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

姚建均,丛大成,姜洪洲,吴振顺,韩俊伟

(哈尔滨工业大学 机电工程学院,哈尔滨 150001)

摘　要:针对电液伺服系统正弦响应中存在相位滞后的现象,基于 Adaline 神经网络,使用 LMS 自适应滤波算法设计了自适应相位纠偏器(APC)。当响应信号对输入信号有相位滞后时,利用 LMS 算法对神经网络的权值进行调整,经加权后的输入信号作用于控制系统,从而消除相位滞后。该方法并不需要对控制对象进行辨识,能保证控制系统的实时性。仿真和试验结果表明,自适应相位纠偏器能有效消除相位滞后,快速跟踪输入信号。

关键词:自动控制技术;Adaline 神经网络; LMS 自适应滤波算法;自适应相位纠偏器; 相位滞后

中图分类号:TP271　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-5497(2007)02-0930-05

ANN-based adaptive phase corrector applied in electro-hydraulic servo system

Yao Jian-jun, Cong Da-cheng, Jiang Hong-zhou, Wu Zhen-shun, Han Jun-wei

(*School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *China*)

Abstract: Aiming at the phase delay phenomenon occurs in electro-hydraulic servo system corresponding to a sinusoidal input, based on Adaline neural network, adaptive phase corrector was designed for eliminating phase delay using LMS adaptive filtering algorithm. When there exists phase delay between the input and its corresponding output, LMS algorithm was used to adjust the weights of the network, the weighted input signal was added to the control system such that the output phase delay was cancelled. This method needs not to estimate the system model and has good real-time performance. The simulation and experiment results show that the adaptive phase corrector can efficiently eliminate the phase delay and quickly trace the input signal.

Key words: automatic control technology; Adaline neural network; LMS adaptive filtering algorithm; adaptive phase corrector; phase delay

液压控制技术已经在许多部门得到了广泛应用[1,2]。与其他驱动方式相比,液压驱动有许多明显优点,如相对小的体积具有较大的转矩、响应快、刚度高、高功率-重量比和高精度等。但液压系统也存在缺点,如摩擦、死区、间隙等非线性因素。此外,由于电液伺服系统的管路、伺服阀及液压缸在运行过程中存在着动态特性,这些动态特性直接影响系统的状态参数,使系统在运行的不同时刻特性是完全不同的,即具有时变性。由于电液伺服系统存在的这些缺点,使常规的控制策

收稿日期:2006-02-23.

基金项目:新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-04-0325).

作者简介:姚建均(1980-),男,博士研究生.研究方向:电液伺服系统智能控制. E-mail:travisyao@126.com

通讯联系人:韩俊伟(1964-),男,教授,博士生导师.研究方向:电液伺服系统,并联机器人和现代控制理论.
E-mail:hjw@mail.hit.edu.cn

略存在一定的局限性。目前许多研究工作集中在非线性控制策略上，其目的是当系统工作环境发生变化时控制器的参数能自适应地调整，从而使系统具有克服自身不确定性的能力[3]。文献[4－8]中对同步协调问题提出了各种控制方法，这些方法主要是基于数字补偿，即在系统输入信号的基础上，通过某种算法在输入信号中加入一个补偿信号来实现输出信号对输入信号的跟踪。但这些算法需要对系统进行辨识，增加了算法的复杂性，难以保证实时性。作者基于 Adaline 神经网络，采用 LMS 自适应滤波算法，设计了自适应相位纠偏器（APC）。该算法不需辨识对象，能保证实时性。仿真和试验验证了这种自适应纠偏器具有跟踪精度高、易于实现等优点。

1　系统描述

电液伺服系统由对称液压缸、伺服阀和负载组成，如图 1 所示。假设供油压力 p_s 为常数，系统无泄漏。从液压伺服系统的流量方程、连续性

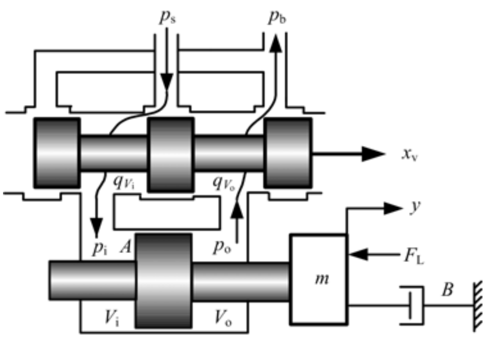

图 1　电液伺服系统简图

Fig. 1　Sketch map of electro-hydraulic servo system

方程和力平衡方程中可得出它的数学表达式。在稳态工作点附近对伺服阀流量方程线性化，可得

$$q_{VL} = K_g x_v - K_p p_L \tag{1}$$

式中：q_{VL} 为负载流量；K_g 为流量增益系数；K_p 为流量-压力系数；p_L 为负载压降，其表达式为

$$p_L = \frac{F_L}{A} = p_i - p_o \tag{2}$$

式中：A 为活塞有效面积；F_L 为作用在活塞上的外负载力。

定义负载流量为

$$q_{VL} = \frac{q_{Vi} + q_{Vo}}{2} \tag{3}$$

液压缸的流量连续性方程为

$$\dot{p}_i = \frac{K}{V_i}(q_{Vi} - A\dot{y}) \tag{4}$$

$$\dot{p}_o = \frac{K}{V_o}(A\dot{y} - q_{Vo}) \tag{5}$$

式中：K 为液体等效体积弹性模量；$\dot{y}$ 为活塞速度。

当液压缸在中位时，由式（2）—（5）可得液压缸流量连续方程为

$$q_{VL} = A\dot{y} + \frac{V_t}{4K}\dot{p}_L \tag{6}$$

式中：V_t 为液压缸两腔的总容积，$V_t = V_i + V_o$。

液压缸和负载的力平衡方程为

$$Ap_L = m\ddot{y} + B\dot{y} + F_L \tag{7}$$

式中：m 为活塞和负载的总质量；B 为活塞和负载的黏性阻尼系数；$\ddot{y}$ 为活塞加速度。

当初始状态为零时，由式（1）、（6）、（7）和 Laplace 变换可得系统的传递函数为[1]

$$Y = \frac{\frac{K_g}{A}X_v - \frac{K_p}{A^2}\left(1 + \frac{s}{\omega_1}\right)F_L}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1\right)} \tag{8}$$

式中：

$$\omega_h = \sqrt{\frac{4KA^2}{mV_t}} \tag{9}$$

$$\xi_h = \frac{K_p}{A}\sqrt{\frac{Km}{V_t}} + \frac{B}{2A}\sqrt{\frac{V_t}{4Km}} \tag{10}$$

$$\omega_1 = \frac{4KK_p}{V_t} \tag{11}$$

2　自适应相位纠偏器

系统的正弦响应往往有相位滞后的问题，导致波形失真，同时在多通道协调加载或疲劳实验中往往要求系统是同步协调控制。因此作者基于 Adaline 神经网络设计了自适应相位纠偏器来解决这个问题。

设输入信号为

$$r = A_I \sin\omega t \tag{12}$$

式中：A_I 为信号幅值；ω 为频率。

系统响应为

$$y = A_o \sin(\omega t - \varphi) \tag{13}$$

式中：A_o 为输出信号的幅值；φ 为相位。

可以看出，如果能使输入信号获得一个相应的相位超前 φ，则可消除相位滞后的问题。故可令系统的输入信号为

$$r = A_I \sin(\omega t + \varphi) = w_1 A_I \sin\omega t + w_2 A_I \cos\omega t \tag{14}$$

式中：$w_1 = \cos\varphi$，$w_2 = \sin\varphi$。

问题的关键在于如何正确辨识系统的相位滞后 φ，从而得到 w_1 和 w_2 的值。这个问题可由 Adaline 神经网络来完成。Adaline 神经网络是由美国 Standford 大学的 Widrow 于 1959 年提出的，它是一种连续时间线性神经元[9]。Adaline 网络已在电力系统、图像处理和化工业等地方得到了成功应用[10-13]。它是有 n 个输入和单输出的神经网络。在任意给定的时刻，其输入/输出的关系是线性的。当权值在线调整时，这种关系作为时间的函数是非线性的。训练就是权值调整的过程，以使输出达到期望输出。该网络的主要优点是能够在线调整、结构简单和具有快速性[14]，其结构如图 2 所示。

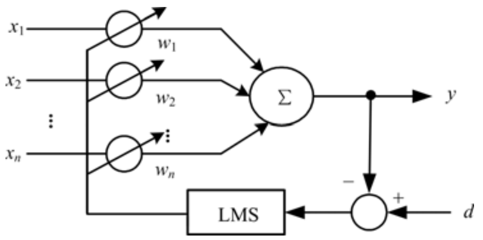

图 2　Adaline 神经网络结构图

Fig. 2　Structure of Adaline neural network

图中：$\boldsymbol{x}=[x_1, x_2, \cdots, x_n]^{\mathrm{T}}$ 为神经网络的输入向量；$\boldsymbol{w}=[w_1, w_2, \cdots, w_n]^{\mathrm{T}}$ 为神经网络的权值；$y=\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}$ 为网络的输出；d 为神经网络的期望输出。

神经网络的权值是通过 LMS 自适应滤波算法来调整的。LMS 算法可描述为[15,16]

$$\boldsymbol{w}_{k+1} = \boldsymbol{w}_k + \alpha e(k)\boldsymbol{x}(k) \tag{15}$$

式中：

$$e(k) = d(k) - y(k) = d - \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \tag{16}$$

均方误差是一个中间向下凹的抛物型曲面，是具有唯一最小值的函数。自适应过程就是自动调节权系数使均方误差达到最小的过程，相当于沿抛物型曲面往下搜索最低点。而 LMS 算法是一种迭代梯度下降算法，它利用均方误差梯度的估计值求得最佳权向量，使均方误差为最小。$e(k)\boldsymbol{x}(k)$ 代表均方误差负梯度的估计值，迭代步长参数 α 是一个控制稳定性和收敛速度的参数。

在 APC 算法中，取 $\boldsymbol{x}=[A_1\sin\omega t, A_1\cos\omega t]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{w}=[w_1, w_2]^{\mathrm{T}}$，其原理如图 3 所示。图中的 y 和 r' 通过式(15)来调整权值，r 经过加权后得到的信号 r' 即为系统新的输入信号。

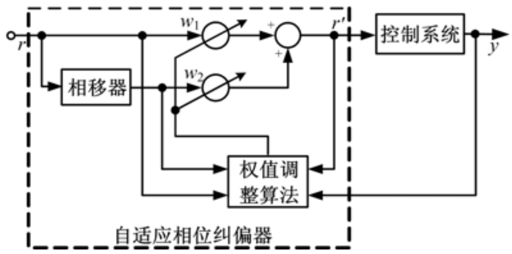

图 3　APC 原理图

Fig. 3　Principle of APC

3　仿真结果

为了表明所设计的 APC 能有效消除正弦响应中的相位滞后，以一个 6-DOF 振动台的阀控缸系统为仿真实例，其传递函数可描述为[17]

$$Y = \frac{73.339I}{s(s^2/156.8^2 + 0.305s/156.8 + 1)}$$

图 4 所示为未采用 APC、输入为 $0.02\sin 20\pi t$ 时的正弦响应。从图中可以看出，正弦响应有很大的相位滞后，并有幅值衰减现象。

图 5 为系统采用自适应相位纠偏器后的正弦响应。从图中可以看出，系统输出经过几个周期后能很好地在相位和幅值上跟踪输入信号。

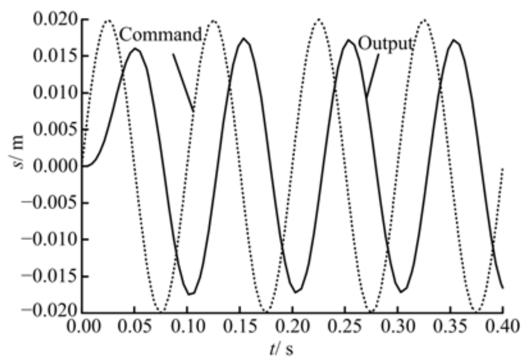

图 4　未采用 APC 时的正弦响应

Fig. 4　System sinusoidal response before using APC

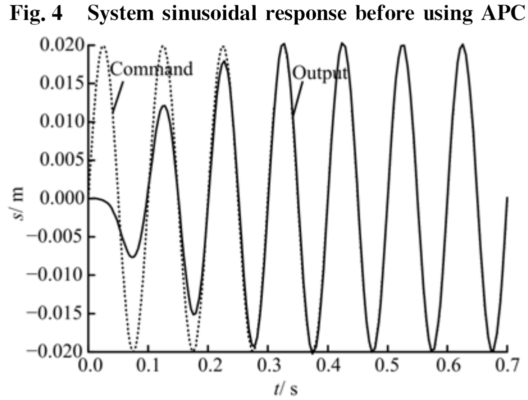

图 5　采用 APC 后的正弦响应

Fig. 5　System sinusoidal response after using APC

4　实验结果

实验时取输入信号为 $2\sin(10\pi t)$ mm;阀是 Moog 公司的 G761,$\Delta p_v=7$ MPa 时,$Q_n=63$ L/min;液压缸由天津优瑞克斯生产,63/45 mm,总行程 700 mm;供油压力 $p_s=10$ MPa,$m=100$ kg。电液伺服系统采用 P 控制、前馈控制和动压反馈相结合的控制策略。

图 6 为系统未采用自适应相位纠偏器时的正弦响应曲线。从图中可以看出,正弦响应有较大的相位滞后。图 7 为系统采用自适应相位纠偏器

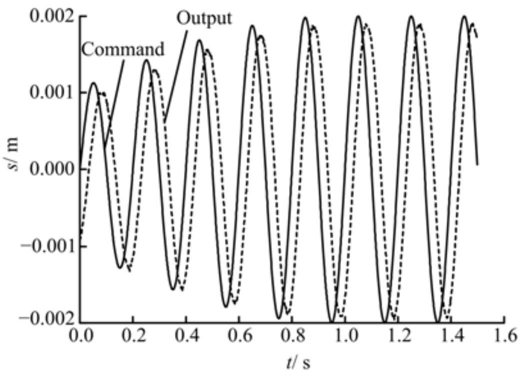

图 6　未采用 APC 时的正弦响应

Fig. 6　System sinusoidal response before using APC

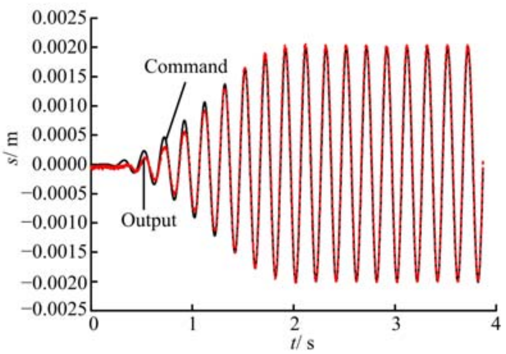

图 7　采用 APC 后的正弦响应

Fig. 7　System sinusoidal response after using APC

后的正弦响应,从图中可以明显看出,输入、输出曲线在经过几个周期后基本重合在一起,表明所设计的自适应相位纠偏器是非常有效的,其跟踪能力非常强。图 8 为 Adaline 神经网络的两个权值曲线,可以看出权值呈小范围波动状态,从谱分析看,其周期与输入信号相同,这符合理论分析。

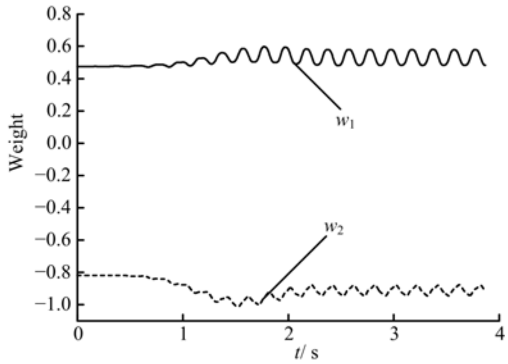

图 8　权值曲线

Fig. 8　Weights plot

5　结束语

针对电液伺服系统正弦响应出现的相位滞后现象,基于 Adaline 神经网络,采用 LMS 算法设计了自适应相位纠偏器。仿真和试验结果表明:该自适应相位纠偏器能够有效消除正弦响应中的相位滞后现象,使输出信号高精度地跟踪输入信号,从而达到同步协调控制的目的。这种方法不需要对系统进行辨识,具有很强的实时性。需要说明的是,作者设计的自适应相位纠偏器是一种反馈系统,实际应用时应合理选择迭代步长参数 α,以使系统处于稳定状态并快速达到收敛状态。

参考文献:

[1] 李洪人. 液压控制系统[M]. 北京:国防工业出版社,1990.

[2] 王占林. 近代液压控制[M]. 北京:机械工业出版社,1997.

[3] 吕维迪. 多通道电液伺服加载系统同步协调控制器的研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2003.
Lü Wei-di. Develop of synchronous controller for multi-channel electrohydraulic loading system[D]. Harbin: School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, 2003.

[4] 简林柯,李新忠,何钺,等. 电液伺服多激振器振动台的同步运动控制[J]. 机床与液压,1998(4): 33-35.
Jian Lin-ke, Li Xin-zhong, He Yue, et al. Synchronous control of electro-hydraulic servo multi-actuator vibration platform[J]. Machine Tool & Hydraulics, 1998(4): 33-35.

[5] 李明霞. 数字补偿技术在振动台振动控制应用中的若干问题[J]. 噪声与振动控制,1997(3): 9-14.

[6] 何玉彬,闫桂荣,张道立,等. 电液伺服结构加载系统的神经网络直接自适应输出跟踪控制[J]. 机床与液压,1997(2): 20-23.
He Yu-bin, Yan Gui-rong, Zhang Dao-li, et al. Neural network direct adaptive output tracking control for electrohydraulic servo structural loading

syatem[J]. Machinen Tool & Hydraulics, 1997(2): 20-23.

[7] 刘江晖,熊清平,李显松. 电液同步控制策略研究[J]. 锻压机械,2000(6): 44-46.
Liu Jiang-hui, Xiong Qing-ping, Li Xian-song. Work on electro-hydraulic synchro-control strategy [J]. Metalforming Machinery, 2000(6): 44-46.

[8] 江加和,喻统武,宋子善. 电液伺服加载系统数字控制的研究[J]. 北京航空航天大学学报,2000(3): 318-320.
Jiang Jia-he, Yu Tong-wu, Song Zi-shan. Study of digital control in electrohydraulic sero loading system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000(3): 318-320.

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

[10] 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(12):2072-2075.
Zhou Yu-guang, Ai Qian,Gu Dan-zhen, et al. Adaline and its application in power quality disturbances detection and frequency tracking [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005 (12): 2072-2075.

[11] 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, 1997,41(3): 203-210.

[12] Abdel-Galil T K, El-Saadany E F, Salam M M A. Power quality event detection using Adaline[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 64(1): 137-144.

[13] Michael M, Mwembeshi C 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.

[14] Widrow B. Adaptive filters [M]. New York: McGrawtlill, 1970.

[15] Cichocki A, Unbehauen R. Simplified neural networks for solving linear least squares and total least squares problems in real time[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994(5): 910-923.

[16] Masry Dabeer E. Analysis of mean-square error and transient speed of the LMS adaptive algorithm[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002 (48): 184-189.

[17] 姚建均. 六自由度振动台加速度谐波抑制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2004.
Yao Jian-jun. Study on acceleration harmonic cancellation for six degree of freedom vibration platform [D]. Harbin: School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, 2004.