材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023021703

# 光学元件磁流变加工驻留时间粒子群优化算法

高　博[1,2,3,4]，王　佳[1,2,3*]，范　斌[1,2,3]，张　帅[1,2,3,4]

（1. 光场调控科学技术全国重点实验室，成都 610209；2. 中国科学院先进光学研制中心，成都 610209；
3. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；4. 中国科学院大学，北京 100049）

**摘　要：** 为实现光学元件磁流变高精度加工，基于脉冲迭代原理，提出基于粒子群算法的驻留时间优化方法。该方法在脉冲迭代法的基础上引入粒子群算法对整体面型残差进行优化，通过对整体驻留时间的判定，从而实现每个驻留时间点的最优选择，达到高精度面形加工。通过对Φ156 mm光学表面仿真加工，均方根（RMS）值和峰谷（PV）值从初始的169.164和1 161.69 nm收敛到23.492 5和807.215 6 nm。仿真结果表明，该算法能在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，能有效降低中频误差，其算法性能优于常用的脉冲迭代法。该算法为磁流变抛光光学元件过程中的驻留时间计算提供了一种解决方案。

**关键词：** 光学加工；磁流变抛光；驻留时间；中频误差

**中图分类号：** TH161；TH74　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0395－05

## Particle Swarm Optimization Algorithm for Dwell Time of Optical Element in Magnetorheological Finishing

GAO Bo[1,2,3,4], WANG Jia[1,2,3], FAN Bin[1,2,3], ZHANG Shuai[1,2,3,4]

(1. National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chengdu 610209, CHN;
2. Advanced Manufacturing Center of Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

**Abstract:** A dwell time optimization method on particle swarm optimization algorithm is proposed for the high-precision magnetorheological machining of optical components based on pulse iteration principle. This method introduced the particle swarm optimization algorithm to optimize the residual error of the overall surface on the basis of the pulse iteration method. Through the determination of the overall dwell time, the optimal selection of each dwell time point was realized and the high-precision surface machining was achieved. The root mean square (RMS) and peak valley (PV) values of Φ156 mm optical surface simulation converged from the initial 169.164 and 1 161.69 nm to 23.492 5 and 807.215 6 nm. The simulation results show that the proposed algorithm not only ensures the accuracy of surface convergence, but also obtains stable and reliable dwell time distribution. The proposed algorithm is better than the common pulse iteration method, effectively reducing the mid-spatial error. This algorithm provides a solution for the dwell time calculation in the process of magnetorheological finishing optical components.

**Key words:** optical manufacturing; magnetorheological finishing; dwell time; mid-spatial error

**收稿日期：**2023－02－17.
**基金项目：**国家自然科学基金项目(62075220)；国家重点研发计划项目(2021YFC2202101).
* **通信作者：**王　佳　**E-mail：**wangj062778@qq.com

## 0 引言

磁流变抛光技术(MRF)作为新型的高效确定性光学元件加工方法[1],由于其具有去除函数稳定、去除效率高、无亚表面损伤等优点[2-6],在高精度光学元件加工方面有着广泛的应用[7]。由于磁流变抛光过程需通过预设轨迹与驻留时间来实现光学元件面形的误差修正,因此对驻留时间的求解决定了光学元件的加工精度。

由于非球面光学元件可用以提高成像质量,且随着设计技术的不断发展,非球面光学元件得到了广泛应用[8-9]。但由于非球面光学元件表面较复杂,其制造过程比球面元件更加困难。现有的研究中,大都通过迭代法计算磁流变加工过程中的驻留时间以实现元件加工[10-11],但该方法存在计算精度低,且中高频误差明显的问题。而粒子群算法作为一种并行算法,运行效率高、参数相对较少,并且其实现原理是通过在反复迭代过程中寻找最优解[12]。因此为实现光学元件磁流变高精度加工,本文将粒子群算法引入到驻留时间计算中,提出了一种基于粒子群算法优化的光学元件磁流变加工驻留时间求解算法。在迭代法的基础上实现驻留时间点的最优选择,以实现高精度面形加工。其在实际的加工过程中可得到理想的面形精度值。通过在非球面上进行仿真加工处理,并进行误差补偿,验证了该方案的可行性。

## 1 驻留时间算法

由于求解驻留时间的基本模型是期望材料去除量等于磨头产生的去除函数与驻留时间的卷积,因此对驻留时间的高精度求解,以及后置处理算法是超精密数控加工的关键所在[13]。

现有的求取驻留时间的方法,有迭代法和线性方程组法两种[14-17]。

(1)迭代法

迭代法主要根据线性时不变材料去除理论,通过光学元件表面的驻留时间与表面的面型误差去除成正比,由多次迭代获取驻留时间。其计算量小、计算速度快,且具有较理想的求解结果,所以在计算机控制加工中使用较多,但该方法却存在精度低、中高频误差明显的缺点。

(2)线性方程组法

线性方程组法的原理是将面形误差与驻留时间按运动轨迹离散化后进行线性方程求解。但该方法计算量大,且一般系数矩阵存在病态,计算速度慢,因此限制了该方法的进一步应用。

针对现有求解驻留时间方法存在的问题,为实现光学元件磁流变高精度加工,在脉冲迭代法的基础上引入粒子群算法。该方法通过对整体面型残差优化,实现整体驻留时间的判定,从而对每个驻留时间点进行最优选择。在迭代法的基础上引入粒子群算法实现驻留时间的优化处理,其计算速度快、精度高,而且能有效改善中频误差。

## 2 驻留时间粒子群优化算法

假设待加工元件的面型误差为 $Z(x,y)$,抛光头在光学元件表面单位时间内产生的去除函数为 $R(x,y)$。在迭代计算的过程中,通过单次迭代求解得到的驻留时间为 $T(x,y)$。则驻留时间求解过程中理论计算的去除量和根据面形误差期望的去除量之间的差值残差 $E(x,y)$为:

$$E(x,y)=Z(x,y)-R(x,y)\otimes T(x,y) \tag{1}$$

式中,$\otimes$表示卷积,去除函数 $R(x,y)$与驻留时间 $T(x,y)$的卷积表示在驻留时间 $T(x,y)$内对光学元件的材料去除,对驻留时间 $T(x,y)$的求解实则为反卷积。

将去除函数 $R(x,y)$理想化为去除脉冲,则去除脉冲的强度 $I$ 表示为:

$$I=\iint_a^b R(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{2}$$

式中,$a$,$b$ 分别表示去除函数 $R(x,y)$的有效范围区间。

将去除函数理想化为去除脉冲,式中求得 $I$ 为脉冲强度,体现为去除函数的体积去除率($\mathrm{mm^3/min}$),而在非理想化情况下,式中求得 $I$ 也是脉冲强度。两者存在体积去除率的不同,会导致收敛率的变化,从而造成面型精度的变化。去除率的变化幅度为 0.15 $\mathrm{mm^3/min}$,对面型残差 RMS 影响仅为 0.3 nm。

设定驻留时间初始值 $T_0(x,y)$为:

$$T_0(x,y)=Z(x,y)/I \tag{3}$$

则初始残差 $E_0(x,y)$表示为:

$$E_0(x,y)=Z(x,y)-R(x,y)*T_0(x,y) \tag{4}$$

针对每次所求得的驻留时间 $T_k(x,y)$,引入粒子群算法进行优化处理,得到新的驻留时间 $T'_k(x,y)$。将每个驻留时间点的位置作为一个粒

子，则粒子群 $x(k)$ 表示为：

$$x(k)=(x_1(k),x_2(k),x_3(k),\cdots,x_i(k)) \quad (5)$$

其中，$i$ 表示粒子序号，$k$ 表示第 $k$ 代粒子，即粒子的迭代次数。将 $x_i(k)$ 代入适应度函数中，便可衡量第 $k$ 代粒子所处位置的优劣。第 $k$ 代粒子的步长 $v(k)$ 可表示为：

$$v(k)=(v_1(k),v_2(k),v_3(k),\cdots,v_i(k)) \quad (6)$$

单个粒子历史最优位置 $p_{\text{best}}$，即每个驻留点处的最优驻留时间可表示为：

$$p_{\text{best}}=(p_{1,\text{best}},p_{2,\text{best}},p_{3,\text{best}},\cdots,p_{i,\text{best}}) \quad (7)$$

每次迭代，粒子的速度、位置、个体最优解和全局最优解都会被更新，粒子的速度和位置更新公式为：

$$v_i(k+1)=w\cdot v_i(k)+c_1r_1\cdot(p_{i,\text{best}}-x_i(k))+c_2r_2\cdot(p_{\text{best}}-x_i(k)) \quad (8)$$

$$x_i(k+1)=x_i(k)+v_i(k+1) \quad (9)$$

式中，$w$ 为惯性权重，$r_1$ 和 $r_2$ 为两个相互独立且服从[0,1]均匀分布的随机数，使迭代过程具有一定的不确定性，更有利于找到最优解；$c_1$ 和 $c_2$ 为学习因子，使粒子向群体内最优位置靠近，即各个驻留时间点的最优驻留时间，则每次迭代后所求得的驻留时间表示 $T'_k(x,y)$ 为：

$$T'_k(x,y)=\sum p_{i,\text{best}} \quad (10)$$

单次驻留时间处理后的残差 $E'_0(x,y)$ 可表示为：

$$E'_0(x,y)=Z(x,y)-R(x,y)\otimes T'_0(x,y) \quad (11)$$

将计算得到的残差作为待加工元件的面型误差 $Z(x,y)$，重复式(2)～(4)和(7)～(11)，进行迭代计算。在光学元件加工过程中，要对元件表面的残差设定预期值，当加工得到的残差未达到预期，则需要迭代加工，即驻留时间叠加，即：

$$T'_k(x,y)=T'_{k-1}(x,y)+T'_k(x,y) \quad (12)$$

当达到预期值时，迭代结束，此时残差可表示为：

$$E'_k(x,y)=Z(x,y)-R(x,y)*T'_k(x,y) \quad (13)$$

则经粒子群算法处理后的总驻留时间分布 $T'(x,y)$ 可表示为：

$$T'(x,y)=\sum_{k=1}^{n}T'_k(x,y) \quad (14)$$

式中，$n$ 代表循环迭代的总次数。

## 3　仿真分析

以直径 156 mm、曲率半径－425.15 mm、离轴量 121.23 mm、$K$ 系数－1 的离轴非球面 SiC 反射镜作为待加工元件，进行磁流变仿真加工。采用 $XY$ 光栅扫描路径，工艺流程图如图 1 所示。

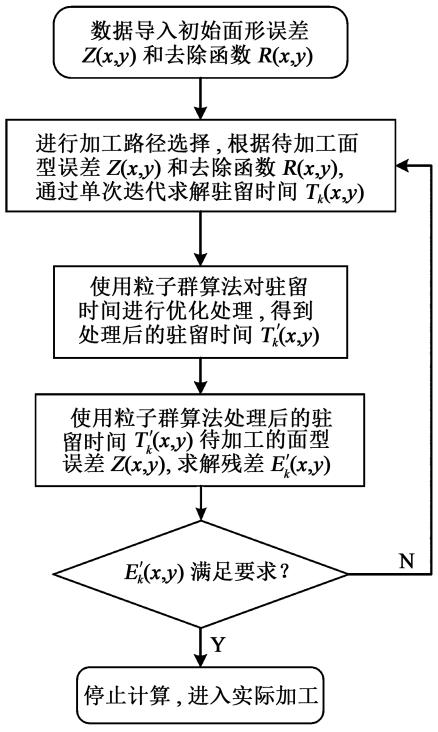
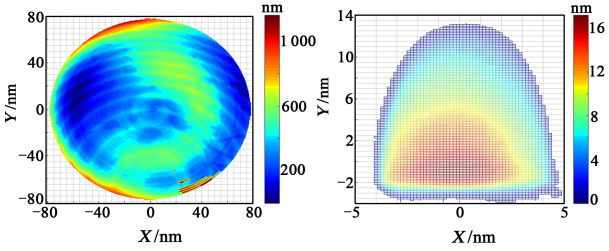



图 1　工艺流程图

待加工元件初始的面型误差分布 $Z(x,y)$ 如图 2(a)所示，其面型峰谷值(PV)为 1 161.69 nm，均方根值(RMS)为 169.164 nm，加工过程所使用的去除函数如图 2(b)所示，去除函数的长度为 16 mm，宽度为 8 mm，峰值去除效率为 17.174 4 μm/min，体积去除效率为 0.992 25 mm/min。将待加工元件的面型误差分布 $Z(x,y)$ 和去除函数 $R(x,y)$ 代入公式(3)和(4)，即可求得脉冲迭代法时的初始驻留时间 $T_0(x,y)$ 和对应的面型残差 $E_0(x,y)$，针对初始驻留时间 $T'_0(x,y)$，按公式(8)～(10)进行优化处理，可以得到使用粒子群优化后的驻留时间分布 $T'_0(x,y)$，并可由公式(8)计算得到使用优化方法后的计算残差 $E'_0(x,y)$。



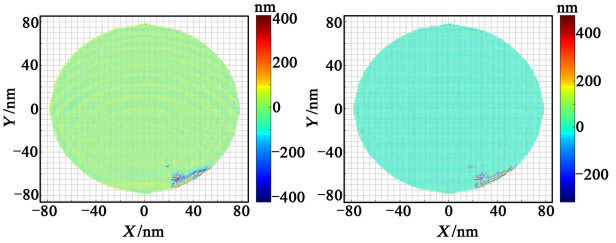

(a) 光学元件初始面型误差分布　　(b) 去除函数

图 2　初始面型误差分布及去除函数

当使用脉冲迭代法不进行优化处理时，将上述

计算残差 $E_0(x,y)$作为待加工面型误差 $Z(x,y)$，进入循环进行迭代计算；当使用粒子群优化算法时，将上述计算残差 $E'_0(x,y)$作为待加工面型误差 $Z(x,y)$，进入循环进行迭代计算。

不使用优化方法时，经过 7 次迭代计算完成后的面型残差 $E_6(x,y)$如图 3(a)所示，对应的面型峰谷值为 837.905 7 nm，均方根值为 28.608 6 nm；使用优化方法时，经过 7 次迭代计算完成后的面型残差 $E'_6(x,y)$如图 3(b)所示，对应的面型峰谷值为 807.215 6 nm，均方根值为 23.492 5 nm；与图 3(a)相比，图 3(b)对应的面型分布更加平滑，峰谷值和均方根值也更小，表明该优化方法能提高元件的面型误差。




(a) 脉冲迭代法计算后的面型残差 (b) 粒子群优化计算后的面型残差

图 3 面型残差

将使用粒子群优化方法时的残差 $E_6(x,y)$的功率谱密度(PSD)曲线和脉冲迭代法不进行优化处理时的残差 $E'_6(x,y)$的功率谱密度 PSD 曲线进行对比，如图 4 所示。从图中可看出，使用优化方法后，空间频率在 0.03～0.16 $mm^{-1}$ 频段内的部分均有所减少，表明粒子群优化方法能降低加工过程中对应的中低频面型误差，虽然空间频率在 0.03 $mm^{-1}$ 以下有所提高，但总体的面型误差峰谷值和均方根值均减少，所以此部分可不作考虑。

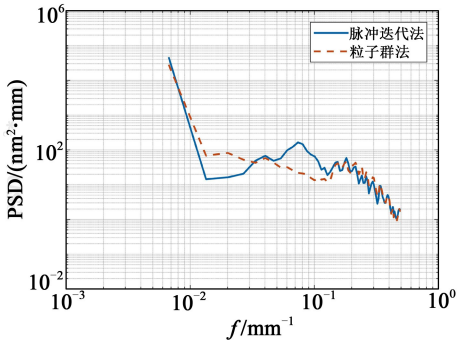
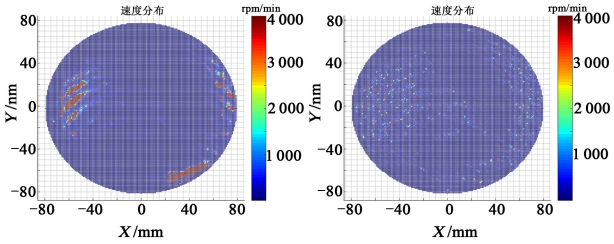



图 4 残差的功率谱密度(PSD)曲线对比

对比不使用优化方法和使用粒子群优化方法时求解得到的抛光轮进给速度分布。其中图 5(a)为不使用优化方法时抛光轮进给速度分布，第 7 次迭代计算后得到的总驻留时间 $T(x,y)$分布满足 $T(x,y)=\sum_{k=0}^{n-1}T_k(x,y)$，对应的峰谷值为 4 000 rpm/min，均方根值为 507.199 rpm/min。图 5(b)为使用粒子群优化方法时抛光轮进给速度分布，第 7 次迭代计算后得到的总驻留时间 $T'(x,y)$分布，满足 $T'(x,y)=\sum_{k=0}^{n-1}T'_k(x,y)$，对应的峰谷值为 4 000 rpm/min，均方根值为 188.126 3 rpm/min。可以看出，使用优化方法后，虽然求解得到的抛光轮进给速度的峰谷值未变，但得到的抛光轮进给速度的均方根值减小，速度分布更加平缓。




(a) 不使用优化方法 (b) 使用优化方法

图 5 抛光轮进给速度分布

对比抛光轮进给速度的功率谱密度曲线。如图 6 所示，可以看出，使用优化方法后，空间频率在 0.02～0.18 $mm^{-1}$ 频段内的部分均有所减少，表明该优化方法能使加工过程的抛光轮进给速度更加均匀，减小瞬间的加减速运动，保证加工时机床的稳定性，由此减少中频误差的引入，保证处理后面型的高精度。

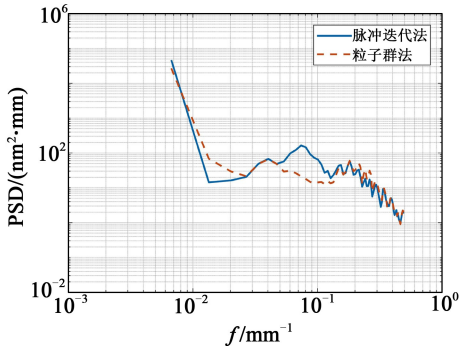



图 6 抛光轮进给速度的功率谱密度对比曲线

## 4 结论

为实现光学元件磁流变加工过程中的驻留时间的精确求解，实现元件高精度加工，提出基于粒子群算法优化的脉冲迭代驻留时间计算算法，将 RMS 作为最终面形精度的判断标准。通过仿真验证，优化后的算法 RMS 和 PV 均有所减小，加工过程的抛光轮进给速度更加均匀，能减小瞬间的加减速运动，保证加工时机床稳定性，减少中频误差的引入。且

该优化算法对非球面类型无限制，任何镜面加工过程均适用。因此，该方法对于实现高精度光学元件磁流变加工具有重要的实用价值。

## 参考文献：


[1] Harris D C. History of magnetorheological finishing [J]. Proc. of SPIE, 2011, 8016(4): 561-566.

[2] 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.
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.

[3] 肖晓兰，阎秋生，潘继生，等. 超精密磁流变复合抛光技术研究进展[J]. 广东工业大学学报，2016，33(6)：28-33.
Xiao Xiaolan, Yan Qiusheng, Pan Jisheng, et al. A review on ultra-precision compound polishing technology of magnetorheological [J]. J. of Guangdong University of Technol., 2016, 33(6): 28-33.

[4] Zhang P, Dong Y Z, Choi H J, et al. Reciprocating magnetorheological polishing method for borosilicate glass surface smoothness [J]. J. of Industrial and Engineering Chemistry, 2020, 84: 243-251.

[5] 肖　强，王嘉琪，靳龙平. 磁流变抛光关键技术及工艺研究进展[J]. 材料导报，2022，36(7)：65-74.
Xiao Qiang, Wang Jiaqi, Jin Longping. Research progress of key technology and process of magnetorheological finishing[J]. Materials Reports, 2022, 36(7): 65-74.

[6] Li X, Li Q, Ye Z, et al. Surface roughness tuning at sub-nanometer level by considering the normal stress field in magnetorheological finishing [J]. Micromachines, 2021, 12(8): 997.

[7] 李龙响，邓伟杰，张斌智，等. 大口径光学元件磁流变加工驻留时间求解算法[J]. 光学学报，2014，34(5)：217-223.
Li Longxiang, Deng Weijie, Zhang Binzhi, et al. Dwell time algorithm for large aperture optical element in magnetorheological finishing[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 217-223.

[8] 宋　辞. 离轴非球面光学零件磁流变抛光关键技术研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2012.
Song Ci. Study on the key techniques of magnetorheological finishing for off-axis aspheric optical elements[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.

[9] 李龙响. 大口径非球面磁流变加工的关键技术研究[D]. 长春：中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所)，2016.
Li Longxiang. Study on the key techniques of magnetorheological finishing for large aspheric optics [D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2016.

[10] 廖文林. 高精度球体类零件离子束确定性修形技术研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2010：25-29.
Liao Wenlin. Deterministic ion beam figuring technology for high-precision spherical components[D]. Changsha: National University of Defense Technol., 2010: 25-29.

[11] 周　林. 光学镜面离子束修形理论与工艺研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2008.
Zhou Lin. Study on theory and technology in ion beam figuring for optical surfaces [D]. Changsha: National University of Defense Technol., 2008.

[12] 李　超. 粒子群优化算法改进策略及其应用研究[D]. 无锡：江南大学，2021.
Li Chao. Improvement strategies for particle swarm optimization algorithms with applications[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.

[13] 廖文林. 亚纳米精度光学表面离子束修形的基础研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2015.
Liao Wenlin. Fundamental research on ion beam figuring for sub-nanometer precision optical surfaces [D]. Changsha: National University of Defense Technol., 2015.

[14] Jones R A. Optimization of computer controlled polishing [J]. Appl. Optics, 1977, 16(1): 218-224.

[15] Allen L N, Keim R E. An ion figuring system for large optic fabrication[J]. Proc. of SPIE, 1989, 1168: 33-50.

[16] Carnal C L, Eegert C M, Hylton K W. Advanced matrix-based algorithm for ion-beam milling of optical components [C]// SPIE Inter. Symposium on Optical Applied Science and Engineering, 1992: 54-62.

[17] 周　林，戴一帆，解旭辉，等. 离子束加工中驻留时间的求解模型及方法(英文)[J]. 纳米技术与精密工程，2007，5(2)：107-112.
Zhou Lin, Dai Yifan, Xie Xuhui, et al. Model and method to determine dwell time in ion beam figuring[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2007, 5(2): 107-112.


## 作者简介：


**高　博**(1996－)，男，山西省忻州市人，硕士研究生，主要从事光学加工方向的研究；

**王　佳**(1987－)，男，博士，研究领域为超精密光学加工。