

多杆机构复合摆动轨迹抛光方法对光学元件中频误差的抑制

赖璐文^{1,2*}, 刘志刚^{1,2**}, 焦翔¹, 朱健强^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 针对高功率激光系统中传统小工具抛光方式带来的较大中频误差影响高功率激光系统稳定性和可靠性的问题,提出了基于简谐运动的复合摆动轨迹抛光方法,并建立了数控多杆机构复合摆动轨迹抛光系统;根据小工具抛光基本原理可知,规则、有序的平转运动轨迹是引入中频误差的重要原因之一。为了提高生成去除函数轨迹的复杂性,提出了基于复合摆动轨迹的去除函数模型,研究了复合摆动轨迹抛光的基本过程和离散化计算方法;选择合适的工艺参数和去除函数轨迹,进行了基于复合摆动轨迹的去除函数与基于传统平转运动的去除函数的对比加工实验。结果表明:通过干涉仪测量可知,复合摆动轨迹加工方法得到的面形干涉条纹比平转运动的更光滑,且无毛刺;在 50 mm×50 mm 范围内,复合摆动轨迹加工面形的功率谱密度曲线低于平转运动的功率谱密度曲线,整体加工效果优于传统平转运动;基于复合摆动轨迹的数控多杆抛光系统相对于传统平转工艺能有效抑制中频误差。

关键词 光学制造;小工具抛光;复合摆动轨迹;中频误差;多杆机构;去除函数

中图分类号 TG356.28

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1102001

Suppression of Mid-Spatial-Frequency Errors in Optical Elements by Polishing with Compound Swing Multi-Link Mechanism

Lai Luwen^{1,2*}, Liu Zhigang^{1,2**}, Jiao Xiang¹, Zhu Jianqiang^{1,2}

¹Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In high-power laser systems, traditional small-tool polishing results in significant mid-spatial-frequency errors, which reduce the stability and reliability of such systems. In this study, we propose a polishing method that uses the compound swing trajectory (CST) based on a simple harmonic motion and demonstrate a polishing system that employs the CST of a multi-link mechanism. By analyzing the basic principle of small-tool polishing, we observe that the regular and orderly trajectories of traditional translational motion (TM) polishing are important causes of the mid-spatial-frequency errors. Further, we propose a function model based on a CST, study the basic polishing process, and perform the discretization calculation for such trajectories to improve the complexity of the trajectory of the removal function. We conduct a processing experiment by selecting appropriate process parameters and trajectories for the removal functions to compare the CST with the traditional TM. Subsequently, we measure the wavefronts using interferometers and observe that the interferometric fringe patterns obtained using the CST processing method are without burrs and smoother than those obtained using TM processing method. The power-spectral-density curve obtained using the CST processing method is lower than that obtained using the TM processing method in 50 mm×50 mm, displaying a better overall processing effect. These experimental results denote that a polishing system using the CST of a multi-link mechanism exhibits a significantly greater capability in suppressing mid-spatial-frequency errors when compared with the TM method.

收稿日期: 2019-03-28; 修回日期: 2019-04-30; 录用日期: 2019-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(61675215)

* E-mail: lailuwen@siom.ac.cn; ** E-mail: lzg_siom@siom.ac.cn

Key words optical fabrication; small-tool polishing; compound swing trajectory; mid-spatial-frequency errors; multi-link mechanism; removal function

OCIS codes 220.4610; 240.5450; 240.6700

1 引 言

随着现代光学元件加工要求的提高,计算机控制光学表面成形技术(CCOS)因具有可精确控制面形的特点而得到了迅速发展^[1]。高功率激光系统的不断发展对光学元件表面质量的要求越来越高。小工具抛光虽然会获得精确的面形,但会给工件表面带来中等的空间频率($0.03 \sim 8.33 \text{ mm}^{-1}$)误差,即中频误差,从而导致光束展宽,引起非线性自聚焦现象^[2],降低中心能量,影响高功率激光系统的稳定性和可靠性。在美国的国家点火设施(NIF)系统中,使用功率谱密度(PSD)函数来评价中频误差^[3]。小工具抛光的工作原理如下:采用比被抛光元件尺寸小得多的抛光工具,通过计算机控制抛光工具相对于工件的压力、速度以及驻留时间,实现对工件表面的抛光加工。为了精确地控制面形,需要确定单周期内抛光盘的运行方式,并根据 Preston 方程计算单周期的去除函数^[4],再根据工件面形进行轨迹规划,得到去除路径。抛光盘以单周期内运动形式沿着去除路径的方式在工件表面运行,抛光盘相对工件的运动轨迹会直接影响工件的面形质量和加工效率^[5],运动轨迹对中频误差的影响至关重要。

小工具抛光引入中频误差的原因多种多样,主要原因有加工轨迹简单重复、加工工具不适宜、去除函数精度低,以及抛光过程中其他不易控制的因素。有的学者从优化工具和前道工序等角度出发来抑制中频误差,有的学者从优化运动轨迹的角度来探索抑制中频误差的方法,运动轨迹包括生成去除函数的轨迹和去除函数的运动路径,还有许多学者对去除函数的运动路径进行了研究,提出了诸如光栅、螺旋、Hilbert 和 Peano 路径以及伪随机路径^[6]。于兴滨^[7]采用伪随机路径对试件进行加工,加工后表面仍具有较大的周期性特征。目前已有学者针对单周期内抛光盘运行轨迹的优化进行了研究,例如:王权陡等^[8]研究了行星和平转运动形式的去除函数特性,认为平转运动优于行星运动;刘猛猛等^[9]在行星和平转运动的基础上实现了椭圆运动方式,并认为椭圆方式优于行星运动和平转运动;姚永胜等^[10]研究了不同形状抛光盘在行星运动时的去除函数,认为当偏心率为 0.4、转速比为 10 时,去除函数的精度较高;

许铭^[11]和周旭升^[12]都对行星运动时小工具的抛光去除过程进行了详细研究。上述研究存在一个共同点:通过简单增加单周期抛光盘运动的复杂性来提高抛光盘的去除精度,其本质上仍然是简单、重复的运动,存在轨迹规则而重复性较高的问题,加工时某些区域会被重复引入误差,导致中频误差较大。

CCOS 加工中常使用笛卡儿坐标系机床或多自由度机械手,然而,提高生成去除函数运动轨迹的杂乱性需要承受较大的加减速和极复杂的联动控制方式。黄忠明等^[13]认为速度阶跃会对机器人的机械本体造成冲击,并且按轨迹运行时,电机输出会不可避免地存在加减速状态,从而产生较大的角加速度,在高速运行时,对控制和力学性能的要求较高,因此在实际加工中,笛卡儿坐标系机床和机械手难以实现高速且较杂乱无序的轨迹,即使得到了杂乱轨迹,还必须结合去除函数的运动路径来解算各轴的输出,通过位置控制模式得到合成轨迹,并高速运行,这在实际工程应用中较难实现。王瑞芳等^[14]对抛光机器人的运动控制器进行研究后认为,机器人刚度大,在高速运行时的动态误差和跟踪误差较大,因此必须开发一种新的加工机构,通过简单的方式即可获得杂乱无序的轨迹,降低对控制系统和机械结构稳定性和高动态响应的要求。将两种转速和振幅均不相同的简谐运动合成的轨迹称为复合摆动轨迹,当两种运动的转速比为整数时,形成封闭的周期轨迹,类似李萨如图形^[15]。

本文针对小工具抛光中因生成去除函数的简单、重复的轨迹带来的中频误差进行优化,提出了数控多杆复合摆动轨迹抛光系统,设计五杆抛光机构,将主轴的单向匀速旋转运动通过曲柄连杆机构转化为复合摆动轨迹,其对控制和力学性能要求大幅降低,实现了复合摆动轨迹的高速、稳定运行,从根本上改变小工具抛光的去除函数的运动方式,实现了方形杂乱轨迹,提高了轨迹的复杂性,不再是简单、重复的圆周、行星或椭圆轨迹;仅通过改变连杆长度,即可便捷地实现生成去除函数轨迹与去除函数运动路径的轨迹合成,减小了抛光盘运动的周期性,增大了运动的复杂性;针对口径为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的方形工件,采用复合摆动轨迹与传统平转运动方式进行对比实验。

2 多杆系统复合摆动轨迹的去除函数

小工具抛光过程的数学描述为表面材料去除量等于去除函数对路径的二维卷积^[16-17],即

$$W(x, y) = F(x, y) * * U(x, y), \quad (1)$$

式中: $**$ 为二维卷积运算符号; $W(x, y)$ 为材料去除量; $F(x, y)$ 为抛光盘运动的去除函数; $U(x, y)$ 为去除函数的加工路径函数。根据 Preston 方程构造去除函数^[4],抛光盘在一个周期 T 内任意位置的材料去除量为

$$F(x, y) = C \int_0^T p(x, y, t) V(x, y, t) dt, \quad (2)$$

式中: C 为 Preston 常数,与工件、抛光盘材料、温度等因素相关; p 为工件与抛光盘之间的压力,是位置 (x, y) 和时间 t 的函数; V 为抛光盘相对工件的速度,是位置 (x, y) 和时间 t 的函数。

小工具抛光容易带来中频误差,这主要源于抛光盘简单、规则的运动形式。当去除函数沿着路径运行时,抛光盘在短时间内多次重复,抛光盘覆盖区域的边界连续且规则,同时抛光盘本身的加工状态变化存在加工误差,沿着去除函数的路径,边界效应在工件表面形成一系列波纹,在重复的去除路径下,波纹不断叠加,最终造成较大的中等频率面形误差。为了减小抛光盘规则运动带来的误差,可增大抛光盘轨迹的周期和复杂性,使抛光盘轨迹在短时间内不会重复,抛光盘覆盖区域的边界不连续、不固定,经过多次叠加后,边界效应被复杂化的轨迹匀化,从而减小了规则的误差。当每个区域的去除函数都不一致时,相邻去除函数叠加区域的误差得到进一步匀化,从而使误差均匀地分布到整个工件。在传统的光学加工中,常采用单电机驱动抛光头运动。为

了增加轨迹的复杂程度,可通过多电机驱动实现。因此,选择五连杆作为复合摆动轨迹的产生机构。

依据以上思路,设计了一种五杆双摆抛光机构,图 1 为机构原理图。两个曲柄的初相位为 q_1 和 q_2 ,转速为 ω_1 和 ω_2 ,曲柄长度为 r_1 和 r_2 ,连杆长度为 L_1 和 L_2 。连杆通过转动副与曲柄连接,2 个连杆远离曲柄端,通过转动副连接,抛光盘固定在连杆转动副的轴线下,并可调整相对连杆的高度。该机构可实现抛光盘在进行复杂运动的同时,沿着抛光路径运行。

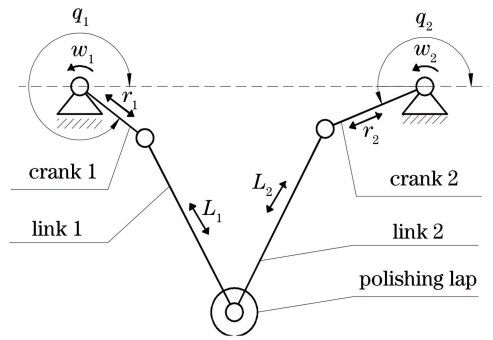


图 1 五杆双摆抛光机构原理图

Fig. 1 Principle of five-link-double-swing polishing mechanism

通过改变该机构的曲柄和连杆的物理长度以及改变主轴的转速,可得到复合摆动轨迹,不同转速比时的轨迹如图 2 所示。由此可见,五杆双摆抛光机构可简便地产生复合摆动轨迹,并高速、稳定运行,获得方形杂乱轨迹,从根本上改变小工具抛光去除函数的运动方式,使其不再是简单、重复的圆周、行星或椭圆运动,并且仅通过改变连杆长度,就可极简单地实现生成去除函数轨迹与去除函数运动路径的轨迹合成,从而实现杂乱无序的轨迹加工。

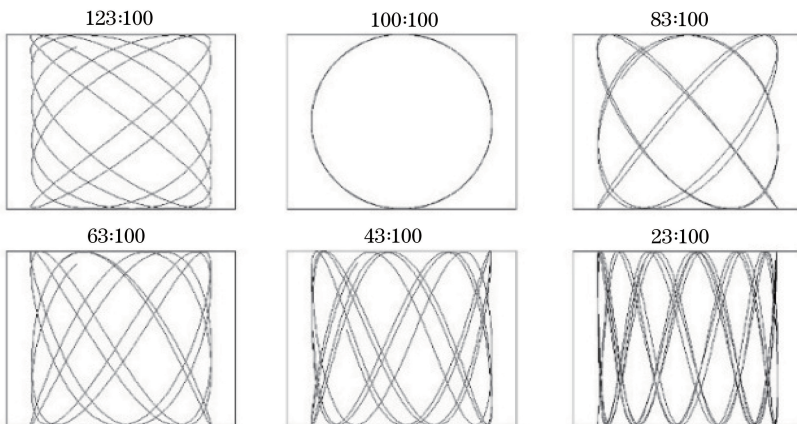


图 2 不同转速比时抛光盘的轨迹

Fig. 2 Trajectories of polishing lap at different speed ratio

将抛光盘、工件和一个完整周期的轨迹进行离散计算。根据结构参数进行运动学仿真,得到运动轨迹,将轨迹进行划分,计算抛光盘在每个划分点处的平均速度,将划分点投影到工件网格点,在工件上以网格点为中心,以工件网格点划分间隔为边长的矩形区域被认为是该网格点的邻域,抛光盘在轨迹划分点上的速度被认为是抛光盘在工件网格点邻域内的速度,抛光盘上各点沿着轨迹运行一周对工件网格点所在邻域的遍历时间即为有效磨削时间。计算抛光盘各点对工件网格点邻域的去除量并求和,得到基于该轨迹的去除函数。工件上任意位置的离散去除函数的计算公式为

$$F_i(X, Y) = C \sum_{k=1}^n p_i(x_k, y_k) V_i(x_k, y_k) T_i(x_k, y_k), \quad (3)$$

式中: $F_i(X, Y)$ 为离散去除函数; (X, Y) 为离散去除函数在工件上的坐标; k 为离散去除函数轨迹的离散点序列; (x_k, y_k) 为离散去除函数轨迹的离散点在工件上的坐标; n 为离散去除函数轨迹的离散点的总和; p_i 为离散去除函数轨迹的离散点对应工件与抛光盘之间的压力; V_i 为离散去除函数轨迹的离散点对应工件与抛光盘之间的平均速度; T_i 为离散去除函数轨迹的离散点对应工件与抛光盘之间磨削时间。

由 Preston 方程可知,速度和压力在较大范围内与去除量呈线性关系^[4],由此可构造大量不同位置处的去除函数。使用这些去除函数对工件面形偏差进行拟合,当拟合误差收敛到允许值时,可得到去除函数在工件表面的驻留时间点图。当抛光盘进行

不完整的周期运行时,认为去除量等比例减少,通过将驻留时间点按顺序规划、连接,再转换为控制代码,控制系统即可按照该拟合结果进行确定性的抛光加工。

3 对比实验与结果

为了验证小工具复合摆动轨迹抛光方案,使基于平转运动的去除函数与复合摆动轨迹的去除函数沿着同样的路径对工件进行加工,对比加工前后面形的中频误差 PSD 曲线。

根据上文所述的机构,通过设定曲柄的转速、初相位和长度,以及连杆的长度等信息,可得到一组轨迹。通过大量测试对比后选择转速比为 14:15 的转速配置,在该转速比下,轨迹较杂乱且均匀,且能较快地重复,便于得到去除函数。为了使抛光盘有合适的加工区域,两个主轴位置与抛光盘的初始位置构成了等腰直角三角形,因此两个主轴距离取 990 mm,连杆的初始长度取 700 mm,曲柄的起始角度取 0°。图 3 所示为 ω_1 为 280 r/min、 ω_2 为 300 r/min 时不同连杆长度条件下抛光盘的轨迹。从图 3 可以看出,该轨迹在确定范围内复杂且较均匀,不同连杆长度的轨迹均不相同。实验使用直径为 30 mm 的抛光盘进行加工,复合摆动轨迹的主轴转速比取 14:15,传统平转运动的转速比取 1:1。为了保证去除函数的轨迹不出现环状且抛光盘的运动速度适中,选择曲柄长度为 3 mm,平转运动转速取 300 r/min,因此复合摆动轨迹的主轴转速为 280 r/min 和 300 r/min。

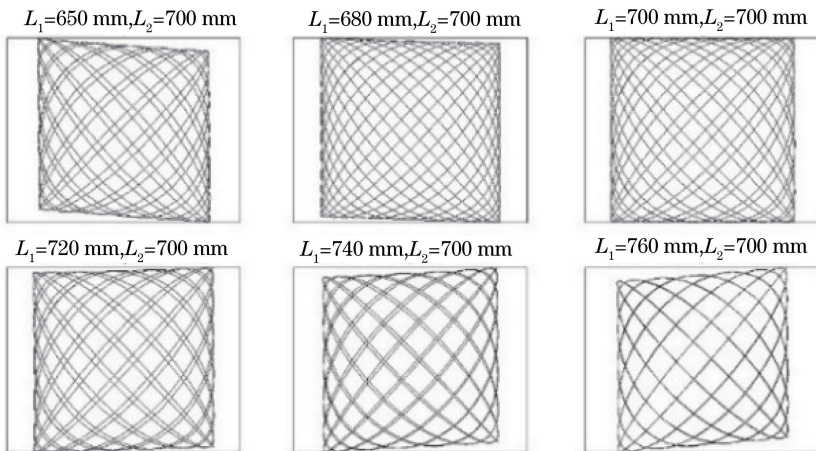


图 3 不同连杆长度时抛光盘的轨迹

Fig. 3 Trajectories of polishing lap at different length of link

按照上述条件,生成基于平转轨迹的去除函数。需要注意的是,应避免光栅间隔落在误差叠加的倍

频范围内,否则将导致平转运动去除结果的可信度较差。当所取间隔过大时,去除函数的数量过少,相

邻去除函数将不能重叠,工件表面不能全部覆盖;当所取间隔过小时,去除函数的数量过多,计算数据过大,而且难以保证去除函数的准确度和加工效果。因此仿真不同光栅间隔的去除函数的二维叠加,并引入误差百分比(δ),该参数表示不考虑边缘时拟合所得面形最大误差与面形高度的比值,即

$$\delta = \frac{F_{\max}(x, y) - F_{\min}(x, y)}{F_{\max}(x, y)} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: $F_{\max}(x, y)$ 为拟合面形的最高点; $F_{\min}(x, y)$ 为拟合面形的最低点。根据(4)式,计算不同光栅间隔时的误差百分比,结果如图4所示。从图4可以看出:当光栅间隔为3 mm时,拟合误差百分比最小;当光栅间隔大于26 mm时,拟合误差百分比达到100%,即相邻去除函数不能重叠。为了简化计算,以连杆长度等距离划分作为去除函数的划分依据,在局部区域内近似于在工件上划分去除函数,两个实验采用相同的划分方式和划分间隔,光栅间隔取3 mm,此时既能保证平转运动去除函数加工的准确度,又能兼顾计算和加工效率。

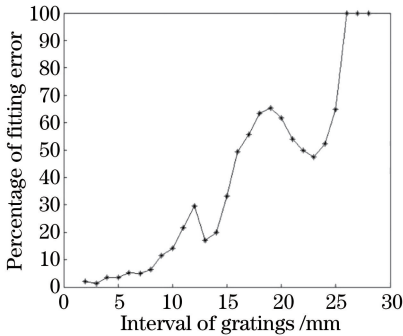


图4 不同光栅间隔时的拟合误差百分比

Fig. 4 Percentages of fitting error at different intervals of gratings

实验采用氧化铈的水溶液作为抛光液,氧化铈粒径为1 μm ,其在溶液中的质量分数为4%~5%,加液方式为一次性加液20 mL。实验所使用的抛光盘制作材料为沥青,表1所示为对比加工实验参数。

采用ZYGO公司生产的DynaFiz型激光干涉仪对工件的初始面形和加工后的面形进行测定,不考虑工件的边缘效应。由于光学加工的随机性较大,需要进行多次加工实验,以确保结果的准确性。为了确保多次加工前实验工件的初始面形稳定、一致,避免不同工件特性的影响,选择环形抛光方法对一个工件表面进行前期加工,达到同一指标(峰谷值小于 0.1λ ,其中测量波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)后进行对比实验。

表1 加工实验参数对比

Table 1 Comparison of experimental processing parameters

Processing parameter	Compound	Translation
	swing trajectory	motion
Polishing lap diameter /mm	30	30
Crank length /mm	3	3
Crank initial angle /rad	0	0
Crank rev $\omega_1 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	280	300
Crank rev $\omega_2 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	300	300
Interval of gratings /mm	3	3
Processing pressure /N	14	14
Temperature / $^{\circ}\text{C}$	25	25

实验中PSD指标参考NIF系统中针对中频段误差评估的PSD函数的计算方法^[3]计算得到。该方法是一种基于傅里叶分析的方法,PSD函数表示波面误差的频谱分布,因此使用傅里叶变换对二维面形进行带通(2.5~33 mm)滤波后,计算离散二维PSD,该工件的理想面形为平面,可取 0° 和 90° 方向进行拉东(Radon)变换,求取一维PSD,得到对应角度的一维PSD曲线。根据NIF系统对PSD曲线的判定标准,设定一条限制线NTE(not-to-exceed)^[18-19],表达式为

$$M(f) = 1.05f^{-1.55}, \quad (5)$$

式中: f 为空间频率; M 为频率 f 对应允许的最大PSD数值。

图5所示为五杆双摆抛光系统。实验工件尺寸为100 mm \times 100 mm,材料为K9光学玻璃,本实验不考虑边缘效应,因此截取50 mm \times 50 mm的区域作为有效实验区域。根据上述条件, Preston常数取 $2.9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$,在相同的光栅路径下,采用复合摆动轨迹抛光方法和传统平转抛光方法加工后工件面形的PSD曲线如图6和图7所示,其中CST为复合摆动轨迹, TM为平转运动。从图6和图7

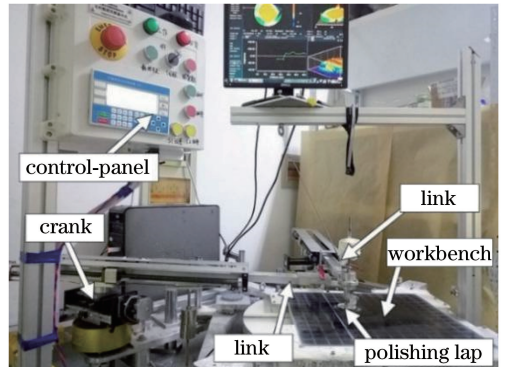


图5 五杆双摆抛光系统

Fig. 5 Five-link-double-swing polishing system

可以看出,经环形抛光方法加工到面形一致后,在相同的光栅轨迹条件下,复合摆动轨迹加工引入的中频误差小于平转运动引入的中频误差。

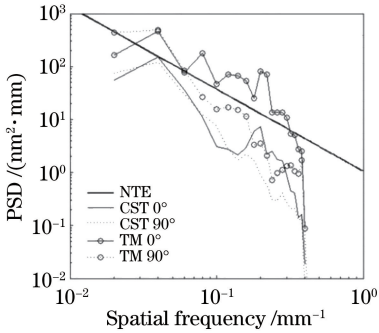


图 6 复合摆动轨迹与平转运动单向光栅路径加工后工件面形的 PSD 曲线

Fig. 6 PSD curves of workpiece surface that polished by compound swing trajectory and translational motion with grating path in single direction

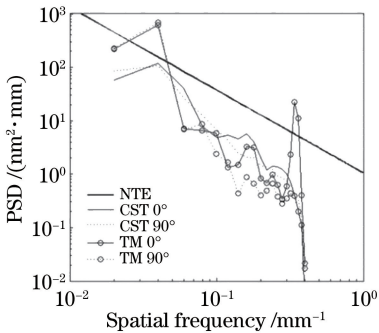


图 7 复合摆动轨迹与平转运动正交光栅路径加工后工件面形的 PSD 曲线

Fig. 7 PSD curves of workpiece surface that polished by compound swing trajectory and translational motion with orthogonal grating path

图 8 所示为两个实验的干涉条纹,可以看出,平转运动加工后的条纹细小,毛刺多于复合摆动轨迹加工后的毛刺,平转运动带来的影响明显多于复合摆动轨迹带来的影响,这说明复合摆动轨迹运动方式可以通过增大去除函数的复杂性和不重复性来达到抑制中频误差的目的。

4 结 论

规则有序的抛光盘运动轨迹是导致小工具抛光光学元件表面中频误差的主要原因之一。本文提出并设计了五杆双摆抛光系统,采用该系统实现了复合摆动轨迹的数控抛光。通过调节机构曲柄、连杆长度以及主轴转速等结构、运动参数,可以提高抛光盘单周期运动的复杂性和不重复性。采用离散采样

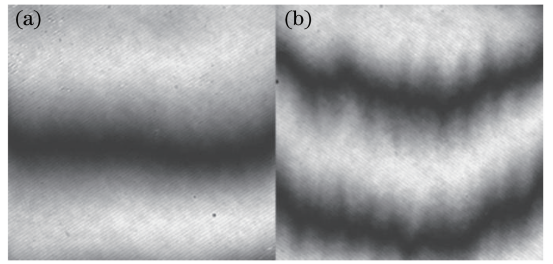


图 8 抛光加工后工件面形的干涉条纹。

(a) 复合摆动轨迹; (b) 平转运动

Fig. 8 Interference fringe patterns of polished workpiece surface. (a) Compound swing trajectory; (b) translational motion

方法计算去除函数和加工光栅路径。当光栅间隔为 3 mm 时,沿相同路径对比了基于平转运动的去除函数与复合摆动轨迹的去除函数在加工工件后表面形的中频误差 PSD 曲线。干涉仪测量结果表明:在 50 mm×50 mm 的范围内,采用复合摆动轨迹加工方法得到的反射波面 PSD 曲线均位于限制线下方,并优于平转运动得到的 PSD 曲线;而且,通过复合摆动轨迹加工后的面形干涉条纹更光滑,且无毛刺。对比实验表明,复合摆动轨迹工艺抑制中频误差的能力强于传统的平转工艺。

本文仅从增大单周期内抛光盘运动的复杂程度进行了讨论,为了进一步提高抛光盘运动的复杂程度,可增加去除函数运动路径的随机性,使基于复合摆动轨迹的去除函数沿着随机路径进行抛光,这也是今后进一步探讨的方向。

参 考 文 献

[1] Yuan J L, Zhang F H, Dai Y F, *et al.* Development research of science and technologies in ultra-precision machining field [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(15): 161-177.
袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(15): 161-177.

[2] Shen W X, Xu D Y. Power spectral density function estimate in high power laser optical element surface [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(4): 392-396.
沈卫星, 徐德衍. 强激光光学元件表面功率谱密度函数估计[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(4): 392-396.

[3] Aikens D M, Wolfe C R, Lawson J K. Use of power spectral density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2576: 281-292.

- [4] Jiao X, Zhu J Q, Fan Q T, *et al.* Influence of overturning moment to workpiece surface figure in continuous polishing and the solutions [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0608003.
焦翔, 朱健强, 樊全堂, 等. 环形抛光中倾覆力矩对工件面形的影响及解决方法 [J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608003.
- [5] Yang X J, Li M. Study on the trajectory of the abrasive particle motion of plane optical element [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(3): 355-360.
杨晓京, 李明. 平面光学元件研磨抛光磨粒运动轨迹研究 [J]. 半导体光电, 2017, 38(3): 355-360.
- [6] Li Q. Study on stability improvement and path optimization in numerical control small tool polishing for optical component [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
李奇. 光学零件小磨头数控抛光稳定性提升与路径优化的研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [7] Yu X B. Research on key technologies of figure error correction of ultrasonic-magnetorheological compound finishing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
于兴滨. 超声磁流变复合抛光面形误差修正的关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [8] Wang Q D, Yu J C, Zhang F, *et al.* Polishing performance comparison of small polishing pad worked in different motion model in computer controlled optical polishing [J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(5): 73-79.
王权陡, 余景池, 张峰, 等. 数控抛光中不同运动方式下小抛光盘抛光特性之比较 [J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 73-79.
- [9] Liu M M, Hong Y. Removal function of small tool polish based on ellipse motion [J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 406-410.
刘猛猛, 洪鹰. 基于椭圆运动方式的小工具抛光去除函数 [J]. 激光技术, 2014, 38(3): 406-410.
- [10] Yao Y S, Ma Z, Xu L, *et al.* Removal functions of different polishing heads worked in planet motion model [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(10): 2706-2713.
姚永胜, 马臻, 许亮, 等. 行星运动方式下不同形状磨头的去除函数 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2706-2713.
- [11] Xu M. Research on the flat CNC polishing CAM by Preston removal process model [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
许铭. 基于 Preston 去除工艺模型的平面数控抛光 CAM 研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [12] Zhou X S. Study on techniques in computer-controlled grinding and polishing for large and medium aspheric surfaces [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
周旭升. 大中型非球面计算机控制研抛工艺方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [13] Huang Z M, Chen A W, Huang F L. Research on position and posture trajectory planning of industrial robot based on sinusoidal acceleration and deceleration control algorithm [J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(2): 31-34.
黄忠明, 陈爱文, 黄凤良. 基于正弦加减速控制算法的工业机器人位姿轨迹规划研究 [J]. 制造业自动化, 2019, 41(2): 31-34.
- [14] Wang R F, Xu F. Design and research on motion controller of grinding and polishing robot [J]. Microcomputer Information, 2007, 23(26): 261-263.
王瑞芳, 徐方. 研磨抛光机器人运动控制器设计与研究 [J]. 微计算机信息, 2007, 23(26): 261-263.
- [15] Han X H. Study on the features of Lissajous' figure [J]. Journal of Xinzhou Teachers University, 2009, 25(5): 18-20, 22.
韩新华. 李萨如图形特点的研究 [J]. 忻州师范学院学报, 2009, 25(5): 18-20, 22.
- [16] Jones R A. Optimization of computer controlled polishing [J]. Applied Optics, 1977, 16(1): 218-224.
- [17] Dai Y F, Shang W J, Zhou X S. Effect of the material of a small tool to the removal function in computer control optical polishing [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(2): 97-101.
戴一帆, 尚文锦, 周旭升. 计算机控制小工具抛光技术中磨盘材料对去除函数的影响 [J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(2): 97-101.
- [18] Cheng X F, Zheng W G, Jiang X D, *et al.* Evaluating intermediate frequency error property of wavefront of optical components with PSD collapse [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(10): 1465-1468.
程晓锋, 郑万国, 蒋晓东, 等. 用功率谱密度坍塌评价光学元件波前中频误差特性 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(10): 1465-1468.
- [19] Xu Q, Gu Y Y, Chai L, *et al.* Measurement of wavefront power spectral density of large optical components [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(3): 344-347.
许乔, 顾元元, 柴林, 等. 大口径光学元件波前功率谱密度检测 [J]. 光学学报, 2001, 21(3): 344-347.