

# 万能试验机神经元自适应控制策略的研究与实现\*

朱程辉, 方 彧, 王建平

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 设计并实现了万能试验机的测控系统, 建立了试验机系统各组成部分的数学模型。在测量噪声、负载扰动等非线性因素以及试件材料性能不确定性因素的影响下, 高精度万能试验机使用常规PID进行控制难以取得满意的效果。提出了积分分离单神经元自适应PID控制算法, 实现了负荷、变形、位移的闭环控制。仿真实验表明, 使用该算法可以达到快速响应和高精度的控制效果, 具有良好的动态性能、自适应能力和较强的鲁棒性。

**关键词:** 万能试验机; 单神经元; 自适应; 比例积分微分; 积分分离

**中图分类号:** TP273+.2

**文献标识码:** A

## Research and implementation of neuron adaptive control strategy for universal-testing-machine

ZHU Cheng Hui, FANG Yu, WANG Jian Ping

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Measurement and control system of universal-testing-machine is designed and implemented, and the math models of the parts of the testing-machine system are described. Under the influence of the nonlinear elements of measurement such as noise, burden disturbance, as well as uncertain factor of test piece mechanical properties, high precision universal-testing-machine that is in control of conventional PID is hard to acquire satisfactory result. The integral separation self-adaptive PID control algorithm based on single neuron is presented, furthermore the three closed-loop control of load, extension and displacement are realized. The simulation experiment outcome shows that using the scheme can attain rapid response and high definition effect and has good dynamic performance, self-adaptive ability and strong robustness.

**Key words:** universal-testing-machine; single neuron; self-adaptive; PID; integral separation

万能试验机是最常用的材料力学性能测试仪器和产品质量测试设备, 具有实时性强、执行机构精确控制等性能要求。试验机测控系统既要进行数据采集和处理, 又要实现对执行机构的闭环控制<sup>[1]</sup>。目前, 日本岛津制作所生产的高精度电子万能试验机的负荷测量精度为0.5%(0.2%~100%范围内)、位置分辨率为0.001 mm、试验速度精度可达 $\pm 0.1\%$ 。

由于受到机械传动机构特性、伺服驱动单元器件参数变化等影响, 万能试验机存在着一些非线性因素。在试验机测控系统中, 由于试件不同而使系统的数学模型

变化较大, 此外在试验过程中, 控制性能会受到试件刚度变化的影响<sup>[2]</sup>, 这些都给高精度万能试验机的控制带来了困难。由于传统的基于确定模型的常规PID控制不能获得令人满意的控制效果, 为了能够实现PID参数在线自调整, 以满足万能试验机高精度的动态控制要求, 本文提出一种高精度万能试验机积分分离单神经元自适应PID控制算法, 较好地解决了上述问题。

### 1 系统建模与内环设计

#### 1.1 系统组成

万能试验机主机结构如图1所示。系统主要由上位

\* 基金项目: 2008年安徽省科技攻关计划(08010202037)

PC机、控制器、伺服电机、机械传动机构、试验机机架以及负荷传感器、变形传感器、位移传感器等几部分组成。万能试验机需要获取的参数为试件所承受的负荷量、试件在受力方向上的变形量以及活动横梁的位移量，这些参数通过不同的传感器采集并传送到控制器的相关接口。其工作原理为：在对试件材料进行试验过程中，根据不同的控制要求，选择负荷量、变形量或位移量中的一个作为测控系统的反馈信号，与相应的给定信号比较，由外环控制器调节输出，经精密减速器减速后，通过滚珠丝杠驱动活动横梁上下移动，实现对试件的加载，从而完成试件的拉伸、压缩、弯曲等力学性能试验。

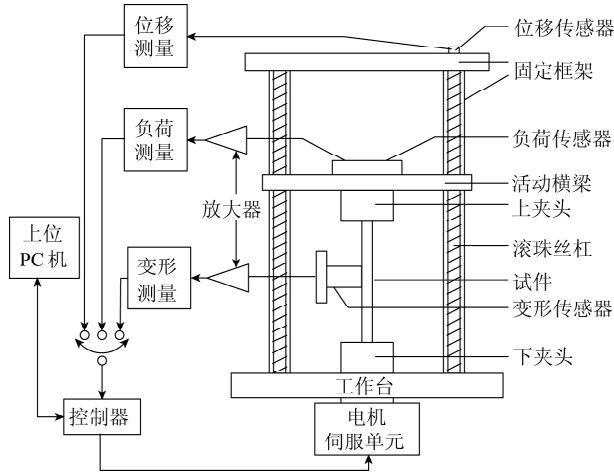


图1 万能试验机主机结构

### 1.2 伺服单元模型

伺服单元包括PWM装置和直流伺服电机。PWM装置的传递函数为：

$$G_s(s) = \frac{K_s}{T_s s + 1} \quad (1)$$

式中， $K_s$ 为PWM装置的放大系数； $T_s$ 为PWM装置的延迟时间。

系统采用直流伺服电机。电机以电枢电压为输入变量、电机角度 $\theta_1$ 为输出变量的传递函数为：

$$G_a(s) = \frac{\theta_1(s)}{U_a(s)} = \frac{1/C_e}{s(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)} \quad (2)$$

式中， $C_e$ 为电机的反电势系数； $T_l = L/R$ 为电机的电磁时间常数； $L$ 、 $R$ 为电机电枢电感和电阻； $T_m = GD^2 R / 375 C_e C_m$ 为电机的机电时间常数； $GD^2$ 为飞轮惯量； $C_m$ 为转矩系数。

### 1.3 横梁位移模型

万能试验机的执行部件活动横梁在滚珠丝杠的驱动下做直线升降运动，伺服电机输出转角与活动横梁的纵向位移之间的方程为：

$$S = \frac{d}{2\pi i} \theta_1 = K_g \theta_1 \quad (3)$$

式中， $S$ 为活动横梁的位移； $\theta_1$ 为电机的转角；设 $\theta_2$ 为丝杠的转角，则 $\theta_2 = \theta_1 / i$ ； $K_g = d / 2\pi i$ ， $d$ 为丝杠导程； $i$ 为减速器的传动比。由此得到活动横梁位移的传递函数为：

$$G_g(s) = \frac{S(s)}{\theta_1(s)} = K_g \quad (4)$$

### 1.4 传感器模型

由于试验机所用的检测元件具有较高的线性特性，所以负荷传感器的传递函数为：

$$G_f(s) = \frac{U_f(s)}{F(s)} = K_f \quad (5)$$

式中， $K_f$ 为比例系数， $U_f$ 为负荷传感器输出电压， $F$ 为被测负荷。

变形传感器的传递函数为：

$$G_m(s) = \frac{U_m(s)}{l_m(s)} = K_m \quad (6)$$

式中， $K_m$ 为比例系数， $U_m$ 为变形传感器输出的电压， $l_m$ 为试件变形长度。

位移传感器的传递函数为：

$$G_p(s) = \frac{f(s)}{\theta_2(s)} = K_p \quad (7)$$

式中， $K_p$ 为比例系数， $f$ 为位移传感器输出脉冲频率， $\theta_2$ 为滚珠丝杠转角。

通常试验机的整机结构具有很高的刚度，因此在传感器建模时可以忽略固定机架、夹头的弹性变形和试件端部的塑性变形。设试件的长度为 $l_1$ ，活动横梁至工作台底座的高度为 $l_2$ ，则试件的伸长变形 $dl_1$ 就等于活动横梁的位移 $dl_2$ ，于是试件的拉伸变形长度 $l_m$ 便等于活动横梁的位移 $S^{[3]}$ 。

设材料试验中施加的力为 $F$ ，试件的变形长度为 $l_m$ ，则试件材料的刚度为 $K_{Fs} = F / l_m$ 。因此，负荷信号反馈系数可以表示为 $K_f K_{Fs} K_g$ ，变形信号反馈系数为 $K_m K_g$ ，位移信号反馈系数为 $K_p i$ 。

### 1.5 三环系统模型及内环设计

万能试验机测控系统模型如图2所示。其中外环根据反馈信号的不同，分别为负荷环、变形环、位移环。测控系统内环由速度环和电流环(虚线表示)构成，为了获得良好的静、动态性能，内环的2个调节器都采用了带输出限幅的PI调节器进行设计<sup>[4]</sup>。

图2中， $\alpha$ 、 $\beta$ 表示转速反馈系数和电流反馈系数，AER为外环控制器，速度环调节器ASR的传递函数为 $G_{ASR}(s) = (K_{p1} s + K_{i1}) / s$ ，电流环调节器ACR的传递函数为 $G_{ACR}(s) = (K_{p2} s + K_{i2}) / s$ 。

内环设计采用了“先电流环、后速度环”的思想，

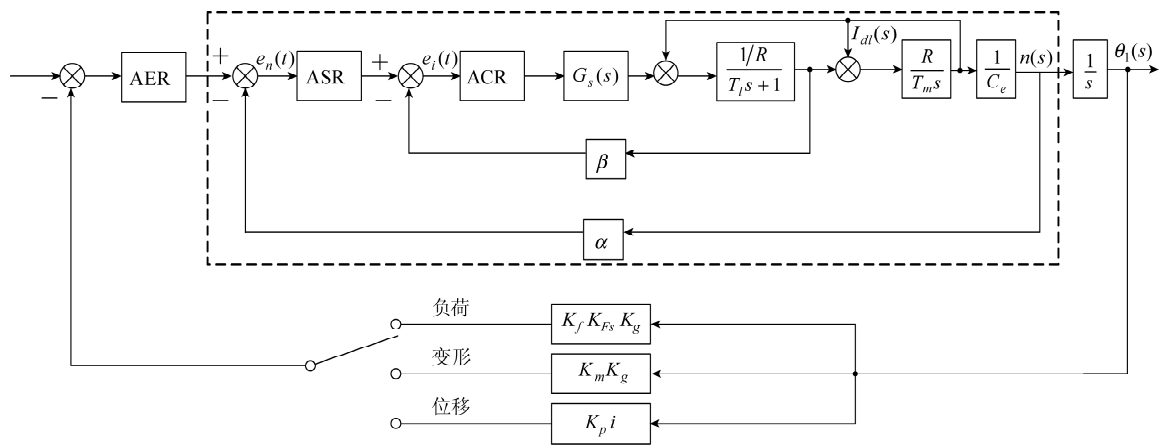


图2 万能试验机测控系统模型

利用参数优化方法<sup>[5]</sup>来确定调节器参数  $K_{p1}$ 、 $K_{i1}$ 、 $K_{p2}$ 、 $K_{i2}$  的值。为了使伺服电机能较快地跟踪给定信号，选取误差绝对值的积分作为参数优化的目标函数(IAE)，即

$$J_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (8)$$

式中， $e(t)$ 为误差信号，在调节器优化设计中先后代表电流误差  $e_i(t)$ 和转速误差  $e_n(t)$ 。参数优化方法以改进的单纯形法算法为基础，根据目标函数，对控制器参数在一定空间范围内进行搜索，从而寻找到使目标函数值满足精度指标的参数组合。整个内环设计好后将其等效为外环的一个环节，再进行外环控制器 AER 的设计。

## 2 外环神经元自适应控制策略及实现

由于万能试验机要求控制精度高，而测控系统受到非线性以及试件材料性能不确定等因素的影响，因此，采用常规 PID 的控制手段不能很好地满足要求。随着现代计算机技术和控制理论的发展，涌现出了如模糊控制、神经网络等智能控制技术和传统 PID 控制相结合的新型控制器，以及使用智能计算技术整定 PID 控制器参数的方法，这些方法的应用为实现万能试验机的高精度控制提供了技术方案。

人工神经网络通过神经元连接权的自行调节可实现自主学习、自适应的功能，但是神经网络控制算法的并行性和目前计算机串行处理之间的矛盾导致了神经网络控制的实时性很难保证<sup>[6]</sup>。而单神经元作为构成神经网络的基本单位，其结构简单，实时性较好，又具有较强的鲁棒性和自适应性<sup>[7]</sup>。若把单神经元的自学习能力与常规 PID 控制结合起来构成单神经元 PID 控制器，则可以较好地解决传统 PID 控制器不易在线自整定参数等问题。因此，本文利用积分分离单神经元自适应 PID 算法设计外环控制器，来解决万能试验机高精度控制要求与系统非线性以及试件材料性能不确定等问题。

### 2.1 积分分离 PID 控制

在常规 PID 控制系统中，积分分离增量型数字 PID

控制<sup>[8]</sup>的方程为：

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + \lambda K_i e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (9)$$

式(9)中， $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ ， $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_D$  分别为控制器的比例系数、积分系数和微分系数。 $\lambda$ 称为逻辑系数，并按如下关系取值：

$$\lambda = \begin{cases} 1; & |e(k)| \leq \varepsilon \\ 0; & |e(k)| > \varepsilon \end{cases} \quad (10)$$

式中， $\varepsilon$ 为误差门限。当 $|e(k)| \leq \varepsilon$ 时，采用PID控制，可保证系统的控制精度；当 $|e(k)| > \varepsilon$ 时，采用PD控制，可避免超调过大，同时使系统具有较快的响应。

### 2.2 积分分离单神经元自适应 PID 控制器的设计

基于单神经元的 PID 控制器结构框图如图 3 所示。图中状态转换器的输入为  $e(k) = r(k) - y(k)$ ， $r(k)$ 代表外环的负荷、变形或者位移给定值， $y(k)$ 为负荷、变形或者位移的反馈信号。状态转换器的输出为神经元控制器所需要的状态向量：

$$\begin{cases} x_1(k) = r(k) - y(k) = e(k) \\ x_2(k) = e(k) - e(k-1) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (11)$$

$K$ 为神经元的比例系数， $K > 0$ 。

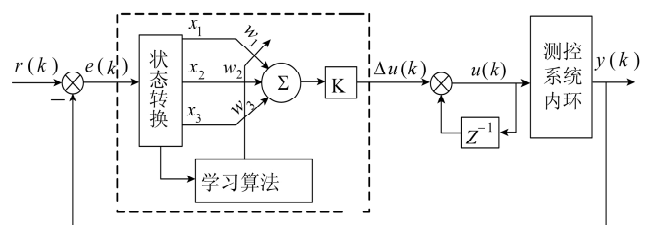


图3 单神经元PID控制器

神经元通过关联搜索产生控制信号，所以

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k) \quad (12)$$

$$\text{因此, } \Delta u(k) = K \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k) \quad (13)$$

设系统误差目标函数为：

$$E(k) = \frac{1}{2} [r(k) - y(k)]^2 = \frac{1}{2} e^2(k) \quad (14)$$

神经网络的学习策略是不断调整权值  $w_i(k)$ , 使  $E$  沿着减小方向变化, 即对  $w_i(k)$  沿负梯度方向进行搜索调整, 可得:

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \eta e(k) \frac{\partial e(k)}{\partial w_i(k)} \quad (15)$$

其中,  $\eta$  为学习速率。本文采用神经网络有监督的 Hebb 学习规则对权值  $w_i(k)$  进行修改, 它与神经元的输入、输出和输出偏差三者的相关函数有关, 用数学式表示为:

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \eta_i p_i(k) \quad (16)$$

$$p_i(k) = e(k) u(k) x_i(k) \quad (17)$$

将式(12)、(13)、(16)、(17)进行整理并对学习算法进行规范化处理后可得:

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 \frac{w_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |w_i(k)|} x_i(k) \quad (18)$$

式中,

$$\begin{cases} w_1(k+1) = w_1(k) + \eta_1 u(k) x_1(k) \\ w_2(k+1) = w_2(k) + \eta_2 u(k) x_2(k) \\ w_3(k+1) = w_3(k) + \eta_3 u(k) x_3(k) \end{cases} \quad (19)$$

而  $\eta_p$ 、 $\eta_i$ 、 $\eta_D$  分别表示比例系数、积分系数、微分系数的学习速率。

对照式(9)和式(13)可知, 通过神经元权值  $w_i(k)$  的自学习可以在线调整积分分离增量型 PID 控制器中的相应系数  $\eta_p$ 、 $\eta_i$  和  $\eta_D$ , 使得整个系统具有自适应 PID 控制的特性, 从而能克服环境变化或非线性等不利因素的影响, 增强系统的鲁棒性。

### 2.3 积分分离单神经元自适应 PID 控制算法的实现

由上述研究分析, 可建立积分分离单神经元自适应 PID 控制算法流程如下:

- (1) 初始化权值  $w_i(0)$ 、比例系数  $K$ 、积分分离的阈值  $\varepsilon$  以及学习速率  $\eta_p$ 、 $\eta_i$  和  $\eta_D$ ;
- (2) 根据当前输入  $r(k)$  和反馈  $y(k)$ , 计算误差量  $e(k) = r(k) - y(k)$ , 经状态转换输出状态向量  $x_i(k)$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;
- (3) 按照式(18)计算单神经元 PID 控制率  $u(k)$ ;
- (4) 按照式(14)计算系统误差目标函数  $E(k)$ , 如果  $E(k) < 0.0001$ , 转步骤(6);
- (5) 按照式(19)修正权值  $w_i(k)$ , 置  $k = k + 1$ , 转步骤 2;
- (6) 停止自学习, 保持神经元权值调整结果。

### 3 仿真实验与结果分析

为了检验积分分离单神经元自适应 PID (Single Neuron PID) 的控制效果, 作者针对某 5 t 万能试验机, 运用 MATLAB 进行了仿真研究并与常规 PID 控制进行对比。系统参数及

有关系数如表 1 所示, 其中万能试验机测控系统的 2 个内环 PI 调节器参数已经通过优化方法得到, 传递函数分别为:  $G_{ACR}(s) = (0.004s + 0.85)/s$ ,  $G_{ASR}(s) = (1.27s + 0.015)/s$ 。积分分离的阈值  $\varepsilon = 0.7$ , 常规 PID 控制器的参数通过 Ziegler-Nichols 公式<sup>[9]</sup>整定得到。

表1 某万能试验机系统参数

序号	参数名称	数值
1	电机额定转速 /r/m	1000
2	电机额定功率 /W	800
3	电机额定转矩 /N.m	2.56
4	电机飞轮惯量 /N.m <sup>2</sup>	0.32
5	电机机电时间常数 /ms	10
6	电机电磁时间常数 /ms	1
7	电机反电势系数 /V.min/r	0.025
8	PWM 装置放大系数	50
9	PWM 装置延迟时间 /ms	0.08
10	滚珠丝杠导程 /mm	5
11	减速器传动比	10

仿真研究 1: 万能试验机系统在常规 PID 和 SNPID 控制下的单位阶跃响应曲线如图 4 所示, 性能指标如表 2 所示。由 2 种控制效果可见: 与常规 PID 相比, SNPID 虽然上升速度较慢, 但具有超调量小、调节时间短、控制精度高等优点。2 s 时, 在系统的单位阶跃信号加入一个测量噪声, 由图 4 可见, SNPID 比常规 PID 的抗干扰能力更强。

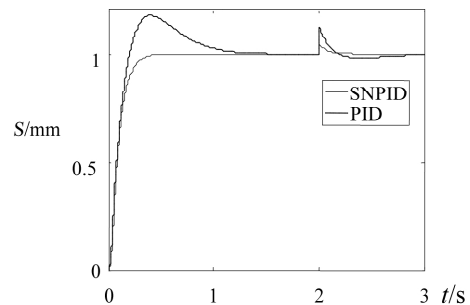


图4 系统单位阶跃响应曲线

表2 2种控制器的性能指标

控制器	上升时间/s	超调量/%	调节时间/s
PID	0.136	17.7	0.87
SNPID	0.176	0.5	0.26

仿真研究 2: 假设对某种塑料试件施加 400 N/min 的恒负荷拉伸速率, 拉伸到定值 1500 N 处。使用 SNPID 和常规 PID 控制的仿真曲线如图 5 所示, 可以看出 2 种控制器性能都能满足要求。

对某种铝合金进行恒负荷拉伸试验, 拉伸速率为 800 N/s, 拉伸到定值 5 000 N 处, 常规 PID 和 SNPID 控制器参数如前不变, 则 2 种控制器的仿真结果如图 6 所示。

由实验结果可以看出, 在控制器参数相同的情况

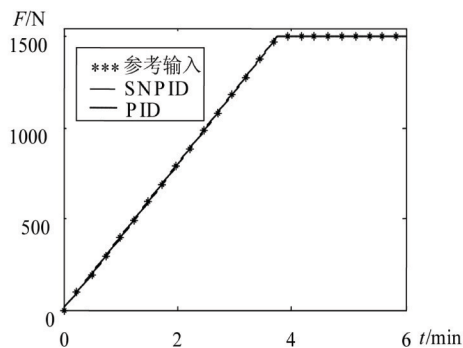


图5 某种塑料恒速率负荷拉伸控制响应曲线

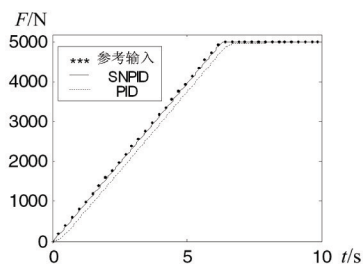


图6 某种铝合金恒速率负荷拉伸控制响应曲线

下,用常规PID控制的不同刚度材料的恒负荷试验效果不理想,而采用SNPID控制器仍能保持较好的试验效果。

仿真研究3:试件的刚度在材料试验的不同阶段会发生变化,假设某种塑料的刚度变化曲线如图7所示。

对该种试件以400 N/min的速率进行恒速率负荷拉伸试验。2种控制器的响应曲线如图8所示。

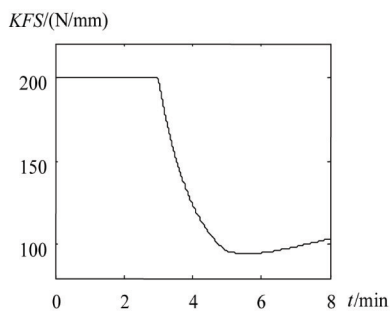


图7 某种塑料刚度变化曲线

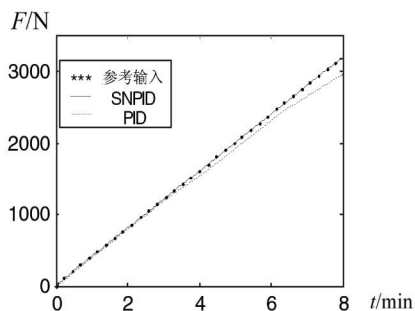


图8 某种塑料恒速率负荷拉伸控制响应曲线

由仿真实验结果可见,SNPID控制器能够适应试件性能参数的变化,具有良好的动态特性和较强的鲁棒性,从而能够更好地满足万能试验机高精度动态控制的要求。

万能试验机在材料试验领域得到了广泛的应用。本文建立了万能试验机测控系统的数学模型,并利用积分分离单神经元自适应PID算法实现了万能试验机系统的负荷、变形、位移的闭环控制。通过仿真并与常规PID控制进行对比,结果表明,该积分分离单神经元自适应PID控制器能够根据被控对象参数变化自整定控制器参数,具有抗扰性能好、可靠性高、易于实现等优点,能满足高精度万能试验机系统的控制要求。

参考文献

- [1] 杨泽勇,何广平.材料试验机测控系统关键技术的研究与实现[J].计算机测量与控制,2005,13(11):1210-1213.
- [2] CLARDE D W.Adaptive control of a materials-testing machine[C]. Adaptive Control, IEE Colloquium, 1996, 13(4): 1-4.
- [3] 宋玉泉,程永春,侯磊.恒应变速率拉伸试验机的控制系统[J].中国机械工程,1999,10(7):782-785.
- [4] 陈伯时.电力拖动自动控制系统(第3版)[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [5] 蒋珉.控制系统计算机仿真[M].北京:电子工业出版社,2006.
- [6] 邱公伟,林瑞全.不完全微分型PID控制的神经元实现[J].仪器仪表学报,2003,24(6):647-648,656.
- [7] JIANG Rui Quan, CAI Jin Guo.Neuron based adaptive control algorithm for CNC positioning servo system[C].Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation, 2000(6): 3121-3125.
- [8] 陶永华.新型PID控制及其应用(第2版)[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [9] ZIEGLER J G, NICHOLS N B.Optimum settings for automatic controllers[J].Trans.ASME.1942, 64: 759-768.

(收稿日期:2008-10-20)