

# 一种提升定点抛光实验中去除函数采集准确性的方法

黄林斌<sup>1</sup>, 林鑫<sup>1</sup>, 彭云峰<sup>1,2\*</sup>

(1. 厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361102; 2. 厦门大学深圳研究院, 广东 深圳 518000)

**摘要:** [目的] 定点抛光实验中, 实际采集的去除函数与名义去除函数之间存在误差, 该误差在加工过程中被累积放大, 严重影响加工精度与面形收敛效率。为获得准确的去除函数, 提高加工精度和面形收敛效率, 本研究以半刚性气囊工具头为研究对象, 探究定点抛光中去除量误差产生的原因与提高采集去除函数准确性的方法。[方法] 本研究分析了定点抛光实验中去除量误差产生的原因, 并基于 Preston 方程建立了去除量误差的数学模型。此外, 通过改进定点抛光实验对该误差进行修正。首先, 通过定点抛光实验获得实际的去除量分布特征。接着, 在相同工艺参数下, 将驻留时间设置为 0 s, 提取定点抛光过程中的去除量误差并根据该误差修正实际的去除量分布特征, 得到更准确的去除函数。最后, 使用修正前和修正后的去除函数对 K9 玻璃进行对比抛光实验, 验证本方法的有效性。[结果] 使用修正后的去除函数进行修形抛光, K9 玻璃的面形峰谷值由 906.80 nm 减小至 374.62 nm, 提升 58.69%。均方根值由 175.92 nm 减小至 47.46 nm, 提升 73.02%。[结论] 本研究提出的优化方法显著提升了半刚性气囊抛光精度与面形收敛率。

**关键词:** 气囊抛光技术; 半刚性气囊工具头; 定点抛光; 面形误差; 去除函数

中图分类号: TH 16

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)02-0307-09

## A method to improve the accuracy of the removal function collection in fixed-point polishing experiments

HUANG Linbin<sup>1</sup>, LIN Xin<sup>1</sup>, PENG Yunfeng<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. Shenzhen Research Institute of Xiamen University, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** [Objective] In fixed-point polishing experiments, a discrepancy exists between the actual removal function collected and the nominal removal function. This error is amplified during the machining process, thus severely affecting machining accuracy and surface convergence rate. To obtain an accurate removal function and improve machining precision and surface convergence rate, we focus on semi-rigid bonnet tools to explore the causes of removal volume errors in fixed-point polishing and methods to enhance the accuracy of the removal function collection. [Methods] In this study, we analyze causes of removal volume errors in fixed-point polishing experiments and establish a mathematical model for these errors based on the Preston equation. Furthermore, the study has improved fixed-point polishing experiments to correct these errors by first obtaining actual removal volume distribution characteristics. Then, under the same process parameters, the dwell time is set to 0 seconds to extract the removal volume errors during the fixed-point polishing process and correct actual removal volume distribution characteristics based on these errors, resulting in a more accurate removal function. Finally, comparative polishing experiments on K9 glass using both pre-corrected and post-corrected removal functions are conducted to validate the effectiveness of this method. [Results] After corrective polishing with the revised removal function, the peak-to-valley value of the K9 glass surface is reduced from 906.80 nm to 374.62 nm, suggesting an improvement of 58.69%. Also, the root mean square value decreases from 175.92 nm to 47.46 nm, indicating an improvement of

收稿日期: 2024-04-09 录用日期: 2024-05-24

\* 通信作者: penyf@xmu.edu.cn

引文格式: 黄林斌, 林鑫, 彭云峰. 一种提升定点抛光实验中去除函数采集准确性的方法[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(2): 307-315.

Citation: HUANG L B, LIN X, PENG Y F. A method to improve the accuracy of the removal function collection in fixed-point polishing experiments[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(2): 307-315. (in Chinese)



73.02%. [Conclusion] The optimization method proposed in this study significantly enhances the precision and the surface convergence rate of semi-rigid bonnet polishing.

Keywords: bonnet polishing technology; semi-rigid bonnet tool; fixed-point polishing; surface shape error; removal function

光刻机物镜系统、惯性约束核聚变系统和同步辐射光源等高新技术均要求超精密光学元件实现一系列前所未有的极端性能[1]. 超精密抛光技术是实现此类性能的关键技术之一[2]. 光学元件的抛光精度主要取决于去除函数的准确性[3], 其中去除函数为单位时间内对材料去除量的分布[4]. 目前, 许多学者对去除函数的稳定性进行研究, 黄雪鹏等[5]建立了机器人刚度模型, 并结合 Preston 方程修正抛光过程中不同刚度下的去除函数模型. 钟波等[6]考虑工件表面曲率对去除函数影响, 建立了时变去除函数模型以修正现有去除函数模型. 潘日等[7-8]基于表面摩擦系数与主轴转速的关系, 以及润滑状况修正去除函数. 上述研究均通过定点抛光实验验证其去除函数模型的准确性, 定点抛光作为获取去除函数的重要方法, 广泛应用于确定性抛光中去除函数的采集[9-11]、去除函数模型的验证[6,8,12] 以及去除函数与各工艺参数关系的探究[13-16]. 目前对如何准确地采集去除函数的研究相对

较少, 在定点抛光实验中, 常忽略了抛光工具在下压和上升过程中产生的去除量, 导致实际采集的去除函数与名义去除函数之间存在误差, 显著影响加工精度.

本研究以半刚性气囊工具头为研究对象, 对定点抛光实验中去除量误差产生的原因进行分析, 并基于 Preston 方程建立去除量误差的数学模型. 此外, 改进定点抛光实验采集去除函数的方法, 对去除函数进行修正. 最后, 通过修形抛光实验验证本方法的有效性.

### 1 去除函数采集方法分析

气囊抛光工艺的流程如图 1 所示, 可概括如下:

- 1) 使用激光干涉仪等检测设备测量采斑元件的初始面形, 并设定工艺参数和驻留时间, 进行定点抛光实验;
- 2) 先将加工前后的采斑元件面形数据相减, 然后

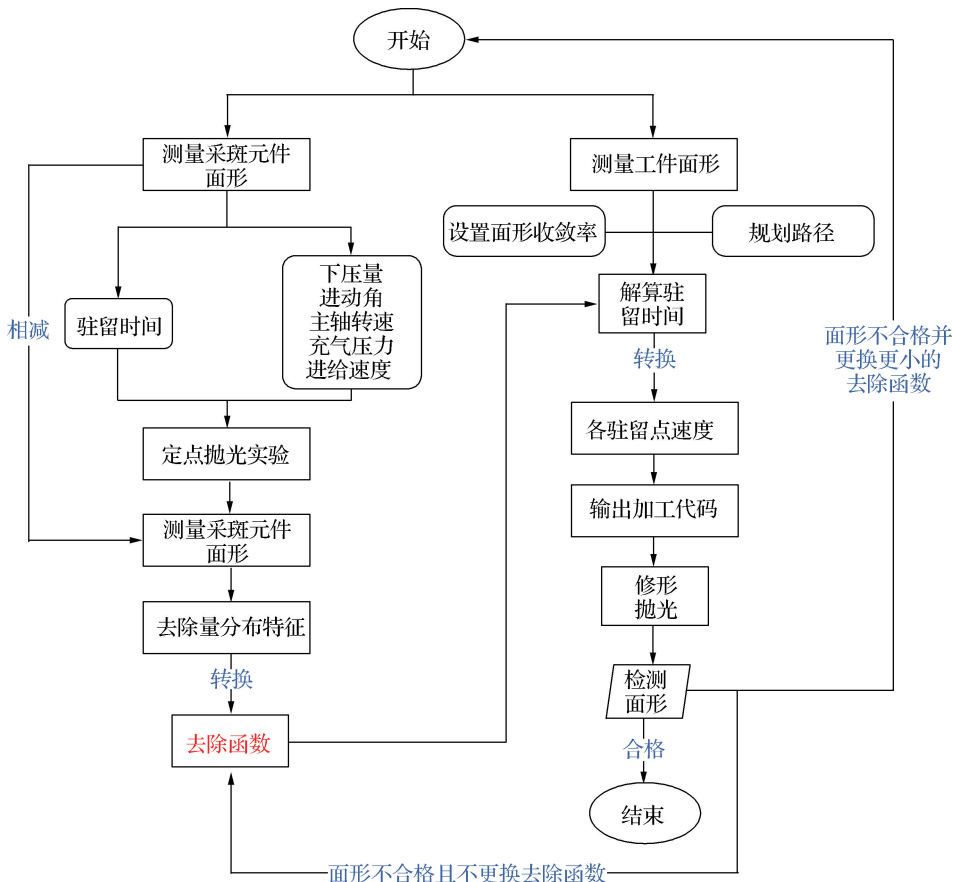


图 1 气囊抛光工艺流程

Fig. 1 The process of bonnet polishing

将差值转换为单位时间的去除量分布,得到特定工艺参数下的去除函数;

3) 检测工件的面形误差并设定加工路径,根据设定的加工路径对工件表面进行离散化处理并将离散点作为驻留点;

4) 将各驻留点的面形误差数据与步骤2中获得的去除函数进行反卷积运算,得到各驻留点的驻留时间;

5) 将各点的驻留时间转化为该点的进给速度,执行数控代码,对工件的面形误差进行修正;

6) 完成抛光后,重新检测工件的面形.若面形精

度未达到预期要求,则返回步骤3,直至达到要求的面形精度.

一般通过定点抛光实验获得实际的去除函数,或使用经定点抛光实验验证的去除函数模型生成去除函数.如图2所示,定点抛光中可分为5个阶段:

- 1) 气囊工具头旋转至初始位姿(S1);
- 2) 气囊工具头从工件表面下压至指定位置(S2);
- 3) 在指定位置停留设定时间(S3);
- 4) 从指定位置开始上升至工件表面(S4);
- 5) 脱离工件并上升至指定高度(S5).

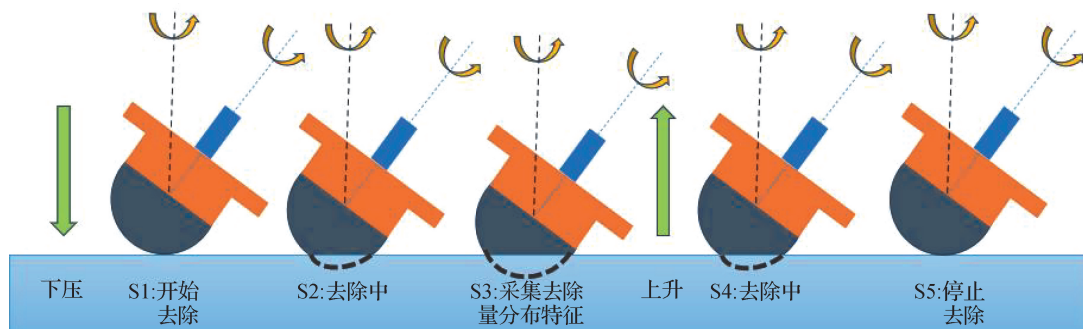


图2 定点抛光过程

Fig. 2 Fixed-point polishing process

在气囊工具头接触工件表面并下压至指定位置及其逆过程中,气囊工具头与工件接触区域存在抛光压力和相对运动,会产生额外的材料去除量,影响去除函数的准确性,进而影响加工精度与面形收敛效率.然而,目前采集去除函数的流程并未考虑上述误差.

定点抛光实验中,去除量误差来源于S2与S4阶段,而S3阶段为获得名义去除量分布的阶段.在工程实践中通常采用以下两种策略获得较为准确的去除量分布特征:一是提高进给速度以缩短S2与S4阶段的时间;二是增加S3阶段的驻留时间.然而,进给速度会受到机床运动特性的限制.同时,气囊抛光的高材料去除率意味着增加驻留时间可能会导致材料去除深度超出干涉仪的测量范围,无法获取抛光后的面形.此外,两种策略对误差抑制的效果有限,因此亟需研究更有效的方法.

## 2 误差分析与修正

### 2.1 去除量误差分析

式(1)为Preston方程,气囊抛光中常用其描述抛光过程的材料去除速率 $dz/dt$ <sup>[17]</sup>,

$$\frac{dz}{dt} = K \cdot P \cdot V, \quad (1)$$

式中: $K$ 为Preston系数,它与被抛光材料、抛光垫种类、抛光粉种类、抛光液浓度、pH值以及抛光时的温度有关; $V$ 为工件表面某一点相对于抛光工具的瞬时速度,与下压量、主轴转速、进动角等有关; $P$ 为接触区域的抛光压力,与下压量、气囊内部充气压力等有关, $V$ 和 $P$ 都是关于位置 $(x, y)$ 和时间 $t$ 的函数.根据Preston方程可知,加工时间 $t$ 内的材料去除量 $\Delta z(x, y)$ 可用式(2)表示:

$$\Delta z(x, y) = K \int_0^t P(x, y, t) \cdot V(x, y, t) dt. \quad (2)$$

由上述内容可知,在定点抛光实验中,S2和S4阶段产生的去除量误差与下压量、进动角、主轴转速、气囊工具头内部充气压强和下压(上升)过程的时间有关.由于定点抛光实验的驻留时间较短,且该时间段内的材料去除深度仅为微米量级,为方便计算,本研究忽略定点抛光过程中的去除量对 $P$ 和 $V$ 的影响以及 $Z$ 轴移动对去除函数的影响,使用静态去除函数计算定点抛光中的材料去除量.

图3为气囊定点抛光实验的空间运动示意图.其中坐标系原点位于点 $O(0, 0, 0)$ ,主轴电机角速度为 $\omega_1$ .气囊工具头球心位于点 $O_1(0, 0, R-l)$ ,其中 $l$ 表示气囊工具头的下压量,图中 $\alpha$ 为进动角, $Q(x, y, 0)$ 为抛光区域中的任意一点.

过点 $Q$ 作一条与 $X$ 轴平行的线,该线与 $Y$ 轴相

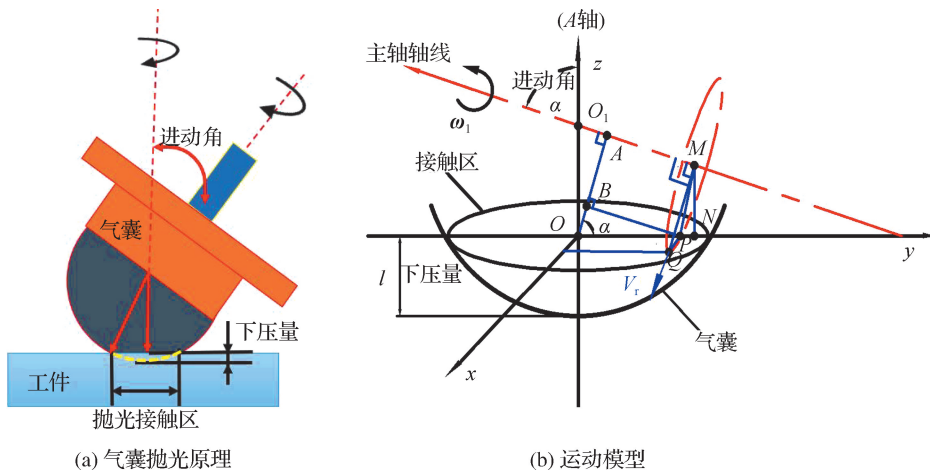


图3 气囊抛光运动模型

Fig. 3 Bonnet polishing motion model

交于点  $P(0, y, 0)$ . 从原点  $O$  出发作直线  $OA$ , 垂直于主轴轴线, 垂足为点  $A(0, (R-l)\sin\alpha\cos\alpha, (R-l)\sin^2\alpha)$ . 接着, 过点  $P$  做直线  $OA$  的垂线  $PB$ , 垂足为点  $B(0, y\cos^2\alpha, y\cos\alpha \cdot \sin\alpha)$ .

主轴轴线位于  $YOZ$  平面, 而直线  $QP$  垂直于  $YOZ$  平面, 因此  $QP$  也垂直于主轴轴线. 由于  $QP$  和

$QM$  都与主轴轴线垂直, 并在  $Q$  点相交, 故主轴轴线垂直于平面  $QPM$ , 因此直线  $PM$  垂直于主轴轴线. 综上可得, 四边形  $AMPB$  为矩形, 即  $AB$  等于  $MP$ . 故  $M$  的坐标为  $(0, y + [R - l\sin\alpha - y\cos\alpha]\cos\alpha, [R - l\sin\alpha - y\cos\alpha]\sin\alpha)$ . 基于点  $M$  的坐标可得抛光区域中任意点  $Q$  的速度表达式:

$$\mathbf{V}_Q = \overrightarrow{QM} \times \boldsymbol{\omega}_1 = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ -x & [R - l\sin\alpha - y\cos\alpha]\cos\alpha & [R - l\sin\alpha - y\cos\alpha]\sin\alpha \\ 0 & -|\boldsymbol{\omega}_1| \sin\alpha & |\boldsymbol{\omega}_1| \cos\alpha \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} |\boldsymbol{\omega}_1| [(R - l)\sin\alpha - y\cos\alpha]^T \\ -|\boldsymbol{\omega}_1| x\cos\alpha \\ |\boldsymbol{\omega}_1| x\sin\alpha \end{pmatrix}. \quad (3)$$

为提高加工精度, 常采用“四步离散进动”技术进行抛光. 该技术将  $A$  轴停留在相隔  $90^\circ$  的 4 个位置以代替  $A$  轴的连续转动, 此时的去除函数为 4 个位置去除函数的叠加. 因此, 接触区任意点的速度分布可用式(4)表示:

在  $S2$  与  $S4$  阶段中, 下压量不断变化导致  $P, V$  和抛光接触区的范围发生相应变化. 基于微积分原理,  $S2$  和  $S4$  阶段的去除量误差可以通过式(6)表示:

$$|\mathbf{V}| = \sum_{i=1}^4 \Delta_i [ (|\boldsymbol{\omega}_1| (R\sin\alpha - l\sin\alpha - y\cos\alpha))^2 + (-|\boldsymbol{\omega}_1| x\cos\alpha)^2 ]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

其中,  $\Delta_i$  为“四步离散进动”过程中的 4 次旋转矩阵.

王春锦<sup>[18]</sup>通过仿真分析发现, “进动抛光”时, 气囊工具头与工件之间的接触应力分布呈类高斯形, 并可用式(5)表示工件与气囊工具头之间的静态接触压力  $P_{static}$ , 此发现与 Kim 等<sup>[19]</sup>的研究结果一致.

$$P_{static} = \eta \cdot P_{max} \left[ \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right) \right]^\varphi, \quad (5)$$

式中,  $\eta$  为仿真误差修正因子,  $P_{max}$  为气囊工具头与工件接触区域的最大压力值,  $d$  为接触区域任意点到中心点的距离,  $\sigma$  为标准差,  $\varphi$  修正系数.

$$S_{TIFE} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^4 \Delta_i \cdot K \cdot \eta \cdot P\left(\frac{t}{n}j\right)_{max} \left[ \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right) \right]^\varphi \cdot \left[ \left[ |\boldsymbol{\omega}_1| \left( R\sin\alpha - l\left(\frac{t}{n}j\right)\sin\alpha - y\cos\alpha \right) \right]^2 + (-|\boldsymbol{\omega}_1| \cos\alpha)^2 x^2 \cdot \frac{t}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \right), \quad (6)$$

式中,  $t$  为气囊工具头从接触工件表面到下压位置所需的时间,  $p\left(\frac{t}{n}j\right)_{max}$  为该时刻气囊工具头与工件之间的最大压力,  $l\left(\frac{t}{n}j\right)$  为该时刻的下压量. 由定点抛光过程可知, 定点抛光实验中去除量误差可用式(7)表示:

$$S_{TIF} = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^4 \Delta_i \cdot K \cdot \eta \cdot \right)$$

$$P\left(\frac{t}{n}j\right)_{\max} \left[ \exp\left(-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}\right) \right]^q \cdot \left[ \left[ |\omega_1| \left( R\sin\alpha - l\left(\frac{t}{n}j\right)\sin\alpha - y\cos\alpha \right) \right]^2 + \left( -|\omega_1| \cos\alpha \right)^2 x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{t}{n} \quad (7)$$

在 S2 和 S4 阶段中,下压量的变化会影响抛光区域各点的速度和抛光压力,其中的关系需要进一步研究.本研究通过仅保留下降和上升的动作的定点抛光实验,获得式(7)中的去除量误差.随后,根据该去除量误差对实际采集的去除量分布进行修正.

### 2.2 误差修正方法

现有采集去除函数的方法未考虑定点抛光过程中 S2 与 S4 阶段产生的误差,难以获得准确的去除函数.为解决该问题,本研究在传统方法上增加了采集 S2 与 S4 阶段的去除量的步骤,并改进了采集去除函数的方法.本研究通过将驻留时间  $T$  设置为 0 秒,仅保留下降和上升的动作的定点抛光实验,提取 S2 和 S4 阶段产生的去除量误差.随后,令实际采集的去除量分布与去除量误差相减,修正去除量分布特征,从而获得更精确的去除量分布特征,详细流程见图 4.

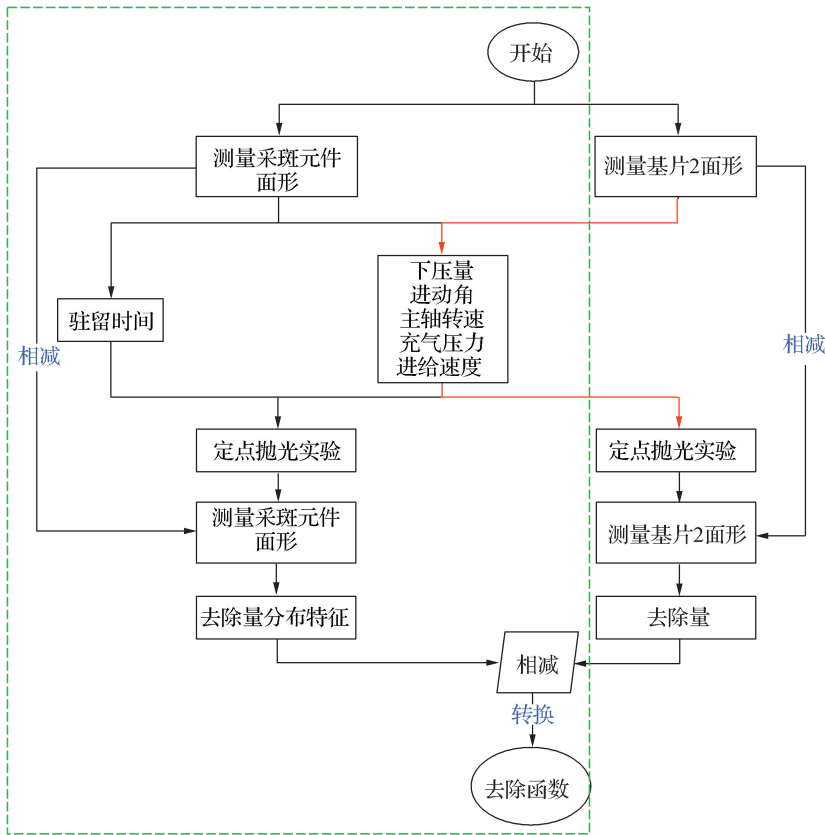


图 4 去除函数采集流程

Fig. 4 The process of collecting removal function

改进后定点抛光实验采集去除函数方法中增加了以下操作步骤:

- 1) 在相同工艺参数下,将驻留时间设定为 0 s,仅保留下降和上升的动作进行定点抛光实验;
- 2) 对加工前和加工后的面形数据执行相减操作,得到去除量误差;
- 3) 令去除量分布特征与单次实验中的去除量误差相减,得到修正后的去除函数.

随后,使用原始和修正后的去除函数对 K9 圆形工件进行修形抛光实验,以验证本方法的有效性.

### 3 定点抛光实验

如图 5 所示,实验所用的气囊抛光机床拥有三个直线轴、两个旋转轴和一个主轴.其中,A 轴与 B 轴是实现“进动抛光”技术的核心组件,通过控制 A 轴与 B 轴,可以将半刚性气囊工具头旋转至指定位姿,确保主轴轴线与工件法线之间的夹角始终为进动角.

采用表 1 所列的工艺参数进行定点抛光实验,并利用 4 英寸激光干涉仪(KTY-SIF-100 型)进行误差

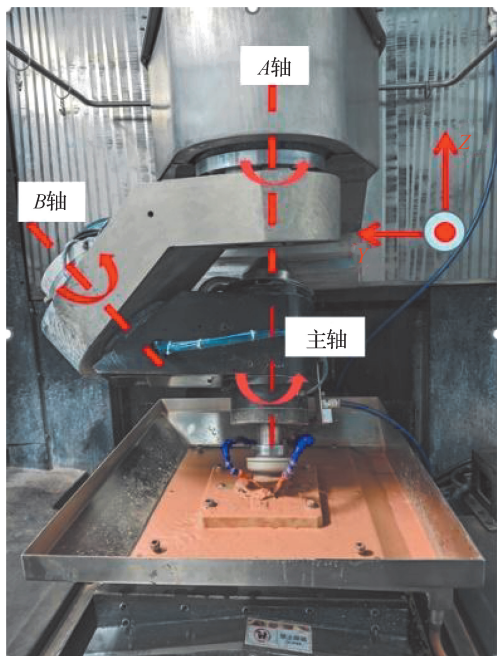


图5 气囊抛光机床

Fig. 5 Bonnet polishing machine tool

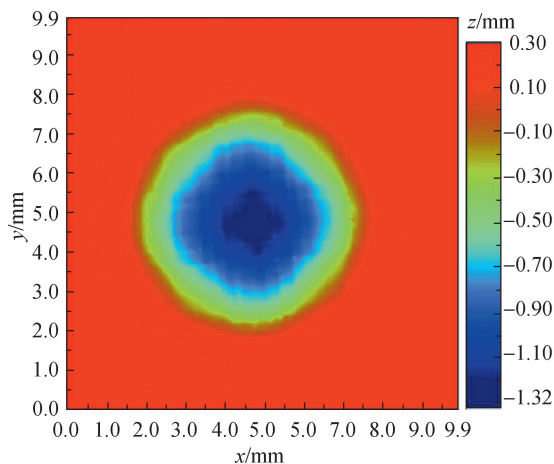
检测. 鉴于半刚性气囊工具头具较高的材料去除效率, 较长的驻留时间可能导致去除深度超出干涉仪的测量范围. 为避免该情况, 将每一步的驻留时间设定

表1 四步离散进动定点抛光实验参数  
Tab. 1 Experimental parameters of four-step discrete precession fixed-point polishing

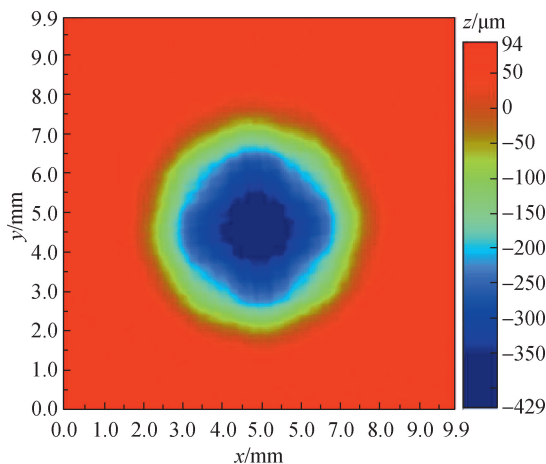
工艺参数	数值
气囊工具头半径/mm	40
驻留时间/s	$4 \times 0.5, 4 \times 0$
抛光液密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	1.03
磨料	$1 \mu\text{m CeO}_2$
进给速度/( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	850
采斑元件材料	K9
进动角/( $^\circ$ )	23
下压量/mm	0.3
主轴转速/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	1 500

为 0.5 s, 实验结果如图 6(a) 所示.

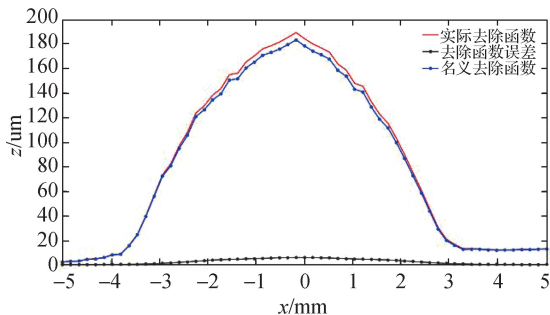
当进给速度为  $850 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时, 半刚性气囊工具头从工件表面下压至指定位置及上升的时间极短. 为确保去除量误差达到干涉仪的检测范围, 在同一位置重复 10 次仅保留下降和上升的动作的定点抛光实验, 且假设每次产生的去除量误差相同, 实验结果如图 6(b) 所示.



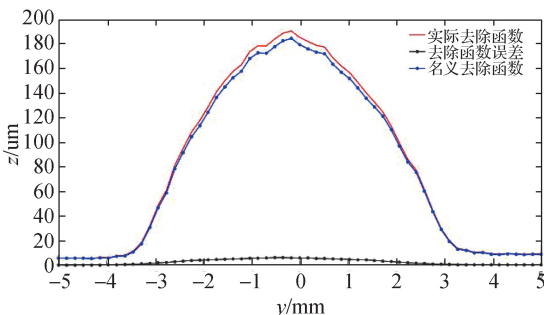
(a) 实际去除量分布



(b) 去除量分布误差



(c) X方向轮廓对比



(d) Y方向轮廓对比

图6 四步离散进动定点抛光的去除函数

Fig. 6 Removal function of four-step discrete precession fixed-point polishing

目前,主要从形状和效率上对去除函数进行评价,由图 6 可知,修正前后的去除函数均呈类高斯形分布. 去除函数的效率分为峰值去除效率和体积去除效率,其中体积去除效率可以通过式(8)计算. 表 2 对比了修正前后去除函数的效率.

$$V = \iint_S R(x,y) dx dy, S: \sqrt{x^2 + y^2} \leq d, \quad (8)$$

式中, $V$  是体积去除效率,  $R(x,y)$  为该工艺参数下的去除函数,  $d$  为去除函数的直径.

表 2 修正前后去除函数效率对比

Tab. 2 Comparing efficiency before and after removal function

评价指标	修正前	修正后
峰值去除效率/ $(\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	194.21	188.07
体积去除效率/ $(\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	3.623	3.508

如图 7 所示,抛光过程中材料的去除可视为去除函数在工件表面的移动. 通过将去除函数移动过程中对各区域的去除量进行累加,可以得到工件表面各区域的材料去除量. 尽管表 2 的数据表明,定点抛光过程中产生的误差对去除函数效率的影响较小,但由于去除函数的半径显著大于驻留点之间的距离,去除函数在抛光过程中不仅同时作用于多个驻留点,并且会多次作用于同一驻留点形成累积,这显著放大了该误差.

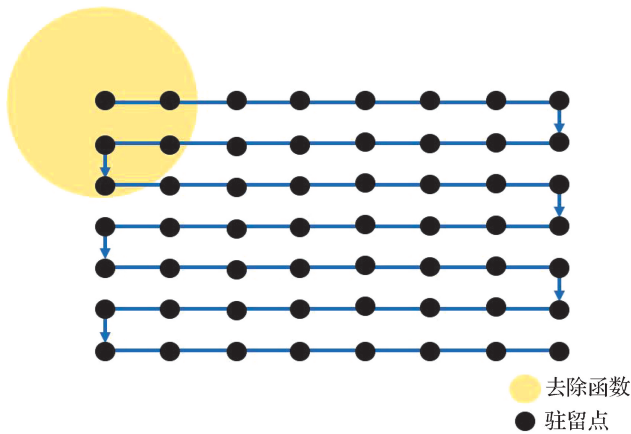


图 7 材料去除过程

Fig. 7 Material removal process

为了探究定点抛光实验中去除函数误差对抛光性能的影响,本研究使用获得的两种去除函数对初始面形相接近的 K9 光学元件进行抛光对比实验.

## 4 修形抛光实验

修形抛光指通过面形误差与去除函数的反卷积运算得到各驻留点的驻留时间,并根据驻留时间改变加工路径上各驻留点的进给速度对面形误差进行修正. 因此,去除函数通过影响驻留时间间接影响抛光精度,准确地获取去除函数是提升加工面形精度与面形收敛效率的关键因素.

为评估去除函数误差对抛光精度的影响,本研究分别使用原始和修正后的去除函数对具有相似面形精度的圆形工件进行一次修形抛光实验. 图 8 为使用原始去除函数进行一次修形抛光后的面形结果,图 9 为使用修正后的去除函数进行一次修形抛光后的面形结果. 两次修形抛光实验的目标收敛率均被设定为 80%,意味着经修形抛光后,面形误差  $\Delta d$  的均方根 (root mean square, RMS)  $\Delta d^{\text{RMS}}$  需减少 80% 及以上.

面形收敛效率和面形收敛速率可分别通过式(9)和(10)计算.

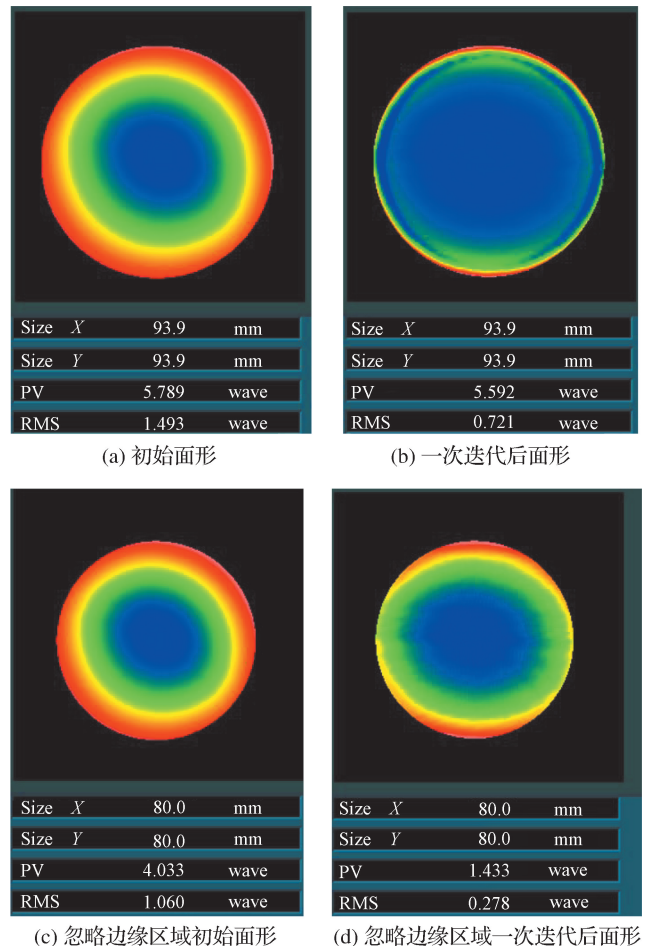


图 8 原始去除函数抛光结果

Fig. 8 Polishing results of original removal function

$$\eta = \frac{\Delta d_i^{\text{RMS}} - \Delta d_{i+1}^{\text{RMS}}}{\Delta d_i^{\text{RMS}}}, \quad (9)$$

式中,  $\eta$  表示面形收敛效率,  $\Delta d_i^{\text{RMS}}$  代表第  $i$  次加工后的面形误差  $\Delta d_i$  的 RMS 值.

$$V_{i+1} = \frac{\Delta d_i^{\text{RMS}} - \Delta d_{i+1}^{\text{RMS}}}{t_{i+1}}, \quad (10)$$

式中,  $V_{i+1}$  代表第  $i+1$  次抛光的面形收敛速率,  $t_{i+1}$  为第  $i+1$  次加工所用的时间.

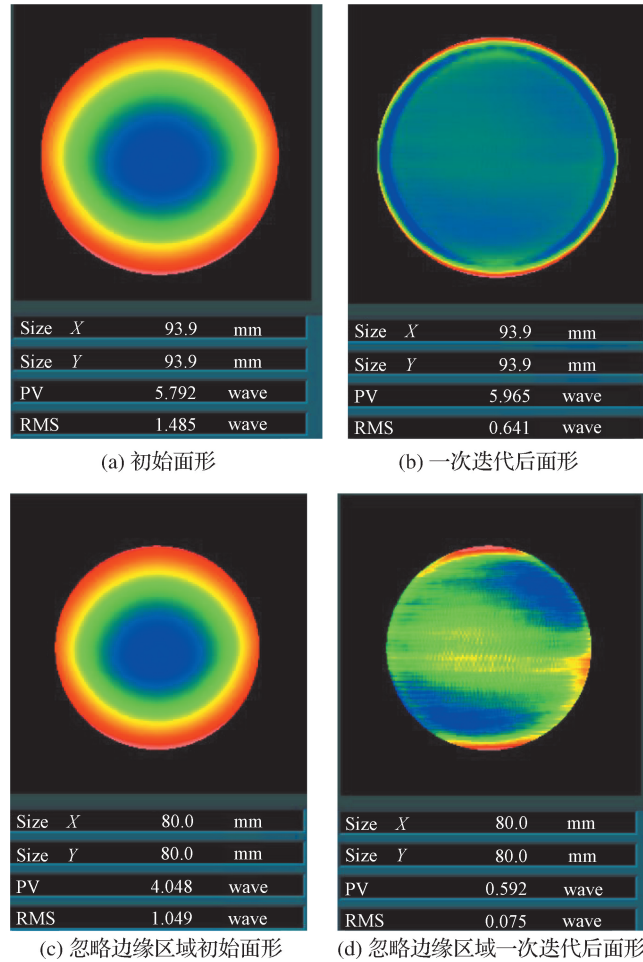


图 9 修正后去除函数抛光结果

Fig. 9 Polishing results of corrected removal function

采用原始去除函数的四步离散抛光总用时为 20 min, 而采用修正后去除函数加工时间为 22 min. 这是因为定点抛光误差使原始去除函数的效率被高估, 导致整体的驻留时间偏短. 此外, 由于气囊抛光技术存在边缘效应, 两次实验的全口径面形 PV (Peak-to-Valley, PV) 未发生明显变化. 当忽略边缘仅分析 80 mm 口径区域时, 采用原始去除函数进行一次修形抛光后, PV 与 RMS 值均有显著改善, 其中 PV 由 2 559.04 nm 收敛至 906.80 nm, RMS 由 670.77 nm 收敛至 175.92 nm, 面形收敛率达到 73.77%, 收敛速

率达到 24.74 nm/min. 其中面形收敛率未满足预期指标的主要原因在于原始去除函数的去除效率被高估. 当使用原始去除函数进行反卷积运算时, 得到的驻留时间偏短, 导致实际的材料去除量偏小, 从而降低了面形收敛效率.

同理, 当忽略边缘仅分析 80 mm 口径区域时, 采用修正后的去除函数进行一次修形抛光后, PV 从初始的 2 556.51 nm 减少至 374.62 nm, RMS 从 663.81 nm 减少至 47.46 nm, 收敛速率为 28.02 nm/min, 面形收敛率高达 92.85%, 超出预期的收敛指标. 表 3 展示了采用原始和修正后的去除函数进行一次修正抛光后的对比结果, 该结果突显了修正去除函数在提高抛光效率和精度方面的意义和改进采集去除函数方法的有效性.

表 3 不同去除函数的 80 mm 口径抛光性能对比

Tab. 3 Polishing performance comparison of 80 mm aperture with different removal function

评价指标	原始去除函数	修正后去除函数
PV/nm	906.80	374.62
RMS/nm	175.92	47.46
收敛速率/(nm · min <sup>-1</sup> )	24.74	28.02
收敛率/%	73.77	92.85

## 5 结 论

本研究将定点抛光过程划分为 5 个阶段, 并指出气囊工具头从接触工件表面至达到指定下压位置及其逆过程, 会引入去除量误差; 该去除量分布误差使实际采集的去除函数的效率被高估, 减少了各驻留点的驻留时间, 降低了面形收敛率与面形精度; 虽然该去除量误差对去除函数的影响较小, 但由于去除函数直径远大于驻留点之间的距离, 导致去除函数同时作用于多个点, 且对一个点作用多次, 放大了该误差. 针对这一问题, 本研究提出在获取去除函数时, 增加采集驻留时间为 0 的去除量, 将非 0 驻留时间采集到的去除量与之相减, 得到更准确性的去除函数, 该方法获取的去除函数可以显著降低该误差的干扰, 提高加工精度与面形收敛效率.

## 参考文献:

[1] 戴一帆, 彭小强, 薛帅, 等. 高性能光学制造[J]. 机械工程

- 学报,2023,59(21):1-14.
- [2] 王振忠,施晨淳,张鹏飞,等. 先进光学制造技术最新进展[J]. 机械工程学报,2021,57(8):23-56.
- [3] 中国机械工程学会. 中国机械工程技术路线图[M]. 北京:机械工业出版社,2022.
- [4] PAN R, ZHONG B, WANG Z Z, et al. Influencing mechanism of the key parameters during bonnet polishing process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2018,94(1):643-653.
- [5] HUANG X P, WANG Z Z, LI L C, et al. Research on the modification of the tool influence function for robotic bonnet polishing with stiffness modeling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2024,86:12674.
- [6] ZHONG B, WANG C J, CHEN X H, et al. Time-varying tool influence function model of bonnet polishing for aspheric surfaces[J]. Applied Optics,2019,58(4):1101-1109.
- [7] PAN R, ZHU X X, WANG Z Z, et al. Modification of tool influence function for bonnet polishing tool based on analysis of interfacial contact state [J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2022,36(6):2825-2836.
- [8] PAN R, ZHONG B, CHEN D J, et al. Modification of tool influence function of bonnet polishing based on interfacial friction coefficient[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2018,124:43-52.
- [9] WALKER D D, BEAUCAMP A T, DOUBROVSKI V, et al. New results extending the precessions process to smoothing ground a spheres and producing freeform parts [J]. International Society for Optical Engineering,2005,5869:79-87.
- [10] WALKER D D, BEAUCAMP A T, BROOKS D, et al. Recent development of precessions polishing for larger components and free-form surfaces [J]. Current Developments in Lens Design and Optical Engineering V,2004,5523:281-289.
- [11] LI H Y, WALKER D, ZHENG X, et al. Advanced techniques for robotic polishing of aluminum mirrors [J]. Optical Fabrication, Testing, and Metrology VI,2018,10692:2311625.
- [12] PAN R, ZHU X X, WANG Z Z, et al. Modification of tool influence function for bonnet polishing tool based on analysis of interfacial contact state [J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2022,36(6):2825-2836.
- [13] WANG C J, YANG X, ZHONG B, et al. Effect of the inflated-pressure to the tool influence function for polishing using SR bonnet [C] // International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies. Harbin: AOMATT,2014:26-29.
- [14] WANG C J, WANG Z Z, YANG X, et al. Modeling of the static tool influence function of bonnet polishing based on FEA [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2014,74(1):341-349.
- [15] CHANG H L, LIN Y C, HUANG W J, et al. Modeling the influence function on a fused silica surface for CNC bonnet polishing process[J]. Photonic Instrumentation Engineering VIII,2022,11287:112871F.
- [16] FENG Y P, WU H Y, CHENG H B. Tool removal function modeling and processing parameters optimization for bonnet polishing[J]. International Journal of Optomechatronics,2016,10(3/4):141-153.
- [17] PRESTON F W. The theory and design of plate glass polishing machines[J]. J Soc Glass Tech,1927(9):214-256.
- [18] 王春锦. 大口径光学元件的半柔性气囊高效抛光技术研究[D]. 厦门:厦门大学,2015.
- [19] KIM D W, KIM S W. Static tool influence function for fabrication simulation of hexagonal mirror segments for extremely large telescopes[J]. Optics Express,2005,13(3):119-126.

(责任编辑:任滢滢)