

大口径光学元件磁流变加工驻留时间求解算法

李龙响^{1,2} 邓伟杰² 张斌智² 白 杨^{1,2} 郑立功² 张学军²

(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 为了解决大口径光学元件磁流变高精度加工问题, 基于矩阵运算模型, 提出了 SBB (Subspace Barzilai and Borwein) 最小非负二乘与自适应 Tikhonov 正则化相结合的驻留时间快速求解方法。同时, 在一次收敛中采用双去除函数优化螺旋线轨迹下光学元件的加工, 保证中心区域与全口径面形精度一致。仿真表明该算法与常用 Lawson-Hanson 最小非负二乘法相比, 计算精度一致且求解效率大幅提高。对 $\Phi 600$ mm 以彗差为主的光学表面模拟加工, 峰谷 (PV) 值和均方根 (RMS) 值从初始的 2.712λ 与 0.461λ 中心区域全局一致收敛到 0.306λ 和 0.0199λ ($\lambda = 632.8$ nm)。因此, 提出的算法能够在有效保证面形收敛精度的同时快速获得稳定可靠的驻留时间分布, 为磁流变抛光应用于大口径光学元件提供有力支持。

关键词 光学制造; 驻留时间; 矩阵运算; 全局收敛; 磁流变抛光

中图分类号 TH161 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0522001

Dwell Time Algorithm for Large Aperture Optical Element in Magnetorheological Finishing

Li Longxiang^{1,2} Deng Weijie² Zhang Binzhi² Bai Yang^{1,2} Zheng Ligong² Zhang Xuejun²

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to obtain high precise optical surface by magnetorheological finishing (MRF), an algorithm combined with SBB (Subspace Barzilai and Borwein) and adaptive Tikhonov regulation is proposed to get dwell time distribution based on matrix multiplication. Moreover, double removal functions are introduced to polishing of the circle mirror with spiral path to guarantee the convergence of center area and surface precision of full aperture. Algorithm's simulation shows that the accuracy of the method mentioned above is the same with traditional Lawson-Hanson method, but the computing rate is much faster than the latter. The example calculation of $\Phi 600$ mm circle mirror with main coma surface error presents that the value of peak-valley (PV) value and root mean square (RMS) from 2.712λ and 0.461λ converges to 0.306λ and 0.0199λ ($\lambda = 632.8$ nm) with the center and full aperture consistent. Therefore, the algorithm in this paper can ensure the convergence accuracy of the surface shape while solving the dwell time distribution effectively and keeping the solution accurate and stable fast. The result provides support to the application of MRF on large aperture optical element.

Key words optical fabrication; dwell time; matrix multiplication; full aperture convergence; magnetorheological finishing

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 220.4840

1 引 言

磁流变抛光 (MRF) 是一种高效确定性的光学

加工工艺^[1], 具有去除函数稳定、下表面破坏层小、边缘效应小, 无复印效应、加工精度高及修形能力强

收稿日期: 2013-09-18; 收到修改稿日期: 2013-11-13

基金项目: 国家自然科学基金 (61036015)

作者简介: 李龙响 (1987—), 男, 博士研究生, 主要从事光学磁流变加工、检测方面的研究。E-mail: lellxhit@126.com

导师简介: 张学军 (1968—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大口径光学加工、检测方面的研究。

E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

等诸多优点^[2-7]。因此,磁流变抛光在高精度光学表面加工中有着广泛的应用。但是磁流变抛光实际应用于大口径光学表面的加工却鲜有报道。磁流变抛光技术加工大口径光学元件的工程应用面临很多困难,其中的关键技术之一就是驻留时间的高效稳定求解。

MRF 是计算机控制光学表面成形 (CCOS) 的衍生方法之一,驻留时间求解的基本依据仍然是期望材料去除量等于磨头的去除函数和驻留时间的卷积。传统驻留时间求解算法主要有傅里叶变换、迭代法等。其中,傅里叶变换法^[8]是根据空域卷积等效于傅里叶变换频域的乘积,把卷积运算变换为乘积运算;迭代法有数值迭代法,脉冲迭代法,简森-范希图特法^[9-10]等,基本思路都是给出合适的初始值,以卷积运算为基础进行相应的迭代计算。但是对于去除函数非圆对称分布的磁流变加工,这两种方法一般仅适用于光栅式加工轨迹^[10]。

基于矩阵求解法^[11-12]是 20 世纪 90 年代发展起来的一种算法。它根据光学加工的实际物理意义将卷积运算变换为矩阵乘积运算,这种方法不仅适用于各种轨迹的磁流变加工,而且驻留点和去除点

密度可以任意选取,甚至可以在一次收敛中使用不同去除函数。但是这种方法并不能直接应用于大口径光学元件的磁流变加工。当加工大口径光学元件时,与传统加工方法相比,一般磁流变抛光机床的去除函数作用区域相对较小,这使得驻留点分布密集,同时面形误差采样点多且分布无规律,从而导致驻留时间求解问题数据规模大、病态性强,求解效率和面形收敛精度受到极大限制。因此,本文旨在建立一种以矩阵运算为基础,速度快、面形收敛精度高的驻留时间求解算法,为磁流变抛光应用于实际的大口径光学元件加工提供可靠的指导。

2 MRF 驻留时间矩阵模型

2.1 MRF 去除函数

磁流变抛光的去除函数定义为:单位时间内磨头驻留在某一固定点时的材料去除量分布。应用图 1 所示与白俄罗斯合作研发的永磁型磁流变抛光设备,其基本原理是: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

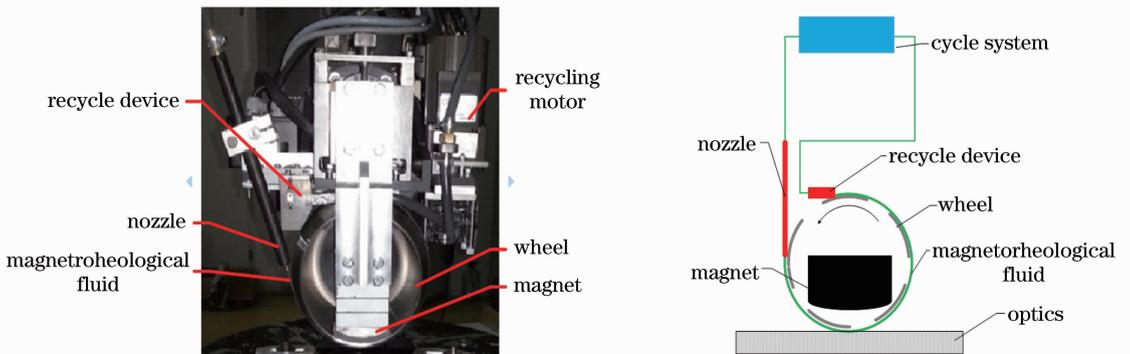


图 1 磁流变抛光设备及原理图

Fig. 1 Machine and principle of MRF

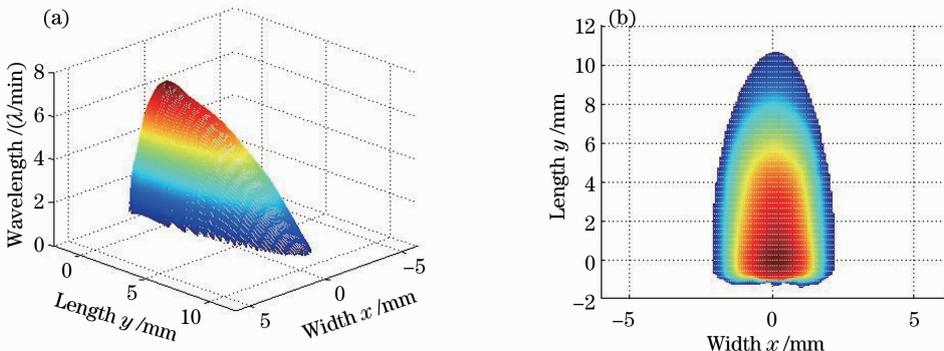


图 2 实验去除函数分布

Fig. 2 Removal function distribution of experiments

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很小,但是剪切力很大,以剪切的方式实现材料的去除。磁流变液中的磨料是粒径为 $8\ \mu\text{m}$ 的氧化铈,抛光材料为 K9 玻璃,抛光轮直径为 $160\ \text{mm}$,抛光轮转速为 $120\ \text{r/min}$,抛光轮最低点到玻璃工件表面的抛光间隙是 $1.1\ \text{mm}$,常温下测出多组 MRF 去除函数,进行平均处理后如图 2 所示,其作用区域是一个约 $11.85\ \text{mm} \times 4.15\ \text{mm}$ 大小的标准 D 字形,材料去除率仅沿 x 方向对称分布。

2.2 矩阵模型

磁流变抛光加工工艺作为一种特殊的 CCOS 技术,材料去除的基本模型依然遵循 Preston 方程。以 Preston 方程为基础,当磨头以某一加工轨迹扫描整个光学表面后,可以得到:

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

式中 $R_{\text{var}}(x_i - \xi_j, y_i - \eta_j)$ 表示磨头驻留在驻留点 (ξ_j, η_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 (ξ_j, η_j) 的时间, N 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点 (x_i, y_i) 总的去除量。尽管(1)式可以认为是卷积的形式,但是和圆对称去除函数不同,在螺旋线或者同心圆的轨迹中, D 字型的去除函数 R_{var} 和光学表面坐标轴的相对角度随着加工区域的变化而变化,传统基于卷积的傅里叶变换和迭代法等算法不适合这种情况。因此,根据(1)式的实际物理意义,把这种特殊的卷积变换为矩阵的乘积。

令 $E(x_i, y_i) = e_i$, $R_{\text{var}}(x_i - \xi_j, y_i - \eta_j) = r_{ij}$, $T(\xi_j, \eta_j) = t_j$,

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

简单描述为 $\mathbf{E} = \mathbf{R} \times \mathbf{T}$, 一般称之为驻留时间矩阵方程, \mathbf{R} 是去除函数矩阵, M 是去除点数量, N 是驻留点数量。这样,反卷积运算求解驻留时间变换

成求解(2)式矩阵方程的非负解。磁流变加工中光栅、螺旋线或同心圆等加工轨迹下的卷积都可以转换成矩阵运算的形式,驻留点和去除点的密度也可以任意选取,同时在一次收敛中可以使用多种去除函数及多种加工轨迹,因此这种基于矩阵的驻留时间求解算法具有广泛的适用性,为磁流变加工过程控制参量优化提供了方便的算法平台。

3 驻留时间优化求解

3.1 SBB 快速非负最小二乘法

在(2)式驻留时间矩阵方程中,去除函数矩阵 \mathbf{R} 的行列维度分别是光学表面去除点和驻留点的数量,对于大口径光学元件磁流变加工而言, \mathbf{R} 是一个大规模甚至超大规模稀疏矩阵,同时驻留时间又不能为负值。因此需要一种能够快速高精度求解稀疏矩阵方程非负解的算法。最常用的非负解求解工具是商品化计算软件 Matlab 中的 lsqnonneg 函数,它以 Lawson-Hanson 非负二乘为核心算法,这种方法虽然求解精度很高,但是计算效率却不能满足大口径光学元件磁流变加工的驻留时间求解。

Dongmin 等^[13]在 2012 年提出了超快求解线性方程组非负解的 SBB (Subspace Barzilai and Borwein)方法。为了描述方便,(2)式可以写成:

$$\mathbf{R}\mathbf{t} = \mathbf{e}, \mathbf{t} \geq 0, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{R} \in \mathcal{R}^{M \times N}$, $\mathbf{e} \in \mathcal{R}^M$. \mathbf{R} 是驻留时间矩阵, \mathbf{t} 是驻留时间分布的列向量, \mathbf{e} 是去除点的列向量。SBB 算法以求解(3)式的非负最小二乘解为基础,优化残差的 2 范数,其相当于优化面形残差的均方根(RMS)值,标准形式为

$$\min_t [f(\mathbf{t})] = \frac{1}{2} \|\mathbf{R}\mathbf{t} - \mathbf{e}\|^2, \mathbf{t} \geq 0. \quad (4)$$

考虑到利用二阶海森矩阵巨大的计算开销, SBB 是一种基于一阶梯度的非负最小二乘算法。给定初始值后,迭代计算公式为

$$\mathbf{t}^{k+1} = [\mathbf{t}^k - \beta^i \cdot \alpha^k \nabla f(\mathbf{t}^k)]_+, \quad (5)$$

式中 $[\cdot]_+$ 表示正交投影, β^i 是确保迭代收敛的可调收缩因子,由 SBB 方法的步长改进而来的迭代步长 α^k 通过下式得到:

$$\begin{cases} \alpha^k = \frac{\|\nabla \hat{f}^{k-1}\|^2}{\langle \nabla \hat{f}^{k-1}, \mathbf{R}^T \mathbf{R} \nabla \hat{f}^{k-1} \rangle} \text{ or } \alpha^k = \frac{\langle \nabla \hat{f}^{k-1}, \mathbf{R}^T \mathbf{R} \nabla \hat{f}^{k-1} \rangle}{\mathbf{R}^T \mathbf{R} \nabla \hat{f}^{k-1}}, \\ [\nabla \hat{f}^{k-1}]_i = \begin{cases} \partial_i f(\mathbf{t}^{k-1}), & i \notin B(\mathbf{t}^k) \\ 0, & \text{other wise} \end{cases}, \\ B(\mathbf{t}^k) = \{i \mid t_i = 0, \partial_i f(\mathbf{t}^{k-1}) > 0\}. \end{cases} \quad (6)$$

迭代终止条件:

$$\| \nabla f_+(t^k) \|_\infty \leq \epsilon, \epsilon \geq 0. \quad (7)$$

∇f_+ 是(4)式中 f 的投影梯度, 定义为

$$[\nabla f_+(t^k)]_i = \begin{cases} \min[0, \partial_i f(t)], & t_i = 0 \\ \partial_i f(t), & t_i \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

SBB 算法不要求 f 是严格的凸规划, 因此对 \mathbf{R} 矩阵要求比较宽松, \mathbf{R} 可以是列满秩的也可以是亏秩的矩阵。在实际磁流变加工过程中获得的 \mathbf{R} 往往是列满秩的, 因此 SBB 能够有效求解(2)式。

3.2 自适应 Tikhonov 正则化

和所有反问题的不稳定性一样, 应用 SBB 算法快速获得的驻留时间可能是不稳定的, 即面形误差微小的扰动将导致驻留时间分布的巨大变化。这种驻留时间分布不稳定的现象取决于去除函数矩阵 \mathbf{R} 的病态性: \mathbf{R} 的病态性越强, 驻留时间越不稳定。实际光学加工过程中, 虽然磁流变加工的去除函数是确定的, 但是面形误差、驻留点和数据点的分布多种多样, \mathbf{R} 可能是病态的甚至是强病态的。因此, 为了确保驻留时间的稳定性, 引入数学上解决不稳定性问题的普遍方法—Tikhonov 正则化^[14]。

引入标准正则化因子后, (3)式等价于

$$(\mathbf{R}^T \mathbf{R} + \beta \mathbf{I}) \mathbf{t} = \mathbf{R}^T \mathbf{e}, \mathbf{t} \geq 0, \quad (9)$$

优化目标为

$$\min_t [f(t)] = [\| \mathbf{R} \mathbf{t} - \mathbf{e} \|^2 + \beta \| \mathbf{I} \mathbf{t} \|^2], \mathbf{t} \geq 0, \quad (10)$$

即满足下式最小:

$$\min \left\{ \sqrt{\sum_{k=1}^M \left\{ \sum_{i=1}^N [R(k, i)t(i) - e(k)]^2 \right\} + \beta \sum_{i=1}^N t_i^2} \right\}. \quad (11)$$

数学上, β 正则化因子的引入起到了稳定线性方程组解的作用。 β 值大, 解的稳定性好, 但是与实际问题的解偏差大; β 值小, 起到的调节方程组病态性的作用越小, 解的稳定性不好。在磁流变抛光中 β 还有其实际的物理意义, 由(10)式可以看出, 它是在计算的剩余面形误差和总的驻留时间之间引入了一个调节权重, 这样可以选择合适的 β , 既保证面形收敛精度又使加工时间不会太长。

β 正则化因子的选取一般用 L 曲线方法^[15], 但是这种方法计算量大, 效率低。引用文献[12]提出的一种自适应正则化方法。这种方法通过迭代可以迅速调整正则化因子 β 接近最优值, 而与 β 的初始值无关。基本计算公式为

$$\beta^{k+1} = \ln \left(\frac{\| \mathbf{e} - \mathbf{R} \mathbf{t}_{\text{sbb}}^k \|_2^2}{\| \mathbf{t}_{\text{sbb}}^k \|_2^2} + 1 \right). \quad (12)$$

β^{k+1} 是第 $k+1$ 次迭代的修正值, $\mathbf{t}_{\text{sbb}}^k$ 是第 k 次迭代中应用 SBB 快速求解的驻留时间解。当相邻两次迭代结果相差很小时, 可以停止迭代:

$$(\| \mathbf{t}_{\text{sbb}}^{k+1} \|_2^2 - \| \mathbf{t}_{\text{sbb}}^k \|_2^2) / \| \mathbf{t}_{\text{sbb}}^k \|_2^2 \leq \delta, \delta \geq 0. \quad (13)$$

这种 SBB 和自适应正则化结合的方法, 既满足了对大型稀疏矩阵方程的求解效率和精度, 又保证了了解的稳定性, 对于大口径光学元件的驻留时间求解非常有利。

3.3 面形收敛优化

由讨论可知上述算法能快速高效求解稳定的驻留时间。但对磁流变抛光以螺旋线轨迹加工圆形光学表面的仿真结果表明: 光学表面的中心出现了明显的凸起或者凹陷形式的残余误差, 这直接影响了全局峰谷(PV)值和 RMS 值的收敛。考虑磁流变抛光的去除函数分布, 其原因可以用图 3(a)说明。当去除函数以图 3(a)中的方式沿着螺旋线轨迹扫描时, 1) 如果螺旋线最小的半径小于去除函数 y 方向长度的 μ 倍 ($0 < \mu < 1$), 去除函数去除量较大的部分发生重叠, 在收敛的过程中光学表面中心点附近形成凹陷; 2) 如果螺旋线最小的半径大于去除函数 y 方向长的 γ ($\gamma > 0$) 倍, 去除函数去除量较小的部分发生重叠甚至不发生重叠, 在收敛的过程中光学表面中心点附近形成凸起。理论上 $\mu = \gamma$ 是一个平衡的位置, 但是仿真表明, 此时中心点附近区域面形收敛出现振荡, 即中心区域是凹陷(凸起), 凹陷周围出现凸起(凹陷), 这种凸凹往往振荡多次, 因此在单一去除函数下, 仅仅调节螺旋线轨迹最小半径这一变量不能解决中心区域明显凹陷和凸起的问题。

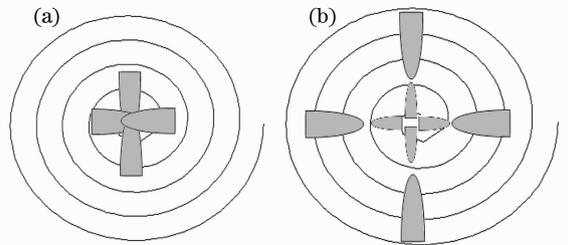


图 3 螺旋线轨迹。(a)单一去除函数;
(b)双去除函数组合

Fig. 3 Spiral path. (a) Single removal function;
(b) composition of double removal function

为了解决中心区域一致收敛的问题, 可以利用基于矩阵运算的驻留时间求解算法, 在去除函数矩阵 \mathbf{R} 的建立过程中, 针对同一螺旋线加工轨迹, 不同区域使用不同去除函数, 这样去除函数成为另一

可控参量。使用如图 3(b)所示的双去除函数优化面形收敛,即在螺旋线靠近光学表面中心的区域采用适当的小去除函数,其余面形区域仍用原去除函数。小去除函数和原去除函数方向相差 180° ,因此二者在重叠区域沿着光学元件矢径方向的去除量互补。另外,由于只有中心区域用小的去除函数,光学表面全口径的加工效率基本不受影响。

由磁流变加工的基本原理可知小去除函数在工

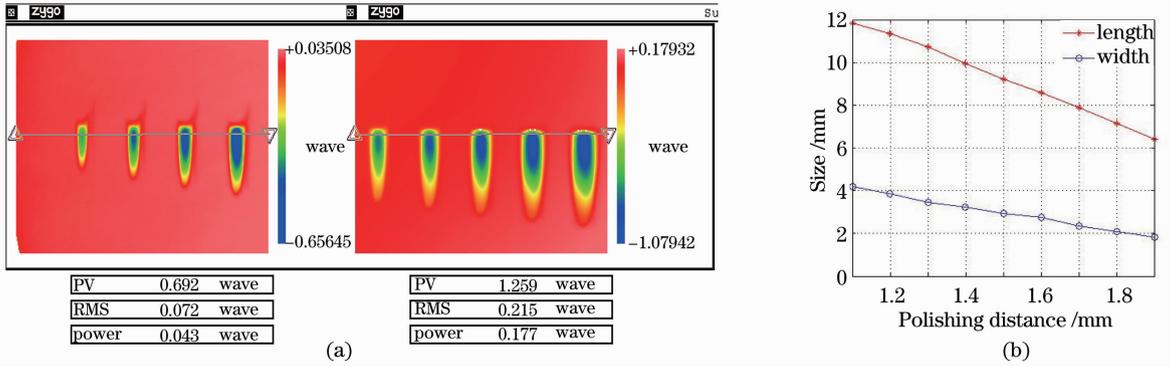


图 4 不同抛光间隙 MRF 去除函数。(a)干涉仪测试图；(b)D形作用区域大小

Fig. 4 MRF removal function with different polishing distances. (a) Interferometer figure; (b) size of D shape area

面形收敛的优化过程仍然以 2 范数最小为目标,确保 RMS 的收敛最优,表示为

$$\text{minimize } f(r, rf, t) = \frac{1}{2} \| \mathbf{R}(r, rf) \mathbf{t} - \mathbf{e} \|^2, \quad (14)$$

$$\mathbf{t} \geq 0,$$

式中 $\mathbf{R}(r, rf)$ 是去除函数矩阵,与螺旋线最小半径 r 和所用的去除函数 rf 有关。实际仿真表明此时 PV 接近最优值。

4 实例计算

为了不失一般性,如图 5 所示的初始面形来自磁流变抛光中实际加工的 $\Phi 100$ mm 光学表面,面形误差 PV 值为 2.712λ , RMS 值为 0.461λ ($\lambda = 632.8$ nm),面形误差以彗差为主,并有一定的中频误差。选取螺旋线加工轨迹。同时,为了排除不同面形对仿真结果的影响,将初始面形放大到不同口径再进行仿真计算,这样每种口径的面形都能保持一致的误差分布。

在单一去除函数的条件下选择 RMS 最优的加工轨迹参数,在相同的计算环境下,采用 SBB 结合自适应 Tikhonov 正则化和 Matlab 软件中 lsqnonneg 函数两种方法,分别求解驻留时间矩阵(2)式。为了合理比较两种算法,文中算法获得的正则化因子直接应用于 lsqnonneg 函数,避免 L-曲线法给后者带来复杂的计算。算法比较结果如图 6

程应用中易于实现,只需要调节磁流变缎带凸起的压入深度。根据使用的磁流变抛光设备,压入深度的调整一般是通过调节抛光间隙来实现的。图 4(a)给出了定点抛光 10s 时测得的不同抛光间隙的去除函数,图 4(b)给出了与图 4(a)相应的去除函数作用区域大小。除抛光间隙外,其他加工条件和 2.1 节一致。

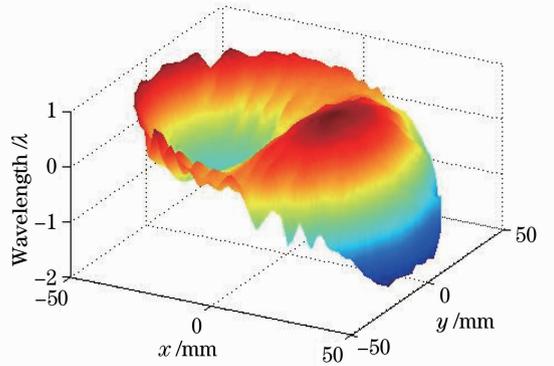


图 5 初始面形误差分布

Fig. 5 Initial surface error distribution

所示。

由图 6(a)可以看出,两种计算方法在相同加工参数下的 RMS 值和 PV 值收敛精度基本一致,这表明使用 SBB 结合自适应 Tikhonov 正则化的方法求解驻留时间,其计算精度可以得到保证。但是两种方法的求解效率差别却很大:如图 6(b)所示,相同的计算环境下,所提方法计算效率提高了 3 个数量级。其所用去除函数作用区域较小(约 $11.85 \text{ mm} \times 4.15 \text{ mm}$),去除点和驻留点分别以 1 mm 间隔密集取点,当光学元件直径从 100 mm 增大到 600 mm 时,如图 6(b)所示去除函数矩阵 \mathbf{R} 行列值 M 和 N 的数量级从 8000 增大到 280000。但即使在 $\Phi 600$ mm

口径下, SBB 和自适应正则化相结合的方法也仅用约 100 s 的时间完成求解; 当加工 1 m 量级或更大口径的光学表面时, 使用的去除函数作用区域会相应增大(一般可以达到 40 mm×20 mm), 去除点和

驻留点密度适当稀疏调整, 因此 SBB 结合自适应 Tikhonov 正则化求解方法可以在保证高计算精度条件下, 快速获得大口径光学元件磁流变加工的稳定驻留时间分布。

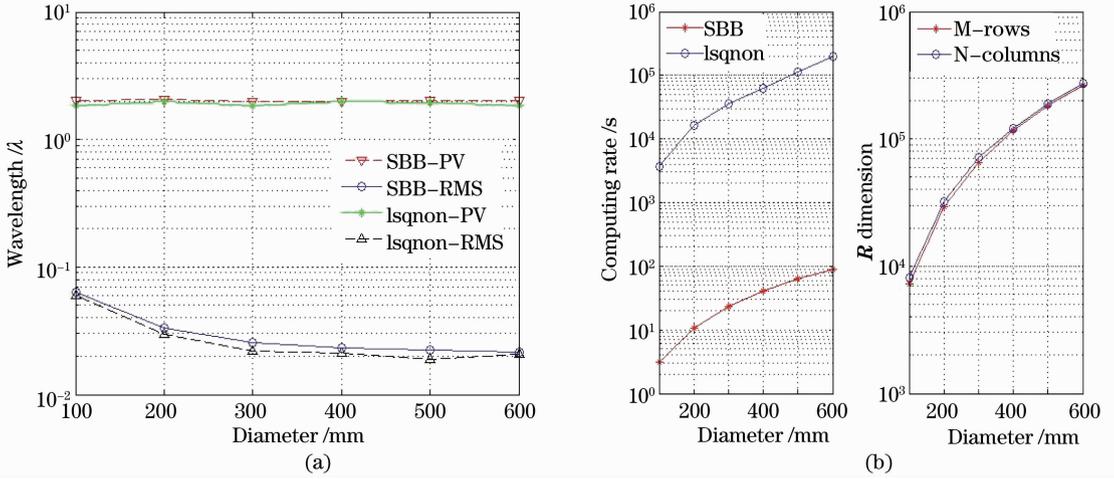


图 6 单一去除函数仿真。(a)模拟加工后的 PV 和 RMS 值; (b)不同口径下的计算效率

Fig. 6 Single removal function simulation. (a) Value of PV and RMS; (b) computing efficient with different apertures

另一方面, 图 6(a)中收敛后的 PV 值和 RMS 值与初始面形比较, 可以看出 RMS 值有较好的收敛, 但是 PV 值的收敛不足。以扩展后得到的 Φ600 mm 圆形光学表面为例, 螺旋线轨迹模拟加工并采用单一去除函数优化的结果如图 7(a)所示: PV 值 1.947λ, RMS 值 0.0318λ, 收敛后面形的中心点附近凹陷, 凹陷周围是较高的凸起, 中心区域收敛以波纹的形式振荡扩散, 这也是一般情况下单一去除函数 RMS 最优收敛附近的常见面形分布。双去除函数优化结果如图 7(b)所示: PV 值 0.306λ, RMS 值 0.0199λ, 二者都明显优于单一去除函数的结果, 尤其是 PV 值的收

敛得到大幅提高; 中心和全局收敛基本一致, 面形的极值存在于边缘而不是中心区域。另外, 和单一去除函数相比, 由于双去除函数优化过程仅在中心区域引入一个较小的去除函数, 对于同一光学元件去除函数矩阵 R 行值不变, 列值的变化小于 3%, 因此驻留时间的计算效率与单一去除函数基本一致。这些充分说明: 当磁流变抛光以螺旋线轨迹加工圆形光学表面时, 双去除函数组合优化能够很好地解决面形中心与全局收敛不一致的问题, 进一步提高面形收敛精度。

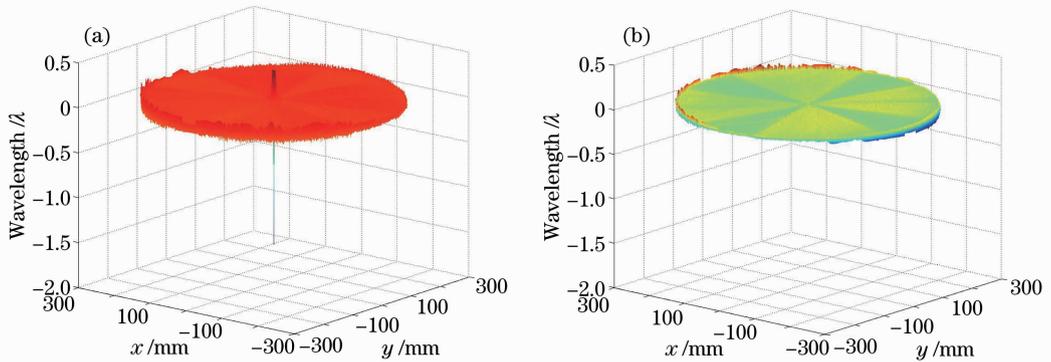


图 7 模拟加工后面形误差。(a)单一去除函数; (b)双去除函数优化

Fig. 7 Surface error after simulation. (a) Single removal function; (b) optimization of double removal function

5 结 论

以稳定的非圆对称的磁流变加工去除函数为基

础, 将驻留时间求解的传统反卷积方法转换为驻留时间矩阵方程的求解。然后, 采用非负最小二乘

SBB 和无需先验知识的自适应 Tikhonov 正则化相结合的方法, 求解驻留时间矩阵方程, 在保证解的精度和稳定性的同时有效提高求解效率。最后, 以双去除函优化收敛过程, 有力保证了螺旋线轨迹下圆形光学表面磁流变加工时中心与全局收敛的一致性。仿真结果表明该算法相对于常用的高精度 Lawson-Hanson 非负二乘算法, 求解精度一致的同时计算效率提高了 3 个数量级。对彗差为主的 $\Phi 600$ mm 光学表面以螺旋线轨迹模拟加工, PV 值和 RMS 值从初始的 2.712λ 和 0.461λ 收敛到 0.306λ 和 0.0199λ , 中心区域与全局收敛基本一致。因此, 该算法能够在有效保证面形收敛精度的同时实现驻留时间快速稳定求解, 有力地指导大口径光学表面的磁流变加工。

参 考 文 献

- 1 D C Harris. History of magnetorheological finishing [C]. SPIE, 2011, 8016: 80160N.
- 2 S D Jacobs, D Golini, Y Hsu, *et al.*. Magnetorheological finishing: a deterministic process for optics manufacturing [C]. SPIE, 1995, 2576: 372-382.
- 3 A B Shorey, W Kordonski, M Tricard. Magnetorheological finishing of large and lightweight optics [C]. SPIE, 2004, 5533: 99-107.
- 4 Dai Yifan, Shi Feng, Peng Xiaoqiang, *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by magnetorheological finishing [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 198-205.
戴一帆, 石峰, 彭小强, 等. 光学镜面磁流变确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 198-205.
- 5 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan, *et al.*. Research of errors analysis and material removal stability in fluid jet polishing [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112012.
施春燕, 袁家虎, 伍凡, 等. 射流抛光误差分析与材料去除稳定性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112012.
- 6 Zhang Feng, Deng Weijie. Magnetic-medium assistant polishing of silicon modification layer on silicon carbide surface [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1116001.
张峰, 邓伟杰. 碳化硅表面硅改性层的磁介质辅助抛光[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1116001.
- 7 Zhao Xianyun, Fan Bin, Zeng Zhige, *et al.*. Design simulation and optimization for the flexible displacement support structure based on $\Phi 1.8$ m lightweight reflector [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322002.
钟显云, 范斌, 曾志革, 等. $\Phi 1.8$ m 轻质镜能动磨盘技术抛光的柔性限位支撑设计仿真和优化分析[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322002.
- 8 Wu Jianfen, Lu Zhenwu, Zhang Hongxin, *et al.*. Optimized dwell time solution for optics in ion beam figuring [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 192-197.
武建芬, 卢振武, 张红鑫, 等. 光学元件离子束加工驻留时间优化求解[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 192-197.
- 9 Luo Lili, He Jianguo, Wang Yajun, *et al.*. Large-scale dwell time algorithm for computer controlled optical surfacing [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3207-3212.
罗丽丽, 何建国, 王亚军, 等. 计算机控制光学表面成形中大规模驻留时间求解[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3207-3212.
- 10 Li Shengyi, Dai Yifan. New Technology for Manufacturing and Measurement of Large and Middle-Scale Aspheric Surfaces [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011. 51-67.
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.
- 11 C L Charles, C M Egert, K W Hylton, *et al.*. Advanced matrix-based algorithm for ion beam milling of optical components [C]. SPIE, 1992, 1752. 54-62.
- 12 Deng Weijie, Zheng Ligong, Shi Yali, *et al.*. Dwell time algorithm based on matrix algebra and regularization method [J]. Optical and Precision Engineering, 2007, 15(7): 1009-1015.
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 D Kim, S Sra, I S Dhillon. A non-monotonic method for large-scale non-negative least squares [J]. Optimization Methods & Software, 2013, 28(5): 1012-1039.
- 14 G H Golub, P C Hansen, D P O'Leary. Tikhonov regularization and total least squares [J]. SIAM J Matrix Anal Appl, 1999, 21(1): 185-194.
- 15 P C Hansen. The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problems [J]. SIAM J Sci Comput, 1993, 14(6): 1487-1503.

栏目编辑: 韩峰