

文章编号 1004-924X(2014)12-3303-07

## 进动气囊抛光的驻留时间优化

张利鹏\*, 杨 辉, 鲍龙祥, 李 静

(北京航空精密机械研究所 精密制造技术航空科技重点实验室, 北京 100076)

**摘要:**提出了一种新的进动气囊抛光驻留时间算法,用于实现高精度的光学玻璃零件的加工。首先,通过抛光工艺试验确定抛光去除率函数;在矩阵迭代算法的基础上,给定一个合适的驻留时间初值函数。然后,采用分层阈值去除法进行驻留时间的优化求解,并加上残余误差方差最小的判定条件,从而得到完整的驻留时间函数。该算法适用于非球面、自由曲面等光学玻璃元件的抛光加工。用 MATLAB 对残余面形误差进行了仿真,仿真结果表明残余误差精度 PV 值可以收敛到  $0.1 \mu\text{m}$  左右。最后,对光学玻璃平面进行了抛光。实际抛光后,该玻璃表面粗糙度  $R_a$  从抛光前的  $0.159 \mu\text{m}$  减小到  $0.024 \mu\text{m}$ ,面形精度 PV 值由抛光前的  $0.756 \mu\text{m}$  减小到  $0.158 \mu\text{m}$ 。得到的结果验证了提出驻留时间算法的合理性,表明该算法可为以后进行复杂面形工件的气囊抛光研究提供理论基础。

**关键词:**光学玻璃;进动气囊抛光;驻留时间算法;矩阵迭代;残余误差

**中图分类号:**TQ171.68 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142212.3303

## Optimization of dwell time algorithm for precession bonnet polishing

ZHANG Li-peng\*, YANG Hui, BAO Long-xiang, LI Jing

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Precision Manufacturing,  
Beijing Precision Engineering Institute for Aircraft Industry, Beijing 100076, China)

\* Corresponding author, E-mail: zlp0410@163.com

**Abstract:** A key dwell time algorithm in bonnet polishing was investigated to get the high-precision optical surface. Firstly, the removal function of bonnet polishing was acquired from the process experiments. Based on the matrix iteration, an appropriate initial dwell time function was given to calculate the dwell time with the liminal removal method. Then, the variance of the residual error was considered to optimize the result of dwell time function and to acquire the dwell time function quickly. The method is suitable for polishing the optical elements such as aspheric surface, and free-form surface. A simulation experiment was performed on a residual surface error through MATLAB, and the results show that the residual error PV value has reached up to  $0.1 \mu\text{m}$ . Finally, an optical glass surface was processed on the bonnet polishing machine developed by ourselves, and results show that its surface roughness  $R_a$  is reduced from  $0.159 \mu\text{m}$  to  $0.024 \mu\text{m}$  and the PV value from  $0.756 \mu\text{m}$  to  $0.158 \mu\text{m}$ . Moreover, the rationality of the dwell time algorithm was verified. It demonstrates that the matrix-based algorithm satisfies the requirement of optical precision machining very well and provides theoretical basis for bonnet polishing of complex optical elements.

收稿日期:2014-03-05;修订日期:2014-04-13.

基金项目:航空创新基金资助项目(No. 2010E30321);武器装备预研基金资助项目(No. 9140A18020307HK1301)

**Key words:** optical glass; precession bonnet polishing; dwell time algorithm; matrix iteration; residual error

## 1 引言

进动气囊抛光是一种新型抛光方法,伦敦光学实验室最先开展了其理论与技术方面的研究<sup>[1]</sup>,并与 ZEEKO 公司合作开发了 IRP 系列气囊抛光机床<sup>[2]</sup>,推动了进动气囊抛光技术的发展。随着对光学元件精度的要求越来越高,国内学者也开始了相关研究<sup>[3-5]</sup>。

进动气囊抛光过程是一种基于计算机控制光学表面成形的光学零件抛光工艺,是一种柔性抛光方式。该工艺采用一个柔性气囊对工件表面进行抛光,在抛光过程中,抛光气囊除了绕自身轴线旋转,同时还绕气囊与工件接触区法线方向旋转,是一种类似陀螺旋转的“进动”运动方式,可保证抛光工具与工件表面的完全吻合。在确定材料的去除函数模型及去除量后,需要采用一定的算法计算出相应的驻留时间,并通过路径规划在进动气囊抛光数控机床上采用计算机数字控制(Computer Numerical Control, CNC)方法完成加工<sup>[6-7]</sup>。

驻留时间算法是进动气囊抛光工艺的关键技术之一<sup>[8]</sup>,目前国内外学者对磁流变抛光、离子束抛光等抛光方式的驻留时间算法进行了一些研究,但很少有对进动气囊抛光驻留时间算法的详细说明,只是简单说明了去除量是驻留时间与去除函数的卷积<sup>[9-10]</sup>。国内的一些文献上对驻留时间的求解进行了卷积与反卷积的演算,主要是结合矩阵迭代和傅里叶变换的方法求解,但这些方法大都收敛不稳定<sup>[11-14]</sup>。虽然不同抛光方式对驻留时间的求解算法可以互相借鉴,鉴于进动气囊抛光方式的复杂性及可加工复杂自由曲面的特点,有必要对进动气囊抛光驻留时间算法进行更深的研究。

本文通过抛光工艺实验确定抛光去除函数,在矩阵迭代算法的基础上,给定一个合适的驻留时间初值函数,利用分层阈值去除的方法对此初值进行迭代求解,在判定残余误差方差最小的限定条件下求得合适的驻留时间。最后在平面上进

行抛光实验,对测量结果进行了检测,并与算法仿真得到的面型误差作对比,验证了算法的合理性。

## 2 抛光去除函数建立

### 2.1 抛光设备及原理

进动气囊抛光以柔性气囊为抛光工具,抛光实验设备及原理如图 1 所示,该设备为七轴五联动数控机床,可实现 X、Y、Z 3 个直线轴和 A、C 2 个旋转轴的联动控制。抛光加工时,被加工工件固定在 C 轴上,可以随 X 轴直线运动及 C 轴转动;抛光气囊固连于 A 轴上,由 Y、Z 两轴控制抛光头的直线位置,由 A 轴旋转控制其空间角度位置,通过各轴的联动控制可以实现加工过程中始终保持接触区法线通过抛光气囊的球心,从而在抛光头主轴和进动轴的运动下实现进动抛光。

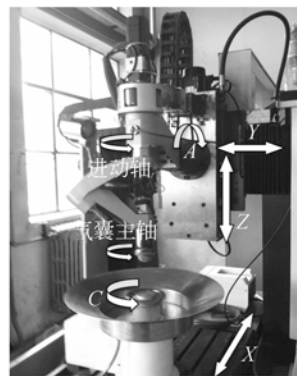


图 1 抛光设备及原理图

Fig. 1 Polishing machining system and its principium

### 2.2 建立去除函数

气囊抛光过程中光学表面去除函数模型与各种工艺参数之间的关系可以通过 Preston 方程来描述<sup>[11]</sup>。虽然以 Preston 方程为依据,可以求解出压力  $p$  和速度  $v$  的数学表达式,并得到材料的去除模型,但该模型存在一定的局限性,无法满足实际加工的需要<sup>[12]</sup>,因此需在 Preston 方程的基础上,以实际的工艺参数为条件来拟合去除函数模型<sup>[13]</sup>。该模型能够随着实际加工条件的改变而变化,因此能够产生用于实际加工的三维模型。

图 2 所示为通过一系列抛光工艺试验后确定的去除率函数  $f(x, y)$ , 可以看出该去除函数是一个近似高斯曲面, 实验中采用氧化铈抛光液, 抛光材料为 K9 光学玻璃, 抛光模为聚氨酯材料。其工艺参数条件如下: 气囊压缩量为 0.2 mm, 气囊主轴转速为 300 r/min, 进动速度为 40 r/min, 进动角为  $20^\circ$ , 充气压力为 100 Kpa。

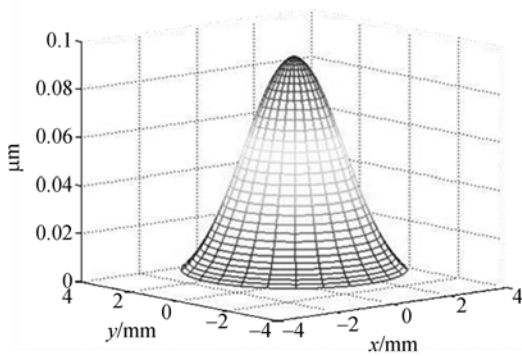


图 2 去除率函数模型

Fig. 2 Removal function simulation

### 3 面形控制原理

进动抛光属于确定性加工技术, 图 3 所示为

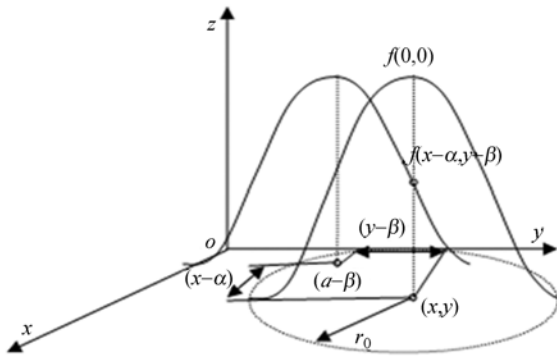


图 3 进动抛光材料去除叠加原理图

Fig. 3 Material removal superposition principle of precession polishing

进动抛光材料去除叠加原理图设抛光头在工件表面任意一点的驻留时间为  $d(x, y)$ , 则去除函数可表示为去除率函数  $f(x, y)$  与驻留时间  $d(x, y)$  的卷积形式:

$$h(x, y) = f(x, y) * d(x, y) \quad (1)$$

由卷积定理将上式写成积分形式可以得到:

$$h(x, y) = \iint f(x - \alpha, y - \beta) \cdot d(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (2)$$

在计算机控制下抛光头相对工件沿一定的轨迹进行抛光运动时, 任意一点的去除量是多个点位的驻留时间与这些点位在该点的去除率乘积的叠加, 因此将式(2)离散展开可以得到总的去除量:

$$h(x, y) = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} f(x - \alpha, y - \beta) \cdot d(\alpha, \beta) \Delta\alpha\Delta\beta \quad (3)$$

去除率函数  $f(x, y)$  与抛光头尺寸和材料性能、抛光压力、抛光速度等因素有关; 去除函数  $h(x, y)$  可以通过测量工件实际面形数值后与理论面形比较得到。已知  $h(x, y)$  和  $f(x, y)$ , 就可以通过迭代等方法求出驻留时间  $d(x, y)$ , 从而实现进动抛光的面形控制, 其加工后的残余误差为:

$$\theta(x, y) = h(x, y) - f(x, y) * d(x, y) \quad (4)$$

### 4 驻留时间算法

目前, 常见的求解算法主要有傅里叶变换和矩阵迭代求解两种<sup>[13-14]</sup>, 本文提出的算法是在矩阵运算的基础上进行推导计算。首先将待去除量  $h(x, y)$  分层, 每层给定一个阈值, 将该层残余误差消去到阈值之后计算下一层, 直到全部误差消去到允许面形误差位置, 然后在此基础上不断修改  $d(x, y)$  进行迭代, 并通过判断残余误差的方差及平方和达到最小时的驻留时间; 最后将其记录输出, 即为得到的驻留时间函数。这种分层阈值去除法相比于传统的矩阵求解加入了分层均匀去除的限定条件, 通过给定分层阈值, 将去除量逐层去除到允许面形误差范围内, 避免了求解线性方程组的复杂计算过程。该方法计算量相对减小, 收敛速度明显加快, 具体步骤如下:

给定驻留时间一个初值矩阵,  $d_0$  为初值:

$$d(x, y) = \begin{bmatrix} d_0 & \cdots & d_0 & \cdots & d_0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ d_0 & \ddots & d_0 & \ddots & d_0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ d_0 & \cdots & d_0 & \cdots & d_0 \end{bmatrix}_{mm} \quad (5)$$

参照待加工工件面形及加工过程, 先将待加工区域离散成一系列将要加工的矩阵:

$$(x, y) = \begin{bmatrix} (x_{11}, y_{11}) & \cdots & (x_{1k}, y_{1k}) & \cdots & (x_{1n}, y_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ (x_{kl}, y_{kl}) & \cdots & (x_{kk}, y_{kk}) & \cdots & (x_{kn}, y_{kn}) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ (x_{ml}, y_{ml}) & \cdots & (x_{mk}, y_{mk}) & \cdots & (x_{mn}, y_{mn}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

然后对这些加工点的位置进行判定, 由于每一个待加工点  $(x, y)$  都可能受其周围加工点  $(\alpha, \beta)$  影响, 这里根据加工区域范围来判定这些影响点的位置和个数, 并将其记录下来, 由这些位置关系代入去除率函数  $f(x-\alpha, y-\beta)$  求解该加工点区域内各点的去除率, 将此时不在加工范围内的各点的去除率置为 0, 组成一个新的去除率矩阵:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & f(x-\alpha, y-\beta) & \cdots & f(x-\alpha, y-\beta) & \vdots \\ 0 & \ddots & f(0,0) & \cdots & 0 \\ \vdots & f(x-\alpha, y-\beta) & \cdots & f(x-\alpha, y-\beta) & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

这里需要用到 MATLAB 中矩阵点乘的概念: 假设矩阵  $A$  和  $B$  为相同维数的矩阵, 则矩阵  $A$  和矩阵  $B$  点乘是指矩阵  $A$  与  $B$  对应元素相乘得到一个新的同维数矩阵  $C$ , 即  $C=A * B$ 。将  $f(x, y)$  内各元素与给定的驻留时间矩阵  $d(x, y)$  点乘并将得到的矩阵的各元素累加起来即可得到该加工点在驻留时间函数下的去除量, 对各个加工点遍历求解, 即可得到每个加工点在该驻留时间函数下的去除量矩阵  $z(x, y)$ , 并与初始待去除量  $h(x, y)$  作差, 得到新的待去除量  $Q(x, y)$ :

$$Q(x, y) = h(x, y) - z(x, y) \quad (8)$$

若某一点的去除量大于该层的阈值, 则在相应点的驻留时间基础上加上一个值  $\Delta t$ , 该值由人为设定, 根据精度要求可设定为  $0.05 \sim 1$  s。若该点去除量  $Q(x, y)$  小于 0, 则在相应的驻留时间基础上减去一个值。每层计算完之后进入下一层计算, 将所有点计算完之后判断  $Q(x, y)$  是否在允许误差范围内, 若不在则将此时的  $d(x, y)$  作为迭代初值重新迭代, 这样周而复始的迭代, 直到得到的待去除量, 即残余误差达到允许误差范围内, 最后判定残余误差的方差最小的一组驻留时间数

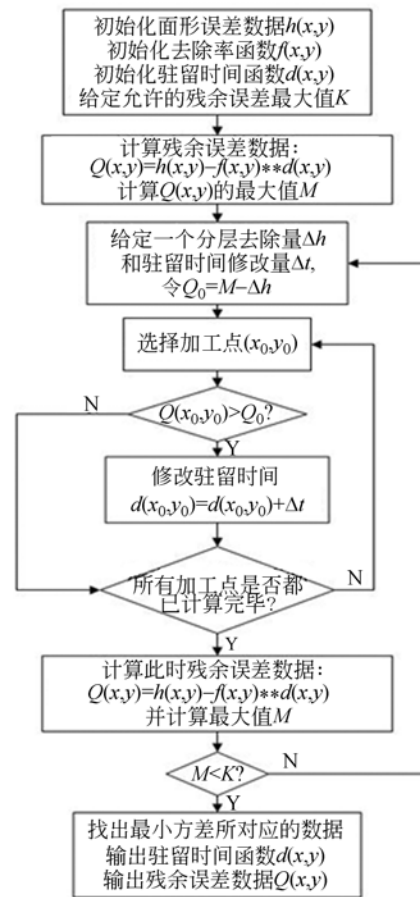


图 4 驻留时间求解算法流程图

Fig. 4 Flow chart of dwell time algorithm

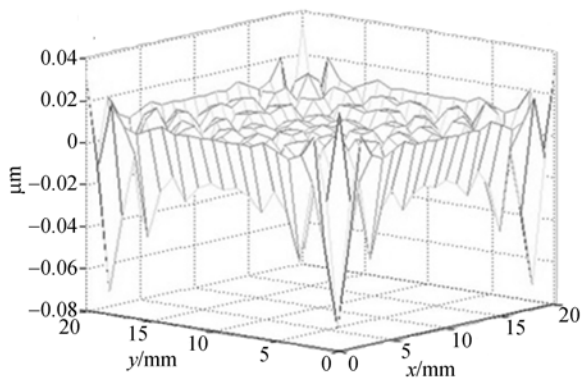
据, 就得到了完整的驻留时间函数  $d(x, y)$ , 具体流程如图 4 所示。

## 5 验证实验及分析

### 5.1 MATLAB 仿真

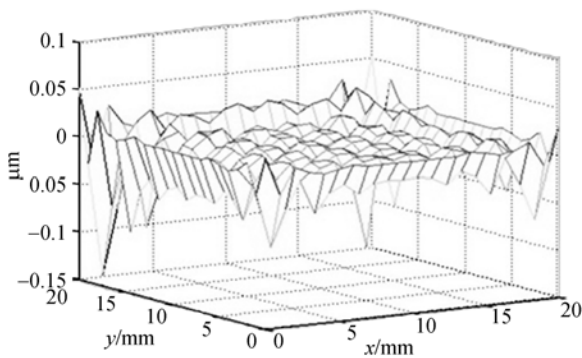
通过 MATLAB 对不同的初始面形误差进行仿真来验证算法的准确性, 加工区域为  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的矩形, 具体如下: a) 初始面形误差为平面误差的表面, 去除量为  $1 \mu\text{m}$ , 仿真结果如图 5(a) 所示; b) 初始面形误差为斜面误差的表面, 去除量为  $1 \sim 2 \mu\text{m}$ , 仿真结果如图 5(b) 所示; c) 初始面形误差为正弦误差的表面, 去除量为  $0 \sim 2 \mu\text{m}$ , 仿真结果如图 5(c) 所示。

根据三种面形的仿真结果可以看出, 最后整个面形精度 PV 值都可以收敛在  $0.2 \mu\text{m}$  以内, 中间部分面形基本可以收敛在  $0.1 \mu\text{m}$ , 但边缘收敛结果较差, 这可能是由于抛光过程中的边缘效应



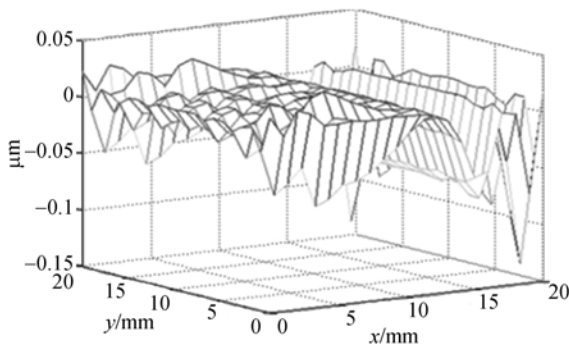
(a) 平面误差表面的加工仿真结果

(a) Processing simulation of plane surface error



(b) 斜面误差表面的加工仿真结果

(b) Processing simulation of incline surface error



(c) 正弦误差表面的加工仿真结果

(c) Processing simulation sine surface error

图 5 MATLAB 仿真结果

Fig. 5 Simulation results in MATLAB

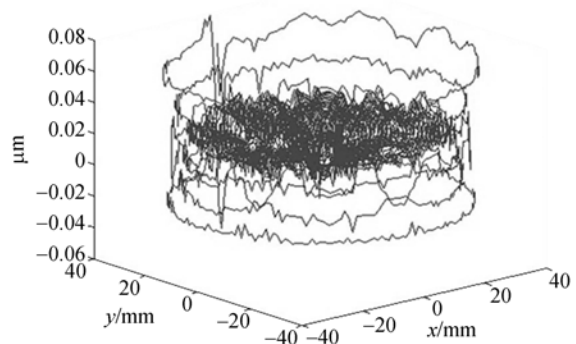
引起的,因为对单个点抛光加工时其抛光区域为一近似圆形,每个点的加工都会影响到周围点的面形,在边缘点附近这些点的影响呈现不规则趋势,会导致边缘点的驻留时间增加,从而增加材料的去除量,这一现象反映到仿真计算过程中,在对

边缘点的驻留时间进行迭代时将会导致算法出现偏差,使边缘点的计算出现突变,从而产生边缘效应<sup>[14-16]</sup>。

通过结果分析可以看出本算法在理论上是可行的,可以指导进动气囊抛光过程中驻留时间算法的计算研究。

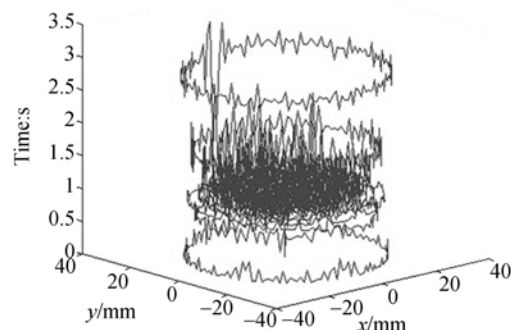
### 5.2 加工实验及分析

最后对初始面形 PV 值为  $0.756 \mu\text{m}$  的 K9 光学玻璃平面进行进动抛光加工,实际加工过程中以螺旋线轨迹进行加工,主要加工区域为半径  $R=30 \text{ mm}$  的圆形,其面形加工残余误差及驻留时间仿真结果如图 6 所示。其中,图 6(a)为加工结果面形误差仿真,可以看出经过加工仿真,面形精度 PV 值可以收敛于  $0.1 \mu\text{m}$  以内,图 6(b)为经过算法确定的驻留时间  $d(x, y)$ ,可以看出边缘部分驻留时间停留较长,在加工过程中将产生边缘效应,需要在以后加工中引起重视。



(a) 残余误差仿真

(a) Processing simulation of residual error

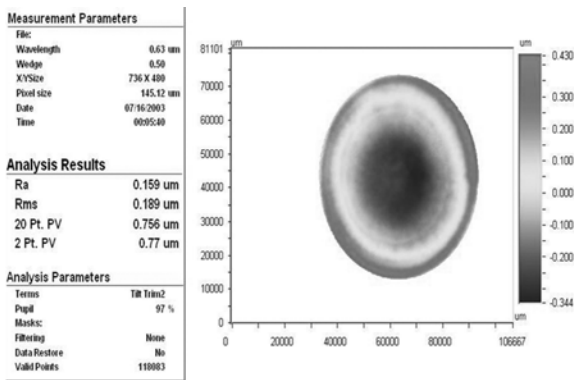


(b) 驻留时间仿真

(b) Simulation of dwell time

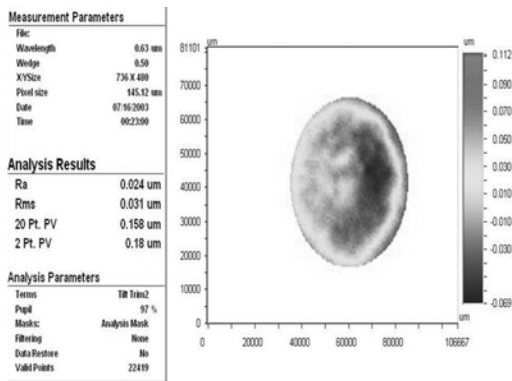
图 6 残余误差及相应的驻留时间仿真

Fig. 6 Simulation of residual error and dwell time



(a) 抛光前面形精度

(a) Surface accuracy before polishing



(b) 抛光后面形精度

(b) Surface accuracy after polishing

图 7 抛光前后表面形测量结果对比

Fig. 7 Comparison surface measurements before and after polishing

图 7 分别为抛光前后的面形测量结果,考虑到本算法的缺点是边缘部分面形不容易控制,因此在实际加工时对整个玻璃表面并没有全部加工。设定待去除量  $0.8 \mu\text{m}$ ,将得到的驻留时间加入到 NC 数控程序,抛光总时间为  $5\ 783 \text{ s}$ ,从图中可以看出抛光后的表面粗糙度  $R_a$  从加工前的  $0.159 \mu\text{m}$  减小到了  $0.024 \mu\text{m}$ ,面形 PV 值由  $0.756 \mu\text{m}$  减小到了  $0.158 \mu\text{m}$ 。

## 6 结 论

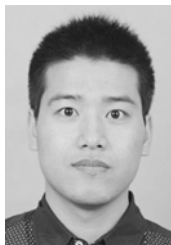
本文根据实际工艺试验确定抛光去除函数,提出了一种新的进动气囊抛光驻留时间算法,即分层阈值去除法。该算法建立在矩阵迭代的基础上,并加入分层阈值去除的优化处理。在计算过程中采用矩阵的点乘运算,简化迭代模型,使算法收敛速度加快;并根据残余误差方差最小的限定条件求出对应的驻留时间函数,可适用于非球面、自由曲面等光学玻璃元件的抛光加工。仿真结果表明,采用该算法求得的驻留时间进行加工可使表面面形误差收敛至  $0.1 \mu\text{m}$  以内。最后对平面 K9 光学玻璃进行了气囊抛光实验,结果显示:工件表面粗糙度达到了  $0.024 \mu\text{m}$ ,面形精度 PV 值由抛光前的  $0.756 \mu\text{m}$  减小到了  $0.158 \mu\text{m}$ ,说明该方法抛光的工件面形误差是收敛的,从而验证了驻留时间算法的合理性,为以后进行复杂面形工件的气囊抛光研究提供了理论基础。

## 参考文献:

- [1] WALKER D D, BROOKS D. The first aspheric form and texture results from a production machine embodying the precession process [C]. *SPIE*, 2001, 4451: 267-277.
- [2] WALKER D D, FREEMAN R, CAVANA G, et al.. The ZEEKO/UCL process for polishing large lenses and prisms [C]. *SPIE*, 2002, 4411: 106-112.
- [3] 张伟,李洪玉,于国威. 光学元件超精密气囊抛光关键技术研究现状[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 2-8.  
ZHANG W, LI H Y, YU G Y. Current situation of ultra-precision bonnet polishing key technology of optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 2-8. (in Chinese)
- [4] 宣斌,谢京江,宋淑梅. 多模式组合抛光技术在光学加工中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 41-50.
- [5] XUAN B, XIE J J, SONG SH M. Application of multi-mode combined polishing to optical manufacturing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 41-50. (in Chinese)
- [6] 白满江,李攀,张晋宽,等. 大区率半径球面反射镜球面误差的改善[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 554-560.
- [7] BAI M J, LI P, ZHANG J K, et al.. Improvement on nonuniformity for sphere mirrors with large radius of curvature[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 554-560. (in Chinese)
- [8] 潘日,王振忠,王春锦,等. 自由曲面光学元件气囊抛光进动运动控制技术[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(3): 186-193.
- [9] PAN R, WANG ZH, WANG CH J, et al.. Control

- techniques of bonnet polishing for free-from optical lenses with precession [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(3): 186-193. (in Chinese)
- [7] 陈国达, 计时鸣, 金明生, 等. 面向等残余面形误差的分层修形模具气囊抛光轨迹规划方法[J]. *兵工学报*, 2012, 33(6): 724-729.
- CHEN G D, JI SH M, JIN M SH, *et al.*. Layering shaping mould gasbag polishing trajectory planning method for equal residual figure error [J]. *Acta Armentarii*, 2012, 33(6): 724-729. (in Chinese)
- [8] 王永刚, 崔天刚, 马文生, 等. Wolter-I 型掠入射反射镜的加工[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 743-753.
- WANG Y G, CUI T G, MA W SH, *et al.*. Fabrication of Wolter-I grazing mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 743-753. (in Chinese)
- [9] SCHINHAERL M. Mathematical modeling of influence functions in computer controlled polishing: Part II [J]. *Appl. Math. Model.*, 2007, 10: 48-52.
- [10] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, DUNN C, *et al.*. Active control of edges and global microstructure on segmented mirrors [C]. *SPIE*, 2008, 7018: 67-76.
- [11] 王贵林. 光学材料超精密研抛关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002: 10-18.
- WANG G L. *A Study on Key Technigues in Ultra-precision Lapping and Polishing for Optical Materials*[D]. Changsha: University of Defense Technology, 2002: 10-18. (in Chinese)
- [12] 李梅. 无谱逆反卷积算法的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2002: 5-9.
- LI M. *Research on Deconvolution Algorithm*[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2002: 5-9. (in Chinese)
- [13] 邓伟杰, 郑立功, 史亚莉, 等. 基于线性代数和正则化算法的驻留时间算法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1009-1015.
- DENG W J, ZHENG L G, SHI Y L, *et al.*. Dwell time algorithm based on matrix algebra and regularization method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1009-1015. (in Chinese)
- [14] 石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 基于矩阵运算的光学零件磁流变加工的驻留时间算法[J]. *国防科技大学学报*, 2009, 31(2): 103-106.
- SHI F, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Dwell time algorithm based on vector for MRF process of optics [J]. *Journal National University Defense Technology*, 2009, 31(2): 103-106. (in Chinese)
- [15] 王伟, 徐敏, 于国域, 等. 计算机控制精密气囊抛光中的边缘效应控制技术[C]. *中国光学学会 2010 年光学大会论文集*, 2010, 126-136.
- WANG W, XU M, YU G Y, *et al.*. Technology of edge control in the process of polishing using CNC ultra precise bonnet [C]. *China Optical Society of Optical Conference 2010*, 2010, 126-135. (in Chinese)
- [16] WALKER D D, BEAUCAMP A, DOUBROVSKI V. Automated optical fabrication-first results from the new precessions 1. 2m CNC polishing machine [C]. *SPIE*, 2006, 6723: 91-98.

#### 作者简介:



张利鹏(1989—),男,河南焦作人,助理工程师,2011年于天津大学获得学士学位,2013年于北京航空精密机械研究所获得硕士学位,主要从事自由曲面光学零件超精密磨削和抛光技术方面的研究。E-mail: zlp0410@163.com



杨辉(1967—),男,浙江宁波人,研究员,1992年、1999年分别于哈尔滨工业大学获硕士、博士学位,主要从事超精密加工机理、超精密加工工艺、超精密加工设备基础元部件及其集成技术方面的研究。E-mail: yanghui303@gmail.com