

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

王 聪^{1,2} 杜 丽¹ 张军伟² 周 海² 王 逍² 陈良明² 傅学军²
林东晖² 吴文龙² 朱启华²

(¹电子科技大学机械电子工程学院, 四川 成都 611731
²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 为获得米量级以上的大口径光栅,光栅拼接技术已被公认为是一种经济可行的方法。而在光栅拼接中,光栅拼接稳定性的控制是核心问题之一,因此,在较高拼接精度的要求条件下(错位误差在纳米量级,角度误差在亚微弧度量级),寻求有效合理的比例积分微分(PID)闭环控制算法显得异常重要。将基于 BP 神经网络的整定方法应用到 PID 控制中,将传统的用零初态时过程加入单位阶跃输出的第一个值用计算符号函数值来代替,实现了单神经元自适应 PID 控制;在此基础上,为了改善系统响应初期的上升时间,采用变化神经元比例系数的值来代替常量 K 值的学习算法。通过仿真分析表明,提出的控制算法使系统响应具有好的快速性的同时又不会产生大的超调量;实验结果也表明改进的控制算法能保证其光栅拼接误差控制精度。

关键词 光栅;比例积分微分闭环控制;神经元比例系数;上升时间;超调量

中图分类号 TP273⁺.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0502014

Advancing Precision of Grating Tiling with Modified Single Neuron Adaptive PID Control Algorithm

Wang Cong^{1,2} Du Li¹ Zhang Junwei² Zhou Hai² Wang Xiao² Chen Liangming²
Fu Xuejun² Lin Donghui² Wu Wenlong² Zhu Qihua²

¹ College of Mechanical Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

² Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Grating tiling which is considered as a feasible technology can be used to obtain multiple-meter-sized large-aperture gratings, and stability control is one of key problems. So, it is important to find available and fit proportion integration differentiation (PID) closed loop control in required high accuracies condition (submicroradian orientations and nanometer positions). In this paper, by means of the principle of back propagation (BP) nerve net modified PID controller, the first value that a system in zero initial conditions using step response produces is replaced with sign function to achieve single neuron adaptive PID control, and based on that, in order to improve the risetime of the system at the beginning of the response, a changeable neuron proportionality coefficient replaces the constant K value. Simulation result indicates that the proposed control algorithm will not bring greater overshoot with quicker risetime than the traditional PID controller; and the experimental result indicates that the proposed control algorithm can guarantee the precision of the grating-tiling.

Key words gratings; proportion integration differentiation closed loop control; neuron proportionality coefficient; risetime; overshoot

OCIS codes 050.2770; 150.5495; 200.4260; 150.1135

收稿日期: 2011-11-14; **收到修改稿日期**: 2012-02-22

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2009B0401045)资助课题。

作者简介: 王 聪(1986—),男,硕士研究生,主要从事光栅拼接控制技术方面的研究。E-mail: gswangcong@163.com

导师简介: 杜 丽(1970—),女,副教授,主要从事机械结构动力学、机械系统可靠性设计与优化等方面的研究。

E-mail: lidu@uestc.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

啁啾脉冲放大技术^[1]在激光技术中的成功应用,使得激光峰值功率提高了几个数量级,为获得更高功率超短脉冲提供了强大的技术保证;同时也为激光核聚变、高能物理等研究领域带来了新的机遇。而其核心元件衍射光栅的损伤阈值和尺寸的大小直接决定了装置峰值功率的输出能力。用刻划法、全息离子蚀刻法^[2]制作光栅,由于受到其技术水平和高复杂工艺的限制,目前所能制作的最大的光栅的尺寸在米级范围内,这远远不能满足对光栅大口径的需求^[3]。而用拼接法获取大口径光栅无论是在原理上还是在技术实现上都是可行的,因此,用拼接法获取大口径光栅成为研究者们研究的热点。

之前的研究表明^[4],有 6 种拼接误差会影响光栅拼接的性能,其误差分别为横向错位误差、纵向错位误差、垂直角偏差误差、母线偏转误差、水平角偏差误差和刻线宽度误差,而如何有效消除这些误差成为拼接光栅成败的关键;同时,前人的研究发现^[5,6],环境因素如温度改变以及空气流动等都会影响拼接光栅的状态,因此,需建立一套实时监控拼接光栅姿态的监控系统来使拼接之后的光栅达到纳米级的拼接精度和较高、长时间的稳定性^[7]。

美国罗彻斯特大学激光力能学实验室(LLE)的拍瓦激光系统 OMEGA EP 装置运用闭环控制等技术手段,在长时间的稳定过程中,其角度误差达到了

$\pm 0.2 \mu\text{rad}$,且平移误差达到了 $\pm 0.13 \mu\text{m}$ ^[8],但国内目前的控制水平远远没有达到这个要求,除了在拼接结构上进行有效合理的设计之外,寻求好的控制算法来提高光栅拼接响应的快速性和稳定性也是必须的。比例积分微分(PID)控制由于其算法简单、稳健性好等优点,在工业生产过程中得到了广泛的应用,而近年来,伴随着计算机技术的进步和智能控制理论的发展,各种智能 PID 控制技术也随之出现,如模糊自适应 PID 控制器,基于遗传算法整定的 PID 控制器等。由具有自适应和自学习能力的单神经元构成的单神经自适应 PID 控制器,由于结构简单,且能适应环境变化和有较强的稳健性,为非线性、时变不确定性系统提供了简单有效的控制方法^[9],在此类系统中,更是比传统的 PID 控制器具有较大的优势。

2 单神经元网络 PID 智能控制原理

单神经元自适应 PID 控制算法是按有监督的 Hebb 学习规则实现的,通过对加权系数的调整来实现自适应、自组织功能和权系数的调整^[10],其控制结构如图 1 所示。图中点划线所包围的部分是通过计算机控制算法所实现的,为了得到高精度的反馈信号,运用了纳米精度的电容传感器对输出量进行实时检测反馈,通过控制算法给压电驱动器提供合适的驱动电压来调节光栅姿态使其满足拼接要求。

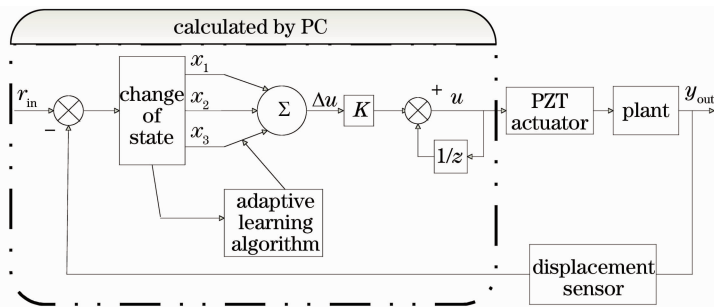


图 1 单神经元自适应 PID 控制原理结构图

Fig. 1 Structure of signal neuron adaptive PID controller

在控制算法加权系数的调整中,引入最优控制中二次型性能的指标思想,则在其控制算法中,设性能指标为^[11]:

$$E(k) = \frac{1}{2} \{ P[r(k) - y(k)] \}^2 + Q\Delta^2 u(k), \quad (1)$$

式中 P, Q 分别为输出误差和控制增量的加权系数, $r(k)$ 和 $y(k)$ 为 k 时刻的参考输入和输出。按照梯度下降法修正网络的加权系数 w_i :

$$\begin{cases} \Delta w_i = w_i(k) - w_i(k-1) = -\eta_i \frac{\partial E(k)}{\partial w_i(k)} = \\ -\eta_i \frac{\partial E(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial w_i(k)} \\ u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k) \\ x_1(k) = e(k) = r(k) - y(k) \\ x_2(k) = e(k) - e(k-1) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (2)$$

从(2)式中可得到：

$$\begin{cases} \Delta w_1(k) = \eta_p K \left\{ Pe(k)x_1(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} - QK \left[\sum_{i=1}^3 w_i(k)x_i(k) \right] x_1(k) \right\} \\ \Delta w_2(k) = \eta_p K \left\{ Pe(k)x_2(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} - QK \left[\sum_{i=1}^3 w_i(k)x_i(k) \right] x_2(k) \right\}, \\ \Delta w_3(k) = \eta_p K \left\{ Pe(k)x_3(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} - QK \left[\sum_{i=1}^3 w_i(k)x_i(k) \right] x_3(k) \right\} \end{cases} \quad (3)$$

式中 η_p 、 η_i 、 η_d 分别为比例、积分、微分的学习速率， K 为神经元的比例系数，且 $K > 0$ 。由于 $\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)}$ 未知，所以近似用符号函数 $\text{sign}\left[\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)}\right]$ 来代替，这样可以简化计算，因为 $\text{sign}\left[\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)}\right]$ 是权值变化中的一个公共因子，最重要的是它符号的正负，因为权值的变化方向取决于符号的正负，其数值大小只能影响权值改变的速度，其带来的计算不精确的影响可以用调整学习速率 η 来得到补偿。

3 单神经网络 PID 控制算法的改进

在网络权系数的实际计算中， $\text{sign}\left[\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)}\right]$ 的值用零初始条件下系统加入单位阶跃时输出的第一个值 b_0 来代替。在基于 BP 神经网络整定的 PID 控制中，在计算网络权系数时，并没有用 b_0 来代替符号函数 $\text{sign}\left[\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)}\right]$ 的值，借鉴此思想，在单神经元自适应 PID 控制算法中，就用符号函数本身来进行网络权系数的修正。

在(2)式中，权值学习算法的神经元比例系数

K 越大，学习速度就越快，快速性就越好，但容易产生超调，甚至有可能使系统不稳定； K 值若偏小，则系统的快速性将变差^[12]。

在一般单神经元 PID 控制的算法中，神经元比例系数 K 为一固定常数，这会导致系统的快速性和超调量之间相互矛盾的结果，即若要求系统有快的响应速度时，超调势必较大，当要求超调较小时，系统的响应则将变得非常缓慢。因此，可以通过在不同时期采用不同的神经元比例系数 K 值使系统有较好的响应特性。结合自动控制理论中系统的动态性能指标来确定不同的 K 值，为使系统在响应初期有较好的上升速率，且确保系统在以后将趋稳定， K 值应选取为

$$K = \begin{cases} aK_0 & y(k) < 0.9r(k) \\ K_0 & \text{else} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 K_0 为系统在用传统算法进行学习时确定的合适的神经元比例系数， a 值的选取通过仿真获得，最小值取 1，最大值的选取应以不大于系统在采用传统算法时获得的超调量为宜。

综上所述，可得到改进的单神经元自适应 PID 控制算法及其学习算法为

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w'_i(k)x_i(k) \\ w'_i(k) = \frac{w_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |w_i(k)|} \\ w_1(k+1) = w_1(k) + \eta_p K \left\{ Pe(k)x_1(k) \text{sign}\left[\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}\right] - QK \left[\sum_{i=1}^3 w_i(k)x_i(k) \right] x_1(k) \right\}, \\ w_2(k+1) = w_2(k) + \eta_p K \left\{ Pe(k)x_2(k) \text{sign}\left[\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}\right] - QK \left[\sum_{i=1}^3 w_i(k)x_i(k) \right] x_2(k) \right\} \\ w_3(k+1) = w_3(k) + \eta_p K \left\{ Pe(k)x_3(k) \text{sign}\left[\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}\right] - QK \left[\sum_{i=1}^3 w_i(k)x_i(k) \right] x_3(k) \right\} \\ K = \begin{cases} aK_0 & y(k) < 0.9r(k) \\ K_0 & \text{else} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

在计算中,对比例 P 、积分 I 和微分 D 分别采用了不同的学习速率 η_p 、 η_i 、 η_d , 这样可以对不同的权系数根据需求分别进行调整。对于 K 值的选择非常重要,应根据控制对象的特点以及所期望达到的控制目的,多次仿真来选取。在实际工程应用中,可先确定一个 K 值,再根据仿真与控制结果进行调整,若超调过大则减小 K ,若过渡时间太长则增大 K ,对于 a 的选取,亦可按照上述思路进行选取。

4 控制仿真和实验结果

对系统采用不同的控制算法进行仿真,其阶跃响应 y_{out} ,如图 2 所示,其中 r_{in} 为输入参考信号。从图中可看出,尽管用符号函数比用传统的 PID 控制器有较长的上升时间,但是超调量要小很多,通过适当的配置调节 PID 控制参数,在一些仿真结果中,用符号函数来进行 PID 控制更容易得到好的控制效果。同时比较发现,改进的变参数 K 值的单神经元自适应 PID 控制比参数 K 值为常量的控制算法在快速性上有了一定程度的提高,比传统的控制算法在响应快速性和超调量上都有了改进。

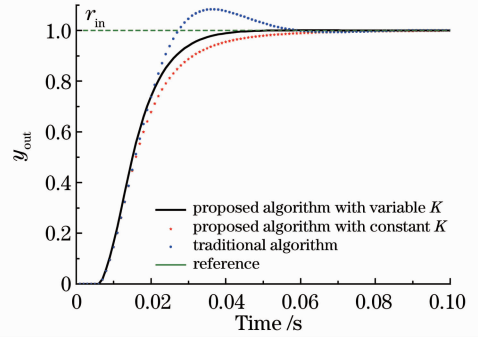


图 2 不同单神经元自适应 PID 控制算法的仿真
Fig. 2 Simulations of the single neuron adaptive PID control algorithm

在单神经元 PID 控制算法中,不同的控制算法是通过影响权值的变化来达到控制目的的。图 3 中显示了在三种不同控制算法下对应的单神经元 PID 控制过程中权值变化的规律,从中可看到改进的算法与传统算法的权值变化差别较大;而在改进的控制算法中,采用变神经元比例系数(K)算法与采用常量 K 值的算法,由于两者之间只是差了一个比值 a ,两者权值的变化趋势基本保持一致。

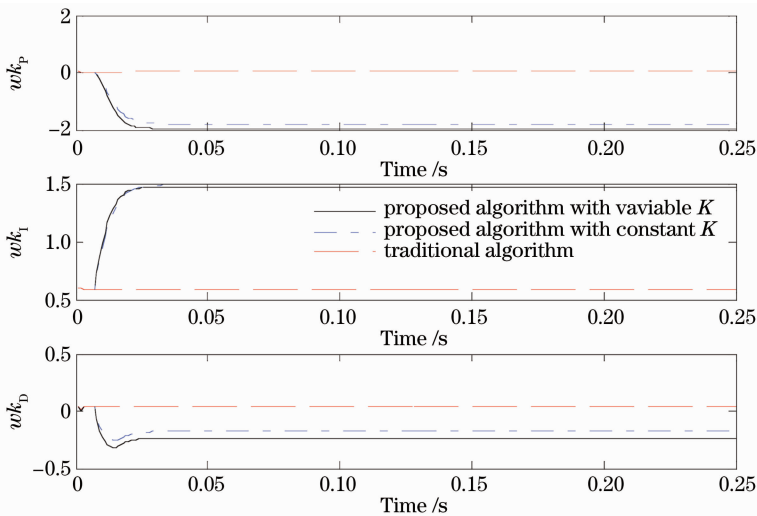


图 3 不同 PID 控制算法下权值的变化

Fig. 3 Variety of weight values with different PID control algorithms

表 1 给出了上述三种控制算法的动态性能指标(表中主要比较了上升时间和超调量两种指标)。从表中可看出在网络权系数的计算中,用符号函数值取代了在一般算法中零初态时系统加入单位阶跃时输出的第一个值,大幅减小了系统响应的超调量;在不同阶段采用不同的神经元比例系数(K)值,在提高系统响应的快速性的同时,其超调量较 K 值为定值时的超调量并没有大幅增加,这表明改进的控制

算法能取得更好的控制效果。

表 1 动态性能指标

Table 1 Dynamic performance index

Performance index	Control algorithm		
	Traditional algorithm	Proposed algorithm with constant K	Proposed algorithm with variable K
Risetime / s	0.015	0.022	0.018
Overshoot / %	8.3	0	0.1

上述的仿真表明基于变比例系数的单神经元自适应 PID 控制算法在响应的快速性和超调量上都有较好的控制效果,可将其应用光栅拼接控制系统中。图 4 为基于单神经元自适应 PID 控制算法的实验结果,图 5 为光栅拼接架的平移误差。

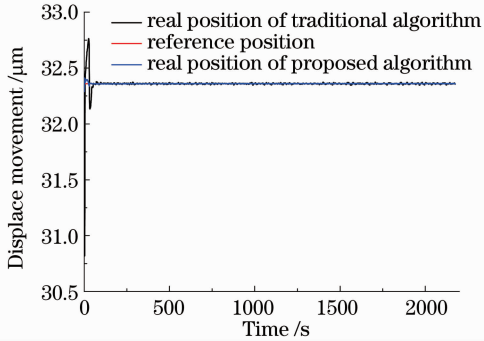


图 4 基于单神经元自适应 PID 控制算法的实验结果

Fig. 4 Experimental result of the single neuron adaptive PID control algorithm

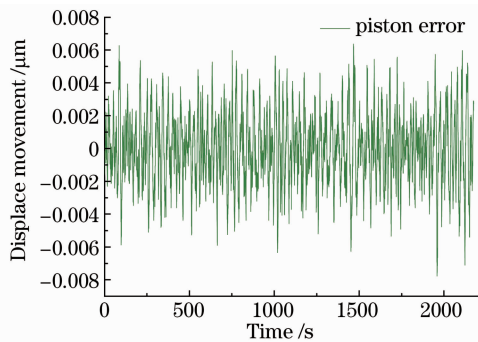


图 5 光栅拼接平移误差

Fig. 5 Piston error of grating tiling

从图 4 可看到,与采用传统算法的控制相比较,改进的控制算法可使控制系统具有较小的超调和较少的振荡,这与仿真结果相一致。系统在较长时间内保持稳定,这表明采用改进的控制算法能使系统保持很强的适应能力和稳健性;从图 5 可观察到通过运用本文提出的算法,光栅拼接的平移误差在接近 40 min 的时间内都保持在 18.5 nm 以下,其结果远远小于可以达到光栅拼接平移误差的要求精度(小于或等于 ± 50 nm)。

5 结 论

由于光栅拼接对拼接精度、快速性以及稳定性等都有较高的要求,且存在一定的非线性、时变性和不确定性。针对这一问题,对单神经元智能 PID 控制算法进行了改进,利用其自适应和自学习的能力实现对拼接光栅误差的精确控制。仿真结果表明,改进的单神经元网络自适应智能 PID 控制比传统

的控制算法无论是在响应的快速性还是在超调量上都有较好的动态性能效果,体现了该方法在光栅拼接 PID 控制中的优越性和可行性。实验结果也表明改进的控制算法较传统算法具有较好的动态指标(较小的超调量和较少的振荡),并能在长时间内保证光栅拼接所要求的控制精度,可将其应用到光栅拼接动态误差控制实验中。

参 考 文 献

- 1 T. J. Kessler, J. Bunkenburg, H. Huang *et al.*. Demonstration of coherent addition of multiple gratings for high-energy chirped-pulse-amplified lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(6): 635~637
- 2 Ma Yanqin. Study on Tiling Theory of Large-Area Grating[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007
马延琴. 大面积光栅的拼接理论研究[D]. 成都: 四川大学, 2007
- 3 Zhaoyang Li, Guang Xu, Tao Wang *et al.*. Object-image-grating self-tiling to achieve and maintain stable, near-ideal tiled grating conditions[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(13): 2206~2208
- 4 J. Qiao, J. H. Kelly, D. Canning *et al.*. Interferometric tiling of large-aperture gratings for petawatt laser systems[C]. Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2007. 1~2
- 5 Zhang Junwei, Wang Xiao, Lin Donghui *et al.*. Dynamic response control and analysis of large aperture tiled grating mount [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112010
张军伟, 王 道, 林东晖 等. 大口径光栅拼接架动力响应控制分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112010
- 6 Zhou Yi, Yang Shujuan, Zhang Junwei *et al.*. Thermal transfiguration analysis for the large aperture optical element of switchyard in ICF driver target area[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 125~130
周 忆, 杨淑娟, 张军伟 等. 惯性约束聚变靶场编组站大口径光学元件的热变形分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 125~130
- 7 Xia Lan, Yang Xuedong, Xu Guang *et al.*. Tiled-grating rotation detecting technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0308001
夏 兰, 杨学东, 徐 光 等. 光栅拼接旋转误差检测系统[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0308001
- 8 J. Qiao, A. Kalb, T. Nguyen *et al.*. Development and operation of large-aperture tiled-grating compressors for high-energy, petawatt-class laser systems [C]. *Frontiers in Optics*, 2010, paper FTuR5
- 9 K. K. Tan, S. Huang, R. Ferdous. Robust self-tuning PID controller for nonlinear systems[J]. *J. Process Control*, 2002, **12**(7): 753~761
- 10 Hou Yongyan, Guo Wenqiang. Research on design of single neural element self-adaptive PID controller [J]. *Control and Automation*, 2005, **21**(8): 8~9, 117
侯勇严, 郭文强. 单神经元自适应 PID 控制器设计方法研究[J]. *微计算机信息*, 2005, **21**(8): 8~9, 117
- 11 Liu Jinkun. Advanced PID Control and Its Matlab Simulation [M]. Beijing: Beijing Electronic Industries Publication, 2003
刘金琨. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真[M]. 北京: 北京电子工业出版社, 2003
- 12 Ding Jun, Xu Yongmao. Single neuron adaptive PID controller and its applications[J]. *Control Engineering of China*, 2004, **11**(1): 27~30, 42
丁 军, 徐用懋. 单神经元控制 PID 控制器及其应用[J]. *控制工程*, 2004, **11**(1): 27~30, 42