

双缸电液位置伺服同步控制系统的智能控制

邓飙^{1,2}, 苏文斌¹, 郭秦阳¹, 林滔¹, 张安²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 第二炮兵工程学院发射系, 710025, 西安)

摘要: 针对双缸电液位置伺服同步控制系统的高精度及快速性要求, 采用比例积分微分型迭代学习控制算法, 设计实现了电液位置同步控制系统. 在系统中采用双闭环两级控制策略, 将双缸同步误差反馈补偿到输出量中, 同时采用比例微分算法对数字控制量进行修正, 使双缸互为跟踪对象, 保证了双缸运行中的高精度同步. 试验结果表明: 该同步控制系统具有较高的控制精度和快速跟踪目标能力, 同步控制精度达到了 0.2%, 为电液同步控制提供了一种新的有效思路和方法, 因此具有重要的工程应用价值.

关键词: 双缸; 电液位置伺服; 同步控制; 迭代学习控制

中图分类号: TP273.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)11-0085-06

Intelligent Control for Electro-Hydraulic Position Servo Synchronic Control System with Double Cylinders

DENG Biao^{1,2}, SU Wenbin¹, GUO Qinyang¹, LIN Tao¹, ZHANG An²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: Aiming at the requirements of the high precision and fast response in electro-hydraulic position servo synchronic control system with double cylinders, proportional-integration-differential iterative learning control strategy was employed to design and implement the control system where two-closed-loop and two-level control were adopted to make the two electro-hydraulic position servo systems track each other and ensure the dynamic synchronization of the double cylinders. The position error between two cylinders into system output signal was fed back while the digital control signal was adjusted by proportional-differential algorithm. The experiments show that the system is endowed with high control accuracy, rapid tracking ability and the precision of synchronization control approaches to 0.2%.

Keywords: double cylinders; electro-hydraulic position servo; synchronic control; iterative learning control

随着液压技术在工程领域中的应用日益扩大, 大型设备负载能力增加或因布局的关系需要多个执行元件同时驱动一个工作部件, 同步运动就显得更为突出^[1]. 因此, 电液同步作为同步技术的重要分支, 正朝着快速、大功率、高精度的方向发展^[2]. 对于液压同步闭环控制, 目前常用的控制方法大致可以分为 4 类: 常规的控制方法、比例积分微分(PID)、

现代控制方法(最优控制、自适应控制等)和智能控制方法(神经网络控制、模糊控制和学习控制等). 文献[3]提出了采用单神经元 PID 控制来实现双缸同步控制, 文献[4]提出采用模糊 PID 实现液压同步控制的方法, 该方法虽然达到了较高的精度, 但均无法满足双缸电液位置伺服同步控制系统的快速性要求. 本文针对具有重复运动特性、高精度和快速性要

求的某电液位置伺服系统,运用迭代学习控制方法实现了对系统的高品质控制。

1 双缸电液位置伺服系统

1.1 系统简介

某电液位置同步控制系统的示意图如图1所示,系统的驱动对象是一个圆柱形的工作部件,在工作过程中用2个液压缸推动工作部件在圆形通道中前后滑动。由于工作部件与其轨道之间间隙很小,因此要求液压缸在推动工作部件滑动过程中应严格保持同步,否则会使工作部件在轨道中被卡死。

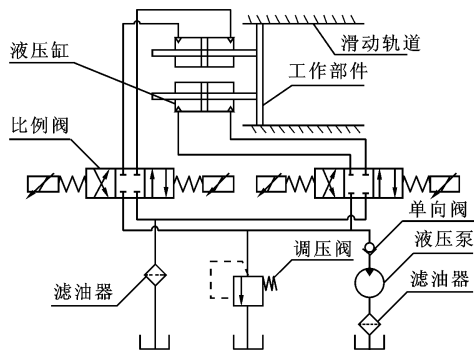


图1 电液位置同步控制系统的原理框图

系统的控制性能指标如下:工作部件的滑动行程为305 mm,系统能够实现慢速运动和快速运动;慢速运动要求系统在3 s内完成开启及关闭动作,在开启及关闭的过程中,均要求运动灵活无卡滞,同步误差小于±1 mm;快速运动要求系统在0.3 s内完成开启及关闭动作,工作过程中同步误差小于±3 mm,关闭过程对系统误差的要求与慢速运动相同。

1.2 系统数学模型的建立

对于控制2个独立的电液位置的伺服系统,其同步控制性能在很大程度上受单缸对输入信号跟踪性能的影响。对于单个电液位置的伺服系统,计算机输出控制信号 U_i 经调理放大后控制伺服比例阀,即通过控制其阀芯的开口位移 x_v ,从而达到控制液压执行元件液压缸的行程位移 x_p 。通过位置传感器对 x_p 进行检测,将检测得到的电信号 U_f 送回系统的输入,从而形成闭环控制。

考虑到系统无弹性负载,伺服比例阀为比例方向阀,阀控非对称液压缸的数学模型可简化为

$$x_p(s)/x_v(s) = \frac{K}{((s^2/\omega_n^2) + (2\xi_n s/\omega_n) + 1)s} \quad (1)$$

$$K = K_0 K_v K_q / A_p; \quad \omega_n = \left(\frac{4\beta_e A_p^2}{V_t M_t} \right)^{1/2}$$

$$\xi_n = \frac{(K_c + C_t)}{A_p} \left(\frac{\beta_e M_t}{V_t} \right)^{1/2} + \frac{B_p}{4A_p} \left(\frac{V_t}{\beta_e M_t} \right)^{1/2}$$

式中: K_0 为放大器的增益; K_v 为比例系数; K_q 为伺服阀流量增益; A_p 为液压缸活塞有效面积; ω_n 为固有频率; ξ_n 为阻尼比; β_e 为系统弹性模量; V_t 为液压缸两腔总容积; M_t 为负载质量; B_p 为负载的黏性阻尼系数; K_c 为伺服阀流量压力系数; C_t 为液压缸总泄漏系数。

2 伺服系统智能控制算法

2.1 控制参数的优化算法

PID迭代学习控制由于无需明确知道系统的数学模型,因此可以采用前次或本次迭代时的输入输出信息,应用比较简单的学习算法得到本次迭代所需的输入,经过多次迭代学习和训练,使控制对象在有限区间上实现对目标信号高精度的快速跟踪,非常适用于具有重复运动特性的被控对象。

PID型迭代学习控制的一般形式为

$$u_{k+1}(t) = f(u_k(t), e_k(t)) = u_k(t) + \left(K_P + K_I \int dt + K_D \frac{d}{dx} \right) e_k(t) \quad (2)$$

$$kT \leq t \leq (k+1)T, k = 0, 1, 2, \dots, n$$

式中: T 为学习周期; K_P 、 K_I 、 K_D 分别为比例、积分、微分学习因子; $u_k(t)$ 为第 k 次迭代过程的输入; $e_k(t)$ 为系统第 k 次输出值与期望理想输出值的误差,且系统0时刻的输出值与期望输出值相等。

$u_0(t)$ 为系统的初始输入,且满足使闭环系统保持稳定的条件,系统期望的理想输出周期为 T 。在PID型各种学习律的研究中,只是根据一定条件试凑出 K_P 、 K_I 、 K_D ,才能保证学习收敛所必须满足的条件。本文将根据传递函数的特殊性,给出一种PID型迭代学习控制的参数优化设计方法^[5-8]。

简单的线性时不变离散系统的输出为

$$Y(z) = H(z)U(z) = (h_d z^{-1} + h_{d+1} z^{-2})U(z) \quad (3)$$

式中: z^{-1} 为标准的时间延迟算子; $H(z)$ 为离散系统; $U(z)$ 为 $H(z)$ 的输入; h_d 为 $H(z)$ 的标准Markov参数,并且该系统在时间段 $t \in [0, N]$ 内可重复运行。假设在每次迭代过程中的初始状态均一致,定义第 k 次迭代过程中系统的输入、输出、期望输出和误差向量为

$$\begin{aligned} U_k &= [u_k(0), u_k(1), \dots, u_k(N-1)]^T \\ Y_k &= [y_k(0), y_k(1), \dots, y_k(N)]^T \\ Y_d &= [y_d(0), y_d(1), \dots, y_d(N)]^T \end{aligned}$$

$$\mathbf{E}_k = [e_k(1), e_k(2), \dots, e_k(N)]^T$$

则式(3)可写为

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{H}_P \times \mathbf{U}_k \tag{4}$$

式中: $\mathbf{H}_P$ 为由被控对象 Markov 参数构成的矩阵, 即

$$\mathbf{H}_P = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ h_2 & h_1 & 0 & \cdots & 0 \\ h_3 & h_2 & h_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_N & h_{N-1} & h_{N-2} & \cdots & h_1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

对于式(4),设计迭代学习控制器的目的就是根据期望输出轨迹,通过不断迭代得到一个期望输入信号 $u_d(t)$,使得系统的理想输出 $y_d(z) = H(z)u_d(z)$. 迭代过程可根据计算得到 $e_k(t)$,再利用一定的学习律通过不断调整 $u_k(t)$ 来完成.

由式(3)给出的离散系统的 PID 型迭代学习控制律的向量形式为

$$\mathbf{U}_{k+1} = \mathbf{U}_k + K_P \mathbf{E}_k + K_I \mathbf{T}_I \mathbf{E}_k + K_D \mathbf{T}_D \mathbf{E}_k \tag{6}$$

其中

$$\mathbf{T}_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{T}_D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

定义向量 $\mathbf{h}_p = [h_1, h_2, \dots, h_N]^T$,引入算子 $\mathbf{L}$,可把 $\mathbf{h}_p$ 映射成为 $\mathbf{H}_P$ 的形式,即 $\mathbf{H}_P = \mathbf{L}(\mathbf{h}_p)$. 同理, $\mathbf{T}_I$ 、 $\mathbf{T}_D$ 可以分别写为

$$\mathbf{T}_I = [1, 1, \dots, 1]^T; \quad \mathbf{T}_D = [1, -1, 0, \dots, 0]^T$$

由于 $\mathbf{Y}_k = \mathbf{H}_P \times \mathbf{U}_k$,根据式(6)可得

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{k+1} &= \mathbf{Y}_d - \mathbf{Y}_k + (\mathbf{Y}_k - \mathbf{Y}_{k+1}) = \\ &= \mathbf{E}_k - \mathbf{H}_P(\mathbf{U}_k - \mathbf{U}_{k+1}) = \\ &= (\mathbf{I} - K_P \mathbf{H}_P - K_I \mathbf{H}_P \mathbf{T}_I - K_D \mathbf{H}_P \mathbf{T}_D) \mathbf{E}_k = \\ &= \mathbf{H}_e \mathbf{E}_k = \mathbf{L}(\mathbf{h}_e) \mathbf{E}_k \end{aligned} \tag{8}$$

式中: $\mathbf{h}_e$ 为 $\mathbf{H}_e$ 的第 1 列. 整个迭代过程收敛的条件为

$$\|\mathbf{H}_e\|_i < 1, i = 1, \dots, \infty \tag{9}$$

定义优化设计的性能指标

$$J_{\min} = \min_{K_P K_I K_D} \|\mathbf{h}_e\|_2^2 \tag{10}$$

令 $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}, \mathbf{h}_D] \in \mathbf{R}^{N \times 3}$, $\mathbf{g}_{PID} = [K_I, K_P, K_D]^T$, 经计算得

$$\mathbf{g}_{\min} = \begin{bmatrix} K_{I\min} \\ K_{P\min} \\ K_{D\min} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^T \mathbf{h}_1 & \mathbf{h}_1^T \mathbf{h} & \mathbf{h}_1^T \mathbf{h}_D \\ \mathbf{h}^T \mathbf{h}_1 & \mathbf{h}^T \mathbf{h} & \mathbf{h}^T \mathbf{h}_D \\ \mathbf{h}_D^T \mathbf{h}_1 & \mathbf{h}_D^T \mathbf{h} & \mathbf{h}_D^T \mathbf{h}_D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h} \\ \mathbf{h}_D \end{bmatrix} \tag{11}$$

当只采用 P 型迭代学习控制(ILC)时, $\mathbf{H} = \mathbf{h}$, $\mathbf{g}_P = K_P$, 则

$$\mathbf{g}_P = K_P = \mathbf{h}_1 / \mathbf{h}^T \mathbf{h} \tag{12}$$

$$J_P = J_P K_{P\min} = 1 - \mathbf{h}_1^2 / \mathbf{h}^T \mathbf{h} \tag{13}$$

当采用 PI 型 ILC 时

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}]; \quad \mathbf{g}_{PI} = [K_I, K_P]^T$$

则

$$\mathbf{g}_{PI\min} = \begin{bmatrix} K_{I\min} \\ K_{P\min} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^T \mathbf{h}_1 & \mathbf{h}_1^T \mathbf{h} \\ \mathbf{h}^T \mathbf{h}_1 & \mathbf{h}^T \mathbf{h} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$J_P = 1 - \mathbf{v}_N^T \mathbf{H} \mathbf{g}_{\min} \tag{15}$$

式中: $\mathbf{v}_N$ 为系统的扰动能.

从式(12)和式(13)可以看出,当被控对象为不稳定系统时, $\mathbf{h}^T \mathbf{h}$ 会很大,使得 $J_{P\min}$ 非常接近于 1,并导致迭代学习的收敛速度很慢. 只有当 $J_{P\min}$ 接近于 0 时,才使得整个迭代学习控制系统的收敛速度较快. 因此,采用 PI 型或 PID 型的迭代学习策略,可以缓解收敛速度慢的问题,加快学习收敛速度.

2.2 系统 PID 迭代学习仿真

对系统进行迭代学习仿真,取 $\omega_n = 400$, $\xi_n = 0.15$,系统增益 $K = 40$. 以系统慢速开启控制量为例,设迭代学习过程中系统的期望运行时间 $t = 3$ s,行程为 305 mm, $t = 0 \sim 0.5$ s 时为匀加速运动, $t = 0.5 \sim 2.5$ s 时为匀速运动, $t = 2.5 \sim 3$ s 时为匀减速运动.

在慢速开启运动过程中,液压缸活塞的速度和位移分别为

$$V(t) = \begin{cases} 244t, & 0 \text{ s} < t \leq 0.5 \text{ s} \\ 122, & 0.5 \text{ s} < t \leq 2.5 \text{ s} \\ -244(t - 3), & 2.5 \text{ s} < t \leq 3 \text{ s} \end{cases}$$
$$x_s(t) = \begin{cases} 122t^2, & 0 \text{ s} < t \leq 0.5 \text{ s} \\ 122t - 30.5, & 0.5 \text{ s} < t \leq 2.5 \text{ s} \\ -122t^2 + 732t - 793, & 2.5 \text{ s} < t \leq 3 \text{ s} \end{cases}$$

设采样时间间隔为 10 ms, 采样点数为 300 个, 选取 PID 迭代学习算法中的学习因子 $K_D=0.001$, $K_P=0.5$. 设初始输入控制量为 0, 即 $u_0(i)=0, i=0, 1, 2, \dots, 300$. 经过反复的迭代学习, 实际输出逐步趋近于期望轨迹, 同时得到相应的迭代学习控制输入. 经过多次迭代学习后得到的仿真结果如图 2 所示.

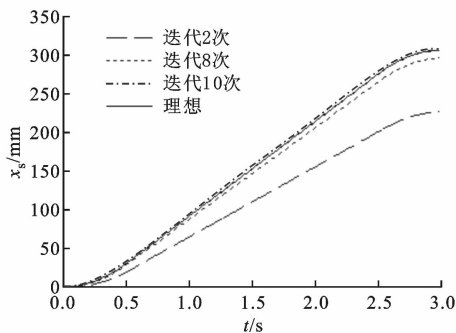


图2 慢速开启迭代学习响应的仿真曲线

由仿真结果可以看出, 当迭代次数达到 8 次后, 输出曲线已经和理想曲线非常接近了, 当迭代次数达到 10 次后, 输出曲线已经基本和理想曲线完全重合. 由此可见, 用迭代学习的方法来修正系统的输出控制量是非常有效的.

3 系统运行试验

3.1 系统的组成与功能

发射装置电液位置同步控制系统由工控机、数据采集卡、信号调理电路、伺服比例阀、位移传感器、压力传感器、液压缸、液压油源、键盘显示器和打印机组成, 工控机是系统的控制核心, 数据采集卡是连接计算机和外设的桥梁, 液压缸是控制对象, 传感器是监测元件, 键盘显示器是人机交互界面. 系统具备的功能为: ①能够按照系统要求的控制精度完成慢速运动和快速运动的控制; ②能够由用户设定速度控制曲线, 并且可以改变开启运动和关闭运动所需的时间; ③能够实现自动运动和手动控制运动的操作方式; ④能够实时观测工作部件的运动位置情况和 2 个液压缸的同步误差情况; ⑤能够对运动状态数据进行储存以便进行分析; ⑥系统具备状态检测、故障显示和报警功能; ⑦系统具备良好的可靠性, 运行稳定, 平均无故障时间大于 500 h, 待机 60 d 后可正常使用.

3.2 系统同步控制策略

电液位置同步控制系统采用的 PID 迭代学习控制原理如图 3 所示. 系统对同步误差的控制采用

模拟和数字双闭环的控制方法, 将两路位移反馈信号的差值比例调节后叠加到系统输出中形成模拟闭环回路. 同时, 将差值信号经数据采集卡 A/D 转化为数字信号输入到计算机中, 再对差值经过 PD 算法处理后叠加到系统的下一个输出控制量中, 从而形成了数字闭环回路.

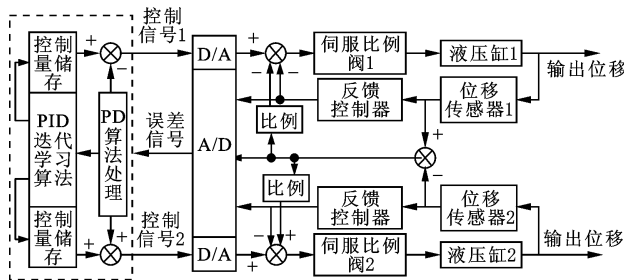


图3 系统 PID 迭代学习示意图

由于受加工精度和安装精度的制约, 2 个液压缸的固有频率和阻尼比不同, 因此在控制过程中, 2 个液压缸的同步性能既受单缸对输入信号跟踪性能的影响, 还受 2 个液压缸参数不一致性的影响, 因此控制过程中给 2 个液压缸输入的控制量应有所不同. 在初次试验运行时, 给 2 个液压缸输入同样的控制量, 在重复运行过程中, 不断对控制量进行离线迭代学习, 使其对 2 个液压缸达到最匹配的效果, 从而将系统的同步误差控制在最小范围内.

3.3 同步运行试验

经过对双缸电液同步控制系统的硬件、软件调试后, 整个系统可按照预先的设计正常运行, 在此基础上, 对系统在不同工作压力 (6、7、8、10 和 12 MPa) 下进行了试验运行.

在控制过程中, 为了改善控制效果, 在线采用 PD 算法对系统的同步误差进行调节. 其中, 比例调节能够对系统的偏差立即产生作用, 从而减少了偏差. 微分调节则反映了系统偏差信号的变化率, 具有预见性, 能预见系统偏差变化的趋势, 因此能产生超前的控制作用, 并改善了系统的动态性能. 以慢速运动控制为例, 在控制过程中分别对采用和不用 PD 算法作比较, 根据经验, 选取 $K_D=0.001$, $K_P=0.5$, 在 8 MPa 下的慢速开启同步误差曲线如图 4 所示.

从试验结果中可以看出, 对于同样的控制量, 当不加 PD 算法时, 系统开启和关闭过程的同步误差 e_s 的波动范围保持在 $-0.4 \sim 1$ mm; 当加入 PD 算法时, 相应地同步误差的波动范围保持在 $-0.3 \sim 0.7$ mm 之间. 可见, 加入 PD 算法后能够有效地缩小同步误差, 使控制精度提高了 0.1%.

3.3.1 慢速同步运动试验结果 在系统压力为 8 MPa 时,慢速同步运动的控制试验结果如图 5a~图 5b 所示. 由试验结果可知,在慢速同步运动中,系统分别在 3 s 内完成了开启和关闭动作,在开启和关闭过程中,系统的同步误差分别保持在-0.4~

0.4 mm 和-0.4~0.6 mm 的范围内,运行过程平稳可靠,同步误差被控制在±0.6 mm 内,控制精度达到了 0.2%.

3.3.2 快速同步运动试验结果 根据系统控制性能指标的要求,快速同步运动分为快速开启和慢速关闭,并分别在 0.3 s 和 3 s 内完成,关闭过程同慢速运动中的关闭过程相同. 本文分析了快速开启过程中的跟踪及同步性能,设定好初始快速开启控制量、在 8 MPa 的条件下,对控制量进行多次迭代学习修正后,得到了较好的控制结果(见图 5c). 由试验结果可知,在快速同步运动中,系统能够在 0.3 s 内完成开启动作,同步误差保持在-1.2~0 mm 的范围内,并且系统运行平稳可靠. 在运行过程中,同步误差被控制在±1.5 mm 范围内,控制精度达到了 0.5%.

4 结 论

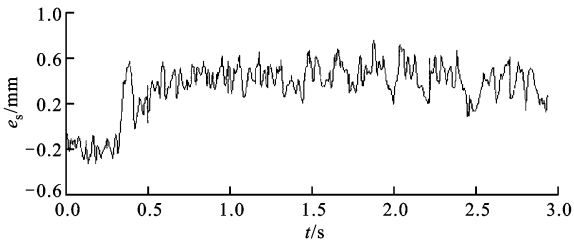
本文通过双缸电液同步控制系统的试验,验证了在线 PD 算法能够有效地减小系统运行过程中由各种不可预计的因素影响而产生的同步误差,从而提高了系统的同步精度,使系统具有较高的运算速度. 系统初始的控制信号经过多次迭代学习后,其同步误差被控制在理想的范围内,并在额定时间内完成了开启与关闭. 从试验结果中可以看出,本文采用的 PID 型学习迭代算法和双闭环控制策略具有良好的同步控制性能,为同步控制非线性时变系统提供了一个有效的途径.

参考文献:

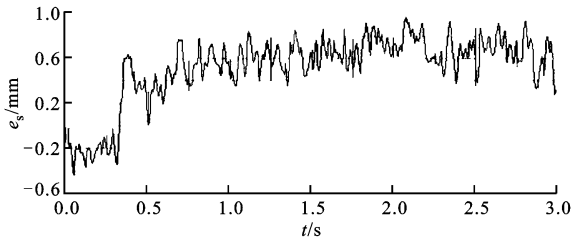
[1] 苏东海,韩国惠,于江华,等. 液压同步控制系统及其应用 [J]. 沈阳工业大学学报,2005,27(4):3-4.
SU Donghai, HAN Guohui, YU Jianghua, et al. Hydraulic synchronization control system and its application [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2005, 27(4): 3-4.

[2] 倪敬,项占琴,潘晓弘,等. 多缸同步提升电液系统建模和控制 [J]. 机械工程学报,2006,42(11):80-87.
NI Jing, XIANG Zhanqin, PAN Xiaohong, et al. Motion synchronization modeling and control for multi-cylinder electrohydraulic elevating system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11): 80-87.

[3] 祁帅,郭晓松,于传强,等. 双缸同步液压系统单神经元 PID 控制仿真研究 [J]. 流体传动与控制,2008,30(5):5-8.

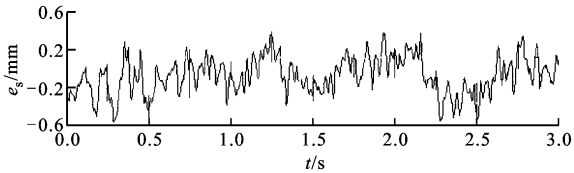


(a)无 PD 算法

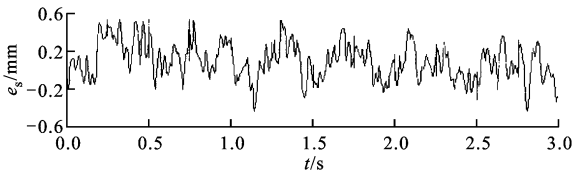


(b)有 PD 算法

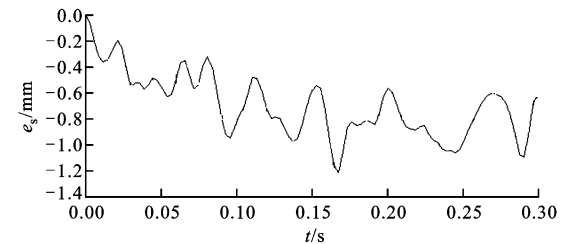
图 4 2 种算法的慢速开启同步误差曲线



(a)慢速开启同步误差



(b)慢速关闭同步误差



(c)快速开启同步误差

图 5 液压缸的同步误差曲线

- QI Shuai, GUO Xiaosong, YU Chuanqiang, et al. Simulative research of synchronization control of two hydraulic cylinder system based on single PID neuro [J]. Fluid Power Transmission and Control, 2008, 30(5): 5-8.
- [4] 凌云, 陈刚. 液压同步模糊控制系统的设计与优化 [J]. 机床与液压, 2009, 37(7): 161-163.
- LING Yun, CHEN Gang. Design and optimization of hydraulic synchronous fuzzy control system [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2009, 37(7): 161-163.
- [5] 李志峰. 电液位置伺服系统的多缸同步控制方法研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2010.
- [6] CHEN Y Q, MOORE K L. PI-type iterative learning control revisited [C]// American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 2138-2143.
- [7] YU Shaojuan, XU Ding, LI Lin, et al. Fuzzy PID-type iterative learning control for electro-hydraulic servo system [C]// Computational Aspects of social Networks Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 671-674.
- [8] 林滔. 双缸电液位置伺服同步控制系统的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- [本刊相关文献链接]**
- 大范围视觉伺服方法在空间机器人上的应用. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 85-89.
- 柔性机械臂试探前行的碰撞响应控制策略. 西安交通大学学报, 2011, 45(9): 21-27.
- 液压混合动力挖掘机回转装置控制方式的研究. 西安交通大学学报, 2011, 45(7): 30-33.
- 透平压缩机组的模糊 PID 控制与特性研究. 西安交通大学学报, 2011, 45(7): 76-81.
- 非均匀采样系统的支持向量回归建模与控制. 西安交通大学学报, 2011, 45(3): 65-69.
- 三作用多泵多马达输出转速和转矩的理论分析. 西安交通大学学报, 2011, 45(3): 81-84.

(编辑 管咏梅)