

## 光栅刻划机超精密定位系统定位控制研究

申远<sup>1,2</sup>, 王怡影<sup>1</sup>, 竺长安<sup>2</sup>, 齐向东<sup>3</sup>

(1. 合肥师范学院电子信息工程学院, 安徽合肥 230601;

2. 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽合肥 230027;

3. 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:**对光栅刻划机超精密定位系统的定位控制以及实验进行探索研究。鉴于控制模型和实验分析验证出光栅刻划机超精密定位系统具有较强的非线性和时变性, 提出将基于BP神经网络的PID控制方法用于光栅刻划机定位系统控制, 利用神经网络的自学习实时调节PID控制参数, 实现精密定位的自适应控制。通过控制实验, 稳定地获得了5 nm以内的定位精度。

**关键词:**光栅刻划机; 精密定位; BP神经网络; PID控制

**中图分类号:** TP274      **文献标识码:** A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.02.013

**引用格式:** Shen Yuan, Wang Yiyang, Zhu Chang'an, et al. Research on positioning control of the precision positioning system of the grating ruling machine[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(2): 165-170.

申远, 王怡影, 竺长安, 等. 光栅刻划机超精密定位系统定位控制研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(2): 165-170.

## Research on positioning control of the precision positioning system of the grating ruling machine

SHEN Yuan<sup>1,2</sup>, WANG Yiyang<sup>1</sup>, ZHU Chang'an<sup>2</sup>, QI Xiangdong<sup>3</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230601, China;

2. Department of Precision Machinery and Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The control and experiment research of the precision positioning system of the grating ruling machine were presented. Considering the non-linearity and time-variation characteristics of the precision positioning system, PID feedback control based on BP neural network was utilized in the positioning system. With the functions of self-learning, the parameters of the PID controller were adjusted in real time, and precision positioning could be realized by the PID controller. Experimental result shows that a positioning accuracy within 5 nm was achieved.

**Key words:** grating ruling machine; precision positioning; BP neural network; PID control

收稿日期: 2013-07-02; 修回日期: 2013-12-18

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZBYZ2008-1), 安徽省自然科学基金(1308085QE92), 中央高校基本科研业务费专项资金(WK2090090010), 合肥师范学院人才基金(2013RCJJ04)资助。

作者简介: 申远(通讯作者), 男, 1985年生, 博士后/讲师。研究方向: 自动控制技术。E-mail: shenyuan@ustc.edu.cn

## 0 引言

光栅是现代高精度光谱仪器的核心元件,光栅的制造能力已成为光谱仪器技术的关键.光栅制造技术是当今最为精密的技术之一,光栅刻划机被称为“精密机械之王”<sup>[1]</sup>.光栅刻划机刻划质量的决定性因素在于定位系统的定位精度,因此定位系统的超精密定位控制是光栅刻划机技术的核心.

超精密定位控制技术在现代超精密加工领域已经得到了广泛的应用,并成为研究的热点.韩国汉城大学研制的宏微结合的 200 mm 行程精密工作台,定位精度达到 10 nm<sup>[2]</sup>.在日本东京工业大学研究的定位系统中定位精度达到±2 nm<sup>[3]</sup>.各种先进的控制方法也被研究用于超精密定位平台.机械制造系统工程国家重点实验室的杨川等<sup>[4]</sup>研究智能 PID 控制技术应用于 X、Y 轴双向定位机构,达到了 25 nm 和 29 nm 的精度.哈尔滨工业大学精密工程研究中心研究了一个高精度定位系统,实现了 2 nm 的高定位精度<sup>[5]</sup>.张金龙等也进行了超精密定位以及角定位的研究<sup>[6-7]</sup>.

光栅刻划机定位系统需要大行程和纳米级的精度,因此本文采用宏微结合的工作台来实现这个目标.我们将宏动、微动定位台之间的作用作为外界扰动考虑在各自的模型中,对两个工作台进行理论建模后,发现定位系统具有时变和非线性的特点.基于此提出将基于 BP 神经网络的 PID 控制方法用于光栅刻划机定位系统控制,利用神经网络的自学习实时调节 PID 控制参数,实现精密定位的自适应控制.通过控制实验,发现控制方法有很好的补偿,最终达到了需求的精度.

## 1 光栅刻划机超精密定位系统结构

光栅刻划机的总体运行方式采用罗兰方式,即定位系统承载待刻光栅做单方向分度运动,刻划系统携刻刀做往复运动,运动方向与分度方向垂直.每 1 个运行周期定位系统前进 1 个步长,刻划系统刻划 1 次,形成 1 条栅线.

为了同时实现光栅刻划机的大行程以及精度需求,定位系统采用宏微结合的方式.光栅刻划机超精密定位系统的结构如图 1 所示.

定位系统分为宏微二级工作台,宏动工作台通过定位机构完成刻化机的粗定位动作,内工作台通过压电陶瓷和弹簧片与外台连接,完成精定位动作.

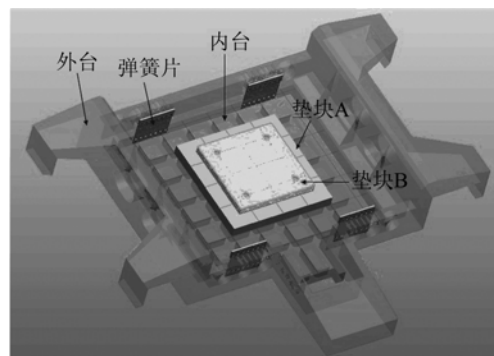


图 1 宏微二级超精密定位系统结构

Fig. 1 Architecture of the positioning system

宏动定位机构由一个伺服电机驱动,经过传动系统完成外工作台的粗定位.微动工作台通过弹簧片连接外台,并由压电陶瓷驱动进行精定位动作.

## 2 定位系统模型研究

根据定位系统的结构,我们进行了简化,得到了内外台的简化模型.

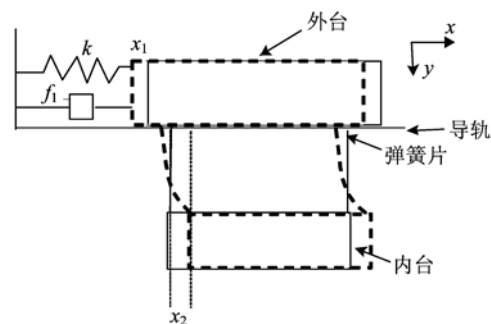


图 2 超精密定位系统模型

Fig. 2 Dynamic model of the positioning system

根据模型建立动力学方程如下:

$$\left. \begin{aligned} M\dot{x}_1(t) &= -(k_3 + k_p + k_1)x_1 - f_1\dot{x}_1 + \\ &\quad (k_3 + k_p)x_2 - ak_p u + k_1 S \\ m\dot{x}_2(t) &= (k_3 + k_p)x_1 - (k_3 + k_p)x_2 + ak_p u \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $M$  为外台质量;  $m$  为内台质量;  $k_1$  为与外台连接的螺母丝杠刚度;  $f_1$  为与外台连接的螺母丝杠的抗阻尼系数;  $k_3$  为与内外台相连接的弹簧片的刚度;  $l$  为与内外台相连接的弹簧片的长度;  $x_1$  为外台沿着  $x$  方向上的绝对位移;  $x_2$  为内台沿着  $x$  方向上的绝对位移;  $k_p$  为压电陶瓷的刚度.

在传递函数模型中作代换  $k_3 + k_p = k$ , 并且令精定位过程中  $S=0$ , 代入并做拉氏变换, 求解分别

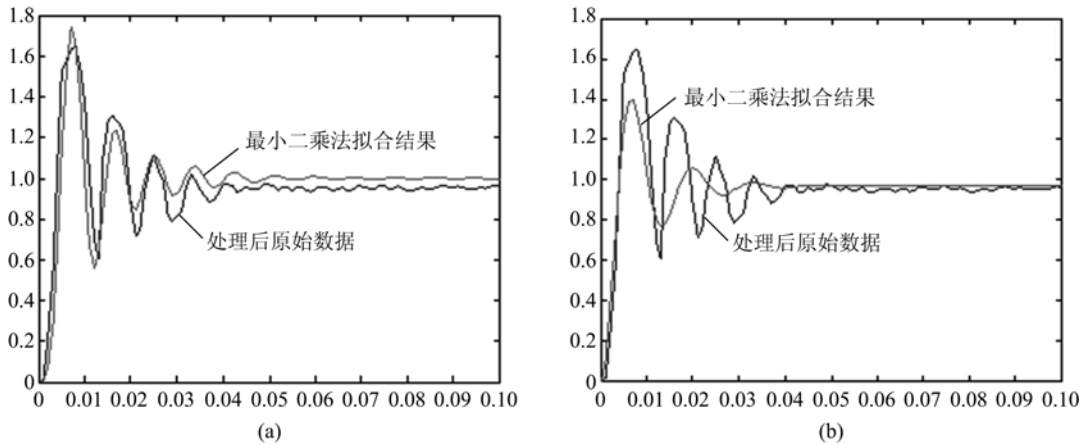


图 3 模型辨识结果

Fig. 3 Fitting results of the identified model

得到宏动、微动工作台绝对位移的频域解析解如下.

宏动工作台:

$$x_1(s) = \frac{ak_p u m s^2}{Ms^4 m + f_1 s^3 m + (Mk + k_1 m + mk) s^2 + f_1 s k + k_1 k} \quad (2)$$

微动工作台:

$$x_2(s) = \frac{ak_p u (f_1 s + Ms^2 + k_1)}{Ms^4 m + f_1 s^3 m + (Mk + k_1 m + mk) s^2 + f_1 s k + k_1 k} \quad (3)$$

宏微工作台的位移差:

$$x_2(s) - x_1(s) = \frac{ak_p u ((M + m) s^2 + f_1 s + k_1)}{Ms^4 m + f_1 s^3 m + (Mk + k_1 m + mk) s^2 + f_1 s k + k_1 k} \quad (4)$$

其中待辨识参数包括  $f_1, k_1, k_3$  和  $k_p$ .

模型辨识采用最小二乘法. 最小二乘法可以简便地求得未知的数据, 并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小, 其他一些优化问题也可通过最小化能量或最大化熵的方法用最小二乘法来表达<sup>[8]</sup>. 经过对海量实验测量数据进行统计和拟合, 获得辨识的参数值如下:

$$\begin{aligned} f_1 &= 0.007773793871494 \times 10^6, \\ k_1 &= 4.284177257867458 \times 10^6, \\ k_3 &= 2.310421613345190 \times 10^6. \end{aligned}$$

查询压电陶瓷的弹性系数, 其数量级为  $10^6$ , 与辨识结果吻合, 因此辨识的参数结果可信. 辨识标准差为 3.875 492 115 729 167, 将辨识出来的系统拟合曲线与实验数据进行比对, 如图 3(a), 可以看出

拟合结果比较理想.

但是, 随后对另一组实验数据进行测试, 辨识标准差上升到了 8.943 517 763(图 3(b)). 经过多次的实验数据对比发现, 精定位系统在不同时刻或处于不同的位置时, 系统特性会发生变化, 即定位系统具有时变、随位置变化等非线性特点. 在进行控制算法研究时, 必须要考虑系统的这些特性, 因此, 利用基于神经网络的 PID 算法的自学习、自适应特点来进行定位系统的控制研究较为合适.

### 3 控制算法研究

基于 BP 神经网络的 PID 算法中, 神经网络可以根据系统的运行状态, 调节 PID 控制器的参数, 以期达到某种性能指标的最优化, 使输出层神经元的输出状态对应于 PID 控制器的 3 个可调参数  $k_p, k_i, k_d$ , 通过神经网络的自学习、加权系数调整, 使神经网络输出对应于某种最优控制规律下的 PID 控制器参数.

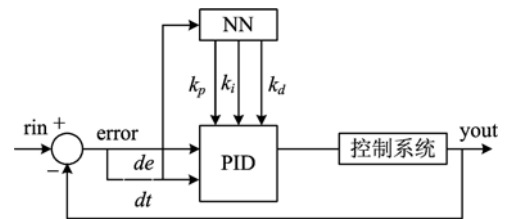


图 4 基于 BP 网络的 PID 控制器结构

Fig. 4 Structure of PID controller based on BP neural network

基于 BP 网络的 PID 控制器能够根据被控对象的变化, 对  $k_p, k_i, k_d$  参数进行调节, 在整个控制过程中,  $k_p, k_i, k_d$  3 个参数总是在不断向最优值逼近,

从而对控制效果有很大改进<sup>[9]</sup>. 可见 BP 神经网络的加入使 PID 控制的性能有了很大改善.

通过仿真和实验, 综合考虑计算精度和控制快速性问题, 我们对基于 BP 神经网络的 PID 控制器进行了多次调整和和改进<sup>[10]</sup>, 最终确定在光栅刻划机分度系统的控制中采用 3 层 BP 神经网络. BP 网络采用输入层 4 个神经元, 隐含层 5 个神经元, 输出层 3 个神经元的网络结构. 输入层的 4 个神经元分别为: ①系统的输入信号; ②系统的输出信号; ③系统的误差信号; ④PID 控制器的输出. 隐层的神经元个数  $Q=5$ . 而输出层的 3 个神经元即  $k_p, k_i, k_d$  3 个控制参数. 具体的网络结构如图 5 所示.

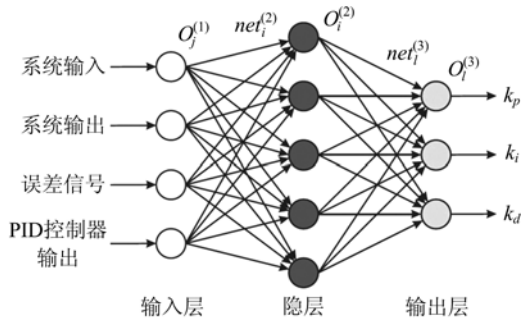


图 5 系统选用的 BP 神经网络结构

Fig. 5 Architecture of the BP neural network

网络输入层各节点的状态为

$$O_j^{(1)}(k) = x_j(k), \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

网络隐含层的输入为

$$net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=1}^4 \omega_{ij}^{(2)} O_j^{(1)}(k) - \theta_i^{(2)} \quad (6)$$

输出为

$$O_i^{(2)}(k) = f(net_i^{(2)}(k)), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (7)$$

式中,  $\omega_{ij}^{(2)}$  为隐含层加权系数;  $\theta_i^{(2)}$  为隐含层第  $i$  个神经元的阈值; 上标 (1), (2), (3) 分别代表输入层、隐含层和输出层.

隐含层神经元的激励函数选取正负对称的 Sigmoid 函数:

$$f(X) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}.$$

网络输出层的输入为

$$net_l^{(3)}(k) = \sum_{i=1}^5 \omega_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \quad (8)$$

输出为

$$O_l^{(3)}(k) = f(net_l^{(3)}(k)), \quad l = 1, 2, 3 \quad (9)$$

即  $O_1^{(3)}(k) = k_p; O_2^{(3)}(k) = k_i; O_3^{(3)}(k) = k_d$ .

输出层的输出节点分别对应 PID 控制器的 3

个参数  $k_p, k_i, k_d$ , 由于这 3 个参数不能为负值, 因此输出层神经元的活化函数取非负的 Sigmoid 函数:

$$g(X) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}.$$

取性能指标函数为

$$E(k) = \frac{1}{2} (rin(k) - yout(k))^2 \quad (10)$$

通过分析可得隐含层加权系数的学习算法为

$$\left. \begin{aligned} \Delta \omega_{ij}^{(2)}(k) &= \alpha \Delta \omega_{ij}^{(2)}(k-1) + \eta \delta_i^{(2)} O_j^{(1)}(k) \\ \delta_i^{(2)} &= f'(net_i^{(2)}(k)) \sum_{l=1}^3 \delta_l^{(3)} \omega_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \\ & \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中,  $f'(\cdot) = (1 - f^2(x))/2$ .

网络输出层加权系数的学习算法为

$$\left. \begin{aligned} \Delta \omega_{li}^{(3)}(k) &= \alpha \Delta \omega_{li}^{(3)}(k-1) + \eta \delta_l^{(3)} O_i^{(2)}(k) \\ \delta_l^{(3)} &= error(k) \operatorname{sgn} \left[ \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \right] \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_l^{(3)}} \cdot \\ & \quad g'(net_l^{(3)}(k)), \quad l = 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中,  $g'(\cdot) = g(x)(1 - g(x))$ .

在 Matlab 中加入上述 BP 神经网络 PID 控制算法, 使用在之前辨识的模型, 进行系统的阶跃响应仿真, 获得了如图 6 所示的效果. 可以发现系统可以较快速地到达目标位置, 并且能够有效地抑制超调.

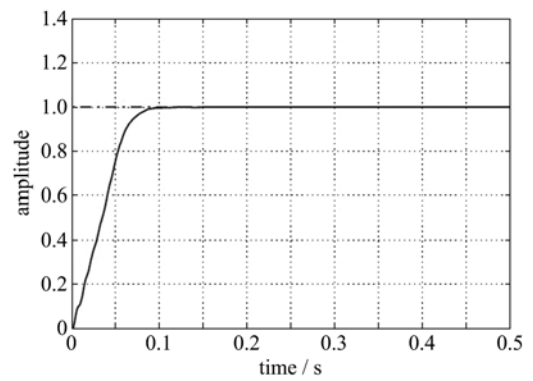


图 6 控制算法仿真结果

Fig. 6 Simulation result of the control algorithm

## 4 定位系统实验

实验在国内某科研单位 2 号光栅刻划机的超精密定位系统上进行, 如图 7 所示. 根据衍射光栅刻划机定位精度的要求, 实验选用 HP(agilent) 5527 型双频激光干涉仪作为工作台位置反馈的测量系统,

其分辨率为 0.15 nm ( $\lambda/4096$ ;  $\lambda=632.8$  nm). 根据定位系统机械结构, 双频激光干涉仪测量系统的布置如图 7 所示, 激光干涉仪采集的数据通过数据处理系统发送给计算机, 然后由计算机进行统一的分析处理.

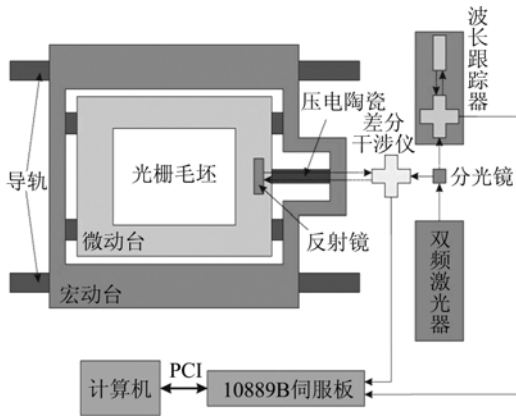


图 7 定位系统实验方案

Fig. 7 Experiment scheme of the positioning system

为了检测控制的有效性和稳定性, 实验并不采用单次阶跃测试, 而采用长时间刻划实验, 通过计算机采集并进行数据处理, 并从多次阶跃中随机提取出一次阶跃数据进行分析, 如图 8 所示.

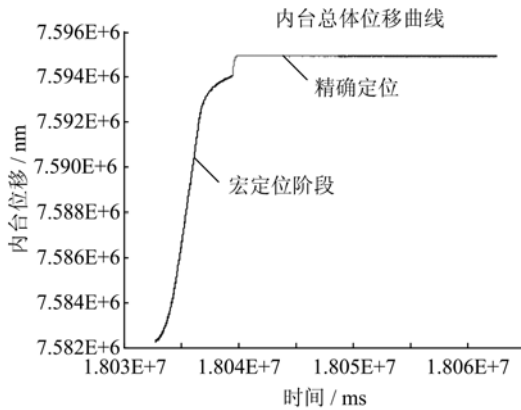


图 8 刻线数据

Fig. 8 Data of the groove

通过对基于 BP 神经网络的 PID 控制下刻线数据中处于稳态的数据点进行拟合, 统计出刻线的  $3\sigma$  值, 如图 9 所示. 刻线的  $3\sigma$  值约为 4.42 nm, 实际统计 99.74% 的测量点误差都在 5 nm 以内. 在之前的研究工作中, 采用普通的 PID 控制获得的  $3\sigma$  值约为 15 nm, 如图 10 所示, 仅有 97.67% 的测量点误差在 10 nm 以内. 通过数据对比可以明显看出, 基于 BP 神经网络的 PID 控制算法对于提高光栅刻划机

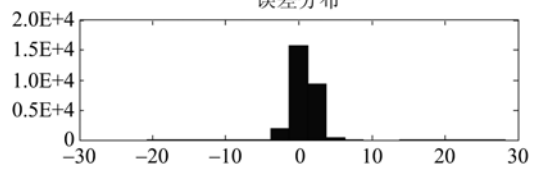
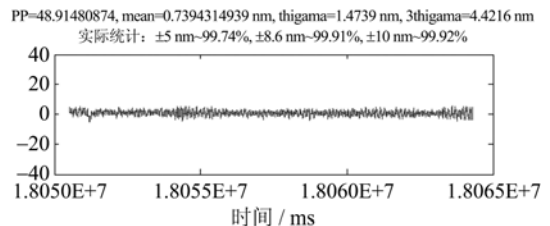


图 9 BPPID 控制实验误差数据统计

Fig. 9 Experiment error statistics of PID control based

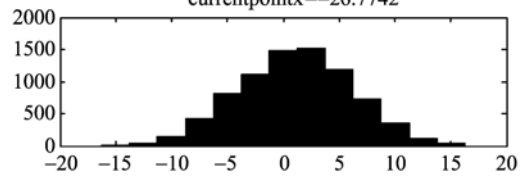
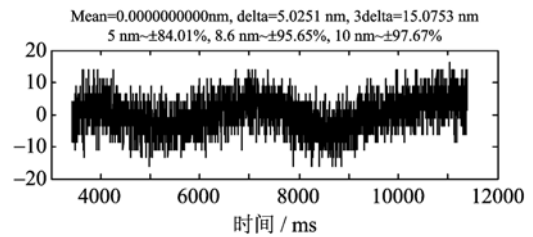


图 10 普通 PID 控制实验误差数据统计

Fig. 10 Experiment error statistics of ordinary PID control

定位精度有明显的作用.

## 5 结论

本文进行了光栅刻划机超精密定位控制方法的探索、实验以及数据分析. 首先对光栅刻划机超精密定位系统进行数学模型建立和辨识, 分析出光栅刻划机超精密定位系统具有较强的非线性和时变性, 提出将基于 BP 神经网络的 PID 控制方法用于光栅刻划机定位系统控制. 之后通过控制算法的优化以及控制系统的反复调试, 进行长时间刻划实验和批量数据统计分析, 最终获得了 5 nm 以内的定位精度. 对比普通 PID 控制实验数据, 定位精度明显提高, 误差变化随机性很强, 没有明显的变化趋势, 也不呈现出周期性变化, 这反映了控制算法的有效性和稳定性.

## 参考文献(References)

- [1] Shi Lun, Hao Defu, Qi Xiangdong. High precision photoelectric diffraction grating ruling engine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(S2):103-104.  
时轮, 郝德阜, 齐向东. 高精度的光电式衍射光栅刻划机[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(S2): 103-104.
- [2] Pakh H J, Lee D S, Park J H. Ultra precision positioning system for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41: 51-63.
- [3] Mao J, Tachikawa H, Shimokohbe A. Precision positioning of a DC-motor-driven aerostatic slide system[J]. Precision Engineering, 2003, 27: 32-41.
- [4] Yang C, Zhao Q, Zhang Z. Application research on intelligent control system in ultra-precision positioning system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(6): 1 218-1 223.
- [5] Lu L H, Liang Y C, Guo Y F, et al. Design and testing of a nanometer positioning system[J]. Journal of dynamic systems, measurement, and control, 2010, 132: 021011;doi: 10.1115/1.4000811.
- [6] Zhang Jinlong, Liu Yang, Guo Yiqian, et al. Research on Ultra-precision Nanopositioning Stage[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011,47(9):187-192.  
张金龙, 刘阳, 郭怡倩, 等. 纳米级超精密定位工作台的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9):187-192.
- [7] Zhang Jinlong, Xu Hui, Liu Jingnan, et al. PID control based on fuzzy neural network for precision angular alignment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012,33(3):549-554.  
张金龙, 徐慧, 刘京南等. 基于模糊神经网络的精密角度定位 PID 控制[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 549-554.
- [8] 夏天长. 系统辨识:最小二乘法[M]. 熊光楞, 李芳芸, 译. 北京:清华大学出版社, 1983.
- [9] 张泽旭. 神经网络控制与 MATLAB 仿真[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2011.
- [10] Zhong R, Wang Y B, Xu Y Z. Position sensorless control of switched reluctance motors based on improved neural network [J]. Electric Power Applications, IET, 2012, 6(2):111-121.
- 
- (上接第 118 页)
- [23] Zhang Huaan, Wang Naiang, Li zhuolun, et al. Features of hydrogen and oxygen isotopes in lakes and groundwater in Southeast Badain Jaran Desert [J]. Journal of Desert Research, 2011,31(6): 1 623-1 629.  
张华安, 王乃昂, 李卓伦, 等. 巴丹吉林沙漠东南部湖泊和地下水的氢氧同位素特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6):1 623-1 629.
- [24] Rank D, Völkl G, Maloszewski P, et al. Flow dynamics in an alpine karst massif studied by means of environmental isotopes [J]. Isotope Techniques in Water Resources Development, 1991:327-343.
- [25] Velderman B J. Groundwater recharge and contamination; Sensitivity analysis for carbonate aquifers in south-eastern Ontario-The Jock River Basin study [D]. Unpublished MSc thesis. Ottawa, Canada; University of Ottawa, 1993:126.
- [26] 桂和荣, 陈陆望. 矿区地下水水文地球化学演化与识别 [M]. 北京:地质出版社, 2007.