

幅相控制策略在六自由度运动模拟器中的应用

马建明, 黄其涛, 丛大成, 叶正茂, 韩俊伟
(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 由于六自由度运动模拟器自身的闭环频率特性及非线性等因素, 对于正弦输入信号存在幅值衰减和相位滞后, 很难实现对高频正弦信号的精确跟踪, 针对这一问题采用基于 Widrow-Hoff 学习算法的幅相控制策略. 利用运动学正解间接得到的运动模拟器上平台位姿的反馈信号, 通过该控制策略迅速地调整系统输入正弦信号的幅值和相位, 使系统输出在短时间内对设定信号进行精确跟踪. 仿真和实验表明, 该方法在实现六自由度运动模拟器对正弦信号的精确跟踪问题上明显优于常规的经典控制, 对于其他正弦运动的精确跟踪系统同样具有普遍意义.

关键词: 六自由度运动模拟器; Widrow-Hoff 学习算法; 幅相控制策略; 精确跟踪

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7043(2008)11-1216-06

Application of the amplitude-phase control strategy in a 6-DOF motion simulator

MA Jianming HUANG Qi-tao CONG Da-cheng YE Zheng-mao HAN Jun-wei
(School of Mechanical and Electrical Engineering Harbin Institute of Technology Harbin 150001, China)

Abstract: Due to closed-loop amplitude and frequency response characteristics and nonlinear factors in 6-DOF motion simulators, it's difficult to accurately track high frequency harmonic motion. To solve the problem, this paper proposes a control strategy based on the Widrow-Hoff learning algorithm. It adopts the feedback signals of position and orientation of the moving platform, which is indirectly achieved by solving the forward kinematics of the 6-DOF motion simulator, to quickly adjust the amplitude and phase of the input harmonic motion signals. Thus, it can enable the output signal to accurately track the input signal in a short period of time. Simulations and experiments prove that the control strategy is obviously superior to the conventional control strategy in tracking harmonic motion of 6-DOF motion simulators. It also has universal significance to other systems that must precisely track harmonic motion.

Key words: 6-DOF motion simulator; Widrow-Hoff learning algorithm; amplitude-phase control strategy; accurate tracking

并联机器人由于其较串联机器人具有刚度大、承载能力强、精度高、易于控制等优点, 近 30 年来成为机器人研究领域的热点. 六自由度运动模拟器是六自由度并联机器人的一个十分重要的应用领域, 具有广阔的发展空间和良好的应用前景.

正弦运动信号是各种六自由度运动模拟器系统十分常用而且非常重要的一种测试信号. 精确的正弦运动可以用来测试或校准某些直线运动和旋转运动^[1]. 正弦运动的跟踪性能指标可以用在一定频率范围内的系统输出与输入之间的幅值误差、相位误差来表示. 文中正弦运动的精确跟踪指标设定为幅值误差不超过 10%, 相位误差不超过 10°. 然而, 液压驱动六自由度运动模拟器在各自由度方向上的固有频率一般不超过 15Hz. 若只采用经典的 PID 调节加输入信号的前馈控制, 由于其自身的闭环频率特性及非线性等因素, 对于输入的正弦信号存在幅值衰减和相位滞后, 而且随着输入信号频率的逐渐提高, 这种现象更趋严重, 因此很难实现对高频正弦信

收稿日期: 2007-09-11.
基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-04-0325).
作者简介: 马建明 (1980-), 男, 博士研究生, E-mail: haiguox@163.com;
韩俊伟 (1964-), 男, 教授, 博士生导师.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

号的精确跟踪.针对这一问题,该文提出采用基于 W idrow Hoff学习算法的幅相控制策略,该方法能够利用运动学正解间接得到的六自由度运动模拟器上平台位姿的反馈信号,通过迅速地调整系统正弦输入信号的幅值和相位,使系统的输出在短时间内对设定信号进行精确跟踪.

1 六自由度运动模拟器系统描述

六自由度运动模拟器由上平台、基座、上铰、下铰,以及连接于上平台和基座之间的 6 套液压伺服作动器构成,如图 1所示.作动器与上平台和基座之间分别用十字铰和虎克铰连接,通过 6 个作动器的协调动作来实现其在空间的六自由度运动. 6 套液压伺服系统均由非对称伺服阀控制的非对称液压缸组成.

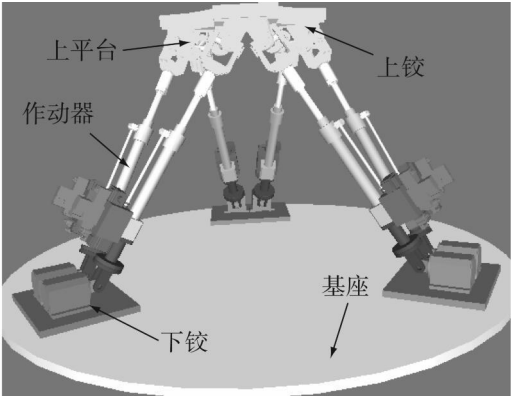


图 1 六自由度运动模拟器
Fig 1 6-DOF motion simulator

六自由度运动模拟器是一个典型的复杂非线性的多输入多输出系统,随着上平台及负载在工作空间中的位姿不同,使得 6 套液压伺服系统在不同位姿下具有不同的负载特性,同时由于采用液压驱动,整个液压系统的管路、伺服阀、液压缸在系统运行过程中的动态特性和液压系统中存在的摩擦、死区和间隙等非线性因素都直接影响着系统的状态参数,使整个系统在运行过程中具有很强的时变性.常规的 PID调节加前馈控制的控制策略对于一般精度的六自由度运动模拟器来说具有参数调节方便,易于实现等特点,但是对于精确的正弦跟踪系统来说,却很难取得令人满意的效果.

基于 W idrow Hoff学习算法的六自由度运动模拟器正弦运动精确跟踪系统的原理框图如图 2所示,整个系统由正弦信号发生器、自学习校正网络、运动学反解模块、运动学正解模块、6 套液压伺服系

统和上平台及负载组成,其中最关键的部分是自学习校正网络和运动学正解模块.

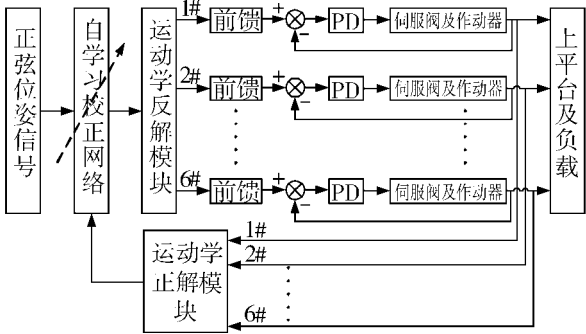


图 2 六自由度运动模拟器正弦运动精确跟踪系统原理框图
Fig 2 Principle block diagram of the accurate harmonic motion tracking system of the 6-DOF motion simulator

自学习校正网络的快速校正功能是由 W idrow Hoff学习算法来实现的. W idrow Hoff学习算法是由美国 Stanford大学的 W idrow 和 Hoff于 1959年提出的,包括一种自适应线性神经网络 (ADALNE)和最小均方算法 (LMS). ADALNE是一种连续时间线性神经元^[2],以前这种算法通常主要用于复杂系统的自适应滤波、故障检测等领域并成功应用于电力系统和化工业等行业^[3-6].文献[7]将该算法用于液压系统的同步控制中,并讨论了算法的稳定性问题,文献[8]基于该算法设计了自适应相位纠偏器用于液压伺服系统中,解决正弦运动的相位滞后问题,取得了很好的效果.该文建立了基于此算法的校正网络,将此算法应用于六自由度运动模拟器中实现对正弦运动的精确跟踪.

2 幅相控制策略及其原理

W idrow Hoff学习算法是建立在 ADALNE神经网络基础上的,它具有一个线性的传输函数,其结构原理如图 3所示.虚线框内是一个双输入的单层线性神经元.对应的公式为

$$\alpha = \text{purelin}(w^T s + d) = w_1 s_1 + w_2 s_2 + d \quad (1)$$

式中: α 为神经网络的输出,权值向量 $w = [w_1 \ w_2]^T$,输入向量 $s = [s_1 \ s_2]^T$, d 是偏移量,通常取 d 为 0.

在任意给定时刻 ADALNE神经网络的输入一输出成线性关系,当权值在线调整时,这种关系作为时间 t 的函数是非线性的.学习的过程就是权值调整的过程,以使输出信号能够跟踪设定的输入信号.该网络的主要优点是结构简单、能够在线调整参数并具有快速性^[9].

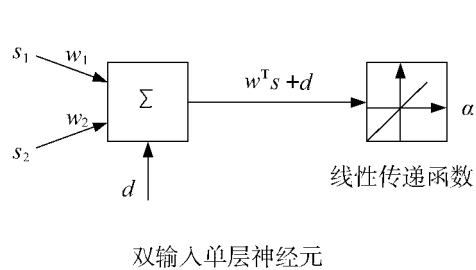


图 3 双输入 ADALINE 神经网络结构原理图
Fig 3 ADALINE neural network with two input ports
自学习校正网络构造的基本原理如图 4 所示。

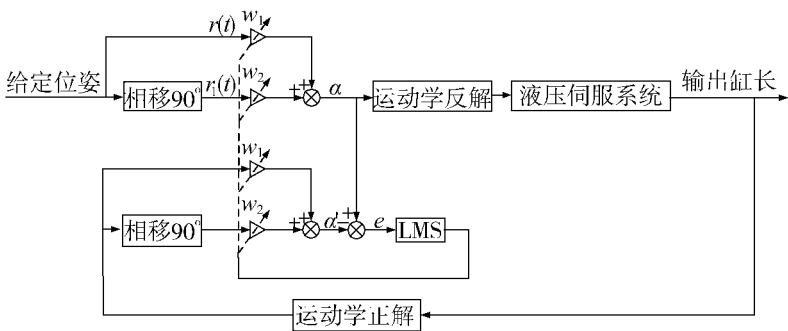


图 4 校正网络的原理图
Fig 4 Principle block diagram of the adjustment network

根据 LMS 算法定义,利用最速下降法^[10],可以得到计算校正网络权值向量的基本公式:

$$w(k+1) = w(k) + 2\beta e(k)s \tag{2}$$

式中: β 是学习系数,可以控制算法的稳定性和收敛速度; $e(k)$ 是 k 时刻的神经网络的输出误差。

均方误差是一个中间向下凹的抛物线型曲面,在整个定义域具有最小值,通过最速下降法,可求得最佳权值向量,使得均方误差为最小。从图 4 中可以看出,只要运动学正解的输出和系统的给定位姿之间存在误差,经过同构的 ADALINE 神经网络后此误差就必然在网络输出误差 e 上体现出来。于是由式 (2) 计算下一个时刻的权值,实时地调整 w_1 、 w_2 ,经过叠加后使神经网络的输出 α 的幅值和相位发生相应变化,由于 α 经过运动学反解后直接输入到液压伺服系统中,从而影响到系统的输出并使其朝着误差减小的趋势变化,直到误差消除,权值也最终趋于稳定,并使输出位姿和设定的位姿信号达到一致,也即实现了正弦信号的精确跟踪。

设正弦输入信号为: $r(t) = A_m \sin(\omega t + \phi_0)$, 此处取 ϕ_0 等于 0, 即 $r(t) = A_m \sin(\omega t)$. 将该信号往后相移 90° , 则 $r_1(t) = -A_m \cos(\omega t)$, 将 $r(t)$ 和 $r_1(t)$ 分别作为校正网络的输入 s_1 和 s_2 , 并乘以 w_1 和 w_2 后进行叠加作为神经网络的输出 α , 然后经过运动学反解送给六自由度运动模拟器的液压伺服控制系统。同时,采集液压缸位移传感器的信号,经过运动学正解,间接得到六自由度运动模拟器上平台的实际位姿,使该位姿也经过一个同构的神经网络,其输出为 α' , α 与 α' 之差即为神经网络的输出误差,根据该误差,利用 LMS 算法调整权值向量。

运动模拟器上平台当前时刻的实际位姿,校正网络必须利用该位姿对系统的输入信号进行调整,从而达到精确跟踪的目的。因此,运动学正解的实时性及其精度是影响系统跟踪性能的关键因素之一。采用文献 [11] 中的运动学正解算法。该算法采用牛顿-拉夫森公式求解一组运动学非线性方程组,求解精度为 $2 \times 10^{-6} \text{ m}$, 在文中描述的六自由度运动模拟器系统中,整个系统运行一个周期的平均时间为 1.12 ms 可以严格保证实际应用的实时性和精度要求。

3 六自由度运动模拟器正弦仿真分析

根据文献 [12] 中采用 Kane 方法建立的六自由度并联机器人多刚体动力学方程和液压伺服系统的动力学方程搭建 Matlab/Simulink 模型进行仿真,液压伺服系统的主要参数取自实际的六自由度运动模拟器的液压伺服系统。液压缸活塞直径 $D = 0.063 \text{ m}$, 活塞杆直径 $d = 0.045 \text{ m}$, 液压缸的有效行程 $L = 445 \text{ mm}$, 伺服阀 7 MPa 下的空载流量为 63 L/min , 油

源压力 $P_s=14\text{ MPa}$ 上平台和负载的总质量 $m=300\text{ kg}$

采用经典的 PID 调节加输入信号的前馈控制策略,在 X 向输入幅值为 1 mm , 频率 20 Hz 的正弦信号,得到的仿真曲线如图 5 所示. X 向幅值误差为 34.7% , 相位误差为 79.6° . 再利用应用了幅相控制策略的模型进行仿真,在 X 向输入同样幅值和频率的正弦信号,取 $\beta=10$, 权值向量初值 $w_0=[1.23\text{ }-1.75]^T$, 经过几个周期的学习后,仿真曲线如图 6 所示. X 向幅值误差仅为 1.17% , 相位误差为 0.00° .

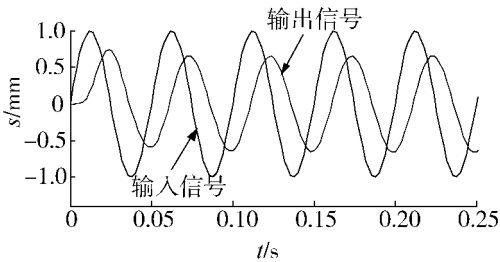


图 5 采用经典控制策略的系统输入、输出

Fig 5 Input and output of system used PID control strategy

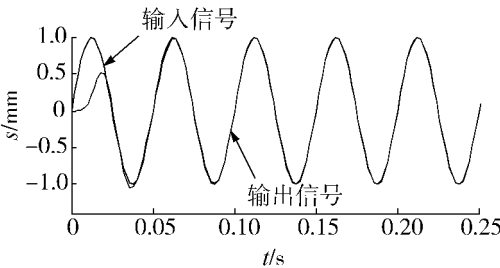


图 6 经过校正网络后的系统输入、输出

Fig 6 Input and output of system used adjustment network

4 六自由度运动模拟器正弦实验研究

利用该文描述的六自由度运动模拟器,以 X 向为例,进行实验研究.采用经典的 PID 调节加输入信号的前馈控制策略,通过系统辨识,得到系统的幅频特性曲线如图 7 所示,从图中可见,系统的位置频宽大约在 $9\sim10\text{ Hz}$ 左右.

在 X 向依次输入不同幅值和频率的正弦信号,得到的幅值误差和相位误差如表 1 所示,相应的实验曲线如图 8 所示.从表中可见当输入信号的频率达到 25 Hz 时,输出信号的幅值误差为 63.7% , 相位误差为 108.9° . 幅值衰减和相位滞后非常严重,输出信号对输入信号的跟踪已经严重失真.

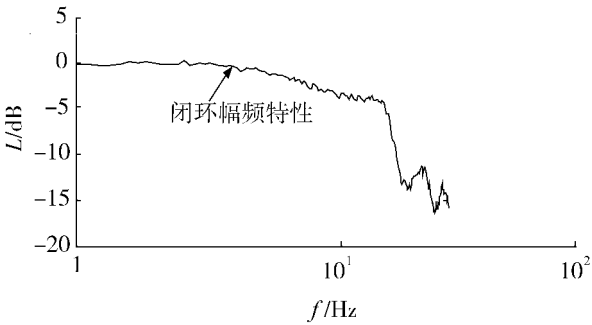
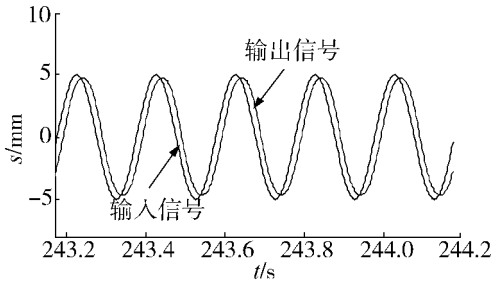


图 7 X 向幅频特性

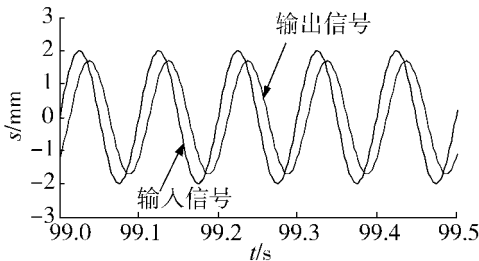
Fig 7 Amplitude-frequency characteristic of X direction

表 1 采用经典控制策略的 X 向正弦运动参数及结果

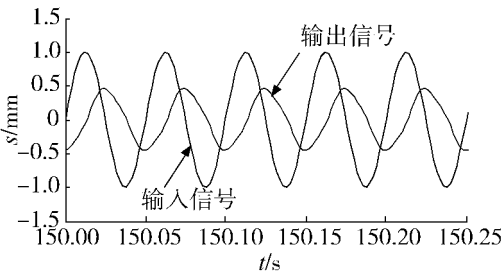
Table 1 Parameters and results of harmonic motion in X direction used PID control strategy				
序号	幅值 /mm	频率 /Hz	幅值误差 /%	相位误差 /($^\circ$)
1	5	5	5.00	27.00
2	2	10	15.2	46.44
3	1	20	53.9	96.48
4	0.8	25	63.7	108.9



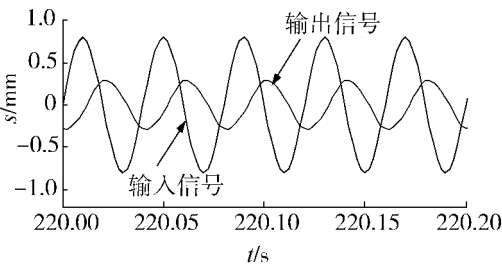
(a) 信号频率 5 Hz



(b) 信号频率 10 Hz



(c) 信号频率 20 Hz



(d) 信号频率 25 Hz

图 8 采用经典控制策略的实验曲线

Fig 8 Experimental curves under the PID control strategy

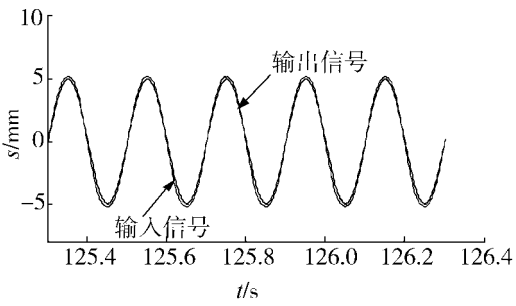
将幅相控制策略应用于该六自由度运动模拟器中,同样在 X 向输入不同幅值和频率的正弦信号,同时 β 值、权值向量初值 w_0 如表 2 所示,经过几个周期的学习后,相应的幅值误差和相位误差示于表 2 中,相应的实验曲线如图 9 所示.从表中可见当输入信号的频率达到 25Hz 时,输出信号的幅值误差仅为 6.44%,相位误差仅为 4.05°输出信号仍然可以以很高的精度跟踪输入信号.

表 2 采用幅相控制策略的 X 向正弦运动参数及结果

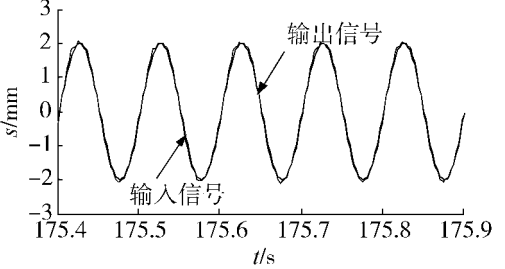
Table 2 Parameters and results of harmonic motion in X direction used amplitude-phase control strategy

序号	幅值/mm	频率/Hz	β	w_0	幅值误差/%	相位误差/(°)
1	5	5	5	$\begin{bmatrix} 0.97 \\ -0.51 \end{bmatrix}$	4.50	1.35
2	2	10	5	$\begin{bmatrix} 0.60 \\ -0.92 \end{bmatrix}$	1.63	0.18
3	1	20	5	$\begin{bmatrix} 0.56 \\ -1.42 \end{bmatrix}$	0.30	3.24
4	0.8	25	5	$\begin{bmatrix} -0.99 \\ -1.43 \end{bmatrix}$	6.44	4.05

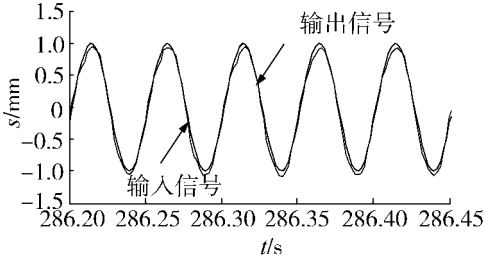
其他 5 个自由度的跟踪效果与 X 向自由度的跟踪效果相似,此处不再赘述.从实验曲线和跟踪精度的分析结果可以看出,采用幅相控制策略的六自由度运动模拟器正弦运动精确跟踪系统,可以在很短的时间内使六自由度运动模拟器对输入的正弦信号以很小的误差进行跟踪,即便是对于频率为系统位置频宽 2.5 倍的高频正弦信号也同样有效,相比于经典的 PID 调节加输入信号前馈的控制策略具有明显的优势.



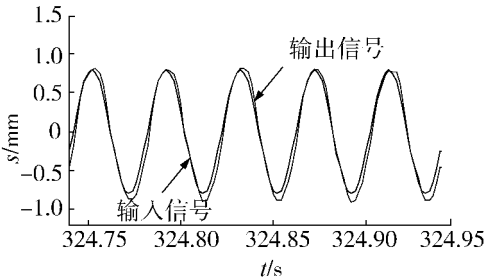
(a) 信号频率 5 Hz



(b) 信号频率 10 Hz



(c) 信号频率 20 Hz



(d) 信号频率 25 Hz

图 9 采用幅相控制策略的实验曲线

Fig 9 Experimental curves under the amplitude phase control strategy

5 结束语

采用基于 Widrow-Hoff 学习算法的幅相控制策略设计了六自由度运动模拟器正弦运动精确跟踪系统,在对正弦位姿信号的跟踪问题上,明显优于经典的 PID 调节加输入信号前馈的控制策略,而且这种方法不需要对系统进行参数辨识,自学习过程短,参数调整方便,易于在实际应用中实现.除了用于六自

由度运动模拟器以外,对于其他正弦运动的精确跟踪系统同样具有普遍意义.

参考文献:

[1]张元生,杨一栋,马智周,等.三轴转台谐波幅相自适应控制系统的设计[J].南京航空航天大学学报,2004,36(5):619-622.

ZHANG Yuansheng YANG Yidong MA Zhizhou et al Design of harmonic amplitude-phase adaptive control system in three-axis turntables[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics 2004, 36(5): 619-622.

[2]徐丽娜.神经网络控制[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999:16-18.

[3]周玉光,艾 芊,顾丹珍,等.自适应线性神经元在电能质量扰动诊断和频率跟踪中的应用[J].上海交通大学学报,2005,37(12):2072-2077,2087.

ZHOU Yuguang AIQ ian GU Danzhen et al Adaline and its application in power quality disturbances detection and frequency tracking[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University 2005, 37(12): 2072-2077, 2087.

[4]DASH P K, SWAIN D P, ROUTRAY A, et al An adaptive neural network approach for the estimation of power system frequency[J]. Electric Power Systems Research, 1887, 41(3): 203-210.

[5]ABDEL-GALIT K, EL-SAADANY E F, SALAM M M A. Power quality event detection using adaline [J]. Electric Power System Research, 2003, 64(1): 137-144.

[6]MICHAEL M, MWEMBESHIC A, KENT S S. Flexible on-line modeling and control of pH in waste neutralization reactors[J]. Chem Eng Technol 2004, 27(2): 130-138.

[7]延 皓,叶正茂,张 辉,等.基于 Widrow-Hoff学习算法的液压协调加载控制策略研究[J].地震工程与工程振动,2006,26(3):104-107.

YAN Hao YE Zhengnao ZHANG Hui et al Hydraulic servo systems' synchronous loading strategy based on Widrow-Hoff learning rules [J]. Earthquake Engineering and Engineering V ibration, 2006, 26(3): 104-107.

[8]姚建均,丛大成,姜洪洲,等.基于神经网络的自适应相位纠偏器在电液伺服系统中的应用[J].吉林大学学报(工学版),2007,37(4):930-934.

YAO Jianjun CONG Dacheng JIANG Hongzhou et al ANN-based adaptive phase corrector applied in electrohydraulic servo system [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(4): 930-934.

[9]WIDROW B. Adaptive filters [M]. New York: McGrawhill 1970:36-62.

[10]HAGAN M T, DEMUTH H B, BEALE M H, 等.神经网络设计[M].戴葵,译.北京:机械工业出版社,2002:168-175.

[11]KOEKEBAKKER S H. Model based control of a flight simulator motion system[D]. Netherlands, Delft University of Technology, 2001:33-60.

[12]何景峰.液压驱动六自由度并联机器人特性及其控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:31-38.

HE Jingfeng Analysis and control of hydraulically driven 6-DOF parallel manipulator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 31-38.

[责任编辑:郑可为]