

文章编号 1004-924X(2015)12-3439-07

神经网络分数阶 $PI^{\mu}D^{\lambda}$ 在压电叠堆控制中的应用

李新波¹, 付云博^{1*}, 姜良旭¹, 杜娟², 石要武¹, 杨志刚³

- (1. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 大陆汽车电子(长春)有限公司净月分公司, 吉林 长春 130023;
3. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了克服压电叠堆的迟滞特性, 实现压电叠堆的精确控制, 建立了压电叠堆控制系统, 研究了该系统所用到的神经网络、分数阶微积分等算法。首先, 搭建了采集压电叠堆位移数据的硬件系统, 并对含有噪声的位移数据进行了滤波处理; 利用径向基函数(RBF)神经网络对压电叠堆建模, 得到了模型参数。然后, 利用 RBF 神经网络建模得到的 Jacobian 信息来整定分数阶 $PI^{\mu}D^{\lambda}$ 控制器中的参数对压电叠堆进行控制。最后, 与 RBF 整数阶 PID 对压电叠堆的控制效果进行了对比。结果显示: RBF 建模误差仅为位移实测数据的 0.22%, RBF 神经网络分数阶 $PI^{\mu}D^{\lambda}$ 控制系统输出稳定, 很好地跟随了给定。得到的结果表明 RBF 神经网络分数阶 $PI^{\mu}D^{\lambda}$ 控制器控制性能良好, 在压电叠堆的控制中比 RBF 整数阶 PID 控制器表现得更加稳定、精确。

关键词: 压电叠堆; 迟滞特性; 径向基函数(RBF)神经网络; 分数阶 $PI^{\mu}D^{\lambda}$

中图分类号: TP275; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152312.3439

Application of neural network fractional order $PI^{\mu}D^{\lambda}$ to piezoelectric stack control

LI Xin-bo¹, FU Yun-bo^{1*}, JIANG Liang-xu¹, DU Juan², SHI Yao-wu¹, YANG Zhi-gang³

- (1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. Continental Automotive Corporation Changchun Co. Ltd. Jingyue Branch, Changchun 130023, China;
3. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: 1156571223@qq.com

Abstract: To overcome the hysteresis characteristics of a piezoelectric stack and to control the piezoelectric stack more accurately, a control system for the piezoelectric stack was established and corresponding algorithms such as neural network, fractional order differential and integral calculus were investigated. First, a hardware platform was set up to collect displacement data of the piezoelectric stack and a wavelet algorithm was used to removal noise. The Radial Basis Function(RBF) neural network model of piezoelectric stack was built to obtain model parameters. Then, the Jacobian information obtained by RBF neural network model was used to set controller parameters of a fractional order $PI^{\mu}D^{\lambda}$ to control the piezoelectric stack. Finally, the comparative work between RBF fractional order

收稿日期: 2015-05-15; **修订日期:** 2015-07-13.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 51475198, No. 51375207); 中国博士后科学基金资助项目(No. 2015M570270); 吉林省青年科研基金资助项目(No. 20140520064JH)

PI^μD^λ and traditional RBF integer order PID was performed to demonstrate the effectiveness of the proposed control methodology. The results show that the RBF model error is only 0.22% that of measured displacement data. The output of fractional order PI^μD^λ control system is stable and has a good follow to the input. It concludes that the RBF neural network fractional order PI^μD^λ controller has good control performance, and it is more stable and accurate to RBF integer order PID in the control process of piezoelectric stacks.

Key words: piezoelectric stack; hysteresis characteristics; Radial Basis Function (RBF) neural network; fractional order PI^μD^λ

1 引言

压电陶瓷是一种高性能的功能材料,因具有精度高、响应快等优点而在精密结构、生物工程、纳米技术、微电子工程等领域均有着广泛的应用前景^[1]。压电陶瓷自身的物理结构易导致迟滞效应,为了克服迟滞效应带来的非线性,需对压电材料进行控制。目前,压电材料的控制主要分为迟滞逆模型补偿控制^[2-7]和闭环控制^[8-10]两大类。压电材料的迟滞模型主要有 Preisach 模型、PI 模型、KP 模型、Maxwell 模型、Duhem 模型等,这些模型解析式较为复杂,待辨识参数较多,逆模型补偿控制就是对上述模型求逆后再对压电材料进行开环控制,但这种方法会使系统的实时误差得不到利用,故控制系统的抗干扰能力不足。以比例-积分-微分(PID)控制为主的闭环控制在处理迟滞非线性系统时能力也有限,控制效果亦不佳。

近年来,分数阶微积分在各个领域中受到了越来越多的青睐,尤其是在控制领域中,分数阶模型可以提高动态系统的设计、控制能力,可以更加准确、细腻地描述系统的动态响应。将系统控制中应用广泛的 PID 算法与分数阶微积分结合,已经成为这几年来一个热门研究方向。分数阶 PI^μD^λ 最初由 Podlubny, I.^[11] 提出,它是在传统 PID 的基础上引入积分项和微分项的阶次^[12],从而使其对系统的控制比传统 PID 有着更大的可整定空间,整定性能也更加平滑、更加稳定,它使传统 PID 控制具有更强的生命力。

神经网络作为智能控制中的重要角色,其其对模型描述的精确性、对系统的鲁棒性、容错性方面都有着不可比拟的优势。本文利用压电材料的实测数据对其进行神经网络建模,提取神经网络

模型中的 Jacobian 信息,结合分数阶 PI^μD^λ 为压电材料设计了一个控制系统,以对其进行闭环精确控制。

2 分数阶微积分

2.1 分数阶微积分的定义

分数阶微积分并不是一个新鲜的概念,它在 300 多年前由 L'Hospital、Leibniz 等人创立,但当时一直没有用武之地,所以也并未受到关注。最近几十年来,社会发展对数学工具需求的增加和对数学理论研究的深入,使得分数阶微积分以其突出的优势成为了研究热点。

分数阶微积分的基本算子为 ${}_a D_t^\alpha$, 其中 α 为微积分的下限, t 为微积分的上限, α 为微积分的阶次,其表达式为:

$${}_a D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & R(\alpha) > 0 \\ 1 & R(\alpha) = 0 \\ \int_a^t (dt)^\alpha & R(\alpha) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$R(\alpha)$ 为阶次 α 的实部。

分数阶微积分的定义并不唯一,不同的数学家对其有着不同的定义,比较著名的有: Grünwald-Letnikov (GL) 定义和 Riemann-Leouville (RL) 定义。

(1) Grünwald-Letnikov (GL) 定义

设 $f(t)$ 在 $[a, t]$ 上 $n+1$ 阶可导,再将整数阶次 n 推广至实数范围,则得到 GL 微积分定义:

$${}^{\text{GL}} D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{(t-a)/h} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(t-jh), \quad (2)$$

其中 $\binom{\alpha}{j}$ 为二项式系数, $\binom{\alpha}{j} =$

$$\frac{\alpha(\alpha+1)\cdots(\alpha+j-1)}{j!}.$$

(2) Riemann-Leouville(RL)定义

$${}^{\text{RL}}D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \left[\frac{d}{dt} \right]^n \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau, \quad (3)$$

其中 $n-1 < \alpha < n, n \in \mathbb{N}, \Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数。

(3) 分数阶微积分的 Laplace 变换

GL 和 RL 定义下的分数阶微积分 Laplace 变换为

$$L[{}_0 D_t^\alpha f(t)] = s^\alpha L[f(t)]. \quad (4)$$

2.2 分数阶微积分实现方法

前面 GL、RL 所提供的分数阶微积分运算方法的前提是被运算函数 $f(t)$ 已知, 但实际工程或者应用中很多输入信号都是无法预知的。在这种情况下, Oustaloup 滤波器^[13,14]应运而生, 它是通过拟合分数阶微积分拉式算子 s^α 对信号进行分数阶微积分运算。如果拟合频段为 (ω_b, ω_h) , 则 Oustaloup 滤波器的传函为:

$$G_f(s) = K \prod_{k=0}^N \frac{s + \omega_k'}{s + \omega_k}, \quad (5)$$

式中: $K = \omega_h^\alpha$, $\omega_k' = \omega_b \omega_u^{(2k-1-\alpha)/N}$, $\omega_k = \omega_b \omega_u^{(2k-1+\alpha)/N}$, 其中 $\omega_u = \sqrt{\omega_h/\omega_b}$ 。后文的分数阶 $PI^\mu D^\lambda$ 就是利用 Oustaloup 滤波器实现分数阶微积分运算的。

3 RBF 神经网络

径向基函数(Radical Basic Function, RBF)神经网络是一种包含输入层、隐层、输出层的三层结构的前馈网络, 它具有运算量小、容错性强, 能够描述任意非线性模型等优点。RBF 神经网络的输入层到隐层为非线性映射, 隐层到输出层为线性映射, 这使得它的学习速度快并且不会陷入局部最小值。本文采用的 RBF 神经网络含有 3 个输入节点, 10 个隐层节点, 输入节点分别是压电材料的输入、输出和单位延迟输出, 其结构如下:

$\mathbf{H} = [h_1, h_2, \dots, h_{10}]$ 为径向基向量, h_i 为高斯基函数:

$$h_i = \exp\left(-\frac{\|X - C_i\|^2}{2b_i^2}\right), i=1, \dots, 10. \quad (6)$$

由于压电叠堆的迟滞特性使得其当前输出和历史输出都与输入有关, 所以这里令神经网络的

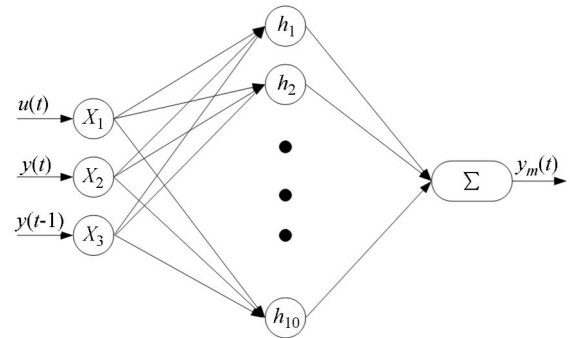


图 1 RBF 神经网络结构

Fig. 1 Structure of RBF neural network

输入层 $\mathbf{X} = [u(t), y(t), y(t-1)]^T$, 其中, $u(t)$ 、 $y(t)$ 、 $y(t-1)$ 分别为当前输入、当前输出、上一时刻输出。 C_i 为第 i 个隐层节点的中心点向量, b_i 为第 i 个隐层节点的高斯基函数半径。

神经网络输出 $y_m(t)$ 与基函数 h_i 的关系可通过权值向量 $\mathbf{W} = [\omega_1, \dots, \omega_{10}]$ 确定:

$$y_m(t) = \mathbf{W} \cdot \mathbf{H} = \omega_1 h_1 + \dots + \omega_{10} h_{10}. \quad (7)$$

神经网络的学习函数为:

$$E(t) = \frac{1}{2} [y(t) - y_m(t)]^2. \quad (8)$$

中心点 c_{ij} 和高斯基函数半径 b_i 通过 K-means 算法训练得到, 这里不再赘述, ω_i 的训练算法采用的是梯度下降法:

$$\omega_i(t) = \omega_i(t-1) + \eta [y(t) - y_m(t)] h_i + \alpha (\omega_i(t-1) - \omega_i(t-2)), \quad (9)$$

式中, η, α 分别为学习速度和惯性系数。

4 基于 RBF 神经网络的分数阶 $PI^\mu D^\lambda$ 控制器设计

4.1 分数阶 PID 结构

分数阶 $PI^\mu D^\lambda$ 控制器是从整数阶 PID 发展而来, 其调节范围不在仅仅局限于比例(P)、积分(I)、微分(D)3 个参数, 还可以调节积分和微分的阶次 μ, λ 。其传递函数为:

$$C(s) = K_P + K_I s^{-\mu} + K_D s^\lambda (0 < \lambda, \mu < 2). \quad (10)$$

相应的时域控制信号 $u(t)$ 为:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I D^{-\mu} e(t) + K_D D^\lambda e(t). \quad (11)$$

4.2 基于 RBF 神经网络的分数阶 $PI^\mu D^\lambda$ 参数整定

传统整数阶 PID 实际就是分数阶 $PI^\mu D^\lambda$ 在 μ 和 λ 都等于 1 时的一个特例,在参数整定时只需调整 P、I、D,而在分数阶 $PI^\mu D^\lambda$ 中 μ 和 λ 则需要

同 P、I、D 一起进行整定。首先对分数阶微积分阶次进行人工整定,根据积分阶次和微分阶次对系统性能的影响^[15],而且针对该系统多次试验经验,本文选择 $\mu=0.9$ 和 $\lambda=0.8$;然后对 P、I、D 3 个参数进行了自适应整定,控制系统结构图如下。

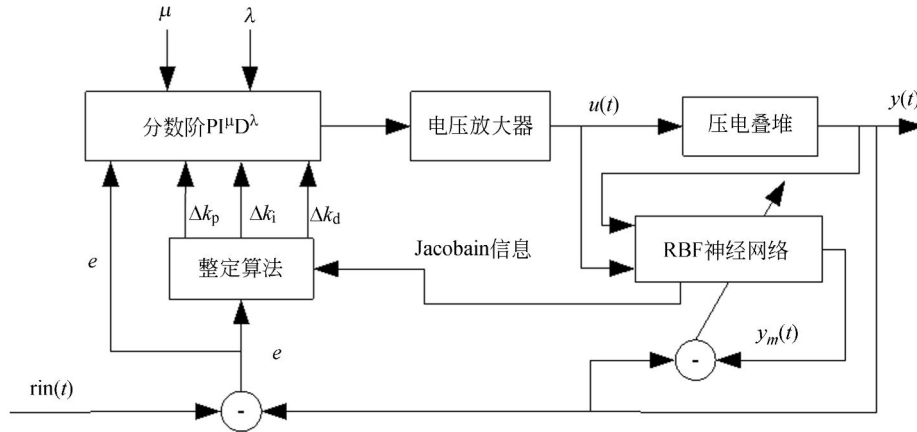


图 2 控制系统结构

Fig. 2 Structure of control system

整定算法的指标为:

$$E(t) = \frac{1}{2} (rin(t) - y(t))^2, \quad (12)$$

由梯度法可以得到 k_p 、 k_i 、 k_d 的迭代增量:

$$\Delta k_p = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_p} = \eta e(t) \frac{\partial y}{\partial u} e(t), \quad (13)$$

$$\Delta k_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_i} = \eta e(t) \frac{\partial y}{\partial u} D^{-\mu} e(t), \quad (14)$$

$$\Delta k_d = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_d} = \eta e(t) \frac{\partial y}{\partial u} D^\lambda e(t), \quad (15)$$

式中 $\frac{\partial y}{\partial u}$ 为压电材料的 Jacobain 信息,则有:

$$\frac{\partial y}{\partial u} \approx \frac{\partial y_m}{\partial u} = \sum_{i=1}^{10} \omega_i h_i \frac{c_{i1} - u(t)}{b_i^2}. \quad (16)$$

综上,得到了基于 RBF 神经网络的分数阶 $PI^{0.9}D^{0.8}$ 控制量:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i D^{-0.9} e(t) + k_d D^{0.8} e(t). \quad (17)$$

在实验时应注意的是由于压电叠堆能承受的电压是有限的,所以控制量不应超过一定额度,本文所用的压电材料能承受的电压上限是 150 V,

而实验中所用的电压放大器放大倍数为 15.4,所以设置该控制量的限额为 9。

5 实验

5.1 数据采集实验

利用 XPCTarget 平台对压电叠堆数据进行采集,采集系统结构如图 3 所示。首先将 XPC 主机上的程序通过以太网下载到目标机,然后运行程序,程序中的驱动信号通过采集板卡(NI PCI-6251)进入电压放大器(芯明天 HVA,放大倍数:15.4)模拟输入,然后用电压放大器模拟输出驱动压电叠堆(PS150/7/120 VS12),最后用激光测位移(LK-G5000)采集压电叠堆位移,并通过采集卡将其传输到 XPC 目标机中。

在采集过程中,外界噪声是不可避免的,本文利用小波变换技术去除噪声,基小波函数选择 'db6',分解步数选择 6 步。

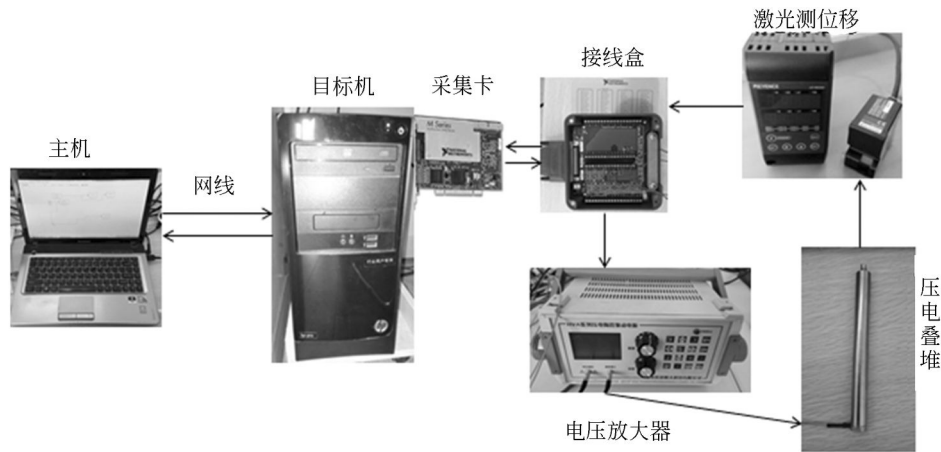
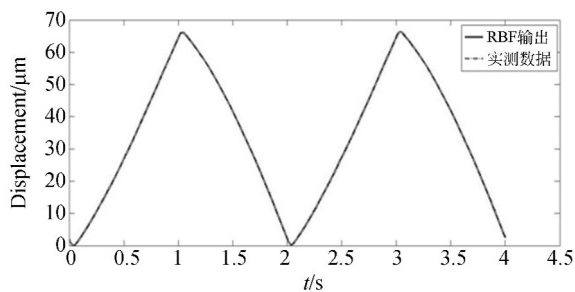


图 3 采集系统结构

Fig. 3 Structure of collection system

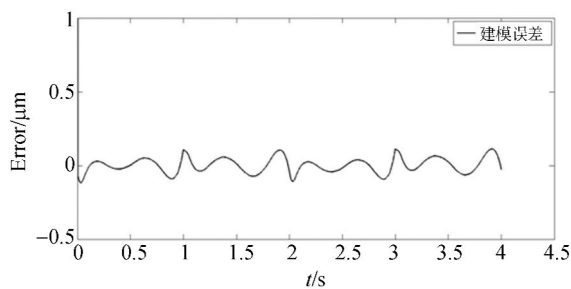
5.2 RBF 神经网络建模

以三角波电压驱动压电叠堆,得到图 4(a)中虚线所示的压电叠堆位移实测数据。再用图 1 所示 RBF 神经网络结构对压电叠堆的驱动电压和输出位移实测数据进行 RBF 建模,得到图 4(a)中实线所示的 RBF 输出,可以看到 RBF 输出和位移实测数据基本吻合,图 4(b)为两者的误差曲线



(a) RBF 建模输出与实测数据对比

(a) Comparison between RBF output and measured data



(b) RBF 建模误差

(b) RBF modeling errors

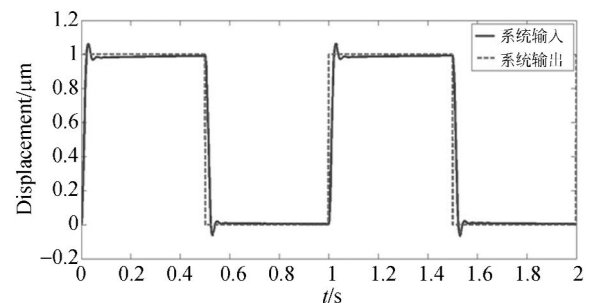
图 4 RBF 建模实验结果

Fig. 4 Experimental results of RBF modeling

线,由图 4(b)可见,误差峰值大约为 $0.15 \mu\text{m}$,是位移实测数据的 0.22% ,实验结果证实了 RBF 模型的精确性。

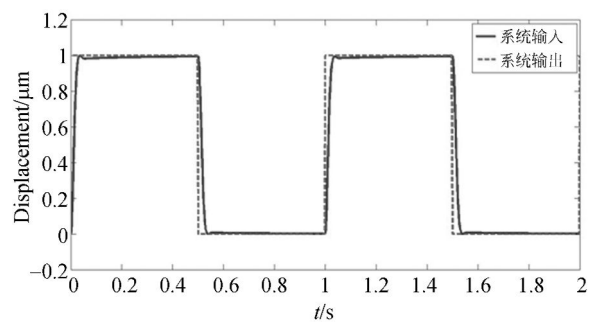
5.3 控制结果

设置初始参数 k_p, k_i, k_d 分别为 $10, 1, 0.1$,得到的控制结果如图 5 所示,图 5(a)为基于 RBF 神



(a) RBF 神经网络整数阶 PID 控制器的实验结果

(a) Results of RBF neural network integer order PID controller



(b) RBF 神经网络分数阶 $PI^{\alpha}D^{\lambda}$ 控制器的实验结果

(b) Results of RBF neural network fractional order $PI^{\alpha}D^{\lambda}$ controller

图 5 两种控制器的控制结果对比

Fig. 5 Comparison of control results of two kinds of controllers

神经网络整数阶 PID 对压电叠堆的控制结果,图 5 (b)为基于 RBF 神经网络分数阶 $PI^\mu D^\lambda$ 控制结果。通过对比可以看出,RBF 神经网络整数阶 PID 控制系统输出超调为 6%,RBF 神经网络分数阶 $PI^\mu D^\lambda$ 控制系统输出超调为零,这说明 RBF 分数阶 $PI^\mu D^\lambda$ 比传统的 RBF 整数阶 PID 在抑制震荡、减小超调、稳定跟踪方面表现出了更卓越的性能。

6 结 论

本文将分数阶 $PI^\mu D^\lambda$ 与压电叠堆的 Jacobain 信息相结合,设计了基于 RBF 神经网络的分数阶

$PI^\mu D^\lambda$ 的控制系统。在 RBF 建模中,模型误差仅为 $0.15 \mu\text{m}$,是位移实测数据的 0.22%;在控制结果中,整数阶 PID 控制系统的输出超调为 6%,而分数阶 $PI^\mu D^\lambda$ 控制器系统的超调为零,且系统输出稳定、精确。

分数阶 $PI^\mu D^\lambda$ 初值的选取对控制结果影响很大,往往是通过多次实验总结经验人为设定,考虑可以先通过优化算法对参数 $k_p, k_i, k_d, \mu, \lambda$ 进行寻优,得到初值。RBF 神经网络不仅可以用来整定 k_p, k_i, k_d ,还应该可以整定 μ 和 λ ,本文的下一步工作将寻找方法利用 RBF 神经网络对 μ, λ 进行自适应调整。

参考文献:

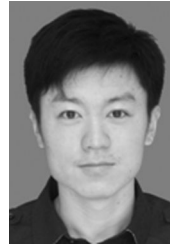
- [1] 杨玥,郑素霞,许忠斌. 微纳米技术在工业装备中的应用研究进展[J]. 轻工机械,2011, 29(4):117-120. YANG Y, ZHENG S X, XU Z B. Application development of the micro- and nano-technology in industrial equipment[J]. *Light Industry Machinery*, 2011,29(4):117-120. (in Chinese)
- [2] 陈元晟. 压电驱动器的迟滞非线性建模与控制[D]. 南京:南京航空航天大学,2013. CHEN Y SH. *Hysteresis Modeling and Nonlinear Control of Piezoelectric Actuators* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [3] 赖志林,刘向东,陈振,等. 基于 Preisach 逆模型的压电陶瓷执行器迟滞补偿控制[J]. 北京理工大学学报,2011, 31(4): 447-451. LAI ZH L, LIU X D, CHEN ZH, *et al.*. The hysteresis compensation control of the piezoceramic actuators based on the inverse Preisach model [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(4): 447-451. (in Chinese)
- [4] 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):69-71,75. FANG F, CUI Y G, LIANG D T, *et al.*. Research on improved hysteresis model of piezoelectric micro-positioning stage[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2014, 36(1):69-71,75. (in Chinese)
- [5] 冀坤. 基于 KP 模型的磁控形状记忆合金执行器位移控制方法研究[D]. 吉林:吉林大学,2014. JI K. *Control Method Research of Magnetic Control Shape Memory Alloy Actuators Based on KP Model*[D]. Jilin: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [6] 裘进浩,陈海荣,陈运晟,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 J H, CHEN H R, CHEN Y SH, *et al.*. A model for asymmetric hysteresis of piezoelectric actuators[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, 10(3):189-197. (in Chinese)
- [7] 陈辉,谭永红,周杏鹏,等. 压电陶瓷执行器的动态模型辨识与控制[J]. 光学精密工程,2012, 20(1): 88-95. CHEN H, TAN Y H, ZHOU X P, *et al.*. Identification and control of dynamic modeling for piezoceramic actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 88-95. (in Chinese)
- [8] 张亚超,赵美荣,林玉池. 压电微角度驱动器及其闭环控制检测系统[J]. 压电与声光,2012, 34(3): 404-407. ZHANG Y CH, ZHAO M R, LIN Y CH. Piezoelectric micro-angle rotary actuator and close-loop control test system[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2012, 34(3):404-407. (in Chinese)
- [9] 李朋志,闫丰,葛川,等. 压电驱动器的开闭环迭代学习控制[J]. 光学精密工程,2014, 22(2): 414-419. LI P ZH, YAN F, GE CH, *et al.*. Open-closed loop iterative learning control of piezoelectric actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 414-419. (in Chinese)
- [10] 王耿,宫春林,张小军,等. 应变式微型精密压电驱

- 动器的一体化设计及其 PID 控制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 709-716.
- WANG G, GONG CH L, ZHANG X J, *et al.*. Design and control of miniature piezoelectric actuator based on strain gauge sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 709-716. (in Chinese)
- [11] PODLUBNY I. Fractional-order dynamic system and $PI^{\alpha}D^{\lambda}$ -controllers[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(1): 208-214.
- [12] 薛定宇, 赵春娜. 分数阶系统的分数阶 PID 控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(5): 771-776.
- XUE D Y, ZHAO CH N. Fractional order PID controller design for fractional order system [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(5): 771-776. (in Chinese)
- [13] PODLUBNY I, PETRAS I, VINAGRE B M, *et al.*. Analogue realization of fractional order controllers[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2002, 29(1-4): 281-296.
- [14] OUSTALOUP A, LEVRON F, MATHIEU B, *et al.*. Frequency band complex non integer differentiator: characterization and synthesis[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and applications*, 2000, 47(1): 25-39.
- [15] 王春阳. 分数阶 $PI^{\alpha}D^{\lambda}$ 控制器参数整定方法与设计研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.
- WANG C Y. *Study on Fractional order $PI^{\alpha}D^{\lambda}$ Controller Parameter Tuning Methods and Design* [D]. Jilin: Jilin University, 2013. (in Chinese)

作者简介:



李新波(1980—),男,吉林吉林人,博士,讲师,2002年、2005年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2007年至2008年为新加坡南洋理工大学联合培养博士生,2009年于吉林大学获得博士学位。主要从事阵列信号处理、时频分析方面的研究。E-mail: cingle@126.com



付云博(1991—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,2013年于吉林大学通信工程学院获得学士学位,主要研究方向为压电驱动控制。E-mail: 1156571223@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)