

DOI: 10.3901/JME.2015.02.198

# 基于广义PI逆模型的超精密定位平台复合控制\*

田艳兵<sup>1,2</sup> 王涛<sup>1</sup> 王美玲<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学自动化学院 北京 100083;

2. 青岛理工大学自动化工程学院 青岛 266520)

**摘要:** 为了提高超精密定位系统的定位精度和行程,设计一种新型的单级驱动气动伺服定位平台。以金属波纹管为执行机构,以气浮导轨支撑,研究无摩擦条件下的较大行程的精密控制。为减少建立PI模型时的算子数量,减小求逆过程的计算量,提高建模精度,改进基本迟滞算子,建立基于广义迟滞算子的广义PI模型,并对模型进行验证。给出广义PI模型的求解逆方法。设计基于广义PI逆模型的复合控制方案,并进行试验研究。结果表明,基于广义逆模型的阶跃响应系统的定位精度达到30 nm,锯齿波和复频跟踪试验输入下,基于PI逆模型的跟踪精度平均误差为0.96  $\mu\text{m}$ 和0.63  $\mu\text{m}$ ,基于广义PI逆模型的跟踪精度平均误差为0.49  $\mu\text{m}$ 和0.45  $\mu\text{m}$ 。试验数据表明改进广义PI模型对于增加系统定位精度有效。

**关键词:** 广义迟滞;波纹管;超精密;复合控制

**中图分类号:** TP271

## Compounding Control of Ultra-precision Positioning Stage Based on Inverse Generalized PI Model

TIAN Yanbing<sup>1,2</sup> WANG Tao<sup>1</sup> WANG Meiling<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100083;

2. Automation Engineering College, Qingdao Technological University, Qingdao 266520)

**Abstract:** In order to improve the accuracy and stroke of the ultra-precision positioning stage, a new type of pneumatic servo positioning stage with single driving device is designed. Metal bellows are used as driving device in the positioning stage, the stage is supported by air flotation sliders to realize large stroke and ultra-precision positioning. In order to reduce the number of operators and to improve modeling accuracy, hysteresis operators are modified to build the generalized PI model, and the model is validated too. A solution of the inverse generalized PI model is given. The compounding controller is designed based on inverse generalized PI model. Experiments are implemented on the step signal, sawtooth signal and multifrequency signal. The results show that the positioning accuracy of the step response is less than 30 nm, the average tracking errors on sawtooth and multifrequency input are 0.96  $\mu\text{m}$  and 0.63  $\mu\text{m}$  based on the PI model, and the average tracing errors are 0.49  $\mu\text{m}$  and 0.45  $\mu\text{m}$  based on generalized PI model. Experiments show that the generalized PI model is effective for increasing the positioning accuracy of the stage.

**Key words:** generalized hysteresis; bellows; ultra-precision; compounding control

## 0 前言

超精密定位技术是超精密加工的基础,现代超精密伺服平台执行器主要有压电和磁滞伸缩材料,行程较小。近年来,国内对于采用电动机驱动的精密平台也有一定的研究,如音圈电动机驱动<sup>[1-2]</sup>,采用直接驱动完成直线运动,传动效率高。冯晓梅等<sup>[3]</sup>设计了基于音圈电动机的气浮平台,精度能达到亚微米级。

2007年,SHINNO等<sup>[4]</sup>以8个音圈电动机驱动,采用“#”字叠压结构,完成了5 nm精度等级的二维精确定位,行程小。

CHIANG等<sup>[5]</sup>采用气缸和压电驱动的双级模式,较好地解决了控制精度和运动行程的问题,控制精度达到微米级。但是双级驱动系统的机械结构复杂,增加了控制难度<sup>[6]</sup>。

在超精密定位中,影响系统精度的原因很大程度上在于执行部件的迟滞特性,迟滞是所有运动部件存在的一种特殊物理现象,其机理比较复杂。有学者针对迟滞现象进行研究,建立了如Preisach模型、KP(Krasnosel'skii-Pokrovskii)模型、PI(Prandtl-Ishinskii)模型等。一般来讲,可以通过逆模型来补

\* 国家自然科学基金(51375045)和流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金(JZKF-201214)资助项目。20140306 收到初稿,20140715 收到修改稿

偿系统的迟滞特性<sup>[7]</sup>。PI 模型由于存在解析逆, 在迟滞补偿控制中应用较广。KREJCI 等<sup>[8]</sup>应用经典 PI 模型的解析逆模型来补偿压电工作平台的非线性, KUHNEN<sup>[9]</sup>进一步应用改进带有死区的算子建立的 PI 模型对迟滞进行预测和补偿, JANAIDEH 等<sup>[10]</sup>建立了率相关性的动态迟滞模型, 其对于迟滞补偿效果有改进和提高。

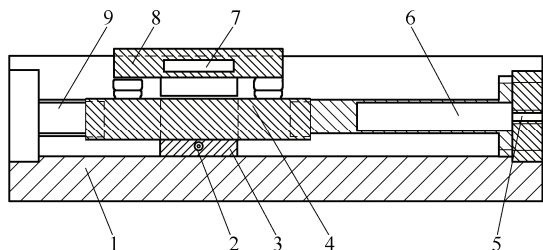
PI 模型是一些基本算子(间隙算子)的加权叠加<sup>[11]</sup>, 由于受制于基本算子特性, PI 模型主要是针对对称特性迟滞环有很好的逼近和预测, 而对于非对称性的迟滞特性预测精度不高。PI 模型精度随着基本算子量的增加而提高, 模型的精度影响系统的跟随效果, 为保证模型的精度必须有足够数量的迟滞算子。且基于 PI 模型的控制方案一般是结合逆模型进行, 求逆过程较为复杂, 算子数量的增加会导致运算量的增大, 不利于建模和控制。

本文设计了一种金属波纹管驱动的气动伺服平台, 以气浮平台为支撑<sup>[12]</sup>, 采用光栅尺进行检测。波纹管有着较大的行程, 且成本低廉, 控制方便, 但是相对于压电或者电动机驱动, 气动波纹管的迟滞特性更为明显。本文对基本 PI 模型进行改进, 降低算子数量, 并对求逆过程进行分析, 给出了可行的求逆方法, 采用基于改进 PI 逆模型复合控制, 取得了较好的控制精度和响应速度。

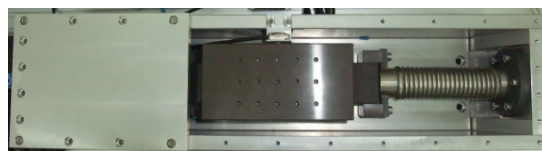
## 1 波纹管驱动的定位平台

运动平台主要由三部分组成, 运动驱动装置, 气浮导轨产生的静压轴承支撑的工作平台以及光栅尺位置检测部分。

运动驱动机构采用波纹管驱动<sup>[13]</sup>, 通过高响应电气比例阀控制波纹管内部气体压力, 产生伸缩位移, 其输入输出线性关系较好。平台采用 MicroE 公司生产的 Mercury3500 系列的光栅尺检测位移, 其检测分辨率可以达到 5 nm。为了减小平台移动时滑动摩擦力的影响, 移动平台通过气浮导轨支撑<sup>[14]</sup>。为提高运动平台的刚度和稳定性, 在平台另外一侧安装有预紧弹簧, 整个系统的结构框图和实物图如图 1 所示。



(a) 定位平台机械结构图



(b) 定位平台实物图

图 1 系统结构框图和实物图

1. 机构体 2. 气浮导轨定子进气孔 3. 气浮导轨定子 4. 气浮导轨动子
5. 进气孔 6. 金属波纹管 7. 光栅尺 8. 载物台 9. 预紧弹簧

## 2 PI 模型

PI 模型是针对迟滞特性系统建模和控制的一种理想方案, 从 Preisach 模型发展而来的一种模型<sup>[15]</sup>。PI 模型的间隙算子与  $x$  轴交点关于  $y$  轴对称, 其基本特性如图 2 所示, PI 模型具有对称性。

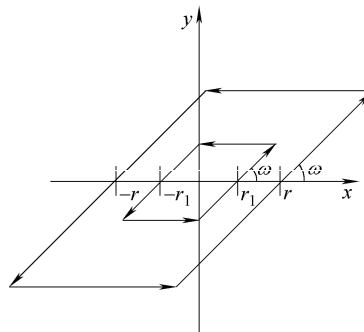


图 2 间隙算子

间隙算子的数学形式如下<sup>[16]</sup>

$$y(t) = H_r[x(t), y_0] = \max\{x(t) - r, \min\{x(t) + r, y(t - T)\}\} \quad (1)$$

式中  $T$ ——系统采样周期;

$y_0$ ——系统初始状态。

式(1)是一个基于  $y(0)$  的递归公式, 第  $i$  个间隙算子可以表述如下

$$H_{r,i}[x(t), y_0^i] = \begin{cases} \max\{x(t) - r_i, y(t_i)\} & x(t) > x(t_i) \\ \min\{x(t) + r_i, y(t_i)\} & x(t) < x(t_i) \\ y(t_i) & x(t) = x(t_i) \end{cases} \quad (2)$$

间隙算子的特性由权重和阈值决定, 权重代表了间隙算子的斜率, 阈值代表了间隙算子的宽度, 假设  $\omega(r_i)$  是间隙算子的权重,  $r_i$  不同时,  $\omega(r_i)$  不同, 第  $i$  个加权迟滞算子为

$$H_{r,\omega,i}[x(t), y_0^i] = \omega(r_i) H_{r,i}[x(t), y_0^i] \quad (3)$$

PI 迟滞模型输出  $\Pi[x(t)]$  可以由  $n$  个加权间隙算子累加, 于是有

$$\Pi[x(t)] = \int_0^R \omega_r(r) H_{r,i}[x(t), y_0^i] =$$

$$\omega_r(0)x(t) + \sum_{i=1}^n \omega(r_i)H_{r,i}[x(t), y_0^i] \quad (4)$$

式中,  $\omega(r)$  为积分密度函数, 为正值, 代表权值的分布情况, 且满足关系

$$\omega(r_i) = \omega_r(r_i)(r_i - r_{i-1}) \quad (5)$$

式(5)表明, 离散权重随着输入的变化而变化。

PI 模型已经广泛应用于描述系统的迟滞特性, 将 PI 模型的逆模型串联在控制对象前, 可将控制对象线性化, 这就是前馈补偿控制, 其控制策略图如图 3 所示<sup>[17]</sup>。

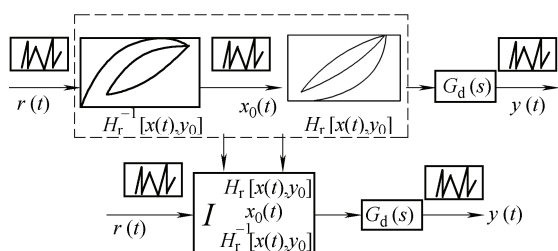


图 3 基于 PI 逆模型的控制策略设计原理

PI 模型的参数辨识可以根据系统初载曲线进行, 式(4)决定系统 PI 模型的两个主要参数为  $r_i$  和  $\omega(r_i)$ 。在本系统中, 基本 PI 模型参数的辨识可以利用系统带载试验数据形成的初载曲线进行。试验数据如表 1 所示。

表 1 试验数据

输入 $u/V$	输出 $l/\mu m$	输入 $u/V$	输出 $l/\mu m$
0	0	0.602 0	1 075
0.004 9	40	0.652 0	1 150
0.065 0	95	0.701 0	1 235
0.113 0	175	0.851 0	1 465
0.176 0	250	1.053 0	1 695
0.235 0	335	1.152 0	1 955
0.290 0	430	1.253 0	2 105
0.347 0	535	1.352 0	2 265
0.401 0	645	1.401 0	2 340
0.456 0	740	1.452 0	2 415
0.509 0	775	1.459 0	2 495
0.550 0	960	1.500 0	2 505

根据表 1 所得到的试验数据, 对式(4)所描述的数学模型, 用 Matlab 的 ployfit 函数进行拟合, 并用最小方差优化, 得到辨识后的系统参数如表 2 所示。

由基本迟滞算子特性可知, PI 模型描述的迟滞特性对于对称的迟滞特性精度很高, 而实际的控制对象往往不能满足这种对称性, 同时 PI 模型精度受制于基本迟滞算子数目。从表 1 的试验数据可以看出, 波纹管迟滞环具有明显的不对称性。另外, 由于波纹管采用压缩气体驱动, 因此其输入量和输出量均为正值, 对输入参数  $x(t)$  有一定限制, 因此, 需要考虑对 PI 模型作必要的改进。

表 2 参数辨识结果

$i$	阈值 $r_i$	权值 $\omega(r_i)$	$i$	阈值 $r_i$	权值 $\omega(r_i)$
0	0.075	1.247 4	10	0.825	0.233 9
1	0.150	0.238 3	11	0.900	0.067 5
2	0.225	0.380 9	12	0.975	0.043 7
3	0.300	0.076 2	13	1.050	2.079 3
4	0.375	0.090 3	14	1.125	0.894 0
5	0.450	0.046 1	15	1.200	2.062 9
6	0.525	0.081 8	16	1.275	0.110 9
7	0.600	0.009 2	17	1.350	0.096 2
8	0.675	0.066 0	18	1.425	1.029 8
9	0.750	0.295 6	19	1.500	0.114 6

### 3 广义 PI 模型

根据上面分析, 有必要对基本 PI 模型做一些改进, 称之为广义 PI 模型。建立广义模型的目的在于通过基本算子特性的改进, 增加建模的精度, 同时降低基本算子的数量, 减小运算量。

#### 3.1 PI 算子和 PI 模型改进

影响 PI 模型精度的因素除了阈值  $r$  和权值  $\omega$  之外, 另外还和间隙算子的自身特性、算子数量关系密切。波纹管采用气体驱动, 在中间段线性度较好, 但是在其行程的初始段和末端, 波纹管输出位移和气体压力的关系线性关系下降。为了更好地跟踪波纹管的运动轨迹, 将 PI 模型的间隙算子进行推广和改进, 建立广义迟滞模型<sup>[18]</sup>。定义新的广义间隙算子, 其上升曲线为  $l_1$ , 下降曲线为  $l_2$ , 称之为包络线, 如图 4 所示。

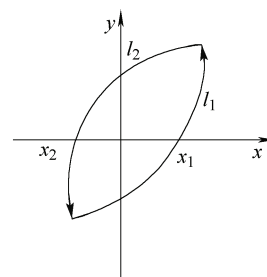


图 4 广义间隙算子

两曲线与  $x$  轴交点为  $x_1$  和  $x_2$ , 算子不具有对称性, 用以更好的表征系统迟滞的不对称性, 参照式(2), 则广义的间隙算子可以定义为

$$G_{r,i}[x(t), y_0^i] =$$

$$\begin{cases} \max\{l_1(t) - r_i, y(t_i)\} & x(t) > x(t_i) \cap x(t) \geq 0 \\ \min\{l_2(t) + r_i, y(t_i)\} & x(t) < x(t_i) \cap x(t) \geq 0 \\ y(t_i) & x(t) = x(t_i) \cap x(t) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

同理,  $\omega(r_i)$  是间隙算子的权重, 第  $i$  个加权迟滞算子为

$$G_{r,\omega,i}[x(t), y_0^i] = \omega(r_i)G_{r,i}[x(t), y_0^i] \quad (7)$$

基于广义间隙算子的广义 PI 模型用  $\phi[x(t)]$  表示

$$\begin{aligned} \phi[x(t)] &= \int_0^R \omega_r(r)G_{r,i}[x(t), y_0^i] = \\ \omega_r(0)x(t) &+ \sum_{i=1}^n G_{r,w,i}[x(t), y_0^i] = \\ \omega_r(0)x(t) &+ \sum_{i=1}^n \omega(r_i)G_{r,i}[x(t), y_0^i] \end{aligned} \quad (8)$$

同样满足

$$\omega(r_i) = \omega_r(r_i)(r_i - r_{i-1}) \quad (9)$$

如式(6), 广义 PI 间隙算子具有连续性、单调性, 广义线性模型是其线性叠加, 因此也是单调、连续的, 当  $l_1$  和  $l_2$  可逆时, 模型是可逆的。

在广义 PI 模型中, 如果令

$$l_1 = l_2 = x(t) \quad (10)$$

则广义 PI 模型即为基本 PI 模型。

### 3.2 广义 PI 逆模型

对于式(4)所示的基本 PI 模型, 其逆模型仅需要做权值和阈值的调整, 可以表述为

$$\begin{aligned} \Pi^{-1}[x(t)] &= \int_0^R \omega'_r(r)H_r^{-1}[x(t), y_0^i] = \\ \omega'_r(0)x(t) &+ \sum_{i=1}^n H_{r,w,i}^{-1}[x(t), y_0^i] = \\ \omega'_r(0)x(t) &+ \sum_{i=1}^n \omega'(r'_i)H_{r,i}^{-1}[x(t), y_0^i] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\omega'_r(0) = \frac{1}{\omega_r(0)}$$

$$\omega'(r'_i) = \frac{-\omega(r_i)}{\left(\sum_{j=0}^i \omega(r_j)\right) \left(\sum_{j=0}^{i-1} \omega(r_j)\right)} \quad i=1, 2, \dots, n-1 \quad (12)$$

$$r'_i = \sum_{j=0}^i \omega(r_j)(r_i - r_j) \quad (13)$$

$$y_0^{i'} = \sum_{j=0}^i \omega(r_j)y_0^i + \sum_{j=i+1}^{n-1} \omega(r_j)y_0^j \quad (14)$$

$\Pi[x(t)]$  和  $\Pi^{-1}[x(t)]$  在平面中关于  $45^\circ$  线对称, 且满足

$$\Pi[x(t)] \Pi^{-1}[x(t)] = I \quad (15)$$

对于广义 PI 模型来说, 广义迟滞算子的包络线为  $l_1$  和  $l_2$ , 不满足对称性, 包络线  $l_1$  和  $l_2$  是通用形式, 因此其求解逆模型过程不能简单地按照式(11)~(13)所示过程进行。广义 PI 模型的输出可以表示为

$$\phi[x(t)] = \begin{cases} \phi^+[x(t)] & \dot{x}(t) \geq 0 \\ \phi^-[x(t)] & \dot{x}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

由广义迟滞算子的定义有

$$\phi^+[x(t)] = \Pi^+[l_1[x(t)]] = \int_0^R \omega_r(r)G_r^+[x(t)]dr \quad (17)$$

$$\phi^-[x(t)] = \Pi^-[l_2[x(t)]] = \int_0^R \omega_r(r)G_r^-[x(t)]dr \quad (18)$$

沿着上行线  $l_1$  和下行线  $l_2$  系统输出为

$$G_r^+[x(t)] = \max(l_1[x(t)] - r, y(t)) \quad (19)$$

$$G_r^-[x(t)] = \max(l_2[x(t)] + r, y(t)) \quad (20)$$

上行线  $l_1$  和下行线  $l_2$  是可逆的, 因此根据式(17)、(18)有

$$l_1^{-1}[x(t)]\Pi^{+^{-1}}\phi^+[x(t)] = x(t) \dot{x}(t) \geq 0 \quad (21)$$

$$l_2^{-1}[x(t)]\Pi^{-^{-1}}\phi^-[x(t)] = x(t) \dot{x}(t) \leq 0 \quad (22)$$

从式(21)、(22)可以知道

$$\begin{aligned} \phi^{-1}[x(t)] &= \\ \begin{cases} l_1^{-1}[x(t)]\Pi^{-^{-1}}[x(t)] & \dot{x}(t) \geq 0 \\ l_2^{-1}[x(t)]\Pi^{-^{-1}}[x(t)] & \dot{x}(t) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)即是广义 PI 逆模型的表达式。

### 3.3 基于初载曲线的广义 PI 逆模型

初载曲线是迟滞特性的另外一种描述, 是指系统输入从零开始, 达到最大输入的过程中, 系统的输出形成的曲线, 式(4)所描述的基本 PI 模型可以用初载曲线描述为

$$\varphi(r) = \omega_r(0)r + \int_0^r \omega_r(\theta)(r - \theta)d\theta \quad (24)$$

于是, 权重函数  $\varphi''(r) = \omega_r(r)$ , 同时  $\varphi'(r) = \omega_r(0)$ , 因此可以将 PI 模型的输出和初载曲线建立联系, 于是有

$$\Pi[x(t)] = \varphi'(0)x(t) + \int_0^R \varphi''(r)H_r[x(t)]dr \quad (25)$$

根据系统逆的定义, 其逆模型的初载曲线满足

$$\psi = \varphi^{-1}(r) \quad (26)$$

系统的 PI 逆模型的初载曲线可以参照式(24)描述为

$$\psi(v) = \lambda_v(0)v + \int_0^v \lambda_v(\theta)(v - \theta)d\theta \quad (27)$$

$$\psi''(v) = \lambda_v(v) \quad \psi'(v) = \lambda_v(0) \quad (28)$$

在 PI 逆模型中, 阈值是  $v$ , 输入区间为  $[0, V]$ , 借助初载曲线(式(27)), 其逆模型输出可以描述为

$$\Pi^{-1}[x(t)] = \psi'(0)v + \int_0^V \psi''(v)H_v[x(t)]dv \quad (29)$$

式(23)描述的广义 PI 逆模型可以表示为

$$\begin{aligned} \phi^{-1}[x(t)] = & \\ \begin{cases} l_1^{-1}[x(t)](\psi'(0)v + \int_0^V \psi''(v)H_v^+[x(t)]dv) \dot{x}(t) \geq 0 \\ l_1^{-1}[x(t)](\psi'(0)v + \int_0^V \psi''(v)H_v^-[x(t)]dv) \dot{x}(t) \leq 0 \end{cases} & (30) \end{aligned}$$

$$H_v^+[x(t)] = \max(x(t) - v, y(t)) \quad (31)$$

$$H_v^-[x(t)] = \max(x(t) + v, y(t)) \quad (32)$$

所以广义 PI 迟滞逆模型是以密度函数  $\lambda_v(v)$  和阈值  $v$  唯一确定的。

广义逆模型的阈值

$$v_j = \sum_{i=0}^j \omega(r_i)(r_j - r_i) \quad (33)$$

广义逆模型密度函数权值和 PI 模型的密度函数满足以下关系

$$\lambda_v(j) = - \frac{\omega_r(j)}{\left[ \omega_r(0) + \sum_{i=1}^j \omega(r_i) \right] \left[ \omega_r(0) + \sum_{i=1}^{j-1} \omega(r_i) \right]} \quad (34)$$

$$\lambda_v(0) = \frac{1}{\omega_r(0)} \quad (35)$$

## 4 波纹管驱动平台的广义 PI 建模

目前关于波纹管的迟滞特性改进大多基于改进金属材料特性,来减小迟滞的影响,效果不理想。表 1 的数据表明,波纹管存在迟滞特性是明确的,且这种迟滞是非对称的。在这一部分我们主要根据初载曲线的特点建立系统的广义模型,以较少的广义间隙算子数量,并验证所建立模型的有效性。

广义 PI 迟滞模型一个重要特性是由包络线  $l_1$  和  $l_2$  决定的,确定一个较为合适的包络线,对于建模精度有较大的影响,根据初载曲线的非对称性,定义  $l_1$  和  $l_2$  为

$$l_1[x(t)] = a_1 x + a_2 \quad (36)$$

$$l_2[x(t)] = b_1 x^2 + b_2 x + b_3 \quad (37)$$

阈值和权值函数为

$$r_i = c_1 i \quad \omega(r_i) = \alpha \exp(-\tau r_i) \quad (38)$$

广义算子数量取为 10 个,即  $i=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ , 将式(36)~(38)代入式(8),与表 1 数据进行寻优计算,采用粒子群算法,完成参数辨识。

粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)是进化算法的一种,和遗传算法相比,规则更为简单。它是从一定范围内的随机解出发,通过迭代寻

找最优解,通过适应度函数  $F_f$  来评价辨识参数的品质,主要是模拟鸟群寻找食物的过程,提出的优化算法,该算法简单,编程较容易实现<sup>[19]</sup>。PSO 算法的关键在于适宜度函数的设计。在此处主要是要模型输出逼近试验数据,适宜度函数  $F_f$  可以选择位移输出试验值和式(8)计算值的平方差和的最小值进行优化,即

$$F_f = \sum (l_{\text{Out}} - l_{\text{Exp}})^2 \quad (39)$$

在寻优过程中,共需要解决 8 个参数的求解,分别是  $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, c_1, \alpha, \tau$ , 因此粒子群维数为 8, 寻优算法如下。

(1) 系统初始化, 给定  $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, c_1, \alpha, \tau$  等参数定初值, 确定范围, 赋予粒子初始位置和速度以及  $p_{\text{best}}$  和  $g_{\text{best}}$ , 确定系统的合法的  $V_{\text{max}}$  和  $X_{\text{max}}$ 。

(2) 对每个粒子按照式(8)计算。

(3) 根据式(39)计算的适宜度函数, 寻求更优值, 确定是否更新其  $p_{\text{best}}$  和  $g_{\text{best}}$  值。

(4) 更新粒子的速度和位置。

(5) 判断粒子位置和速度的合法性。

(6) 如果达到最大迭代次数转至步骤(7), 否则转至步骤(2)。

(7) 寻优结束, 得到 PSO 寻优后的相关参数如表 3 所示。

表 3 参数辨识结果

参数	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$c_1$	$\alpha$	$\tau$
结果	3.12	0	0.47	1.25	1.32	2.37	3.14	0.17

由上得  $r_i = 2.37i$ ,  $\omega(r_i) = 3.14 \exp(-0.17 r_i)$ 。

为了验证模型的精度, 设定输入信号为

$$(0 \text{ V}, -1.5 \text{ V}, -0 \text{ V}, -1.4 \text{ V}, -0.2 \text{ V}, \\ -1.3 \text{ V}, -0.5 \text{ V}, -1.2 \text{ V}, -0.6 \text{ V})$$

电压变化速度为 0.5 V/s, 进行仿真试验。系统模型输出和试验输出如图 5 所示, 可以看出, 在 10 个广义算子的前提下, 系统的模型精度很高。

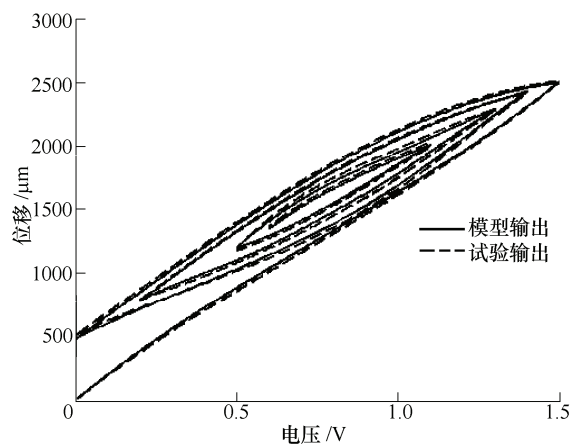


图 5 模型输出和试验输出



## 5 基于广义逆模型的前馈控制

试验表明,在波纹管驱动系统中,迟滞特性是影响定位精度的主要因素之一,基于广义 PI 逆模型的前馈控制器,对于补偿其迟滞特性有较好的效果。

### 5.1 直接前馈控制

将广义逆模型直接串联在被控对象前面,这种控制方案为直接前馈控制方案。理论上讲,直接前馈控制能够较好地补偿迟滞对系统输入信号跟踪的影响,其精度有较大的提高,尽管缺少反馈环节,但是在某些精度要求不高的场所,直接前馈控制可以节约价格昂贵的位置反馈环节,从而从很大程度上降低成本<sup>[20]</sup>。试验研究表明,采用直接前馈开环控制,控制精度可以达到几  $\mu\text{m}$  的等级,因此也有一定的使用价值。前馈控制方案如图 6 所示。

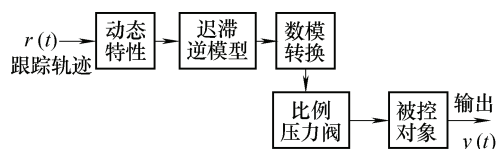


图 6 系统迟滞逆模型开环控制

### 5.2 复合控制方案

复合控制方案采用前馈控制复合反馈控制<sup>[21-22]</sup>,提高系统的定位精度<sup>[23]</sup>,反馈环节可以有效地应对外界干扰影响,同时处理波纹管其他特性,如蠕变特性等<sup>[24]</sup>。反馈控制器采用 PID 控制,其控制系统框图如图 7 所示。

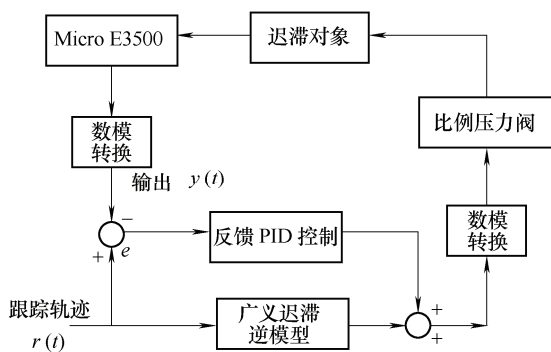


图 7 系统复合控制方案

## 6 试验与分析

利用复合控制方案在波纹管驱动平台上进行试验,按照定位试验和跟踪试验进行,主要参数如下:  
 $m=1.65\text{ kg}$ ,  $A=2.46\times 10^{-3}\text{ m}^2$ ,  $p_s=0.6\text{ MPa}$ ,  $p_0=0.4\text{ MPa}$

根据式(33)~(35),对系统广义逆模型进行辨识,可以得到其阈值为

$$v_i=(0, 4.973\ 9, 14.947\ 4, 28.279\ 4, 43.130\ 9, 58.020\ 5, 71.953\ 2, 84.369\ 5, 95.039\ 5, 103.954\ 0)$$

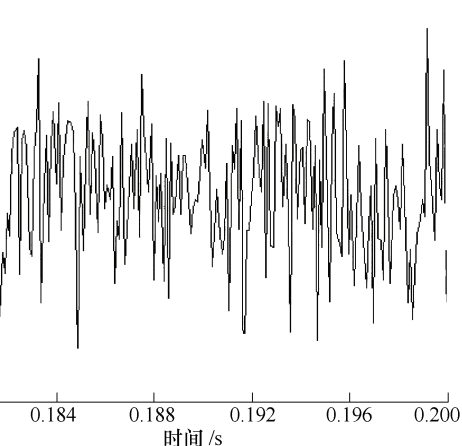
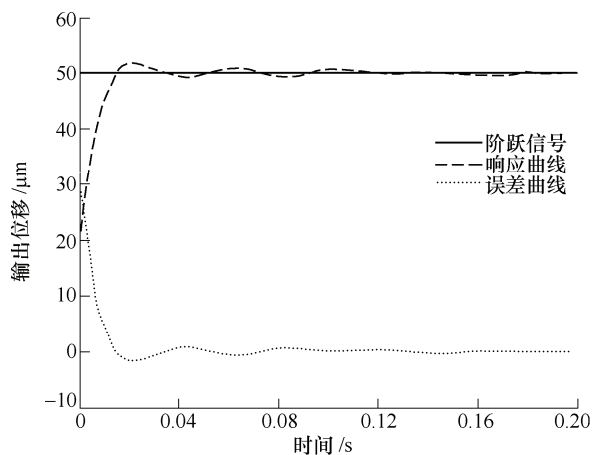
权值为

$$\lambda_v(i)=(0.801\ 7, 0.186\ 7, 0.190\ 9, 0.060\ 3, 0.027\ 9, 0.015\ 1, 0.008\ 9, 0.005\ 5, 0.103\ 5, 0.002\ 7)$$

为了验证广义 PI 模型对控制精度的影响,对基本 PI 模型和广义 PI 模型分别求逆,作为前馈控制器,反馈控制参数  $K_p=0.32$ ,  $K_i=0.12$ ,  $K_d=1.02$ 。

基于 PI 逆模型和广义 PI 逆模型的复合控制方案阶跃响应曲线如图 8 所示。阶跃设定值为  $50\ \mu\text{m}$ 。在复合控制方案下,基于 PI 逆模型的系统调整时间小于  $0.08\text{ s}$ ,超调在  $5\%$  左右,稳态误差小于  $0.07\ \mu\text{m}$ 。基于广义逆模型的系统的调整时间小于  $0.05\text{ s}$ ,超调在  $2\%$  左右,稳态误差小于  $0.03\ \mu\text{m}$ 。可以看出基于广义 PI 逆模型控制有更好的定位精度。

从图 8c 中可以看出,在  $1\ 000\ \mu\text{m}$  行程下,系统超调量大约在  $3\%$ ,其稳态误差能够维持在  $0.03\ \mu\text{m}$  左右,仍具有很好的精度。



(a) 基本 PI 逆模型阶跃响应和稳态误差曲线

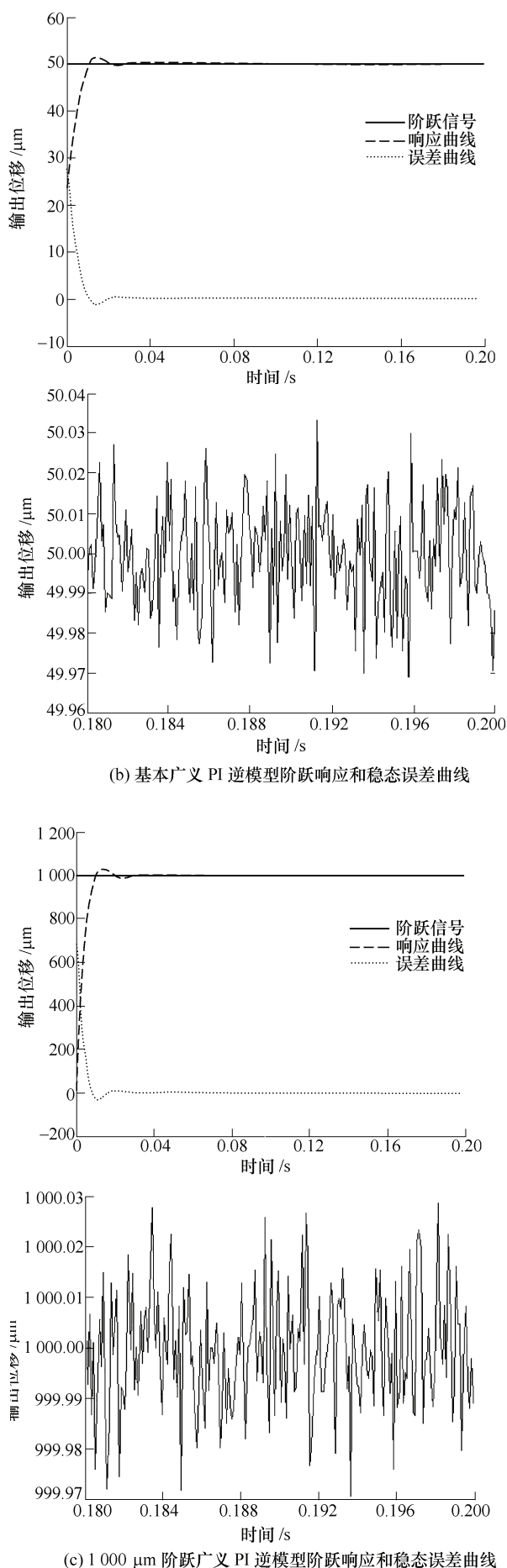


图 8 阶跃响应

跟踪试验采用三角波输入时, 其输入轨迹在  $0 \sim 30 \mu\text{m}$ , 分别对其在 PI 逆模型和广义 PI 逆模型的情况下进行试验研究, 跟踪效果如图 9 所示。采用复频信号输入时, 跟踪效果如图 10 所示。

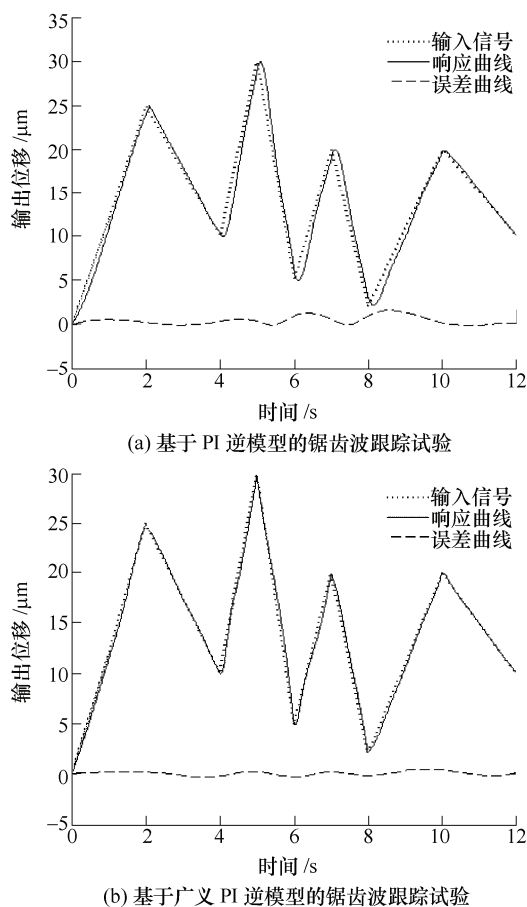


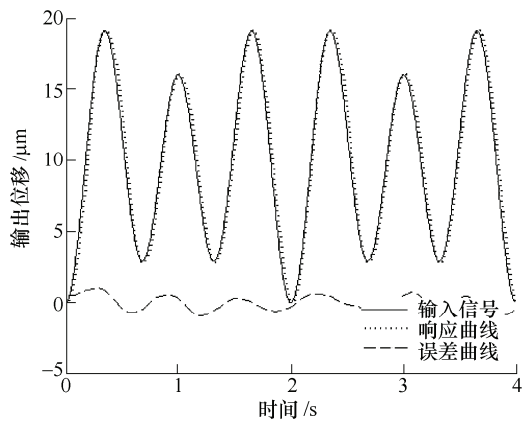
图 9 三角波信号跟踪试验

从图 9 可以看出, 锯齿波跟踪的情况下, 基于 PI 逆模型的跟踪误差最大为  $2.18 \mu\text{m}$ , 平均为  $0.96 \mu\text{m}$ 。在基于广义逆模型的复合控制方案下, 系统的跟踪误差最大为  $0.77 \mu\text{m}$ , 平均为  $0.49 \mu\text{m}$ 。复频波跟踪的情况下, 基于 PI 逆模型的跟踪误差最大为  $1.28 \mu\text{m}$ , 平均为  $0.63 \mu\text{m}$ 。在基于广义逆模型的复合控制方案下, 系统的跟踪最大误差为  $0.72 \mu\text{m}$ , 平均为  $0.45 \mu\text{m}$ , 满足超精密定位平台的要求。

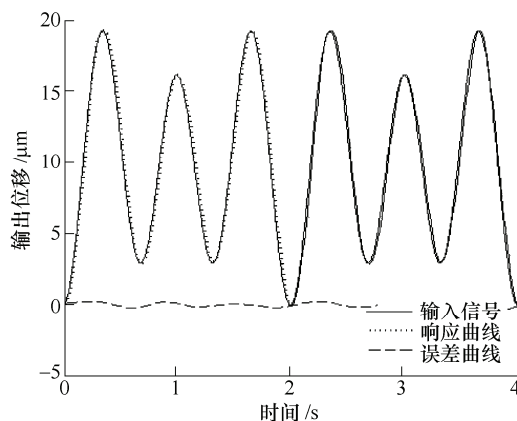
需要特别指出的是, 上述的控制效果和比较, 不管是定位试验还是跟踪试验, 基本 PI 模型的算子数量为 20 个, 而广义 PI 模型的算子数量为 10 个。因此广义 PI 模型在较少的算子数量下, 其控制精度, 仍有明显的优势。

## 7 结论

针对波纹管驱动系统中存在的迟滞特性, 分析了迟滞环的特性, 建立了广义 PI 模型, 并根据包络



(a) 基于 PI 逆模型的复频信号跟踪试验



(b) 基于 PI 广义逆模型的复频信号跟踪试验

图 10 复频信号跟踪试验

线  $I_1$  和  $I_2$  对广义 PI 模型求逆。

(1) 波纹管采用气动作为驱动能源, 受环境影响较小。波纹管造价低廉, 有着明显的成本优势。通过建模和控制方案优化, 波纹管在较大行程中有着很高的精度, 这一点相对于其他超精密驱动装置, 如压电等是不能比拟的, 这样在一些较大行程的超精密驱动平台中可以避免两级驱动的模式, 简化了机械结构<sup>[25]</sup>。

(2) 对基本 PI 模型进行推广, 建立了广义 PI 模型, 并给出了求解逆方法, 建立了广义 PI 逆模型。广义 PI 模型对算子数量要求较低, 且建模精度很高, 从很大程度上降低了运算量。

(3) 基于广义 PI 逆模型, 设计了波纹管定位平台的复合控制方案, 通过与基本 PI 模型对比, 控制效果有明显改进。

波纹管作为执行机构, 目前国外有一定的研究, 表明其在超精密控制中的应用是完全可行的<sup>[26]</sup>, 但是国内还没有进一步的研究。本文证明了其作为超精密执行器的可行性。但是波纹管驱动目前也存在诸多问题, 如还没有专门的企业生产驱动用波纹管, 无统一行业标准, 波纹管作为驱动其机械特性和使

用寿命有待进一步研究和优化。

## 参 考 文 献

- [1] 张从鹏, 刘强. 直线电机气浮精密定位平台设计与控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(2): 224-228.  
ZHANG Congpeng, LIU Qiang. Design and control of air bearing precision positioning stage driven by linear motors[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(2): 224-228.
- [2] 赵兴玉, 张胜泉, 张大卫. 基于音圈电机精密定位平台的控制系统设计与仿真[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 127-131.  
ZHAO Xingyu, ZHANG Shengquan, ZHANG Dawei. Design and simulation of the control system of precision positioning table driven by voice coil actuator[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(2): 127-131.
- [3] 冯晓梅, 张大卫, 赵兴玉. 基于音圈电机的新型高速精密定位系统设计方法[J]. 中国机械工程, 2005, 16(16): 1414-1418.  
FENG Xiaomei, ZHANG Dawei, ZHAO Xingyu. The new high-speed precision positioning system design methodology based on voice coil motor[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(16): 1414-1418.
- [4] SHINNO H, YOSHIKA H, TANIGUCHI K. A newly developed linear motor-driven aerostatic X-Y planar motion table system for nano-machining[J]. Annals of the CIRP, 2007, 56: 369-372.
- [5] CHIANG M, CHEN C, TSOU T. Large stroke and high precision pneumatic-piezoelectric hybrid positioning control using adaptive discrete variable structure control[J]. Mechatronics, 2005, 15: 523-545.
- [6] KENJI K, TAKESHI A, KOTARO T, et al. Development of coarse/fine dual stage using pneumatically driven bellows actuator and cylinder with air bearings[J]. Precision Engineering, 2010, 34: 526-533.
- [7] JANAIDEH M A, RAKHEJA S, SU C Y. A generalized Prandtl-Ishlinskii model for characterizing hysteresis nonlinearities of smart actuators[J]. Smart Mater. Struct., 2009, 18(4): 1-9.
- [8] KREJCI P, KUHNEN K. Inverse control of systems with hysteresis and creep[J]. Proc. Inst. Elect. Eng.: Control Theory Applications, 2001, 148(3): 185-192.
- [9] KUHNEN K. Modeling, identification and compensation of complex hysteretic nonlinearities: A modified Prandtl-Ishlinskii approach[J]. European Journal of Control, 2003, 9(4): 407-418.
- [10] JANAIDEH M A, SU C Y, RAKHEJA S. Development of the ratedependent Prandtl-Ishlinskii model for smart



- actuators[J]. Smart Mater. Struct., 2008, 17(3): 1-11.
- [11] 赵新龙, 谭永红, 董建萍. 基扩展空间法的压电执行器迟滞特性动态建模[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 169-174.
- ZHAO Xinlong, TAN Yonghong, DONG Jianping. Dynamic modeling of rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuators based on expanded input space method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(20): 169-174.
- [12] 张新宇, 陈忠基. 基于有限元法的气浮支撑系统的数值模拟与实验研究[J]. 辽宁科技大学学报, 2008, 31(3-4): 285-287.
- ZHANG Xinyu, CHEN Zhongji. Numerical simulation based on finite element method and experiment of aerostatic bearing system[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2008, 31(3-4): 285-287.
- [13] 王占彬, 周浩洋. 一种 U 型波纹管强度及稳定性分析方法研究[J]. 强度与环境, 2012, 39(4): 19-24.
- WANG Zhanbin, ZHOU Haoyang. Research on the analytical method of U-shape bellows strength and Stabilization[J]. Structure and Environment Engineering, 2012, 39(4): 19-24.
- [14] LI Yuntang, HE Ding. Design analysis and experimental study of aerostatic linear guideways used in a high acceleration and high precision x-y stage[J]. Proc. IMechE, Part J: J. Engineering Tribology, 2007, 221(J1): 1-9.
- [15] 张栋, 张承进, 魏强. 压电微动工作台的动态迟滞模型[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 549-556.
- ZHANG Dong, ZHANG Chengjin, WEI Qiang. Dynamic hysteresis model of piezopositioning stage[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 549-556.
- [16] ZHANG Dong, ZHANG Yulin, LI Xianming, et al. Modeling and controller design of SECM's Micro/Nanoposition systems[J]. Micronano electronic Technology, 2009, 46(7): 428-443.
- [17] WEI T, PRADEEP K K, CAMERON N. Riviere feed forward controller with inverse rate-dependent model for piezoelectric actuators in trajectory-tracking applications [J]. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, 2007, 12(2): 134-142.
- [18] JANAIDEH M A, KREJCI P. Inverse rate-dependent Prandtl-Ishlinskii model for feedforward compensation of hysteresis in a piezomicropositioning actuator[J]. IEEE/ASME Transactions on mechatronics, 2013, 18(5): 1498-1507.
- [19] 田艳兵. 基于 PSO 的自整定 PID 温度控制研究[J]. 化工仪表自动化, 2012, 37(11): 31-33.
- TIAN Yanbing. The design of self-tuning PID temperature controller based on PSO [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2010, 37( 11): 31-33.
- [20] 王希花, 郭书祥, 叶秀芬, 等. 压电陶瓷迟滞特性的建模及复合控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 13(5): 766-771.
- WANG Xihua, GUO Shuxiang, YE Xiufeng, et al. Modeling and feed-forward control based on piezoelectric ceramic hysteretic[J]. Electric Machines and Control, 2012, 13(5): 766-771.
- [21] 崔玉国, 董纬杰, 孙宝元, 等. 压电微动工作台的位移复合控制[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3): 156-161.
- CUI Yuguo, DONG Weijie, SUN Baoyuan, et al. Displacement compounding control of piezoelectric micro-motion worktable[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3): 156-161.
- [22] 唐志峰, 吕福在, 项占琴. 超磁致伸缩微位移驱动器的非线性迟滞建模及控制方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 55-61.
- TANG Zhifeng, LÜ Fuzai, XIANG Zhanqin. Nonlinear hysteresis model and control of magnetostrictive micropositioner[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 55-61.
- [23] SONG G, ZHAO Jinqiang, ZHOU Xiaoxin, et al. Tracking control of a piezoceramic actuator with hysteresis compensation using inverse Preisach model [J]. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2005, 10(2): 198-209.
- [24] CROFT D, SHED G, DEVASIA S. Creep, hysteresis, and vibration compensation for piezoactuators: Atomic force microscopy application [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2001, 123(1): 35-43.
- [25] 张建明. 现代超精密加工技术和装备的研究与发展[J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(1): 1-7.
- ZHANG Jianming. Research and development of modern ultra-precision processing technology and equipment[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2008, 44(1): 1-7.
- [26] TOSHINORI F, KAZUTOSHI S, YUSUKE T, et al. Ultra precise positioning of a stage driven by pneumatic Bellows[J]. International Journal of Automation Technology, 2011, 5(4): 508-513.

作者简介: 田艳兵(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士研究生。主要研究方向为微纳运动控制系统。

E-mail: tianyanbing@qtech.edu.cn

王涛, 男, 1971 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为检测技术与自动化装置、流体传动及控制。

E-mail: wangtaobit@bit.edu.cn

王美玲, 女, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为新型传感器技术、组合导航与智能导航等。

E-mail: wangml@bit.edu.cn