

# 基于复合 ADRC 的压电陶瓷驱动器自适应控制

高金海, 郝丽娜, 项超群, 祁紫轩

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对压电陶瓷驱动器固有的迟滞现象对其定位控制精度的影响问题, 提出将自抗扰控制 (ADRC) 与改进 Preisach 逆模型相结合的控制方案. 以模型输入、输出迟滞环的线性度为标准, 目的是提高微工作台的定位精度, 从而提高微操作效率和成功率. 为了验证所提出控制策略的有效性, 通过无控制方法、改进逆 Preisach 控制方法、复合 PID 方法、ADRC 控制和复合 ADRC 控制实验, 得出所选用压电陶瓷驱动器的迟滞环比重分别为 12.3%、5.8%、4.7%、2.5%、1.4%. 不同控制方案所得实验结果证明, ADRC 与迟滞逆模型相结合的控制方案具有良好的控制性能.

**关 键 词:** 压电陶瓷; 非线性; 迟滞环; 自抗扰控制; Preisach 模型

**中图分类号:** TP 29      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2018)08-1158-05

## Adaptive Control of Piezoelectric Ceramic Actuator with Composite ADRC

GAO Jin-hai, HAO Li-na, XIANG Chao-qun, QI Zi-xuan

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: HAO Li-na, E-mail: haolina@me.neu.edu.cn)

**Abstract:** To eliminate the influence of the inherent hysteresis phenomenon of the piezoelectric ceramic actuator, a control scheme based on the combination of the active disturbance rejection control (ADRC) and the improved Preisach model is proposed. Taking the linearity of hysteresis loop of the model's input and output as a criterion, the model is used to improve the positioning accuracy of the piezoelectric, thus improving the operating efficiency and success rate in bio manipulation. Through the experiments of different control schemes, the proportion of hysteresis loop is about 12.3% (no control), 5.8% (improved inverse Preisach control), 4.7% (composite PID), 2.5% (ADRC), 1.4% (composite ADRC). The experimental results comparisons prove that the control scheme proposed has good performance.

**Key words:** piezoelectric ceramic; nonlinearity; hysteresis loop; ADRC; Preisach model

进入 20 世纪以来, 微操作机器人成为了机电系统和机器人领域的研究热点, 各国的政府、企业投放了大量人力、物力. 在面向细胞工程的微操作机器人中比较著名的研究机构有: 德国 Karlsruhe 大学 IPR 研究所 (Buerkle, Fatikow)、美国麻省 RLE 研究所 (Freeman) 和日本 Nagoya 大学微系统工程部 (Arai, Fukuda) 等. 自 1997 年起, 我国将微操作方面的研究纳入到“国家高技术发展计划项目”机器人主题和国家攀登计划, 哈尔

滨工业大学机器人研究所<sup>[1]</sup>、北京航空航天大学机器人研究所<sup>[2]</sup>、中国科技大学<sup>[3]</sup>、东北大学<sup>[4]</sup>等多家研究机构参与了微操作研究, 对微操作器、精密定位技术、智能控制和显微立体视觉系统等 MEMS 关键技术进行了深入研究.

在这些关键技术中, 基于压电陶瓷等智能材料的驱动器逐渐成为微操作中微位移驱动的关键部件. 但是, 该类驱动器的动态响应特性呈现出迟滞、蠕变等复杂特性<sup>[5]</sup>, 这是智能材料具有的本

征特性,且不因材料的改进而消失,这就造成驱动器定位精度降低、动态性能下降,在某些特定的工作条件下会造成系统不稳定,从而限制了智能材料驱动装置的应用。

本文主要针对以柔性铰链为执行机构的微动定位平台系统中压电陶瓷存在的迟滞、传感器干扰等非线性现象,进行复合自抗扰技术研究,并结合实验研究实现压电陶瓷的精确重复定位控制。通过提高压电陶瓷驱动器的重复定位精度,从而提高细胞注射的操作效率和成功率,对提高细胞操作的准确性和安全性提供帮助。

## 1 压电陶瓷迟滞及动力学建模

压电陶瓷驱动器具有响应速度快、精度高、结构简单等优点,在工程领域得到广泛应用。然而它所具有的非线性特性较难处理,而这些非线性特性的典型代表便是迟滞特性<sup>[6]</sup>,并且这些迟滞特性往往和与输入频率相关的动力学特性相关联。为了精确描述压电陶瓷输入、输出特性,以便提出高效的控制方法,研究者们提出了许多数学模型<sup>[7]</sup>,其中被广泛认可和应用的是迟滞特性与线性动力学系统串联结构模型,如图 1 所示。因此,压电陶瓷驱动器补偿机理基于此模型进行逆补偿建模。

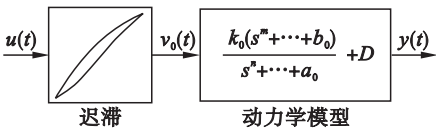


图 1 迟滞-线性动力学串联机构模型示意图  
Fig. 1 Hysteresis cascaded linear dynamics model

### 1.1 改进 Preisach 逆模型

Preisach 模型是迄今为止众多迟滞非线性模型中最为常用的方案之一。1935 年,由德国学者 Preisach 等通过引入几何解释完成了进一步的改进和完善,称之为“经典 Preisach 算子”。

经典 Preisach 模型由多个最简单的基本迟滞算子叠加构成,单个基本迟滞算子如图 2 所示。当给压电陶瓷驱动器加载正向电压  $u(t)$  时,压电陶瓷驱动器只产生正向的位移伸长量  $y(t)$ ,由于  $u(t)$  和  $y(t)$  均为正值,它们的关系只能发生在第一象限,因此迟滞算子的值只能为 0 或 1。对于 Preisach 模型而言,纵然每个基本迟滞算子仅表现一个局部记忆滞回,但无数个基本迟滞算子叠加在一起时就表现为全局记忆性。Preisach 模型表达式为

$$y(t) = \iint_{\alpha > \beta} w(\alpha, \beta) [u(t) d\alpha d\beta] \quad (1)$$

式中:  $w(\alpha, \beta)$  表示每一个基本迟滞算子的权重系数,  $\alpha, \beta$  分别表示迟滞算子上升和下降电压阈值;  $u(t)$  表示输入电压;  $y(t)$  表示采用压电陶瓷的输出位移。

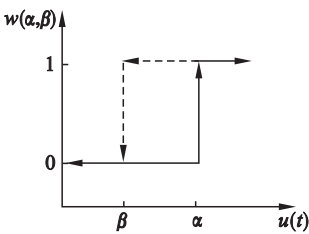


图 2 基本迟滞算子示意图  
Fig. 1 Hysteresis operator

然而传统建模方法求解繁琐、误差大,其逆模型也非常复杂,模型精度差,因此,本文基于 BP 神经网络 Preisach 模型直接针对某电压及其对应位移值进行建模,减小了辨识误差,降低了模型复杂程度。模型采用 3 输入,1 输出,单隐含层 35 个节点的三层 BP 神经网络<sup>[8]</sup>。其中,输入层的 3 个节点分别为此刻位移与位移极值的差值  $\delta$ 、位移值  $x_a$ 、电压上升/下降标志  $df[1/0]$ ;输出层为 1 个节点,为此刻电压值  $x_b$ 。学习方法为贝叶斯正则化算法 (trainbr),隐含层激活函数和输出层激活函数分别采用 tansig 和 purelin 实现。得到压电陶瓷迟滞逆模型如图 3 所示。

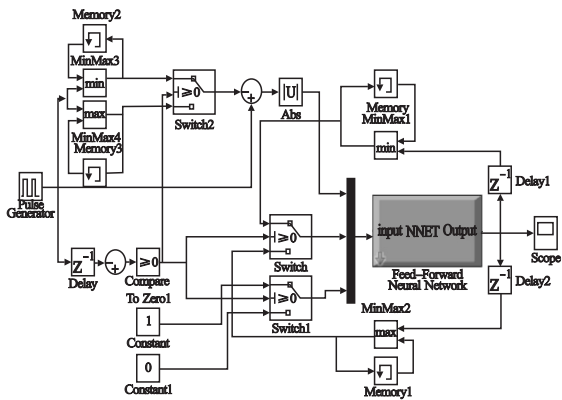


图 3 改进 Preisach 逆模型  
Fig. 3 Improved inverse Preisach model

### 1.2 压电陶瓷线性动力学模型

压电陶瓷驱动器的动力学模型在控制器设计中至关重要,因为它能够提供被控系统频率相关信息。依据文献<sup>[9]</sup>所述,线性动力学系统能够采用如式(2)所示的拉普拉斯域函数  $D_p(s)$  表示,该表达方法有助于对所构建的模型进行鲁棒性分析。在式(2)中,  $D$  表示前馈增益项,而且分子阶

数  $m$  要严格小于分母阶数  $n$ ;  $v_0(s)$  和  $y(s)$  分别为输入、输出.

$$D_p(s)=\frac{y(s)}{v_0(s)}=\frac{k_0(s^m+b_{m-1}s^{m-1}+\cdots+b_0)}{s^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_1s+a_0}+D.$$

(2)

2 ADRC 控制器

ADRC 控制器<sup>[10-11]</sup>的仿真模型如图 4 所示, 主要目的是消除控制过程中各种不确定干扰, 实现控制目标. 该模块主要包括三部分: 非线性跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和非线性状态误差反馈(NSEF).

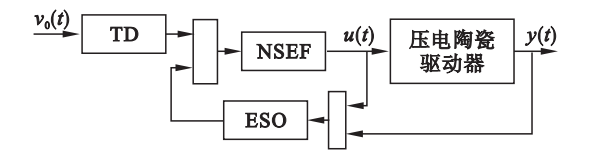


图 4 ADRC 控制器  
Fig. 4 ADRC controller

2.1 非线性跟踪微分器

非线性跟踪微分器是一非线性动态单元, 二阶积分器串联系统为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= u, |u| \leq r. \end{aligned} \right\}$$

(3)

以原点为终点的快速最优控制综合函数为

$$u(x_1, x_2) = -r \cdot \text{sign}\left(x_1 + \frac{x_2 |x_2|}{2r}\right).$$

(4)

将式(4)代入式(3)中, 得

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -r \cdot \text{sign}\left(x_1 + \frac{x_2 |x_2|}{2r}\right). \end{aligned} \right\}$$

(5)

若把式(5)第二式中  $x_1$  改为  $x_1 - v_0(t)$ , 可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -r \cdot \text{sign}\left(x_1 - v_0(t) + \frac{x_2 |x_2|}{2r}\right). \end{aligned} \right\}$$

(6)

当该系统解的分量  $|\dot{x}_1| \leq r$  时, 该系统将最快地跟踪输入信号  $v_0(t)$ .

2.2 扩张状态观测器

扩张状态观测器是一个动态过程, 它只用了原对象的输入与输出信息, 没有用到描述控制对象传递函数的任何信息, 即不依赖于生成扰动的具体数学模型, 也不需要直接去测量其相互作用, 它是一通用而实用的扰动观测器, 其结构如图 5 所示.

对于一个单输入单输出非线性系统:

$$y^n = f(y, \dot{y}, \cdots, y^k, \cdots, y^{n-1}, t) + d(t) + bu.$$

(7)

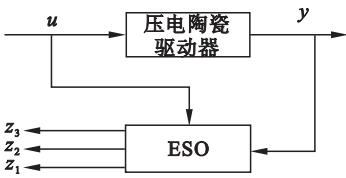


图 5 扩张状态观测器  
Fig. 5 Extended state observer

式中:  $f(y, \dot{y}, \cdots, y^k, \cdots, y^{n-1}, t)$  为非线性对象模型;  $d(t)$  为噪声干扰;  $u$  是控制输入信号;  $b$  为输入项系数. 该模型的状态空间方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n, \\ \dot{x}_n &= f(x_1, x_2, \cdots, x_{n-1}, x_n, t) + d(t) + bu, \\ y &= x_1. \end{aligned} \right\}$$

(8)

对于三阶对象, 可建立如下扩张状态观测器:

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= z_1 - y, \\ \dot{z}_1 &= z_2 - \beta_1 e_1, \\ \dot{z}_2 &= z_3 - \beta_2 |e_1|^{1/2} \text{sign}(e_1) + bu, \\ \dot{z}_3 &= -\beta_3 |e_1|^{1/4} \text{sign}(e_1). \end{aligned} \right\}$$

(9)

2.3 非线性状态反馈

传统 PID 控制器的控制律由比例、积分和微分的线性组合来实现; 而非线性误差反馈的闭环稳态误差比线性反馈的稳态误差小得多, 而且具有更强的扰动抑制能力. 根据微分信号和状态估计, 非线性状态反馈可以表示为

$$u_0 = \sum_{n=1}^m k_n \text{fal}(e_n, \alpha).$$

(10)

$$\text{fal}(e_n, \alpha) = \begin{cases} e_n d^{\alpha-1}, & |e_n| < d; \\ |e_n|^{\alpha} \text{sign}(e_n), & |e_n| \geq d. \end{cases}$$

$d$  为可变常数, 本文取  $d = 0.001$ ;  $e_n$  为状态误差;  $\alpha$  为状态误差参数.

最后, ADRC 控制器的控制输出信号为

$$u = u_0 - z_n.$$

(11)

3 控制实验及分析

针对压电陶瓷驱动器迟滞非线性特征, 提出了将 ADRC 控制同迟滞逆模型相结合的方法, 以实现压电陶瓷驱动微动平台的线性运动. 通过对比实验进一步验证该方案的合理性. 根据上述分析, 搭建压电陶瓷控制系统(图 6 所示)及实验装置, 主要包括压电陶瓷 SZBS150/5×5/20, 压电陶

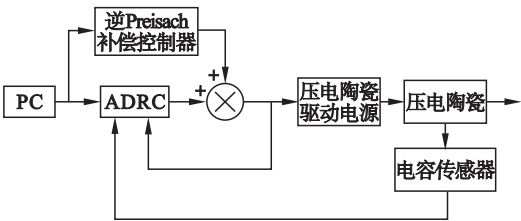


图 6 压电陶瓷控制系统

Fig. 6 Piezoelectric ceramic control system

瓷驱动电源 HPV-1C03 00A0300, 电容式位移传感器 MA-0.5(10 nm), 24 V 直流电源 WP100-

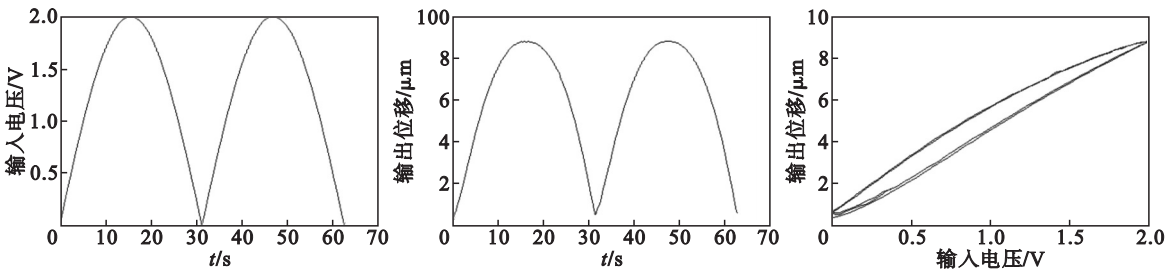


图 7 采样数据和迟滞环

Fig. 7 Sample data and hysteresis loop of piezoelectric

3.2 不同控制实验对比

为验证本文提出的控制策略的合理性,针对压电陶瓷的非线性特性,输入理论信号  $y = 110\sin(0.1t)$  的正弦信号,分别应用 4 种控制策略对压电陶瓷驱动器进行补偿控制. 4 种控制策略为:改进逆 Preisach 控制;PID 与改进 Preisach 逆模型结合控制 (PID 控制参数分别为  $k_p = 1.03$ ,  $k_i = 0.01$ ,  $k_d = 0$ ), 即复合 PID 控制;ADRC 控制;ADRC 与改进 Preisach 逆模型结合控制,即复合

ADRC 控制. 其中 ADRC 各个模块参数设置为: TD 模块各参数为  $r = 2\,000$ ,  $d_1 = 0.001$ ; ESO 各参数为  $\beta = 1, 0.33, 8$ ,  $d_2 = 0.01$ ,  $b = 2$ ; NSEF 模块参数为:  $k_n = 6, 3$ ,  $\alpha = 0.95, 1.2$ . 实验结果如图 8 ~ 图 11 所示. 可以看出,4 种策略压电陶瓷迟滞环分别为 5.8%, 4.7%, 2.5%, 1.4%. 对比实验数据可知,ADRC 与改进 Preisach 逆模型相结合的控制方法具有更好的线性度.

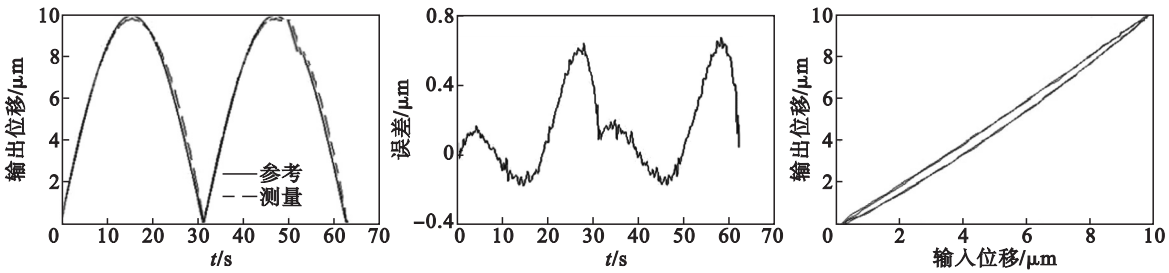


图 8 改进逆 Preisach 控制

Fig. 8 Improved inverse Preisach control

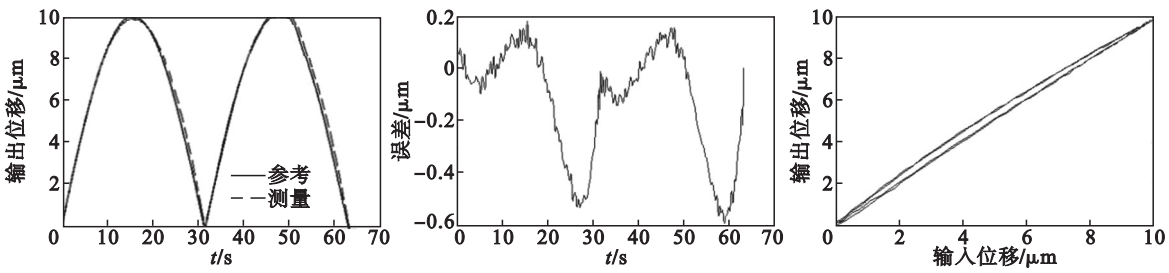


图 9 复合 PID 控制

Fig. 9 Composite PID control



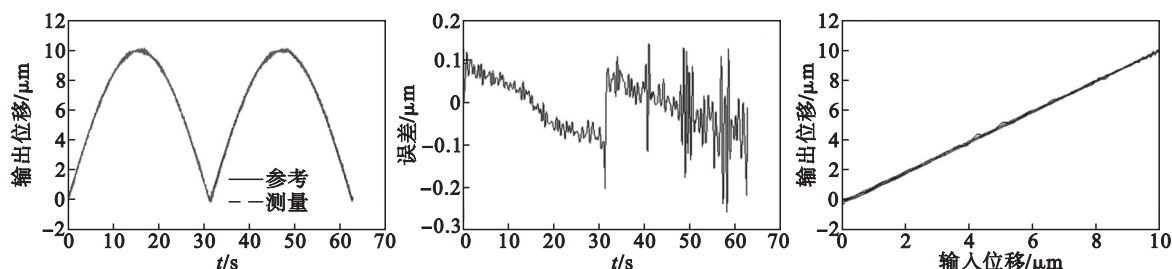


图 10 ADRC 控制  
Fig. 10 ADRC control

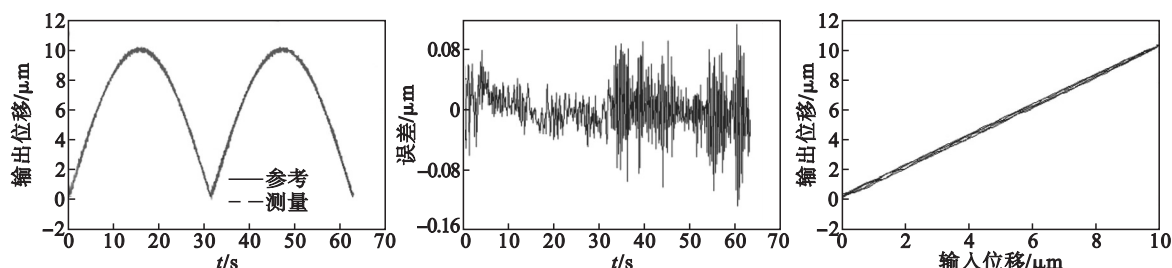


图 11 复合 ADRC 控制  
Fig. 11 Composite ADRC control

## 4 结 语

微动定位平台系统中压电陶瓷驱动器存在固有的迟滞现象,并影响其定位精度,因此提出了自抗扰控制(ADRC)与改进 Presiach 逆模型相结合的控制方案.以模型输入、输出迟滞环线性度为标准,目的是提高微动工作台的定位精度,从而提高微操作效率和成功率.与 ADRC 模型及其他迟滞补偿模型相比,本文模型建模更简单且具有通用性.实验结果也证明了本文提出的方案具有良好的控制性能.

## 参考文献:

- [1] 邹宇,荣伟彬,邢济尧.一种套件精密对接自动装配实验系统[J]. 机器人,2016,38(1):115-121.  
(Zou Yu, Rong Wei-bin, Xing Ji-yao. An auto-docking assembly test system for target suits [J]. *Robot*, 2016, 38 (1):115-121.)
- [2] 周杰,荣伟彬,许金鹏,等.基于 SEM 的微纳遥操作系统控制策略研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(11):2448-2457.  
(Zhou Jie, Rong Wei-bin, Xu Jin-peng, et al. Research on the control strategy of SEM based micro/nano tele-operation system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35 (11):2448-2457.)
- [3] Ju T, Liu S, Yang J, et al. Rapidly exploring random tree algorithm-based path planning for robot-aided optical manipulation of biological cells [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 11 (3): 649-657.
- [4] Sun Z Y, Song B, Xi N, et al. Compensating asymmetric hysteresis for nanorobot motion control [C]// IEEE

International Conference on Robotics and Automation. Seattle, 2015:3501-3506.

- [5] Song B, Sun Z Y, Xi N, et al. High precision positioning control for SPM based nanomanipulation: a robust adaptive model reference control approach [C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Besacon, 2014:1658-1663.
- [6] 谷国迎. 压电陶瓷驱动微位移平台的磁滞补偿控制理论和方法研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.  
(Gu Guo-ying. Control of piezoceramic actuated micro/nanopositioning stages with hysteresis compensation [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.)
- [7] Li Y, Xu Q. Design and robust repetitive control of a new parallel-kinematic XY piezostage for micro/nano manipulation [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17 (6):1120-1132.
- [8] 朱珠. 压电陶瓷驱动器特性研究及二维微纳定位平台结构设计[D]. 杭州:浙江大学,2011.  
(Zhu Zhu. Research of characteristics of piezoelectric actuator and structure design of two dimensional micro-nano positioning stage [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.)
- [9] Sun Z Y, Hao L N, Song B, et al. Periodic reference tracking control approach for smart material actuators with complex hysteretic characteristics [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25 (10):105029.
- [10] Tang H, Li Y M. Feed forward nonlinear PID control of a novel micro manipulator using Preisach hysteresis compensator [J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2015, 34:124-132.
- [11] 韩京清. 自抗扰控制技术:估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2011.  
(Han Jing-qing. Active disturbance rejection control technique—the technique for estimating and compensating the uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.)