

采用改进 PI 迟滞模型的压电微夹钳前馈控制

蔡永根, 崔玉国*, 赵余杰, 刘尔春, 刘 康, 薛 飞

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为减小压电微定位平台的迟滞误差, 设计前馈控制器对其进行控制. 首先在使所建平台迟滞模型精度达到要求并使各阈值点精度相同的情况下, 对平台迟滞模型的阈值进行优化, 得到满足模型精度要求的最小算子数, 进而建立了平台的PI (Prandtl-Ishilinskii)迟滞模型; 然后通过对所建迟滞模型求逆, 设计出平台的前馈控制器; 最后在所设计的前馈控制作用下, 使平台达到 $5\text{ }\mu\text{m}$ 理想阶跃值的响应时间为 0.01 s , 稳态误差中线的变化范围为 $0.40\sim 0.50\text{ }\mu\text{m}$, 当期望平台输出最大值为 $17\text{ }\mu\text{m}$ 变幅值三角波位移时, 实测位移相对于理想位移的误差中线变动范围为 $-1.15\sim -0.05\text{ }\mu\text{m}$. 所设计前馈控制器可有效地减小压电微定位平台的迟滞误差.

关键词: 压电微定位平台; PI迟滞建模; 阈值优化; 前馈控制

中图分类号: TN304

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 06-0053-06

压电微夹钳因可输出较大的钳指位移及夹持力, 同时具有位移及力分辨率高、响应速度快、结构刚度较大等特点, 而被用于微机电系统及生物工程等领域^[1-3]. 在微机系统中, 压电微夹钳可在微操作手(压电微夹钳作为其手指)及微定位平台(用来定位微零件)的配合下, 将微轴、微齿轮、微泵、微马达等装配成微系统. 在生物工程中, 压电微夹钳可在微操作手的配合下, 对游离细胞进行捕获和运送; 而在微操作手及微冲击探针的配合下, 还可将相应的成分注入细胞或从中提取相应的成分. 但是, 由于压电陶瓷材料具有迟滞特性, 致使压电微夹钳的输出位移与输入电压间存在迟滞非线性, 这就会使压电微夹钳产生迟滞误差, 降低其定位精度.

为了减小及消除压电陶瓷材料的迟滞误差, 提高压电微夹钳的夹持精度, 需要建立描述其迟滞特性的迟滞模型, 并设计相应的控制算法, 进而对压电微夹钳进行相应的控制. 目前, 关于压电微夹钳的迟滞建模方法主要有Maxwell模型^[4]、Preisach模型^[5-6]、PI模型(Prandtl-Ishilinskii模型)^[7-8]以及Dahl模型^[9]等, 其中PI模型由于具有参数少、

算法简便、求逆(前馈控制器设计)容易等优点获得更广泛的应用. 目前关于压电微夹钳的控制方法主要有前馈控制^[10-11]、反馈控制^[12]和复合控制^[5], 其中前馈控制基于所建立的迟滞模型, 算法简单, 速度快, 但控制精度低; 反馈控制因采用精密位移传感器, 故控制精度高, 但其响应速度较前馈控制慢, 系统成本较前馈控制高; 复合控制是将前馈控制和反馈控制相结合的一种控制方法, 具有良好的控制性能, 但算法复杂, 实现困难.

本文针对压电微夹钳迟滞曲线呈非奇对称且为非凸曲线的特点, 将死区算子串联给常规PI迟滞模型, 建立可以更好地描述压电微夹钳迟滞特性的迟滞模型, 设计相应的前馈控制算法, 以期在前馈控制作用下, 减小压电微夹钳的迟滞误差, 提高其操作精度.

1 微夹钳结构及运动原理

1.1 微夹钳结构

图 1 给出了压电微夹钳的三维造型和实物照片, 其结构包括 2 个钳指、1 个夹板、2 个驱动电极片、支座. 每个钳指由 2 片压电陶瓷晶片(材料为

收稿日期: 2017-03-02.

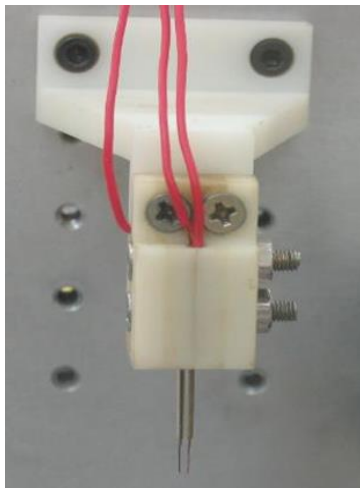
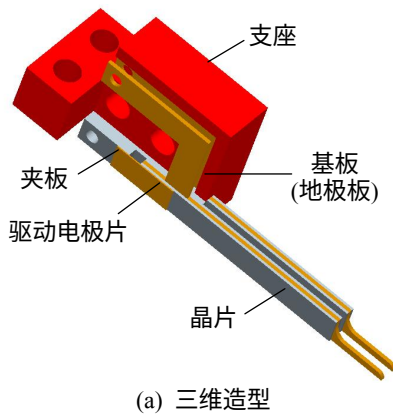
宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51675288).

第一作者: 蔡永根(1990—), 男, 河南商丘人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 微/纳米定位技术. E-mail: 1084653515@qq.com

*通信作者: 崔玉国(1971—), 男, 吉林农安人, 教授, 主要研究方向: 微/纳米定位技术及精密测量技术. E-mail: cuiyuguo@nbu.edu.cn

PZT5)及1片基板(材料为黄铜)粘贴而成,基板作为地电极.夹板(材料为45号钢)用来调节两钳指之间的初始间隙,又作为驱动电极.驱动电极片(材料为黄铜)一端与钳指外晶片表面粘接,另一端与夹板粘接,用来将来自夹板的驱动电压施加在外晶片上.支座(材料为聚四氟乙烯)用来固定微夹钳.微夹钳结构整体尺寸为35 mm×25 mm×20 mm.



(b) 实物照片
图1 微夹钳结构

1.2 微夹钳运动原理

微夹钳工作原理为:同时给构成微夹钳的某一钳指中的两晶片施加相同的驱动电压,如图2所示.其中上晶片由于电极化强度(P)和电场(E)方向相反而伸长;下晶片由于电极化强度和电场方向相同而缩短,由此使钳指产生向下运动.另一方面,构成微夹钳的另一钳指中的两晶片的极化方向与上述钳指两晶片的极化方向相反,当给该钳指施加同样的电压时,其向上运动,从而实现微夹钳的夹持动作.

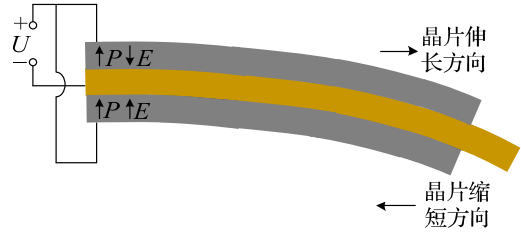


图2 微夹钳运动原理

2 PI迟滞模型及其改进

2.1 PI迟滞模型描述

被描述对象的PI迟滞模型可通过多个阈值不同及权重不同的迟滞算子(Backlash算子)相加构成,其表达式为:

$$y(t) = \mathbf{w}_H^T \mathbf{H}_r[x, y](t) = \sum_{i=0}^n H_r^i[x(t), y^i(t)] = \sum_{i=0}^n w_r^i \max\{x(t) - r_H^i, \min[x(t) + r_H^i, y^i(t - T)]\}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{w}_H^T = [w_{H0}, w_{H1}, \dots, w_{Hn}]$ 为 Backlash 算子权重向量; $\mathbf{H}_r[x, y](t) = [H_r^0[x, y](t), H_r^1[x, y](t), \dots, H_r^n[x, y](t)]$ 为 Backlash 算子向量; H_r^i 为第 i 个 Backlash 算子; w_H^i 为第 i 个算子权重; r_H^i 为第 i 个 Backlash 算子阈值, 且 $0 = r_H^0 < r_H^1 < \dots < r_H^n < +\infty$; $x(t) - r_H^i, x(t) + r_H^i$ 为第 i 个算子输入; $y^i(t - T)$ 第 i 个算子输出; T 为采样周期.

式(1)中的 Backlash 算子 H_r^i 可用图3表示.

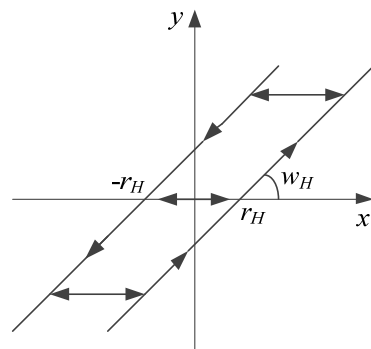


图3 Backlash 迟滞算子

图3中省略了算子权重 w_H 、阈值 r_H 、算子输入 x 和算子输出 y 的序号 i . Backlash 算子常采用递归形式表达, 即:

$$y(t) = \mathbf{H}_r[x(t), y(t)] = \max\{x(t) - r_H, \min[x(t) + r_H, y(t - T)]\}, \quad (2)$$

式(2)的初始条件为:

$$y(t_0) = \max\{x(t_0) - r_H, \min[x(t_0) + r_H, y_0]\}, \quad (3)$$

式中 $x(t_0)$, y_0 分别为算子输入和输出的初始值, 都可取为0.

当式(1)中的Backlash算子的阈值 r_H^i 和权重 w_H^i 被求出后, 便可求出用式(1)所表达的被描述对象的PI迟滞模型. r_H^i 和 w_H^i 的求解过程为: (1)通过实验获得被描述对象的实际迟滞曲线; (2)将实际迟滞曲线划分为 n 个阈值区间, 即 $r_H^0, r_H^1, \dots, r_H^i, \dots, r_H^n$; (3)在使PI迟滞模型相对于实测迟滞曲线的误差二范数为最小的情况下, 求出被描述对象PI迟滞模型各算子的 w_H^i .

2.2 PI 模型的改进

常规 PI 迟滞模型主要用来描述迟滞曲线关于算子中心对称, 且为凸曲线, 如图 4 所示. 而某些具有迟滞特性的对象, 如压电微夹钳, 其迟滞曲线呈非奇对称, 且为非凸曲线, 如图 5 所示. 这时直接用常规 PI 迟滞模型就不能精确地描述该对象的迟滞特性.

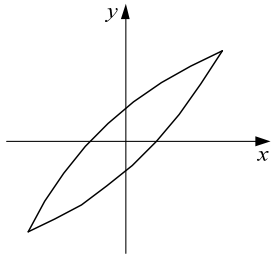


图 4 奇对称和凸函数迟滞曲线示意图

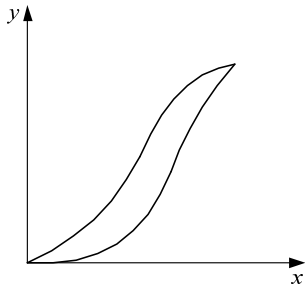


图 5 非奇对称和非凸函数迟滞曲线示意图

为使 PI 迟滞模型能够更好地描述对象的迟滞非线性特性, 需要对其进行改进. 为此, 我们将呈非对称、非凸特性的死区算子(图 6)同常规 PI 迟滞模型相串联(将二者相乘), 以使改进后的 PI 迟滞模型也呈现非奇对称、非凸的特性, 进而更好地拟合实测迟滞曲线.

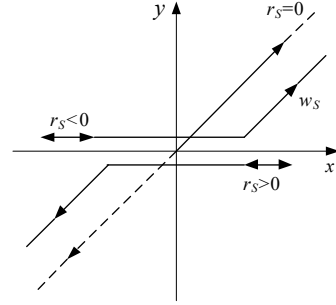


图 6 死区算子示意图

由于作用于压电微夹钳上的电压为正电压, 钳指位移也为正值, 从而使压电微夹钳的迟滞曲线只位于坐标系的第一象限, 这样便可采用单边死区算子(阈值大于零的死区算子)来改进常规 PI 迟滞模型. 这种算子可表示为:

$$S_r[x](t) = \begin{cases} \max\{x(t) - r_s, 0\}, & r_s > 0, \\ x(t), & r_s = 0. \end{cases} \quad (4)$$

用单边死区算子对 PI 迟滞模型进行改进时, 也需要将阈值不同、权重不同的单边死区算子进行叠加, 即:

$$y(t) = \mathbf{w}_s^T \mathbf{S}_r[x](t), \quad (5)$$

式中: x 和 y 分别为死区算子的输入和输出; $\mathbf{w}_s^T = [w_s^0, w_s^1, \dots, w_s^m]$ 为死区算子的权重向量; $\mathbf{r}_s^T = [r_s^0, r_s^1, \dots, r_s^m]$ 为死区算子的阈值向量, 且 $0 = r_H^0 < r_H^1 < \dots < r_H^m < +\infty$; $\mathbf{S}_r[x](t) = [S_r^0[x](t), S_r^1[x](t), \dots, S_r^m[x](t)]$ 为死区算子向量.

将常规 PI 迟滞模型同单边死区算子模型相结合后的 PI 迟滞模型为:

$$\Gamma[x](t) = \mathbf{w}_s^T \mathbf{S}_r\{\mathbf{w}_H^T \mathbf{H}_r[x, y_0]\}(t). \quad (6)$$

图 7 给出了采用改进 PI 模型所建立的压电微夹钳迟滞模型.

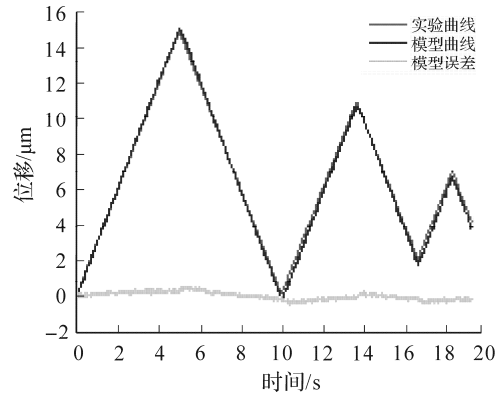


图 7 微夹钳的模型曲线与实测曲线

由图 7 可知: 在 $0 \sim 14.8 \mu\text{m}$ 的微夹钳钳指位移范围内所建模型曲线相对于实测曲线的误差中线变化为 $-0.4 \sim 0.35 \mu\text{m}$, 所建模型可较好地描述压电微夹钳的迟滞非线性。

3 前馈控制器设计

前馈控制是一种按照扰动信号或参考输入信号对被控对象的实际输出进行补偿(按扰动信号或参考输入信号来设计控制器)的开环控制方式。该控制方式可提高被控对象的实际输出对参考输入的跟踪精度, 且由于不影响闭环系统的特征方程, 故不影响系统的稳定性。

对具有迟滞特性的被控对象, 如压电微夹钳, 其前馈控制就是对反映位移与电压关系的迟滞模型求逆, 将所求得的反映电压与位移关系的迟滞逆模型作用于压电微夹钳。对本文的改进 PI 迟滞模型, 其逆模型为:

$$\Gamma^{-1}[y](t) = \mathbf{w}_H^T \mathbf{H}_{r_H} \{ \mathbf{w}_S^T \mathbf{S}_{r_S} [y], y_0' \}(t), \quad (7)$$

式中:

$$w_H^i = -w_H^j / [(w_H^0 + \sum_{j=1}^i w_H^j)(w_H^0 + \sum_{j=1}^{i-1} w_H^j)],$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

$$w_H^0 = 1/w_H^0, \quad (9)$$

$$r_H^i = \sum_{j=0}^i w_H^j (r_H^i - r_H^j), \quad i = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

$$y_0^i = \sum_{j=0}^i w_H^j y_0^i + \sum_{j=i+1}^n w_H^j y_0^i, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (11)$$

$$w_S^i = -w_S^j / [(w_S^0 + \sum_{j=1}^i w_S^j)(w_S^0 + \sum_{j=1}^{i-1} w_S^j)],$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \quad (12)$$

$$w_S^0 = 1/w_S^0, \quad (13)$$

$$r_S^i = \sum_{j=0}^i w_S^j (r_S^i - r_S^j), \quad i = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (14)$$

$$z_0^i = \sum_{j=0}^i w_S^j z_0^i + \sum_{j=i+1}^n w_S^j z_0^i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (15)$$

式(15)中, z_0^i 为死区算子的初值。

将所求出的改进 PI 迟滞模型的相应参数代入式(8)~(15), 可得改进 PI 迟滞逆模型的相应参数,

进而得到压电微夹钳的前馈控制器。

4 微夹钳前馈控制实验

4.1 实验系统构成

图 8 为压电微夹钳钳指输出位移的测量系统, 其工作过程为: 将前馈控制器所生成的数字控制电压经数据卡上的数/模转换器转换为模拟控制电压, 施加给压电微夹钳驱动电源, 驱动电源输出相应的驱动电压使钳指产生相应的输出位移, 该位移被激光位移传感器测得, 并通过计算机网口被采集到计算机内。

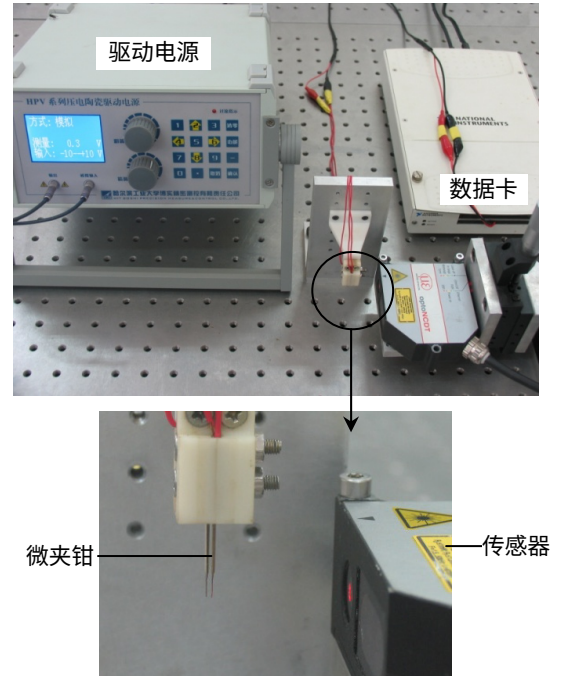
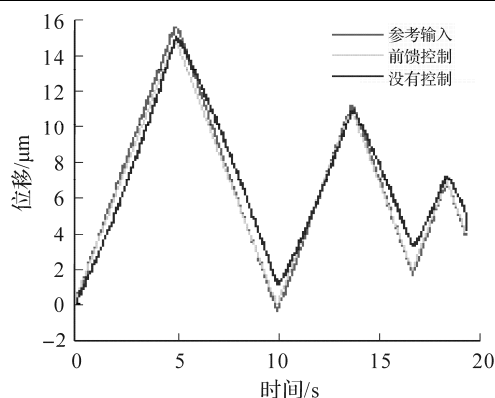


图 8 钳指位移测试系统

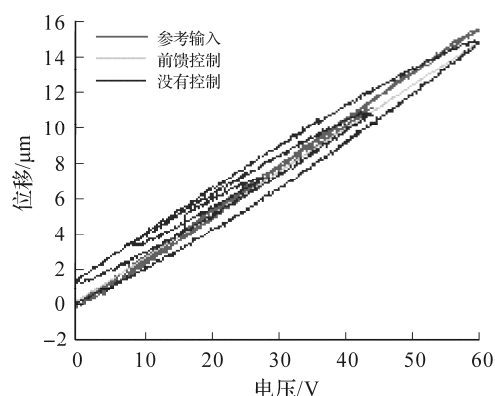
4.2 前馈控制实验

4.2.1 三角波跟踪

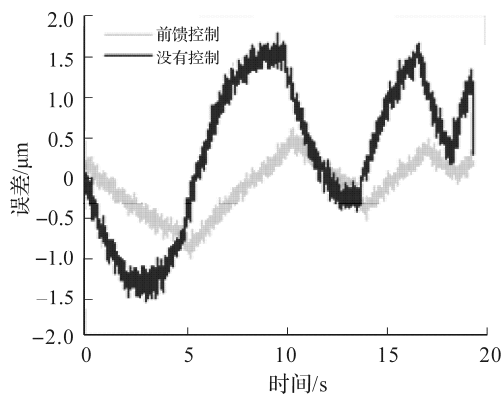
图 9 给出了参考位移为变幅值三角波时压电微夹钳在所设计前馈控制器作用下的位移响应。由图 9(a)和(b)可知, 在前馈控制作用下, 微夹钳钳指的输出位移能够较好地跟踪参考位移; 而由图 9(c)可知, 前馈控制可使压电微夹钳的迟滞误差显著减小, 在 $0 \sim 15.2 \mu\text{m}$ 的位移范围内, 迟滞误差中线从没有控制时的 $-1.35 \sim 1.50 \mu\text{m}$ 减小为前馈控制时的 $-0.95 \sim 0.47 \mu\text{m}$ 。所设计的前馈控制器之所以不能完全消除压电微夹钳的迟滞非线性, 是由于前馈控制是一种开环控制。



(a) 位移与时间关系



(b) 位移与电压关系

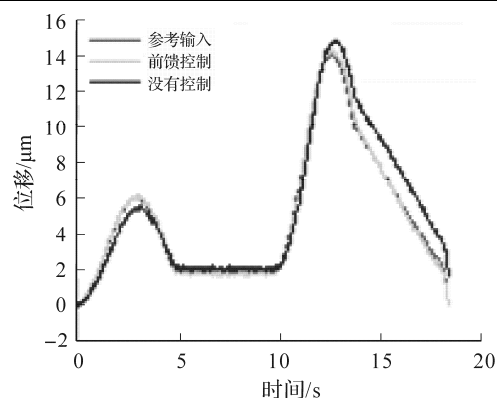


(c) 位移误差

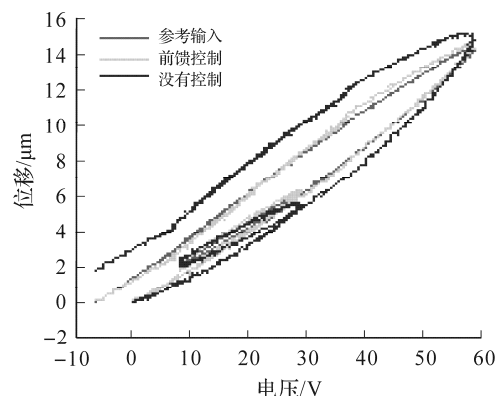
图 9 微夹钳对三角波的跟踪

4.2.2 任意波形跟踪

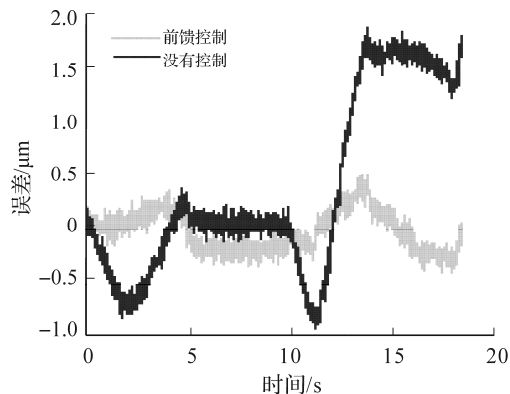
图 10 给出了压电微夹钳在所设计前馈控制器作用下对任意波的跟踪. 由图 10(a)和(b)可知, 在前馈控制作用下, 微夹钳钳指输出位移仍能够很好地跟踪任意波形参考位移; 而由图 10(c)可知, 在 0~14.1 μm 位移范围内, 钳指输出位移对任意波形参考位移跟踪时的迟滞误差中线由没有控制时的 -0.90~1.84 μm 减小到前馈控制下的 -0.32~0.40 μm . 这进一步表明, 即使对于任意波形, 所涉及的



(a) 位移与时间关系



(b) 位移与电压关系



(c) 位移误差

图 10 微夹钳对任意波形的跟踪

前馈控制器也能够有效地减小压电微夹钳的迟滞误差, 提高其对输入的跟踪能力.

5 结论

通过引入死区算子, 对描述对象迟滞特性的 PI 模型进行改进, 使其能更好地描述具有非对称、非凸特性的压电微夹钳的迟滞特性, 进而建立了压电微夹钳的迟滞模型. 在 0~14.8 μm 的微夹钳钳指位移范围内, 所建模型曲线相对于实测曲线的

误差中线变化为 $-0.4\sim-0.35\ \mu\text{m}$.

基于所建迟滞模型,对压电微夹钳进行了前馈控制,结果表明:在 $0\sim 15.2\ \mu\text{m}$ 的期望钳指位移范围内,实测钳指位移相对于期望位移的误差中线为 $-0.95\sim-0.47\ \mu\text{m}$.表明所设计前馈控制器可显著地减小压电微夹钳的迟滞误差,提高其对参考输入位移的跟踪精度.

参考文献:

- [1] MAYRA G S, MONIKA L S, MATTHIAS S, et al. Micro-gripper: A new concept for a monolithic single-cell manipulation device[J]. *Sensors and Actuators A (Physical)*, 2015, 236:130-139.
- [2] KIM B S, PARK J S, KANG B H, et al. Fabrication and property analysis of a MEMS micro-gripper for robotic micro-manipulation[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, 28:50-56.
- [3] 孙媛, 金鑫, 叶鑫, 等. 面向中间尺度零件精密装配的微夹持器[J]. *兵工学报*, 2014, 35(12):2079-2086.
- [4] 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):190-197.
- [5] TANG H, LI Y G. Feedforward nonlinear PID control of a novel micromanipulator using Preisach hysteresis compensator[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, 34:124-132.
- [6] 李黎, 刘向东, 王伟, 等. 压电陶瓷执行器迟滞特性的广义非线性 Preisach 模型及其数值实现[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5):701-711.
- [7] STEFANSKI F, MINOROWICZ B, PERSSON J, et al. Non-linear control of a hydraulic piezo-valve[J]. *Systems and Signal Processing*, 2017, 82:412-431.
- [8] 王俐, 饶长辉, 饶学军, 等. 压电陶瓷微动台的复合控制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6):1266-1271.
- [9] 曾祥进, 黄心汉, 王敏, 等. 基于 Dahl 模型的压电陶瓷微夹钳控制研究[J]. *机械工程学报*, 2008, 19(7):766-768.
- [10] 胡小根, 李玉和, 林浩山, 等. 压电驱动器迟滞建模与开环控制实验研究[J]. *压电与声光*, 2010, 32(6):1000-1001.
- [11] 唐强, 吉方, 陈东生, 等. 压电陶瓷执行器的动态迟滞建模与零相差前馈补偿控制[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2015(9):95-98.
- [12] ORSZULIKA R R, SHAN J J. Output feedback integral control of piezoelectric actuators considering hysteresis[J]. *Precision Engineering*, 2017, 47:90-96.

Feedforward control of a piezoelectric microgripper using improved PI hysteresis model

CAI Yong-gen, CUI Yu-guo*, ZHAO Yu-jie, LIU Er-chun, LIU Kang, XUE Fei

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

Abstract: In order to reduce the hysteresis error of piezoelectric microgripper displacement, a feedforward controller is designed for controlling purposes. First, the dead-zone operator is introduced to the conventional PI hysteresis model, and the hysteresis model of piezoelectric microgripper is built for non singular symmetric and non convex curve of piezoelectric microgripper hysteresis. Then, through the inverse calculations of the hysteresis model, the feedforward control algorithm for piezoelectric micro-gripper is developed. Finally, the feedforward control of piezoelectric microgripper is tested. The results show that when the displacement of piezoelectric microgripper clamp is in the range of $0\sim 15.2\ \mu\text{m}$, the center line of the hysteresis error is reduced from $-1.35\sim-1.50\ \mu\text{m}$ with no control to $-0.95\sim-0.47\ \mu\text{m}$ with the feed forward control. The feedforward controller can significantly reduce the hysteresis error of piezoelectric microgripper and improve the tracking accuracy of the reference input.

Key words: piezoelectric microgripper; PI hysteresis model; threshold optimization; feedforward control

(责任编辑 史小丽)