

引用格式:赵庆旭,王一帆,吴文鹏,等. 压电陶瓷驱动平台的复合控制方法研究[J]. 电光与控制,2019, 26(6):80-84, 105. ZHAO Q X, WANG Y F, WU W P, et al. On composite control method for piezoelectric ceramic driving platform[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(6):80-84, 105.

## 压电陶瓷驱动平台的复合控制方法研究

赵庆旭, 王一帆, 吴文鹏, 胡 贞  
(长春理工大学, 长春 130022)

**摘要:** 压电陶瓷驱动平台的迟滞非线性影响其定位精度,并降低原子力显微镜等微纳操纵系统对微纳米尺度样品的扫描成像质量。采用最小二乘法对压电陶瓷驱动平台的迟滞特性进行建模,避免了繁琐的迟滞模型求取过程;提出前馈控制与自抗扰控制相结合的复合控制方法,通过设定扩张观测器的带宽及系统控制带宽达到消除迟滞、提高平台定位精度的目的。实验结果表明,该复合控制方法在保证系统稳定性的前提下能有效地提高系统定位控制精度。

**关键词:** 压电陶瓷驱动平台; 迟滞; 定位精度; 自抗扰控制; 复合控制

**中图分类号:** TP273.3      **文献标志码:** A      **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.06.016

## On Composite Control Method for Piezoelectric Ceramic Driving Platform

ZHAO Qing-xu, WANG Yi-fan, WU Wen-peng, HU Zhen  
(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The hysteresis nonlinearity of piezoelectric ceramic driving platform affects its positioning accuracy, and reduces the quality of such micro-nano manipulation systems as atomic force microscopy for scan imaging of micro/nanoscale samples. The hysteresis characteristics of piezoelectric ceramic driving platform are modeled by the least squares method, thus the cumbersome hysteresis model acquisition process is avoided. The composite control method combining feed-forward control with active disturbance rejection control is proposed. By setting the bandwidths of the expansion observer and the system control, the purpose of eliminating hysteresis and improving the positioning accuracy of the platform is achieved. The experimental results show that the composite control method can effectively improve the system positioning control accuracy under the premise of ensuring system stability.

**Key words:** piezoelectric ceramic driving platform; hysteresis; positioning accuracy; active disturbance rejection control; composite control

### 0 引言

随着科技的发展,人们对世界的认知开始从宏观世界转向微观世界。纳米技术作为“国家安全的新边疆”<sup>[1]</sup>,许多国家开始对其进行深入研究。压电陶瓷驱动平台因具有驱动力大和响应速度快等优点,被广泛应用于微纳米级装备制造与加工,但其本身固有的迟滞非线性严重影响定位精度,限制其推广应用<sup>[2]</sup>。

为消除迟滞非线性对压电陶瓷驱动平台造成的不利影响,许多学者对此展开研究。李春涛等<sup>[3]</sup>基于Preisach构造了一种易于在线更新的迟滞模型,并针对

该模型设计神经网络控制器对迟滞进行补偿;刘向东等<sup>[4]</sup>针对一阶微分方程形式的迟滞模型,提出一种基于动态滑模原理的跟踪控制器,有效地补偿了压电陶瓷的迟滞特性;周森磊等<sup>[5]</sup>利用BP神经网络迟滞逆模型与专家模糊控制相结合的复合控制方法,有效地消除迟滞对定位平台的定位精度影响;WANG等<sup>[6]</sup>针对改进PI迟滞模型提出一种鲁棒自适应控制方法,提高系统的定位精度;LI等<sup>[7]</sup>提出包含输入变量的KP模型表达式,并求取逆模型设计出逆补偿器,成功应用于压电微定位平台;KO等<sup>[8]</sup>将PI模型的辨识归结成非线性优化问题,并确定逆模型和前馈控制器,实现对压电陶瓷驱动平台迟滞特性的补偿;HABINEZA等<sup>[9]</sup>将Bouc-Wen迟滞模型扩展到多变量迟滞系统,并提出了基于逆乘法结构与Bouc-Wen模型的多变量迟滞补偿器,成功应用于三自由度压电陶瓷驱动平台的迟滞

收稿日期:2018-12-24

修回日期:2019-01-25

基金项目:吉林省自然科学基金(201554)

作者简介:赵庆旭(1995—),男,吉林安图人,硕士生,研究方向为机器人测制技术。

建模和补偿;PENG等<sup>[10]</sup>利用PID调节器代替切换函数并应用于压电陶瓷驱动平台,很好地补偿了迟滞;XU等<sup>[11]</sup>提出了一种增强型模型预测滑模控制方法,实现了纳米级的跟踪定位;LIU等<sup>[12]</sup>提出一种基于动态线性化的多层前馈神经网络模型的预测控制器,并引入误差补偿项来消除系统的稳态误差,实现了良好的控制效果;SU等<sup>[13]</sup>采用微分方程描述了 Backlash-like 迟滞模型,并设计出鲁棒自适应控制器保证压电陶瓷驱动平台的稳定性和跟踪性能;乔继红<sup>[14]</sup>针对 Bouc-Wen 迟滞模型提出一种基于滑模观测器的反演控制器,最后证明了该方法的有效性;左守印等<sup>[15]</sup>提出一种求解PI逆模型参数的算法,并将基于该算法的PI逆模型作为前馈控制,实现了迟滞的补偿。

针对压电陶瓷驱动平台的迟滞特性,提出采用二阶多项式模型对其进行拟合,并计算出迟滞逆模型作为前馈控制消除迟滞;在此基础上结合自抗扰控制器进一步消除平台的迟滞特性,提高系统定位精度;最后,通过仿真将设计的复合控制器与传统PI控制器分别应用于压电陶瓷驱动平台,对比仿真结果证明了该控制方法的有效性。

### 1 压电陶瓷驱动平台建模及控制器设计

压电陶瓷驱动平台可看作是迟滞系统与线性二阶系统的串联,如图1所示,对迟滞系统部分和线性系统部分分别进行建模。



图1 压电陶瓷驱动平台等效模型

Fig.1 Equivalent model of piezoelectric ceramic driving platform

#### 1.1 压电陶瓷迟滞非线性建模

考虑到模型复杂程度与工程的可实现性,采用二阶多项式模型来拟合压电陶瓷驱动平台的迟滞非线性曲线。对实验室开发的微纳操纵系统中压电陶瓷驱动平台施加0~100V的电压,将所得数据通过Matlab进行仿真,得到迟滞曲线如图2所示。

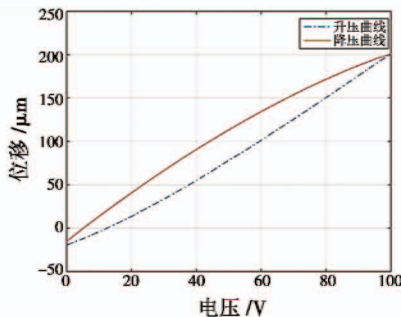


图2 压电陶瓷驱动平台的迟滞曲线

Fig.2 Hysteresis curves of piezoelectric ceramic driving platform

升压曲线和降压曲线的描述方程分别为

$$x(u_1) = a_1 u_1^2 + b_1 u_1 + c \quad (1)$$

$$x(u_2) = a_2 u_2^2 + b_2 u_2 + c \quad (2)$$

利用Matlab最小二乘法进行二阶拟合得到

$$x(u_1) = 0.0052u_1^2 + 1.7u_1 - 22 \quad (3)$$

$$x(u_2) = -0.0081u_2^2 + 3u_2 - 15 \quad (4)$$

对多项式模型求取逆模型,并作为前馈控制器来消除迟滞非线性,其逆模型为

$$u_1 = \sqrt{\frac{4a_1(x_1 - c) + b_1^2}{4a_1^2}} - \frac{b_1}{2a_1} \quad (5)$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{4a_2(x_2 - c) + b_2^2}{4a_2^2}} - \frac{b_2}{2a_2} \quad (6)$$

将逆模型作为前馈控制器加入系统,逆模型的输入量是期望的输出位移,逆模型的输出量是压电陶瓷驱动平台的控制输入,实现迟滞的补偿。前馈控制如图3所示。

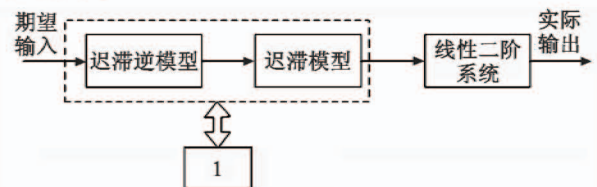


图3 前馈控制

Fig.3 Feed-forward control

图3中,1表示模型与逆模型的组合相当于数值为1的比例环节。

#### 1.2 压电陶瓷线性部分建模

采用弹性圈替代柔性铰链实现纳米级位移<sup>[16]</sup>,假设:在电场作用下,压电陶瓷伸长形变的时间远少于机械形变的时间,则可以忽略不计。压电陶瓷驱动平台在空载情况下动力学模型如图4所示。其中: $m_1$ 为压电陶瓷驱动平台运动部分的质量; $m_2$ 为压电陶瓷的质量; $r$ 为压电陶瓷驱动平台的阻尼; $k_1, k_2$ 分别为弹性圈和压电陶瓷的刚度。

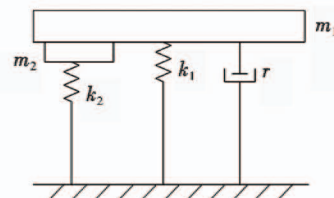


图4 压电陶瓷驱动平台模型

Fig.4 Piezoelectric ceramic driving platform model

根据图4建立压电陶瓷驱动平台在空载情况下的微分方程为

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + r x_1 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = 0 \quad (7)$$

由拉普拉斯变换可得



$$m_1 s^2 x_1(s) + r s x_1(s) + (k_1 + k_2) x_1(s) - k_2 x_2(s) = 0 \quad (8)$$

得到压电陶瓷驱动平台在空载下的传递函数为

$$G_b(s) = \frac{k_2}{m_1 s^2 + r s + k_1 + k_2} \quad (9)$$

亦可写为

$$G_b(s) = \frac{k \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

式中： $k$ 为放大系数； $\xi$ 为阻尼比； $\omega_n$ 为压电陶瓷驱动平台空载下的共振频率。下面分别对  $k, \xi$  和  $\omega_n$  进行定值。

图 5 所示为在输入信号是 0.1 mV 阶跃信号条件下系统的输入输出响应曲线。

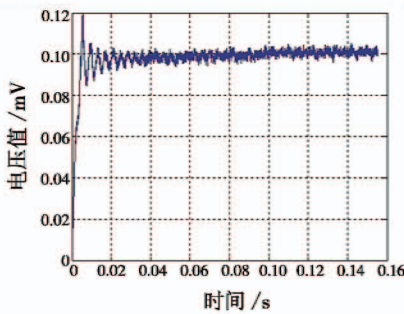


图 5 压电陶瓷驱动平台输入输出响应曲线  
Fig. 5 Input and output response curves of piezoelectric ceramic driving platform

根据图 5 可知,该压电陶瓷驱动平台的最大偏离量  $c(t_p)$  约为 0.12 V,峰值时间约为 0.006 s,由超调量  $\sigma$  算式

$$\sigma = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (11)$$

得到系统的最大超调量为 20%。

图 6 所示欠阻尼二阶系统阻尼比  $\xi$  与超调量  $\sigma$  的关系曲线表明该系统的阻尼比约为 0.46。

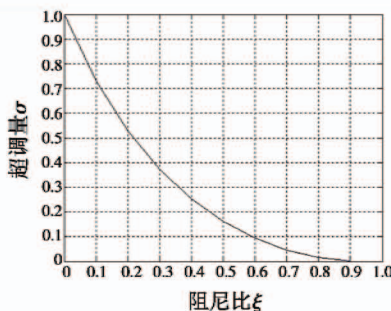


图 6 欠阻尼二阶系统阻尼比与超调量的关系曲线  
Fig. 6 Damping ratio vs overshoot of underdamped second-order system

由阻尼比与系统共振频率关系的数学表达式

$$\omega_n = \frac{\pi}{t_p \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (12)$$

可得无阻尼振荡频率  $\omega_n$  约为 590 rad/s。

放大倍数  $k$  由压电陶瓷驱动平台输入输出值可确定为 1,该平台的传递函数近似为

$$G(s) = \frac{348\ 100}{s^2 + 542.8s + 348\ 100} \quad (13)$$

其微分方程为

$$\ddot{y} = -542.8 \dot{y} - 348\ 100y + 348\ 100u \quad (14)$$

单纯采用前馈控制仅能达到消除迟滞的目的,但无法提升系统的增益,所以前馈控制的应用范围受到限制。因此,采用自抗扰控制技术作为反馈控制器,结合逆模型的前馈控制形成复合控制方法,提升系统增益且保障系统的控制精度和稳定性。自抗扰控制原理如图 7 所示。

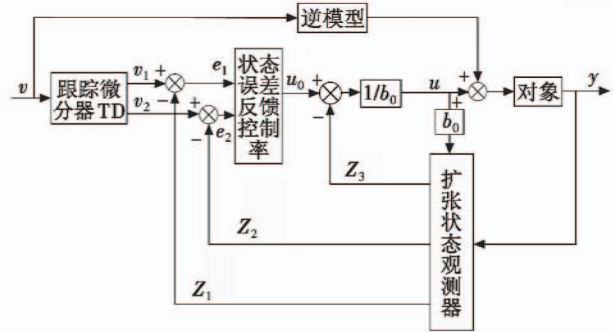


图 7 控制原理

Fig. 7 Control principle

图 7 中:跟踪微分器的输出  $v_1$  和  $v_2$  是对系统输入信号  $v$  的跟踪及微分; $Z_1, Z_2$  和  $Z_3$  是对系统输出  $y$  的跟踪。

针对二阶受控系统

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + bu = -a_1 \dot{y} - a_0 y + w + b_0 u \quad (15)$$

设计自抗扰控制律

$$\begin{cases} u_0 = k_p(r_1 - l_1) - k_d l_2 \\ u = \frac{u_0 - l_3}{b_0} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $k_p, k_d$ 为控制参数; $r_1$ 为系统期望输出; $w$ 为未知扰动; $l_1, l_2$ 和  $l_3$ 为模型辅助的线性扩张状态观测器(LESO)增益矩阵  $L$  的输出,增益矩阵  $L$  的表达式为

$$L = [l_1 \quad l_2 \quad l_3]^T \quad (17)$$

式(15)的连续扩张状态空间描述为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ew \\ y = Cx \end{cases} \quad (18)$$

式中: $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -a_0 & -a_1 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ -a_1 b_0 \end{bmatrix}; E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; C =$

[1 0 0]。

对应模型辅助的 LESO 为

$$\begin{cases} \dot{z} = [A - LC]z + [B \ L]u_c \\ y_c = z \end{cases} \quad (19)$$

式中： $u_c = [u \ y]^T$  为组合输入； $y_c$  为输出。

由

$$\lambda(s) = |sI - (A - LC)| = (s + w_o)^3 \quad (20)$$

可求得观测器的增益矩阵  $L$ 。式中： $I$  为单位矩阵； $w_o$  为观测器的带宽。

### 2 仿真研究

为了验证线性自抗扰控制器(LADRC)对压电陶瓷驱动平台的控制效果,在 Matlab/Simulink 环境下建立压电陶瓷驱动平台模型,并搭建自抗扰控制器和 PI 控制器,对平台实现闭环控制的数值仿真。自抗扰控制器如图 8 所示。

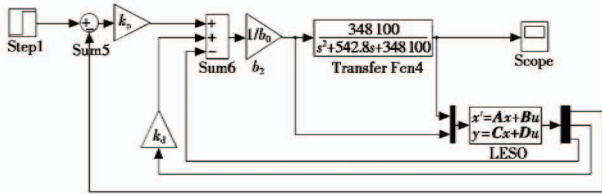


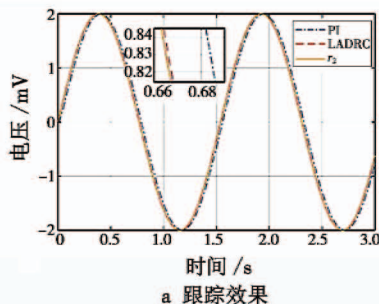
图 8 线性自抗扰控制器

Fig. 8 Linear active-disturbance rejection controller

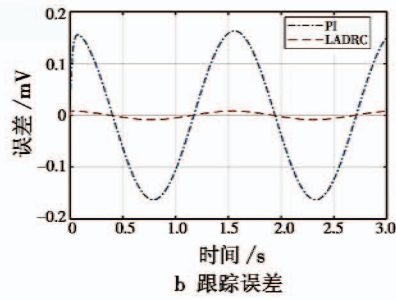
自抗扰控制器参数的选取按文献[17]所提供的方法,在保障稳定系统的前提下,令仿真中的观测器带宽  $w_o = 9000$ ,控制带宽  $w_c = 2000$ , $b_o = 500\ 000$ , $k_p = w_c^2$ , $k_d = -2w_c$ 。PI 控制参数选取为  $K_p = 0.014$ , $K_i = 50$ 。输入信号  $r_2$  选择正弦信号  $2\sin(1.3\pi t)$  和锯齿波信号,由于前馈补偿后的结果可能存在误差,所以实验分别在以下两种情况下进行。

1) 情况 1:前馈控制补偿后迟滞对系统影响小,可以忽略此误差。

忽略前馈控制可能造成的误差,对补偿后的平台输入正弦信号时,平台的跟踪效果如图 9a 所示,图 9b 为跟踪偏差。



a 跟踪效果

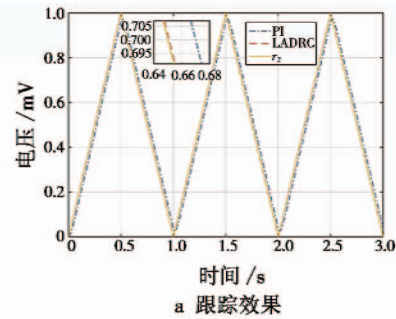


b 跟踪误差

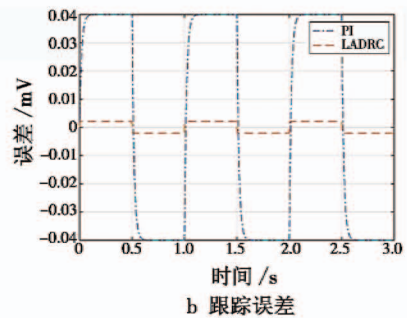
图 9 正弦给定时 LADRC 和 PI 的定位效果

Fig. 9 LADRC and PI positioning effect under given sinusoidal wave

图 10 给出了输入为锯齿波信号时,平台的跟踪控制效果。



a 跟踪效果



b 跟踪误差

图 10 锯齿波给定时 LADRC 和 PI 的定位效果

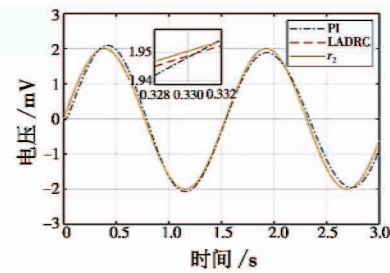
Fig. 10 LADRC and PI positioning effect under given sawtooth wave

仿真结果表明,PI 控制的输出波形与期望波形有较大偏差,而自抗扰控制的输出波形与期望波形几乎重合。由此可见,自抗扰控制能够有效地提高定位精度。

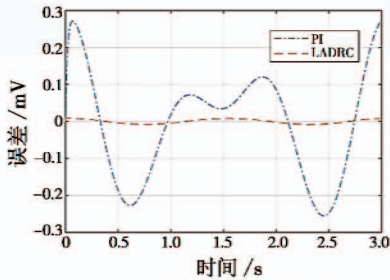
2) 情况 2:前馈控制补偿后迟滞对系统影响大,需进一步消除迟滞。

假定前馈控制补偿后残余迟滞对系统影响较大,可将残余迟滞看作系统内部扰动,与外部扰动统一设定为正弦干扰信号。自仿真开始对平台施加正弦干扰信号  $\sin(2\pi t)$  直至结束,保持 PI 控制器与自抗扰控制器的参数与上述仿真参数一致,来观察两个控制器对正弦信号及锯齿波信号的跟踪效果,如图 11 所示。

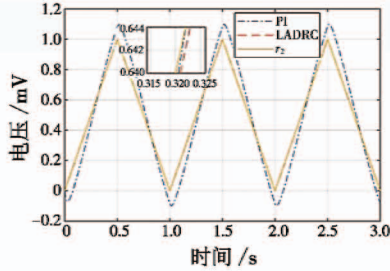




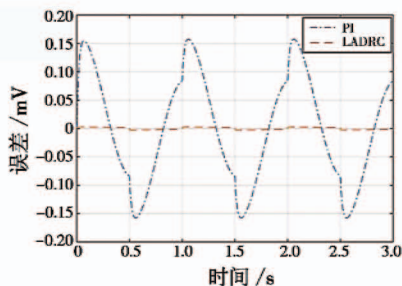
a 正弦给定下的跟踪效果



b 正弦给定下的跟踪误差



c 锯齿波给定下的跟踪效果



d 锯齿波给定下的跟踪误差

图 11 干扰信号下 LADRC 和 PI 的定位效果

Fig. 11 Positioning effect of LADRC and PI under interference signal

由图 11 可以看出,加入正弦干扰后,由于扩张观测器能够快速对干扰信号进行估计,并对其进行补偿,所以自抗扰控制器使压电陶瓷驱动平台的定位控制效果很快恢复,保持良好的控制效果;而 PI 控制器不能很好地对加入干扰信号的平台做出及时调整,无法保证定位的控制效果。

### 3 结束语

前馈控制在一定程度上消除了平台的迟滞,将模型可能带来的误差和前馈补偿后存在的误差视为扰动,利用自抗扰的扩张观测器可以及时估计并消除扰

动,通过仿真实验验证了自抗扰控制器对提高定位精度的有效性,这种复合控制方法为提高压电陶瓷驱动平台的定位精度提供了一种行之有效的方案。

### 参考文献

- [1] 李三虎. 纳米技术: 国家安全的新边疆[J]. 工程研究—跨学科视野中的工程, 2011, 3(4): 323-329.
- [2] KAWAMATA A, KADOTA Y, HOSAKA H, et al. Self-sensing piezoelectric actuator using permittivity detection [J]. *Ferroelectrics*, 2008, 368(1): 194-201.
- [3] 李春涛, 谭永红. 基于状态观测器的迟滞非线性系统输出反馈控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(9): 967-972.
- [4] 刘向东, 王伟. 一类迟滞模型的动态滑模跟踪控制器设计[J]. 控制与决策, 2007, 22(8): 878-881.
- [5] 周森磊, 张敬爱, 赵宇, 等. 压电微定位平台神经网络与专家模糊复合控制方法[J]. 控制与决策, 2018, 33(1): 95-100.
- [6] WANG Q, SU C Y. Robust adaptive control of a class of nonlinear systems including actuator hysteresis with Prandtl-Ishlinskii presentations [J]. *Automatica*, 2006, 42(5): 859-867.
- [7] LI Z, SHAN J, GABBERT U. Inverse compensation of hysteresis using Krasnoselskii-Pokrovskii model [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(2): 966-971.
- [8] KO Y R, HWANG Y, CHAE M, et al. Direct identification of generalized Prandtl-Ishlinskii model inversion for asymmetric hysteresis compensation [J]. *ISA Transactions*, 2017, 70: 209-218.
- [9] HABINEZA D, RAKOTONDRABE M, LE GORREC Y. Bouc-Wen modeling and feedforward control of multivariable hysteresis in piezoelectric systems: application to a 3-DoF piezotube scanner [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(5): 1797-1806.
- [10] PENG J Y, CHEN X B. Integrated PID-based sliding mode state estimation and control for piezoelectric actuators [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(1): 88-99.
- [11] XU Q, LI Y. Model predictive discrete-time sliding mode control of a nano-positioning piezostage without modeling hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(4): 983-994.
- [12] LIU W, CHENG L, HOU Z G, et al. An inversion-free predictive controller for piezoelectric actuators based on a dynamic linearized neural network model [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(1): 214-226.

(下转第 105 页)

### 3 结束语

为了降低微机械陀螺仪的温度漂移,本文提出了一种基于PSO调节SVM参数的建模与补偿方法。首先,用于建模的温度漂移数据采用20 s数据(即1000组数据)平滑预处理;然后,采用支持向量机构造漂移模型,保证泛化能力。PSO方法用于优化支持向量机的参数,提高了建立模型的精度。通过大量的温度实验验证了本文方法的有效性。结果表明,与最小二乘法、BP神经网络方法相比,PSO调节SVM的补偿数据方差分别减小了81.3%和57%,最大误差分别减小54.7%和48.5%。另外,将本文方法应用于多个微机械陀螺进行补偿,效果都明显优于其他两种方法,证明本文方法有很强的泛化能力。

### 参考文献

- [1] WANG L, ZHANG W, ZHANG Z P, et al. Spinning frequency estimation algorithm of MEMS gyro's output signal based on FFT coefficient [J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(4):1789-1793.
- [2] KOURANI A, HEGAZI E, ISMAIL Y. Electronic frequency compensation of AlN-on-Si MEMS reference oscillators [J]. *Microelectronics Journal*, 2016, 54:72-84.
- [3] WU X Z, LIU Z L, LI S Y. Influence factors and enhancement on property of micro-silicon gyroscopes [J]. *Micro-nanoelectronic Technology*, 2003, 7(8):274-277.
- [4] HE J B, XIE J, HE X P, et al. Analytical study and compensation for temperature drifts of a bulk silicon MEMS capacitive accelerometer [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 239:174-184.
- [5] KUMAR P. Multilevel communication optimal least squares [C]//International Conference on Computational Science, Reykjavik, Iceland, 2015:1838-1847.
- [6] 陈辰,吕跃勇,马广富,等.基于神经网络的RLV再入段有限时间自适应姿态控制[J].*宇航学报*,2017,38(3):279-286.
- [7] VAPNIK V N. The nature of statistical learning theory [M]. New York:Springer, 1999.
- [8] 顾胜,魏蛟龙,皮德常.一种粒子群模糊支持向量机的航天器参量预测方法[J].*宇航学报*,2014,35(11):1270-1276.
- [9] FRIEDRICH S. Evolutionary tuning of multiple SVM parameters [J]. *Neurocomputing*, 2017, 64(2):107-117.
- [10] 王娟,刘明光.基于粒子群算法-最小二乘支持向量机算法的磁化曲线拟合[J].*电机与控制应用*, 2017, 44(7):26-29.
- [11] XAVIER A L, Jr, CELASCHI S. Groundwater monitoring of a hidric shortage crisis in Brazil based on LS-SVM forecasts for the city of São Paulo [J]. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2017, 8(1):1-9.
- (上接第84页)
- [13] SU C Y, STEPANENKO Y, SVOBODA J, et al. Robust adaptive control of a class of nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(12):2427-2432.
- [14] 乔继红.压电陶瓷驱动器的滑模观测器反演控制[J].*科学技术与工程*,2018(1):257-260.
- [15] 左守印,王合龙,周德召,等.基于几何法求解PI逆模型参数[J].*电光与控制*,2019,26(1):47-50,60.
- [16] 林伟,叶虎年,尹冬至,等.压电陶瓷微定位控制系统的规则控制研究[J].*华中科技大学学报:自然科学版*,2005,33(5):92-94.
- [17] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]//American Control Conference, IEEE, 2003. doi:10.1109/ACC.2003.1242516.
- (上接第99页)
- [5] 陈希林,傅裕松,尉洵楷.机载光电瞄准系统的现状与发展[J].*红外技术*,2006,26(2):421-423.
- [6] 刘洵,王国华,毛大鹏,等.军用飞机光电平台的研发趋势与技术剖析[J].*中国光学与应用光学*,2009,2(4):269-288.
- [7] 纪明,许培忠,徐飞飞.武装直升机光电系统的发展与对策[J].*舰船电子工程*,2010,31(1):2-7.
- [8] 沈君辉,杨光,陶忠,等.舰载直升机光电系统发展及其关键技术[J].*应用光学*,2015,36(2):162-170.
- [9] 阮潇琳,王志信,单洁.美军新一代舰载直升机——MH-60S/R多用途直升机[J].*国防科技*,2011,32(4):32-35.
- [10] SHALAL-ESA A. U. S. should consider re-design of missile defense system [R]. Washington:Reuters,2014.
- [11] MOLEBNY V, ZARUBIN P, KAMERMAN G. The dawn of optical radar; a story from another side of the globe [C]//The International Society for Optical Engineering, 2010. doi:10.1117/12.850086.
- [12] CHOW B G, SILBERGLITT R, MILNE C R, et al. Toward affordable systems III: portfolio management for army engineering and manufacturing development programs [R]. Santa Monica:RAND Corporation, 2012.