

文章编号:1000-582X(2011)11-013-07

微纳传动系统的 BP 神经网络非线性控制

林 超,俞松松,程 凯,崔新辉,刘 刚

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

摘 要:对微纳传动系统的动态特性进行了分析,将微纳定位平台简化成等效弹簧-质量-阻尼模型,应用拉格朗日方法,建立了定位平台的动力学模型。结合压电陶瓷驱动器(PZT)的电容特性,推导了微纳传动系统的总传递函数。利用 BP 神经网络的自学习、自适应及非线性逼近功能,对该微纳传动系统的 PID 参数进行在线自整定。结合 PID 控制简单、实现容易与鲁棒性强的优点,设计了 BP 神经网络 PID(BPNN-PID)控制器,与传统 PID 控制相比,实现了更高的控制精度和更短的稳态时间,满足了微纳传动系统高精度与快速响应的要求。

关键词:微纳传动系统;动力学模型;BPNN-PID;非线性控制

中图分类号:TH113.22

文献标志码:A

Non-linear control of mirco/nano-transmission system using BP neural network

LIN Chao, YU Song-song, CHENG Kai, CUI Xin-hui, LIU Gang

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Dynamic characteristics of the mirco/nano-transmission system are analyzed. After simplified micro-nano-positioning platform to be a spring-mass-damper model equivalently, its dynamic model is established using Lagrange approach. Based on the capacitor characteristics of piezoelectric actuator (PZT), the overall-transfer-function of the system is deduced. Because of self-training function, adaptability and nonlinear approximation of BP neural network, the PID parameters are self-tuned online. A BPNN-PID controller is designed by combining the advantages of simpleness, easy realization and good robustness of PID method. The BPNN-PID controller realizes higher control accuracy and shorter steady-state residence time compared with traditional PID, and well meets the need of high accuracy and fast response of the mirco/nano-transmission system.

Key words: mirco/nano-transmission system; dynamical model; BPNN-PID; non-linear control

近年来,随着微纳米技术的迅猛发展,超精密领域对微纳传动系统的定位、控制精度的要求也越来越高^[1-2]。而传统机械系统由于装配造成的间隙及摩擦,定位精度局限于亚微米级,满足不了超精密领域的纳米级精度要求。压电陶瓷驱动器(PZT)具有

位移分辨率高、响应速度快、输出力大、换能效率高及静态不发热等优点,是纳米级定位技术中较理想的驱动元件^[3-4]。同时,整体式全柔性机构可免于装配、免于润滑及免于磨损,可实现纳米级精度的位移传递^[5]。因此,以 PZT 为驱动器、融合全柔性机构

收稿日期:2011-06-18

基金项目:重庆大学机械传动国家重点实验室自主研究项目(0301002109150);重庆大学机械传动国家重点实验室 2008 年度开放基金资助项目(SKLM-T-KFKT-200806)

作者简介:林超(1958-),男,重庆大学教授,博士,主要从事机械设计计算机辅助工程,微纳米传动系统的设计与分析,新型齿轮、精密传动的研究,(E-mail) linchao@cqu.edu.cn。

的微纳传动系统,可适用于超精密制造、超精密检测及微细加工技术等领域。

目前,微纳定位工作台的结构学和运动学方面的研究已取得了重大进展,文献[6-9]提出了以PZT为驱动器、柔性铰链为导轨的高精密定位工作台,可实现多自由度的纳米级定位。同时,微纳定位系统的定位精度及动态性能,决定着系统的实用性和稳定性,特别在柔性机构发生大变形的情况下^[10-11],须准确地建立系统的动力学模型。同时,要满足工程实际要求,必须选择合适的控制策略,以缩短响应时间,提高定位精度。传统PID控制器可满足上述要求^[12],但人工整定参数 K_p 、 K_i 、 K_d 比较繁琐^[13-14],且控制精度得不到保证。而BP神经网络具有逼近任意有界连续非线性函数的功能^[15],因此,BPNN-PID控制器,可在线自整定参数 K_p 、 K_i 、 K_d ,使系统具有良好的鲁棒性、自适应性及抗干扰能力^[16-17],以获得满意的控制效果。

笔者建立了微纳传动系统动力学模型,推导了系统的总传递函数,结合BPNN-PID控制器,实现了微纳传动系统的实时闭环控制。通过对比分析不同控制策略下系统的响应,结果表明,BPNN-PID控制方法更方便、更迅速、更准确,可很好地满足微纳传动系统的控制要求。

1 微纳传动系统分析

1.1 系统结构

结合柔性机构学、机械原理及机构创新设计方法,设计了图1所示的微纳传动系统,其外形尺寸为 $180\text{ mm} \times 180\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 。系统由压电陶瓷驱动器及全柔性定位平台两大部分组成。微纳定位平台由整块金属材料经钻、铣、磨及线切割一体加工而成。定位平台由6个微位移放大机构优化组合而成,并由6个双极性PZT驱动,PZT由于逆压电效应而产生的微位移输出量,作为系统的微位移输入。当对PZT1施加特定波形的正电压时,PZT1伸长,其位移输出量经微位移放大机构的放大和传递(微位移放大原理如图2),则系统可实现沿Y向的移动,由于其结构完全对称,则可消除X向位移耦合,保证了Y向移动的线性度。同理,系统可实现沿X向的纯线性移动。同时对PZT3-6施加相等正电压时,系统可实现沿Z向的纯线性移动;对PZT3施加正电压,并对PZT4施加相等大小的负电压时,可实现绕Y向的摆动;同理,对PZT5、PZT6同时施加大小相等、极性相反的电压时,则系统可实现绕X向的摆动。

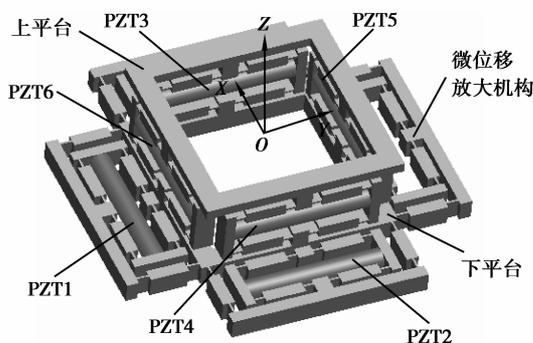


图1 系统结构图

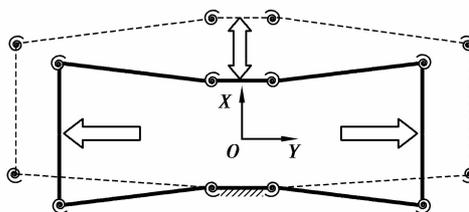


图2 机构放大原理图

1.2 系统动力学模型

根据有限元理论,可建立定位平台的动力学模型为:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{D} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \mathbf{x} = \mathbf{F}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为主质量矩阵; \mathbf{D} 为主阻尼矩阵; \mathbf{K} 为主刚度矩阵; \mathbf{x} 为位移向量; \mathbf{F} 为PZT驱动力。

由于定位平台由多个微位移放大机构组合而成,将放大机构简化为等效的弹簧-质量-阻尼模型,如图3所示。同时,综合PZT的刚度特性,可推导微纳传动系统的等效质量矩阵与等效刚度矩阵,得式(2)。

$$\begin{bmatrix} M_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\theta}_x \\ \ddot{\theta}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{\theta_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{\theta_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} K_X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_Y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_Z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\theta X} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{\theta Y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta_X \\ \theta_Y \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \\ M_X \\ M_Y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: λ 为微位移放大比。由微纳传动系统的结构特征,可建立系统的总动力学模型,如图 4 所示。

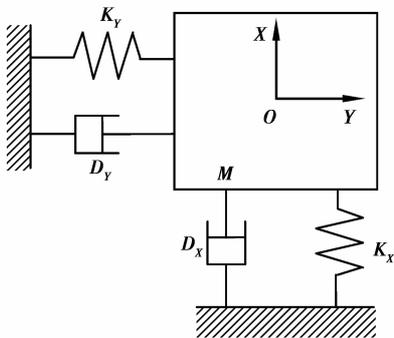


图 3 弹簧-质量-阻尼模型

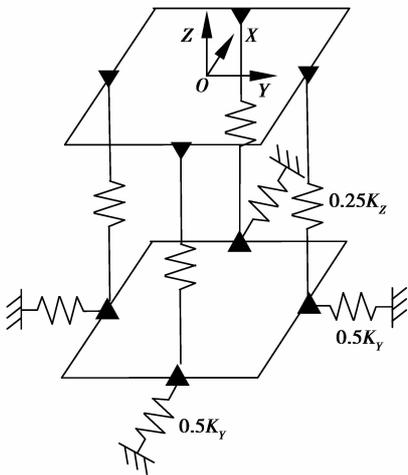


图 4 系统动力学模型

2 动态分析

2.1 PZT 的动态特性

PZT 的共振频率是比较高的,一般都在几十千核兹以上。当工作频率远低于共振频率时,PZT 可以等效成图 5 所示的 RLC 电路。

那么,PZT 的传递函数为

$$W(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{\omega_{np}^2}{s^2 + 2\xi_p \omega_{np} s + \omega_{np}^2}, \quad (3)$$

式中: $\xi_p = 0.5R \sqrt{\frac{C}{L}}$ 为 PZT 的阻尼比,常取工程最

佳参数 $\xi_p = 0.707$; 谐振频率 $\omega_{np} = \sqrt{L \cdot C}$ 为 PZT 的固有参数。

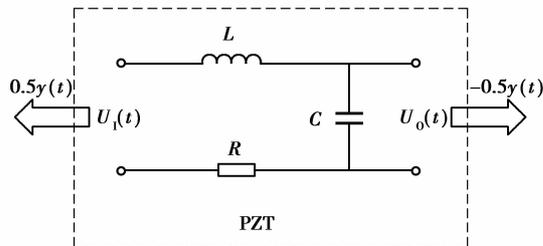


图 5 PZT 的 RLC 电路图

根据 PZT 的电位移特性,当驱动电压大于特定值后,可忽略 PZT 的非线性特性,即微位移输出量与驱动电压成线性正比。但是,若驱动电压一定,当 PZT 受外力作用,其微位移输出量与外力的大小成线性反比。微位移输出量与驱动电压、驱动力的关系为

$$y(t) = rU_o(t) - \frac{F(t)}{K_{pzt}}, \quad (4)$$

式中: r 为比例系数; $U_o(t)$ 为驱动电压; $F(t)$ 为 PZT 的驱动力; K_{pzt} 为 PZT 刚度; $y(t)$ 为 PZT 的微位移输出量。

2.2 定位平台的动态方程

由式(1)可知,系统沿 X 向移动动态方程为

$$M_X \ddot{x} + D_X \dot{x} + K_X x = \frac{F_X}{\lambda}. \quad (5)$$

结合式(4)与式(5),得

$$M_X \ddot{x} + D_X \dot{x} + (K_X + \frac{K_{pzt}}{\lambda^2})x = \frac{rK_{pzt}}{\lambda} U_o(t). \quad (6)$$

那么,定位平台沿 X 向的传递函数为

$$G(s) = \frac{\frac{r\omega_{nx}^2 K_{pzt}}{(K_X \lambda)}}{s^2 + 2\xi_d \omega_{nx} s + \omega_{nx}^2 \left[1 + \frac{K_{pzt}}{(K_X \lambda^2)} \right]}, \quad (7)$$

式中:固有角频率为 $\omega_{nx} = \sqrt{K_X/M_X}$, ω_d 为定位平台的阻尼比, ω_{nx} 和 ξ_d 为固有参数。

同理,可推导其余自由度的传递函数。其中,稳态时间与 ω_{nx} 成反比,即 ω_{nx} 数值越大,瞬态阶跃响应速度越快。根据这一规律,应尽可能提高微纳传动平台的固有频率,以缩短稳态时间,为其结构设计提供理论依据。

2.3 系统的总传递函数

微纳传动系统的动态特性分析,有助于系统控制策略的选择,有助于提高微纳传动系统的定位精

度及分辨率。PZT 在特性波形电压驱动下,由于逆压电效应而产生微位移输出,微位移经定位平台实现微移动及微摆动,即系统的输入为施加在 PZT 上的电压,而输出为定位平台的移动量或摆动量。因此,分析微纳传动系统的动态特性时,应综合 PZT 及定位平台两部分的动态特性,合并式(3)和式(7),得到微纳传动系统的总传递函数为

$$H(s) = W(s) \cdot G(s)。 \quad (8)$$

3 微纳传动系统的 BPNN-PID 设计

3.1 传统 PID 控制

微纳传动系统中的 PZT,型号选用德国进口 PS150/10/60 VS15 型,其标称位移为 $60 \mu\text{m}$,刚度为 $35 \text{ N}/\mu\text{m}$,最大推力为 $3\ 500 \text{ N}$,谐振频率为 50 kHz ,系统参数如表 1 所示。将表 1 中参数代入式(8),得开环控制的响应曲线,如图 6 所示。由图可知,目标输出位移为 0.3 mm 时,最大超调量高达 90% ,稳态时间为 250 ms 左右,稳态误差约为 32.5% ,系统的振荡周期多,显然,开环控制满足不了

纳米级定位要求。而 PID 方法具有控制简单、实现容易与鲁棒性强的优点,经典增量式数字 PID 的控制算法,如式(9)所示。

$$u(k) = u(k-1) + K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) + K_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)), \quad (9)$$

式中: K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分环节的参数。

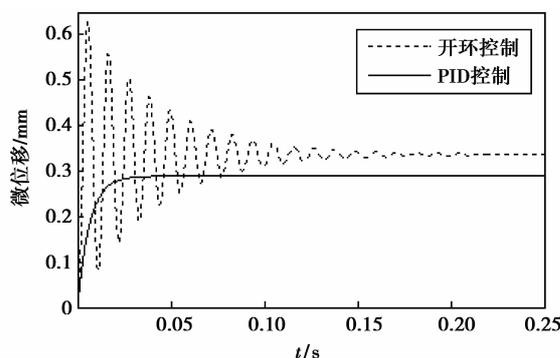


图 6 系统的开环响应

表 1 微纳传动系统的设计参数

λ	r	ξ_p	ξ_d	K_X /($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	K_Y /($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	K_Z /($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	$K_{\theta X}$ /($\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1}$)
20	0.25	0.707	0.03	268.12	268.12	448.24	453.60
$K_{\theta Y}$ /($\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1}$)	K_{pzt} /($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	ω_{nX} /Hz	ω_{nY} /Hz	ω_{nZ} /Hz	$\omega_{n\theta X}$ /Hz	$\omega_{n\theta Y}$ /Hz	ω_{np} /kHz
453.60	35 000	86.67	86.67	214.34	215.02	215.02	25

在 Matlab/Simulink 环境下,建立系统的 PID 控制仿真模型,如图 7 所示,可得系统的动态微位移响应曲线,但由于 PZT 的非线性、外部条件干扰及线切割局部高温导致的不同区域刚度和电特性的差

异等因素,使得系统的固有参数发生变化,可能导致系统的动力学模型与实际偏差较大,加之,传统 PID 控制对参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的凑试法操作繁琐,较难获得满意的控制效果。

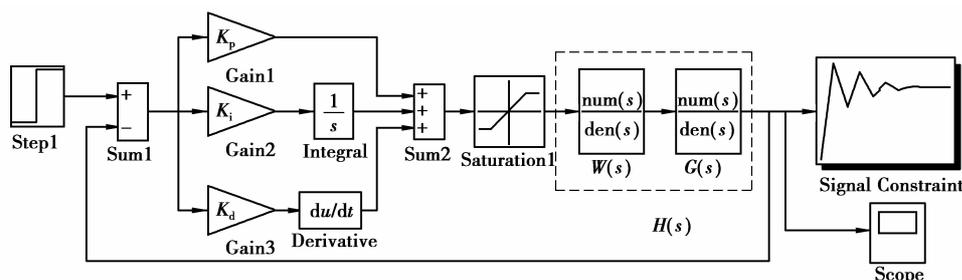


图 7 系统的仿真模型

3.2 系统的 BPNN-PID 控制

由于上述 PZT 的非线性特性及加工误差等原因导致系统特性的非线性,而 BP 神经网络逼近任意非线性函数的功能,可处理难以用精确模型描述的系统,很好地弥补传统 PID 的缺陷。因此,设计 BPNN-PID 控制器,可在线自整定 PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d ,减小了人工凑试的繁琐性和失误率,能使系统具有更强的适应能力和更好的鲁棒性,同时,满足系统毫秒级响应速度及纳米级定位精度的要求。

微纳传动系统的控制模型如图 8 所示,该 BPNN-PID 控制器,采用 4-5-3 层网络结构(见图 9),输入层 4 个神经元的输入为微纳传动系统的目标位移值 $r(k)$ 、位移输出值 $y(k)$ 、定位误差 $e(k)$ 及常数 1,隐含层采用 5 个神经元,可对该非线性系统进行很好地逼近,输出层的 3 个神经元分别输出 K_p 、 K_i 、 K_d ,BPNN-PID 算法如式(10)–(12)所示。

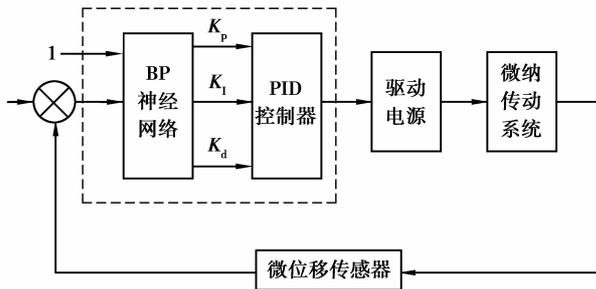


图 8 系统的控制模型

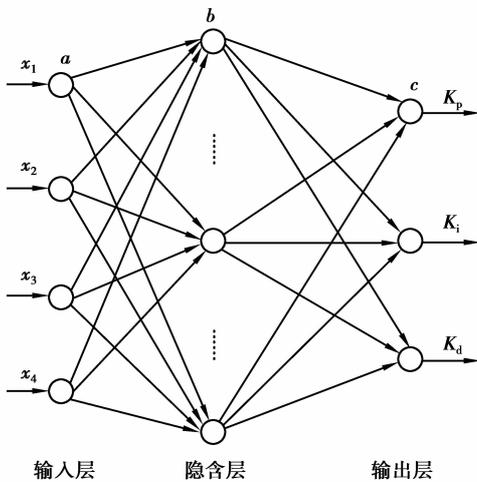


图 9 BPNN-PID 原理

将 BPNN 的输出 K_p 、 K_i 、 K_d 值自动赋予 PID 控制器,控制器将指令传达到驱动电源,PZT 在特定电压作用下,实现微纳传动系统的微移动或微摆动。同时,微位移传感器对系统的微移动进行实时检测,并反馈到 BPNN-PID 控制器,可得到预期的

目标响应,如图 10。

网络输入层的输入为

$$x_i = \begin{bmatrix} O_1^{(a)}(k) \\ O_2^{(a)}(k) \\ O_3^{(a)}(k) \\ O_4^{(a)}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e(k) \\ \sum_{i=1}^k e(k) \\ e(k) - e(k-1) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

网络隐含层的输入、输出为

$$\begin{bmatrix} \text{net}_i^{(b)}(k) \\ O_i^{(b)}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^4 \omega_{ij}^{(b)} O_j^{(a)} \\ f(\text{net}_i^{(b)}(k)) \end{bmatrix} \quad (11)$$

网络输出层的输出为

$$\begin{bmatrix} O_1^{(c)}(k) \\ O_2^{(c)}(k) \\ O_3^{(c)}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_p \\ K_i \\ K_d \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, ω_{ij} 为第 i 个输入单元到第 j 个输出单元的权系数;输入层至隐含层的激活函数取 S 型函数 $f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$;输出层的激活函数取非负的 S 型函数 $g(x) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}}$,网络训练函数为 Traingdx,采用收敛速度快的梯度下降算法。

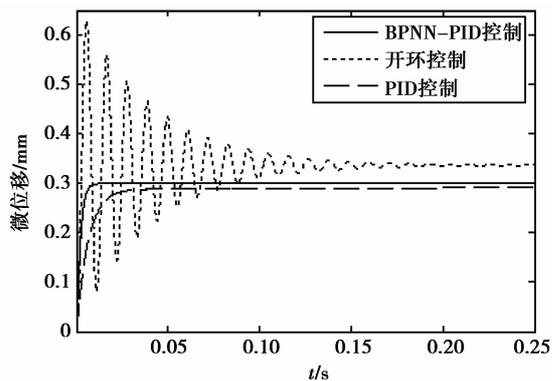


图 10 系统响应对比图

由图 10 可知,系统经过 BPNN-PID 控制后,相对于开环响应,其动态性能得到了很大改善。同时,BPNN-PID 控制相比于传统 PID 控制,稳态时间由 100 ms 缩短为 30 ms 左右,且稳态误差由 5.0% 系统减小到 0.1% 以下,动态性能得到了进一步的改进。因此,BPNN-PID 控制优于开环控制及传统 PID 控制。

BPNN 自整定的 PID 参数如图 11 所示,由图 11 可知,在 0~30 ms 时间段,BPNN 对 PID 参数进行在线自学习,其 K_p 、 K_i 、 K_d 值也在不断地非线性

性变化中,30 ms 后,BPNN 完成了对 PID 参数的整定, K_p 、 K_i 、 K_d 分别达到稳定值。图 11 中, K_p 、 K_i 、 K_d 值都在区间 $[0,1]$ 中变化,因为 BPNN 自学习时,先分别将 PID 参数初值归一到区间 $[0,1]$ 内,要想得到 K_p 、 K_i 、 K_d 的理想值,可反归一化处理。因此,BPNN-PID 简单、方便、精度高,非常适用于微纳传动系统的控制。

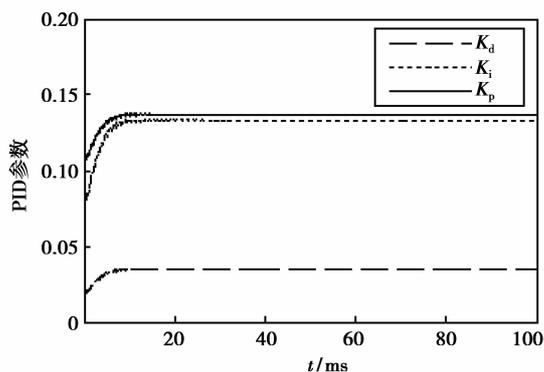


图 11 归一化的 PID 参数

3.3 系统的控制试验

利用 BP 神经网络的自学习、自适应及非线性逼近功能,对 PID 参数在线自整定,将设计的 BPNN-PID 控制器集成到 PZT 控制器中,以提高微纳传动系统的控制效果,试验装置如图 12 所示。系统包括电容式位移传感器、微纳定位平台、PZT 驱动器、PZT 控制器及计算机,其中,电容式位移传感器型号为德国米依 DT6500(量程:5 mm;线性度: $\leq \pm 250$ nm;重复性:15 nm;静态分辨率: ≤ 3.75 nm,动态分辨率: ≤ 100 nm)。



图 12 试验装置

应用电容式位移传感器软件,可检测微纳定位平台在阶跃输入下的微位移响应,如图 13 所示。由图可知,电容式位移传感器的分辨率在 3 nm 左右,在技术指标(3.75 nm)之内,精度是非常高的。在 72.83 s 时,对 PZT 施加特定电压,系统在 72.87 s

后微位移输出达到稳定,系统的动态响应时间约为 40 ms,与理论值 30 ms 非常接近。再者,电容式位移传感器检测到平台的微位移为 4.5 nm(由 0.161 187 mm 到 0.161 182 5 mm),3 种控制方法(开环控制、PID 控制、BPNN-PID 控制)的对比结果如表 2 所示。由表可知,BPNN-PID 控制方法的定位精度最高、响应速度最快,表明该方法用于微纳传动系统的控制是可行的。

表 2 3 种控制方法对比

动态指标	定位误差/%	响应速度/ms
开环	32.50	250
PID	5.00	100
BPNN-PID	0.10	30
试验	0.15	40

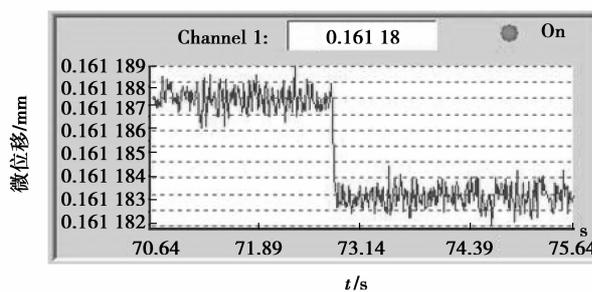


图 13 系统阶跃响应

4 结 论

应用 BP 神经网络和 PID 控制相结合的控制方法,与传统 PID 控制方法相比,可提高控制精度和响应速度。设计的 BPNN-PID 控制器,通过对微纳传动系统的控制试验,结果表明,微纳传动系统的定位精度高、响应速度快,与理论分析结果基本一致,说明 BP 神经网络 PID 控制方法,可满足微纳传动系统的纳米级定位精度及毫秒级定位速度的要求,为超高精密定位系统的控制策略奠定了一定的基础。

参考文献:

- [1] 张建甄,陈万银,可欣荣,等. 三自由度精密定位工作台的设计与仿真[J]. 现代制造工程,2009(3):39-42.
ZHANG JING-ZHENG, CHEN WAN-YIN, KE XIN-RONG, et al. Design and simulation of a 3-DOF micro-positioning worktable [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009(3):39-42.
- [2] 马立,荣伟彬,孙立宁. 三维纳米级微动工作台的设计与分析[J]. 光学精密工程,2006,14(6):1017-1024.
MA LI, RONG WEI-BIN, SUN LI-NING. Design and

- analysis of a novel 3-DOF nanopositioning stage[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14 (6): 1017-1024.
- [3] YUEN K Y, SUMEET S A, MOHEIMAN S O. Design, analysis and control of a fast nano-positioning stage [C] // Proceedings of the 2008 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics, Xi'an, China. [S. l.]: IEEE Press, 2008: 451-456.
- [4] ZHANG D Y, TANKAHITO O, MASAYO E, et al. Piezo-actuator-integrated monolithic micro-stage with six degrees of freedom[J]. Sensor and Actuator, 2005, 122(2):301-306.
- [5] WOUTE O S, FRANS GM K, HANS T, et al. Dimensionless design graphs for flexure elements and a comparison between three flexure elements [J]. Precision Engineering, 2005, 29(1):41-47.
- [6] WEI D, SUN L N. Stiffness research on a high-precision, large-workspace parallel mechanism with compliant joints [J]. Precision Engineering, 2008, 32(3):222-231.
- [7] CHU C L, FAN S H. A novel long-travel pzt-driven linear nano-positioning stage [J]. Precision Engineering, 2006, 30:85-95.
- [8] DEEPI, DONG J Y, EAKKACHAI P W, et al. A SOI-MEMS-based 3-DOF planar parallel-kinematics nanopositioning stage [J]. Sensor and Actuator A: Physcial, 2008, 147(1):340-351.
- [9] TANG X Y, CHEN I M, LI Q, et al. Design and nonlinear modeling of a large-displacement XYZ flexure parallel mechanism with decoupled kinematic structure[J]. Scientific Instruments, 2006, 77 (11): 1-11.
- [10] DONG J Y, YAO Q, PLA M F, et al. Dynamics, control and performance analysis of a novel parallel kinematics mechanism for integrated, multi-axis nano-positioning[J]. Precision Engineering, 2008, 32(1):20-33.
- [11] KYUNG S M, WOO C C, SHIN H S. Static and dynamic analysis of a nano-positioning flexure-hinge stage with a flexible lever mechanism[J]. Engineering Manufacture, 2005, 219(B):447-454.
- [12] 王伟. 3-RRR 并联微动工作台研制及其误差分析[D]. 合肥:合肥工业大学, 2007.
- [13] HUANG ZI Y, FEI M R, HU Z Q, et al. Smith online identification prediction control and its application in STM [C] // Proceedings of 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shanghai, China. [S. l.]: IEEE Press, 2002, 3:2254-2257.
- [14] 陆振宇, 朱日宏, 陈磊, 等. 光学超精密抗振系统的鲁棒控制[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007, 30(11): 23-26.
- LU ZHEN-YU, ZHU RI-HONG, CHEN LEI, et al. Robust control system for the optical extra-precise vibration isolation system [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30 (11): 23-26.
- [15] 李兴国, 金鑫, 何玉林. 基于神经网络的风力机动力学分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(8):78-83.
- LI XING-GUO, JIN XIN, HE YU-LIN. Dynamic analysis of wind turbine based on ANN [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(8):78-83.
- [16] 廖芳芳, 肖建. 基于 BP 神经网络 PID 参数自整定的研究[J]. 系统仿真学报, 2005(7):1711-1713.
- LIAO FANG-FANG, XIAO JIAN. Research on self-tuning of PID parameters based on BP Neural Networks [J]. Journal of System Simulation, 2005(7):1711-1713.
- [17] 王云峰, 李战明, 袁占亭, 等. RBF 神经网络与模糊理论相结合的磨矿分级智能控制方法[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(3):124-128.
- WANG YUN-FENG, LI ZHAN-MING, YUAN ZHAN-TING, et al. Intelligent control of the grinding and classification system based on fuzzy RBF neural network [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(3):124-128.