

文章编号: 1672-2892(2010)05-0616-04

计算机控制磁流变抛光软件去除算法设计

郑楠, 李海波, 袁志刚

(成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要: 根据计算机控制磁流变抛光的去除机理, 分析了抛光工艺软件的去除算法核心问题即求解驻留时间函数和加工路径设计。采用简森-范锡图特法对驻留时间函数进行迭代求解, 同时优化设计工艺软件的加工路径算法, 开展工艺软件全过程模块化、流程化设计, 完成工艺软件的代码集成测试。最后, 通过工艺软件控制磁流变抛光 $330\text{ mm} \times 330\text{ mm}$ 石英平面反射镜实验, 验证去除算法控制抛光过程的有效性、准确性, 实验值与理论值吻合良好, 从而证实工艺软件去除算法能够准确、有效地指导大口径光学元件的磁流变加工。

关键词: 计算机控制光学表面成形技术; 磁流变抛光技术; 去除算法; 驻留时间函数; 加工路径

中图分类号: TN911.7; TP273

文献标识码: A

Remove algorithm design for computer controlled magnetorheological finishing

ZHENG Nan, LI Hai-bo, YUAN Zhi-gang

(Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract: Based on the mechanism of magnetorheological finishing by computer control for optical surface, the core issues of process software are calculating dwell function and designing of machining path. This study utilized Jansson-Van Cittert algorithm to calculate dwell function, then optimized machining path. It accomplished software modularization programming, modular testing and integration testing. Finally, a validity and reliability test on a fused silicon element with an aperture of $330\text{ mm} \times 330\text{ mm}$ was performed. The data were consistent between analog surface and practical polishing surface. This proves that the software can control the whole magnetorheological finishing process accurately and effectively.

Key words: Computer Controlled Optical Surface(CCOS); magnetorheological finishing; remove function; dwell time function; polishing path design

磁流变抛光技术也是一种计算机控制光学表面成形技术(CCOS)^[1], 具备高效、高精密度、低亚表面缺陷等优点, 其应用范围十分广泛^[2]。其工作原理是: 将去除函数提取出来, 根据定量的面形检测数据和抛光加工过程的控制模型, 在磁流变抛光工艺软件的控制下, 以一定的路径、速度和压力抛光工件表面, 通过控制柔性抛光头在工件表面的驻留时间, 精确控制工件表面材料的去除量, 从而改善元件的局部面形误差, 达到最终的面形精密度要求, 因此该抛光技术的核心问题之一即去除核心算法设计。本文以磁流变抛光工程样机为平台, 完成磁流变抛光工艺软件驻留时间函数算法及加工路径规划设计, 确定软件去除函数控制模块, 并以 $330\text{ mm} \times 330\text{ mm}$ 的石英平面反射镜的磁流变抛光试验, 来验证工艺软件去除算法的有效性、准确性。

1 磁流变抛光工艺软件核心算法模块设计

实际加工中, 去除材料量和去除函数均为已知, 因此问题就变成求解实现给定去除量时的驻留函数, 也就是将被去除材料量与去除函数进行反卷积运算(或称傅里叶变换)的过程^[3], 则工艺软件的核心算法即为驻留时间函数的求解和加工路径的规划设计。设计磁流变抛光工艺软件的核心算法, 首先需要确定材料去除模型, 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, 然后通过磁流变抛光工程样机完成加工过程, 因此,

收稿日期: 2010-05-07; 修回日期: 2010-06-13

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金资助项目(2004Z0304)

材料去除模型为工艺软件设计的首要因素。

1.1 简森-范锡图特法建立去除函数模型

根据 Preston 假设，求解实现给定去除量时的驻留函数 $D'(x, y)$ ，也就是将被去除材料量 $\Delta h(x, y)$ 与去除函数 $R(x, y)$ 进行反卷积运算(或称傅里叶变换)的过程，可描述为一个只随抛光模的位置变化而变化的线性过程^[4]：

$$\Delta h(x, y) = D'(x, y) * R(x, y) \tag{1}$$

$$D'(x, y) = \Delta h(x, y) (*) R(x, y) \tag{2}$$

式(2)即为驻留时间函数 $D'(x, y)$ 的普遍表达式，实际加工中，常用求解驻留时间的算法有：按比例估算法、傅里叶变换法以及简森-范锡图特(Jansson-Van Cittert)法等^[5]，结合磁流变抛光特性，本文采用简森-范锡图特法迭代求解驻留时间。随着迭代次数增加，驻留函数形状会越来越尖，最终趋于某 2 个数值之间，而每次去除的材料 $\Delta z^{(k)}$ (其中 k 为归一化次数)由驻留函数的形状与去除函数决定，即迭代过程的收敛条件是 $D^{(k)} ** R$ 趋近于 δ 函数，设定第 k 次归一化常数 n^k ，使理论去除量与实际相符。在软件算法设计过程中，为使面形误差最小，这些工作都用归一化后的数据来进行。设归一的面形误差的最小值为 0，最大值为 256。用下标“ n ”表示归一化后的数据，则有：

$$h_{0n}(i, j) = 256R_0 [h_0(i, j) - \Delta h_{0\min}] \tag{3}$$

$$R_n(i, j) = 256R_0 [R(i, j) - R_{\min}] \tag{4}$$

式中： $h_0=1/(\Delta h_{0\max} - \Delta h_{0\min})$, $R_0=1/(R_{\max} - R_{\min})$ ， $\Delta h_{0\max}$ 和 $\Delta h_{0\min}$ 分别为表面误差函数 Δh_0 的最大、最小值； R_{\max} 和 R_{\min} 分别为去除函数 R 的最大、最小值。第 k 次迭代后的面形误差可用下面的方法求得：

$$E_k = E_{k-1} + C_0 \Delta h^{(k)} = E_{k-1} + C_0 (D^{(k)} ** R) = E_{k-1} + \frac{C_0 D_0}{256} \frac{R_0}{256} (D^{(k)} ** R_n) \tag{5}$$

式中： $D^{(k)}$ 是第 k 次迭代后归一化产生的驻留函数， D_0 为未知的归一化常数，用来估算驻留函数； R_n 为归一化后的去除函数， R_0 为 R_n 的归一化常数； C_0 为驻留函数归一化时选用的常数，使用峰-峰归一时，为了使驻留函数的归一与峰值相匹配，设常数 C_1 ，令 $C_1 = C_0 D_0 / 256$ ，有式(6)成立， $\Delta h_n^{(k)} = D^{(k)} ** R_n$ ，即第 k 次迭代产生的驻留函数与去除函数的卷积。

$$E_k = E_{k-1} + C_1 \frac{R_0}{256} (\Delta h_n^{(k)}) \tag{6}$$

采用使均方根误差最小的方法求得 $C_1 R_0$ ，重新估算的驻留函数为： $D'(k) = C_1 D_n^{(k)}$ 。根据该算法理论设计，经过迭代循环求解驻留时间函数，提取出去除函数，其求解流程如图 1 所示。根据图 1，在每个加工周期，磁流变抛光工艺软件的主要设计任务为：对硬件设施的出口数据提供录入接口，获取光学元件的面形情况及机床驱动设备的运动参数设置，经去除核心算法分析处理，确定磨头的抛光路径及驻留函数，同时选择合适的加工参数，通过控制磁流变抛光头在工件表面的驻留时间，准确控制工件表面的定点、定量去除，进入模拟加工模块，预期模拟加工后的面形结果，最终由操作人员判断收敛是否有效，并生成机控程序指导实际加工，达到预期的材料去除量，实现光学元件面形的快速收敛，至此，一个加工周期结束。

1.2 加工路径算法优化设计

磁流变抛光工艺本身是一种“小磨头”

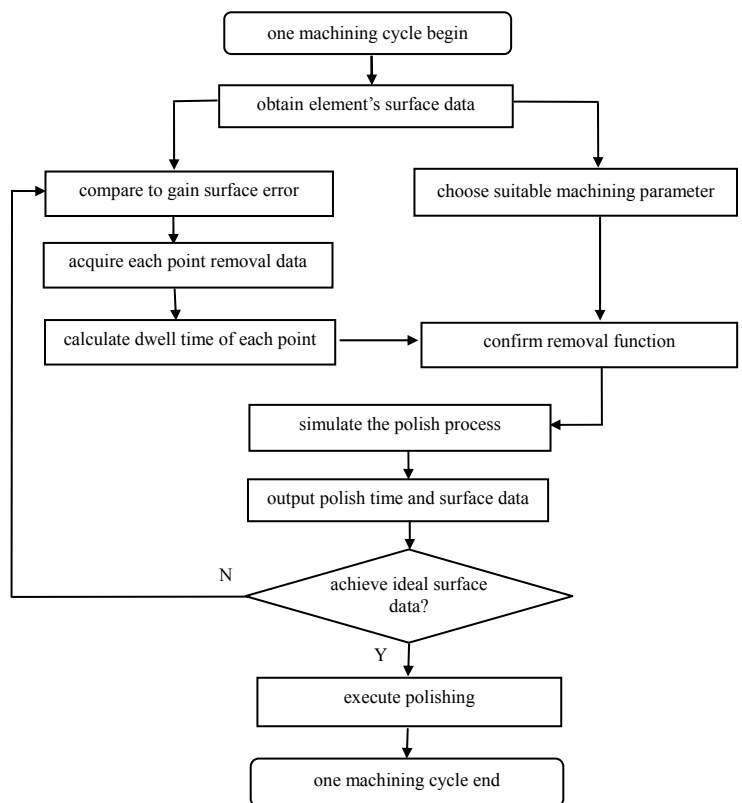


Fig.1 Kernel arithmetic process cycle
图 1 核心算法求解流程

叠加的加工方式, 需要结合光学元件的加工尺寸和路径之间的关系, 来确定加工路径分布方式^[6]。路径分布方式的算法有很多种, 常见的有3种: 直线分布型、螺旋线分布型及非规则分布型^[7]。根据比对分析, 鉴于目前实际加工元件形状大多为方形, 其模拟加工误差分布如图2所示, 适合用直线分布型路径; 其次, 直线分布型路径在分析干涉仪输出时简单易行, 数据存储结构简单^[8]。据此, 最终选用直线分布型加工路径。在单个加工周期中, 通过对理想面形和初加工面形比较, 获取到元件的总材料去除量, 根据去除函数的去除率, 确定单步加工量, 为有效避免产生碎带和尽可能消除加工误差, 在工艺软件中设置适当的偏置量、行间距等细化加工参数, 改变加工直线在元件上的相对位置, 实现加工路径优化设计, 如图3所示。为实现“单次测量, 多工序生成”的加工模式, 因工艺软件对 AutoCAD 提供数据接口, 因此可直接导入该软件生成的文件, 利用手画线对光学元件进行局部修形, 能够有效抑制“边缘效应”。

由于工程样机采用五轴联动实现磁流变抛光加工, 因此, 使用工艺软件可根据待加工元件的结构特点, 选用直角坐标或极坐标下的直线分布型抛光路径, 如图4所示, 便于操作者灵活选用。

2 去除函数算法验证实验

为验证工艺软件控制的准确性及有效性, 使用 330 mm × 330 mm 石英材料的平面反射镜进行磁流变抛光, 按照图5所示的3个阶段制备抛光斑: 完成平行抛光斑采集步骤(图5(b))后, 利用工艺软件计算图5(a)与图5(b)采斑前后元件的面形变化值, 提取去除斑(见图5(c))。

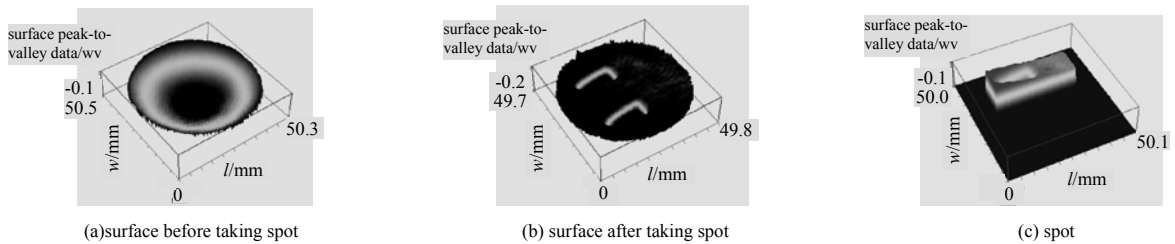


Fig.5 Procedure of taking spot
图5 工艺实验抛光斑制备过程

去除函数生成后, 进入模拟加工阶段。按照工艺软件的操作流程逐步操作, 完成加工参数设置后, 工艺软件给出模拟加工后的面形预期及加工所需时间, 如图6所示, 由操作人员判断加工是否准确, 参数设置是否合适, 最后进行实际加工。

根据工艺软件算法, 模拟加工得出的面形与实际加工后得到的面形如图7~图8所示, 从图中可以得出结论: 工艺软件模拟加工与实际加工结果吻合, 充分证明工艺软件控制磁流变抛光过程的准确性、有效性。

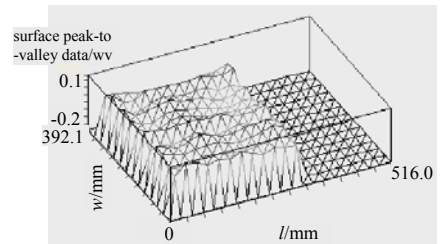


Fig.2 Computer simulation machining error distribution
图2 模拟加工误差分布图

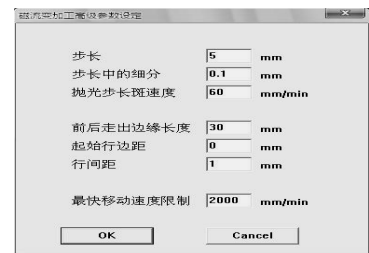


Fig.3 Machining step parameter optimization design
图3 加工步长参数优化设计

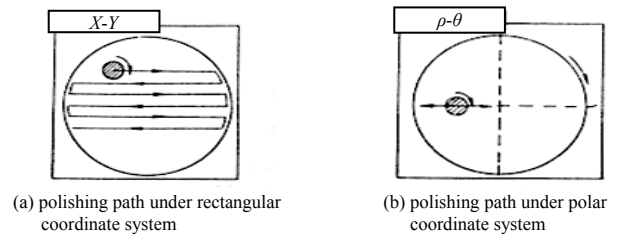


Fig.4 Polishing path design
图4 抛光路径设计

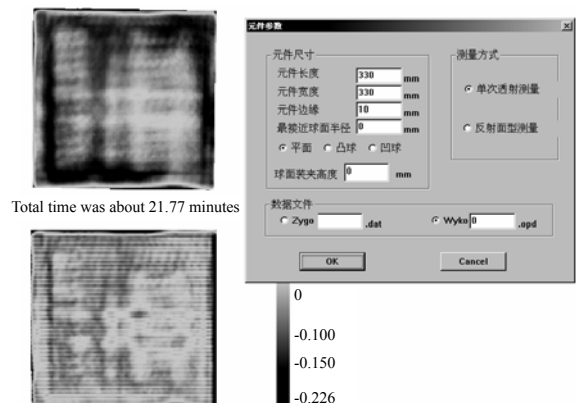


Fig.6 Simulated and expectant surface data
图6 模拟加工及预期面形图

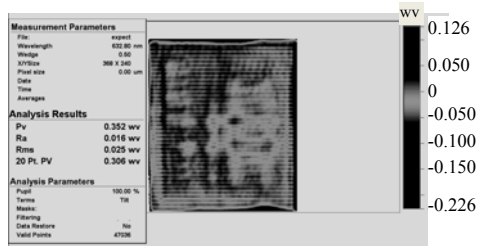


Fig.7 Simulated surface data by software
图7 工艺软件模拟加工结果图

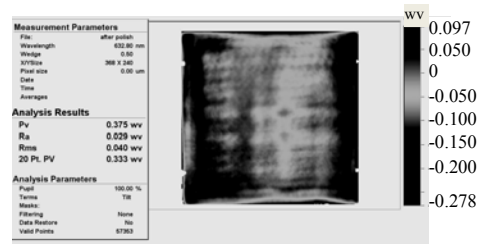


Fig.8 Surface data after polishing
图8 实际加工后面形形貌分布

3 结论

基于对磁流变抛光机理的研究,通过确定驻留时间函数算法及加工路径规划算法,从而完成计算机控制磁流变抛光技术的核心——去除函数设计,最后完成平面大口径光学元件磁流变抛光工艺软件的全流程模块化设计及功能测试。为验证工艺软件控制加工的准确性、有效性,以 330 mm × 330 mm 的石英平面镜为例模拟加工后进行实际加工,加工后的面形结果与模拟预期结果吻合,从而验证了磁流变抛光工艺软件能够更好地全程准确、快速、有效地指导整个抛光过程。

参考文献:

- [1] Shorey A B. Mechanism of material removal in magnetorheological finishing of glass[D]. USA:University of Rochester, 2000.
- [2] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京:科学出版社, 2001. (YANG Li. Advanced Optics Manufacture Technique[M]. Beijing: Science Press,2001.)
- [3] Tricard M,Dumas P R,Golini D. New industrial applications of magnetorheological finishing[C]// Optical Fabrication and Testing. Rochester,New York:[s.n.], 2004.
- [4] 袁巨龙,王志伟,文东辉,等. 超精密加工现状综述[J]. 机械工程学报, 2007,43(1):34-41. (YUAN Ju-long,WANG Zhi-wei, WEN Dong-hui,et al. Review of the current situation of ultra-precision machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007,43(1):34-41.)
- [5] 孙希威,韩强,于大泳,等. 磁流变抛光驻留时间算法[J]. 光电工程, 2009,36(1):114-119. (SUN Xi-wei,HAN Qiang,YU Da-yong,et al. Magnetorheological Finishing Dwell Time Algorithm[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009,36(1):114-119.)
- [6] 康桂文,张飞虎,董申. 磁流变技术研究及其在光学加工中的应用[J]. 光学技术, 2004,30(3):354-356. (KANG Gui-wen, ZHANG Fei-hu,DOG Shen. Research on magnetorheological fluid and application in optical machining[J]. Optical Technique, 2004,30(3):354-356.)
- [7] Arrasmith S R,Kozhinova I A,Gregg L L,et al. Details of polishing spot in magnetorheological finishing[C]// Proc. SPIE. Denver,CO,USA:[s.n.], 1993,3782:92-99.
- [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. (ZHANG Feng,ZHANG Xue-jun,YU Jing-chi,et al. Foundation of mathematics model of magnetorheological finishing[J]. Optical Technique, 2000, 26(2):190-192.)

作者简介:



郑楠(1982-),女,河北省邢台市人,硕士,助理工程师,主要从事先进光学制造技术研究,email:nanceerie@163.com.

李海波(1977-),女,安徽省无为县人,工程师,主要从事先进光学制造技术研究。

袁志刚(1985-),男,河北省衡水市人,助理工程师,主要从事子口径抛光工艺研究。