

偏心双转子运动抛光工艺研究及中频误差的抑制研究

董子铭^{1,2,3*}, 章亚男¹, 刘志刚^{2,3**}, 焦翔^{2,3}, 朱健强^{2,3}, 崔文辉^{2,3}, 林炜恒^{2,3}¹上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444;²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;³中国科学院中国工程物理研究院高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

摘要 在计算机控制光学表面抛光中, 高斯形状的去除函数是一种理想的去除函数, 然而传统的双转子运动抛光产生的去除函数与高斯形状有较大偏差, 不够平滑, 因此会在被抛光表面引入较大的中频误差, 影响高功率激光系统的性能。针对该问题, 在传统双转子抛光的基础上, 本文提出了偏心双转子运动抛光技术, 并建立了数学模型。理论分析表明, 偏心双转子抛光可以产生更加接近高斯形状的去除函数。对各关键参数进行优化, 理论上获得了拟合优度(R^2)达到 0.9986 的高斯型去除函数。进行了偏心双转子定点抛光实验和光栅轨迹数控抛光实验, 定点抛光实验中获得了 $R^2=0.9895$ 的高斯型去除函数, 验证了理论分析的正确性; 光栅轨迹数控抛光实验证明了偏心双转子抛光技术较传统双转子抛光技术对中频误差有更好的抑制作用。

关键词 光学制造; 小磨头抛光; 高斯型去除函数; 中频误差; 偏心双转子运动

中图分类号 TG356.28

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2404002

1 引言

高功率激光技术的发展对影响系统光束质量指标的的光学元件提出了更高要求^[1-2], 计算机控制光学表面(CCOS)成形技术因具有可精确控制面形的特点而成为获得高质量光学元件的重要加工手段, 并得到了迅速发展。其中, 双转子抛光技术作为计算机控制小磨头抛光技术的一种, 因可以得到稳定、可控的去除函数而在光学元器件的面形加工领域发挥着重要作用^[3-6]。传统的小磨头抛光虽然可以获得精确的面形, 但会在工件表面引入中频误差, 而中频误差会导致光束展宽, 引起非线性自聚焦现象, 降低中心处的能量, 不利于高功率激光系统的稳定性与可靠性, 从而制约了高功率激光技术的发展。小磨头抛光引入中频误差的主要原因是加工轨迹简单重复、去除函数精度低, 以及抛光过程中存在其他不易控制的因素^[7]。去除函数的精度主要是去除函数的形状精度, 去除函数的形状直接关系到面形是否收敛^[8]。经证实, 高斯型去除函数是理想的去除函数,

能抑制中高频误差^[9-10]。因此, 获得理想的去除函数的形状以及使去除函数轨迹复杂都是抑制中频误差的有效方式。

双转子运动去除函数形状精度的提高主要有两种方式, 分别是调整抛光盘的局部形状和改变运动方式, 以获得高斯型去除函数。研究人员在调整抛光盘局部形状的研究方面取得了一定成果, 目前已出现了三角形、方形^[11]、环形^[12]、五角星形和花瓣形抛光盘^[13-15], 这些抛光盘均能获得较好的去除特性, 其中花瓣形抛光盘可以获得高斯型、类高斯型去除函数, 但存在抛光盘加工困难、易磨损等问题, 同时异形抛光盘与修形用的沥青在流动性方面存在矛盾^[16-18], 不利于长期稳定加工。研究人员在改变运动方式的研究方面也取得了一定进展, 如在双转子基础上提出了三转子运动^[19]和三转子椭圆运动^[20], 虽然采用这些运动方式可以获得高斯型或类高斯型去除函数, 但所用设备结构复杂, 机构庞大, 可能会导致刚性不足, 精度较低, 而且均只能针对去除函数的形状进行优化, 尚不能对去除函数的复杂

收稿日期: 2021-05-10; 修回日期: 2021-05-25; 录用日期: 2021-05-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 A 类(XDA25020305)

通信作者: *dongziming@shu.edu.cn; **lzg_siom@siom.ac.cn

轨迹进行优化。对去除函数的复杂轨迹进行优化的方案有针对平转动的复合摆动运动方式^[21],该运动方式可以有效抑制中频误差,但去除函数的形状依然是传统的平转动去除函数的形状,并未提高去除函数的形状精度。

针对上述情况,本文在兼顾去除函数形状精度及去除函数复杂轨迹的条件下,在双转子运动的基础上提出了偏心双转子运动,通过偏心双转子运动的数学模型分析了演化过程中的主要参数,研究了生成高斯型去除函数的工艺参数条件以及参数的选用范围,优化了去除函数的形状精度,并通过定点抛光实验验证了获取高斯型去除函数的可行性。在去除函数数学模型的基础上提出去除函数的方向去除特性,通过仿真分析了双转子运动与偏心双转子运动的去除函数的方向特性,并进行了光栅轨迹数控抛光实验验证,仿真结果与实验结果都表明偏心双转子运动的方向特性优于双转子运动,抑制中频误差的效果也优于双转子运动。本文研究结果对实际加工具有指导意义。

2 去除函数的分析计算

偏心双转子运动简图如图 1 所示。根据 Preston 假设,工件的去除量与抛光盘和工件的相对速度、相对压力、驻留时间、Preston 比例系数 K 的关系为

$$\Delta z(x, y) = K \int_0^t P(x, y, t) v(x, y, t) dt, \quad (1)$$

式中: Δz 表示工件材料的去除量; K 表示 Preston 系数; t 表示抛光工具的驻留时间; P 表示抛光工具相对工件的压力,是位置 (x, y) 和时间 t 的函数; v 表示抛光工具相对工件的速度,是位置 (x, y) 和时间 t 的函数。

运动分析如图 2 所示。 Q 为抛光盘上的任一点; O 为抛光盘的公转中心,其位于原点处,坐标为 $(0, 0)$; O_1 为抛光盘的自转中心, O_1 点的公转半径为 e , O_1 点坐标为 $(e, 0)$, O_1 点的公转速度和自转速度分别为 ω_1 和 ω_2 。设初始时刻为 0, Q 经过时间 t 运动到 Q' 点,此时 O_1 运动到 O_1' 位置,坐标为

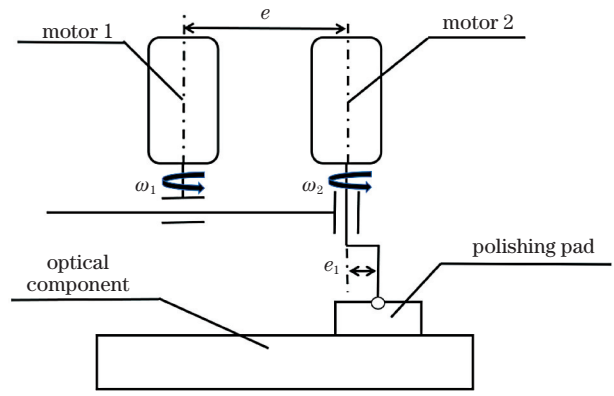


图 1 偏心双转子运动简图

Fig. 1 Motion diagram of eccentric dual-rotor

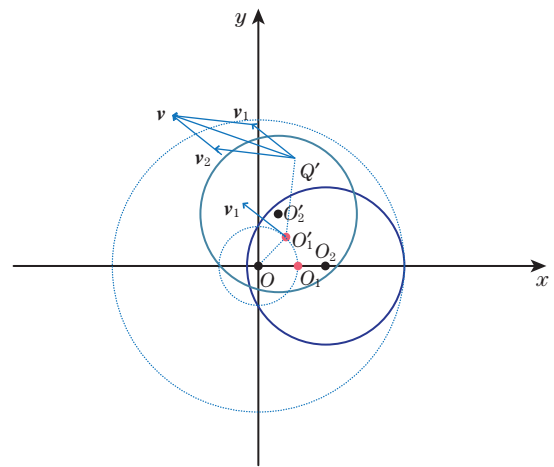


图 2 偏心双转子运动分析图

Fig. 2 Motion analysis of eccentric dual-rotor

$(e \cdot \cos \theta, e \cdot \sin \theta)$, 其中 $\theta = \omega_1 \cdot t$ 。 O_2 为抛光盘的圆心, $O_1 O_2$ 间的距离为偏心距 e_1 , O_2 的坐标为 $(e \cdot \cos \theta + e_1 \cdot \cos \alpha, e \cdot \sin \theta + e_1 \cdot \sin \alpha)$, 其中 $\alpha = \omega_2 \cdot t$ 。若抛光盘的半径为 r_1 , 则任一点 $Q'(x, y)$ 到 O_2 的距离 $d_{Q'O_2} \leq r_1$, 而对于任一点 $Q'(x, y)$, 其速度 v 应等于公转速度 v_1 与自转速度 v_2 的合速度。整个抛光盘的瞬时公转速度的大小为 $v_1 = \omega_1 \cdot e$, 方向为公转半径的切向方向, 与 O_1 方向垂直; 抛光盘的瞬时自转速度的大小为 $v_2 = \omega_2 \cdot r_2$, 瞬时方向为切向方向, 其中 r_2 为抛光盘上任一点距 O_2 的距离, $r_2 \leq r_1$ 。合速度为 $v = v_1 + v_2$ 。推导可得抛光盘上任一点的去除量公式为

$$\Delta z = KP \int_0^t \sqrt{\omega_1^2 \cdot e^2 + \omega_2^2 \cdot \{ [e \cdot \cos(\omega_1 t) + e_1 \cdot \cos(\omega_2 t) - x]^2 + [e \cdot \sin(\omega_1 t) + e_1 \cdot \sin(\omega_2 t) - y]^2 \}} dt. \quad (2)$$

由于 K 是常数, 压力 P 均匀且保持恒定, 所以去除量只与速度 v 有关。根据 (2) 式可以计算得到工件上任一点在周期内的去除量, 积分后即可得到抛光盘去除函数的形状。

3 基于偏心双转子的高斯型去除函数的参数获得

3.1 偏心双转子去除函数截面形状的优化处理

将抛光盘半径 r_1 进行归一化处理,对上述运动模型中的公转速度 ω_1 、自转速度 ω_2 、公转半径 e 和抛光盘偏心距 e_1 进行优化分析。

理想的去除函数应满足以下特点^[9]:1) 具有旋转对称性;2) 中心具有单个峰值,边缘处的去除量为 0;3) 中心处和边缘处的斜率为 0;4) 连续光滑。

将自转速度 ω_2 和公转速度 ω_1 的比值定义为转速比 $n, n = \omega_2 / \omega_1$ 。为使抛光区域与未抛光区域实现过渡平滑,将抛光区域边缘速度取 0,并在此基础上进行分析,此时的约束条件为

$$\omega_1 \cdot e = -\omega_2 \cdot (1 + e_1), \quad (3)$$

$$n = -\frac{e}{1 + e_1}. \quad (4)$$

公式中的负号表示方向相反。此时,转速比是与 e 、 e_1 有关的函数。此时问题就转化为公转半径 e 和偏心距 e_1 对去除函数形状的影响。去除函数的中心存在去除量的约束条件为

$$\begin{cases} e_1 + 1 > e, e \in (0, 1 + e_1) \\ e_1 < 1, e_1 \in [0, 1) \end{cases}. \quad (5)$$

取去除函数任意一个过中心的截面进行高斯拟合,用拟合优度^[22] (R^2) 来衡量拟合程度。拟合优度

表示拟合曲线与目标曲线的近似程度,其值在 0~1 之间,越接近 0 表示拟合相关度越小,与目标曲线的偏离程度越大,越接近 1 则表示拟合相关度越高,越接近目标曲线。

基于上述情况,将偏心距和公转半径在取值范围内取相同间隔交互作用组成参数矩阵进行截面拟合,拟合结果如图 3 所示。

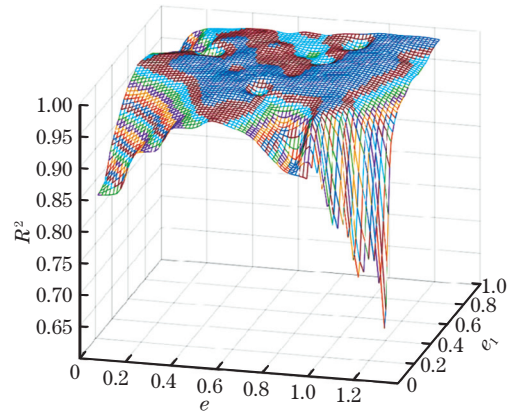


图 3 参数矩阵的截面拟合图

Fig. 3 Cross-section fitting diagram of parameter matrix

在图 3 中可以看到相当多的参数计算获得的截面形状的 R^2 大于 0.95,但在 $R^2 > 0.95$ 的参数中存在少数点偏离程度大、局部不理想的情况,此时去除函数不可用,会出现分层、中心点下凹、平顶等不理想情况,如图 4(a)、(b)、(d) 所示。 R^2 越大,截面形状越趋近于高斯型。仿真分析结果表明,当 $R^2 >$

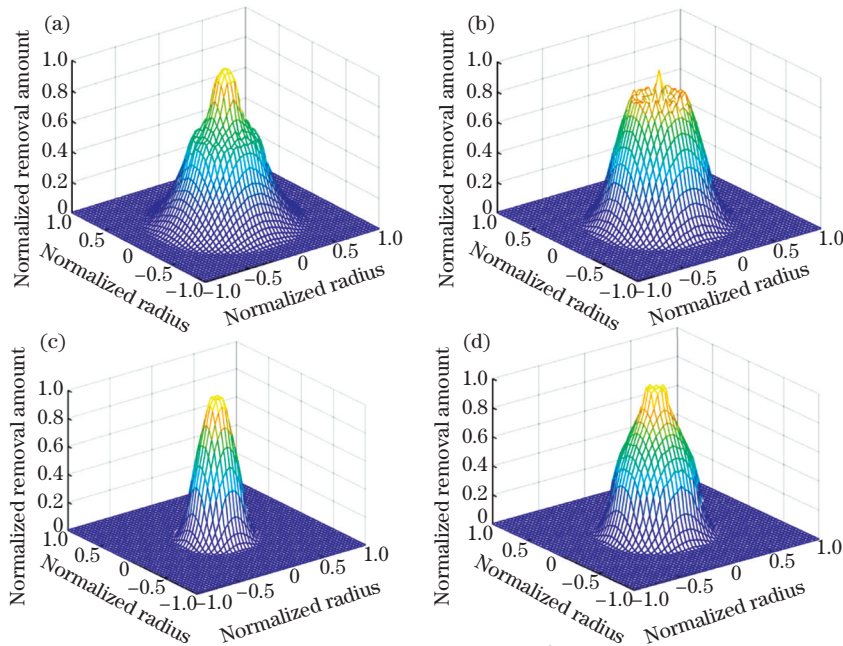


图 4 $R^2 < 0.995$ 时去除函数的形状。(a) 分层, $e_1 = 5/6, e = 4/3, R^2 = 0.9875$; (b) 中心点下凹, $e_1 = 0.5, e = 4/3,$

$R^2 = 0.9551$; (c) 类高斯型, $e_1 = 0.3, e = 5/12, R^2 = 0.9931$; (d) 平顶, $e_1 = 11/12, e = 1/3, R^2 = 0.9859$

Fig. 4 Shapes of removal function when $R^2 < 0.995$. (a) Layering, $e_1 = 5/6, e = 4/3, R^2 = 0.9875$; (b) central inferior concave, $e_1 = 0.5, e = 4/3, R^2 = 0.9551$; (c) Gaussian-like, $e_1 = 0.3, e = 5/12, R^2 = 0.9931$; (d) flat top, $e_1 = 11/12, e = 1/3, R^2 = 0.9859$

0.995 时, 偏离点少且偏离程度小, 截面形状为高斯型, 是可用的。此外, 图 3 中也存在 R^2 没有达到 0.995 但可获得类高斯型截面形状的参数, 如图 4 (c) 所示, 因此无法直接通过 R^2 的大小判断去除函数是否可用。在 $R^2 > 0.995$ 范围内有大量满足的参数, 因而设定 $R^2 > 0.995$ 为阈值, 生成如图 5 所

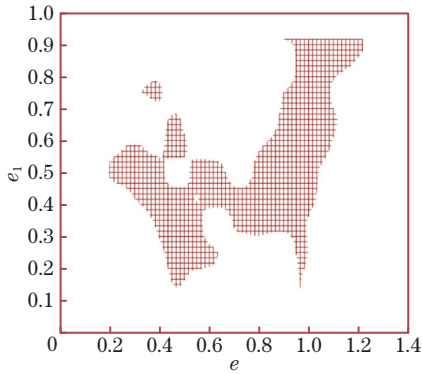


图 5 $R^2 > 0.995$ 时的参数图
Fig. 5 Parameters diagram with $R^2 > 0.995$

示的图像, 该图像表示公转半径与偏心距交互作用可以得到去除函数截面形状为高斯型的参数范围。

从图 5 中可以看出, 若要获得高斯型去除函数, 偏心双转子运动的公转半径的取值范围应为 $0.2333 \leq e \leq 1.25$, 偏心距的取值范围应为 $0.15 \leq e_1 \leq 0.9167$ 。由 (4) 式可得转速比范围为 $n \in (-1.087, -0.1216)$ 。

3.2 偏心双转子去除函数的方向去除特性

偏心双转子去除函数的运动轨迹对去除函数形状具有一定影响, 图 6 为转速比 $n = -1/3$ 时所获得的去除函数的形状及运动轨迹。可见, 运动轨迹的形状始终为花瓣形。花瓣数目随转速比的不同而改变, 花瓣数目等于转速比最简有理分式的分子与分母之和。定义花瓣数目为 M , 则有

$$n = -a/b, M = (a + b), \quad (6)$$

式中: a 、 b 分别为转速比最简有理分式的分子与分母。

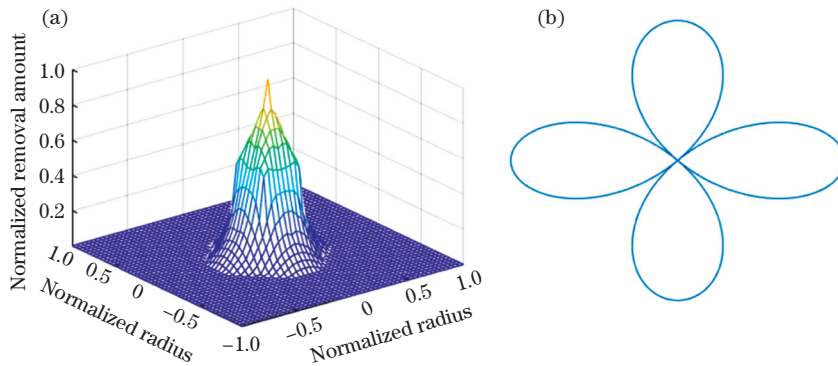


图 6 $n = -1/3$ 时的拟合结果及轨迹图 ($e_1 = 0.5, e = 0.5, R^2 = 0.9939$)。 (a) 拟合结果; (b) 轨迹图
Fig. 6 Fitting result and trajectory diagram when $n = -1/3$ ($e_1 = 0.5, e = 0.5, R^2 = 0.9939$).

(a) Fitting result; (b) trajectory diagram

理论上, 转速比越复杂, M 值越大, 产生的轨迹越复杂, 对中频误差的抑制效果就越好。为避免简单转速比, 需要设定最低的花瓣数目。仿真分析后

发现, 当 $M = 9$ (即最低花瓣数为 9) 时, 偏心双转子运动获得的去除函数的旋转对称性符合使用要求, 效果如图 7 所示。

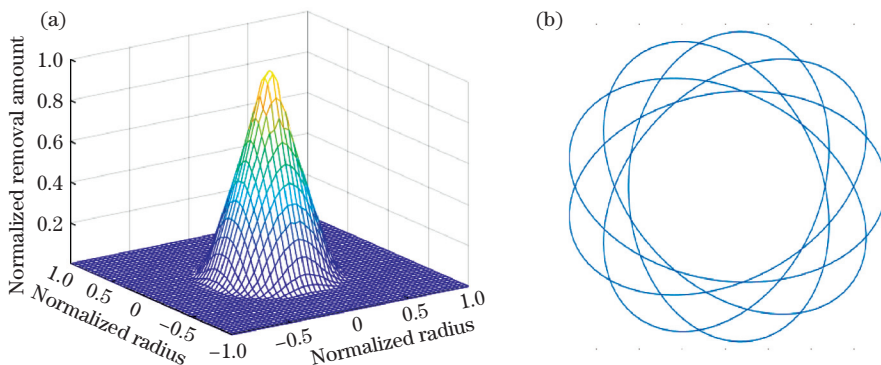


图 7 $n = -4/5$ 时的拟合结果及轨迹图 ($e_1 = 0.25, e = 1, R^2 = 0.9959$)。 (a) 拟合结果; (b) 轨迹图
Fig. 7 Fitting result and trajectory diagram when $n = -4/5$ ($e_1 = 0.25, e = 1, R^2 = 0.9959$).

(a) Fitting result; (b) trajectory diagram

规则、重复的轨迹会导致某一方向上的去除量较大,产生波纹(纹路),而增加轨迹的复杂度可以获得更多的去除方向,保证各个方向上的去除量更加均匀。为此,本文将去除函数上的点的去除方向的多少以及各个方向上的去除量是否均匀作为去除效果优劣的评价标准,并将其定义为去除函数的方向去除特性 φ ,即

$$\varphi = \frac{k \sum_{i=1}^k z_i}{180 \cdot z} \cdot \frac{z_{\max}}{z_{\max} - z_{\min}} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: k 为超过归一化去除量 0.6 的角度数量; z_i 为对应角度的去除量; z 为该点的总去除量; z_{\max} 为所有角度中的最大去除量; z_{\min} 为所有角度中的最小去除量。去除函数上的一点的去除角度越多,各方向上的去除量就越均匀,方向去除特性越好, φ 值越大;相反,去除角度越少,各方向上的去除量就越集中,方向去除特性越差, φ 值越小。通过仿真比较了双转子运动与偏心双转子运动的方向去除特性,因为对去除函数进行了归一化处理,所以去除函数的大小不会对仿真结果产生影响。仿真采用的参数如表 1 所示。

本文采用的双转子运动参数是在周旭升等^[23]优化推荐的参数的基础上通过仿真优化获取的。偏心双转子运动参数选用与双转子运动相同的转速

表 1 去除函数的方向去除特性仿真选用的参数
Table 1 Removal function parameters in the simulation of direction removal characteristic

Parameter	Value	
	Dual-rotor	Eccentric dual-rotor
r_1/mm	6	6
e/mm	4.8	6.12
e_1/mm	0	3
$\omega_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	-204	-204
$\omega_1/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	300	300
n	-0.68	-0.68
M	-	42

比,这是因为复杂的转速比会产生复杂的轨迹。为控制单一变量,仅比较不同运动形式下的方向去除特性。对去除函数归一化后,去除函数的大小相等,在转速比相同的情况下,去除函数的方向去除特性仅受运动形式的影响。由于去除函数的旋转对称性,只需比较一条半径上的方向特性即可。本次仿真选用的点为去除函数 x 轴归一化半径为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 的等间隔的 5 个点,如图 8 所示。图 8 中横坐标为去除方向的角度,由于对称性,因此角度范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$;纵坐标为归一化后各点的去除量。

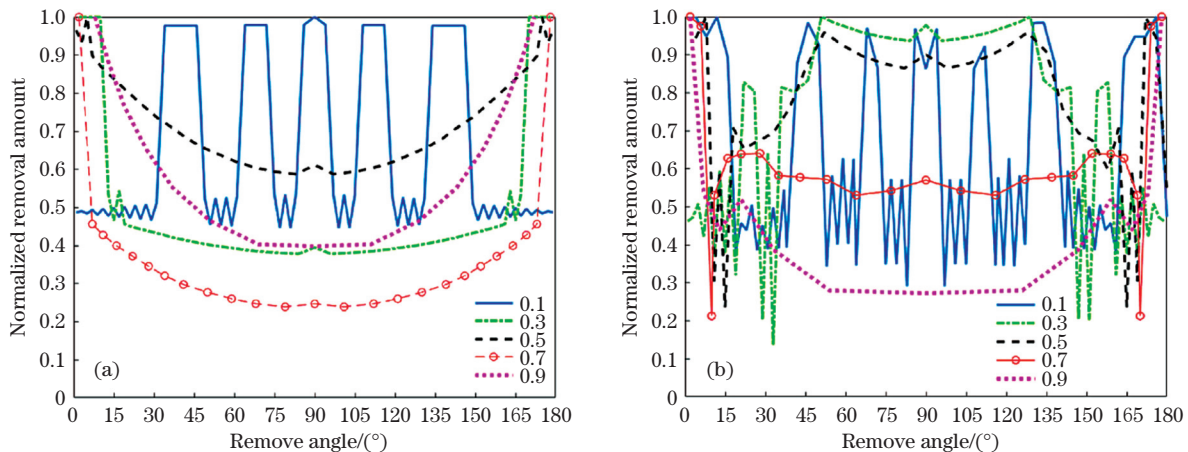


图 8 方向去除特性仿真图。(a)双转子运动去除函数;(b)偏心双转子运动去除函数

Fig. 8 Simulation diagram of direction removal characteristic. (a) Removal function of dual-rotor motion; (b) removal function of eccentric dual-rotor motion

通过图 8 及表 2 的计算结果可以发现,除归一化半径 0.9 处双转子运动去除函数的方向去除特性优于偏心双转子运动去除函数外,其余各点的偏心双转子运动去除函数的方向去除特性均优于双转子运动去除函数。对于去除函数而言,去除量主要集中在中心处,在去除函数归一化半径 0.9 处的去除

量很小,作用有限。综上,偏心双转子运动去除函数的方向特性优于双转子运动去除函数。

综上分析可知偏心双转子运动所产生的去除函数的方向去除特性优于传统双转子运动。理论上,偏心双转子技术对中频误差的抑制效果优于传统双转子技术。

表 2 仿真计算得到的去除函数的方向去除特性
Table 2 Simulated direction removal characteristic of removal function

Normalized radius	Directional removal characteristic	
	Dual-rotor	Eccentric dual-rotor
0.1	1.9720	4.9413
0.3	0.5940	9.1365
0.5	6.4703	9.4033
0.7	0.1772	2.1994
0.9	1.7951	0.2448

4 实验验证

为验证上述结论,本研究团队进行了定点抛光实验和光栅轨迹数控抛光实验。其中,定点抛光实验用以验证偏心双转子运动获取高斯型去除函数的可行性与优化参数范围的正确性,光栅轨迹数控抛光实验用来比较双转子运动与偏心双转子运动去除函数形状带来的叠加效果以及偏心双转子与双转子仿真分析的方向去除特性。实验所用抛光设备为五杆双摆抛光系统^[18],如图 9 所示,实验工件是直径为 140 mm 的材质为 K9 的平面光学元件,小磨头采用圆形抛光盘,抛光模材质为沥青,抛光模厚度为 3 mm。在优化范围内选取参数,如表 3 所示,实验中抛光压力为 8 N,保持压力恒定,公转方向为逆时针方向,自转方向为顺时针方向。实验中采用氧化铈水溶液作为抛光液,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。抛光时间为 10 min。本实验中的所有面形均采用 ZYGO 公司生产的 DynaFiz 激光干涉仪测得。圆形光学元件均经过环抛处理,达到同一指标(峰谷值小于 0.1 λ ,其中测量波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)后进行实验。工件 1 用于进行定点抛光

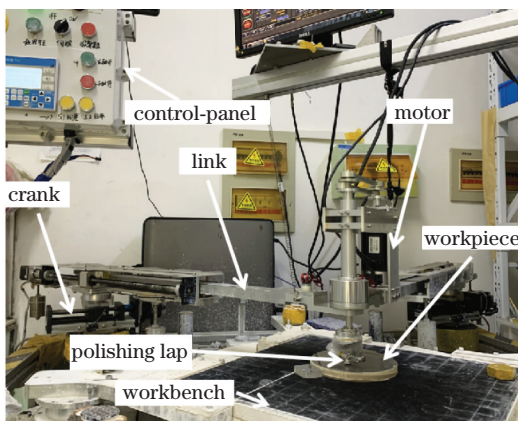


图 9 五杆双摆抛光系统

Fig. 9 Five-link-double-swing polishing system

实验,工件 2 用于在双转子运动方式下进行光栅轨迹数控抛光实验,工件 3 用于在偏心双转子运动方式下进行光栅轨迹数控抛光实验。

定点抛光实验选用的参数如表 3 所示。

表 3 去除函数定点抛光实验参数

Table 3 Removal function parameters of fixed-point polishing experiment

Parameter	Value				
	Dual-rotor motion		Eccentric dual-rotor motion		
r_1 / mm	6	6	6	6	6
e / mm	4.8	2.76	3.24	5.91	6.12
e_1 / mm	0	3	3	3	3
n	-0.68	-23/75	-0.36	-197/300	-0.68
$\omega_1 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	300	300	300	300	300
M	—	98	34	497	42
R^2 (simulation value)	0.9511	0.9957	0.9978	0.9986	0.9983
Time / min	10	10	10	10	10
R^2 (measurement value)	0.9774	0.9887	0.9895	0.9843	0.9816

双转子运动下获得的实测结果的拟合优度 R^2 为 0.9774,低于偏心双转子运动下获得的实测结果的 R^2 。通过图 10(b)和图 11 中去除函数形状的对比如图 10(d)和图 12 中去除函数截面高斯拟合结果可以看到,偏心双转子运动获得的去除函数较为光滑连续,而双转子运动的去除函数曲线有明显波动且与未抛光区域的过渡不够平滑,容易引入中频误差。实验结果表明,偏心双转子运动可以获得高斯型去除函数,且拟合程度优于双转子运动。实验结果相比仿真结果出现了一定偏差,这是因为实验中五杆抛光机构的两曲柄长度存在误差,使公转轨迹不够圆,而且仿真中的压力是绝对均匀的,而实验中无法保证,对面形产生了一定影响;此外,磨头与工件是相对转动的两个物体,相对磨合会使生成的表面趋于球面,因而实验结果顶端较仿真结果顶端圆扁,从而形成了偏差。

光栅轨迹数控抛光实验是为了验证去除函数的叠加效果以及不同运动方式下的方向去除特性。光栅间隔需要针对具体的去除函数进行优化处理,若采用的光栅间隔处于误差叠加的倍频范围内,则抛光结果的可信度差。因此,引入叠加误差来评价去除函数的叠加效果。叠加误差的计算公式为

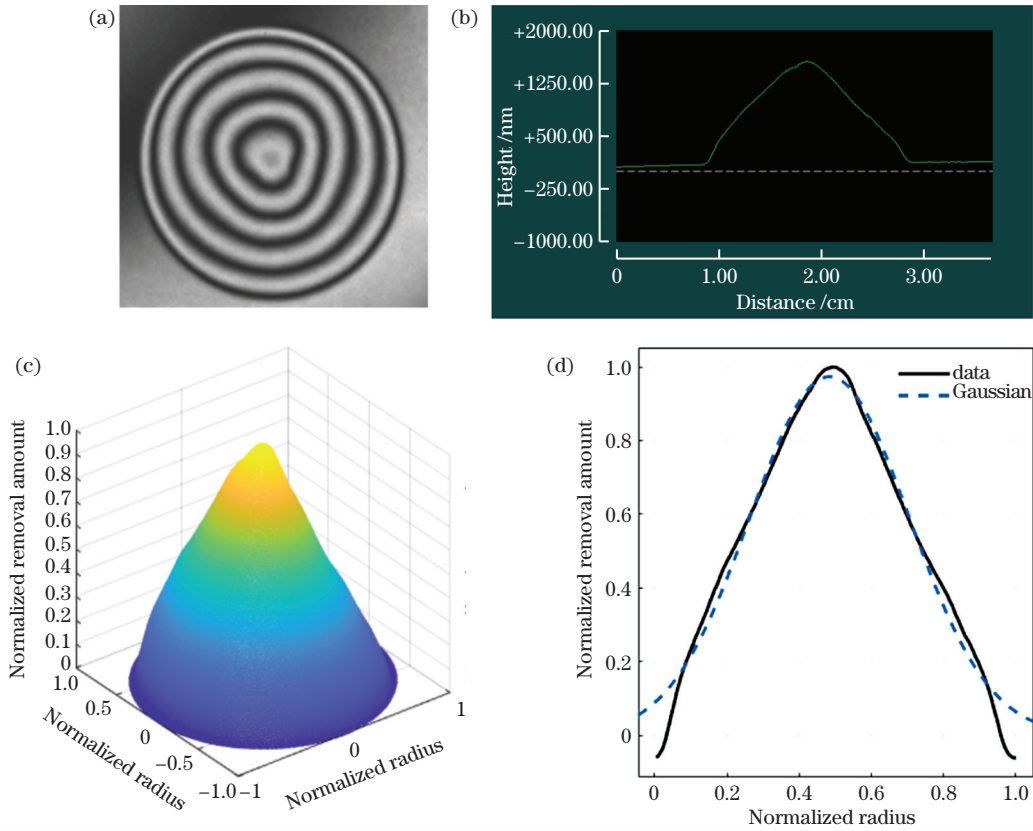


图 10 双转子去除函数面形干涉图及拟合结果。(a)干涉图;(b)去除函数在 Metropro 软件上的形状;(c)三维模型;(d)拟合结果
Fig. 10 Dual-rotor removal function interferogram and fitting results. (a) Interferogram; (b) shape of removal function on Metropro software; (c) three-dimensional model; (d) fitting result

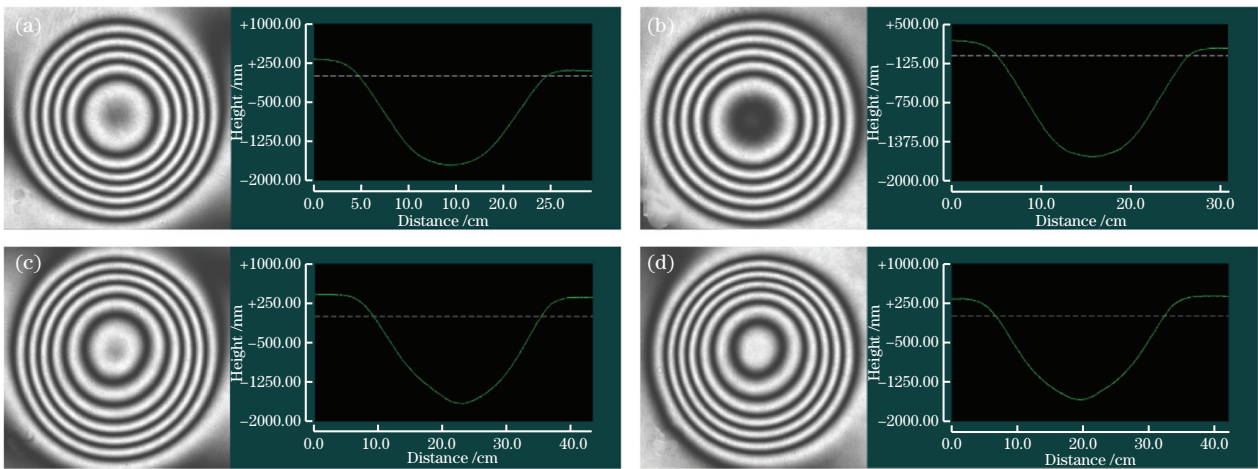


图 11 偏心双转子去除函数面形干涉图及相应的去除函数形状。(a) $e=2.76$; (b) $e=3.24$; (c) $e=5.91$; (d) $e=6.12$
Fig. 11 Surface shape interferograms of eccentric dual-rotor removal function and shapes of corresponding removal function. (a) $e=2.76$; (b) $e=3.24$; (c) $e=5.91$; (d) $e=6.12$

$$\epsilon = \frac{P(x, y) - V(x, y)}{P(x, y)}, \quad (8)$$

式中: $P(x, y)$ 为叠加后拟合面形的最高点; $V(x, y)$ 为叠加后拟合面形的最低点。

叠加误差计算结果如图 13 所示。在间隔为 1 时,传统双转子运动与偏心双转子运动的叠加误差

都分别取到最小值,分别为 0.013% 和 0.089%。因此光栅间隔都取 1 mm。在工件 2 和工件 3 中心 50 mm×50 mm 的方形区域内进行光栅轨迹数控抛光实验,工件 2 和工件 3 分别选用表 1 中的参数进行抛光实验。接下来比较相同转速比下优化的双转子去除函数与偏心双转子去除函数对中频误差的

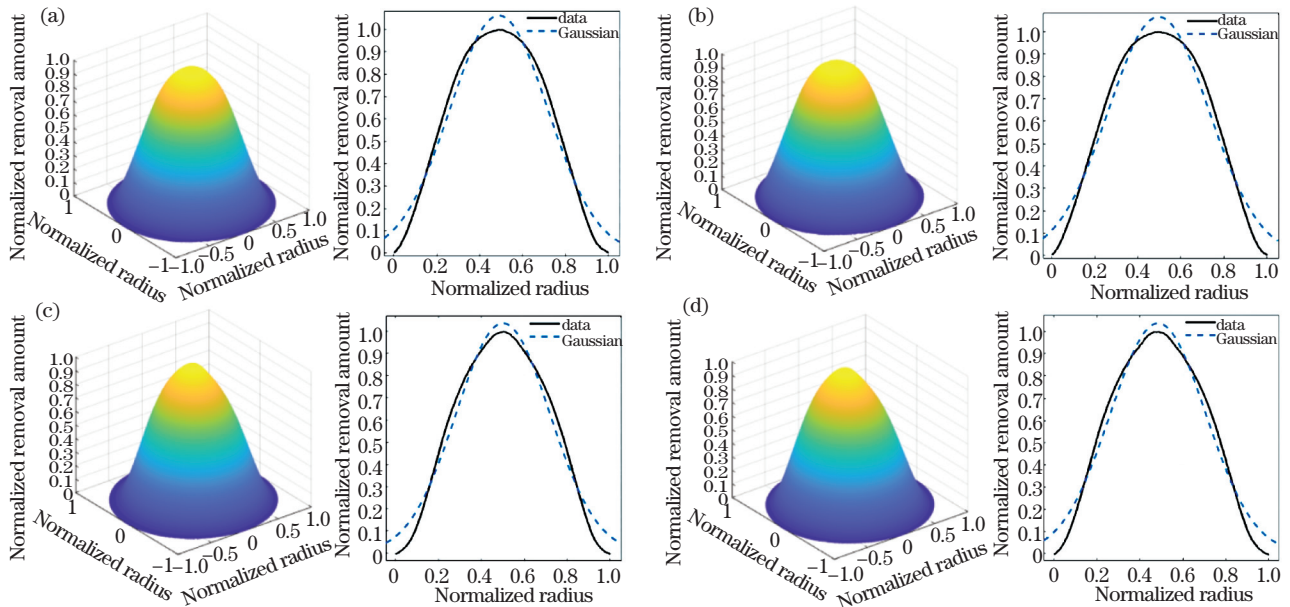


图 12 归一化处理后的偏心双转子去除函数及其归一化截面高斯拟合图。(a) $e=2.76$; (b) $e=3.24$;
(c) $e=5.91$; (d) $e=6.12$

Fig. 12 Normalized eccentric dual-rotor removal function and normalized cross-section Gaussian fitting diagrams.

(a) $e=2.76$; (b) $e=3.24$; (c) $e=5.91$; (d) $e=6.12$

抑制效果,以验证方向去除特性的仿真结果。

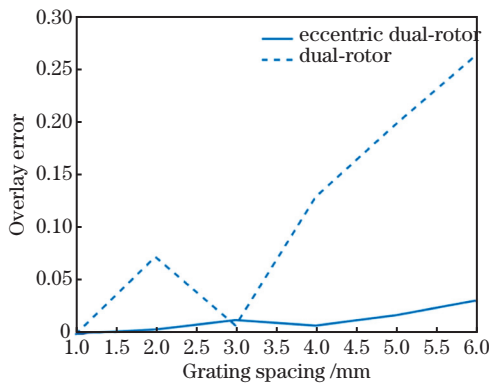


图 13 不同光栅间隔下的叠加误差曲线图

Fig. 13 Overlay error curves under different grating intervals

图 14 为实验获得的工件面形图的局部放大图,放大区域面积相同,均为 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 。可以看到,图 14(a)上有较规则的网格状纹路,而且这些纹路在灰色区域更加明显;图 14(b)中没有明显的规则纹路。在图 14 中作一条垂直于光栅轨迹的直线,可以获得局部面形图,如图 15 所示。在图 15(a)中可以看到一些较规则的形状,曲线的峰谷值为 21.281 nm ,均方根为 4.291 nm 。在相同的抛光条件下,在图 15(b)中没有看到较规则的形状,曲线的峰谷值为 12.977 nm ,均方根为 2.598 nm 。可见,偏心双转子运动获得的工件面形优于双转子运动获得的面形。

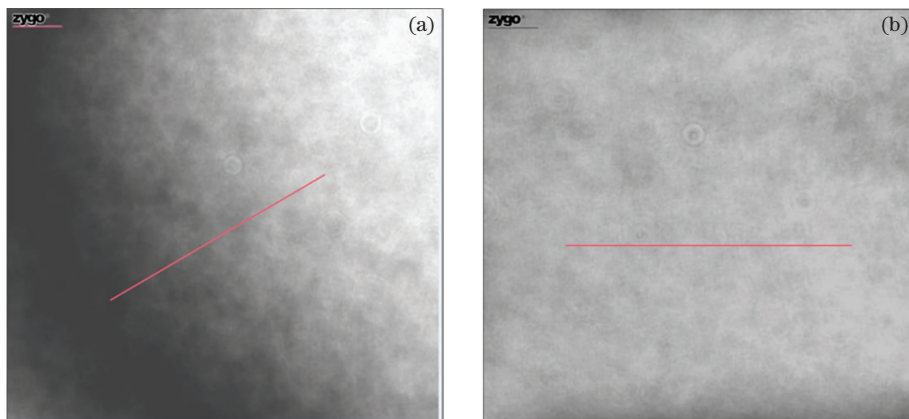


图 14 工件 2 和工件 3 干涉图的局部放大图。(a) 工件 2, 双转子运动; (b) 工件 3, 偏心双转子运动
Fig. 14 Partially enlarged interferograms of workpieces 2 and 3. (a) Workpiece 2, dual rotor motion;
(b) workpiece 3, eccentric dual-rotor motion

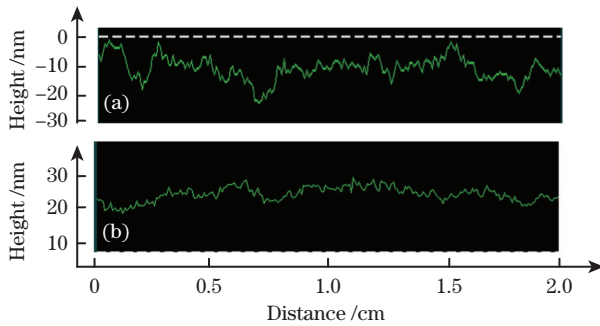


图 15 工件 2 和工件 3 的局部面形曲线。(a)工件 2, 双转子运动;(b)工件 3, 偏心双转子运动

Fig. 15 Local surface curves of workpieces 2 and 3.
(a) Workpiece 2, dual rotor motion;
(b) workpiece 3, eccentric dual-rotor motion

美国国家点火装置(NIF)采用功率谱密度(PSD)函数对中频误差进行评判,并设置了一条限制线(NTE)。PSD 函数的计算公式为

$$f_{\text{PSD}} = A\nu^{-b}, \quad (9)$$

式中: A 为 1.05; b 为 1.55; ν 为空间频率。评判标准为实际 PSD 曲线必须低于限制线。

由图 16 可以看到:双转子运动下的 PSD 曲线并不完全在限制线以下,有部分频率下的曲线超出了限制线,而偏心双转子运动下的 PSD 曲线完全处于限制线以下,且整体低于双转子运动。对于双转子

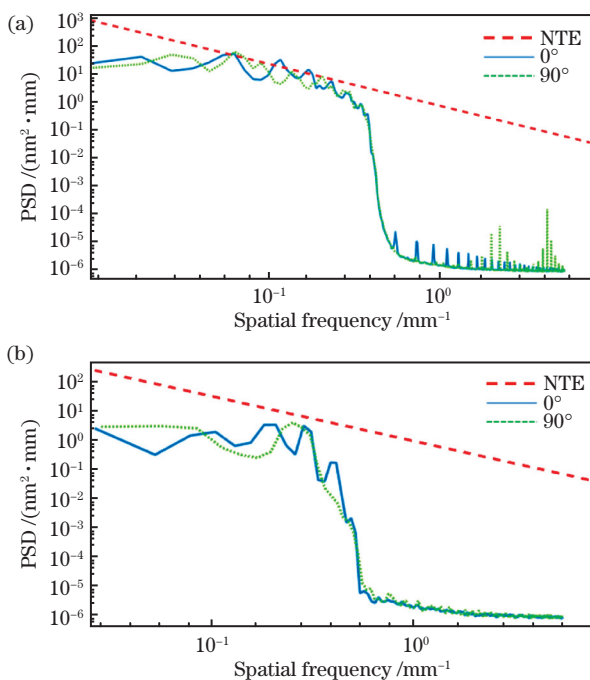


图 16 工件 2 和工件 3 的 PSD 分析图。(a)工件 2, 双转子运动;(b)工件 3, 偏心双转子运动

Fig. 16 PSD analysis diagrams of workpieces 2 and 3.
(a) Workpiece 2, dual rotor motion;
(b) workpiece 3, eccentric dual-rotor motion

运动和离心双转子运动,虽然其在 1 mm^{-1} 频率附近及以下的 PSD 曲线都在限制线以下,但双转子运动下有多处峰值较大的明显的起伏波动,而偏心双转子运动则较为平稳,无明显波动。以上说明偏心双转子运动的去除量更加均匀,即偏心双转子运动的方向去除特性优于双转子运动的方向去除特性。光栅轨迹数控抛光实验说明,在相同的光栅轨迹条件下,偏心双转子运动在加工过程中相比双转子运动可以更加有效地抑制中频误差。实验结果与仿真结果吻合,说明偏心双转子运动的方向去除特性优于双转子运动。

综上分析可知,偏心双转子运动相比双转子运动对中频误差有更好的抑制作用。

5 结 论

本文在双转子运动的基础上提出了偏心双转子运动,并建立了相应的数学模型。理论分析表明,偏心双转子运动抛光可以产生更加接近高斯形状的去除函数。对各关键参数进行优化,理论上获得了 R^2 值达 0.9986 的高斯型去除函数。分析了双转子运动抛光去除函数和偏心双转子运动抛光去除函数的方向去除特性,仿真分析表明,偏心双转子技术对中频误差的抑制效果优于传统双转子技术。进行了偏心双转子定点抛光实验和光栅轨迹数控抛光实验。定点抛光实验中获得了 $R^2 = 0.9895$ 的高斯型去除函数,验证了理论分析的正确性;光栅轨迹数控抛光实验证明了偏心双转子抛光技术比传统双转子抛光技术对中频误差有更好的抑制作用。实验结果与仿真分析一致。

参 考 文 献

- [1] Lin Z Q. Progress of laser fusion (invited paper) [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2202-2207. 林尊琪. 激光核聚变的发展(邀请论文) [J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2202-2207.
- [2] 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.
- [3] Fan C, Lu Y, Wang K J, et al. Surface removal characteristic of computer-controlled dual-rotor polishing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111(7): 2189-2199.

- [4] Wan S L, Wei C Y, Hong Z, et al. Modeling and analysis of the mid-spatial-frequency error characteristics and generation mechanism in sub-aperture optical polishing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8959-8973.
- [5] Wang S, Liu J, Zhang L. Dual-rotor tool path generation and removal error analysis in active feed polishing[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(28): 6948-6955.
- [6] Jiang X W, Long X W, Tan Z Q. A review of material removal mechanism in ultra-precision polishing of optical glass [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401014.
蒋小为, 龙兴武, 谭中奇. 光学玻璃超精密抛光加工中材料去除机理研究综述[J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401014.
- [7] Li A M. Study on the removal characteristics and technology of computer-controlled gadget polishing [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: 国防科学技术大学, 2003.
- [8] Wang Z Y, Zhang L X, Sun P F, et al. Mathematical modeling method for generation of Gaussian-type removal function in fluid jet polishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1022002.
王中昱, 张连新, 孙鹏飞, 等. 射流抛光中生成高斯型去除函数的数学建模方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1022002.
- [9] 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.
- [10] Walker D, Brooks D, King A, et al. The 'precessions' tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces[J]. *Optics Express*, 2003, 11(8): 958-964.
- [11] Shang W J. Model building and simulation of computer control deterministic grinding and polishing [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
尚文锦. 计算机控制确定性研抛的建模与仿真[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [12] Zhang W B. Theoretical research of the removal function based on the computer controlled polishing technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
张文彪. 基于计算机控制小磨头抛光的去除函数理论研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [13] Chen H N, Wang J L, Li X L, et al. Modelling and approximation of Gaussian-like removal function in dual-rotor polishing technology of optics elements [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(3): 282-287.
陈华男, 王君林, 李显凌, 等. 光学元件双转子抛光技术中类高斯型去除函数建模与逼近[J]. *光子学报*, 2013, 42(3): 282-287.
- [14] 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.
- [15] Chen X, Guo P J, Ren J F. Optimization of removal function in computer controlled optical surfacing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7655: 76551Y.
- [16] 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.
- [17] Tang W L, Liang S J, Jiao X, et al. Formation and control of scratches on surfaces of optical components during polishing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1202009.
汤文龙, 梁尚娟, 焦翔, 等. 抛光过程中光学元件表面划痕的形成和控制[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1202009.
- [18] Liu B X, Jiao X, Tan X H, et al. Effect of anionic modified polishing agent on Nd-doped phosphate laser glass polishing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1003001.
刘伯勋, 焦翔, 谭小红, 等. 阴离子改性抛光剂对磷酸盐激光钕玻璃抛光的影响[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1003001.
- [19] Chen X. Optimizing analysis of removal function in computer controlled optical surfacing [D]. Suzhou: Soochow University, 2011.
陈曦. 计算机控制抛光去除函数优化分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.
- [20] 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.
- [21] Lai L W, Liu Z G, Jiao X, et al. Suppression of mid-spatial-frequency errors in optical elements by polishing with compound swing multi-link mechanism[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1102001.
赖璐文, 刘志刚, 焦翔, 等. 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[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102001.
- [22] Jia J P, He X Q, Jin Y J. Statistics[M]. 7th ed. Beijing: China Renmin University Press, 2018. 贾俊平, 何晓群, 金勇进. 统计学[M]. 7 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2018.
- [23] 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.

Eccentric Dual-Rotor Polishing and the Suppression of Mid-Spatial-Frequency Error: Technological Study

Dong Ziming^{1,2,3*}, Zhang Yanan¹, Liu Zhigang^{2,3**}, Jiao Xiang^{2,3},
Zhu Jianqiang^{2,3}, Cui Wenhui^{2,3}, Lin Weiheng^{2,3}

¹ School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

² National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³ National Laboratory on High Power Laser and Physics, China Academy of Engineering Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract

Objective With the advancement of high-power laser technology, the optical components that affect the system's beam quality indicators are subjected to more stringent standards. Due to its properties of precise control of the surface shape and rapid development, computer-controlled optical surfacing technology has become an important processing method for creating high-quality optical components. Dual-rotor polishing technology, which is a type of computer-controlled small tool polishing technology, is one of them. It can achieve a steady and controllable removal function, which is vital in the surface processing of optical components. The removal function of Gaussian shape is ideal in computer-controlled optical surface cleaning. However, traditional dual-rotor motion polishing produces a substantial deviation from the Gaussian removal function and is not smooth enough, resulting in a mid-spatial-frequency error on the polished surface, which impacts the performance of the high-power laser system. The main cause of the mid-spatial-frequency error caused by small tools polishing is the simple repetition of the processing trajectory and the low precision of the removal function form. To address this issue, we have proposed a new small tool motion-polishing method that optimizes the two aspects of the removal function shape and processing trajectory to better suppress the mid-spatial-frequency error in this study.

Methods This study proposes an eccentric dual-rotor motion based on the traditional dual-rotor motion. The cross-sectional shape of the removal function through the center and the Gaussian curve are evaluated by establishing the motion model of the eccentric dual-rotor and using the goodness of fit as the evaluation index to optimize the removal function shape and obtain the range of process parameters that can produce the Gaussian removal function. To demonstrate the suppression effect of the removal function on the mid-spatial-frequency error, a mathematical model of the direction removal characteristic is proposed to evaluate how much removal direction a point on the removal function receives and whether the removal amount in each direction is uniform. The removal function of the dual-rotor motion and the eccentric dual-rotor motion are compared in the fixed-point polishing experiment. The suppressing effect of the dual-rotor motion and eccentric dual-rotor motion on the mid-spatial-frequency error is compared in grating track numerical control polishing experiment.

Results and Discussion A removal function that is closer to Gaussian shape than the motion of the dual-rotor is obtained from the optimization range of the simulation process parameters (Fig. 5) and the fitted $R^2 = 0.9986$. Comparison of simulation results of direction removal characteristic between dual-rotor motion and eccentric dual-rotor motion is shown (Fig. 8 and Table 2). It shows that the eccentric dual-rotor motion has better direction removal characteristic than the traditional dual-rotor motion, and theoretically has a better suppression effect on the mid-spatial-frequency error. The fixed-point polishing experiment compares the removal function shape of the

traditional dual-rotor motion and the eccentric dual-rotor motion and obtains the removal function shape, which is closer to the Gaussian removal function shape than the dual-rotor motion, the $R^2 = 0.9895$ (Figs. 10 and 11 and Table 3). The eccentric dual-rotor motion PSD curve obtained by the grating track numerical control polishing experiment is below the limit line, and the error ratio of eccentric dual-rotor motion at frequency of 1 mm^{-1} and below is smaller than that of the motion of the dual-rotor, indicating that the eccentric dual-rotor removal function can better suppress the mid-spatial-frequency error (Figs. 14 and 16), which verifies the correctness of the simulation analysis of the direction removal characteristic.

Conclusions The key parameters of the eccentric dual-rotor motion model were investigated and optimized theoretically in this study, and the Gaussian removal function of theoretical $R^2 = 0.9986$ was obtained. The Gaussian removal function can theoretically be obtained within a considerable optimization range. Also the direction removal characteristic model is established, which shows that the removal function of the eccentric dual-rotor is more uniform and has a better suppression effect on the mid-spatial-frequency error. A fixed-point polishing experiment is used to examine the removal function of dual-rotor and eccentric dual-rotor. The eccentric dual-rotor motion obtains a removal function closer to the Gaussian shape than the dual-rotor motion, and its $R^2 = 0.9895$. The effects of dual-rotor and eccentric dual-rotor motion on suppressing mid-spatial-frequency error are compared in the numerical control-grating track polishing experiment. Among them, the PSD curve of the dual-rotor motion partially exceeds the limit line, and the PSD curve obtained from the eccentric dual-rotor motion is below the limit line and has a better suppression effect on the mid-spatial-frequency error of less than 1 mm^{-1} , indicating that the eccentric dual-rotor motion has a better suppression effect on the mid-spatial-frequency error. The above results verify the correctness of the direction removal characteristic and have guiding significance for the actual processing.

Key words optical fabrication; small tools polishing; Gaussian removal function; mid-spatial-frequency error; eccentric dual-rotor motion

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 240.5450