

运动轨迹对抛光误差的影响分析和轨迹优化研究

施春燕^{1,2} 袁家虎¹ 伍 凡¹ 万勇建¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 针对现有光学加工抛光头运动方式由于光栅形或螺旋形等对称扫描方式带来的运动轨迹间的迭代误差, 提出随机轨迹抛光运动方式。随机轨迹方法通过随机轨迹算法随机生成镜面离散点的抛光顺序和抛光轨迹, 采用随机轨迹驻留时间补偿方法控制镜面离散点的驻留时间, 对各个点进行相应大小的材料去除。实验结果显示, 随机轨迹方法产生的抛光运动轨迹表现为混乱分布, 从而把运动轨迹间的迭代误差均匀分布在整个镜面上, 与规则运动轨迹方式相比降低了轨迹误差分布。

关键词 光学加工; 射流抛光; 运动轨迹; 抛光误差; 随机轨迹

中图分类号 TH74; TP60 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0822003

Analysis of Polishing Errors by Tool Paths and Optimization of Tool Paths

Shi Chunyan^{1,2} Yuan Jiahu¹ Wu Fan¹ Wan Yongjian¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract To solve the problem that the inerratic tool paths will bring the iterative errors between path and path to polished optical components, a new polishing tool path which is named random tool path is proposed. The way of random tool path polishing is carried out as follows. Firstly, the orders of polishing positions and polishing paths are created by random tool path algorithm after the polishing positions of optical components are discretized. Secondly, the dwell times can be figured out from error distributions and material removal function. However, the actual dwell times are not the calculated values because the random polishing paths will affect the dwell times when each path scans through some polishing positions. So the next step is that the actual dwell times are computed by the offset method, and numerical control codes are produced with actual dwell times. Finally, the polishing process is performed in numerical control polishing machine. The experimental results show that the way of random tool path is disordered, and the disorder can make the iterative errors between path and path distribute equally, which can reduce the error on optical mirrors and improve the roughness.

Key words optics fabrication; fluid jet polishing; tool paths; polishing errors; random tool paths

OCIS codes 220.4610; 240.5450

1 引 言

随着科学技术的发展,人们对光学系统提出了许多新的要求。光学系统中采用非球面不仅能提高系统性能,还能简化系统结构。鉴于对非球面光学元件的需求,非球面光学加工技术正不断完善,已从

经典抛光发展到现在的数控确定性抛光^[1~4]。在数控抛光中,由于一些可预测和不确定的误差的存在,抛光面形不能完全按照预期进行收敛。抛光加工误差主要来自四个方面:1)驻留时间迭代误差,即求解驻留时间时进行离散化,算法求解不能完全收敛造

收稿日期: 2011-01-05; **收到修改稿日期**: 2011-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(60808017)资助课题。

作者简介: 施春燕(1984—),男,博士研究生,主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: yancshi@163.com

导师简介: 袁家虎(1967—),男,研究员,博士生导师,主要从事先进光学制造技术方面的研究。

E-mail: jhyuansz@163.com

成的误差;2)去除函数误差,即由于压力、温度和浓度波动等因素造成的材料去除率不稳定造成的误差;3)运动轨迹误差,抛光头的运动轨迹在整个抛光面上不是连续分布的,运动轨迹和间距的不同会带来不同的轨迹误差;4)机床运动定位误差,主要影响材料去除分布的整体偏移^[5,6]。

在数控抛光中,数控机床的磨盘运动具有直线插补和圆弧插补两种方式,磨盘抛光整个对称镜面的运动过程中,二维遍历轨迹模式一般设置为螺旋轨迹和光栅轨迹两种方式^[7]。由于抛光轨迹是离散间隔分布的,轨迹没有遍历每一个误差点位置,导致卷积描述与实际去除的不一致^[8],从而带来对称的迭代误差。本文分析了一般运动轨迹对抛光误差的影响,提出随机抛光轨迹优化方法,并对这种方法进行了实验分析和论证。

2 轨迹对误差的影响分析

图1是数控抛光过程中螺旋轨迹和光栅轨迹两种二维遍历轨迹模式,从图中可以看出轨迹与轨迹之间是有间隔的,与去除函数遍历每一个驻留时间分量的驻留时间卷积不一样,这两种轨迹没有遍历每一个误差点位置(由于误差点一般非常多),从而带来对称的迭代误差。

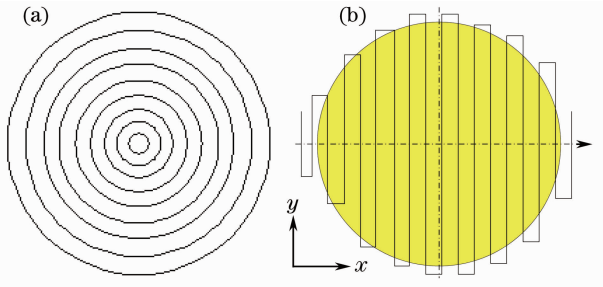


图1 抛光头运动轨迹方式。(a)螺旋轨迹;(b)光栅轨迹
Fig.1 Modes of tool paths. (a) Spiral tool path;
(b) raster tool path

图2和图3分别是采用射流螺旋轨迹抛光和光栅轨迹抛光的误差分析,抛光材料为 $\Phi 30$ mm的平面石英玻璃(初始面形分别为峰-谷值 0.141λ 和 0.221λ),轨迹间隔为1 mm,喷嘴口径 $d=1.5$ mm。从图可以看出,由于轨迹间的间隔迭代,螺旋轨迹抛光会带来对称的环带误差,光栅轨迹抛光会带来条纹误差,从而降低面形精度和平整度。这种轨迹误差可以通过减小轨迹间隔来降低,但会带来频率更高的轨迹误差而得不到彻底消除。

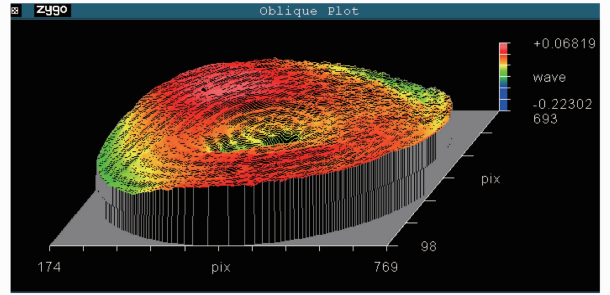


图2 射流螺旋轨迹抛光误差分布
Fig.2 Polishing error distribution by spiral tool paths of fluid jet

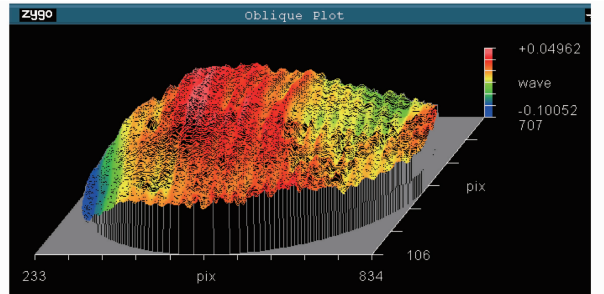


图3 射流光栅轨迹抛光误差分布
Fig.3 Polishing error distribution by raster tool paths of fluid jet

在微观方面,在小工具和磁流变等抛光过程中,这种对称型的规则运动轨迹(螺旋轨迹和光栅轨迹)在镜面容易留下规则的划痕,提高镜面的高频误差和粗糙度,如图4所示^[9]。这是因为,抛光过程中

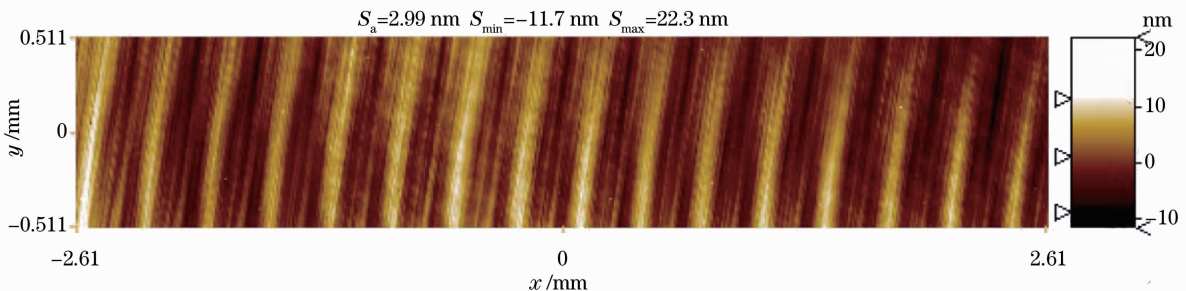


图4 规则轨迹抛光误差分布
Fig.4 Polishing error distribution by inerratic tool paths

工件和磨盘的表面相互接触，工件和磨盘之间的磨粒随着磨盘做螺旋线轨迹或光栅轨迹运动，磨削方式出现滑动磨削和滚动磨削，滑动磨削时会产生与运动轨迹线相当的划痕和低频误差^[10]。

针对这种误差现象，提出采用伪随机抛光轨迹运动方式^[5]，通过这种运动方式，在微观方面，磨粒的运动轨迹可近似为随机凌乱分布，镜面不会残留规则的轨迹划痕；在宏观方面，规则的轨迹间的去除函数迭代误差也不会出现，而是均匀地分布在整个面形中。实验结果证明，这种伪随机运动轨迹能提高面形精度和平整度。但这种伪随机轨迹运动方式对机床性能要求极高，在实际加工中不易实现。

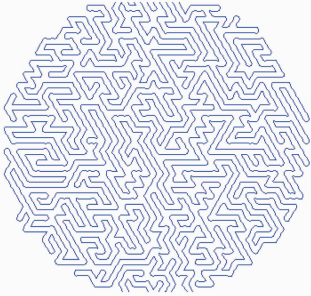


图5 伪随机运动轨迹分布

Fig. 5 Distribution of pseudo-random tool path

3 随机轨迹优化抛光

针对规则运动轨迹带来规则的误差分布和伪随机轨迹运动方式的缺点，提出采用随机轨迹抛光方法。这种方法首先把镜面离散为 N 个点，然后求出各个点的驻留时间分布，通过射流对各个点进行相应大小的材料去除，其中各个点的抛光顺序通过程序随机生成，运动轨迹表现为混乱分布，从而把运动轨迹间的迭代误差均匀分布在整个镜面上，与规则运动轨迹方式相比降低了面形误差分布。

图6是以 $\Phi 30$ mm 的平面石英玻璃抛光为例计算的抛光轨迹，其中抛光平面的离散间隔为 1 mm。从图中可以看出，随机生成的抛光轨迹凌乱分布在镜面上，但轨迹线不是均匀分布的，颜色越深的地方代表轨迹交叉越多的地方。由于在抛光点定位过程中射流是持续喷射的，在轨迹经过越多的地方，射流作用越多，会使该区域的材料去除更多，从而导致实际的材料去除量不准确而带来额外轨迹去除误差。

针对图6所示的轨迹线不均匀分布带来的额外去除误差，采用驻留时间补偿的方法进行优化。驻留时间补偿方法的具体思想就是在轨迹线生成过程中，求出每一条轨迹线经历的附近离散点，计算该轨

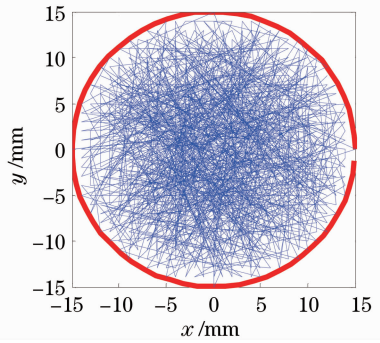


图6 随机运动轨迹分布

Fig. 6 Distribution of random tool path

迹线在该离散点的偏离情况和停留时间，在加工程序代码生成过程中该点的实际驻留时间为初始的驻留时间分布减去各个轨迹线在该点的停留时间的总和。设 D 为通过镜面面形误差与去除函数的反卷积计算出的驻留时间分布，则随机轨迹抛光镜面任意一离散点的实际驻留时间分布为

$$D'(i, j) = D(i, j) - \sum_{n=1}^N \alpha_n t_n(i, j), \quad (1)$$

式中 $t_n(i, j)$ 为第 n 条轨迹线在离散点 (i, j) 处的停留时间， α_n 为第 n 条轨迹线在离散点 (i, j) 处的停留时间影响因子。停留时间影响因子 α_n 的计算如图7所示，假设第 n 条轨迹线为从 $(i+3, j-3)$ 点到 $(i, j+1)$ 点的直线，离散点间距为 1 mm，去除函数区域为半径为 1 mm 的圆斑，当去除函数从 $(i+3, j-3)$ 点运动到 $(i, j+1)$ 点时，去除函数区域覆盖了 (i, j) 点，表明轨迹运动时对 (i, j) 点有材料去除影响作用，可以计算在 t 时刻 (i, j) 点到轨迹线上去除函数区域中心点的距离为 $L(t)$ ，则停留时间影响因子 α_n 为

$$\alpha_n = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f[L(t)] / \max(f) dt, \quad (2)$$

式中 $f[L(t)]$ 为距中心点 $L(t)$ 处的去除函数值，

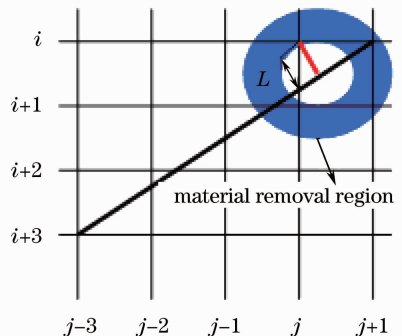


图7 轨迹线计算影响因子示例图

Fig. 7 Sketch map of the factor of tool paths calculation

$\max(f)$ 为最大去除值, t_1 为去除函数区域初始覆盖 (i, j) 点的时间, t_2 为去除函数区域离开 (i, j) 点的时间。随机轨迹抛光的程序流程如图 8 所示, 程序每个抛光周期生成的抛光轨迹都会不同。抛光过程中存在机床轴系运动加速度限制。首先, 在随机轨迹抛光过程中, 随机轨迹根据一定的面形权重算法生成, 保证了点与点间的加速度不会过大; 其次, 由于在随机轨迹扫描过程中考虑了扫描运动时间对扫描点的驻留时间的影响, 并在算法执行过程中予以补偿, 保证了扫描速度和加速度都不会过大。因此, 随机轨迹运动方式对机床性能要求不高。

4 随机轨迹抛光实验研究

采用图 8 所示的随机运动轨迹抛光一块

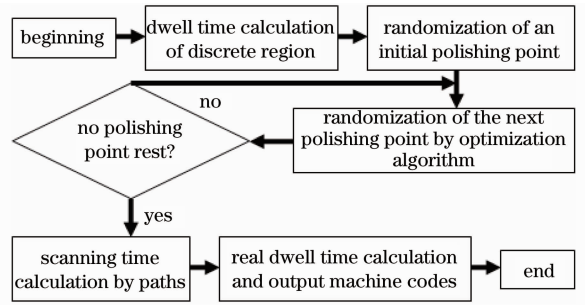


图 8 随机轨迹程序流程

Fig. 8 Flow chart of random tool path polishing process $\Phi 30$ mm 的平面石英玻璃。材料初始面形如图 9 所示, 经过一个抛光周期后, 得到如图 10 所示的面形。图 11 是图 10 和图 2 面形的功率谱密度(PSD)曲线分布, 从图可知, 相比螺旋轨迹抛光, 随机轨迹抛光所得的面形更好, 中低频误差更小。

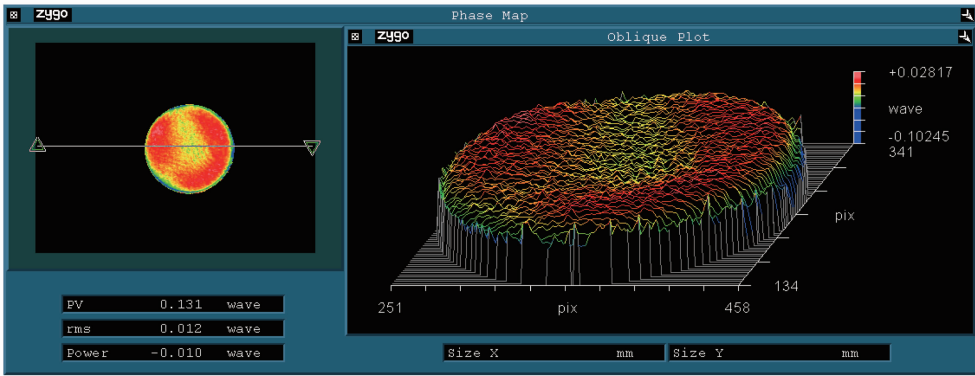


图 9 $\Phi 30$ mm 平面石英玻璃初始面形

Fig. 9 Initial error distribution of $\Phi 30$ mm planar quartz glass

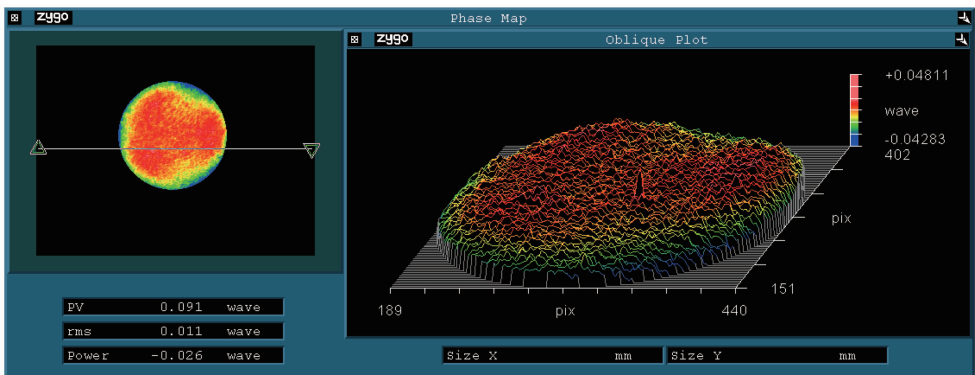


图 10 射流随机轨迹抛光误差分布

Fig. 10 Error distribution of $\Phi 30$ mm planar quartz glass after fluid jet random tool path polishing

5 结 论

针对规则运动轨迹带来规则的误差分布和伪随机轨迹运动方式的缺点, 本文提出采用随机轨迹抛光方法, 并对随机轨迹抛光方法轨迹线不均匀带来

的去除误差进行了补偿和优化。实验结果显示, 随机轨迹抛光方法使抛光头和磨粒的运动轨迹近似为随机凌乱分布, 镜面不会残留规则的轨迹划痕; 使规则的轨迹间的去除函数迭代误差均匀分布在整个面

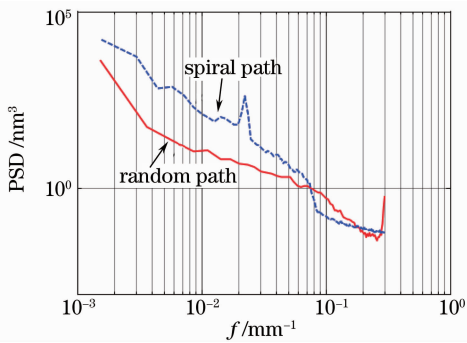


图 11 PSD 曲线

Fig. 11 PSD distribution

形中,从而提高面形的精度。随机轨迹抛光方法适用于数控抛光,如射流和离子束抛光。

参 考 文 献

- 1 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan *et al.*. Influence analysis of impact angle on material removal profile in fluid jet polishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 513~517
施春燕, 袁家虎, 伍凡等. 冲击角度对射流抛光中材料去除面形的影响分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 513~517
- 2 Zhang Baoan, Bao Lei, Zhu Jianqiang. Influence of slurry particle size on materials removal rate and roughness in high power laser glass material polishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1905~1911
张宝安, 包蕾, 朱健强. 抛光粉颗粒度对高功率激光玻璃材料抛光效率和粗糙度的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1905~1911
- 3 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan *et al.*. Errors analysis and material removal stability research in fluid jet polishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112012

施春燕, 袁家虎, 伍凡等. 射流抛光中误差分析与去除精度研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112012

- 4 Chunyan Shi, Jiahu Yuan, Fan Wu *et al.*. Research on material removal model of vertical impinging model in fluid jet polishing [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(3): 323~325
- 5 Zhou Xusheng, Li Shengyi, Dai Yifan *et al.*. Correcting errors in definite area; a new method for controlling mid-spatial-frequency errors in optical surface [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2007, **15**(11): 1668~1673
周旭升, 李圣怡, 戴一帆等. 光学表面中频误差的控制方法—确定区域修正法 [J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(11): 1668~1673
- 6 Wan Yongjian, Shi Chunyan, Yuan Jiahu *et al.*. Research on method of finishing errors control by dwell time compensation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(1): 97~100
万勇建, 施春燕, 袁家虎等. 基于驻留时间补偿的抛光误差控制方法研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(1): 97~100
- 7 Li Ai-min. Research on the Removal Characteristic and Polishing Technics by Computer Controlled Optical Surfacing [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003
李爱民. 计算机控制小工具研抛的去除特性及工艺研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2003
- 8 Wan Yongjian. The Intelligent Polishing Technics of Computer Controlled Optical Surfacing for Aspheric Mirrors [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2007
万勇建. 非球面计算机数控小工具智能加工技术 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007
- 9 Christina R. Dunn, David D. Walker. Pseudo-random tool paths for CNC sub-aperture polishing and other applications [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(23): 18942~18949
- 10 Yongjian Wan, Chunyan Shi, Jiahu Yuan *et al.*. Research on middle and high spatial-frequency errors by discrete particles abrasion [C]. *SPIE*, 2010, **7655**: 765511