

基于信赖域狗腿法的非球面抛光后置处理方法

杨航^{1*}, 赵功², 张强¹, 汪玉兰¹, 黄文², 何建国², 贾阳³

¹ 遵义师范学院工学院, 贵州 遵义 563006;

² 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900;

³ 华中光电技术研究所武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430073

摘要 提出利用信赖域狗腿法解决通用非球面光学元件抛光后置求解的强非线性问题。基于低序体表示和齐次变换方法建立适用于任意非球面面形和任意轨迹抛光的正向运动学模型; 基于信赖域狗腿法建立强非线性正向运动学模型的数值优化求解方法, 获得相应的逆向运动学数值结果; 对逆向运动学数值求解结果进行处理得到各轴控制量, 用于抛光后置处理。对一初始面形均方根值为 0.037λ 的离轴非球面采用光栅线进行 4 轮抛光, 采用螺旋线进行 5 轮抛光, 加工元件的面形收敛到均方根值为 0.012λ , 总收敛效率达到 67.57%, 表明所提后置处理方法是正确的, 能够用于非球面加工。

关键词 光学制造; 非球面制造; 信赖域方法; 狗腿法; 后置处理

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.052202

Aspherical Finishing Post Processing Method Based on Trust Region Dogleg Method

Yang Hang^{1*}, Zhao Gong², Zhang Qiang¹, Wang Yulan¹, Huang Wen², He Jianguo², Jia Yang³

¹ College of Engineering, Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou 563006, China;

² Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

³ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong Research Institute of Electro-Optical Technology, Wuhan, Hubei 430073, China

Abstract This paper proposes to use the trust region dogleg method to solve the high nonlinearity problem of post finishing of general aspheric optical components. Firstly, based on the low-order body representation and the homogeneous transformation method, a forward kinematic model suitable for any aspherical surface shape and arbitrary path is established. Then, a strong nonlinear forward kinematic model is established based on the trust region dogleg method. The numerical optimization method is used to obtain the corresponding inverse kinematics numerical results. Finally, the inverse kinematics numerical solution results are processed to obtain the control values of each axis for post processing. For an off-axis aspheric surface with an initial surface shape of root mean square 0.037λ , after four rounds of finishing with a raster line path planning and five rounds of finishing with a spiral path planning, the surface shape of the processed component converges to root mean square 0.012λ , and the total convergence efficiency reaches 67.57%, indicating that the proposed post-processing method is correct and can be used for aspheric processing.

Key words optical fabrication; aspherical manufacturing; trust region method; dogleg method; post processing

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 240.5770; 240.1250

收稿日期: 2019-07-18; 修回日期: 2019-08-18; 录用日期: 2019-08-28

基金项目: 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔科教 KY 字[2017]249)、贵州省科技计划(黔科合 LH 字[2017]7084、黔科合平台人才[2018]5784)、国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项“巨型激光装置光学元件超精密制造系统示范工程”课题资助(2017ZX04022001)

* E-mail: yang@zync.edu.cn

1 引言

由于非球面光学元件具有校正相差、减小设备体积的能力,高精度非球面光学元件被广泛用于强激光装置,如 SG-III^[1-2]、NIF^[3] 等激光约束核聚变装置。非球面磁流变抛光作为高精度光学元件面形修正的最后环节,其工艺稳定性与工艺确定性直接决定光学元件最终的面形精度与表面完整性。非球面光学元件磁流变抛光完成轨迹规划后,需要将其轨迹从工件的表面空间投射到机床的运动轴空间,求解各轴对每一抛光点的控制量或控制增量,这一过程类似于传统数控加工的后置处理。

磁流变抛光平面光学元件的后置处理方法已较为成熟,其控制轴通常只涉及到 X, Y, Z 三个平动轴加上一个旋转轴,后置处理较为简单。戴一帆等^[4]实现了对回转对称面形的确定性加工。Beier 等^[5]基于光栅线轨迹实现了对凸曲面和凹曲面的正确抛光。孙希威^[6]利用改进的后置处理方法实现了平面光学元件的三维轮廓控制。Zhang 等^[7]基于螺旋轨迹的几何特性实现了对回转对称在轴非球面的磁流变确定性抛光,由于轨迹的特殊性,控制量求解是基于逆向运动学模型的解析解。宋辞等^[8]基于四轴联动机床,开展了四轴联动后置处理方法的开发,其正向运动学模型适用于同类联动结构的控制量求解。Chen 等^[9-10]基于小型抛光头结构实现了凹曲面的后置处理。

目前国内外已有的磁流变抛光后置处理方法难以应对非球面甚至自由曲面等具有面形随机性的非球面加工问题^[11-12]。如果一般非球面的加工轨迹不具有几何求解便利性(如对称性、周期性、回转性等),正向运动学模型具有很强非线性,其后置求解也变得更加困难^[13-14]。本文拟基于空间点和向量的一般性质,建立可适应更多非球面面形特征和一般轨迹特征的后置处理方法,使非球面磁流变抛光后置处理方法具有更强的通用性和鲁棒性。

本文先分析非球面磁流变抛光的工艺特性。基于工艺特性建立通用的正向运动学模型,该模型具有较强的非线性特征,难以直接求解。基于最优化思想,采用信赖域狗腿法进行逆向运动学求解得到各轴控制量。最后,设计实验对本文提出的非球面加工后置处理方法进行验证。

2 非球面磁流变抛光工艺

2.1 非球面光学元件

非球面是与球面有偏离的表面。狭义上讲,非球面是与球面的偏离量具有对称性的表面;广义来讲,除了球面和平面外的其他表面都可以称为非球面。非球面母线可表示为^[15]

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2r^2}} + a_4r^4 + a_6r^6 + a_8r^8 + \dots, \quad (1)$$

式中: z 为非球面的旋转对称轴即光轴,坐标原点在顶点; c 为顶点曲率; k 为二次曲面常数; a_4, a_6, a_8, \dots 为高次项系数; r 为母线到光轴的距离, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

高次非球面系数均为零时,则(1)式只有第一项,此时非球面统称为二次非球面。 k 取不同值,代表不同的二次非球面。 $k > 0$ 时为扁椭球面, $k = 0$ 时为球面, $0 > k > -1$ 时为椭球面, $k = -1$ 时为抛物面, $k < -1$ 时为双曲面。

2.2 磁流变抛光工艺

磁流变抛光利用高梯度磁场下磁流变抛光液在毫秒时间内形成类固体缎带,实现对光学材料的去除,涉及面形测定、轨迹规划、驻留时间求解等环节^[16]。轨迹规划完成后,需要针对具体的机床参数、机床运动轴联动结构与实际参与联动的运动轴进行后置求解,即开展后置处理计算。

对于平面面形,无论采用何种轨迹,其联动参与轴一般为 X, Y, Z 轴。对于在平面面形上设计的回转对称轨迹,其参与联动轴可能包含 B 轴(绕 Y 轴旋转)或 A 轴(绕 X 轴旋转)。对于光栅型轨迹,需要四轴联动。二次型在轴非球面可以基于特定几何特性的求解方法开展后置求解。对于高次非球面、自由曲面、离轴二次非球面、一般轨迹等情况,其正向运动学的非线性较强,需要鲁棒性更强的应对非线性难题的后置处理方法。

3 抛光机床的正向运动学模型

3.1 抛光机床的低序体表示

对于体 j 的一阶低序体 i ,空间拓扑关系如图 1 所示。

对于体 j ,如果其 n 阶低序体为 i ,则有

$$L^n(j) = i, \quad (2)$$

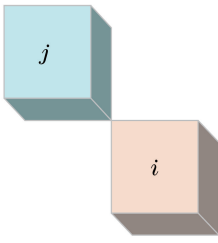


图1 低序体*i*和*j*的空间拓扑关系

Fig. 1 Spatial topological relationship between *j* and its lower-order body *i*

式中: L 为低序体算子,并称*j*为*i*的*n*阶高序体,满足

$$L^n(j) = L[L^{n-1}(j)]. \quad (3)$$

定义 $L^0(j) = j, L^n(0) = 0$ 。若*i*为*j*的相邻低序体时,有 $L(j) = i$ 。

自研PKC型磁流变抛光机床的实物结构如图2所示。其空间拓扑结构如图3所示,其中结构8为抛光轮,结构4为工件,结构0为床身。

计算磁流变抛光机床拓扑结构的各阶低序体阵列,如表1所示。

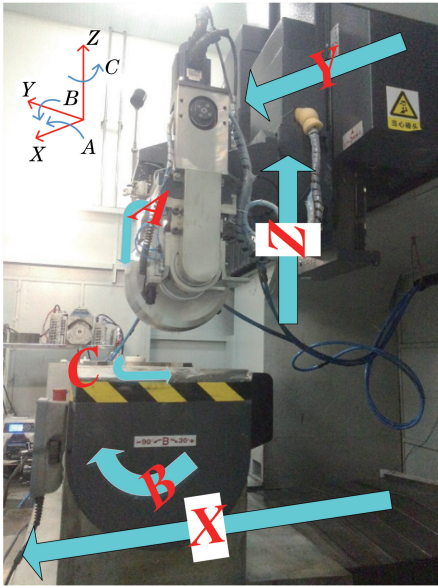


图2 自研PKC型磁流变抛光机床实物结构图

Fig. 2 Physical structure of self-developed PKC magnetorheological finishing machine

3.2 正向运动学分析

3.2.1 抛光机床的运动学模型

正向运动学分析即建立基于轴空间刀位点在工件坐标系中的表示。建立PKC磁流变抛光机床的运动学模型,如图4所示。其中体0~8结构相应的随体坐标系 $C_0 \sim C_8$ 建立的位置用虚线圆圈表示,方向均与机床坐标系平行。 (y_t, z_t) 为抛光轮参考

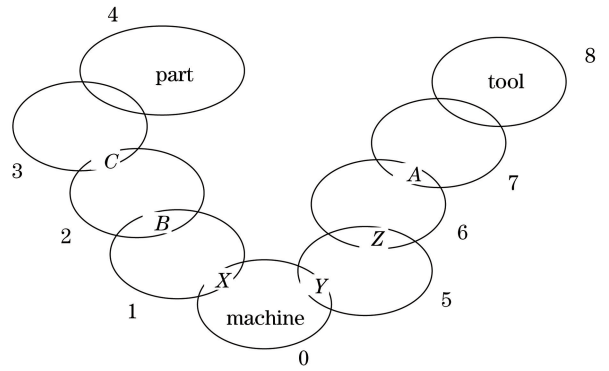


图3 PKC型磁流变抛光机床空间拓扑结构

Fig. 3 Spatial topology of PKC magnetorheological finishing machine

表1 磁流变抛光机床拓扑结构的低序体阵列

Table 1 Low-order topology array of magnetorheological finishing machine

<i>j</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$L^0(j)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$L^1(j)$	0	0	1	2	3	0	5	6	7
$L^2(j)$	0	0	0	1	2	0	0	5	6
$L^3(j)$	0	0	0	0	1	0	0	0	5
$L^4(j)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

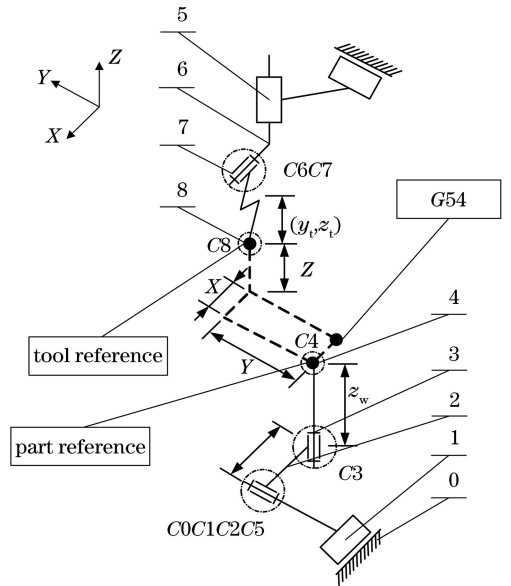


图4 磁流变抛光机床的运动学模型

Fig. 4 Kinematic model of a magnetorheological finishing machine

点在 C_7 中的 y 向和 z 向坐标, z_w 为工件参考点在 C_3 中的 z 向坐标, x_0 为 C_3 的原点在 C_2 中的坐标。根据该模型可以确定磁流变抛光机床的各结构体之间的齐次变换关系。

3.2.2 坐标系及点和矢量的齐次表示

所有典型体上均建立笛卡儿坐标系,按右手定

则取名 X, Y, Z 轴。对于空间点 q , 在其三维笛卡儿坐标值 (q_x, q_y, q_z) 后面加上 1 构成四维矢量, 得到空间点 q 的齐次坐标。对于空间矢量 \mathbf{v} , 在其三维笛卡儿坐标轴投影 (v_x, v_y, v_z) 后面加上 0 构成四维矢量, 得到空间矢量 \mathbf{v} 的齐次坐标。即

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

工件面形上的空间点和矢量具有矢量的和差为矢量、点的差为矢量、点的和没有意义、点与矢量的和差均为点等特性。

3.2.3 齐次坐标变换与表示

在两个刚体上分别建立随体坐标系。由于运动的相对性, 假设其中一个静止, 随体坐标系为 O_1-xyz , 另外一个相对于 O_1-xyz 有平移或旋转运动,

其随体坐标系为 O_2-xyz , 更为复杂的运动形式可由这两种基本运动合成。 O_1-xyz 和 O_2-xyz 中的齐次点 q 和齐次向量 \mathbf{v} 为

$$(\mathbf{q}_1, \mathbf{v}_1)_{4 \times 2} = \mathbf{T}_{12} \cdot (\mathbf{q}_2, \mathbf{v}_2)_{4 \times 2}, \quad (5)$$

式中: \mathbf{T} 为坐标系之间的转换矩阵。刚体之间作相对平移运动, O_2-xyz 相对于 O_1-xyz 有 (x, y, z) 的平移量, 则

$$\mathbf{T}_{12} = \begin{bmatrix} 1 & & x \\ & 1 & y \\ & & 1 & z \\ & & & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

刚体之间作相对旋转运动, 在符合右手定则的笛卡儿坐标系下, 如果 O_2-xyz 相对于 O_1-xyz 有绕 x 轴的旋转量 A , O_2-xyz 相对于 O_1-xyz 有绕 y 轴的旋转量 B , O_2-xyz 相对于 O_1-xyz 有绕 z 轴的旋转量 C , 则坐标变换矩阵分别为

$$\mathbf{T}_{12} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & \cos A & -\sin A & \\ & \sin A & \cos A & \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{12} = \begin{bmatrix} \cos B & \sin B & & \\ & 1 & & \\ -\sin B & \cos B & & \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{12} = \begin{bmatrix} \cos C & -\sin C & & \\ \sin C & \cos C & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过简单的运算可以发现, 若两体之间变换交换顺序, 右手坐标系变成左手坐标系, 对变换矩阵求逆等, 只需要改变 X, Y, Z, A, B, C 的正负号即可。因此 PKC 磁流变抛光机床的体间变换关系为

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{01p} = \mathbf{I}_{4 \times 4}, \mathbf{T}_{01s} &= \begin{bmatrix} 1 & & x \\ & 1 & \\ & & 1 \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{12p} = \mathbf{I}_{4 \times 4}, \mathbf{T}_{12s} = \begin{bmatrix} \cos B & -\sin B & & \\ & 1 & & \\ \sin B & \cos B & & \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{T}_{23p} &= \begin{bmatrix} 1 & & x_0 \\ & 1 & \\ & & 1 \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{23s} = \begin{bmatrix} \cos C & \sin C & & \\ -\sin C & \cos C & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{34p} = \begin{bmatrix} 1 & & x_w \\ & 1 & y_w \\ & & 1 & z_w \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{34s} = \mathbf{I}_{4 \times 4}, \\ \mathbf{T}_{05p} = \mathbf{I}_{4 \times 4}, \mathbf{T}_{05s} &= \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & y \\ & & 1 \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{56p} = \begin{bmatrix} 1 & & x_w + x_0 \\ & 1 & y_w - y_t \\ & & 1 & z_w - z_t \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{56s} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & z \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{T}_{67p} = \mathbf{I}_{4 \times 4}, \mathbf{T}_{67s} &= \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & \cos A & \sin A & \\ & -\sin A & \cos A & \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{78p} = \begin{bmatrix} 1 & & x_t \\ & 1 & y_t \\ & & 1 & z_t \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{78s} = \mathbf{I}_{4 \times 4}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵; 下标 p 表示静态关系, s 表示动态关系; $x_0, x_t, y_t, z_t, x_w, y_w, z_w$ 均自带正负号, x_0 为 C 轴相对于 B 轴偏置的大小和方向, (x_t, y_t, z_t) 为抛光轮参考点在坐标系 $C7$ 中的坐标, (x_w, y_w, z_w) 为工件参考点在坐标系 $C3$ 中的坐标。根据机床结构参数可得 $x_0 = -0.011, x_w = y_w = 0, z_w = 252.911, x_t = y_t = 0, z_t = -300$ 。

此时有

$$\mathbf{T} = \left(\prod_{u=n, L^u(4)=0}^{u=1} \mathbf{T}_{L^u(4)L^{u-1}(4)p} \mathbf{T}_{L^u(4)L^{u-1}(4)s} \right)^{-1} \left(\prod_{t=n, L^t(8)=0}^{t=1} \mathbf{T}_{L^t(8)L^{t-1}(8)p} \mathbf{T}_{L^t(8)L^{t-1}(8)s} \right) = \mathbf{T}_{34s}^{-1} \mathbf{T}_{34p}^{-1} \mathbf{T}_{23s}^{-1} \mathbf{T}_{23p}^{-1} \mathbf{T}_{12s}^{-1} \mathbf{T}_{12p}^{-1} \mathbf{T}_{01s}^{-1} \mathbf{T}_{01p}^{-1} \mathbf{T}_{05p} \mathbf{T}_{05s} \mathbf{T}_{56p} \mathbf{T}_{56s} \mathbf{T}_{67p} \mathbf{T}_{67s} \mathbf{T}_{78p} \mathbf{T}_{78s} \quad (9)$$

将(9)式代入(5)式,求解

$$\mathbf{q}_w = \begin{bmatrix} (sC - cAsC - cCsAsB) \cdot y_t - (sAsC + cCsB - cAcCsB) \cdot z_t + \\ cCsB \cdot z_w + cCsB \cdot z - sC \cdot y - cCcB \cdot x + (cCcB - cC) \cdot x_0 \\ (cAcC - sCsAsB - cC) \cdot y_t + (sAcC + cAsCsB - sBsC) \cdot z_t + \\ sCsB \cdot z_w + sCsB \cdot z + cC \cdot y - sCcB \cdot x + (sCcB - sC) \cdot x_0 - \\ cBsA \cdot y_t + (cAcB - cB) \cdot z_t + \\ (cB - 1) \cdot z_w + cB \cdot z + sB \cdot x - sB \cdot x_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{v}_w = \begin{bmatrix} cAsBcC - sAsC \\ cAsBsC + sAcC \\ cAcB \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中:记 $c = \cos, s = \sin$ 。(10)式即为 PKC 机床的正向运动学模型。根据此模型,可以得到各轴运动量影响到位点在工件上的实际位置。

4 轴控制量求解

4.1 信赖域狗腿法

信赖域狗腿法是一种非线性函数无约束数值优化方法^[17-18],可以高效、可靠地实现非线性函数全局收敛,具有较强鲁棒性。核心思想是利用函数 g 在点 \mathbf{x} 的邻域 Ω 内逼近函数 f ,即:

$$\min_{\mathbf{d}} \{g(\mathbf{d}), \mathbf{d} \in \Omega\}, \quad (11)$$

式中: \mathbf{d} 为迭代步长; Ω 为信赖域。若 $f(\mathbf{x} + \mathbf{d}) < f(\mathbf{x})$,当前点 \mathbf{x} 更新为 $\mathbf{x} + \mathbf{d}$ 。信赖域狗腿法将函

数 f 的优化问题转化为近似函数的优化子问题,即

$$\min_{\mathbf{d} \in \mathbf{R}^n} m_k(\mathbf{d}) = f(\mathbf{x}_k) + \nabla f(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{d} + \frac{\mathbf{d}^T \nabla^2 f(\mathbf{x}_k) \mathbf{d}}{2} \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{d}\| \leq \Delta_k, \quad (12)$$

式中: Δ_k 为第 k 次迭代的信赖域半径。根据子问题模型函数 m_k 和目标函数 f 的偏差 ρ_k 选择信赖域半径。目标函数 f 的偏差 ρ_k 为

$$\rho_k = \frac{f(\mathbf{x}_k) - f(\mathbf{x}_k + \mathbf{d}_k)}{m_k(0) - m_k(\mathbf{d}_k)}, \quad (13)$$

式中: \mathbf{d}_k 为迭代步。若 ρ_k 为负数,则迭代步 \mathbf{d}_k 应该被拒绝;若 ρ_k 接近于 1,则函数 g 较好地接近函数 f ,可以接受当前迭代;若 ρ_k 远离 1 而接近 0 或者负数,则减小信赖域半径。为改善计算性能,狗腿法将迭代中的点偏向牛顿方向,即选取迭代步 \mathbf{d} 为

$$\mathbf{d}(\lambda) = \begin{cases} -\lambda \frac{\nabla f(\mathbf{x}_k)^T \nabla f(\mathbf{x}_k)}{\nabla f(\mathbf{x}_k)^T \nabla^2 f(\mathbf{x}_k) \nabla f(\mathbf{x}_k)} \nabla f(\mathbf{x}_k), & 0 \leq \lambda \leq 1 \\ \frac{\nabla f(\mathbf{x}_k)^T \nabla f(\mathbf{x}_k)}{\nabla f(\mathbf{x}_k)^T \nabla^2 f(\mathbf{x}_k) \nabla f(\mathbf{x}_k)} \nabla f(\mathbf{x}_k) + (\lambda - 1) \left[-\Delta \frac{\nabla f(\mathbf{x}_k)}{\|\nabla f(\mathbf{x}_k)\|} - \frac{\nabla f(\mathbf{x}_k)^T \nabla f(\mathbf{x}_k)}{\nabla f(\mathbf{x}_k)^T \nabla^2 f(\mathbf{x}_k) \nabla f(\mathbf{x}_k)} \nabla f(\mathbf{x}_k) \right], & 1 \leq \lambda \leq 2 \end{cases} \quad (14)$$

4.2 非线性逆向运动学求解

非球面光学元件完成抛光轨迹规划后,需要根据轨迹点求解各轴的控制量,即进行逆向运动学求解。由(10)式可知,当轨迹点为 q_w 时,从 x, y, z, A, B, C 中选定联动轴的具体配置,如 $(x, y, z, A, B), (x, y, z, B, C)$ 或 (x, y, z, C) 等联动形式均可。将不参与联动的运动轴的运动量设置为零。

通过对刀操作可以得到轨迹参考点的轴运动量,其余轨迹点则可以利用信赖域狗腿法逐个迭代求得各轴增量。即已知 q_{w0} 对应轴控制量的情况下,逐点优化:

$$\min q_w^k, k = 1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

基于(15)式可以数值求解得到各轨迹点对应的轴控制量。

5 非球面光学元件加工实例

5.1 实验设计

对顶点曲率 c 为 $1/500$ 、二次曲面常数 k 为 -1 、离轴量为 500 mm 、通光口径为 200 mm 的焦距(FS)离轴抛物镜面进行后置处理计算与加工实验,用以验证所提算法的正确性。面形测量设备为 Zygo 18 英寸激光干涉仪,基于标准球测量方法搭建测量光路。抛光设备为 PKC 型磁流变抛光机床。抛光液采用水分积分数为 14% 的 Type-I 型金刚石粉基高效率抛光液。

先后采用光栅线和螺旋线加工,光栅扫略间距设置为 5 mm ,螺旋线结构参数 α, β 分别为 $0, 1\text{ mm}$ 。通过面形的收敛情况评价后置处理方法的

效果。若面形收敛,则表明后置算法有效。若发散,则后置处理方法存在错误。

5.2 轨迹规划与运动轴控制量求解结果

光栅线轨迹规划和螺旋线轨迹规划的结果如图 5 所示。其中光栅线和螺旋线的扫略方向与磁流变抛光液流动方向垂直。

在光栅线轨迹和螺旋线轨迹的两种轨迹模式下,分别对机床各轴运动量采用信赖域狗腿法进行优化求解,得到轨迹点对应的 x, y, z 轴控制量,如图 6 所示。

由图 6 可以看到,无论光栅线轨迹还是螺旋线轨迹,采用 XYZBC 轴联动均可获得较为平滑的、连续变化的轴控制量,大大降低了对磁流变抛光机床运动动态性能的要求。

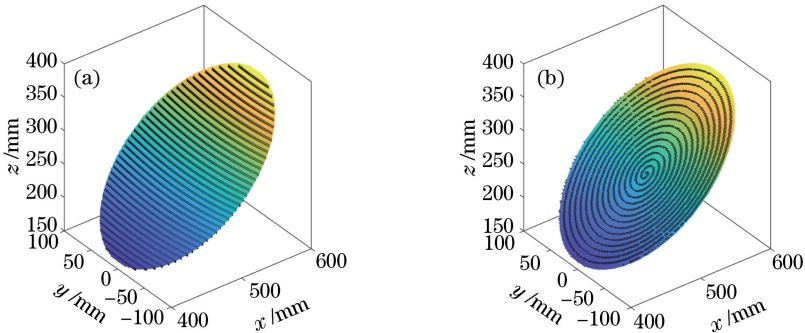


图 5 不同轨迹规划结果。(a)光栅线轨迹规划;(b)螺旋线轨迹规划

Fig. 5 Different trajectory planning results. (a) Raster line path planning; (b) spiral line path planning

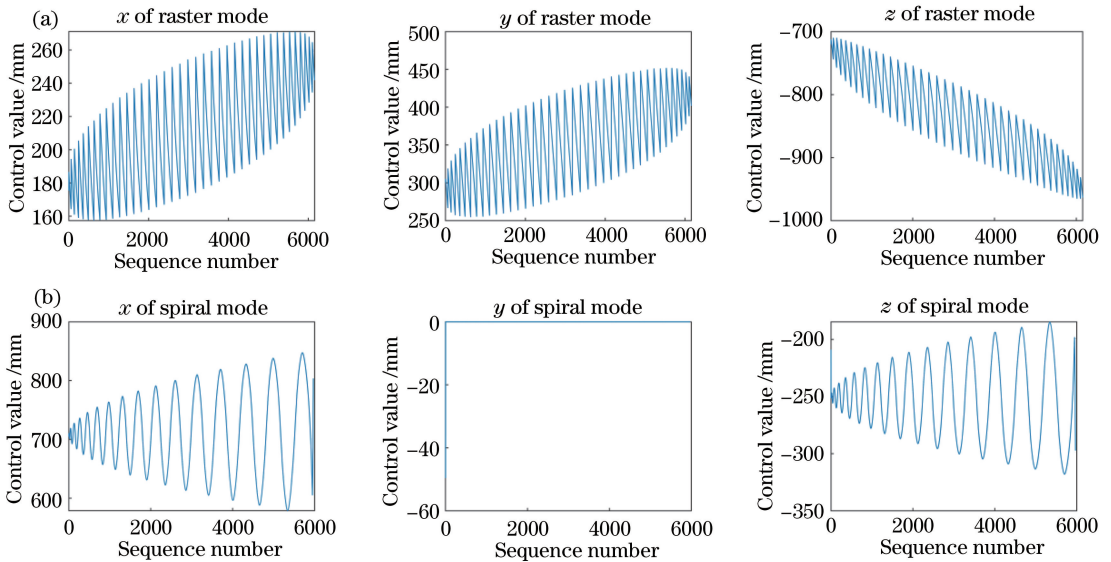


图 6 不同轨迹下的轴控制量。(a)光栅线轨迹;(b)螺旋线轨迹

Fig. 6 Axis control under different trajectories. (a) Raster line path; (b) spiral line path

5.3 抛光结果

对初始面形均方根值 $R = 0.037\lambda$ 的离轴非球面进行两次加工,第一次采用光栅线轨迹加工,第二

次采用螺旋线轨迹加工,共进行 9 组抛光实验。经过 38 h 的抛光实验,面形收敛到 $R = 0.012\lambda$ 。第一次加工经过 4 轮迭代,第二次加工经过 5 轮迭代。

定义收敛效率 $\zeta = (R_{i-1} - R_i) / R_{i-1}$, R_i 表示第 i 轮抛光结果面形误差的均方根值。收敛效率如表 2 所示,总收敛效率为 67.5676%。

表 2 抛光迭代收敛效率

Table 2 Iteration convergence rate of finishing

Sequence No.	Raster mode		Spiral mode	
	R / λ	$\zeta / \%$	R / λ	$\zeta / \%$
0	0.0370		0.0260	
1	0.0350	5.4054	0.0200	23.0769
2	0.0300	14.2857	0.0190	5.0000
3	0.0250	16.6667	0.0180	5.2632
4	0.0260	-4.0000	0.0150	16.6667
5			0.0120	20.0000

由表 2 可以看到,在光栅线模式和螺旋线模式下,面形均能正确收敛。光栅线模式下 4 轮迭代面形总收敛效率为 29.7297%,螺旋线模式下总收敛效率为 53.8462%。表明所提出的后置处理方法能够正确修整光学元件。

6 结 论

基于信赖域狗腿法建立了一种非球面后置处理方法,解决了一般非球面面形和轨迹规划几何一般性引入的正向运动学模型强非线性问题。与传统磁流变抛光后置处理方法相比,该方法对面形和轨迹具有更强的适应性和鲁棒性。基于低序体表示和齐次变换,建立了磁流变抛光过程的正向运动学模型用于后置求解。低序体表示能够将纷繁复杂的机床结构形式纳入统一的数学模型,齐次变换对面形和轨迹点不会出现奇点,因此该方法对光学元件面形和轨迹规划方式具有强鲁棒性和通用性。基于信赖域狗腿法数值优化方法解决了强非线性磁流变抛光逆向运动学求解难题,进而建立了从轨迹规划结果直接求解轴控制量的数值方法。信赖域狗腿法对于非线性无约束问题能够在信赖域内将搜索方向折向牛顿方向,具有较好的收敛效率,也能够得到全局收敛结果,因此适用于磁流变抛光后置处理对轨迹点量大和精度高的要求。所提后置处理方法求解的各轴控制量具有连贯、平滑的特点。因此机床在运行过程中各轴控制量增量不会出现较大变动,轴速度、加速度波动较小,大大改善了磁流变抛光机床的动态性能。通过磁流变抛光实验发现所提方法总收敛效率达到 67.57%,能够正确收敛面形。

参 考 文 献

[1] Wen H D, Hui L J, Hou J, et al. Research on the

wave front gradient control technology of aspherical lens based on CCOS[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10838: 1083811.

[2] Wang D E, Hu D X, Yuan Q, et al. Wavefront control of main-amplifier system in the SG-III laser facility[J]. Optics Communications, 2017, 394: 92-97.

[3] Yang H, He J G, Huang W, et al. Spot breeding method to evaluate the determinism of magnetorheological finishing [J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 035101.

[4] Dai Y F, Shi F, Peng X Q, 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] Beier M, Scheiding S, Gebhardt A, et al. Fabrication of high precision metallic freeform mirrors with magnetorheological finishing (MRF)[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8884: 88840S.

[6] Sun X W. Magnetorheological finishing pre-compensation cross-coupled contour control algorithm [J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(6): 7-11.

孙希威. 磁流变抛光预补偿交叉耦合轮廓控制算法[J]. 制造业自动化, 2012, 34(6): 7-11.

[7] Zhang Y F, Huang W, Zheng Y C, et al. Research on the magnetorheological finishing of large aperture off-axis aspheric optical surfaces for zinc sulfide[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10255: 102550R.

[8] Song C, Dai Y F, Peng X Q, et al. Post processing for magnetorheological finishing of optical mirrors [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1715-1721.

宋辞, 戴一帆, 彭小强, 等. 光学镜面磁流变抛光的后置处理[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1715-1721.

[9] Chen M J, Liu H N, Su Y R, et al. Design and fabrication of a novel magnetorheological finishing process for small concave surfaces using small ball-end permanent-magnet polishing head [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83: 823-834.

[10] Liu H N, Chen M J, Yu B, et al. Configuration design and accuracy analysis of a novel magnetorheological finishing machine tool for concave surfaces with small radius of curvature[J]. Journal of

- Mechanical Science and Technology, 2016, 30(7): 3301-3311.
- [11] Maloney C, Lormeau J P, Dumas P. Improving low, mid and high-spatial frequency errors on advanced aspherical and freeform optics with MRF [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10009: 100090R.
- [12] Menapace J A, Peer A S, Tham G C. Manufacturing high-gradient freeform continuous phase plates (CPPs) using magnetorheological finishing [C] // Optical Design and Fabrication 2019 (Freeform, OFT), June 10-12, 2019, Washington, DC, United States. Washington, D.C.: OSA, 2019: JW1A.5.
- [13] Xu W J, Chen J, Lau H Y K, et al. Data-driven methods towards learning the highly nonlinear inverse kinematics of tendon-driven surgical manipulators [J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2017, 13(3): e1774.
- [14] Momani S, Abo-Hammou Z S, MK Alsmad O. Solution of inverse kinematics problem using genetic algorithms[J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2016, 10(1): 225-233.
- [15] Goodman D. Geometric optics, handbook of optics: fundamentals, techniques, and design [M]. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [16] Yang H, He J G, Huang W, et al. Differential decoupling method employed in MRF spotting process[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(8): 082005.
杨航, 何建国, 黄文, 等. 磁流变抛光去除函数获取的微分解耦方法[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(8): 082005.
- [17] Ahookhosh M, Amini K, Kimiaei M. A globally convergent trust-region method for large-scale symmetric nonlinear systems [J]. Numerical Functional Analysis and Optimization, 2015, 36(7): 830-855.
- [18] Yuan Y. A review of trust region algorithms for optimization[C]//ICIAM. [S.l.: s.n.], 2000: 271-282.