time algorithm

确定性磁流变抛光技术是由美国 Rochester 大学 COM 光学加工中心首创, 由美国 QED 公司完成产品化的新一代光学零件高精度抛光加工方法<sup>[1]</sup>。该抛光方法是智能材料、电磁学、流体动力学、分析化学等理论在光学抛光领域的集中应用。该方法通过控制外加的梯度磁场改变智能材料——磁流变液的粘度与剪切屈服强度, 在抛光轮表面形成一个形状可控、“硬度”可调、粘度可变的可控聚束能量流, 以该聚束能量流为“柔性抛光模”可以完成光学零件的高精度抛光。磁流变抛光技术具有以下优点: (1) 可以完成光学表面的高精度抛光。采用磁流变抛光方法, 光学表面(平面、球面、非球面等)面型精度(P-V)可达  $\lambda/20$  以下, 表面粗糙度可达 1nm 以下<sup>[2]</sup>。(2) 磁流变抛光过程的材料去除机理是剪切力为主、压力辅助, 磨料微粒对光学表面的物理损伤程度小, 光学表面基本无亚表面损伤层。(3) 磁流变抛光以聚束能量流的形式完成抛光过程, 不存在传统抛光方法的抛光头磨损、抛光区域温度上升、抛光过程不可控等一系列问题。(4) 理论上, 磁流变抛光方法不受抛光工件几何形状、外形尺寸大小等限制, 可完成任何面型的光学零件抛光。

磁流变抛光过程采用 CCOS 的光学零件抛光工艺方法, 首先确定材料去除模型, 再根据选定的驻留时间计算方法, 计算出驻留时间并完成路径规划, 然后采用 CNC 方法完成加工过程。可见, 在确定磁流变抛光工艺过程的去除函数和预期的材料去除量后, 驻留时间计算方法是磁流变抛光工艺的关键和基础。考虑到磁流变抛光模形状的特殊性和复杂性: (1) 抛光模的形状不具备回转对称性, 这与小工具回转抛光的抛光模具有本质区别。(2) 抛光模的形状、稳定性、去除效率等基本特征受抛光工件曲率半径、

\* 收稿日期: 2008- 09- 10

基金项目: 国家部委基金资助项目(9140A18070108KG0147); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET)

作者简介: 石峰(1980-), 男, 博士生。

磁流变液的屈服强度和粘度、工件表面接触情况、抛光轮与工件间隙等外在因素的影响。因此,需要综合考虑上述因素来求解驻留时间,而不能采取传统的卷积迭代的方法。本文提出一种基于矩阵的驻留时间算法,可以完成回转类光学零件磁流变加工驻留时间的快速解算。

### 1 MRF 材料去除模型

如图 1,磁流变抛光的基本原理:磁流变液在蠕动泵的作用下从喷嘴喷出,由旋转抛光轮带入抛光区域,在梯度磁场(由抛光轮内的电磁铁产生)的作用下形成可控的柔性抛光模,完成材料去除后进入回收装置,经过滤搅拌后连续循环。由于磁流变液的 Bingham 流体特性<sup>[3]</sup>,抛光区域磁流变液的成核状态、压力场、

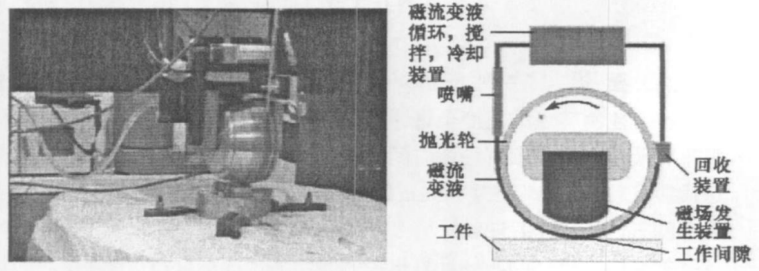


图 1 磁流变抛光样机及其原理图

Fig. 1 Schematic diagram of MRF experiment equipment

剪切应力场、速度场的计算十分困难。抛光区域的磁流变液可采用修正的二维雷诺方程来描述<sup>[4-5]</sup>,采用数值迭代的方法进行求解。以 Preston 方程为依据,可以求解出压力参数  $P$  的数学表达式,从而得到材料的去除模型<sup>[8]</sup>。由于这种数学模型局限于沿抛光方向上的二维去除模型求解,因此不能满足实际加工的需要。为了能够将数学模型应用于实际加工,文献[7]中提出了以 Preston 方程为基础,以实际的工艺参数为条件拟合去除函数模型。该方法建立的模型能够随实际加工条件的改变而变化,因此能够产生用于实际加工的三维模型。虽然如此,但是实际的加工条件往往复杂多变,拟合模型又不一定准确可靠,特别在进行高精度光学零件的修形抛光过程中,去除函数模型的精度将直接影响着磁流变抛光的最终加工精度。基于上述考虑,在实际的加工过程中,总是采用差动平均的方法实时获取一定工艺参数条件下的去除函数特征。图 2 显示了利用 4 个去除函数平均来得到去除函数特征的过程。将 4 个去除函数取平均值就可以减小引入的随机误差,从而提高去除函数的精度。图 3 为实际获得的去除函数模型,可以看出所得到的去除函数在  $Y$  方向上存在左右不对称的现象,而拟合的去除函数模型总是左右对称的。如果用拟合的去除函数模型进行驻留时间的求解,势必会因为这种不对称误差的引入产生相应的误差,无法达到高精度确定性磁流变抛光的要求。

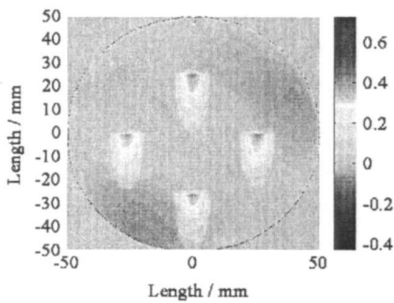


图 2 磁流变去除函数特征提取过程  
Fig. 2 Progress of getting MRF influence function's characteristic

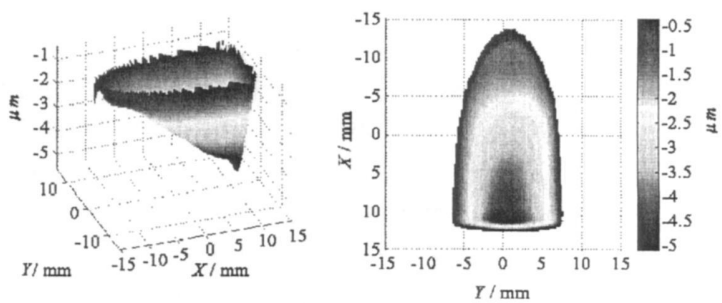


图 3 实际获取的磁流变去除函数模型  
Fig. 3 Model of MRF influence function in actual

### 2 驻留时间的矩阵算法

#### 2.1 光学零件磁流变抛光路径规划

如图 4,将工件沿半径方向和圆周方向分别进行离散式网格划分。半径方向离散间隔为  $\delta$ ,各环的半径分别为:  $\delta, \dots, \rho_{-1}, \rho, \rho_{+1}, \dots, \rho_k$  ( $\rho_k$  为工件的半径),径向分隔线总数为  $m$ ;圆周方向离散间隔为  $\theta$ ,则各处的圆周角度分别为:  $\theta, \dots, \theta_{-1}, \theta, \theta_{+1}, \dots, 2\pi$  (以  $y$  轴负方向为起点),周向分隔线总数为

$n$ 。定义控制节点  $p_{i,j}$  是半径为  $r_i$ , 圆周角度为  $\theta_j$  的位置, 则控制节点总数为  $c = m \times n$ 。如图中阴影部分所示, 定义控制节点  $p_{i,j}$  对应的控制面积为其左前侧的扇形区域。设工件的加工余量(初始面形数据与预期面形数据的差)为  $Z(r, \theta)$ , 根据加工余量, 则可以计算各个控制节点的高度余量  $H(r, \theta)$ 。驻留时间算法就是求解驻留时间矩阵  $T$  (磁流变抛光模在各个控制节点上的驻留时间), 使得各个控制节点的高度去除量尽量接近高度余量<sup>[6]</sup>。已知驻留时间矩阵  $T$  后, 抛光路径可采用多种方式进行规划: ①同心圆路径, 磁流变抛光模沿圆周方向依次驻留同一半径上的各个控制节点, 而后迅速移动至下一半径位置。②子午线路径, 磁流变抛光模沿半径方向依次驻留同一圆周角度上的各个控制节点, 而后迅速移动至下一圆周角度位置。③随机路径或伪随机路径, 磁流变抛光模按一定的规则进行随机或伪随机路径规划, 依次驻留各个控制节点。

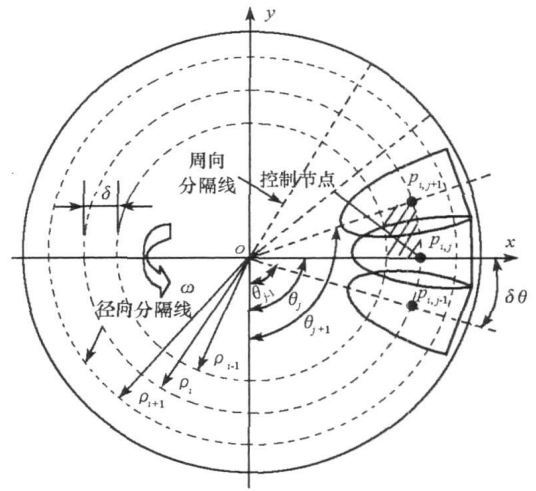


图4 磁流变抛光路径规划  
Fig.4 Path design for the MRF process

## 2.2 矩阵算法的基本原理

如图4, 定义控制节点向量为  $P = [p_{11}, \dots, p_{1n}, p_{21}, \dots, p_{2n}, \dots, p_{m1}, \dots, p_{mn}]^T$ , 定义去除向量  $F^k = [F_1^k, \dots, F_i^k, \dots, F_c^k]^T$ , 表示磁流变抛光模位于第  $k$  个控制节点时, 对所有控制节点的材料去除能力, 设此时抛光模的影响范围为  $\Omega_k$ 。可见, 对于任意控制节点  $P_i$  (向量  $P$  的第  $i$  个分量), 如果其在抛光模的影响范围内(即控制面积在抛光模的影响范围内), 可以根据 MRF 过程的材料去除效率模型确定其材料去除效率  $m_i^k$ ; 如果其在抛光模的影响范围以外, 材料去除效率为零, 则有

$$F_i^k = \begin{cases} m_i^k & P_i \in \Omega_k \\ 0 & P_i \notin \Omega_k \end{cases} \quad (1)$$

定义去除矩阵  $F_{c \times c} = [F^1, \dots, F^k, \dots, F^c]$ , 定义驻留时间向量  $t = [t_1, \dots, t_i, \dots, t_c]^T$ , 其中  $t_i$  为磁流变抛光模在第  $i$  个控制节点的驻留时间, 定义材料去除向量  $R = [R_1, \dots, R_i, \dots, R_c]^T$ , 其中  $R_i$  为磁流变抛光模遍历各个控制节点后, 第  $i$  个控制节点的材料去除量, 则有

$$R = F \cdot t \quad (2)$$

根据加工余量  $Z(r, \theta)$ , 可以计算各个控制节点的高度余量  $H(r, \theta)$ , 定义高度余量向量  $h = [h_1, \dots, h_i, \dots, h_c]^T$ , 其中  $h_i$  为第  $i$  个控制节点的高度余量, 定义残留误差向量  $e = [e_1, \dots, e_i, \dots, e_c]^T$ , 其中  $e_i$  为第  $i$  个控制节点的残留误差, 则有

$$e = h - R = h - F \cdot t \quad (3)$$

$$\|e\| = \|h - F \cdot t\| \quad (4)$$

求解驻留时间的过程即为寻找最优解  $t^*$ , 使得式(4)取得最小值。由于向量  $h$ 、向量  $t$ 、矩阵  $F$  都是非负的, 采用非负最小二乘法 NNLS(nonnegative least squares) 进行求解, 使得范数  $\|e\|$  达到最小值。

## 2.3 去除向量的计算

去除向量和去除矩阵的计算是基于矩阵算法求解驻留时间的关键。如图5, 当磁流变抛光模位于第  $k$  个控制节点时, 抛光模内部的控制节点  $P_i$  的材料去除效率为

$$m_i^k = \frac{1}{A_i} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\rho_1}^{\rho_2} D(\rho, \theta) d\rho d\theta \quad (5)$$

式中,  $D(\rho, \theta)$  为抛光模在半径和圆周方向的去除效率分布函数。  $A_i$  为控

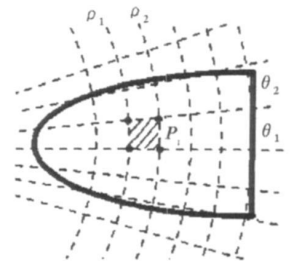


图5 抛光模网格划分图  
Fig.5 Polishing spot of the MRF

制节点  $i$  对应的控制面积。

### 3 加工实例

采用自行开发的磁流变抛光机床 KDMRF-1000F (见图 1) 对有效口径为 145mm 的球面工件进行抛光实验。具体试验条件: 工件材料 BK7, 磁流变抛光液型号 KDMRF-1, 磨料  $\text{CeO}_2$ , 抛光轮半径 150mm, 抛光轮转速 100r/min, 磁场电流 6A, 抛光轮与工件间隙 1.0mm。控制节点划分为: 半径方向间隔 2mm, 圆周方向间隔  $2^\circ$ 。以第一次迭代过程为例, 计算结果如图 6 所示。

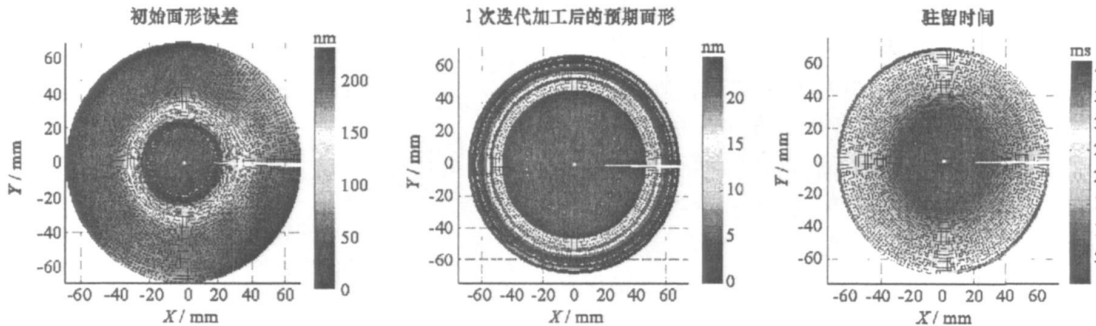


图 6 驻留时间和预期面形的计算结果

Fig. 6 Results of dwell time and predicated surface (original surface error, predicated surface after 1 iteration, dwell time)

如图 7, 两次迭代加工后进行测试 (ZYGO 干涉仪), 该工件的面形误差和表面质量均有明显提高。面形 P-V 值从 293nm 提高到 40.5nm (约为  $\lambda/15$ ), 面形 RMS 值从 48nm 提高到 5nm (约为  $\lambda/125$ ), 表面粗糙度  $R_a$  值从 1.58nm 提高到 0.57nm。

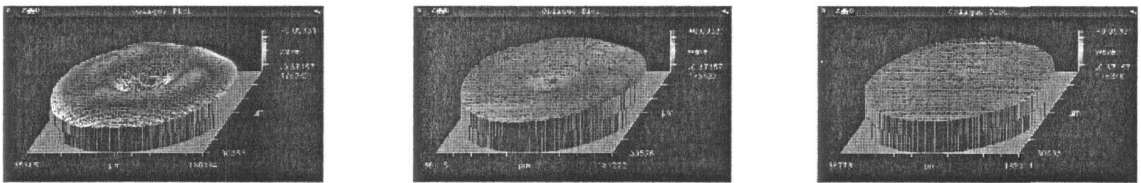


图 7 工件面形收敛效果图

Fig. 7 Measure results of the workpiece surface (original surface, after 1 iteration, after 2 iterations)

### 4 结论

基于非负最小二乘法的驻留时间矩阵算法具有简单直观、计算速度快、面形收敛效率高的特点, 有效地避免了复杂的卷积迭代运算。该算法对回转类光学零件面形误差收敛, 表面质量提高都具有良好的效果。该算法提供的离散式网格划分方法适用范围十分广泛, 对工件加工余量的对称性无特殊要求, 对工件的面形无特殊要求 (球面、非球面、抛物面等均可适用), 甚至通过调整控制节点的位置可以完成离轴镜、扇形镜、六边形镜等异型镜的加工。

### 参考文献:

- [1] Shorey A B. Mechanism of Material Removal in Magnetorheological Finishing of Glass[D]. Ph. D Dissertation, University of Rochester, 2000.
- [2] Kordonski W I, Golini D. Multiple Application of Magnetorheological Effect in High Precision Finishing[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2002, 13: 401.
- [3] Bulsara V, Ah Y, Chandrasekar S, et al. Mechanics of Polishing[C]//Transactions of the ASME, 1998, 65: 410- 416.
- [4] Kordonski W I. Magnetorheological Effect as a Base of New Devices and Technologies[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Mat, 1993, 122: 395- 398.
- [5] Tichy J A. Hydrodynamic Lubrication Theory for the Bingham Plastic Flow Model[J]. Journal of Rheology, 1991, 34: 477- 495.
- [6] Lee H, Yang M Y. Dwell Time Algorithm for Computer-controlled Polishing of Small Axis-symmetrical Aspherical Lens Mold[J]. Opt. Eng, 2001, 40(9): 1936- 1943.
- [7] Schinhaerl M. Mathematical Modelling of Influence Functions in Computer-controlled Polishing: Part II[J]. Appl. Math. Model, 2007(10).
- [8] 张峰, 张学军, 余景池, 等. 磁流变抛光数学模型的建立[J]. 光学技术, 2000, 26(2): 190- 192.