

压电叠堆执行器迟滞建模与前馈补偿研究

朱 斌¹, 朱玉川¹, 李宇阳¹, 王晓露^{2,3}, 张鑫彬^{2,3}

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;

3. 上海伺服系统工程技术研究中心, 上海 201109)

摘要:针对压电叠堆执行器输入电压与输出位移的动态迟滞特性, 结合非对称静态 Bouc-Wen 迟滞模型, 建立了压电叠堆执行器动态迟滞模型, 并采用粒子群算法辨识出 6 个模型参数。为提高压电叠堆执行器动态位移输出精度, 进一步推导出压电叠堆执行器迟滞逆模型, 最终在此基础上对压电叠堆执行器进行前馈补偿研究。仿真与实验结果对比表明, 在 0~120 V 峰值电压与 0~500 Hz 激励频率内, 所建立的动态迟滞模型能够较好地描述与预测压电叠堆执行器的动态输出位移。前馈补偿实验研究结果表明, 利用所建的迟滞逆模型补偿后, 压电叠堆执行器的滞环减小, 输出位移非线性度下降约 3%。

关键词:压电叠堆; 迟滞; 执行器; Bouc-Wen 模型; 前馈补偿

中图分类号: TH137 文献标识码: A DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.009

Research on Modeling and Feedforward Compensation of the Hysteresis of Piezoelectric Stack Actuator

ZHU Bin¹, ZHU Yuchuan¹, LI Yuyang¹, WANG Xiaolu^{2,3}, ZHANG Xinbing^{2,3}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;

3. Shanghai Engineering Research Center of Servo Systems, Shanghai 201109, China.)

Abstract: Aiming at the dynamic hysteresis of piezoelectric stack actuator (PA) between input voltage and output displacement, the dynamic hysteresis model which based on the asymmetric Bouc-Wen hysteresis model was established; the six parameters of hysteresis model was recognized by the particle swarm algorithm. To improve dynamic output displacement of PA, the hysteresis inverse model was derived; the feedforward control was used to compensate the hysteresis. The results of simulation and experiment showed that when PA was driven by 0~120 V input peak voltage or 0~500 Hz driven frequency, the dynamic hysteresis model can well reflect and forecast the output dynamic displacement. The feedforward compensation experiment result shows that the feedforward compensation based on the inverse model can decreased the area of hysteresis loop and the non-linearity of output displacement is decreased about 3%.

Key words: piezoelectric stack; hysteresis; actuator; Bouc-Wen model; feedforward compensation

0 引言

压电叠堆执行器因压电叠堆能量密度高、响应快而广泛应用于精密定位系统^[1]。然而, 压电叠堆的迟滞特性在一定程度上影响了压电叠堆执行器位移输出精度。目前, 大量的迟滞模型应用于压电叠堆执行器迟滞特性的描述。描述迟滞的经典迟滞模

型主要有: 基于机理的物理模型 (Jiles-Atherton 模型、Duherm 模型等) 和基于现象的数学模型 (Preisach 模型、Bouc-Wen 模型等)^[2]。由于压电叠堆执行器的迟滞特性表现为率相关特性, 滞环的形状随着输入、输出信号的变化率和频率的变化而变化, 这种特性也称为动态迟滞特性^[3]。经典的迟滞模型不具有率相关性, 当输入电压频率变大时, 静态迟滞模

收稿日期: 2017-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51575258); 南京航空航天大学研究生创新基地 (实验室) 开放基金资助项目 (ykfjj20160518); 上海航天科技创新基金资助项目 (SAST2016081); 江苏省青蓝工程中青年学术带头人基金资助项目。

作者简介: 朱斌 (1993-), 男, 江苏扬州人, 硕士生, 主要从事压电叠堆执行器及压电静电液作动器研究。通信作者: 朱玉川 (1974-), 男, 教授, 主要从事压电叠堆执行器及压电静电液作动器研究。

型会造成一定的误差。Tzen 等将压电叠堆执行器输出位移分为线性部分和非线性部分,迟滞模型采用二阶动态模型与静态迟滞模型的串联,其中二阶动态模型用于描述线性部分,静态迟滞模型用于描述非线性部分^[4]。李黎等基于不对称指数函数迟滞算子构造动态 Preisach 模型描述压电叠堆执行器的动态迟滞现象,并采用神经网络完成参数辨识^[3]。在对压电叠堆执行器迟滞特性准确描述的基础上,基于迟滞逆模型的前馈补偿是提高压电叠堆执行器输出位移精度的有效方式。王代华等基于 Bouc-Wen 迟滞模型设计了前馈线性化控制器,有效提高了压电叠堆执行器的位移输出精度^[1]。曾祥进等基于 Dahl 模型对压电叠堆执行器进行前馈补偿,并结合 PID 反馈控制算法提高执行器的输出位移精度^[5]。本文结合文献^[6]中的非对称 Bouc-Wen 静态迟滞模型建立压电叠堆执行器的动态迟滞模型,描述压电叠堆执行器的动态迟滞特性。对非对称 Bouc-Wen 模型中的参数采用粒子群算法进行辨识,并基于非对称 Bouc-Wen 迟滞逆模型对压电叠堆执行器迟滞进行前馈补偿。

1 压电叠堆执行器迟滞建模

1.1 非对称 Bouc-Wen 静态迟滞模型

传统的 Bouc-Wen 静态迟滞模型不能反应迟滞非对称特性。因此,压电叠堆执行器的静态迟滞模型采用非对称 Bouc-Wen 模型^[6]:

$$\begin{cases} x = (k_1/k_0)u + h \\ \dot{h} = \dot{u}(A - \psi |h|) \\ \psi = \gamma + \phi_1 \operatorname{sgn}(\dot{u}h) + \phi_2 \operatorname{sgn}(\dot{u}) + \phi_3 \operatorname{sgn}(h) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u 为输入电压; $\dot{u}$ 为输入电压的导数; $\dot{h}$ 为迟滞位移 h 的导数。

非对称 Bouc-Wen 迟滞模型将压叠堆执行器的输出位移 x 分为线性位移 $(k_1/k_0)u$ 与 h 两部分。其中 k_1 为电压与力转换系数, k_0 为压电叠堆刚度, ψ 为形状控制函数, ψ 的取值为:

- 1) $\dot{u} > 0, h > 0, \psi = \gamma + \phi_1 + \phi_2 + \phi_3$;
- 2) $\dot{u} > 0, h < 0, \psi = \gamma - \phi_1 + \phi_2 - \phi_3$;
- 3) $\dot{u} < 0, h > 0, \psi = \gamma - \phi_1 - \phi_2 + \phi_3$;
- 4) $\dot{u} < 0, h < 0, \psi = \gamma + \phi_1 - \phi_2 - \phi_3$ 。

由于形状控制函数在 4 个区域具有 4 个相互独立的值,能够独立控制滞环 4 个区的形状,因此可以

实现迟滞模型的非对称性。其中 $A, \gamma, \phi_1, \phi_2, \phi_3$ 为滞环形状控制参数。

1.2 压电叠堆执行器动态迟滞模型

为了描述压电叠堆执行器迟滞的动态特性,将压电叠堆执行器等效为一个二阶动态系统并结合非对称 Bouc-Wen 迟滞模型建立压电叠堆执行器动态迟滞模型^[7]:

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x} + c_0 \dot{x} + k_0 x = \frac{k_1}{\tau} e^{-t/\tau} u + k_0 h \\ \dot{h} = \dot{u}(A - \psi |h|) \\ \psi = \gamma + \phi_1 \operatorname{sgn}(\dot{u}h) + \phi_2 \operatorname{sgn}(\dot{u}) + \phi_3 \operatorname{sgn}(h) \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_0, c_0 为压电叠堆执行器的等效质量、阻尼; τ 为电压与力转换的时间常数。

1.3 非对称 Bouc-Wen 迟滞模型的参数辨识

非对称 Bouc-Wen 迟滞模型中的参数采用粒子群算法进行辨识。采用粒子群算法可同时得到 $k_1/k_0, A, \gamma, \phi_1, \phi_2, \phi_3$ 这 6 个参数的值。令 $\theta = [k_1/k_0 \ A \ \gamma \ \phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3]$ 参数向量为搜索空间的一个粒子。粒子群算法在辨识时,跟踪两个最优值:每个粒子本身迄今找到的最优值(局部最优值)与整个群体找到的最优值(全局最优值)。首先在初始状态下建立大量的随机粒子,粒子总数为 N 。在每一次迭代中,每个粒子经测试函数

$$e_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{j=1}^m [x_r(k) - x_{\text{BW}}(k)]^2 / m} \quad (3)$$

计算得到本次迭代中的每个粒子的测试函数值,其中 m 为实测位移中的采样点数,将本次迭代每个粒子的测试函数值与局部最优粒子测试函数值比较,取测试函数最优的为局部最优粒子。再将局部最优值与全局最优值比较,取测试函数值较优的为全局最优粒子,更新粒子速度、位置,不断迭代直至测试函数收敛或达到迭代次数停止。其中粒子速度、位置的更新采用 shi 与 Eberhart 提出的带惯性权重的算法^[8]:

$$\begin{cases} v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 r_1 (P\theta_i(t) - \theta_i(t)) + \\ \quad c_2 r_2 (P_g\theta(t) - \theta_i(t)) \\ \theta_i(t+1) = \theta_i(t) + v_i(t+1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $c_1=2, c_2=2$ 均为粒子的加速度常数; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数; $P\theta_i(t)$ 为局部最优粒子; $P_g\theta(t)$ 为全局最优粒子, i 为当前粒子序号, g 为

全局最优粒子序号。

将 $u = 40 + 40\sin(2\pi \times 0.5)(V)$ 的电压输入压电叠堆执行器,得到一组实测的电压-位移曲线。将实测数据代入粒子群算法可得到 k_1/k_0 、 A 、 γ 、 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 的值。迟滞参数的收敛过程如图 1 所示。

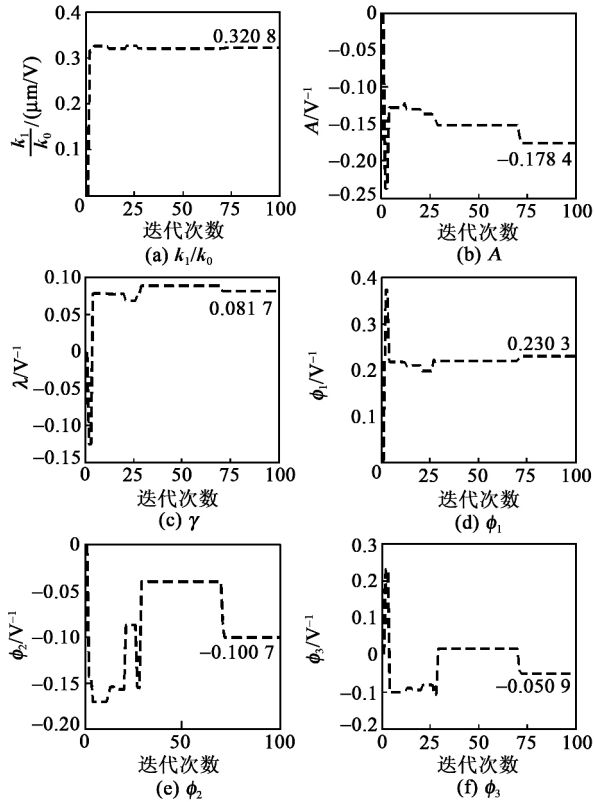


图 1 迟滞参数收敛过程曲线

表 1 为动态迟滞模型中的相关参数值。

表 1 压电叠堆执行器仿真参数

m_0/kg	0.219
$k_0/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	180
$c_0/[\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^{-1})]$	1 500
τ/s	6×10^{-5}

2 压电叠堆执行器的前馈补偿

压电叠堆执行器前馈控制原理如图 2 所示。信号发生器产生的正弦电压 u_s 放大得到的电压 u 经前馈控制器计算输出补偿后的电压 u' 经功率放大器放大作用于压电叠堆执行器(放大倍数 $k_p = 16$)。

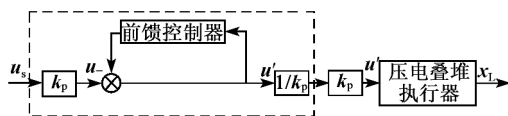


图 2 压电叠堆执行器控制原理图

在无迟滞的理想情况下,压电叠堆执行器输出

位移与输入电压满足:

$$x_L = (k_1/k_0)u \quad (5)$$

式中: x_L 为压电叠堆执行器线性位移; $u = k_p u_s$ 为压电叠堆执行器的输入电压。

为了得到压电叠堆执行器线性位移输出,须对压电叠堆执行器的输入电压进行补偿。根据式(1)和(5)输入补偿电压为

$$u' = k_p u_s - (k_0/k_1)h \quad (6)$$

因此,基于非对称 Bouc-Wen 迟滞逆模型的前馈补偿算法:

$$\begin{cases} u = k_p u_s - (k_0/k_1)h \\ \dot{h} = \dot{u}'(A - \phi |h|) \\ \phi = \gamma + \phi_1 \text{sgn}(\dot{u}'h) + \phi_2 \text{sgn}(\dot{u}') + \phi_3 \text{sgn}(h) \end{cases} \quad (7)$$

3 实验与仿真研究

3.1 实验平台的搭建

搭建的实验平台如图 3 所示。信号发生器产生的正弦电压经功率放大器线性放大作用于压电叠堆执行器,压电叠堆执行器产生的位移经电涡流传感器测量并在示波器显示。

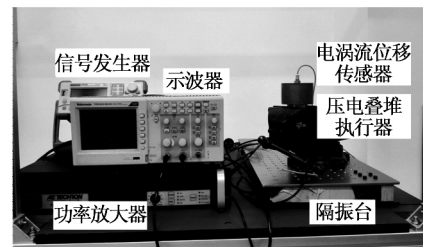


图 3 压电叠堆执行器测试平台

3.2 动态迟滞模型验证

为了验证动态迟滞 Bouc-Wen 模型的准确性,不同频率、峰值电压的正弦电压作用于压电叠堆执行器并通过电涡流位移传感器测量压电叠堆执行器的输出位移。将峰值电压为 80 V,不同频率正弦电压作用于压电叠堆执行器得到电压-位移曲线(见图 4)。不同频率正弦电压作用下压电叠堆执行器滞环实验与仿真的对比表明:电压驱动频率在 500 Hz 内,动态迟滞模型能够较好地描述不同频率作用下压电叠堆执行器的动态输出位移。图 5 为不同峰值正弦电压作用下压电叠堆执行器实验与仿真滞环对比图,由图 5 可知,动态迟滞模型能够反映峰值电压的变化对压电叠堆执行器滞环的影响。由于峰值电压趋于最大输入电压时,压电叠堆执行器输出位移趋于饱和,动态迟滞模型输出位移与实验位移误差

有所增加。

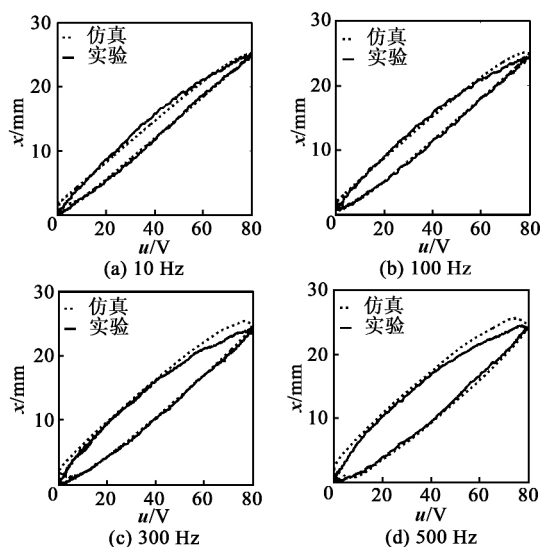


图 4 不同频率执行器滞环实验与仿真对比

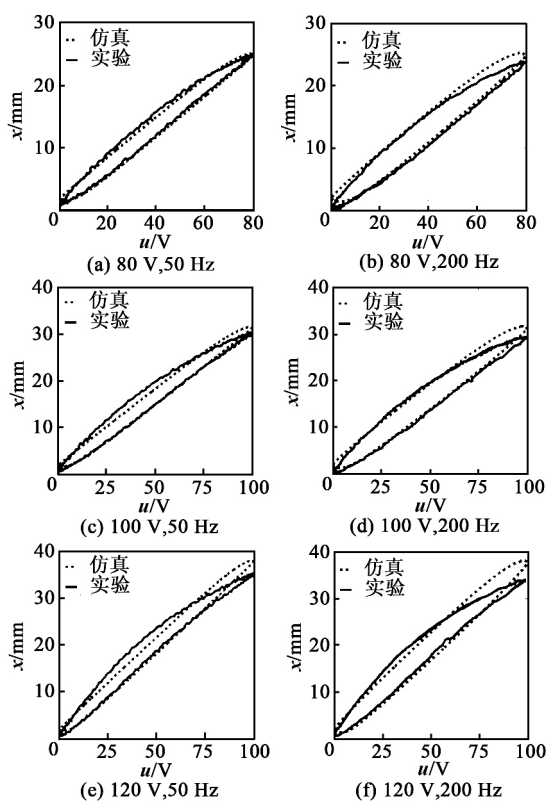


图 5 不同峰值电压执行器滞环实验与仿真对比

3.3 前馈控制补偿实验

前馈补偿算法在 DSP 中编程实现, DSP 中 ADC 采样信号发生器电压, 经前馈控制算法得到的电压值经 DAC 输出, 输出电压经功率放大器放大作用于压电叠堆执行器。

图 6 为补偿前后输入到功率放大器的电压图, 补偿后电压峰-峰值较未补偿的电压峰-峰值略大。

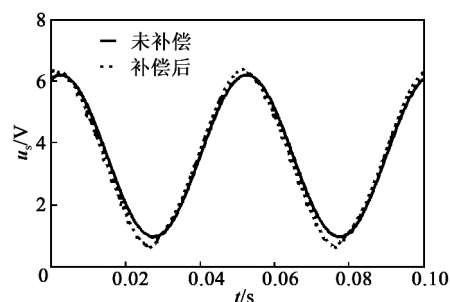


图 6 未补偿电压与前馈补偿电压对比图

图 7 为信号发生器产生的电压与压电叠堆执行器位移滞环图, 前馈补偿后滞环变小。

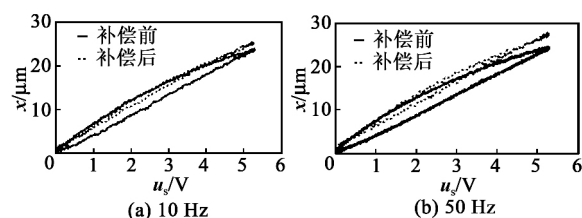


图 7 前馈补偿前后, 执行器位移滞环

4 结束语

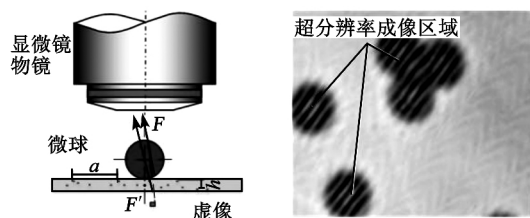
基于非对称 Bouc-Wen 静态迟滞模型对压电叠堆执行器迟滞特性进行动态迟滞建模。仿真与实验对比表明, 驱动电压频率在 500 Hz 内且峰值电压在 120 V 内, 建立的动态迟滞模型能够描述与预测压电叠堆执行器迟滞的动态输出位移。对压电叠堆执行器迟滞特性采用基于非对称 Bouc-Wen 迟滞逆模型的前馈补偿, 前馈补偿后压电叠堆执行器的滞环明显减小, 非线性度下降约 3%。

参考文献:

- [1] 王代华, 严松林, 朱炜. 基于 Bouc-Wen 模型的压电执行器的前馈线性化控制器[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7): 1514-1521.
WANG Daihua, YAN Songlin, ZHU wei. Bouc-Wen model based feedforward linearization controller for piezoceramic micro-actuators[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(7): 1514-1521.
- [2] 赖志林, 刘向东, 耿洁. 压电陶瓷执行器的类 Hammerstein 模型及其参数辨识[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 2087-2094.
LAI Zhilin, LIU Xiangdong, GENG Jie. Hammerstein-based model of piezoceramic actuator and its identification[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(9): 2087-2094.
- [3] 李黎, 刘向东, 侯朝桢, 等. 基于不对称指数函数迟滞算

(下转第 46 页)

限,实现超分辨率成像,其结构图如图 12(a)所示,但是,将微球洒落在样品表面的传统方法,无法控制微球的位置,并有可能破坏样品表面结构。利用多指微操作工具可以控制微球的释放位置,从而对样品表面的特定区域显微成像。通过组装微球可以对样品表面连续的一整块区域进行观察,从而拓展显微区域,其效果如图 12(b)所示。



(a) 微球透镜显微成像结构 (b) 微球透镜成像效果图

图 12 超分辨率成像微球实验

3 结束语

本文设计并制造了一种基于压电驱动的多指微操作工具,该微操作工具具有柔性化工作特性,由 3 个单指微操作工具和微动调节座组成,结构简单,有较大的夹持范围。每个单指的执行末端可更换,以适应不同的操作任务。通过实验分别验证了微操作工作单指、双指及三指的工作能力,拾取与释放操作成功率在 85% 以上。采用不同的操作方式,能够对不同材质、结构的微球进行操作,操作的微球尺寸最小为 $10\ \mu\text{m}$,最大为 $800\ \mu\text{m}$,其中,三指操作模式能够不依赖于粘附力完成微纳操作。利用该多指微操作工具完成了微球组装和超分辨率成像微球操作的实验,这样的拓展应用证明了该操作器具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 郝永平,董福祿,张嘉易,等. 基于 MEMS 机构装配的微夹持器研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(5): 596-601.
HAO Yongping, DONG Fulu, ZHANG Jiayi, et al. Study on micro-gripper based on MEMS mechanism assembly[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(5): 596-601.
- [2] XU Qingsong. Design, fabrication, and testing of an MEMS microgripper with dual-axis force sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(10): 6017-6026.
- [3] 高群,周鹏骥,王晓东. 一种非对称式压电驱动微夹持器[J]. 纳米技术与精密工程, 2014, 12(6): 435-440.
GAO Qun, ZHOU Pengji, WANG Xiaodong. An asymmetric micro-gripper actuated by piezoelectric ceramics[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2014, 12(6): 435-440.
- [4] 包丽雅,周娴. 用于微装配的二级放大微夹持器的设计与实验[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(1): 47-49.
BAO Liya, ZHOU Xian. Design of micro-gripper with two-stage amplifier for micro-assembly and its experimental research[J]. Machine Design and Research, 2014, 30(1): 47-49.
- [5] 姚萌,杜慧玲,史翔,等. 无铅压电叠层驱动器极化工艺及驱动性能研究[J]. 压电与声光, 2017, 39(1): 92-96.
YAO Meng, DU Huiling, SHI Xiang, et al. Study on the polarizing technique and driving performance of stack actuator based on lead-free piezoelectric ceramic [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(1): 92-96.
- [6] 李巍. 压电作动器迟滞非线性建模与补偿控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [7] 郭亚子,朱玉川. 压电叠堆执行器迟滞非线性建模与分析[J]. 压电与声光, 2017, 39(04): 520-524.
GUO Yazi, ZHU Yuchuan. Modeling and analysis on hysteresis nonlinear characteristics of the piezoelectrics stack actuators[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(04): 520-524.
- [8] 李丽,牛奔. 粒子群优化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.

(上接第 41 页)

子的压电陶瓷执行器动态 Preisach 迟滞模型[J]. 中国机械工程, 2009, (12): 1468-1472.

LI Li, LIU Xiangdong, HOU Chaozhen, et al. Dynamic hysteresis preisach model of a piezoceramic actuator based on asymmetric exponential function hysteresis operators [J]. China Mechanical Engineering, 2009, (12): 1468-1472.

- [4] TZEN J J, JENG S L, CHIENG W H. Modeling of piezoelectric actuator for compensation and controller design[J]. Precision Engineering, 2003, 27(1): 70-86.

- [5] 曾祥进,黄心汉,王敏. 基于 Dahl 模型的压电陶瓷微夹钳控制研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(7): 766-769.
ZENG Xiangjin, HUANG Xinhuan, WANG Min. Study

on piezoelectric micro-gripper's control based on dahl model [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(7): 766-769.

- [6] 李巍. 压电作动器迟滞非线性建模与补偿控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [7] 郭亚子,朱玉川. 压电叠堆执行器迟滞非线性建模与分析[J]. 压电与声光, 2017, 39(04): 520-524.
GUO Yazi, ZHU Yuchuan. Modeling and analysis on hysteresis nonlinear characteristics of the piezoelectrics stack actuators[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(04): 520-524.
- [8] 李丽,牛奔. 粒子群优化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.