采用反射叠栅信号的超精密定位技术研究

范育奇[1] 周 晨[1] 张金龙[1] 刘京南[2] 内田敬久[3]

[1]南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042

[2]东南大学自动控制系, 江苏 南京 210096

[3]日本爱知工业大学智能机械工学科, 丰田市 470-0392

摘要 在光学理论基础上,对反射型双光栅检测系统进行了研究。建立了以反射叠栅信号及其相应位移为对象的数学模型,并利用Matlab软件对反射叠栅信号其位移特性进行数值计算及分析仿真,经仿真研究发现,反射0次叠栅信号输出光波强度最强、呈现出稳定的规律性。据此,设计实现一种基于反射叠栅信号的超精密定位系统,以反射0次叠栅信号作为定位台的控制信号,在微型计算机闭环作用下,实现微定位工作台高精度位移偏差实时检测以及超高精度自动定位。对于反射定位系统存在的非线性、迟滞性等特点,提出基于模糊径向基函数(RBF)神经网络的智能比例积分微分(PID)控制技术,在二者共同作用下在线实时调整PID控制参数,实现PID控制的智能化,提高智能控制的自适应能力。结果表明,采用反射叠栅信号的智能PID控制系统抗干扰性强、定位效率高,可实现±10 nm的定位精度。

关键词 几何光学; 超精密定位; 反射叠栅信号; 模糊径向基函数神经网络; 比例积分微分控制

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.1208002

Research on Ultra-Precision Positioning Technology Using Reflective Gratings

Fan Yuqi[1] Zhou Chen[1] Zhang Jinlong[1] Liu Jingnan[2] Yoshihisa Uchida[3]

[1]*College of Electrical and Automatic Engineering , Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu* 210042, *China*

[2]*Automation College, Southeast University, Nanjing, Jiangsu* 210096, *China*

[3]*Department of Intelligent Machinery Engineering, Aichi Institute of Technology, Toyota* 470-0392, *Japan*

Abstract The system of reflective double grating diffraction has been studied based on the optical theory. A mathematic model which is related to the reflective grating signal as well as the relative displacement has been established, and the characteristic of displacement is analyzed and simulated by Matlab, it is easy to find that the output light intensity of 0th signal come to the largest and the regulation of it stays stable. Besides, an ultra precision positioning system using double reflecting gratings is designed, the system chooses 0th grating signal as the control signal, through the closed-loop control by micro-computer, it can provide real-time detection of high-precision displacement and automatic location in ultra high precision. An intelligent proportion integration differentiation(PID) control technology based on the fuzzy radial basis function (RBF) neural networks has been designed in allusion to the characteristics such as non-linear and hysteresis of the reflect positioning system. With the affection both of them, the control parameter of PID system can be adjusted on time, the intelligent PID control system is able to realize the intelligentialize as well as to improve the adaptive ability. The result indicates that the intelligent PID control system has good interference immunity, high positioning efficiency, and the accuracy can achieve ±10 nm.

Key words geometric optics; ultra-precision positioning; reflective grating signals; fuzzy radial basis function neural network; proportion integration differentiation control

OCIS codes 080.2720; 110.2970; 060.2340; 160.3900

收稿日期: 2015-05-29; **收到修改稿日期:** 2015-07-01

基金项目: 国家863计划(2005AA303610)、江苏省自然科学基金(BK200406)

作者简介: 范育奇(1992—),女,硕士研究生,主要从事精密定位技术与智能控制等方面的研究。E-mail: nsdfyq@163.com

导师简介: 张金龙(1965—),男,博士,教授,主要从事精密测量与控制技术等方面的研究。E-mail: zjl0310@163.com

1 引 言

超精密定位技术在现代科技中应用非常广泛，涉及到大容量数据存储、纳米技术、生物细胞操纵、微机电系统组装、以及精密测试等多个不同领域，是国家综合实力的象征之一[1]。传统的定位方法存在体积大和响应性差缺陷，一种具有更紧凑性、更快响应的反射式超精密定位的方法成为时下关注的热点[2-9]。利用光学相关理论知识研究了反射型双光栅定位系统，建立了以反射叠栅信号及其相应位移为对象的数学模型，利用Matlab软件针对反射叠栅信号的位移特性进行了相关参数的数值计算以及仿真。据此，本文设计实现一种基于反射式叠栅信号的超精密定位系统，以反射0次叠栅信号作为精密定位台的控制信号，在微型计算机闭环作用下，实现微定位工作台高精度位移偏差实时检测以及超高精度自动定位。针对反射定位系统存在的非线性、迟滞性等缺陷，提出了一种基于径向基函数(RBF)神经网络的智能比例积分微分(PID)控制技术，在二者共同作用下在线实时调整PID控制参数，用于完成PID控制的智能化[10]。

2 精密定位原理

两片衍射式光栅的布置结构如图1所示，透射式衍射光栅1与反射式衍射光栅2互相平行，激光光束从与光栅相垂直的方向入射。

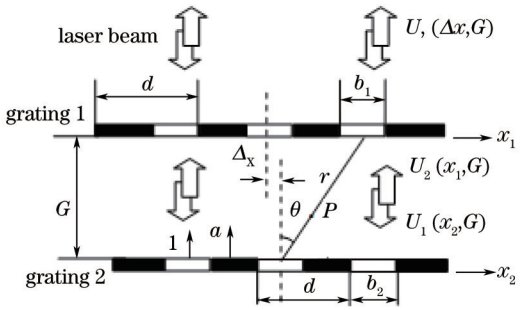

图1 反射式双级光栅结构

Fig.1 Structure of reflection duo-gratings

光栅1的缝隙(图中光栅白色区域)在激光光束的垂直入射作用下，经过光栅的衍射得到了衍射的叠栅信号。当缝隙上任意一点入射光复振幅为 $U_0(Q)$ 时，利用菲涅耳衍射积分公式，能够得到光栅2前面 P 点处的衍射光复振幅表达式如下[6]

$$U_1(P)=\frac{i}{2\lambda}\int_{-b_1/2}^{b_1/2}U_0(Q)r^{-1/2}(1+\cos\theta)\exp(-\mathrm{i}kr)\mathrm{d}x_1\ , \tag{1}$$

式中 b_1 是两片光栅的缝隙宽度(白色条纹处)，x_1 为光栅1，$k=2\pi/\lambda$ 是光波波数，r 为光栅2出射至光栅1光束长度，θ 为经光栅2出射至光栅1的出射角，令 $A_1=\frac{i}{2\lambda}\cdot U_0(Q)$，那么 P 处的衍射光复振幅表达式如下

$$U_1(P)=A_1\int_{-b_1/2}^{b_1/2}r^{-1/2}(1+\cos\theta)\exp(-\mathrm{i}kr)\mathrm{d}x_1\ . \tag{2}$$

从图1中可以计算出 $\cos\theta=G/r$。G为光栅1和光栅2之间的间距，对条数为 $2M+1$ 的光束其振幅进行累加求和，则可得到 P 处衍射光复振幅 $U_1(x_1,G)$ 表达式如下

$$U_1(x_2,G)=A_1\sum_{m=-M}^{M}\int_{-b_1/2}^{b_1/2}r^{-1/2}(1+G/r)\cdot\exp(-\mathrm{i}kr)\mathrm{d}x_1\quad , \tag{3}$$

式中 $r=[G^2+(\Delta x+md)^2]^{1/2}$，$\Delta x=x_2-x_1$ 是光栅1和光栅2之间的相对位置偏差，d 是光栅1和光栅2的光栅常数，λ 是光波波长。

(1)~(3)式计算出了光栅1经衍射后形成的衍射光 $U_1(x_2,G)$，衍射光束接着抵达反射式光栅2，光束经过光栅2时会产生反射。令光栅2其刻痕处以及光栅2镜面处反射率分别为 α 和1，b_2 为光栅2两片光栅的缝隙宽度，那么光束在经过光栅2的反射之后光栅反射率其分布函数 $R(x-\Delta x)$ 可以表示为[5]

$$\begin{cases}R(x_2-\Delta x)=\alpha & |x_2-\Delta x|<b_2/2\\ R(x_2-\Delta x)=1 & b_2/2<|x_2-\Delta x|<d/2\end{cases}. \tag{4}$$

由菲涅尔衍射定律可以方便地表示出反射光栅周围的反射光波复振幅为 $U_1(x_2,G)R(x_2-\Delta x)$。而相同时刻由于反射光栅的作用，使得反射光栅周围的反射光波在反射光栅处被激起次波场，在反射光栅处传播出柱面次波，该柱面次波经过透射式光栅1，在其附近形成光波复振幅 $U_2(x_1,G)$，则 $U_2(x_1,G)$ 根据菲涅耳积分公式可表示为

$$U_2(x_1,G)=A_2\sum_{m=-M}^{M}\int_{-d/2+\Delta x}^{d/2+\Delta x}U_1(x_2,G)R(x_2-\Delta x)r^{-1/2}(1+G/r)\exp(-\mathrm{i}kr)\mathrm{d}x_2\,. \tag{5}$$

在光栅1附近的光波复振幅 $U_2(x_1,G)$，经过透射光栅1后发生二次衍射，产生衍射后的二次光复振幅 $U_2'(x_1,G)$。假设透射式光栅1的透光特性函数为 $T(x_1)$，则经过二次衍射后光复振幅为

$$U_2'(x_1,G)=U_2(x_1,G)T(x_1)\,. \tag{6}$$

在透射式光栅1发生衍射其远场区域，n 级衍射光复振幅可以通过夫琅禾费衍射定律进行计算，光复振幅最终可以表示为

$$U_r(\Delta x,G)_n=\frac{1}{\mathrm{i}\lambda z_0}\cdot\exp(\mathrm{i}kz_0)\exp(\mathrm{i}kx_1^2/2z_0)\cdot\int U_2(x_1,G)T(x_1)\cdot\exp(-\mathrm{i}2\pi f_x x_1)\cdot b\mathrm{d}x_1\,. \tag{7}$$

令 $A_r=\dfrac{b}{i\lambda z_0}\cdot\exp(\mathrm{i}kz_0)\cdot\exp(\mathrm{i}kx_1^2/2z_0)$，$z_0$ 是光栅1衍射的远场处距离，傅里叶光学理论可知其空间频率 $f_x=n/d$，那么

$$\begin{aligned}U_r(\Delta x,G)_n&=A_r\int U_2(x_1,G)T(x_1)\cdot\exp\left(-\mathrm{i}\frac{2\pi nx_1}{d}\right)\mathrm{d}x_1\\&=A_r\int_{-b_1/2}^{b_1/2}U_2(x_1,G)\cdot\exp(-\mathrm{i}2\pi nx_1/d)\mathrm{d}x_1\end{aligned}\,. \tag{8}$$

当 n=0时，衍射光复振幅为

$$U_r(\Delta x,G)_0=A_r\int_{-b_1/2}^{b_1/2}U_2(x_1,G)\mathrm{d}x_1\,. \tag{9}$$

利用Matlab工具箱对(1)~(9)式进行数值计算，为更好地了解信号强度与位移之间的关系，实验了多组数据对其进行计算机仿真，进而得到三维仿真曲线，如图2所示。仿真中设置光波波长为635 nm，光栅常数 d 亦即光栅周期，设置为100 μm，由图可见，0次反射叠栅信号具有稳定的变化规律，十分适用于作为精密定位系统中的控制信号。

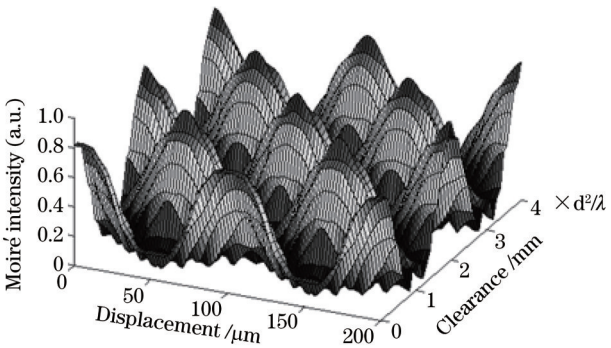

图2 0次反射莫尔信号的仿真曲线

Fig.2 Simulation curves of 0-th order reflection Moiré signals

在精密定位控制中，光电传感器根据接受到的0次叠栅信号将其转变为电信号，该信号再通过放大、滤波和模数(A/D)转换等处理后，输入给微机，微机对接收到的输入信号进行分析、比较、运算，得到两片光栅之间相对位移 Δx 的大小以及方向，最终给出指令，驱动压电陶瓷执行器动作，完成精密定位。

3　精密定位控制系统

应用反射式激光叠栅信号构建的超精密定位装置框图如图3所示。工作台主要包括：精密位置检测系统、步进电机驱动机构、压电陶瓷(PZT)微位移执行机构、超精密定位机构以及微型计算机控制系统等部分。

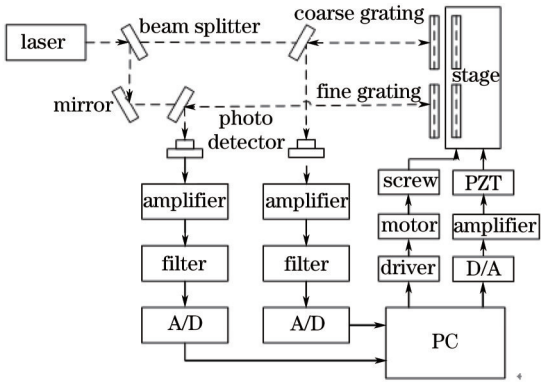

图3 精密定位装置

Fig.3 Apparatus of the precision aligment

3.1 信号检测装置

精密定位系统所选取激光源为半导体激光器，激光器波长为635nm。与其他激光源相比，系统选取的半导体激光器具有波长适宜、光强稳定、光束能量集中、方便安装、易于检测等优点，是精密定位中的理想光源之一。

本系统选取的半导体激光器是ED635-20型号的发射器，其主要涉及到的参数如表1所示。

表1 激光二极管主要参数

Table 1 Laser diode main parameters

Wavelength	Output ower	Model	Working voltage	Spot diameter	Beam divergence angle	Power fluctuations
635 nm	20 mW	TEM00	5 V	4mm	<0.2 mrad	<±3%

3.2 精密定位机构

精密定位机构是整个工作台系统中最为关键的部分之一，所设计的超精密工作台其定位机构是由粗、精定位机构两个部分组成。

工作台粗定位部分是由具有良好起停性能和反转响应的步进电机以及精密滚珠丝杠机构构成，驱动方式采用的是脉冲细分式驱动。本系统步进电机为北京和利时电机技术有限公司生产的57BYG两相混合式步进电机，相关参数如表2所示。与之对应的驱动器是SH-20403细分驱动器，参数设置如表3所示。

表2 57BYG两相混合式步进电机的主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of the 57BYG two-phase hybrid stepping motor

Step angle	Phase current	Phase inductance	Phase resistance	Positioning torque	Holding torque	No-load start frequency
1.8°	3.0A	3.4mH	0.6 Ω	0.06 Nm	1.5 Nm	3.1 kHz

表3 SH-20403的主要性能指标及其参数

Table 3 SH-20403 main performance index and parameters

Parameter	Value
Power supply	10V~40 VDC, capacity 0.03 KVA
Prive way	Constant phase flow PWM control
Excitation way	Whole step, half step, 4 segmentation, 8 segmentation, 16 segmentation, 32 segmentation, 64 segmentation
Insulation resistance /strength	Under the atmospheric pressure >100 MΩ /0.5 KV, 1 min
Cooling way	Natural cooling (need auxiliary heat dissipation under the bad environment)
Environmental humidity	<80%RH, no condensation, frost
Keeping temperature	-20 °C ~ +65 °C

精定位装置所选取的驱动机构为压电陶瓷驱动器，系统选用了德国PST150/7/60 VS12 VBS型压电陶瓷微位移驱动器，相关参数如表4所示。

表4 PZT相关技能参数

Table 4 PZT relative performance parameters

Drive voltage /V	Maximum output force /N	Nominal displacement /μm	Stiffness /(N/um)
0~150	1800	60	15

3.3 控制装置

控制装置是整个工作台进行精密定位的核心以及关键，精密定位控制台所选用的控制装置是由工业控制计算机、驱动器、信号放大电路、D/A转换器等4个主要部分构成。在精密定位过程中，微型计算机通过接收到的叠栅信号大小和方向，对驱动机构给出对应的驱动指令，驱动定位机构移动，并通过实时调节最终使得定位机构处于所要求的目标精度范围内。而当定位系统受到外部扰动时，叠栅信号响应曲线则有可能超出误差带的控制范围，此时微型计算机则会产生与偏离误差带的值相对应的控制信号对其进行复位，将位置误差重新整合到误差带覆盖的范围之内，整个检测过程由微机进行实时的闭环控制，精密定位的模糊神经网络PID控制框图如图4所示。

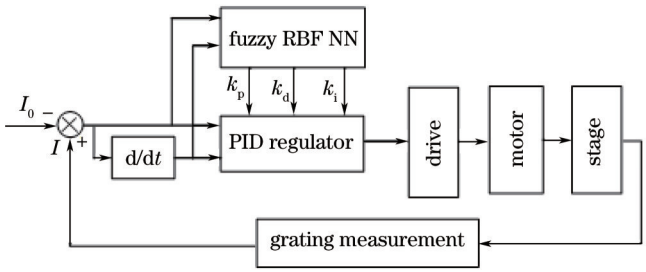

图4 精密定位的模糊神经网络PID控制

Fig.4 Fuzzy neural network PID of precision alignment

4 模糊神经网络PID控制器

精密定位的压电陶瓷微位移执行器具有迟滞性、蠕变性、非线性等特点，这些特点使得执行器在传统的PID控制下难以实现良好的控制性能。模糊RBF神经网络不仅有较强的自我学习能力，而且可以在不依赖模型的基础上获得模糊信息并对模糊信息进行处理。据此提出的一种基于RBF神经网络的智能PID控制技术，通过二者共同作用，经典PID控制中k_p、k_i、k_d3个参数可以实时在线进行调整，最终得到适宜系统的一组最优参数。

4.1 模糊RBF神经网络结构

模糊RBF神经网络的结构图如图5所示，其结构一共分为4层，它们分别是输入层、模糊化层、模糊推理层以及输出层，控制系统的最终输出信号为k_p、k_i、k_d。

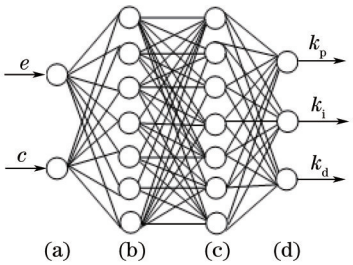

图5 模糊神经网络结构

Fig.5 Structure of fuzzy neural network

1) 输入层

输入层将接收到的输入信号通过f_1函数作用之后传递至第二层中神经元，每一个节点和输入量的每一个分量直接相连，$f_1(x_i)=x_i,\quad i=1,2,\cdots n$，在本系统里输入层一共包含两个神经元，即$n=2$，它们分别代表的是叠栅信号光强偏差变化率$c(t)$以及叠栅光强偏差$e(t)$，二者共同被输入给第二层中对应神经元，即：$x_1=e(t), x_2=c(t)$。

2) 模糊化层

模糊化层用来表示出每一个单独分量分别隶属各自语言变量值的模糊集合的隶属度函数，每一个模糊集合所表示出的隶属度函数都是这一层当中各个神经元经过模拟输入变量后所得到。在这一层里一共有7个节点，由上一层的2个函数进行分割，得到衍生出的7个模糊集合，它们分别是PB、PM、PS、0、NS、NM、NB。系统所选取的隶属度函数为高斯函数，其表达式为

$$f_2(i,j)=\exp\left\{-\frac{[f_1(i)-c_{ij}]^2}{(b_{ij})^2}\right\} \quad , \tag{10}$$

式中 $i=1,2,\ j=1,2,\cdots 7$ 。 c_{ij} 是函数第 i 个输入变量和对应的第 j 个模糊集合的隶属函数的均值，b_{ij} 是与其对应的方差。

3) 模糊推理层

模糊推理层将与两个输入信号相对应的模糊值进行两两匹配，从而达到点火的强度。通过连接第二层，将其进行模糊规则匹配，匹配后的推理层则具有一一对应的7个节点，每个节点都表示着一种模糊规则，两两节点之间实现模糊运算，运算规则是将每个节点接收到的上一层各个输入节点的信号值相乘，其乘积作为对应节点 j 的输出量，可以表示为

$$f_3(j)=\prod_{j=1}^{N} f_2(i,j) \qquad \left(N=\prod_{j=1}^{n} n_i\right), \tag{11}$$

式中 n 是上一级输入量的维数。

4) 输出层

输出层得到最终 k_{p} 、k_{i} 、k_{d} 参数整定结果，所需节点的个数为3个，用表达式可以表示为

$$f_4(i)=\omega\cdot f_3=\sum_{j=1}^{N}\omega(i,j)\cdot f_3(j) \quad , \tag{12}$$

式中 $\omega(i,j)$ 是输出3个节点和上一层各个节点之间的连接权矩阵，$i=1,2,3$ 。

最终控制器的输出为

$$\Delta u(k)=k_{\mathrm{p}}\cdot x_{\mathrm{c}}(1)+k_{\mathrm{i}}\cdot x_{\mathrm{c}}(2)+k_{\mathrm{d}}\cdot x_{\mathrm{c}}(3) \quad , \tag{13}$$

式中 $k_{\mathrm{p}}=f_4(1),\ k_{\mathrm{i}}=f_4(2),\ k_{\mathrm{d}}=f_4(3);\ x_c(1)=e(k),\ x_c(2)=e(k)-e(k-1),\ x_c(3)=e(k)-2e(k-1)+e(k-2)$，采用增量式PID控制算法：

$$u(k)=u(k-1)+\Delta u(k) \quad . \tag{14}$$

4.2 模糊神经网络的学习算法

由于压电陶瓷微位移驱动机构存在迟滞性、蠕变性、非线性等特点，需要控制系统在线实时地调整参数权值 ω 。对此，采用delta规则对神经网络中各个参数进行在线调整和修正，最终输出层得到的权值为

$$\omega_j(k)=\omega_j(k-1)+\Delta\omega_j(k)+\partial\left[\omega_j(k-1)-\omega_j(k-2)\right] \ , \tag{15}$$

式中 k 是迭代步骤，∂ 是学习动量因子，$\Delta\omega_j(k)$ 的学习算法如下

$$\Delta\omega_j(k)=-\eta\cdot\frac{\partial E}{\partial\omega_j}=\eta\cdot[r_{\mathrm{in}}(k)-y_{\mathrm{out}}(k)]\times\frac{\partial y_{\mathrm{out}}}{\partial\Delta u}\times x_c(j)\cdot f_3(j) \ , \tag{16}$$

式中 ω_j 是该层输出节点与上一层每一个节点间的连接权，η 是学习效率，$j=1,2,\cdots,N$ 。 $r_{\mathrm{in}}(k)$ 、$y_{\mathrm{out}}(k)$ 各自代表了神经网络控制器的理想输出以及实际输出。

通过上述学习算法，可以使得代表系统各项性能指标函数 $E=\frac{1}{2}\left[r_{\mathrm{in}}(k)-y_{\mathrm{out}}(k)\right]^2$ 的值达到最优。

5 实验研究

系统选取的激光光源是半导体激光，实验中各项参数设置如下：光栅常数 d 设置为100 μm，光波波长 λ 设置为635 nm，透射光栅1和反射光栅2之间间距 G 设置为1 mm。

实验先后进行了粗定位和精定位相结合的复合式定位实验，粗定位部分是微机通过判断粗光栅产生的叠栅信号大小以及极性对步进电机执行器发出对应脉冲指令，驱动精密定位台移动，实现系统的粗定位。当系统进入粗定位所控制的精度范围之后，微机进而通过细光栅产生的莫尔信号对精定位驱动机构发出相应的脉冲指令，在压电陶瓷的作用下驱动定位台工作，最终使得系统进入精定位的精度范围内。图6显示出了粗、精相结合的复合式精密定位对比结果，从中可以看出，系统可达到的粗定位控制精度为±0.5 μm，可达到的精定位控制精度为±10 nm。此外，对精密定位在不同环境下的智能控制进行了对比实验，实验先后选取了经典PID控制以及基于模糊RBF神经网络的智能PID控制两种不同方式，实验结果如图7所示。

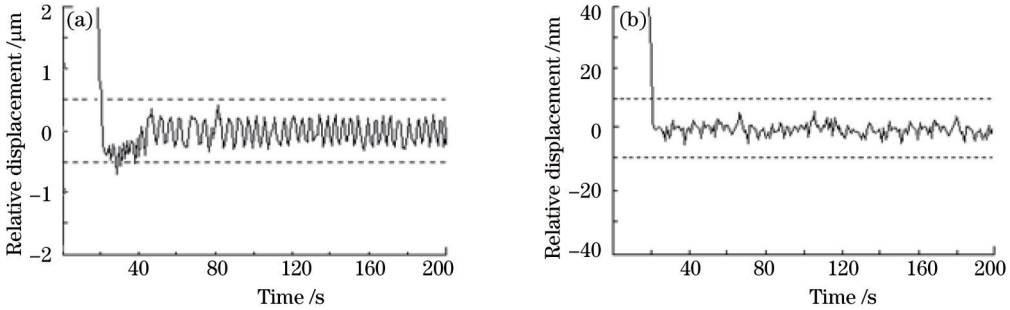

图6 精密定位实验结果。(a) 粗糙定位; (b) 精密定位

Fig.6 Result of precision positioning. (a) Course alignment; (b) fine alignment

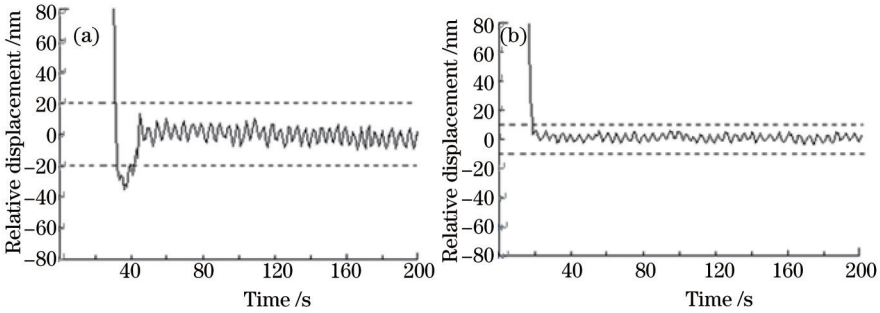

图7 精密定位智能控制对比实验。(a)经典PID控制; (b)智能PID控制

Fig.7 Comparison experiment of intelligent control. (a) Traditional PID control; (b) intelligent PID control

从图中可以看出，在实验初始状态完全相同的条件下，两种控制方式其定位时间有所不同，其中经典PID控制所需定位时间为40 s，而智能PID控制所需定位时间仅仅为15 s，小于经典PID控制方式。此外两种不同控制方式其定位精度也不同，其中经典PID控制可以实现的定位精度为±20 nm，而智能PID控制可以实现的定位精度则为经典PID控制的一半，即±10 nm。

6 结　论

研究了基于0次叠栅信号的反射型双光栅检测系统，建立了以反射叠栅信号及其相应位移为对象的数学模型，利用Matlab软件针对反射式叠栅信号其位移特性进行了相关数值计算以及仿真。据此，设计实现一种基于反射叠栅信号的超精密定位系统，以反射0次叠栅信号作为定位台的控制信号，在微型计算机的闭环作用下，实现了微定位工作台高精度位移偏差实时检测及超精密自动定位，系统定位精度可达10 nm。针对反射定位系统固有的非线性、迟滞性等缺陷，提出了一种基于模糊RBF神经网络的智能PID控制技术，在二者的共同作用下在线实时调整相关PID控制参数，实现PID控制的智能化，有效提高系统定位的效率以及抗干扰能力。

参 考 文 献

1 Sun L N, Jie D G, Liu Y J, *et al.*. Investigation on a novel dual-grating macro-micro driven high speed precision positioning system for NEMS[C]. In Proceedings of 1st IEEE International Conference on Nano Micro Engineered and Molecular Systems, 2006, 6(1): 644-648.

2 Wang Yong, Liu Zhigang, Bo Feng, *et al.*. Design and control of an ultra-precision stage used in grating tilting[J]. Chinese Journal of

Mechanical Engineering, 2007, 20(1): 1-4.

3 Meng Ke, Dong Zhaoyang, Wang Dianhui, *et al*.. A self-adaptive RBF neural network classifier for transformer fault analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1350-1360.

4 Alexandridis A, Chondrodima E, Efthimiou E, *et al*.. Large earthquake occurrence estimation based on radial basis function neural networks [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(9): 5443-5453.

5 Wang Cong, Du Li, Zhang Junwei, *et al*.. Advancing precision of grating tiling with modified single neuron adaptive PID control algorithm [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502014.

王 聪, 杜 丽, 张军伟, 等. 采用改进的单神经元 PID 控制算法提高光栅拼接精度的方法[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502014.

6 Zhang Xuemin, Wei Ruyi, Yan Su, *et al*.. Precise alignment of separated Sagnac interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40 (4): 0416001.

张学敏, 魏儒义, 闫 肃, 等. 分体型萨格奈克干涉仪的精密装调[J]. 中国激光, 2013, 40 (4): 0416001.

7 Fan Yuanyuan, Sang Yingjun, Shen Xiangheng. Optimization of image quality assessment parameters based on back-propagation neural network[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 32(6): 1150-1155.

范媛媛, 桑英军, 沈湘衡. 基于 BP 神经网络的图像质量评价参数优化[J]. 应用光学, 2012, 32(6): 1150-1155.

8 Zhang Dong, Zhang Chengjin, Wei Qiang, *et al*.. Modeling and control of piezo-stage using neural networks[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 587-596.

张 栋, 张承进, 魏 强, 等. 压电工作台的神经网络建模与控制[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(3): 587-596.

9 Wang Chongchong, Hu Lifa, He Bin, *et al*.. Hysteresis compensation method of piezoelectric steering mirror based on neural network[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 239-244.

王冲冲, 胡立发, 何 斌, 等. 基于神经网络的压电倾斜镜磁滞补偿方法研究[J]. 中国激光, 2013, 40 (11): 239-244.

10 Xiao Guangzong, Long Xingwu, Zhang Bin, *et al*.. A novel global optimization method to design laser parameters with artificial neural network and genetic algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1203-1208.

肖光宗, 龙兴武, 张 斌, 等. 基于人工神经网络和遗传算法的激光器参数全局优化方法[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1203-1208.

栏目编辑: 韩 峰