

基于压电迟滞模型的非共振椭圆振动切削装置控制研究*

栾博, 张臣, 霍建强, 甘晓明

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 根据所研制的一种典型结构的非共振椭圆振动切削(Elliptical Vibration Cutting, EVC)装置,考虑压电叠堆在非共振EVC装置表现出来的动态迟滞特点,对静态PI迟滞模型进行分段动态化权值处理,构建动态PI迟滞模型描述非共振EVC装置各轴向输入电压与输出位移的关系。通过对迟滞模型的求逆建立非共振EVC装置的前馈控制器,为进一步提高控制系统的精度与稳定性,引入PID反馈环节,用前馈逆控制器加PID反馈的复合控制方法控制非共振EVC装置各轴向输出指定频率、幅值的正弦位移,进而使其合成的椭圆振动轨迹运动频率、轴长和倾角满足需求,实现对非共振EVC装置的控制。试验结果表明,非共振EVC装置在复合控制下能够在频率100Hz以下输出振幅、倾角可调,且运动误差低于3.5%的椭圆振动轨迹。

关键词: 非共振椭圆振动切削装置;迟滞模型;椭圆轨迹;运动控制;复合控制

Research on Control of Non-Resonant Elliptical Vibration Cutting Device Based on Piezoelectric Hysteresis Model

LUAN Bo, ZHANG Chen, HUO Jianqiang, GAN Xiaoming

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] According to a typical structure of non-resonant elliptical vibration cutting (EVC) device, the dynamic hysteresis characteristics of piezoelectric stack in non-resonant EVC device are considered, the static PI hysteresis model is segmented into dynamic weights, and the dynamic PI hysteresis model is constructed to describe the relationship between the axial input voltage and the output displacement of the non-resonant EVC device. The feed-forward controller of the non-resonant EVC device is established by inversion of the hysteresis model, and in order to further improve the accuracy and stability of the control system, the PID feedback link is introduced and the feed-forward is used. The compound control method of inverse controller and PID feedback is used to control the sinusoidal displacement of the specified frequency and amplitude of each axial output of the non-resonant EVC device, so that the motion frequency, shaft length and inclination of the elliptical vibration track can meet the requirements, and the non-resonant EVC device can be controlled. The experimental results show that the non-resonant EVC device can output an elliptical vibration trajectory with an adjustable amplitude and dip angle below 100Hz under compound control, and the motion error is less than 3.5%.

Keywords: Non-resonant elliptical vibration cutting device; Hysteresis model; Elliptical trajectory; Motion control; Compound control

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.11.066

自20世纪90年代椭圆振动切削(Elliptical Vibration Cutting, EVC)被首次提出以来,国内外很多学者对EVC的装置设计、加工机理以及应用方面做了大量研究,发现这种加工方法具有减小切削力、延长刀

具寿命以及提高加工精度等特点^[1-3]。然而对于EVC装置控制方面,尚未有统一有效的措施,这也限制了EVC技术在高精密高适用性上的发展^[4]。目前,从众多学者所研制出来的EVC装置来看,根据其工作机理的不同可以分为共振EVC装置和非共振EVC装置,相应的其控制方法也可归为两类。其中共振EVC装置一般

* 基金项目: 国家自然科学基金(51675277)。

是通过压电陶瓷片激励换能器达到共振状态,以实现高频、大振幅椭圆轨迹输出,工作频率只能是装置的共振点;控制方面,共振 EVC 装置工作频率单一,一般以固定参数的椭圆振动形式进行输出,偶尔只是通过改变激励电压幅值来改变椭圆轴长,因此共振 EVC 装置难以输出精度高、形式灵活可调的椭圆轨迹,其控制系统简单,也鲜有学者在共振 EVC 装置的控制上有过研究^[5-6]。非共振 EVC 装置一般采用压电叠堆作为驱动器,利用压电叠堆大的位移输出直接驱动装置各轴向运动,以此在刀尖合成椭圆轨迹,工作频率取决于压电叠堆的允许范围,一般可以工作于几百赫兹下的任意频率点^[7]。由于非共振 EVC 装置不存在复杂的共振模态,通过直接控制装置各轴向压电叠堆的输出位移可灵活调整椭圆振动轨迹幅值、倾角等运动参数。目前对非共振 EVC 装置的控制研究大多采用“黑盒”处理,未考虑实际装置采用驱动器的输出特点,控制方法适用的工作参数范围小,且存在控制器设计复杂,当改变装置的驱动频率以及振幅时,控制器参数需要重新调整,适应性较差^[7-8]。为此,本文以一种典型结构的非共振 EVC 装置为研究对象,以压电迟滞模型表示装置各轴向位移与输入电压的关系,通过迟滞模型设计控制方法来实现装置各轴向输出位移的控制,进而对其合成的椭圆轨迹运动参数进行灵活调节与精密控制。

1 非共振 EVC 装置各轴向运动模型的建立

图 1 (a) 为自行研制的一种非共振 EVC 装置,图 1 (b) 为其工作原理图,根据装置上刀具相对机床主轴的位置进行坐标系定义,在 Y、Z 两轴上,两个压电叠堆通过螺栓预紧在固定槽中,当压电叠堆受电压激励时,分别驱动柔性铰链导向机构沿相应方向运动,使得硬质合金刀具在 Y、Z 轴方向上存在两个运动分量,当驱动器的输出位移为正弦运动形式且存在一相位差时,可以使刀具刀尖在 YOZ 平面上输出椭圆振动轨迹,固定于 Y、Z 轴向的位移传感器可以实时检测刀具分运动位移。

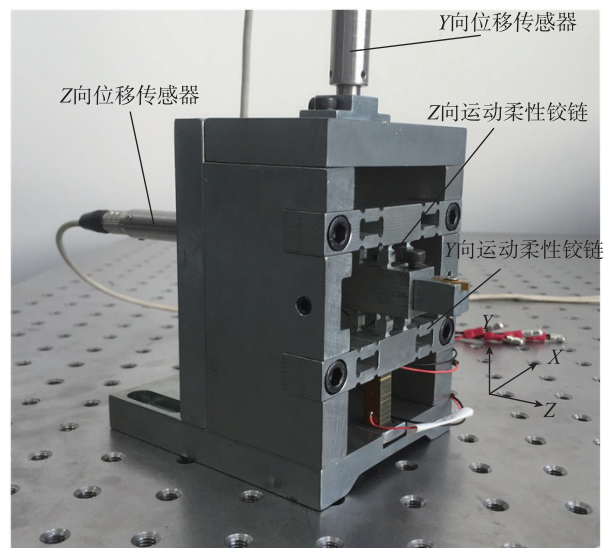
从非共振 EVC 装置的工作原理可知,非共振 EVC 装置单方向上的分运动为压电叠堆输入电压输出位移关系,这种电压-位移的非线性关系可以用压电迟滞模型来描述^[9-11],现今有多种迟滞模型用于压电叠堆应用领域中的建模与控制方法设计,其中,基于算子类的 PI 迟滞模型可以准确描述复杂迟滞现象,在控制器的设计中有广泛的应用^[12]。

1.1 PI 迟滞模型

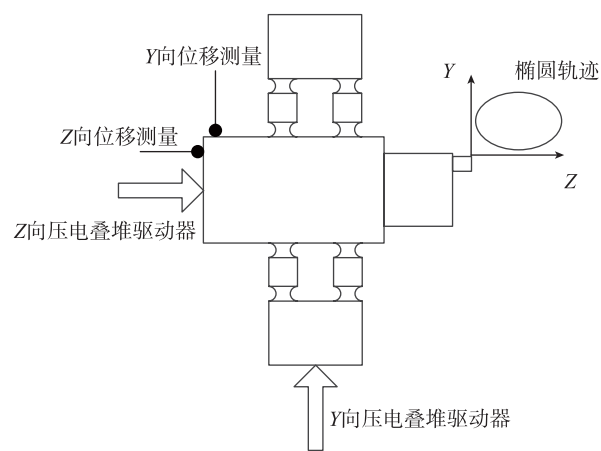
PI 迟滞模型可以看作是由不同阈值的 Play 算子加权叠加得到,Play 算子描述的输入与输出的关系如图 2 所示,数学表达式为:

$$\begin{cases} P_r[u](t) = \max\{u(t) - r, \min\{u(t) + r, P_r[u](t-T)\}\} \\ P_r[u](0) = \max\{u(0) - r, \min\{u(0) + r, y_0\}\} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $u(t)$ 是算子输入; $P_r[u](t)$ 是算子输出; r 是算子阈



(a) 非共振型椭圆振动切削装置实物图



(b) 工作原理图

图1 非共振型椭圆振动切削装置实物图与工作原理图

Fig.1 Physical map and working principle diagram of non-resonant elliptical vibration cutting device

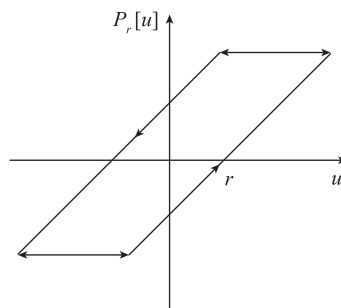


图2 Play迟滞算子

Fig.2 Play hysteresis operator

值; T 是算子更新周期; y_0 是算子初始状态, 一般取为 0。

将具有不同阈值的 Play 算子进行加权叠加, 得到 PI 迟滞模型的表达式:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i P_{r_i}[u](t) \quad (2)$$

式中, ω_i 是阈值为 r_i 的算子权值; n 是算子的数量。

实际上, 由式(2)构建的 PI 模型称作静态 PI 模型, 这是因为, 公式的输出结果与输入电压 $u(t)$ 的变化率无关。然而, 在实际的测试中可以发现, 当改变压电叠堆的输入电压频率时, 输出的迟滞环曲线形状会发生变化, 即表现出率相关特性(也即动态迟滞特性)。

本文根据研制的非共振 EVC 装置所使用的压电叠堆的工作参数: 最大限载电压 150V, 额定使用电压 120V。对非共振 EVC 装置 Y、Z 轴向压电叠堆输入 0~120V 的正弦偏置电压, 改变电压频率, 获得 Y 向、Z 向在不同频率下的迟滞环曲线(即电压-位移曲线), 如图 3 所示。

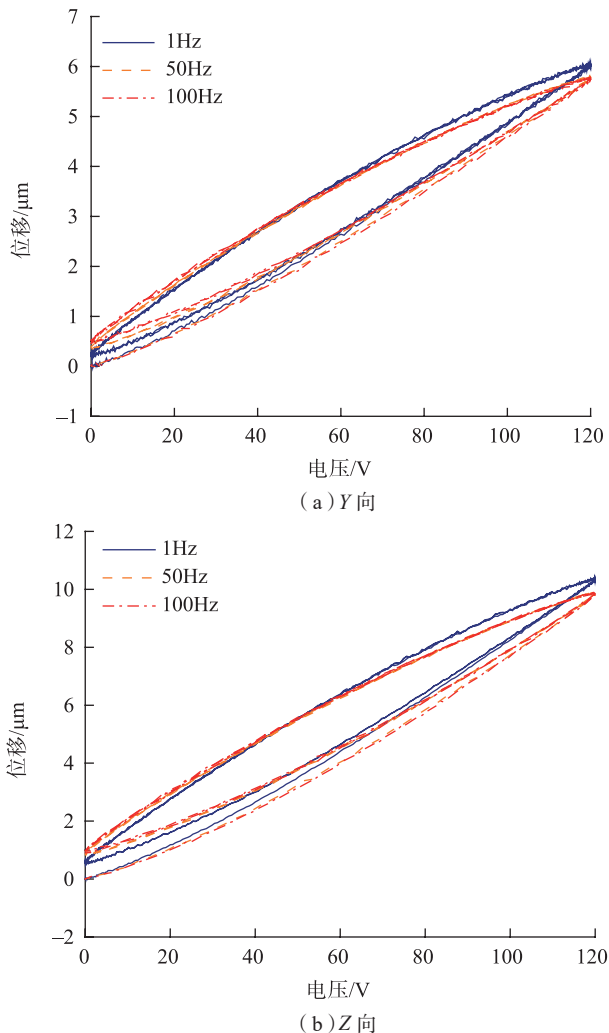


图3 非共振型EVC装置各轴向输出迟滞环曲线

Fig.3 Hysteresis loop curves of each axial output for non-resonant EVC devices

从图 3 中可以看出, 随着输入电压频率的增加, 各轴向输出位移的最大值减小, 输出位移在稳态时的最小值增大。尽管在不少文献^[10-11]中提出, 压电陶瓷材料的迟滞环曲线在输入电压频率增大时, 除了表现上述的两个特点外, 迟滞环曲线的宽度也会增大, 但是在实际使用环境中, 由压电陶瓷材料制成的压电叠堆表现出来的输出特性强弱程度会因工作情况(预紧力、负载刚度)以及驱动器本身制作材料、工艺的不同而有所差异^[11]。

因此为了使 PI 模型能刻画不同输入电压频率下压电叠堆的输出, 提高模型精度, 需要对静态 PI 模型进行率相关性改进^[12], 构建动态 PI 模型。

在率相关性改进方面, 文献[12]提出了以动态化阈值的 Play 算子与动态化权值加权叠加来描述率相关迟滞特性, 其中, 动态化阈值可以体现迟滞环宽度的变化特点, 动态化权值可以体现迟滞输出位移变化特点。但是, 根据非共振 EVC 装置各轴向迟滞环曲线随频率的变化特点来看, 本文在静态 PI 模型的基础上进行针对性的率相关性改进, 构建的动态 PI 模型能更加准确地描述压电叠堆在非共振 EVC 装置中的应用特点。

为了更明显展示非共振 EVC 装置各轴向迟滞环曲线随驱动电压频率的变化, 现将频率差值较大的 1Hz 与 100Hz 下的迟滞环曲线图重画于图 4, 从频率 1Hz 到 100Hz 迟滞环曲线的变化特点能够体现整个迟滞率相关特性。在图 4 中, 以中间电压值 $A/2$ 为界, 在 $(A/2, A)$ 电压区间内, 在同等电压值下压电叠堆输出位移值随着输入电压频率的增大而减小, 且在电压从 $A/2 \rightarrow A$ 过程中减小幅度增大; 在 $(0, A/2)$ 电压区间内, 在同等电压值下压电叠堆输出位移值随着输入电压频率的增大而增大, 且在电压从 $A/2 \rightarrow 0$ 过程中增大幅度增大, 而在中间电压值附近的位移值随频率的增大变化不明显, 整体看上去, 迟滞环曲线随着频率的增大进行微幅的“顺时针旋转”。

鉴于本压电叠堆在非共振 EVC 装置中表现出来的率相关性特点, 根据已有的 PI 模型动态化方法, 本文保持 PI 模型的 Play 算子阈值不变, 以分段动态化权值的方法改进 PI 模型, 建立率相关的 PI 模型。首先, 根据电压的中间值对权值分两段进行动态化, 考虑上述划分方法在同一段电压值区间内电压的上升段与下降段压电叠堆率相关性表现出来的位移变化程度不尽相同, 因此根据输入电压的不同区段将迟滞环划分为 4 段, 相应的权值以不同参数进行表示。由于上述分析的迟滞环变化特点与电压二阶导取值具有很好的同步性, 如图 4 所示, 迟滞环 4 段划分可以由 \dot{u} 、 \ddot{u} 的符号来表示, 如图 5 所示。因此提出式(3)表示动态权值。

$$\omega_i(u(t)) = \omega_i + \varphi(u(t)) \quad \varphi(u(t)) = \begin{cases} \sigma_1 \ddot{u}(t) & \dot{u} \geq 0, \ddot{u} \geq 0 \\ \sigma_2 \ddot{u}(t) & \dot{u} \geq 0, \ddot{u} \leq 0 \\ \sigma_3 \ddot{u}(t) & \dot{u} \leq 0, \ddot{u} \leq 0 \\ \sigma_4 \ddot{u}(t) & \dot{u} \leq 0, \ddot{u} \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, ω_i 为静态 PI 模型权值, 权值变化函数 $\varphi(u(t))$ 可以体现非共振 EVC 装置中压电叠堆的迟滞环曲线随驱动频率变化的特点。因此非共振 EVC 装置各轴向运动位移与驱动电压可以用动态改进后的 PI 模型表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i(u(t)) P_i[u](t) \quad (4)$$

1.2 动态PI模型参数辨识

由于本文提出的动态改进后的 PI 模型是在原静态 PI 模型的基础上对权值进行分段动态化得到的, 相关参

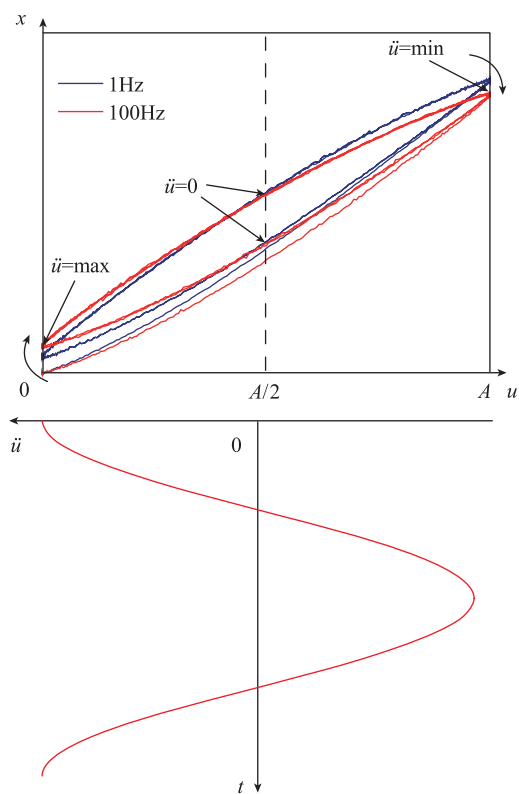


图4 不同频率迟滞环曲线变化示意图

Fig.4 Schematic diagram of hysteresis loop curves at different frequencies

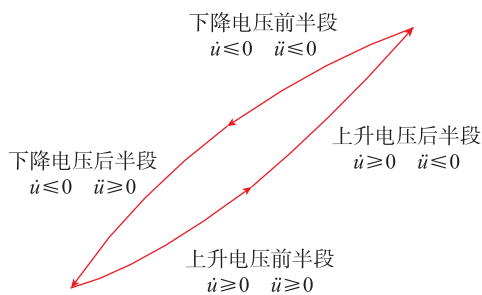


图5 迟滞环曲线分段示意图

Fig.5 Sketch map of hysteresis loop curve

数涉及到静态模型阈值 r_i 与权值 ω_i , 以及动态改进引入参数 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 。静态 PI 模型以 0~120V 正弦偏置电压在 1Hz 下的迟滞环数据进行辨识, 阈值选取原则为 $r_i = \frac{i-1}{n} \max(u(t))$ ($i=1, 2, \dots, n$), 权值可以采用二次规划算法求解得到, 具体方法可参见文献 [13-14]。动态改进后的 PI 模型引入的参数以 0~120V 正弦偏置电压在 1Hz、10Hz、50Hz、100Hz 下的迟滞环数据采用粒子群算法同时辨识得到。Y 向动态 PI 模型 σ_1 为 5.24, σ_2 为 3.87, σ_3 为 3.25, σ_4 为 5.81, 与表 1 构成非共振 EVC 装置 Y 向运动动态迟滞模型完整参数; Z 向动态 PI 模型 σ_1 为 6.12, σ_2 为 5.44, σ_3 为 5.10, σ_4 为 6.49, 与表 2 构成非共振 EVC 装置 Z 向运动动态迟滞模型完整参数。

将构建的动态迟滞模型用于拟合不同频率下的迟滞环曲线, 图 6、7 分别为两种频率下非共振 EVC 装置 Y 向、Z 向运动模型拟合效果图。可以看出动态改进后的 PI 模型具有描述不同频率下非共振 EVC 装置轴向运动的能力。动态模型对 Y 方向频率 10Hz、100Hz 的迟滞环拟合的均方根误差为 0.086 μm 、0.112 μm , 动态模型对 Z 方向频率 10Hz、100Hz 的迟滞环拟合的均方根误差为 0.146 μm 、0.217 μm 。

2 基于压电迟滞模型的非共振型 EVC 装置运动控制

2.1 前馈加PID反馈控制系统

由于非共振 EVC 装置上压电叠堆输出位移表现出来的迟滞特性, 本文采用前馈加 PID 控制的复合控制方

表1 Y向静态PI模型参数

Table 1 Y-direction static PI model parameters

i	阈值 r_i	权值 ω_i	i	阈值 r_i	权值 ω_i
1	0	0.0428	6	60	0
2	12	0.0323	7	72	0
3	24	0.0153	8	84	0
4	36	0.0015	9	96	0
5	48	0	10	108	0

表2 Z向静态PI模型参数

Table 2 Z-direction static PI model parameters

i	阈值 r_i	权值 ω_i	i	阈值 r_i	权值 ω_i
1	0	0.0291	6	60	0
2	12	0.0149	7	72	0
3	24	0.0035	8	84	0
4	36	0.0077	9	96	0
5	48	0.0016	10	108	0.0043

法,前馈控制利用动态改进后的PI模型求逆构建前馈逆控制器,PID反用来降低模型精度不足以及未知干扰的影响,改善控制效果。非共振EVC装置各轴向运动控制框图如图8所示。

2.2 动态改进后的PI逆模型控制算法以及PID控制算法
本文采用动态改进的PI模型的逆模型来设计前馈逆控制器,由于PI模型存在解析逆,其逆模型在表达式上仍是PI模型,通过PI模型与其逆模型在阈值、权值上

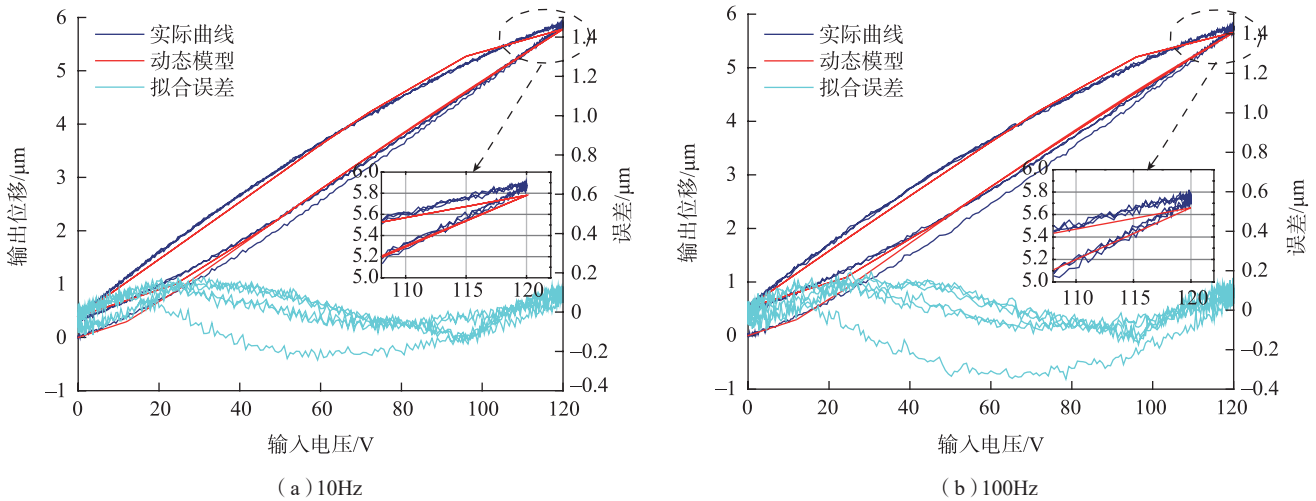


图6 不同频率下非共振EVC装置Y向运动模型拟合效果图

Fig.6 Model fitting effect diagram of Y-direction motion of non-resonant EVC device at different frequencies

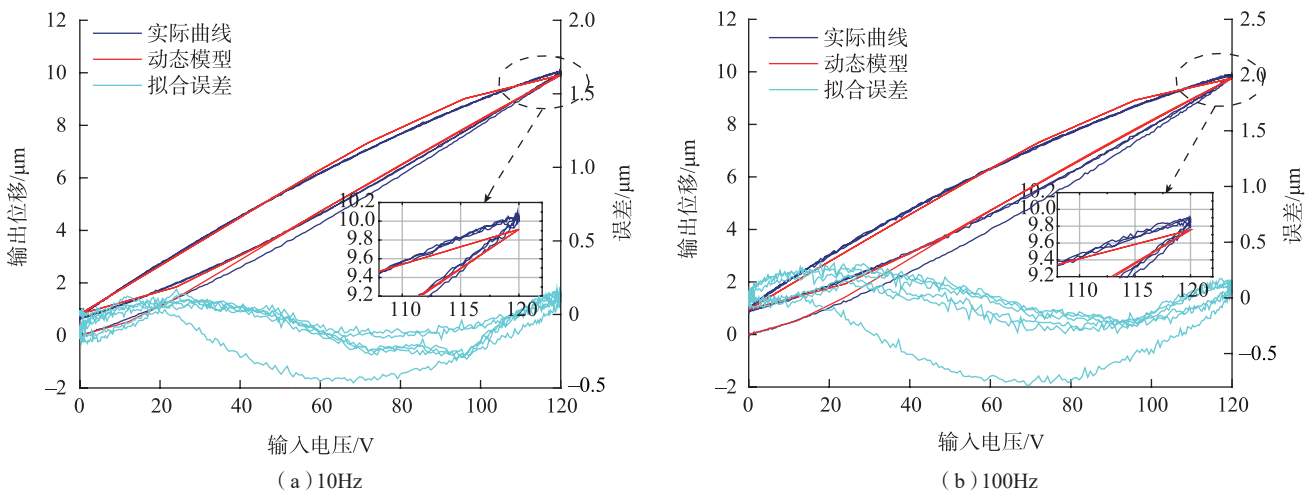


图7 不同频率下非共振EVC装置Z向运动模型拟合效果图

Fig.7 Model fitting effect diagram of Z-direction motion of non-resonant EVC device at different frequencies

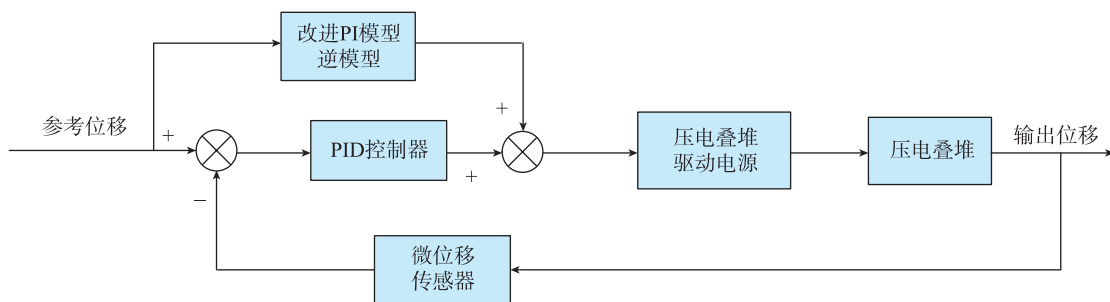


图8 控制系统框图

Fig.8 Control system block diagram

的对应关系可直接求得^[13-14]。相应模型参数为:

$$\omega'_1(x_d(t)) = \frac{1}{\omega_1(x_d(t))} \quad (5)$$

$$\omega'_i(x_d(t)) = \frac{-\omega_i(x_d(t))}{\sum_{j=1}^i \omega_j(x_d(t)) \sum_{j=1}^{i-1} \omega_j(x_d(t))} \quad i=2,3,\dots,n \quad (6)$$

$$r'_i(x_d(t)) = \sum_{j=1}^i \omega_j(x_d(t))(r_i - r_j) \quad i=1,2,\dots,n \quad (7)$$

上面各式中, $x_d(t)$ 为期望位移; $\omega'_i(x_d(t))$ 、 $r'_i(x_d(t))$ ($i=1,2,\dots,n$) 分别为逆模型权值与算子阈值, 均具有率相关性特点。动态改进的 PI 模型的逆模型表达如下:

$$u[x_d](t) = \sum_{i=1}^n \omega'_i(x_d(t)) P_{r'_i(x_d(t))} [x_d](t) \quad (8)$$

常规 PID 控制算法为:

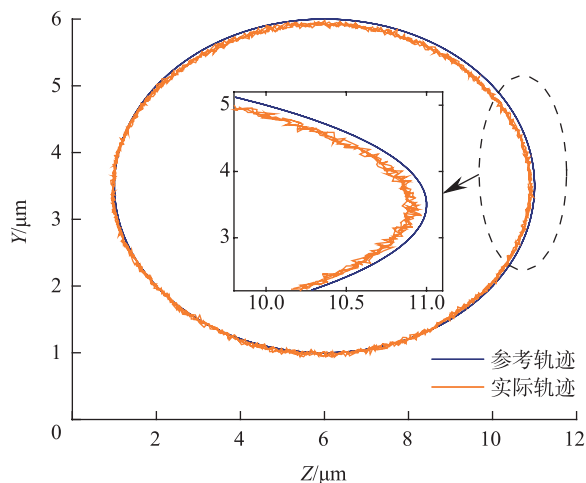
$$u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (9)$$

对式(9)进行离散数字化后的 PID 控制算法为:

$$\begin{aligned} u(k) &= k_p (e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} (e(k) - e(k-1))) \\ &= k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) T + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{aligned} \quad (10)$$

3 非共振 EVC 装置输出椭圆轨迹验证

为了验证上述复合控制方法对非共振 EVC 装置的控制效果, 本文采用 labview 软件搭建控制程序, 数模及模数转换使用 NI 公司的 NI-USB-6361X 型数据采集卡, 装置中使用的压电叠堆是苏州攀特公司的 PTJ-150.20。



(a)形式 1

非共振 EVC 装置 Y、Z 两向运动由同一程序进行独立控制, 前馈逆控制器所需参数见 1、2 节, PID 反馈控制算法所需参数 k_p 、 k_i 、 k_d 在前期对各轴向单独控制中通过凑试法得到, 其中 Y 向参数分别为 50、300、0.06, Z 向参数分别为 70、450、0.08。

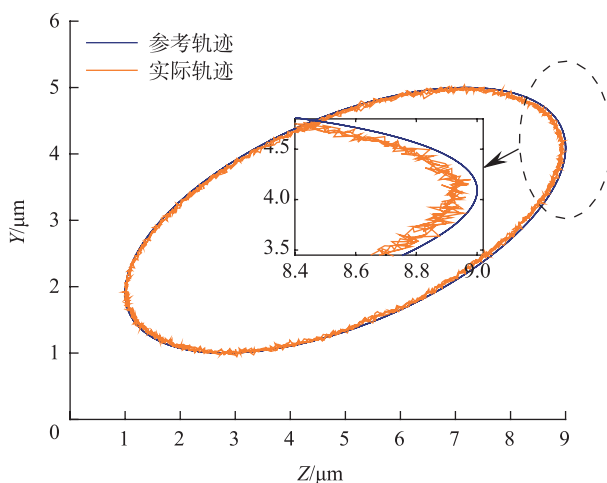
试验中测试了频率 100Hz 时两种不同形式的椭圆轨迹输出效果, 定义椭圆长轴与 Z 向的夹角为椭圆倾角, 其值可通过指定 Y、Z 两向跟踪的正弦位移的相位差来实现。形式 1: 指定 Y 向、Z 向分别跟踪 1~6 μ m、1~11 μ m 的正弦偏置位移, 椭圆倾角为 0° 的椭圆轨迹; 形式 2: 指定 Y 向、Z 向分别跟踪 1~5 μ m、1~9 μ m 的正弦偏置位移, 椭圆倾角为 20° 的椭圆轨迹, 如图 9 所示。

其中, 轨迹的误差用各轴向的输出位移误差来评价, 形式 1 的 Y、Z 两向输出位移最大误差分别为 0.203 μ m、0.314 μ m; 形式 2 的 Y、Z 两向输出位移最大误差分别为 0.152 μ m、0.247 μ m, 相对误差均低于 3.5%, 装置具有较好控制效果, 如图 10 所示。与现有常见的非共振 EVC 装置控制方法相比, 本文将压电迟滞模型运用到装置控制方法设计中, 使非共振 EVC 装置能够输出较高频率范围且振动参数可灵活调节的椭圆振动轨迹, 整体提升了非共振 EVC 装置的运动性能。

4 结论

(1) 在复合控制下, 非共振 EVC 装置能够输出频率 100Hz 以下, 振幅、倾角可调的椭圆振动轨迹, 且具有较高运动精度。

(2) 拓展了非共振 EVC 装置的控制方法, 对于椭圆振动切削的加工精度以及适应性均有一定提高作用, 为非共振 EVC 装置的控制问题提供了一种解决思路。



(b)形式 2

图9 各形式椭圆轨迹输出结果

Fig.9 Output results of various elliptical trajectories

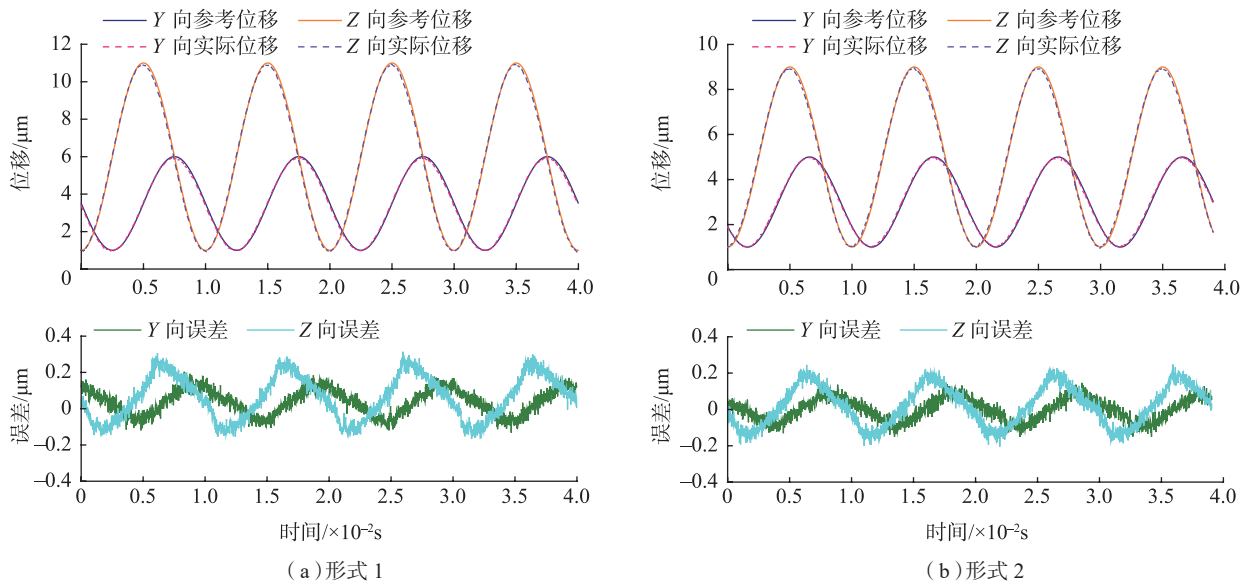


图10 各形式椭圆轨迹轴向输出位移结果
Fig.10 Axial output displacement results of elliptical trajectories in various forms

参考文献

[1] SHAMOTO E, SUZUKI N, MORIWAKI T, et al. Development of ultrasonic elliptical vibration controller for elliptical vibration cutting[J]. *Cirp Annals—Manufacturing Technology*, 2002, 51(1): 327–330.

[2] SHAMOTO E, SUZUKI N, HINO R, et al. A new method to machine sculptured surfaces by applying ultrasonic elliptical vibration cutting[C]//*International Symposium on Micro-Nanomechanics and Human Science*. New York: IEEE, 2005.

[3] ZHANG J, SUZUKI N, WANG Y, et al. Fund a mental investigation of ultra-precision ductile machining of tungsten carbide by applying elliptical vibration cutting with single crystal diamond[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2644–2659.

[4] KIM G D, LOH B G. Direct machining of micro patterns on nickel alloy and mold steel by vibration assisted cutting[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(4): 583–588.

[5] ZHANG C, EHMANN K, LI Y. Analysis of cutting forces in the ultrasonic elliptical vibration-assisted micro-groove turning process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(1): 139–152.

[6] ZHU Z W, TO S, ZHU W L, et al. Optimum design of a piezo-actuated triaxial compliant mechanism for nano-cutting[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, 62(4): 43–57.

[7] LU M M, ZHOU J K, LIN J Q, et al. Study on Ti-6Al-4V alloy machining applying the non-resonant three-dimensional elliptical vibration cutting[J]. *Micromachines*, 2017, 8(10): 1–16.

[8] 王荣奇. 二维椭圆振动辅助加工新方法及其装置的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.

WANG Rongqi. New method and device for two dimensional elliptical vibration aided machining[D]. Changchun: Jilin University, 2017.

[9] RAKOTONDRABE M. Bouc-Wen modeling and inverse multiplicative structure to compensate hysteresis nonlinearity in

piezoelectric actuators[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, 8(2): 428–431.

[10] BAYRAMOGLU H, KOMURCUGIL H. Nonsingular decoupled terminal sliding-mode control for a class of fourth-order nonlinear systems[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2013, 18(9): 2527–2539.

[11] LI Z F, YUAN P, HU Y M, et al. Adaptive control of a class of uncertain nonlinear systems with unknown input hysteresis[C]//*2011 IEEE International Conference on Information and Automation*. Shenzhen, 2011.

[12] 杨斌堂, 赵寅, 彭志科, 等. 基于 Prandtl-Ishlinskii 模型的超磁致伸缩驱动器实时磁滞补偿控制研究[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 124–130.

YANG Bintang, ZHAO Yin, PENG Zhike, et al. Research on real time hysteresis compensation control of giant magnetostrictive actuator based on Prandtl-Ishlinskii model[J]. *Optical Precision Engineering*, 2013, 21(1): 124–130.

[13] 张桂林, 张承进, 李康. 基于 PI 迟滞模型的压电驱动器自适应辨识与逆控制[J]. *纳米技术与精密工程*, 2013, 11(1): 85–89.

ZHANG Guilin, ZHANG Chengjin, LI Kang. Adaptive identification and inverse control of piezoelectric actuators based on PI hysteresis model[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2013, 11(1): 85–89.

[14] 马宏伟, 须颖, 安冬, 等. 基于三段 PI 模型的压电驱动器迟滞补偿方法[J]. *纳米技术与精密工程*, 2017, 15(1): 53–60.

MA Hongwei, XU Ying, AN Dong, et al. Hysteresis compensation method for piezoelectric actuators based on three segment PI model[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2017, 15(1): 53–60.

通讯作者: 张臣, 博士, 教授, 研究方向为数字化设计与制造、加工过程仿真、超声椭圆振动辅助切削技术、减阻结构设计及制造技术, E-mail: meeczhang@nuaa.edu.cn。

(责编 铃兰)