

基于双压电执行器的高频响伺服刀架实现研究

孙 涛,李国平,姚秋水

(宁波大学 机械工程与力学学院,浙江 宁波 315211)

摘 要:目前应用压电执行器的快速伺服刀架只能提供单向的驱动力,回复时间长,据此提出了一种双压电执行器构造的高频响伺服刀架。采用经典 PI 迟滞模型和其逆模型分别对 2 个压电执行器进行建模,在此基础上实现 2 个执行器的联动控制。为了提高控制精度,对经典 PI 模型进行改进,使其具有动态和非对称性。有限元软件分析得到该刀架的响应速度为 10.21 mm/s。最后实验结果表明刀架的响应速度为 9.62 mm/s。

关键词:双压电执行器;高频响伺服刀架;改进的 PI 模型;逆模型;联动控制;有限元分析

中图分类号:TM282;TH161

文献标识码:A

Realization Research of High-frequency Response Servo Turret Based on Double Piezoelectric Actuators

SUN Tao, LI Guoping, YAO Qiushui

(The Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Currently the turret with piezoelectric actuators mostly can only provide one-way driving force with long response time. A kind of high-frequency response servo turret with double piezoelectric actuator was presented. The classical PI model and its inverse model was used to model the former and latter piezoelectric actuator respectively, achieving the complex control of two actuators. In order to improve the control accuracy, the conventional PI model was improved with the characteristics of a dynamic and non-symmetric. The finite element software analysis showed that the response speed of cutter was 10.21 mm/s. Finally, the experimental verification showed that the speed of response frequency response servo turret was 9.62 mm/s.

Key words: double piezoelectric actuators; high-frequency response servo turret; modified PI model; inverse model; complex control; finite element software analysis

0 引言

随着科技的不断进步和制造业的不断发展,对加工精度的要求越来越高。目前,应用压电执行器和超磁致伸缩执行器的刀架仅能提供单向的驱动力,回复力需靠外界机械结构提供,回复时间长,影响刀具的定位精度。本文设计了一个新型的高频响伺服刀架^[1]。该伺服刀架由刀架体、前、后压电执行器与刀架固连的车刀组成,刀架体的中间有一块台板,通过柔性铰链与刀架体的外框相连。要想实现刀架的高频响运动,需让前、后压电执行器能一前一后的协调配合运动,即后执行器随着电压增加向前运动的同时,前执行器必须加上相对应减小的电压,

使其向后运动以达到两者间的相互配合运动;反之亦然。该刀架的优点是刀具在两个压电执行器的“夹持”作用下实现高精度定位和高频响运动。然而压电执行器的输入电压和输出位移间呈现明显的非线性和压电材料固有的迟滞特性,给 2 个压电执行器的联动带来一定的困难,所以必须先对 2 个压电执行器分别建立精确的迟滞模型。目前运用较多的迟滞模型有 Preisach^[2]模型、Maxwell 模型^[3]、PI 模型^[4]、Duhem 模型^[5]等。由于 PI 模型结构简单,参数少,存在解析逆,且具有明确的表达式,易求解,方便在实时控制中的应用。但传统 PI 模型的迟滞算子关于中心奇对称,而在实际中压电执行器的迟滞

收稿日期:2014-11-05

基金项目:浙江省科技厅公益技术基金资助项目(2013C31017);浙江省自然科学基金资助项目(LY15E050005)

作者简介:孙涛(1989-),男,安徽望江县人,硕士生,主要从事精密加工与测控的研究。李国平(1967-),男,湖北黄冈人,教授,博士,主要从事精密加工与机电测控、振动控制的研究。

回线是非对称的;另外经典 PI 模型是一种静态迟滞模型,而刀具在运动过程中位移时刻发生变化,这就导致输入电压是动态变化的。所以按照经典的迟滞模型进行建模显然满足不了伺服刀架精确定位的要求。

1 压电执行器迟滞建模

1.1 PI 模型的 backlash 迟滞元

PI 模型^[4]把迟滞非线性看成是一系列基本 backlash 算子线性加权叠加而成的,结构简单。backlash 算子的表达式为

$$y(t) = H_r[x, y_0](t) \quad (1)$$

$$r \in R_0^+, y_0 \in R, t \in [t_0, t_e]$$

式中: $y(t)$ 为迟滞输出; x 为迟滞输入; y_0 为初始值。其递归数学表达式为

$$y(t) = H_r[x(t), y(t_i), r_{\Pi}](t) = \max\{x(t) - r_H, \min\{x(t) + r_H, y(t-T)\}\} \quad (2)$$

式中: $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_N = t_e$ 为区间 $[0, t_e]$ 的一个划分,该划分使输入在每一个子区间 $[t_i, t_{i+1}]$ 上保持单调; $x(t)$ 为迟滞算子的输入; T 为采样周期。

$$y(0) = \max\{x(0) - r_{\Pi}, \min\{x(0) + r_{\Pi}, y_0\}\} \quad (3)$$

Backlash 迟滞元如图 1(a)所示。

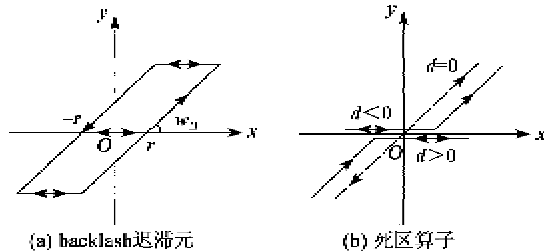


图 1 backlash 迟滞元和死区算子

n 个阈值不同的基本 backlash 迟滞元线性加权叠加得到 PI 迟滞模型的输出,即

$$y(t) = \mathbf{w}_H^T \cdot H_{r_H}[x, y_{H0}](t) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{w}_H^T = (w_{H0}, w_{H1}, \dots, w_{Hn})$ 为权重; $\mathbf{r}_H^T = (r_{H0}, r_{H1}, \dots, r_{Hn})$ 为迟滞元的阈值,且满足 $0 = r_{H0} < r_{H1} < \dots < r_{Hn} < +\infty$,迟滞元的初始状态向量均可取为 0, $H_{r_H}[x, y_{H0}](t)^T = \{H_{r_{H1}}[x, y_{H01}](t), H_{r_{H2}}[x, y_{H02}](t), \dots, H_{r_{Hn}}[x, y_{H0n}](t)\}$ 。

1.2 对 backlash 迟滞元算子的改进

传统 backlash 算子的输出与输入电压的频率变化无关。导致 PI 模型的输出也与输入电压的频率变化无关,是一种静态模型。为了得到一种动态

的迟滞元算子,对传统 backlash 算子进行一阶微分处理可得动态迟滞元模型^[6]:

$$y'(t) = \alpha y'(t-T) + (1-\alpha)y(t) \quad (5)$$

式中: α 为惯性因子; $y'(t)$ 为 $y(t)$ 的一阶微分。

动态 PI 模型的输出为

$$y(t) = \mathbf{w}_H^T \cdot y'(t) \quad (6)$$

尽管迟滞算子具有动态特性,但改进的迟滞算子还是关于中心奇对称,而实际迟滞模型一般是非对称的,为了使 PI 模型具有非局部记忆性与非奇对称等特性,在动态迟滞算子的基础上引入了死区算子^[7](见图 1(b)),定义为

$$S[x(t), r_s] = \begin{cases} \max\{x(t) - r_s, 0\} & r_s > 0 \\ x(t) & r_s = 0 \\ \min\{x(t) + r_s, 0\} & r_s < 0 \end{cases} \quad (7)$$

不同阈值的死区算子加权叠加为

$$y(t) = \mathbf{w}_S^T \cdot S_{r_S}[x](t) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{w}_S^T = (w_{S-l}, \dots, w_{S0}, \dots, w_{Ss})$ 为权重; $\mathbf{r}_S^T = (r_{S-l}, \dots, r_{S0}, \dots, r_{Ss})$ 为阈值,且满足 $-\infty < r_{S-l} < \dots < r_{S0} = 0 < \dots < r_{Ss} < +\infty$, $S_{r_H}[x](t)^T = \{S_{r_{S-l}}[x](t), \dots, S_{r_{S0}}[x](t), \dots, S_{r_{Ss}}[x](t)\}$ 。

将动态 PI 模型与死区算子相串连,得到新的改进 PI 模型为

$$\Gamma[x](t) = \mathbf{w}_S^T \cdot S_{r_S}[\mathbf{w}_H^T \cdot y'(t)](t) \quad (9)$$

新的改进 PI 逆模型为动态 PI 模型的逆与叠加算子的逆相串连,则有

$$\Gamma^{-1}[y](t) = \mathbf{w}_H^T \cdot y'[\mathbf{w}_S^T \cdot S_{r_S}^{-1}[y](t), y_0^*](t) \quad (10)$$

由于改进后的 PI 模型仍是纯现象模型,参数与内部物理结构无关,参数的辨识还是要通过实验获得。 r_H 和 r_S^* 通过压电执行器的初载曲线^[8](压电执行器输入电压从 0 单调递增到其所能承受的最大电压时实际的输出曲线)确定,采用等分阈值,则

$$r_{Hi} = \frac{i}{n+1} \max[x(t)] \quad (11)$$

$$r_{S0}^* = 0 \quad (12)$$

$$r_{Si}^* = \frac{i-1/2}{l} \max[y(t)] \quad i=1, \dots, l \quad (13)$$

$$r_{Si}^* = \frac{i+1/2}{l} \min[y(t)] \quad i=-l, \dots, -1 \quad (14)$$

而权值 w_H 和 w_S^* 则由误差的最小二范数 L_2^2 得到,误差函数^[7]为

$$E[x, y] = (\mathbf{w}_H^T \quad \mathbf{w}_S^{*T}) \begin{bmatrix} y'(t) \\ -S_{r_S^*}[y](t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

2 双压电执行器精确联动的控制

通过实验得到两个压电执行器的PI迟滞模型和PI迟滞逆模型后,可实现2个压电执行的联动控制,如图2所示。

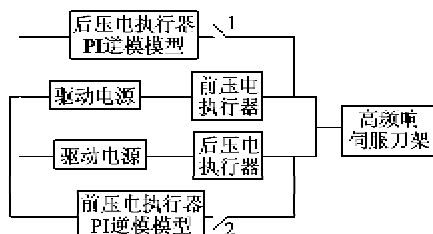


图2 双压电执行器联动控制原理图

当刀架需向前进给时,可选择闭合1而断开2,驱动电源驱动后压电执行器向前输出位移,再通过传感器读取实际数据。将读数输入前压电执行器PI逆模型算出相应的电压变化值,再通过驱动电源作用于前压电执行器,令前压电执行器向后退缩,完成刀架的进给运动。当刀架向后运动时,可选择闭合2而断开1,驱动电源驱动前压电执行器向前输出位移,通过传感器读取数据。将数据输入后压电执行器PI逆模型算出相应的电压变化值,再通过驱动电源作用于后压电执行器,使后压电执行器向后退缩,完成刀架的回复。从这个过程可看出,如果仅使用一个压电执行器,当刀架回复时只能依靠柔性铰链自身的回复力完成刀架的后退动作,花费时间长,且刀具自由回复时具有一定的颤动,造成定位不精确。采用2个压电执行器使刀架的进给和后退都由压电执行器完成,且刀具在2个压电执行器的“夹持”下颤动减小,从理论上保证了实现高精度定位和高频响运动的可能性。

3 有限元仿真和实验验证

3.1 有限元仿真

图3为用有限元仿真的对比刀架位移云图,图4为有限元仿真的高频响伺服刀架的位移云图。由图可看出,该刀架采用对称结构,车刀的进给和回复运动都由压电执行器完成。下面应用有限元软件分析该刀架提高的速度。本方案设计提高频响的构想是基于刀具的回复由压电执行器推动代替单纯利用柔性铰链自身的回复力完成,所以应用有限元软件分析提高频响即要分析单纯依靠柔性铰链自身回复的刀架响应情况,因此,本文首先利用有限元软件分析了一个压电执行器的刀架。模型参数:实体单元

的材料参数为弹性模量 70 GPa,泊松比 0.3,密度 2.7 g/cm^3 ;加载方式为多步加载。

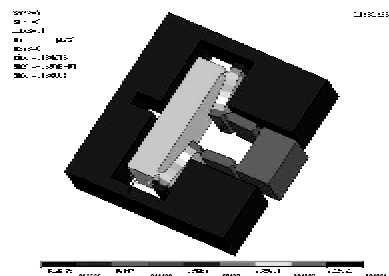


图3 对比的刀架位移云图

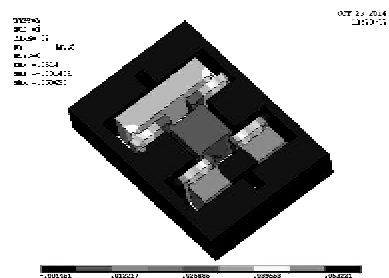


图4 高频响伺服刀架位移云图

对比刀架采用的是对称式放大机构,放大倍数为4,理论输出最大位移为 $200 \mu\text{m}$ 。从图3可知,刀架实际输出的最大位移为 $134.004 \mu\text{m}$,符合实际情况,证明有限元分析的有效性。对压电执行器输入三角波电压,得到的位移响应曲线如图5所示。由图可知,刀具的响应时间约为 0.11 s ,且在回复过程中发生了明显的颤动,造成下次定位的不精确。

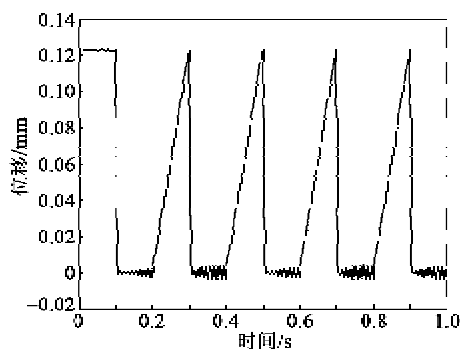


图5 刀具的响应曲线

本文对该高频响伺服刀架作了相应的有限元分析,对前、后压电执行器分别输入周期和幅值相等、相位相反的三角波电压信号,得到分析结果如图6所示。由图可知,高频响伺服刀架的响应时间为 0.01 s ,响应速度为 10.21 mm/s 。刀具在2个压电执行器的“夹持”下,颤动减小,提高了位置控制的精确性。

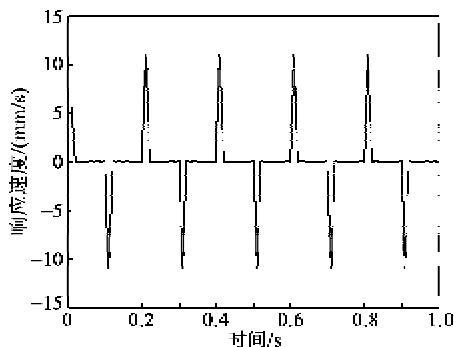


图6 高频响伺服刀架响应速度曲线

3.2 实验验证

在实际工作中,由于初始状态的伺服刀架中2个压电执行器和台板间存在间隙,所以实验前必须加载一定的电压来消除间隙。又因为压电执行器不能承受过大的反向电压,所以必须使其中一个压电执行器加载正的饱和电压。工作时的初始状态是前一个压电执行器已加载正的饱和电压,后一个压电执行器加载一定的正的预紧电压。

实验前,分别对前、后压电执行器预紧,对前压电执行器输入饱和电压,对后压电执行器输入约10 V的电压。试验中,对后压电执行器输入上升段的三角波电压,通过建立的PI模型得到压电执行器输出采样点的位移值,再通过前压电执行器的PI逆模型计算得到其输出位移值对应的采样点输入电压,即为对前压电执行器输入的对应下降电压,完成刀架的进给。同样,通过相同的原理实现刀架的后退运动。整个过程利用加速度传感器收集数据,经多次试验得到的曲线如图7所示,计算分析得到刀架的平均响应速度达到9.62 mm/s。

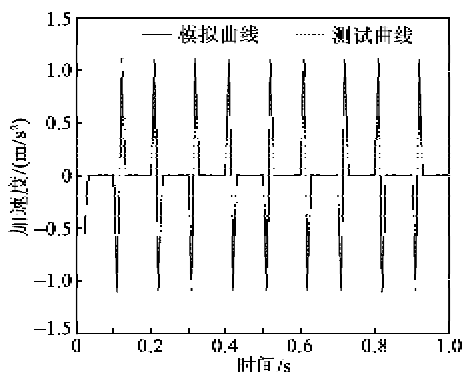


图7 高频响伺服刀架响应加速度曲线

4 结束语

本文分别建立了2个压电执行器改进的PI模型和逆模型,在此基础上实现2个压电执行器的联动控制,并利用有限元软件对刀架的响应速度进行了

模拟,最后由实验结果验证了本文设计的高频响伺服刀架有效地提高了刀架的响应速度,为实现高精度的切削打下了基础。下一步的主要研究是分别建立上升段和下降段的压电执行器模型,单独控制刀架的进给和后退,并采用神经网络辨识模型参数,或直接用神经网络建立压电执行器的迟滞模型,进一步提高模型精度和实验精度。

参考文献:

- [1] 王海峰.非圆加工用高速高精度快速刀具进给系统的研制[D].上海:上海交通大学,2006.
- [2] 李黎,刘向东,侯朝桢. Preisach 逆模型补偿的压电陶瓷执行器自适应滑膜控制[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(2): 237-240.
LI Li, LIU Xiangdong, HOU Chaozhen. Adaptive sliding control of the piezoceramic actuators with the inverse preisach model compensation[J]. Transactions of Beijing Institute Technology, 2008, 28(3): 237-240.
- [3] 裘进浩,陈海荣,陈远晟,等. 压电驱动器的非对称迟滞模型[J]. 纳米技术与精密工程, 2012, 10(3): 189-197.
QIU Jinhao, CHEN Hairong, CHEN Yuansheng, et al. A model for asymmetric hysteresis of piezoelectric actuators[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2012, 10(3): 189-197.
- [4] SU Chunyi, WANG Qingqing, CHEN Xinkai, et al. Adaptive variable structure control of class of nonlinear systems with unknown Prandtl-Ishlinskii hysteresis [J]. IEEE Trans Automatic Control, 2005, 50(12): 2069-2074.
- [5] LIN C J, LIN P T. Tracking control of a biaxial piezo-actuated positioning stage using generalized Duhem model[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2012, 64(5): 766-787.
- [6] 郭国法,党选举. 基于PI模型的压电陶瓷执行器迟滞特性建模[J]. 微计算机信息, 2008, 24(4): 282-284.
GUO Guofa, DANG Xuan'ju. Modeling for piezoceramic actuators based on PI model[J]. Control & Automation, 2008, 24(4): 282-284.
- [7] 王俐,饶长辉,饶学军. 压电陶瓷微动台的复合控制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1265-1271.
WANG Li, RAO Changhui, RAO Xuejun. Feed-forward control of piezoelectric ceramic positioning stage [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1265-1271.
- [8] 方凡,崔玉国,梁冬泰,等. 压电微动平台的改进PI迟滞模型研究[J]. 压电与声光, 2014, 36(1): 69-71.
FANG Fan, CUI Yuguo, LIANG Dongtai, et al. Research on improve hysteresis model of piezoelectric micro-positioning stage[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2014, 36(1): 69-71.