

光栅刻划机 300 mm 行程工作台研制及其 自适应控制方法

李晓天 于海利* 齐向东 朱继伟 于宏柱 巴音贺希格

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 光栅刻划机工作台性能及其控制算法是直接影响大面积光栅刻划精度的重要原因。为了提高光栅刻划机运行精度,研制了采用压电陶瓷进行微定位控制的 300 mm 行程宏微两级工作台,建立了微定位工作台数学模型,仿真分析了工作台参数对系统动态性能的影响。采用反向传播(BP)神经网络比例-积分-微分(PID)算法对微定位工作台进行闭环控制。仿真分析表明通过增大内外台连接刚度或内外台之间阻尼在总体趋势上均可改善与光栅质量密切相关微定位工作台动态性能。工作台定位实验表明,在以双频激光干涉仪为纳米位移测量基准的情况下,进行刻线密度为 35 line/mm 以上常用光栅空运刻划时,BP 神经网络 PID 算法可实现宏微两级工作台定位误差 3σ 值不大于 5.0 nm。以上研究为大尺寸光栅刻划机宏微两级工作台结构设计及控制算法的选择提供了理论及技术指导。

关键词 光栅;光栅刻划机;宏微两级工作台;BP 神经网络;PID 控制;自适应控制

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0608001

300 mm-Travel Stage of Grating Ruling Engine and Its Self-Adaptive Control Method

Li Xiaotian Yu Haili Qi Xiangdong Zhu Jiwei Yu Hongzhu Bayanheshig

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract Stage properties and its control algorithms of grating-ruling engine are important reasons that directly influence the ruling accuracy of large grating. In order to improve the running accuracy of grating ruling engine, a 300 mm travel macro-micro stage using PZT as actuator of the micro positioning stage is developed. Mathematical model of micro-positioning stage is established, and the influence of stage's parameters on the dynamic performance of the system is analyzed by simulation. Micro-positioning stage is closed-loop controlled by BP neural network proportion integration differentiation (PID) method. Simulation results show that the dynamic performance of micro-positioning stage which is closely related with grating quality can be improved in general trend by increasing the stiffness or damping between inside and outside stage. Positioning experiments of stage, which is used to emptily rule 35 line/mm or higher line density grating and employ dual-frequency laser interferometer as nano-positioning measurement standard, show that BP neural network PID algorithm can achieve 3σ positioning error of macro-micro stage to be no more than 5.0 nm. The studies above can provide theoretical and technical guidance for structure design and control-algorithm choice of macro-micro stage of large grating ruling engine.

Key words gratings; grating ruling engine; macro-micro stage; BP neural network; PID control; self-adaptive control

OCIS codes 050.1950; 050.1960; 050.2770; 110.2650; 260.3160

收稿日期: 2013-10-10; 收到修改稿日期: 2014-01-20

基金项目: 国家 973 计划(2014CB049500)、国家重大科研装备研制项目(61227901、ZDYZ2008-1)、吉林省重大科技攻关项目(09ZDGG005)

作者简介: 李晓天(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事衍射光栅制作及光谱应用等技术方面的研究。

E-mail: lixt_1981@163.com

* 通信联系人。E-mail: yuhailite@163.com

1 引 言

机械刻划法^[1]是大面积高精度平面光栅^[2]的主要制作方法之一。国外的大面积高精度光栅刻划机主要有美国 MIT-B、MIT-C 刻划机^[3-5]和日本 Hitachi-4 刻划机^[6]。其中,MIT-C 机研制于1970 年左右,该刻划机采用差速轮系作为分度系统反馈执行器件^[7],纳米定位精度约为 10 nm^[8],其光栅最大刻划面积为 340 mm×440 mm,且所刻光栅周期误差达到 3%条纹,分辨本领可达 90%,罗兰鬼线小于 10⁻⁴,该刻划机和 MIT-B 机供应了世界绝大多数大面积机械刻划天文光栅和部分大面积且高精度的中阶梯光栅。日本 Hitachi-4 机^[6]研制于 1992 年左右,其光栅最大刻划面积为 200 mm×300 mm,该刻划机首次采用宏微两级工作台和压电陶瓷实现分度系统纳米定位控制,宏定位工作台和微定位工作台分别用于实现微米量级的工作台粗定位和纳米两级的精定位,工作台的纳米定位精度可达 5 nm^[8]。

目前国内最大的光栅刻划机是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 2 号光栅刻划机^[1,9](以下简称 2 号机),刻划面积可达到 300 mm×300 mm,该机器的运行精度与国外相比有较大差距。为了提高大面积光栅刻划机运行精度,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所对 2 号机工作台进行了改进,研制了采用压电陶瓷^[10]进行微定位控制的 300 mm 行程宏微两级工作台。由于宏微两级工作台中的微定位工作台性能及其控制算法^[11]是直接影响光栅刻划精度的重要原因之一,建立了微定位工作台的数学模型,仿真分析了微定位工作

台系统参数对微定位工作台系统动态性能的影响。最后,采用反向传播(BP)神经网络比例-积分-微分(PID)控制算法^[12-13]对具有非线性、变结构特性的微定位工作台进行闭环控制。通过以上研究旨在为大型光栅刻划机宏微两级工作台结构设计及控制算法的选择提供理论及技术指导。

2 光栅刻划机宏微两级工作台及动态特性分析

2.1 光栅刻划机宏微两级工作台及系统建模

研制的宏微两级工作台主要由宏定位工作台(简称为外台)、微定位工作台(简称为内台)、压电陶瓷、拉簧和弹性钢片组成,如图 1 所示。其中外台与内台是通过四个弹性钢片进行连接。外台(见图 2)在分度电机驱动的作用下,可沿工作台导向导轨进行运动。宏微两级工作台驱动流程为:分度电机经过减速器减速后,带动蜗轮蜗杆副和丝杠螺母副运动,螺母与宏定位工作台通过弹簧片相连,从而使分度电机带动宏定位工作台进行工作台宏定位(又称粗定位)操作;再根据双频激光干涉仪测得的微定位工作台实际位置与理想位置的偏差量,由压电陶瓷(PZT)驱动微定位工作台实现工作台的微定位(又称精定位)操作 2 号机工作台宏微定位曲线如图 3 所示,图 3 中的 t_1 时间段对应宏定位工作台的宏定位阶段, t_2 和 t_3 时间段对应微定位工作台的静定位阶段,其中 t_3 时间段为每条刻线的刻划阶段,图 3 纵坐标中的 d 为光栅常数。

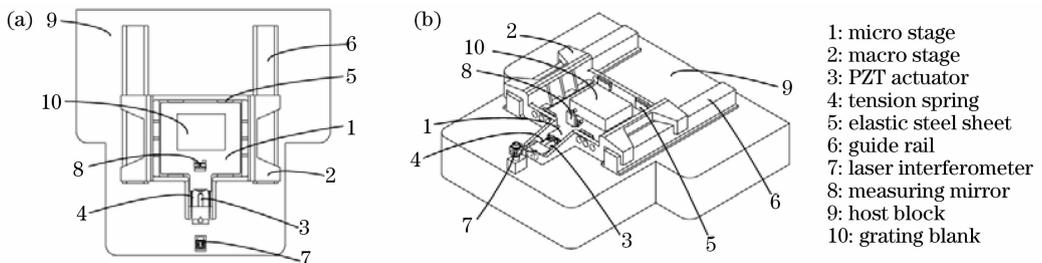


图 1 宏微两级工作台示意图。(a) 俯视图;(b) 三维图

Fig. 1 Schematic of macro-micro table. (a) Top view; (b) three-dimensional view

根据宏微两级工作台的特点,工作台的宏定位只需实现微米量级的开环定位精度,因此宏微两级工作台的控制重点和难点是微定位工作台的性能和精度。选用灰箱建模方法^[11]进行微定位工作台系统建模,先建立含有未知参数的系统数学模型,而后根据实验数据确定其部分参数。当压电陶瓷驱动内台进行微定位时(设用于驱动外台的分度电机

处于静止状态),外台也有一定的位移量,即内台和外台之间存在位移耦合。因此,在对微定位工作台进行微定位操作时,控制系统可简化为一个单输入双输出系统,该系统可由如图 4 所示的质量-弹簧-阻尼系统近似表征,其中 u 为压电陶瓷位移输入; y_1 和 y_2 分别表示外台和内台的位移输出; m_1 和 m_2 分别表示外台和内台的质量; k_1 和 b_1 表示外台与外界

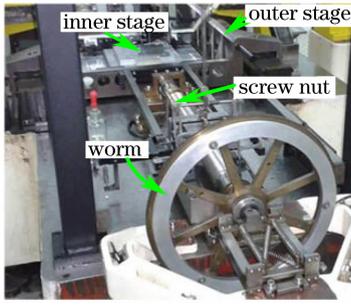


图 2 宏微两级工作台及其驱动实物图

Fig. 2 Macro-micro stage and its drivers

之间的等效刚度和阻尼系数； k_2 和 b_2 表示内台和外台之间的等效刚度和阻尼系数。 F 为外台的重锤封闭力（丝杠螺母和重锤分别位于外台的两侧），重锤封闭力主要用于减少外台与其驱动环节连接刚度不足以及摩擦力的存在导致的外台运行不稳定问题。

根据图 4 所示的宏微工作台物理简化模型，可得动力学方程组为

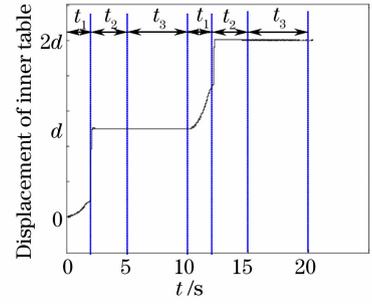


图 3 宏微两级工作台定位曲线

Fig. 3 Positioning curve of macro-micro stage

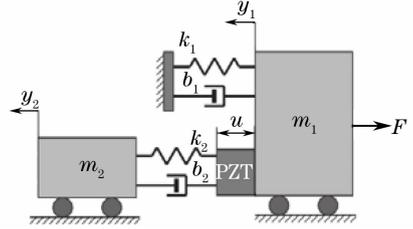


图 4 微定位工作台系统简化模型

Fig. 4 Simplified system model of micro stage

$$\begin{cases} m_2 \ddot{y}_2 + k_2 (y_2 - y_1 - u) + b_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1 - \dot{u}) = 0 \\ m_1 \ddot{y}_1 + k_1 y_1 + b_1 \dot{y}_1 - k_2 (y_2 - y_1 - u) - b_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1 - \dot{u}) + F = 0 \end{cases} \quad (1)$$

设 y_1, y_2 和 u 在拉氏坐标下分别为 $Y_1(s), Y_2(s)$ 和 $U(s)$ 。则对(1)式进行拉氏变换，可得

$$\begin{cases} (m_2 s^2 + b_2 s + k_2) Y_2(s) - (b_2 s + k_2) Y_1(s) - (b_2 s + k_2) U(s) = 0 \\ [m_1 s^2 + (b_1 + b_2) s + (k_1 + k_2)] Y_1(s) - (b_2 s + k_2) Y_2(s) + (b_2 s + k_2) U(s) + F/s = 0 \end{cases} \quad (2)$$

对(2)式进行整理，可求出压电陶瓷输入 $U(s)$ 与宏定位工作台输出 $Y_1(s)$ 和微定位工作台输出 $Y_2(s)$ 的传递函数表达式分别为

$$Y_1(s) = \frac{-(b_2 m_2 s^4 + k_2 m_2 s^3) U(s) + (m_2 s^2 + b_2 s + k_2) F}{m_1 m_2 s^5 + G_1 s^4 + G_2 s^3 + (b_1 k_2 + b_2 k_1) s^2 + k_1 k_2 s}, \quad (3)$$

$$Y_2(s) = \frac{[b_2 m_1 s^4 + (b_1 b_2 + k_2 m_1) s^3 + (b_1 k_2 + b_2 k_1) s^2 + k_1 k_2 s] U(s) - (b_2 s + k_2) F}{m_1 m_2 s^5 + G_1 s^4 + G_2 s^3 + (b_1 k_2 + b_2 k_1) s^2 + k_1 k_2 s}, \quad (4)$$

式中 $G_1 = b_1 m_2 + b_2 m_1 + b_2 m_2, G_2 = b_1 b_2 + k_1 m_2 + k_2 m_1 + k_2 m_2$ 。

2.2 微定位工作台系统参数辨识实验

采用给压电陶瓷产生 $50 \mu\text{m}$ 阶跃信号的方式来获得系统输入，用双频激光干涉仪测量微定位工作台和宏定位工作台的系统输出数据，再根据测得的实验数据及最小二乘辨识法^[11,14]对微定位工作台进行系统辨识，其中已知量为 m_1, m_2 和 F ，未知量为 b_1, b_2, k_1 和 k_2 。系统辨识得到的未知参数值分别为 $b_1 = 3.294 \times 10^3, b_2 = 746.402, k_1 = 1.439 \times 10^6, k_2 = 4.493 \times 10^6$ 。将系统辨识得到的未知参数代入到(3)式和(4)式，根据系统仿真模型，计算出在压电陶瓷阶跃信号输入时的微定位和宏定位工作台

输出，将系统辨识后的仿真输出结果与实验结果进行比较，如图 5 和图 6 所示，微定位和宏定位工作台系统输出实验与仿真结果具有较为接近，系统辨识出的数学模型与系统的实际模型已具有较好的相似性。

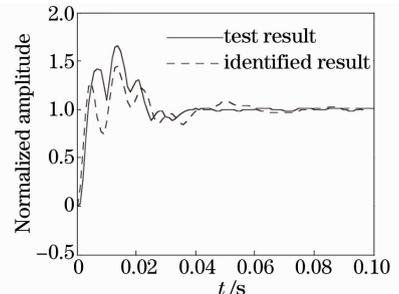


图 5 微定位工作台系统输出结果分析

Fig. 5 Output-result analysis of micro stage

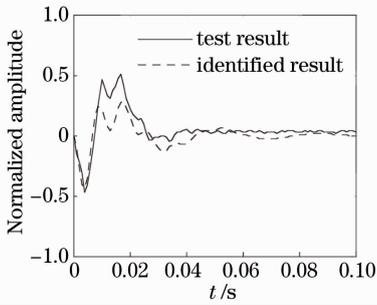


图 6 宏定位工作台系统输出结果分析

Fig. 6 Output-result analysis of macro stage

2.3 微定位工作台系统动态性能分析

对于光栅刻划机微定位工作台设计和使用而言,最关心微定位工作台动态特性为系统的平稳性和快速性,希望在微定位工作台进行纳米定位时工作台运行平稳而且可以在外界扰动下快速的回到系统的理想输出值,从而提高微定位工作台的纳米定

位精度。因此重点考察与系统的机械结构密切相关的系统参数(质量、弹簧和阻尼)对微定位工作台系统的超调量、调整时间以及系统波特图的影响。

图 7 考察了内外台质量与微定位工作台系统调整时间和超调量的关系,其中 m_1 为外台质量, m_2 为内台质量。由图 7(a)可知,当内外台质量同时变化时,系统的调整时间主要由内台质量 m_2 决定且二者具有单调关系,要减少调整时间,可对内台进行减重或选用密度更小的材料;由图 7(b)可知,内外台质量对系统超调量的影响不具备单调关系,因此要降低微定位工作台系统的超调量,需要根据具体的内外台质量进行分析。图 8 给出了内台质量与微定位工作台系统波特图的关系,由图 8 可知,内台质量 m_2 越小,系统的第一阶和第二阶固有频率越大而且第一阶固有频率对应的阻尼比增大,使得系统调整时间变小。

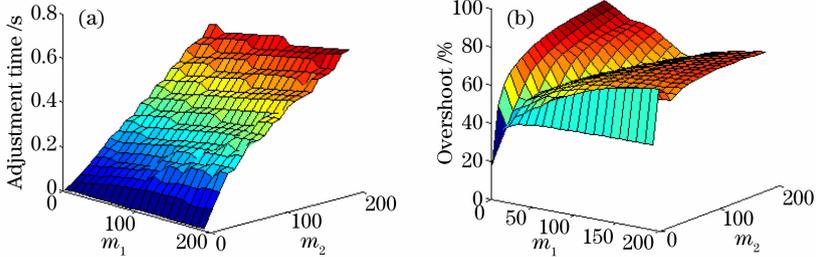


图 7 内外台质量与系统动态性能的关系。(a) 与调整时间的关系;(b) 与超调量的关系

Fig. 7 Relationships between the mass of inner-outer stage and system dynamic performance.

(a) Relationship with adjustment time; (b) relationship with overshoot

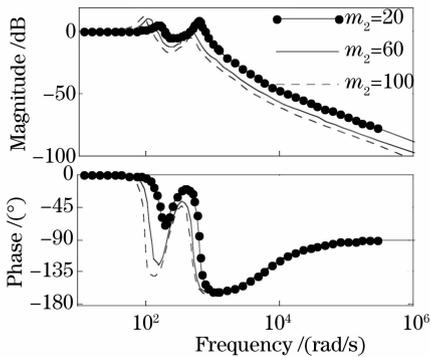


图 8 内台质量与系统波特图的关系

Fig. 8 Relationship between the mass of inner stage and system bode diagram

图 9 考察了刚度(k_2 和 k_1)与微定位工作台系统调整时间和超调量的关系,由图 9(a)可知系统的调整时间与内外台之间的连接刚度 k_2 之间的规律性较强,调整时间在整体趋势上随着 k_2 的增大而降低,当 k_2 增大至 3.21×10^6 以后,这种变化趋势变得平缓; k_2 对系统超调量的影响较小。由图 9(a)和图 10(b)

也可以考察出外台与外界的连接刚度 k_1 对系统调整时间和超调量的影响不具有单调性,因此 k_1 的刚度要慎重选择,最好通过实验确定。图 10 给出了内外台连接刚度 k_2 与微定位工作台系统波特图的关系。由图 8 和图 10 可知,降低内台质量 m_2 和增大内外台连接刚度 k_2 ,在整体趋势上均可提高系统的快速性。

图 11 考察了系统阻尼比(b_2 和 b_1)与微定位工作台系统调整时间和超调量的关系。结合图 11(a)和 12(b)可知,系统调整时间和超调量在总体趋势上均与内外台之间阻尼 b_2 成反比,但是阻尼 b_1 对系统调整时间和超调量的影响却是非单调的。因此对于微定位工作台系统而言,应尽量增大内外台之间阻尼 b_2 ,同时根据系统现有的阻尼 b_1 幅值,对其进行适当调整。图 12 给出了内外台之间阻尼 b_2 与微定位工作台系统波特图的关系, b_2 与系统的第一阶和第二阶固有频率对应的阻尼比成正比关系,且对第二阶固有频率对应的阻尼比影响较大,从而有效降低了系统的超调量和调整时间,改善了微定位

工作台系统的动态性能。

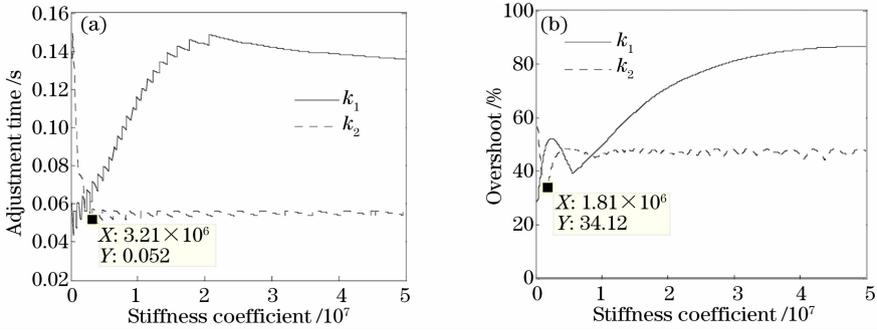


图 9 刚度与系统动态性能的关系。(a) 与调整时间的关系；(b) 与超量的关系

Fig. 9 Relationships between stiffness and system dynamic performance. (a) Relationship with adjustment time; (b) relationship with overshoot

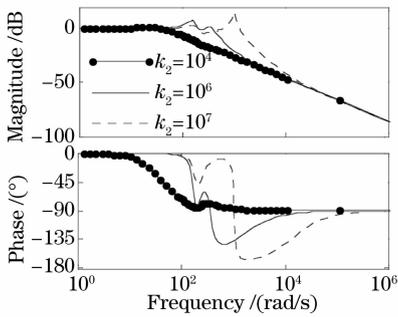


图 10 刚度 k_2 与系统波特图的关系

Fig. 10 Relationship between stiffness k_2 and system bode diagram

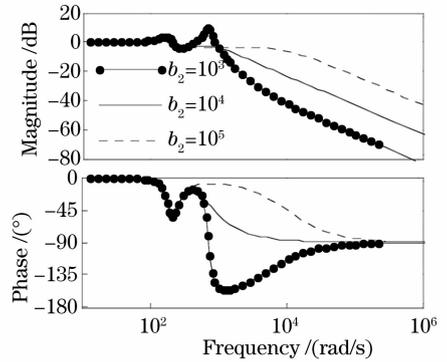


图 12 阻尼 b_2 与系统波特图的关系

Fig. 12 Relationships between damping b_2 and system bode diagram

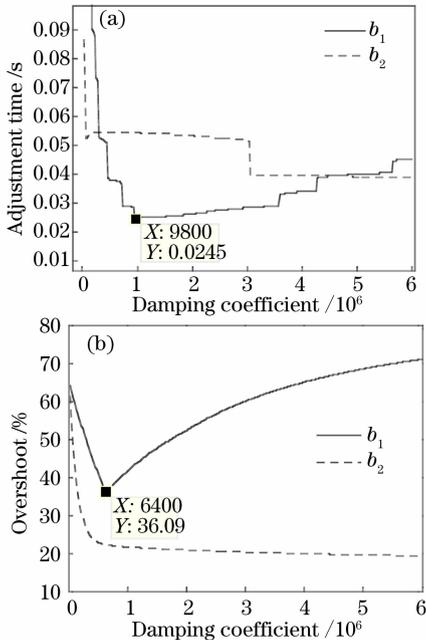


图 11 阻尼与系统动态性能的关系。(a) 与系统调整时间的关系；(b) 与系统超量的关系

Fig. 11 Relationships between damping and system dynamic performance. (a) Relationship with adjustment time; (b) relationship with overshoot

综上所述,微定位工作台调整时间和超量与内外台连接刚度 k_2 和内外台之间阻尼 b_2 在总体趋势上具有单调关系,通过增大内外台连接刚度 k_2 或内外台之间阻尼 b_2 均可改善微定位工作台性能,此外微定位工作台调整时间与内台质量 m_2 具有单调关系,减小内台质量 m_2 ,可缩短调整时间;微定位工作台系统动态性能与外台质量 m_1 、外台与外界的连接刚度 k_1 和外台与外界间的阻尼 b_1 不具有单调关系,需根据微定位工作台的具体结构进行选择。上述仿真结果对具有宏微两级工作台结构的纳米定位工作台的设计及结构优化具有一定的参考价值。

此处需要说明的是,工作台外台与外界驱动机构(丝杠螺母副)的连接方式的合理设计对工作台整体性能(如工作台的俯仰、滚转和偏航等)而言也是不容忽视的。目前 2 号机采用的是双垂直弹性钢片连接方式,也可采用水平弹性片和垂直弹性钢片相结合的方式(如图 13 所示)。此外为了避免外界振动经宏定位工作台传递至微定位工作台而导致的定位精度下降问题,应使工作台具有良好的隔振条件。

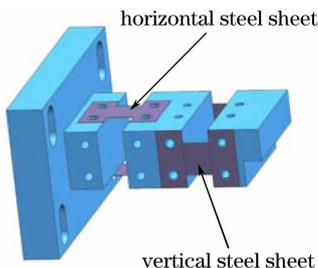


图 13 水平和垂直弹性钢片结构示意图

Fig. 13 Schematic of horizontal and vertical steel sheets

3 微定位工作台的 BP 神经网络 PID 自适应控制方法

大量实验结果表明微定位工作台系统模型与压电陶瓷的伸长量有关,而在光栅刻划过程中,压电陶瓷的伸长量在不断变化,使得微定位工作台系统具有时变性,而且这种系统特性与光栅刻线密度有关,因此采用 BP 神经网络对 PID 控制参数进行在线整定和优化^[11-12](见图 14),可以使控制系统具有较强的自适应能力和稳健性。BP 神经网络采用 3 层结构,其中输入层 4 个节点,隐含层 5 个节点,输出层 3 个节点(即 4-5-3 结构)。

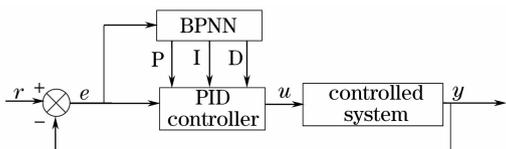


图 14 BP 神经网络 PID 控制系统示意图

Fig. 14 Schematic of PID control based on BP neural network

输入层节点分别为

$$\begin{cases} x_1(k) = r(k) \\ x_2(k) = e(k) - e(k-1) \\ x_3(k) = e(k) \\ x_4(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (5)$$

输入层各节点的输入输出为

$$O_j^{(1)}(k) = n_{ej}^{(1)}(k) = x_j(k), \quad j = 1, \dots, 4. \quad (6)$$

隐含层各节点的输入输出关系为

$$\begin{aligned} n_{ei}^{(2)}(k) &= \sum_{j=1}^4 w_{ij}^{(2)} O_j^{(1)}(k) - \theta_i^{(2)} \\ O_i^{(2)}(k) &= f_1[n_{ei}^{(2)}(k)], \quad i = 1, \dots, 5, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $w_{ij}^{(2)}$ 为输入层第 j 个神经元到隐层第 i 个神经元的权值, $\theta_i^{(2)}$ 为隐层第 i 个神经元的阈值, 上标 (1), (2), (3) 分别表示输入层、隐层和输出层。 f_1 为隐含层激活函数, 此处取 $f_1 = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x})$ 。

输出层各节点的输入输出关系为

$$\begin{aligned} n_{el}^{(3)}(k) &= \sum_{i=1}^5 w_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k) - \theta_l^{(3)} \\ O_l^{(3)}(k) &= f_2[n_{el}^{(3)}(k)], \quad l = 1, 2, 3, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $w_{li}^{(3)}$ 是隐含层第 i 个神经元到输出层第 l 个神经元的加权系数, f_2 是输出层激活函数, 此处取 $f_2 = e^x / (e^x + e^{-x})$ 。

输出层的神经元个数固定为 3 个, 其值分别为 PID 控制器的比例、积分和微分项系数 P, I 和 D 。取 BP 神经网络的性能指标函数为

$$E(k) = \frac{1}{2} [r(k) - y(k)]^2 = \frac{1}{2} e^2(k). \quad (9)$$

按照梯度下降法修正神经网络各层权值系数 $w(k)$, 即取

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = \eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_{li}^{(3)}} + \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1), \quad (10)$$

式中 η 为学习速率, α 为惯性系数。

4 实验结果分析

为了比较 BP-PID 算法和传统 PID 算法对 2 号刻划机微定位工作台定位精度的差别, 本文利用上述两种算法分别对微定位工作台进行闭环控制, 并采用双频激光干涉仪(此处不考虑干涉仪自身测量误差对测量结果的影响)对微定位工作台的位移进行实时测量, 最后对两种算法的工作台定位结果进行对照分析。在实验中, 使光栅刻划机处于空运刻划方式, 即让刻划电机处于静止状态且金刚石刻刀一直处于抬刀状态(落刀状态为刻划状态), 用以减少光栅刻划机刻划系统振动对微定位工作台定位精度的影响。

图 15 至图 18 分别考察了光栅总刻线数为 400 且光栅刻线密度分别为 600、200、100、35 line/mm 时的 BP-PID 算法($\eta=0.1, \alpha=0.1$)与传统 PID 算法($P=0.15, I=0.09, D=0.04$)闭环控制情况下的 2 号机微定位工作台定位误差 3σ 值比较结果, 其中 35 line/mm 的光栅刻划速度为 3 line/min, 是其他刻线密度光栅的刻划速度的一半, 降低较低刻线密度光栅的刻划速度是为了减少刻划电机振动和宏定位工作台的惯性运动对微定位工作台定位精度的影响。表 1 给出了图 15 至图 18 中的两种算法对应的微定位工作台定位误差 3σ 值的最大值情况。由图 15 至图 18 及表 1 可知, 对于 2 号刻划机而言, 在相同刻划速度情况下工作台定位误差随着光栅刻划密度的降低而增大, 且 BP-PID 算法和传统 PID 算法在四种不同光栅刻线密度情况下的纳米定位误差

3σ 值的最大值分别约为 5.0 nm 和 7.1 nm。因此，在模拟光栅刻划且以双频激光干涉仪为纳米位移测量基准的情况下，当刻划光栅刻线密度为 35 line/mm 以上的常用光栅时，BP-PID 算法可实现 2 号刻划机宏微两级工作台定位误差 3σ 值不大于 5 nm。

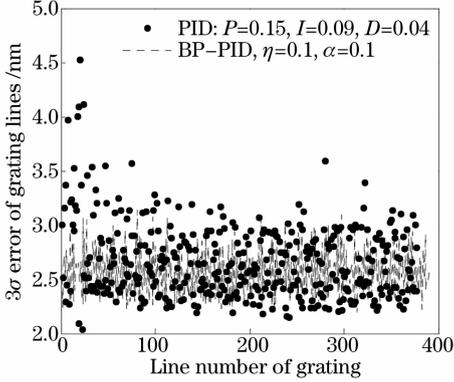


图 15 两种控制算法误差比较(600 line/mm)

Fig. 15 Errors of two control methods (600 line/mm)

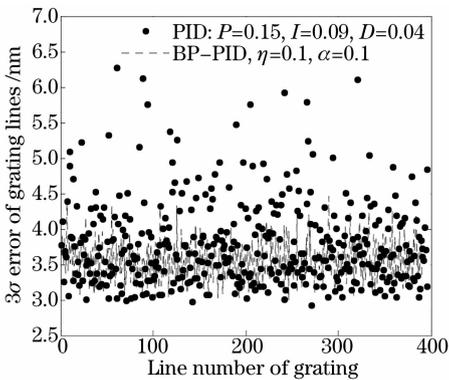


图 16 两种控制算法误差比较(200 line/mm)

Fig. 16 Errors of two control methods (200 line/mm)

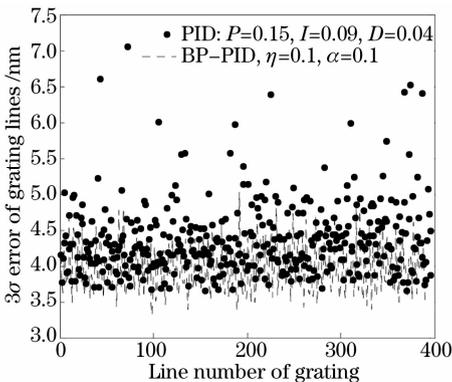


图 17 两种控制算法误差比较(100 line/mm)

Fig. 17 Errors of two control methods(100 line/mm)

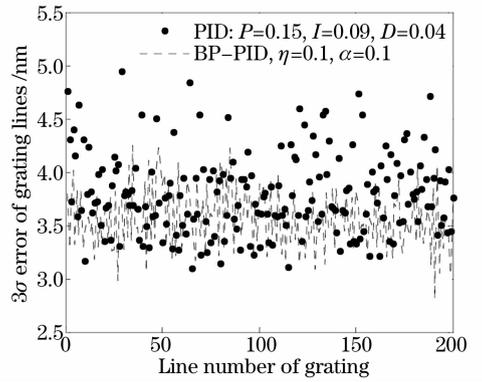


图 18 两种控制算法误差比较(35 line/mm)

Fig. 18 Errors of two control methods(35 line/mm)

表 1 两种控制算法定位误差比较

Table 1 Comparison of positioning error of two control methods

Groove density /(line/mm)	600	200	100	35
Errors of BP-PID method /nm	3.1	4.5	5.0	4.2
Errors of PID method /nm	4.5	6.3	7.1	5.2

下面对 BP-PID 算法和传统 PID 算法的控制时间进行比较分析。目前 2 号光栅刻划机采用计算机控制方式^[8,11]实现压电执行器对工作台的实时控制。经测试, BP-PID 算法的控制频率约为 1.1 kHz (即当刻划速度为 3 line/min 时, 每条光栅刻线刻划期间, 压电执行器可进行约 11000 次精定位控制), 而传统 PID 算法的控制频率约为 1.2 kHz。因此 BP-PID 算法与传统 PID 算法相比, 其控制效率没有显著下降。

5 结 论

为了提高光栅刻划机运行精度, 针对自研的光栅刻划机 300 mm 行程宏微两级工作台, 进行了微定位工作台系统建模及动态特性分析和闭环自适应控制, 得出如下结论: 1) 仿真结果表明, 通过增大内外台连接刚度或内外台之间阻尼在总体趋势上均可改善与光栅刻划密切相关的微定位工作台动态性能, 此外微定位工作台调整时间与内台质量具有单调关系, 但是微定位工作台系统动态性能与外台参数不具有单调关系, 需根据具体的工作台结构进行选择; 2) 在相同刻划速度情况下, 工作台定位误差随着光栅刻划密度的降低而增大, 此外降低刻划速度有助于提高微定位工作台定位精度; 3) 在模拟光栅刻划且以双频激光干涉仪为纳米位移测量基准并具有良好的工作台隔振条件的情况下, 刻划刻线密度为 35 line/mm 以上常用光栅时, BP 神经网络

PID算法可实现2号刻划机宏微两级工作台定位误差 3σ 值不大于5.0 nm。以上研究及所得结论为大尺寸光栅刻划机宏微两级工作台结构设计及控制算法的选择提供了理论及技术指导。

参 考 文 献

- 1 Liang Haoming, Zhuang Kui, Zhang Qingying, *et al.*. The diffraction grating ruling engines[J]. *Acta Optica Sinica*, 1981, 1(1): 51-58.
梁浩明, 庄夔, 张庆英, 等. 衍射光栅刻划机[J]. *光学学报*, 1981, 1(1): 51-58.
- 2 George R Harrison, Stephen W Thompson, Harry Kazukonis *et al.*. 750-mm ruling engine producing large gratings and echelles[J]. *J Opt Soc Am*, 1972, 62(6): 751-756.
- 3 George R Harrison, Neville Sturgis, Sumner P Davis, *et al.*. Interferometrically controlled ruling of ten-inch diffraction gratings[J]. *J Opt Soc Am*, 1959, 49(3): 205-208.
- 4 George R Harrison, Stephen W Thompson. Large diffraction gratings ruled on a commercial measuring machine controlled interferometrically[J]. *J Opt Soc Am*, 1970, 60(5): 591-595.
- 5 G W Stroke. Attainment of high-resolution gratings by ruling under interferometric control[J]. *J Opt Soc Am*, 1961, 51(10): 1321-1339.
- 6 Toshiaki Kita, Tatsuo Harada. Ruling engine using a piezoelectric device for large and high-groove density gratings[J]. *Appl Opt*, 1992, 31(8): 1399-1406.
- 7 George R Harrison. Techniques for ruling improved large diffraction gratings[C]. Massachusetts Institute of Technology, 1971. 1-14.
- 8 Yu Haili. Research on Large Stroke Nan-Positioning Technology and Application Based on Dual-Frequency Laser Interferometer[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
于海利. 基于双频激光干涉测量的大行程纳米定位技术及其应
用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
- 9 Li Xiaotian, Bayanheshig, Qi Xiangdong, *et al.*. Influence and revising method of machine-ruling grating line's curve error, location error on plane grating's performance[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0308009.
李晓天, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 机械刻划光栅的刻线弯曲与位置误差对平面光栅性能影响及其修正方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0308009.
- 10 Liu Bo, Guo Jianying, Sun Yongquan. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1503-1509.
刘泊, 郭建英, 孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1503-1509.
- 11 Zhong Jun. Research on Some Key Technologies of the Macroscopic Scale and Nano Positioning[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
钟俊. 宏观尺度的纳米级定位控制技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- 12 Zhang Dong, Zhang Chengjin, Wei Qiang, *et al.*. Modeling and control of piezo-stage using neural networks[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 20(3): 587-594.
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*, 2013, 20(3): 587-594.
- 13 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.
- 14 Li Hongzhuang, Zhang Zhenduo, Wang Jianli, *et al.*. Active surface-profile correction of 620 mm thin-mirror based on flotation support[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0511001.
李宏壮, 张振铎, 王建立, 等. 基于浮动支撑的620 mm薄反射镜面形主动校正[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0511001.

栏目编辑:何卓铭