

文章编号:1001-2486(2004)03-0089-04

回转对称非球面光学零件磁流变成形抛光的驻留时间算法*

彭小强,戴一帆,李圣怡,尤伟伟

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

摘要:介绍了一种基于代数算法的回转对称非球面计算机控制表面成形的驻留时间算法。该算法将驻留时间转化为工件自转的整数圈数,并且将抛光模对工件的材料去除效率体现到材料去除矩阵上进行计算。利用非负最小二乘法求解驻留时间向量。最后,利用该算法在自研的磁流变抛光实验装置上对一回转对称光学零件进行 3 次迭代加工,使其面形精度从 $8\mu\text{m}$ 提高到 $0.5\mu\text{m}$ 以内。

关键词:磁流变抛光;驻留时间;计算机控制表面成形;非球面

中图分类号:TH161 **文献标识码:**A

Dwell Time Algorithm for MRF of Axis-symmetrical Aspherical Parts

PENG Xiao-qiang, DAI Yi-fan, Li Sheng-yi, YOU Wei-wei

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

Abstract: A dwell time algorithm for the magnetorheological finishing (MRF) of the small axis-symmetrical aspherical surfaces is described. The dwell time at each dwell grid is calculated as integer multiple of the workpiece rotation period. The removal rate on the surface of workpiece is transferred to a removal matrix. Nonnegative least-squares solution is used to obtain the optimal solution of the dwell time. A piece of axis-symmetrical aspherical surface glass is polished on the MRF experimental facility developed by us. After iterative polishing three times, the residual error of the workpiece decreases from $8\mu\text{m}$ to $0.5\mu\text{m}$.

Key words: MRF; dwell time; computer controlled optical surfacing; aspherical surfaces

应用非球面工件可以使复杂的结构变得简单,有效地消除像差,提高系统的成像质量。系统的尺寸及重量减小,稳定性提高,成本降低。因此,随着科学技术的发展,非球面工件越来越多地应用在光学系统中^[1,2]。传统的光学制造方法是依靠高级光学加工技术人员采用手工修磨方法制造非球面,精度稳定性差,加工效率低下,很难满足生产的要求。随着计算机技术融入到光学零件加工中,计算机控制表面成形(CCOS)技术使得非球面工件加工效率大大缩短,加工费用大大减低。

确定性加工(deterministic processes)技术是 CCOS 加工技术的基础,所谓确定性加工就是工件的材料去除函数在固定的工艺条件下是时不变和空间不变的。磁流变抛光技术(MRF)就是典型的确定性加工技术。它是美国 Rochester 大学 W.I. Kordonski, D. Golini 及其合作者^[3]将电磁学、流体动力学、分析化学相结合而提出的一种新型的光学零件加工方法。该方法通过外磁场对磁流变液的硬度和形状进行实时控制,生成一个压力区域,该区域类似于一个能够与被加工表面相吻合的“柔性抛光模”。磁流变抛光技术具有以下优点:(1)由于磁流变液在不停地循环使用,所以没有磨头磨损、抛光区域温度升高这些传统计算机控制抛光中的不确定因素。(2)由于参与抛光头不是固体抛光盘,而且其硬度可以通过磁场控制,因此,工件能获得高质量表面,且工件基本没有亚表面损伤。(3)磁流变抛光提供了一种可以准确控制去除量的确定性抛光策略方法的可能性,通过控制工艺参数,就能够精确地控制抛光后的光学零件面型。

为了使磁流变的确定性抛光策略成为可能,在知道固定工艺条件下的材料去除函数以及材料去除量后,驻留时间算法是关键^[6]。本文提出一种基于矩阵的算法,适用于回转对称非球面工件的加工。

* 收稿日期:2004-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50375156)

作者简介:彭小强(1977—),男,博士生。

1 MRF 的工件材料去除函数

图 1 所示的 MRF 实验装置模型图,磁流变液被泵入回转抛光盘与工件之间的抛光区域内,并依附于回转抛光盘上流出抛光区域至回收装置中。由于磁场作用,磁流变液在抛光区域内形成“柔性抛光模”对工件抛光。利用 millitron 西德电感进行接触式测量获得工件的实际面形数据。

MRF 通过在抛光区域形成一定的相对速度和压力,利用抛光磨料去除工件表面的材料,满足 Preston 方程,材料去除率函数 R 可以表示为:

$$R = kpv \tag{1}$$

式中, k 为 Preston 系数,在特定的工艺参数下, k 为常数; p 为抛光区域内工件表面所受压力; v 为抛光区内磁流变抛光液与工件表面的相对速度。磁流变抛光液与工件表面的相对速度为回转抛光盘速度与工件加工点自转线速度的矢量和。因此,获得抛光区域内工件表面所受压力便可以获得工件的材料去除率函数。根据 Bingham 塑性润滑理论以及 Martin 润滑理论,沿 x 方向的抛光中线轴有^[5]:

$$p = \frac{6\eta u \sqrt{2Rh}}{h^2} \left[\frac{\gamma}{2} + \frac{\sin 2\gamma}{4} - 1.22575 \cdot \left(\frac{3\gamma}{8} + \frac{3\pi}{16} + \frac{\sin 2\gamma}{4} + \frac{\sin 4\gamma}{32} \right) + \frac{\pi}{4} \right] \tag{2}$$

式中, η 为磁流变液粘度, $\gamma = \arctan(x/\sqrt{2Rh})$ 为代换角, R 为回转抛光盘的半径, h 为磁流变液固体核表面到回转抛光盘的间距。根据上式和短轴承润滑理论,可以估算出磁流变抛光材料去除的三维函数,如图 2 所示。图 2(a)所示抛光试件及其仿真模型是在工件静止不动时获得,在回转非球面加工时,试件是自转的,工件中心和边缘的速率是不同的。由于是做小口径工件($\phi 60\text{mm}$)的成形抛光,而且工件主轴转速设置也很低,因此,工件的自转速率影响可以忽略。如果加工大口径工件,建模时必须考虑该影响因素。

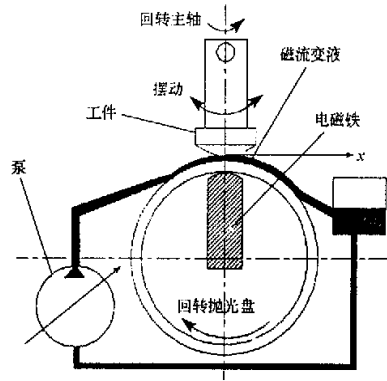


图 1 MRF 试验装置图
Fig.1 Schematic diagram of MRF experiment equipment

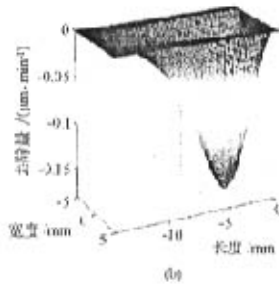
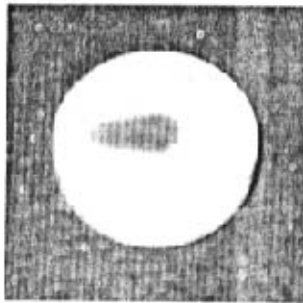


图 2 试件上的 MRF 抛光区照片与材料去除函数图

Fig.2 The photograph of polish zone and the diagram of material removal function

2 回转对称非球面加工抛光代数算法

2.1 回转对称非球面工件 MRF 抛光轨迹规划

如图 3 所示,工件绕对称轴自转,MRF 抛光模沿着工件的一条直径 x 轴上的特定驻留点进给,工件在该驻留点自转了整数圈。如在半径为 r_i 点处,抛光模在抛光区 A_i 对工件发生了材料去除,由于工件

的自转,材料去除是回转对称的。工件在 r_i 点处驻留了时间 T_i ,工件自转了 N_i 圈,工件上的材料去除量为 $H_i(r)$ 。接着,抛光模快速地进行到 r_{i+1} 点抛光区域 A_{i+1} ,驻留 T_{i+1} 时间,即工件自转了 N_{i+1} 圈,在该点工件上的材料去除量为 $H_{i+1}(r)$ 。通过测量获得工件原始表面形貌数据 $Z_m(r)$,该数据与所想要得到的面形数据的差 $Z_d(r)$ 就是非球面工件需要加工的余量 $Z_d(r)$,驻留时间算法就是要得到工件在各个驻留点上的回转圈数 N ,使 MRF 抛光中工件的实际材料去除量尽量接近需要加工的余量 $Z_d(r)$ 。

2.2 材料去除向量

抛光模驻留在 r_i 点 T_i 时间,则工件的材料去除量 $H_i(r)$ 为:

$$H_i(r) = R_i(r, \theta) * T_i \quad (3)$$

式中, $R_i(r, \theta)$ 是 MRF 抛光模在 r_i 点的材料去除率函数,卷积“*”表示工件上某点的材料去除是抛光模各点对该点材料去除的总和。由于加工回转工件只需要一维进给,工件在半径 r_i 处的材料去除与角度 θ 无关,因此,将去除函数 $R_i(r, \theta)$ 转换到一条直径上,称之为转移函数 $R_i(r)$,有:

$$R_i(r) = \frac{1}{\omega} \int_{\theta_1}^{\theta_2} R_i(r, \theta) d\theta \quad (4)$$

则式(3)可转化为:

$$H_i(r) = R_i(r) \cdot N_i \quad (5)$$

为了得到线性的代数方程,将式(5)离散化。对工件表面进行离散化采样,采样间距为 λ ,工件直径 D 范围内有 $2m+1$ 个采样点,则有 $\lambda = D/(2m)$;MRF 抛光驻留点间距为 δ ,如图3,设工件上的驻留点总数为 n ,则有 $\delta = D/(n-1)$ 。则转移函数 $R_i(r)$ 离散化为:

$$R_i^j = \frac{1}{\omega} \int_{\theta_1}^{\theta_2} R_i(r_i, \theta) d\theta, \quad j = 1, \dots, 2m+1 \quad (6)$$

(6)式表示抛光区 A_i 驻留在 r_i 点时,第 j 个采样点上的材料去除率。当第 j 个采样点在抛光区 A_i 范围内时,有 $R_i^j \geq 0$;第 j 个采样点在抛光区 A_i 范围外时, $R_i^j = 0$ 。如果抛光模在 r_i 点驻留了 T_i 时间,工件回转了 N_i 圈,则第 j 点的材料去除量为:

$$H_i^j = R_i^j \cdot N_i \quad (7)$$

由式(6),抛光模驻留在 r_i 点时,工件上各个采样点的材料去除率向量 R_i 为:

$$R_i = [R_i^1, \dots, R_i^{2m+1}]^T \quad (8)$$

MRF 抛光模对整个工件加工完一遍后,第 j 点的材料去除总量 H^j 为:

$$H^j = \sum_i H_i^j = \sum_i R_i^j \cdot N_i = R_i^j \cdot N_1 + \dots + R_i^n \cdot N_n, \quad j = 1, \dots, 2m+1 \quad (9)$$

最后,表示工件所有采样点的材料去除总量的向量 H 为材料去除率矩阵 $R_{(2m+1, n)}$ 和驻留时间向量 N 的乘积:

$$H = [H^1, \dots, H^{2m+1}]^T = R_{(2m+1, n)} \cdot N = [R_1, \dots, R_n] \cdot [N_1, \dots, N_n]^T \quad (10)$$

工件是回转对称的,则有 $H^j = H^{2m+2-j}$;由于工件材料的去除也是回转对称的,则有 $R_i^j = R_i^{2m+2-j}$ 。因此,求解工件的一半表面,也可以得到驻留时间向量 N ,所以,式(10)可以简化为:

$$H_s = R_s \cdot N = [R_{s1}, \dots, R_{sn}] \cdot [N_1, \dots, N_n]^T \quad (11)$$

式中, $H_s = [H^1, \dots, H^{m+1}]^T$, $R_s = [R_1^1, \dots, R_1^{m+1}]^T$ 。

2.3 非负最小二乘法

根据需要加工的余量 $H_d(r)$,确定材料去除向量 $H_s(r)$,由 MRF 的工件材料去除函数确定材料去除率矩阵 R_s ,现要求解式(10)的驻留时间向量 N 。由于材料去除率矩阵 R_s 不是方阵,矩阵 R_s 没有逆

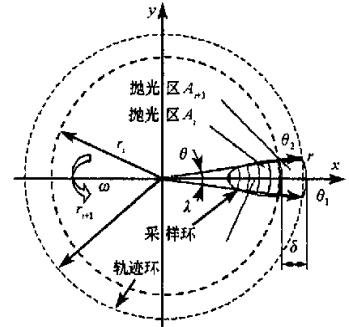


图3 回转非球面 MRF 抛光轨迹规划
Fig.3 Trajectories of the MRF of Axis-symmetrical Aspherical Part

矩阵。因此,利用最小二乘法求解式(10)。由于向量 N 、向量 H_k 、矩阵 R 都是非负的,利用非负最小二乘法 NNLS(nonnegative least squares)求解,使得范数有最小值。

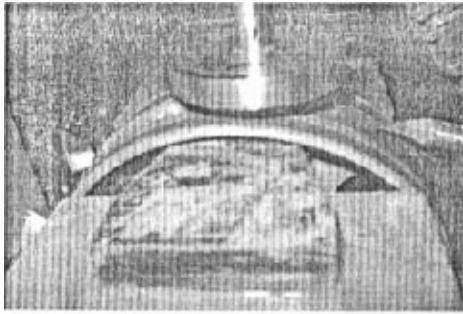


图4 工件 MRF 抛光照片

Fig.4 The photograph of magnetorheological finishing workpiece

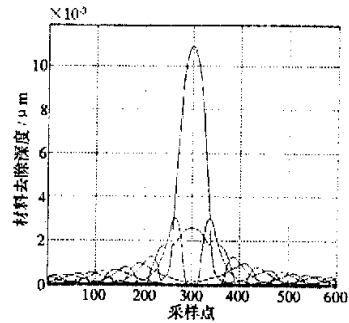


图5 驻留点上的材料去除向量

Fig.5 The material removal vector at the dwell positions

3 加工实验

在自研的磁流变抛光实验系统上对一口径为 $\phi 60$ 的 K9 玻璃工件进行抛光成形实验,工件自转速率为 30r/min ,采样点为 0.1mm ,驻留点间距为 1mm 。图 4 为正在抛光的工件。首先求解出去除率矩阵 $R_{(m,n)}$,如图 5 所示,图中只标示出了向量 R_k ,其中 k 为 5 的倍数。图中中心点去除效率最高是因为在中心点附近式(6)的积分角度能有 $0 \sim 360^\circ$ 。工件从最初面形达到目标面形的材料加工余量为 $8\mu\text{m}$,如图 6 所示。经过 3 次迭代加工后,在工件的中心 $\phi 50\text{mm}$ 范围内,面形精度降到 $0.5\mu\text{m}$ 以内。由于测量手段有限,工件面形精度无法再提高。不过实验已经说明,基于矩阵的驻留时间算法是收敛的,且效率很高。

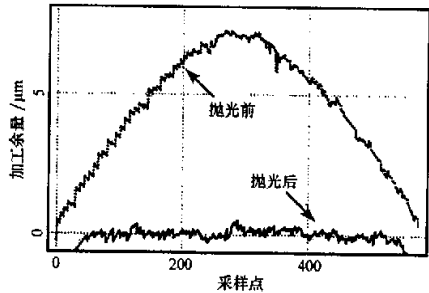


图6 工作的材料去除余量

Fig.6 The residual error of the work piece

4 结论

基于矩阵的驻留时间算法将 CCOS 算法引入到线性代数领域,从而使得驻留时间算法直观、简单,而且没有繁杂的卷积运算。该算法运用于 MRF 对回转非球面抛光,经过实验验证,是非常有效的。

参考文献:

- [1] 余景池,张学军,等. 计算机控制光学表面成型技术综述[J]. 光学技术, 1998, (3).
- [2] 王贵林,李圣怡,戴一帆. 光学表面的分形特点与模拟表征算法[J]. 国防科技大学学报, 2003, (4).
- [3] Kordonski W I, Golini D. Fundamentals of Magnetorheological Fluid Utilization in High Precision Finishing [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2001, 10(9):683 ~ 689.
- [4] 扬沛然. 流体润滑数值分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [5] 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, (4).
- [6] Lee Hocheol, Yang Minyang. Dwell Time Algorithm for Computer-controlled Polishing of Small Axis-symmetrical Aspherical Lens Mold[J]. Opt. Eng., 2001, 40, (9):1936 - 1943.

