

文章编号: 1001- 2486(2009) 04- 0005- 05

# 磁流变抛光螺旋扫描方式的算法与实现\*

胡 皓, 彭小强, 戴帆, 石 峰

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 研究基于螺旋扫描路径的光学镜面磁流变抛光的算法与实现。该算法将去除函数矩阵转化成驻留时间解算的线性方程组的系数矩阵, 并利用其为稀疏矩阵的特点来进行快速迭代计算, 然后将求得的驻留时间分配到螺旋扫描路径上以求得整个路径上速度变化, 从而控制磁流变抛光机床直线轴和转轴作插补运动。利用该算法在自研的 KDMRF- 200 磁流变抛光机床上对一 K9 玻璃平面镜进行了两次迭代加工, 面形均方根误差由初始的  $0.128\lambda$  加工到  $0.022\lambda$ , 验证了该算法的正确性和实用性。

**关键词:** 磁流变抛光; 驻留时间; 螺旋扫描路径

**中图分类号:** TH161 **文献标识码:** A

## Algorithm and Implementation of Magnetorheological Finishing with Spiral Scan Mode

HU Hao, PENG Xiao-qiang, DAI Yi-fan, SHI Feng

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

**Abstract:** The algorithm and implementation of Magnetorheological Finishing with spiral scan mode was researched. The algorithm implemented changes the removal function matrix to the coefficient matrices of the linear system of equations for dwell-time calculation. These equations are resolved quickly because the coefficient matrices are sparse. The variations of speed on the spiral path are obtained by the allocation of the dwell time and the work piece can be processed well using the machine that contains the information about the MRF process. An experiment on a K9 circular plane mirror is made on the KDMRF-200 machine developed by us. The RMS surface error is  $0.02\lambda$  ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ ) through the 2nd iteration.

**Key words:** magnetorheological finishing; dwell time; spiral scan path

磁流变抛光技术(Magnetorheological Finishing, MRF)利用磁流变抛光液在梯度磁场中的流变性变化,在工件表面形成一个压力区域,该区域类似于一个与工件表面吻合的“柔性抛光模”,在各参数稳定控制的基础上,“柔性抛光模”是极其稳定的。光学镜面磁流变修形基于计算机控制光学成型原理<sup>[1]</sup>(Computer Controlled Optics Shaping, CCOS),利用稳定的去除函数对工件材料进行剪切去除,从而实现面形误差修正。相对传统抛光加工方法而言,这种技术具有抛光效率高、去除函数稳定、表面质量高、易于进行计算机控制等显著的优点。确定性磁流变抛光的工艺流程是:根据所测得的初始面形误差和去除函数,计算“抛光模”在工件上各位置的驻留时间,然后将驻留时间形成机床基代码来控制“抛光模”在加工路径上各加工点的停留时间或速度变化,这一过程反复迭代将工件面形加工至最终要求精度。由于磁流变抛光的去除函数不是回转对称的,采用螺旋扫描加工方式时,随着驻留点的不同,去除函数矩阵就会不同,因此其驻留时间的解算方法和实现方法也随路径方式的改变而改变。

### 1 螺旋扫描加工方式

国内的磁流变抛光目前主要采用光栅扫描的加工路径,如图 1(b)所示,主要是因为加工过程中其去除函数方向固定不变,容易采用比较成熟的脉冲迭代法进行去除函数与驻留时间的二维卷积运

\* 收稿日期:2009- 05- 10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50775215)

作者简介:胡皓(1982-),男,博士生。

算,计算速度快,能够满足实际加工的要求。相对于光栅扫描路径来说,螺旋扫描加工方式(图 1(a))能够减小加工旋转对称工件的机床行程并减少机床的自由度,因此有利于简化机床的结构,提高机床的运动精度,减小加工的成本。磁流变抛光螺旋扫描驻留时间计算与实现的难点在于:一是在螺旋扫描加工方式中,去除函数随着镜面的方位角变化而变化,不能用线性扫描方式中的时间-空间不变的线性卷积模型来描述,从而导致驻留时间的计算不能简单地采用脉冲迭代法;二是由于在螺旋扫描路径上难以找到在光栅扫描路径上空间分布均匀的驻留点,因此给点驻留的实现也带来了困难。Hocheol<sup>[2]</sup>、彭小强<sup>[3]</sup>和 Schindler<sup>[6]</sup>分别研究了在“小磨头”抛光、磁流变抛光技术和离子束修形中如何利用螺旋扫描加工方式修正面形回转对称误差。通过将二维的去除函数绕加工回转轴简化成一维的转移函数,计算去除函数在各个加工环带上驻留整数圈以实现驻留时间。由于这种方法是将去除函数进行一维简化,因此决定了其所讨论的方法只能修正回转对称镜面的回转对称误差,而不能对镜面的非回转对称误差进行修正。周林<sup>[5]</sup>针对离子束加工模型研究了驻留时间算法,但是由于加工模型的差异,其算法并不能直接应用于磁流变抛光加工中。针对这些问题,基于磁流变修形加工和磁流变去除函数的特点,就磁流变螺旋扫描加工方式的驻留时间求解算法、驻留时间实现方式等开展理论和实验研究,由此形成一套完整的螺旋扫描加工方式工艺流程。

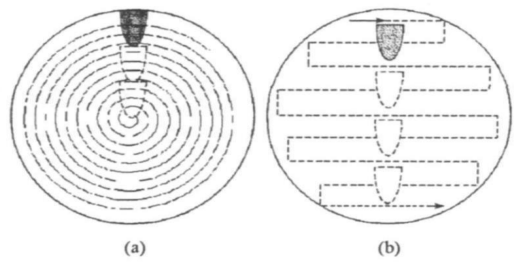


图 1 磁流变抛光加工路径

Fig. 1 Processing path of MRF

## 2 驻留时间求解

### 2.1 数据离散

根据 CCOS 的原理,材料去除量是去除函数和驻留时间的二维卷积,求解驻留时间的过程即是一个反卷积的计算过程,在工程应用上,一般将材料去除量、去除函数和驻留时间都用离散矩阵表示。因为螺旋扫描路径上难以找到均匀分布的加工点,因此先对光学零件材料去除量和去除函数进行均匀等面积离散网格划分,如图 2 所示。

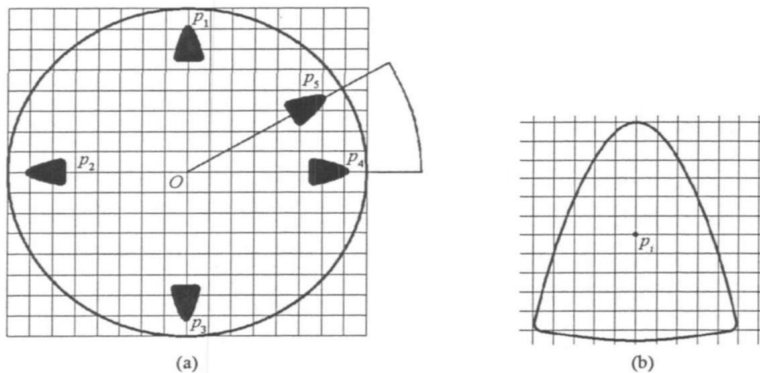


图 2 去除量和去除函数的网格划分

Fig. 2 Graticule division of material removal and removal function

网格的长宽分别用  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  表示,可得一系列控制节点  $p_i$ ,定义其控制面积  $S_i = \Delta x \cdot \Delta y$ 。定义控制节点向量  $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_m]^T$ ,定义驻留点向量  $\mathbf{R} = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T$ ,定义去除向量  $\mathbf{F}^k = [F_1^k, F_2^k, \dots, F_m^k]^T$ ,它表示去除函数位于驻留点  $r_k$  时,对所有控制节点的材料去除能力,则对任意节点  $p_i$  有

$$F_i^k = \frac{1}{S_i} \iint_{in} D(x_i, y_i) dx dy \quad (1)$$

式中,  $D(x_i, y_i)$  为去除函数的分布函数,  $S_{in}$  为  $S_i$  在去除函数内部的区域,显然,当  $p_i$  位于去除函数外部

时,  $F_i^k = 0$ 。

## 2.2 建立线性方程组

定义去除矩阵, 其中  $F_i^k$  表示去除函数位于驻留点  $r_k$  时, 对控制节点  $p_i$  的材料去除。

$$F_{m \times n} = \begin{bmatrix} F_1^1 & F_1^2 & \dots & F_1^k & \dots & F_1^n \\ F_2^1 & F_2^2 & \dots & F_2^k & \dots & F_2^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_i^1 & F_i^2 & \dots & F_i^k & \dots & F_i^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_m^1 & F_m^2 & \dots & F_m^k & \dots & F_m^n \end{bmatrix} \quad (2)$$

定义驻留时间向量  $T = [t_1, t_2, \dots, t_n]^T$ , 材料去除向量  $Q = [q_1, q_2, \dots, q_m]^T$ , 则有线性方程组:

$$F \times T = Q \quad (3)$$

因此, 驻留点加工时间的解算就转化成了线性方程组(3)中驻留时间向量的求解。

## 2.3 方程求解

求解线性方程组(3)的方法很多, 总的来说可以分为两类: 直接法和迭代法。而方程组的系数矩阵  $F_{m \times n}$  条件数很大使得方程组为病态, 求解此类方程一般采用正则化方法, 但是直接用正则化法求解驻留时间, 随着系数矩阵维数的增加, 方法复杂度急剧上升, 计算时间过长<sup>[4]</sup>。磁流变抛光属于一种典型的小磨头抛光, 去除函数相对于加工工件来说尺寸要小得多, 因此系数矩阵稀疏化的特征很明显, 因此在这里驻留时间的求解转化成了大型稀疏矩阵线性方程组的求解。针对大型稀疏矩阵线性方程组的研究十分深入, 求解方法主要有 GMRES 迭代法、BICG 法、多波前法、LU 直接分解法、QR 分解法、多重网格法, 甚至有专用的求解器, 并且可求解病态矩阵。大型稀疏矩阵的求解速度日益提高, 例如采用 GSS 求解器, 1 万阶矩阵数值分解时间为 0.01s, 十万阶为 0.1s, 73s 分解一个 68 万阶的矩阵, 因此这种方法能够满足实际加工快速计算的需要。

## 3 驻留时间实现

与线性扫描加工方式不同, 螺旋扫描加工方式的驻留时间在某一螺旋路径上实现, 如图 1(a) 所示, 设螺旋路径用以下方程式表示:

$$r = k(\theta) \quad (4)$$

式中,  $r, \theta$  为螺旋线的极坐标分量,  $k$  为螺旋线的控制参数。

在螺旋扫描加工方式中, 由于在螺旋线上很难寻求均匀分布于镜面上的点阵, 在点驻留方式中相连驻留点之间的运动时间不一致, 会在工艺过程中引入非均匀分布的附加驻留时间, 从而影响加工精度, 因此采用连续速度实现方式将驻留时间分区域实现更为准确, 实现方法是通过改变各个区域的加工扫描速度以体现区域的驻留时间来实现对面形的修正, 其具体实现流程如图 3 所示。

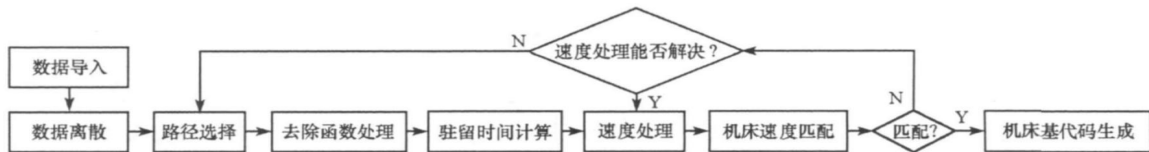


图 3 螺旋扫描加工的工艺流程

Fig. 3 Process flow of spiral scan

将面形数据和去除函数数据导入离散后, 根据选择的螺旋路径将去除函数进行处理后建立如(3)式的线性方程组, 设由(3)式求解出的驻留时间密度为  $T(p_i)$ , 则根据加工路径可以得到螺旋路径上的驻留时间分布密度  $T'(p_i)$ , 则在某一环带上,  $d\theta$  角度微元形成的区域驻留时间可以用下式计算:

$$t(r, \theta) = T'(r, \theta) r p(\theta) d\theta \quad (5)$$

其中  $p(\theta)$  为螺旋线的螺距。

螺距的合理选择直接影响到加工的精度和加工后的面形误差分布,与去除函数的覆盖面积大小和初始面形直接相关。

先不考虑机床的动态性能,对于平面和低陡度(非)球面,在式(5)给定的时间内完成螺旋线上相连两点之间的运动,运动系统的合成运动速度为

$$v(r, \theta) = \frac{\sqrt{(\frac{d\theta}{dt})^2 + \left(\frac{1}{i(r, \theta)} \frac{dr}{d\theta}\right)^2}}{i(r, \theta)} \quad (6)$$

在得到整个螺旋线上的速度分布后,结合机床的动态性能参数看机床能否实现所计算出来的速度,一般都需要执行速度的平滑处理。根据所要加工的精度进行这一过程的迭代计算,最后生成机床基代码进行工件的加工。

## 4 实验与分析

### 4.1 实验验证

根据图3所示的计算与实现流程,对一口径为100mm的K9玻璃平面镜进行修形实验验证,实验设备为自研的KDMRF-200磁流变抛光机床,其主轴最高转速为400r/min,其定位精度为30"。加工工件的初始面形如图4所示,测量数据由Zygo XP/D-1000波面干涉仪得到,因为加工中工件设置了定位标签,所以只使用90%的口径,镜面初始误差RMS(Root Mean Square)值为0.128λ(λ=632.8nm),PV(Peak-valley)值为0.633λ,加工中使用的去除函数如图5所示,去除函数长度为10mm,宽度为4.5mm,峰值去除效率为1.6μm/min,体积去除效率为2.87×10<sup>7</sup>μm<sup>3</sup>/min。

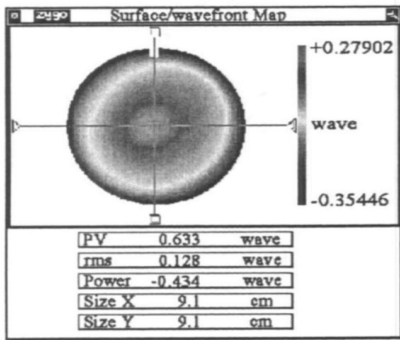


图4 工件初始面形

Fig. 4 Initial surface shape of the work

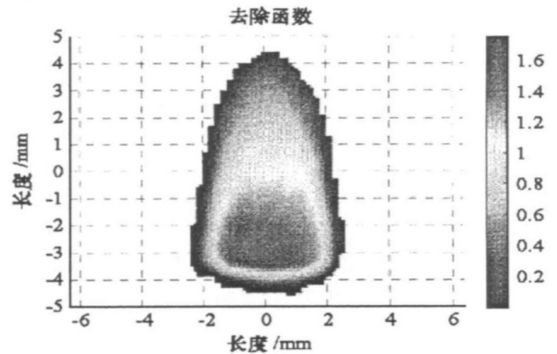


图5 去除函数模型

Fig. 5 Model of the removal function

经过两次迭代加工,共用2h,镜面的RMS值变为了0.022λ, PV值为0.419λ, RMS值收敛率为5.82,如图6和图7所示,实验证明了算法是正确有效的。由于机床精度、速度以及去除函数稳定性等方面的限制,没有再进行进一步的加工。

### 4.2 问题分析

随着加工精度的上升,工件需去除的材料越来越少,而越靠近工件加工中心,螺旋线所包围的区域越小,因此计算所得到的驻留时间也非常短,从而导致加工中心区域时工件的转动速度很快,一般会超过机床的容许速度。如果直接采用速度截断的方式,用机床容许的最高速度代替中心计算速度,往往会造成工件中心出现“过切”的现象,出现一个很深的“孔洞”,如图8所示。为了克服这一缺点,第一种方法是增加均匀去除层的厚度来延长在整个加工面积上的驻留时间,但是这种做法往往会使得工件的整体加工时间变长,影响加工的效率;第二种方法是采用等面积螺旋线路径来进行加工<sup>[7]</sup>,但这种螺旋路径中心区域螺距往往过大,导致中心加工纹路十分明显。利用等距螺旋线和等面积螺旋线路径的优缺点,采用两者相结合的螺旋路径来进行加工是比较合乎实际应用的,例如在工件半径小于抛光斑点长度

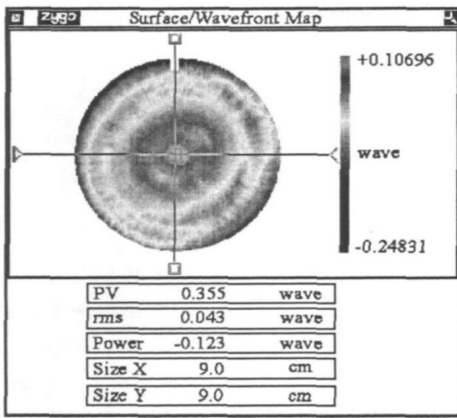


图 6 第一次迭代加工结果

Fig. 6 Result of the first iterative processing

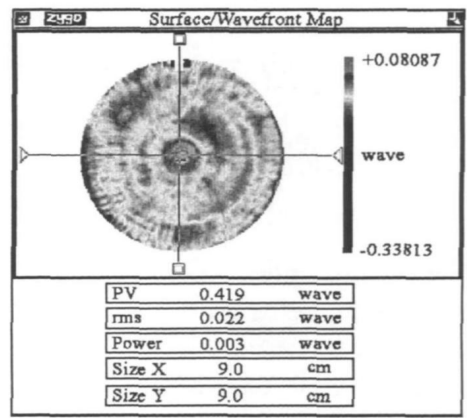


图 7 第二次迭代加工结果

Fig. 7 Result of the second iterative processing

的区域内使用等面积螺旋线扫描加工,而在此半径之外的区域使用等距螺旋线扫描加工。

由于在计算的过程中得到的速度分布往往有加减速的尖峰在里面,而实际加工时机床是无法实现急剧的加减速的,因此在考虑加工精度的同时还需要对计算得到的速度进行平滑处理,以保证机床能够严格跟踪所需要的速度变化。

在实际加工过程中,工件的装夹精度和去除函数的提取精度等都将直接对最终的加工精度产生很大的影响,而中心区域则是对这些误差最为敏感的区域。

## 5 结论

通过对去除函数进行处理,将磁流变抛光的驻留时间解算转化成大型稀疏系数矩阵的线性方程组的求解,其解算速度快,计算精度较高,可以满足实际加工快速计算的需要。

同时通过路径的合理选择和速度的平滑处理,解决了加工镜面中心机床动态性能不足导致中央容易出现孔洞的问题。通过实验验证了磁流变抛光螺旋扫描加工是一种行之有效的高效率、高确定性的加工方法。

## 参考文献:

- [1] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] Hodeol L, Minyang Y. Dwell Time Algorithm for Computer-controlled Polishing of Small Axis-symmetrical Aspherical Lens Mold[J]. Opt. Eng, 2001, 40(9): 1936- 1943.
- [3] 彭小强, 戴一帆, 李圣怡, 等. 回转对称非球面光学零件磁流变成型抛光的驻留时间算法[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(3): 89- 92.
- [4] 邓伟杰, 郑立功, 史亚莉, 等. 基于线性代数和正则化法的驻留时间算法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1009- 1015.
- [5] 周林, 戴一帆, 解旭辉, 等. 离子束加工去除模型和驻留时间算法[J]. 纳米技术与精密工程, 2007, 5(2): 107- 112.
- [6] Schindler A, Boehm G, Haensel T, et al. Precision Optical Asphere Fabrication by Plasma Jet Chemical Etching (PJCE) and Ion Beam Figuring[J]. SPIE, 2001, 4451: 242- 248.
- [7] 周林. 光学镜面离子束修形理论与工艺研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.

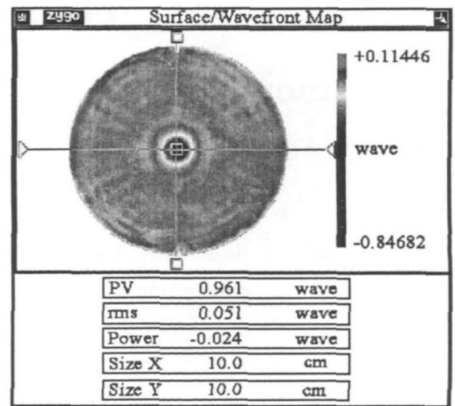


图 8 中心出现“过切”

Fig. 8 Excessive Removal in center