

高解耦性能振动辅助抛光装置的开发与测试*

许兴旺, 谷 岩, 郭桌一, 刘亚梅, 陈宏宇

(长春工业大学吉林省高性能制造及检测国际科技合作重点实验室 长春, 130000)

摘要 针对抛光过程中存在的加工效率低、表面质量差等问题,基于柔性机构理论开发了一种高解耦性能的振动辅助抛光装置,并设计复合控制系统提高其跟踪精度。基于柔度矩阵法,建立了振动辅助抛光装置的理论模型,通过有限元分析法,对振动辅助抛光装置的性能进行分析。性能测试实验结果表明,振动辅助抛光装置的固有频率为 1 593 Hz, x 方向和 y 方向的耦合误差率为 2.5% 和 2.8%。建立系统的迟滞模型,并通过最小二乘法对测试数据进行拟合,误差为 2.98%。控制系统测试实验表明,与比例-积分-微分(proportion-integral-derivative,简称 PID)控制相比,复合控制下振动辅助抛光装置的轨迹跟踪误差降低 0.43 μm 和 0.38 μm ,验证了复合控制的有效性。抛光实验结果表明,复合控制条件下对无压烧结碳化硅陶瓷抛光后的表面粗糙度比抛光前降低了 11 nm。

关键词 振动辅助抛光装置;柔性机构理论;模态仿真;复合控制

中图分类号 TH161

引 言

作为制造业产业链的最顶端,精密制造通过加工碳化硅等难加工材料,为制造业提供了关键的零部件,并广泛用于国防工业领域和民生领域^[1]。其中,抛光是实现难加工材料表面光整化的最后一道工序。传统抛光工艺在对难加工材料的表面进行抛光时存在诸多局限性,严重限制了优秀材料的应用^[2]。

为了解决上述问题,学者们从改良抛光方法的角度出发,以求进一步提高抛光质量。其中,将振动与传统抛光相结合而诞生的振动辅助抛光方法是具有代表性的一种新型抛光方法。Tian 等^[3]提出了一种空间柔性机构设计概念,将 3 种典型的运动放大机构与 2 组胡克节点进行排列,实现了一种独特的折叠操作,降低了装置的空间尺寸,测试结果显示装置的运动分辨率为 5 nm。Zhang 等^[4]结合嵌套结构、多层结构和对称结构,设计了一个纯旋转微定位平台,同时获得了较大的旋转角度和较高的分辨率。以上研究表明,振动辅助装置对改善材料表面质量具有重要作用,然而要进一步提高抛光效果,行之有效的方法之一是提高振动辅助抛光装置的运动精度^[5]。

由于压电陶瓷驱动器具有尺寸小、精度高和响应快等优点,因此被振动辅助抛光装置作为动力源,然而其固有的迟滞特性严重影响了装置的运动精度。为了抑制迟滞非线性,Wu 等^[6]开发了一种单层

结构且无冗余的压电中心旋转平台,应用 Prandtl-Ishlinskii(简称 PI)模型抑制其迟滞非线性,迟滞由 9.0% 和 14.4% 降低到 1.3% 和 1.5%,取得了良好效果。Li 等^[7]研制了一种快速伺服刀具并设计了控制系统,引入控制系统加工后的工件表面高度曲线明显降低,误差在 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 以内,验证了控制系统的有效性。以上研究成果表明,控制系统能够有效提高装置性能,进而提高加工的效果。

为了满足振动辅助抛光装置(简称装置)的设计需求,笔者采用柔度矩阵法设计了一种高解耦性能的振动辅助抛光装置。通过有限元仿真、性能测试进行验证,并设计复合控制系统提高装置的轨迹跟踪精度,最终进行抛光实验。结果表明,所设计的装置和控制系统可以满足实际加工需求。

1 装置的设计与计算

1.1 装置的结构设计

图 1 为振动辅助抛光装置的结构示意图。压电陶瓷驱动器(piezoelectric ceramic actuator,简称 PEA)用预紧螺栓固定在装置的凹槽中,装置结构参数如表 1 所示。由于直圆型柔性铰链漂移小,直角型柔性铰链柔度更大^[8],因此采用 2 种柔性铰链相结合的方式设计振动辅助抛光装置。

* 吉林省科技发展计划资助项目(20220201025GX)

收稿日期:2023-06-02;修回日期:2023-08-14

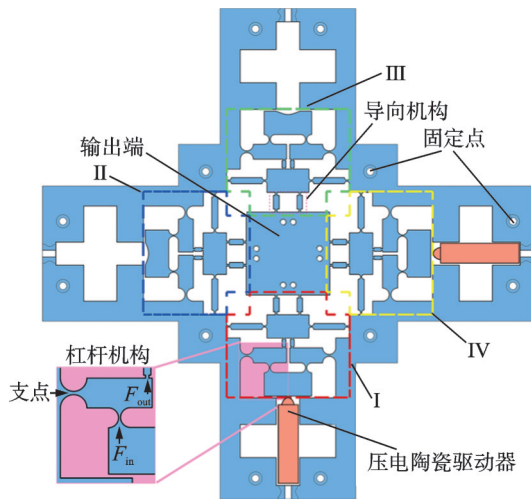


图1 振动辅助抛光装置的结构示意图
Fig.1 Structural schematic diagram of vibration-assisted polishing device

表1 装置结构参数

柔性铰链类型	长/mm	宽/mm	高/mm	半径/mm
直角型	1.9	13	0.6	—
直圆型	—	13	0.6	1.5

图2为振动辅助抛光装置机构简图。将一级杠杆放大机构与平行杆串联并对称布置。在保证装置具有较大输出位移、较高结构刚度和较小耦合运动等优点的同时,也克服了输出端运动轨迹线性度差的缺点。

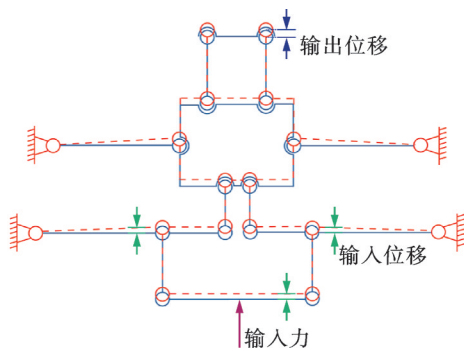


图2 振动辅助抛光装置机构简图
Fig.2 Schematic diagram of vibration-assisted polishing device mechanism

1.2 装置的计算

由于装置完全对称,因此将其划分成I、II、III、IV 4个区域(如图1所示)。对其中一部分特性进行分析,根据串并联关系得到整体的静动态性能。直角型柔性铰链和直圆型柔性铰链的柔度矩阵分别采用长春光机所^[9]和江西理工大学^[10]的计算方式。

装置整体的柔度矩阵需要坐标变换,局部坐标

系到全局坐标系的转换方式为

$$C_i^j = T_i^j C_i (T_i^j)^T \quad (1)$$

其中: i 表示坐标系 O_i ; j 表示坐标系 O_j ; C_i^j 表示转换的柔度矩阵; T_i^j 为变换矩阵。

$$T_i^j = \begin{bmatrix} R_i^j & S(r_i^j)R_i^j \\ 0 & R_i^j \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: R_i^j 为局部坐标系和全局坐标系间的旋转变换矩阵; r_i^j 为坐标平移向量; $S(r_i^j)$ 为平移向量的反对称算子。

在计算装置的输出刚度时,先计算 C_i^{out} ,再根据4部分的并联关系得到 $C_{\text{II}}^{\text{out}}$ 、 $C_{\text{III}}^{\text{out}}$ 和 $C_{\text{IV}}^{\text{out}}$ 。因此,装置的输出柔度为

$$C_{\text{entire}}^{\text{out}} = \left[(C_{\text{I}}^{\text{out}})^{-1} + (C_{\text{II}}^{\text{out}})^{-1} + (C_{\text{III}}^{\text{out}})^{-1} + (C_{\text{IV}}^{\text{out}})^{-1} \right]^{-1} \quad (3)$$

装置的输出刚度为

$$K_{\text{entire}}^{\text{out}} = (C_{\text{entire}}^{\text{out}})^{-1} \quad (4)$$

图3为输出刚度坐标示意图。根据图3计算区域I的输出柔度 $C_{\text{I}}^{\text{out}}$ 。

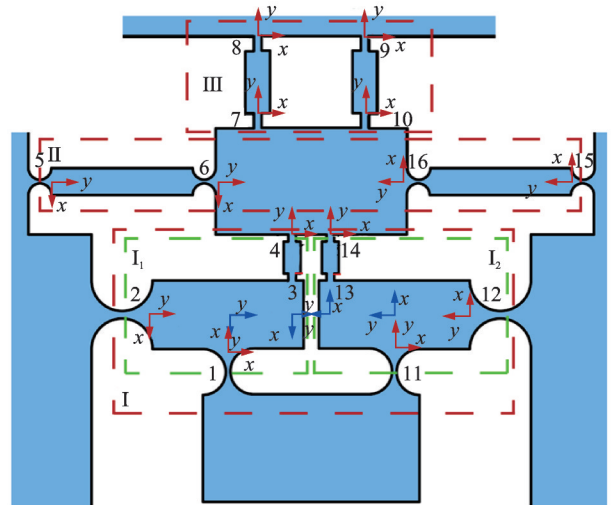


图3 输出刚度坐标示意图
Fig.3 Schematic diagram of output stiffness coordinates

由图3可知,铰链1和2并联,铰链3和4串联,将2部分的串并联结果进行串联,可得到 I_1 部分的输出柔度为

$$C_{I_1} = \left[(C_1)^{-1} + (C_2)^{-1} \right]^{-1} + [(C_3) + (C_4)] \quad (5)$$

由于 I_2 部分和 I_1 部分完全对称,因此 I_2 部分的输出柔度为

$$C_{I_2} = \left[(C_{11})^{-1} + (C_{12})^{-1} \right]^{-1} + [(C_{13}) + (C_{14})] \quad (6)$$

由于 I_1 部分和 I_2 部分为并联关系,因此I部分的输出柔度为

$$C_I = \left[(C_{I_1})^{-1} + (C_{I_2})^{-1} \right]^{-1} \quad (7)$$

铰链5和6串联,同理铰链15和16串联,将2部分串并联结果进行并联,得到II部分的输出柔度为

$$C_{II} = \left[(C_5 + C_6)^{-1} + (C_{15} + C_{16})^{-1} \right]^{-1} \quad (8)$$

铰链7和8串联,同理铰链9和10串联,将2部分串并联结果进行并联,得到III部分的输出柔度为

$$C_{III} = \left[(C_7 + C_8)^{-1} + (C_9 + C_{10})^{-1} \right]^{-1} \quad (9)$$

整个区域I内,I、II和III部分并联,因此区域I输出的柔度为

$$C_I^{\text{out}} = \left[(C_I)^{-1} + (C_{II})^{-1} + (C_{III})^{-1} \right]^{-1} \quad (10)$$

经过计算,装置的输出刚度为19.36 N/μm。

装置的输入刚度与输出刚度计算原理相同,因此装置的输入柔度为

$$C_{\text{entire}}^{\text{in}} = C_I^{\text{in}} + \left[(C_{II}^{\text{in}})^{-1} + (C_{III}^{\text{in}})^{-1} + (C_{IV}^{\text{in}})^{-1} \right]^{-1} \quad (11)$$

输入刚度表示为

$$K_{\text{entire}}^{\text{in}} = (C_{\text{entire}}^{\text{in}})^{-1} \quad (12)$$

图4为输入刚度坐标示意图。根据图4计算区域I的输入柔度 C_I^{in} 。

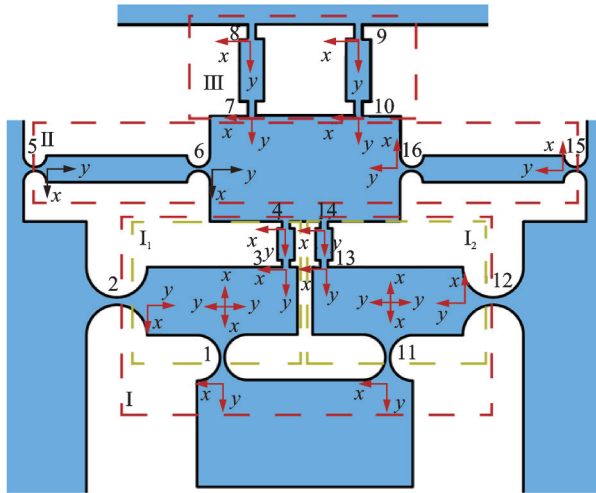


图4 输入刚度坐标示意图

Fig.4 Schematic diagram of input stiffness coordinates

由于装置完全对称,输入刚度坐标示意图中柔性铰链串并联关系仍满足式(5)~(9),因此区域I的输入柔度为

$$C_I^{\text{in}} = \left[(C_I)^{-1} + (C_{II})^{-1} + (C_{III})^{-1} \right]^{-1} \quad (13)$$

经过计算,装置的输入刚度为21.33 N/μm。根据输入刚度和输出刚度的比值可以计算出装置的放大比 λ 为1.102。此外,固有频率的计算采用拉格朗日方程法^[11],得到装置的固有频率为1 608 Hz。

2 装置的有限元仿真及性能测试

2.1 装置的有限元仿真

对装置施加43 μm的驱动位移并通过软件ABAQUS对其最大应力进行仿真,最大应力仿真如图5所示。在安全系数为1.5时装置的最大应力不超过111.7 MPa,小于合金材料Al7075-T6的允许应力505 MPa。可见,装置能够承受振动过程中带来的交变应力,满足设计需求。

输入刚度和输出刚度仿真如图6所示。装置的输入刚度和输出刚度分别为22.32 N/μm和13.10 N/μm。

模态分布如图7所示。装置的前2阶模态分别为1 538.6 Hz和1 544.2 Hz。

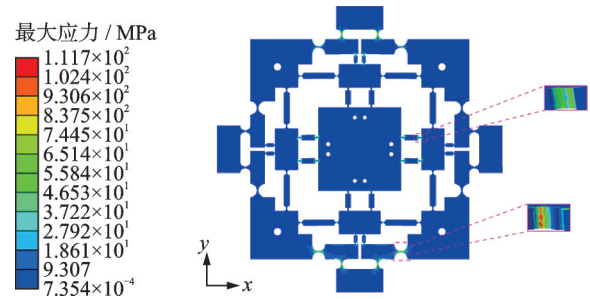


图5 最大应力仿真

Fig.5 Simulation of maximum stress

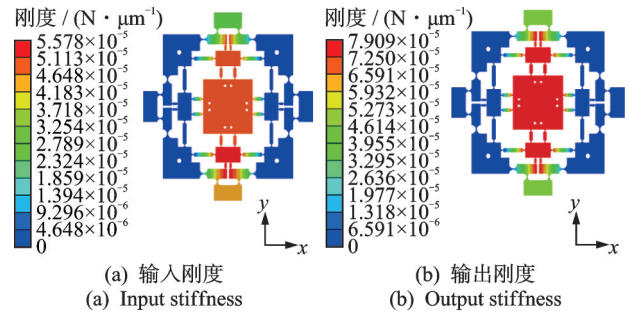


图6 输入刚度和输出刚度仿真

Fig.6 Simulation of input stiffness and output stiffness

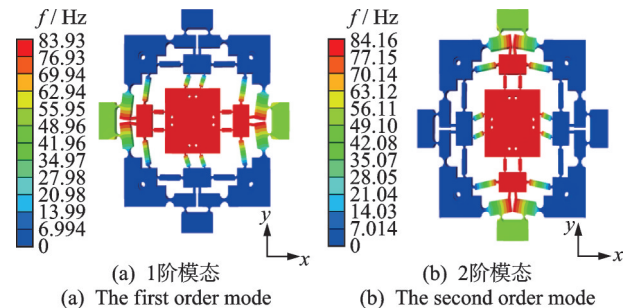


图7 模态分布

Fig.7 Modal distribution diagram

2.2 装置的性能测试

装置性能测试系统如图 8 所示。由振动辅助抛光装置、PEA、PMAC 控制卡、功率放大器和位移传感器组成。由上位机设定发射并经过功率放大器放大后的激励信号驱动 PEA 产生位移,位移信号由传感器实时采集并最终通过 PMAC 反馈到上位机。

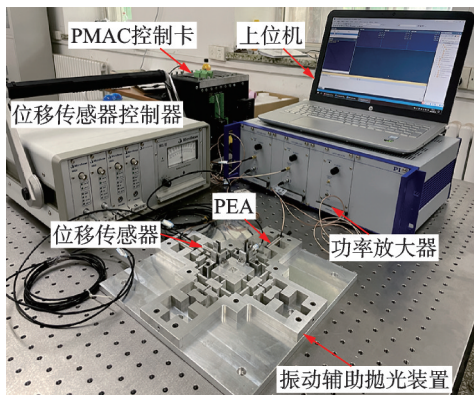


图 8 装置性能测试系统

Fig.8 The performance test system of device

图 9 为耦合误差示意图。图 9(a)和(b)分别为 x 方向对 y 方向和 y 方向对 x 方向的干扰,对装置施加频率为 0.5 Hz、幅值为 4 V 的正弦激励信号,耦合误差率分别为 2.5% 和 2.8%,说明采用完全对称的设计可以有效降低装置的耦合误差。

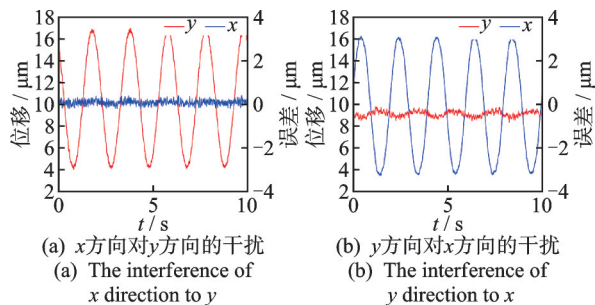


图 9 耦合误差示意图

Fig.9 Coupling error diagram

图 10 为固有频率示意图。图 10(a)和(b)分别为装置 x 方向和 y 方向的固有频率,其中: x 方向的固有频率为 1 593 Hz, y 方向的固有频率为 1 602 Hz,与有限元结果基本吻合。实验结果表明装置具有较大的工作带宽。

图 11 为迟滞曲线。如图 11(a)所示, x 方向的迟滞曲线其上升曲线和下降曲线间的误差为 $5.417 \mu\text{m}$ 。如图 11(b)所示, y 方向的迟滞曲线其上升曲线和下降曲线间的误差为 $5.506 \mu\text{m}$ 。在后续的工作中将根据迟滞特性 PI 模型设计前馈控制器,进一步提高装置的运动精度。

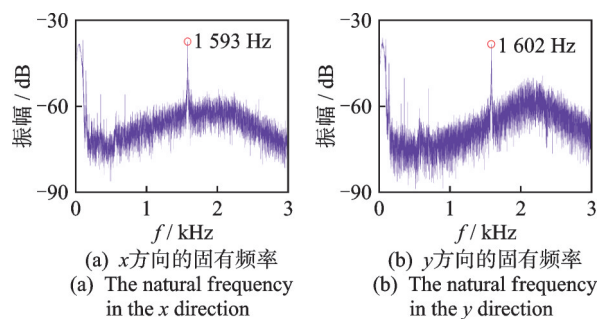


图 10 固有频率示意图

Fig.10 Natural frequency diagram

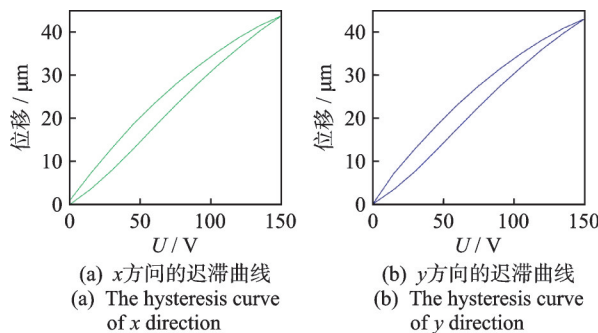


图 11 迟滞曲线

Fig.11 Hysteresis curve

3 控制系统的设计与测试

3.1 控制系统设计

PID 控制器作为经典控制器,可以实现对装置的反馈控制。控制律为

$$u(t) = K_P \text{Error}(t) + K_I \int_0^t \text{Error}(t) dt + K_D \frac{d[\text{Error}(t)]}{dt} \quad (14)$$

PI 模型由 Backlash 算子加权叠加而成,单个 Backlash 算子的计算公式为

$$y(t_i) = \max \{ u(t_i) - r, \min \{ u(t_i) + r, y(t_{i-1}) \} \} \quad (15)$$

其中: $y(t)$ 为 t_i 时刻算子的输出; $u(t)$ 为 t_i 时刻算子的输入。

算子输出的精度主要通过阈值 r_i 确定,即

$$r_i = \frac{i}{n} \max |u(t_i)| \quad (16)$$

其中: $i=0,1,\dots,n-1$; n 为算子的个数。

确定合理的算子数后,根据每个算子的权值叠加迟滞模型,即

$$Y(t) = w \left\{ \max \left\{ u(t_i) - r_i, \min \left[u(t_i) + r_i, y(t_{i-1}) \right] \right\} \right\}_i \quad (17)$$

其中: w_i 为每个算子的权值。

逆模型的表达式为

$$Y'(t)=w'\left\{\max\left\{u(t_i)-r'_i,\min\left[u(t_i)+r'_i,y(t_{i-1})\right]\right\}\right\}_i$$

(18)

采用递归最小二乘法拟合 PI 模型中算子的权值,图 12 为迟滞拟合曲线。表 2 为 PI 模型辨识结果。拟合曲线与实验曲线高度重合,拟合曲线误差为 2.98%,表明此模型可以较为准确地描述装置的迟滞特性。

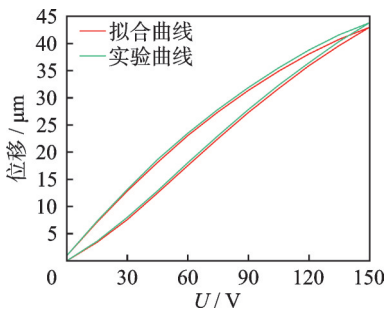


图 12 迟滞拟合曲线
Fig.12 Hysteresis fitting curve

表 2 PI 模型辨识结果

Tab.2 PI model identification results

i	w_i	r_i	w'_i	r'_i	i	w_i	r_i	w'_i	r'_i
1	0.23	0	4.37	0	7	0.6	90	0.04	27.26
2	-7.91	15	0.16	3.43	8	0.16	105	0.01	31.65
3	6.37	30	-1.02	6.74	9	0.49	120	0.03	35.84
4	5.44	45	-0.56	11.00	10	-1.17	135	-0.08	39.57
5	4.98	60	-0.38	16.09	11	0	150	0	44.72
6	0.24	75	0.02	21.92					

w_i 和 w'_i 分别为 PI 正模型和逆模型的权值; r_i 和 r'_i 分别为 PI 正模型和逆模型的阈值

然而,单独引入 PID 反馈控制难以实现系统的线性化,同样单独引入前馈控制也不能消除系统的静态误差。因此,将 PID 反馈控制和基于 PI 模型的前馈控制相结合实现对装置的复合控制是十分必要的。图 13 为复合控制原理图,控制律为

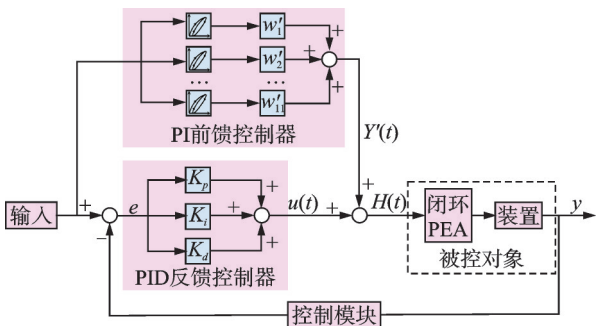


图 13 复合控制原理图
Fig.13 Composite control schematic diagram

$$H(t)=Y'(t)+u(t)$$

(19)

3.2 控制系统测试实验

为了验证控制系统的可靠性,搭建装置控制实验平台进行实验验证。控制系统测试实验设置如图 14 所示。装置固定在气浮平台上,闭环 PEA 通过螺栓固定在装置上,功率放大器集成了闭环控制模块,通过 LabVIEW 开发控制程序,实现信号的发射和采集。此外,功率放大器支持连接示波器,可以查看实时反馈曲线。

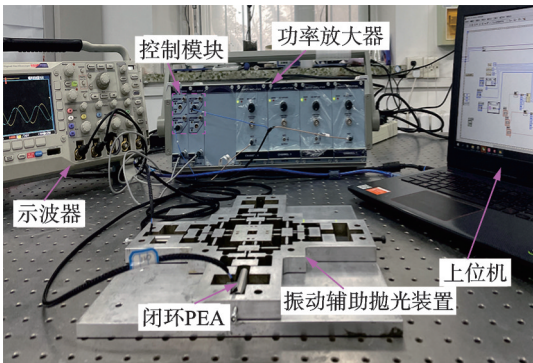
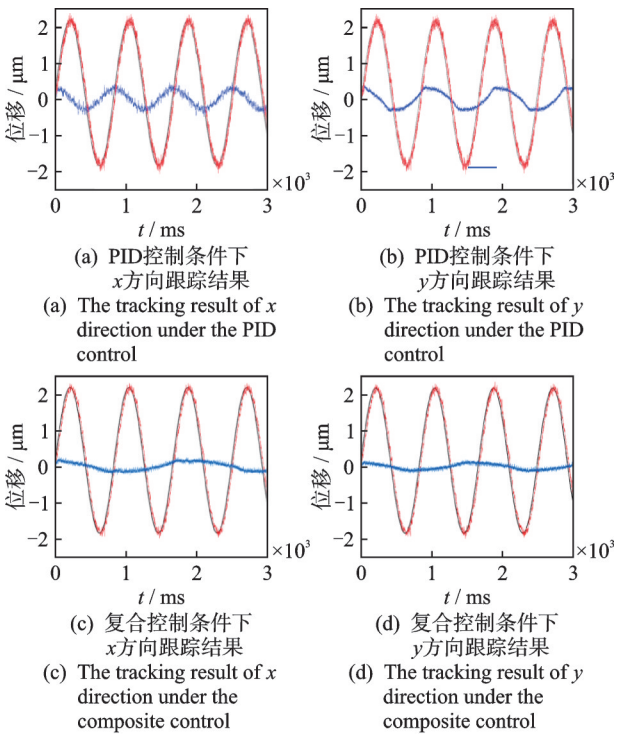


图 14 控制系统测试实验设置
Fig.14 Control system test experiment setup diagram

分别施加频率和振幅相同的正弦信号,对比 PID 控制和复合控制对装置运动轨迹的影响。图 15 为不同控制条件下的测试结果。图 15(a)和(b)分别为



— 指令位置; — 实际位置; — 误差
图 15 不同控制条件下的测试结果

Fig.15 Test results under different control conditions

PID 控制下 x 方向和 y 方向的正弦轨迹跟踪结果,其轨迹跟踪误差分别为 $0.6\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.52\text{ }\mu\text{m}$ 。图 15(c)、(d) 分别为复合控制下 x 方向和 y 方向的正弦轨迹跟踪结果,其轨迹跟踪误差分别为 $0.17\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.14\text{ }\mu\text{m}$ 。复合控制误差较小,验证了复合控制的有效性。

4 抛光实验

为了验证设计装置和控制系统的有效性,对无压烧结碳化硅陶瓷(简称碳化硅陶瓷)进行抛光实验,实验设置如图 16 所示。PEA 被固定在装置的 x 方向和 y 方向,通过上位机产生激励信号驱动 PEA,在输出端产生振动。将碳化硅陶瓷和夹具用石蜡固定并通过螺栓固定在装置的输出端。抛光时碳化硅陶瓷浸没在抛光液中,通过主轴高速旋转实现抛光工艺。

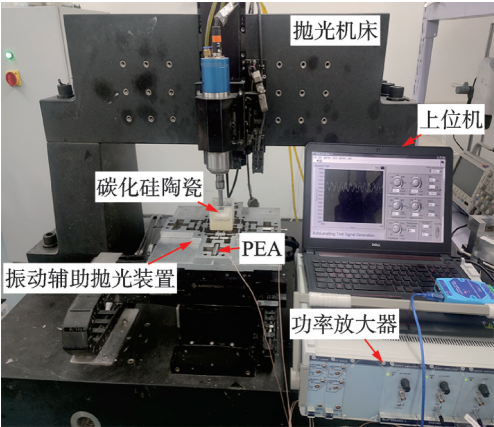


图 16 抛光实验设置

Fig.16 The experimental setting of polishing

图 17 为无振动且无控制条件下的抛光结果。如图 17(a) 所示,碳化硅陶瓷的初始表面粗糙度 $S_a=20\text{ nm}$,初始表面粗糙度的标准差 $S_q=24\text{ nm}$ 。表 3 为不同条件下的抛光结果。由图 17(b) 和表 3 可知,碳化硅陶瓷抛光后的表面粗糙度 $S_a=18\text{ nm}$,表面粗糙度的标准差 $S_q=27\text{ nm}$,与初始相比 S_a 减小 2 nm ,但

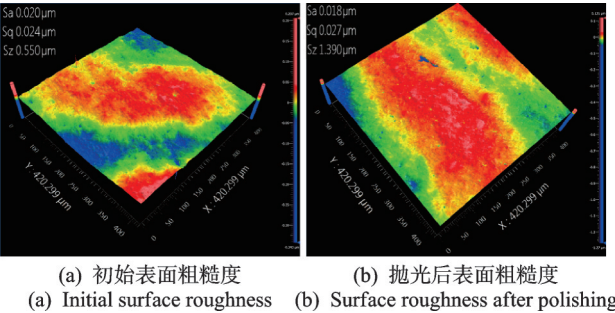


图 17 无振动且无控制条件下的抛光结果

Fig.17 Polishing results under the without vibration and uncontrolled conditions

表 3 不同条件下的抛光结果						
Tab.3 Polishing results under different conditions						
抛光条件	f/Hz	振幅/ μm	初始 S_a/nm	抛光后 S_a/nm	初始 S_q/nm	抛光后 S_q/nm
无振动无控制	50	4	20	18	24	27
有振动无控制	50	4	21	15	26	19
有振动有控制	50	4	21	10	28	13

S_q 增大了 3 nm 。 S_q 增大主要是由于无振动参与时,抛光液中磨粒分散性较差导致抛光不均匀,进一步降低了材料表面粗糙度的标准差。

图 18 为有振动但无控制条件下的抛光结果。如图 18(a) 所示,碳化硅陶瓷的初始表面粗糙度 $S_a=21\text{ nm}$,初始表面粗糙度的标准差 $S_q=26\text{ nm}$ 。当施加频率为 50 Hz 、振幅为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的正弦信号时,抛光结果如图 18(b) 和表 3 所示。碳化硅陶瓷抛光后的表面粗糙度 $S_a=15\text{ nm}$,表面粗糙度标准差 $S_q=19\text{ nm}$ 。与抛光前相比, S_a 和 S_q 分别减小 6 nm 和 7 nm ,并且与无振动且无控制条件下的抛光结果相比, S_a 和 S_q 都有所降低。这是由于振动的引入使得抛光液中磨粒分布均匀,团聚现象有所缓解,提高了抛光的均匀性,从而进一步提高了材料的表面质量。

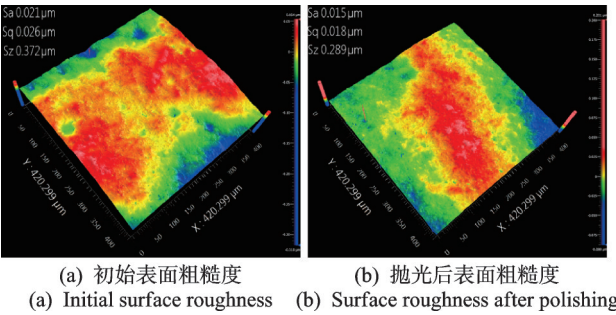
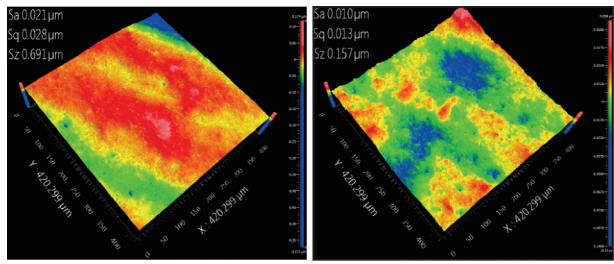


图 18 有振动但无控制条件下的抛光结果

Fig.18 Polishing results with vibration but without control

图 19 为振动和复合控制条件下的抛光结果。如图 19(a) 所示,碳化硅陶瓷的初始表面粗糙度 $S_a=21\text{ nm}$,初始表面粗糙度的标准差 $S_q=28\text{ nm}$ 。当施加频率为 50 Hz 、振幅为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的正弦信号时,在复合控制条件下对碳化硅陶瓷进行抛光,抛光结果如图 19(b) 和表 3 所示。碳化硅陶瓷抛光后的表面粗糙度 $S_a=10\text{ nm}$,表面粗糙度标准差 $S_q=13\text{ nm}$ 。与抛光前相比, S_a 和 S_q 分别减小 11 nm 和 15 nm ,并且 S_a 和 S_q 与前 2 组相比明显减小。这主要是因为复合控制在补偿装置迟滞效应的同时减小了静态误差,提高了装置的轨迹跟踪精度,降低了输出信号和输入



(a) 初始表面粗糙度 (b) 抛光后表面粗糙度
(a) Initial surface roughness (b) Surface roughness after polishing

图19 振动和复合控制条件下的抛光结果

Fig.19 Polishing results under the vibration and compound control conditions

信号之间的偏差,提高了抛光的均匀性,从而进一步提高了材料的表面质量。

5 结 论

1) 开发了一种高解耦性能的振动辅助抛光装置。基于柔度矩阵法对装置的输入刚度和输出刚度进行计算,采用拉格朗日方程法计算装置的固有频率。

2) 分析并测试了装置的性能。利用ABAQUS软件分析了装置的输入刚度、输出刚度、最大应力以及固有频率,验证理论模型的准确性。性能测试实验表明,装置的耦合误差较小,固有频率为1 593 Hz,迟滞曲线中上升曲线和下降曲线间的误差分别为5.417 μm 和5.506 μm 。

3) 与PID反馈控制相比,复合控制条件下装置的正弦轨迹跟踪误差分别降低0.43 μm 和0.38 μm ,验证了复合控制的有效性。

4) 当施加频率为50 Hz、振幅为4 μm 的正弦信号激励PEA时,复合控制条件下抛光后的碳化硅陶瓷表面粗糙度 S_a 与初始条件相比降低11 nm,表面粗糙度的标准差 S_q 较初始条件降低了15 nm,与无控制条件相比 S_a 和 S_q 都明显降低,验证了复合控制的有效性。

参 考 文 献

- [1] 王国伟. 现代机械制造工艺及精密加工技术研究[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(11): 167-169.
WANG Guowei. Research on modern mechanical manufacturing process and precision machining technology [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2022, 58(11): 167-169. (in Chinese)
- [2] FARWAHA H S, DEEPAK D, BRAR G S. Mathematical modeling and process parameters optimization of ultrasonic assisted electrochemical magnetic abrasive machining[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(12): 5063-5073.

- [3] TIAN Y L, LU K K, WANG F J, et al. A spatial deployable three-DOF compliant nano-positioner with a three-stage motion amplification mechanism[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(3): 1322-1334.
- [4] ZHANG J C, GAN J Q, DING H F, et al. Design of a pure rotation micropositioning stage with dual-range[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 169: 104631.
- [5] CHANG K M, CHENG J L, LIU Y T. Machining control of non-axisymmetric aspheric surface based on piezoelectric fast tool servo system [J]. Precision Engineering, 2022, 76: 160-172.
- [6] WU Y X, YANG Y L, LI G P, et al. A non-redundant piezoelectric center-rotation platform with a single-layer structure and a large working range [J]. Mechatronics, 2022, 88: 102911.
- [7] LI H C, TANG H, LI J D, et al. Design, fabrication, and testing of a 3-DOF piezo fast tool servo for microstructure machining [J]. Precision Engineering, 2021, 72: 756-768.
- [8] GU Y, KANG M S, LIN J Q, et al. Non-resonant vibration-assisted magnetorheological finishing[J]. Precision Engineering, 2021, 71: 263-281.
- [9] 于阳, 王学问, 徐振邦, 等. 基于柔性铰链的大口径望远镜并联调整机构[J]. 光学精密工程, 2023, 31(3): 352-362.
YU Yang, WANG Xuewen, XU Zhenbang, et al. Parallel adjustment mechanism for large aperture telescope based on flexible hinges[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(3): 352-362. (in Chinese)
- [10] WANG Q L, LONG Y P, WEI J M. Fatigue damage stiffness degradation modeling of right circular flexure hinges[J]. AIP Advances, 2023, 13(4): 045318.
- [11] LIAN J K, AN D W, CHEN M Y, et al. Design and feedforward control of a two-degree-of-freedom positioning stage with bidirectional piezoelectric drive[J]. Precision Engineering, 2023, 81: 158-166.



第一作者简介:许兴旺,男,1999年4月生,硕士生。主要研究方向为精密加工和微纳制造。曾发表《Investigation on enhanced machinability of SiC ceramics through photocatalytic vibration composite polishing》(《Langmuir》2024, Vol.40)等论文。

E-mail: xu18943120582@163.com

通信作者简介:谷岩,男,1980年5月生,博士、副教授。主要研究方向为精密加工和微纳制造。

E-mail: guyan@ccut.edu.cn