

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0252-04

# 超精密定位控制系统的研究

刘 阳<sup>1</sup> 张金龙<sup>1</sup> 刘京南<sup>2</sup> 内田敬久<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042  
<sup>2</sup>东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096; <sup>3</sup>日本爱知工业大学智能机械工程系, 丰田 470-0392 日本)

**摘要** 应用光学理论分析了一种纳米级位移分辨率的双级衍射光栅测量系统,建立了衍射叠栅信号与对应位移的数学模型。在此基础上设计了基于激光叠栅信号的超精密平面定位系统,该系统可实现高精度位置检测及全自动精密平面定位。针对精密定位系统存在非线性,精确控制模型难以建立的缺陷,将不基于模型的模糊神经网络控制理论应用于精密定位控制系统中,构造了模糊推理反向传播(BP)神经网络控制模型。通过对光强及光强变化率的映射,得到定位台的驱动信号。改造后的模糊控制系统具有知识自动获取功能,能更好地适应工况环境。实验结果表明,使用模糊神经网络控制,控制响应快、稳定性好、稳健性强,可有效提高定位精度及定位速度,系统可获得 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 的定位精度。

**关键词** 超精密定位;衍射光栅;模糊神经网络;智能控制

**中图分类号** TP274+.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0252

## Research on Ultra Precision Positioning Control System

Liu Yang<sup>1</sup> Zhang Jinlong<sup>1</sup> Liu Jingnan<sup>2</sup> Yoshihisa Uchida<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>College of Electrical and Automatic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210042, China  
<sup>2</sup>Automation College, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China  
<sup>3</sup>Department of Intelligent Machinery Engineering, Aichi Institute of Technology, Toyoda 470-0392, Japan)

**Abstract** A double grating displacement measurement system with the resolution of nanometer order is analyzed theoretically. A mathematic model of the double grating displacement measurement is established. An ultra-precision positioning set based on laser Moiré signals is designed, which achieves high-accuracy position detection and full automatic precision plane alignment. In view of the existing non-linearity and the difficulty in establishing precision controlled model, fuzzy control method is used in the precision positioning control. The bach propagation(BP) neural network is used to set up a fuzzy neural network controller (FNNC) model. Driving signal is obtained by mapping Moiré signals' intensities and their intensity rates. The improved fuzzy control system can obtain corresponding operation knowledge according to working environment. The experimental result shows that FNNC can perform excellent control effect such as good stability and strong robustness, and that the positioning speed and positioning accuracy can be effectively improved. The device based on fuzzy neural network can achieve positioning accuracy of  $\pm 0.4 \mu\text{m}$ .

**Key words** ultra-precision position; diffraction gratings; fuzzy neural network; intelligent control

## 1 引 言

超精密定位技术是超精密加工、半导体器件制造、电子产品组装线、高清晰显示器件制作及纳米技术研究开发等领域的关键性基础性技术,利用激光叠栅信号进行超精密自动定位是当今世界采用的一

种高新技术方法<sup>[1~10]</sup>,与传统的定位方法相比较,它具有定位精度高、稳定性好等优点,因而受到了业界的广泛关注。但由于该系统所涉及的激光叠栅信号和驱动系统具有非线性、滞后性等特征,因此很难得到其精确的数学模型,使得经典控制理论在该系

收稿日期: 2010-03-16; 收到修改稿日期: 2010-05-27

基金项目: 国家 863 计划(2005AA303610)和江苏省自然科学基金(BK200406)资助课题。

作者简介: 刘 阳(1985—),硕士研究生,主要从事光电检测与智能控制技术等方面的研究。E-mail: rousowy@163.com

导师简介: 张金龙(1965—),男,博士,副教授,主要从事精密测量与控制技术等方面的研究。

E-mail: zjl0310@163.com(通信联系人)

统难以较好地发挥作用。本文将不基于模型的模糊控制理论应用于精密定位控制系统中,并应用神经网络的联想记忆功能,构造神经网络模糊控制器,给出了模糊推理反向传播(BP)网络模型,改造后的模糊控制系统具有了知识自动获取功能,能更好地适应工况环境。基于模糊神经网络控制(FNNC)的精密定位系统,不仅提高了定位精度,同时也缩短了定位时间。

## 2 精密定位原理与系统组成

精密定位利用光栅检测技术,如图 1 所示,两片衍射光栅平行设置,激光光束垂直入射光栅,由两光栅的二次衍射形成透射的零次叠栅信号  $I_t(\Delta x, G)_0$ 。该信号由光电二极管检测后转换为电信号。透射的零次叠栅信号强度随两片光栅间的相对位移呈周期性变化,其理论关系表示为<sup>[11,12]</sup>

$$I_t(\Delta x, G)_0 = A_t \int_{-w_2/2+\Delta x}^{w_2/2+\Delta x} I_1(x_1, G) dx_1, \quad (1)$$

$$I_1(x_1, G) = A_1 \sum_{b=-M}^M \int_{-w_1/2}^{w_1/2} r^{-1/2} (1 + G/r) \cdot \exp(-iqr) dx_0, \quad (2)$$

$$r = [G^2 + (x_0 - x_1 + bP)^2]^{1/2} = [G^2 + (\Delta x + bP)^2]^{1/2}, \quad (3)$$

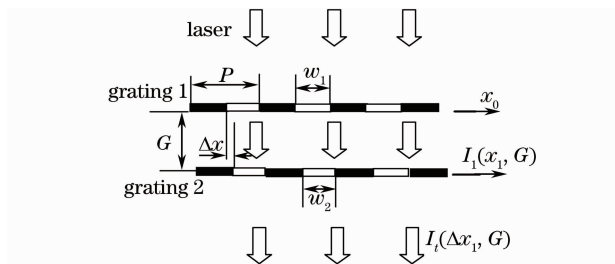


图 1 光栅的结构

Fig. 1 Arrangement of gratings

式中  $I_1(x_1, G)$  为经光栅 1 衍射后在光栅 2 前面形成的叠栅光光强,  $q = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为波长,  $P$  为光栅常数,  $G$  为两光栅间距,  $2M+1$  为激光光束所覆盖的光栅条数,  $w_1$  为第一片光栅的光栅缝隙宽度,  $w_2$  为第二片衍射光栅的光栅缝隙宽度,  $\Delta x = x_0 - x_1$  为两片光栅之间的相对位移,  $b$  为光栅条数,  $A_1, A_t$  为常数, 分别由菲涅耳衍射积分公式和夫琅禾费衍射积分公式计算得到。

通过检测叠栅光信号强度, 确定两片光栅间的相对位移  $\Delta x$ , 再通过计算机控制实现精密定位。

依据上述原理设计的精密定位系统如图 2 所

示, 系统由激光器、分光镜、定位台、光电二极管、信号处理电路、工业控制计算机、步进电机、机械驱动机构等组成。定位时, 激光器发出的激光束经过分光镜被分成两束, 垂直透过光栅副, 产生透射的零次叠栅信号, 由光电二极管转换为电信号, 并经电流/电压(I/V)转换、放大、滤波、模拟/数字(A/D)转换等处理后, 再输入工业控制计算机, 计算机根据检测到的零次叠栅信号大小和极性发出相应的驱动脉冲信号, 使步进电机细分步驱动微动台达到所要求的位置精度范围, 实现精密定位。当系统受到扰动时, 反映位置变化的叠栅信号曲线偏离设定的误差范围, 工控机便会发出相应的控制脉冲进行自动复位, 使位置偏差始终控制在所要求的精度范围内, 整个定位过程由计算机实时检测控制完成。

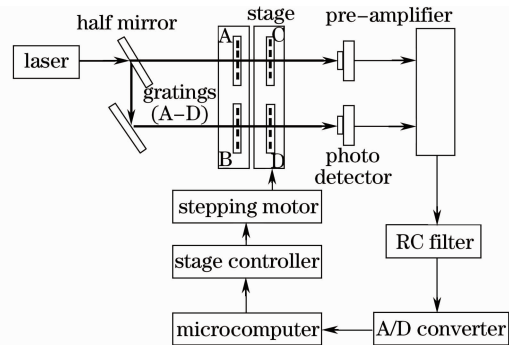


图 2 精密定位装置结构框图

Fig. 2 Apparatus of precision alignment

## 3 模糊径向基函数(RBF)神经网络控制

精密定位的控制过程十分复杂, 具有显著的非线性, 很难建立用于控制的精确数学模型, 这使得经典控制理论在该系统难以较好地发挥作用。而模糊神经网络控制具有很好的非线性逼近能力和不依赖于精确数学模型的特点。这里采用基于模糊神经网络的精密定位控制策略, 控制器的输入信息为叠栅光强偏差  $e$  和光强偏差变化率  $\delta e$ , 输出量为步进电机脉冲数  $y$ , 脉冲数决定定位台的位移量。精密定位模糊神经网络控制系统框图如图 3 所示。

### 3.1 模糊控制

模糊系统的偏差  $x_1$ 、偏差变化率  $x_2$  及步进电机脉冲数  $y$  划分为以下形式的模糊子集:

$$x_1 = \{NB, NM, NS, NZ, PZ, PS, PM, PB\}$$

$$x_2 = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$$

$$y = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$$

其中 NB 为负大, NM 为负中, NS 为负小, NZ 为负

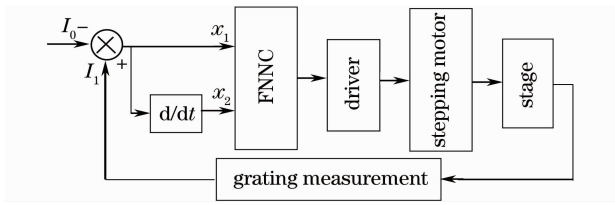


图3 精密定位的模糊神经网络控制模型

Fig. 3 Fuzzy neural network model of precision alignment

零, PZ 为正零, Z 为零, PS 为正小, PM 为正中, PB 为正大, 其论域分别量化为 8、7、7 个等级, 即

$$X_1 = \{-3, -2, -1, -0, +0, +1, +2, +3\}$$

$$X_2 = \{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$$

$$Y = \{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$$

这样, 控制的知识库可以描述成 56 个 if-then 形式的规则, 依据精密定位控制经验可形成如表 1 所示的模糊控制规则表。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Regulation of fuzzy control

$\delta e$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$e$							
	NB	PB	PB	PM	PM	PS	0
	NM	PB	PB	PM	PM	PS	0
	NS	PM	PM	PS	PS	0	NS
	NZ	PM	PS	PS	0	NS	NS
	PS	PS	PS	0	NS	NS	NM
	PM	PS	0	NS	NM	NM	NB
	PB	0	0	NS	NM	NM	NB

模糊集的隶属函数采用可微分的高斯函数来描述。这里, 用  $A_h^k(x)$  和  $\theta_l$  表示输入和输出的隶属函数,  $k$  代表第  $k$  个模糊集合,  $h$  代表第  $h$  个输入变量。则第  $l$  条规则为

$$R_l: \text{if } x_1 = A_1^i \text{ and } x_2 = A_2^k \text{ then } y = \theta_l.$$

这里用隶属函数名代表相应的模糊集合。

模糊推理采用 Sum-product 方法<sup>[13]</sup>, 反模糊化采用加权平均法, 则

$$y = \sum_{l=1}^{56} \theta_l \alpha_l, \quad (4)$$

$$\alpha_l = A_1^i(x_1) A_2^k(x_2), \quad (5)$$

式中  $\alpha_l$  是第  $l$  条模糊规则的激活度, 它的构成与控制规则表有关。

### 3.2 模糊神经网络控制器

根据(4),(5)式构造的模糊神经网络如图 4 所示。在网络结构中, 层(1)为输入层, 2 个节点; 层(2)为隶属函数层, 15 个节点; 层(3)为规则层, 56 个节点, 分别对应 56 条模糊规则; 网络中只有参数值  $m_{1j}, \sigma_{1j}, m_{2k}, \sigma_{2k}$  和  $\theta_l$  需要训练调整。设第  $s$  层第  $n$  个

节点的净输入为  $P_{\text{net}_n^s}$ , 输出为  $y_n^s, x_n^s$  为第  $s$  层第  $n$  个输入, 即  $y_n^s = x_n^{s+1}$ 。则各层输入、输出为

$$P_{\text{net}_h^1} = x_h \quad y_h^1 = P_{\text{net}_h^1} \quad (h = 1, 2), \quad (6)$$

隶属函数层:

$$P_{\text{net}_j^2} = -\frac{(x_h - m_{hj})^2}{\sigma_{hj}^2} \quad y_j^2 = \exp(P_{\text{net}_j^2}), \quad (7)$$

式中当  $h = 1$  时,  $j = 1, 2, \dots, 8$ ;

当  $h = 2$  时,  $j = 1, 2, \dots, 7$ 。

$m_{hj}$  和  $\sigma_{hj}$  分别是第  $h$  个输入变量的第  $j$  个模糊集合的高斯隶属函数的均值和标准差。

规则层:

$$P_{\text{net}_l^3} = x_1^3 \cdot x_2^3 \quad y_l^3 = P_{\text{net}_l^3} \quad (l = 1, 2, \dots, 56), \quad (8)$$

输出层:

$$P_{\text{net}_1^4} = \sum_{l=1}^{56} \theta_l x_l^4 \quad y_1^4 = P_{\text{net}_1^4}. \quad (9)$$

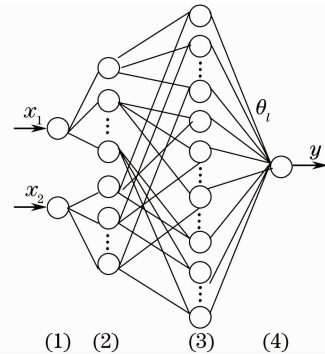


图4 模糊神经网络结构

Fig. 4 Construction of fuzzy neural network

### 3.3 学习算法

学习算法基于 BP 算法的思想, 按误差梯度反向修正  $\theta_l, \sigma_{hj}, m_{hj}$ , 从而完成隶属函数和控制规则的自我学习和完善<sup>[13]</sup>。

设误差函数为

$$E = \frac{1}{2} (d - y_1^4)^2 = \frac{1}{2} e^2, \quad (10)$$

式中  $d$  为希望输出, 教师信号。则可调参数的学习算法为

$$\theta_l(t+1) = \theta_l(t) + \eta_1 \Delta \theta_l(t), \quad (11)$$

$$m_{hj}(t+1) = m_{hj}(t) + \eta_2 \Delta m_{hj}(t), \quad (12)$$

$$\sigma_{hj}(t+1) = \sigma_{hj} + \eta_3 \Delta \sigma_{hj}(t), \quad (13)$$

式中

$$\Delta \theta_l = \frac{-\partial E}{\partial \theta_l} = \frac{-\partial E}{\partial P_{\text{net}_1^4}} \frac{\partial P_{\text{net}_1^4}}{\partial \theta_l}$$

$$\Delta m_{hj} = \frac{-\partial E}{\partial m_{hj}} = \frac{-\partial E}{\partial P_{\text{net}_j^2}} \frac{\partial P_{\text{net}_j^2}}{\partial m_{hj}}$$

$$\Delta\sigma_{hj} = \frac{-\partial E}{\partial m_{hj}} = \frac{-\partial E}{\partial P_{net_j^2}} \frac{\partial P_{net_j^2}}{\partial \sigma_{hj}},$$

$\eta_1, \eta_2, \eta_3$  为学习率,  $t$  为计算时刻。

## 4 实 验

实验所用的激光光源为半导体激光, 波长  $\lambda = 635 \text{ nm}$ , 衍射光栅的光栅常数  $P = 100$ 。实验分别进行了精密定位的普通控制、模糊控制及模糊神经网络控制并测取了相应的曲线, 如图 5 所示。普通控制是定位时控制器根据定位台的初始位置, 每次均发一单位脉冲, 通过步进电机一步步地驱动定位台移动, 直至进入允许的误差范围, 达到一定的定位精度。3 种控制的定位台初始位置设置相同, 均为

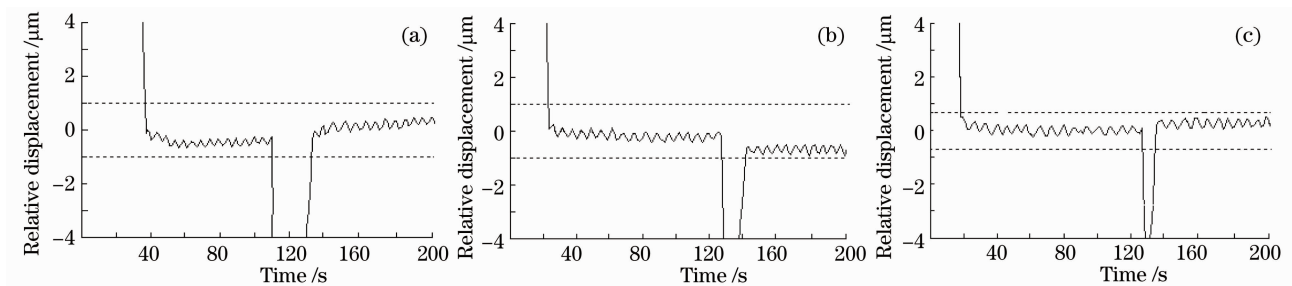


图 5 精密定位实验结果。(a)普通控制,(b)模糊控制,(c)模糊神经网络控制

Fig. 5 Results of precision alignment. (a) normal control, (b) fuzzy control, (c) FNN control

## 5 结 论

应用透射式零次激光叠栅信号设计的精密定位装置, 可实现高精度位置检测及超精密自动定位。系统采用的模糊神经网络控制, 可有效改善控制质量, 提高定位速度及精度, 其控制响应快、稳定性好、稳健性强。实验结果表明, 基于模糊神经网络的精密定位可获得亚微米级的定位精度, 对精密加工工程具有一定的实用价值。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Jinlong, Cheng Congyan, Yu Lingling. Ultra-precision alignment technique based on modified Moiré signals[J]. *Journal of Southeast University*, 2005, **21**(1): 16~19
- 2 M. Akihito, H. Furuhashi. Influences of the inclination of gratings on the alignment accuracies in Moiré alignment systems [J]. *Electr. Eng. Jpn.*, 2002, **139**(2): 46~51
- 3 A. K. Kanjilal, R. Narain, R. Sharma *et al.*. Automatic mask alignment without a microscope [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1995, **44**(3): 806~809
- 4 J. Itoh, T. Kanayama. Optical heterodyne detection of mask to wafer displacement for fine alignment[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1986, **25**(8): 684~686
- 5 B. P. Singh, T. Goto, R. Sharma *et al.*. Tracking and dynamic control of the angular alignment position in a photolithographic mask aligner by Moiré interference technique [J]. *Rev. Sci.*

38.5  $\mu\text{m}$ 。由图 5 可见, 3 种控制进入定位误差带的时间不同, 其中普通控制、模糊控制分别为 38 s, 23 s, 而模糊神经网络控制为 18 s。此外 3 种控制的定位误差范围不同, 其中普通控制、模糊控制定位的误差范围为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ , 即定位精度为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ , 见图 5(a), (b), 而模糊神经网络的定位误差范围为  $\pm 0.4 \mu\text{m}$ , 即定位精度为  $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 。因此模糊神经网络控制可有效提高定位精度及速度。实验同时进行了抗干扰性能测试。由图 5 可以看出, 加入相同的干扰源时 3 种控制的响应均比较剧烈, 但重新返回误差带的时间不同; 还可以看出模糊神经网络控制的过渡时间最短, 为 5.5 s, 即模糊神经网络控制具有较强的自适应和抗干扰能力。

- Instrum.*, 1995, **66**(3): 2658~2660
- 6 J. Liu, H. Furuhashi, Y. Uchida. Automatic mask alignment in the  $\theta$  direction using Moiré sensors[J]. *Nanotechnology*, 1995, **6**(4): 135~138
- 7 L. Z. Zhou, H. Furuhashi, Y. Uchida. Sensing characteristics of a precision aligner using Moiré gratings for precision alignment system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **B10**(4): 257~262
- 8 J. Liu, H. Furuhashi. Precision position control system using Moiré signals [C]. In Proceedings of the 1995 IEEE IECON Conference Orlando, USA; 1995, 968~972
- 9 Lu Quan, Liu Shangqian, Wang Hui Feng. Precise location of laser spot center based on residual pruning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2311~2315
- 卢 泉, 刘上乾, 王会峰. 基于残差修剪的激光光斑高精度定位方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2311~2315
- 10 Zhu Jigui, Guo Lei, Ye Shenghua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1872~1876
- 郝继贵, 郭 磊, 叶声华. 现场条件下大空间三维精密定位原理与方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1872~1876
- 11 K. Hara, T. Nomura, S. Kimura *et al.*. An alignment technique using diffracted Moiré signals[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1989, **B7**(6): 1977~1979
- 12 Y. Uchida, S. Hattori, T. Nomura. An automatic mask alignment technique using Moiré interference[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1987, **B5**(1): 244~247
- 13 Zhang Naiyao, Yan Pingfan. Artificial Neural Networks and Fuzzy Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998
- 张乃尧, 阎平凡. 神经网络与模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998