

6-2-2020

Adaptive Control for Hydraulic Servo Position System with Bounded Input

Jianfei Shi

College of Information Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

Shujuan Yi

College of Information Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Adaptive Control for Hydraulic Servo Position System with Bounded Input

Abstract

Abstract: An adaptive state feedback controller based on neural network fitting was proposed for hydraulic servo position systems containing parameter uncertainties, external disturbance and bounded input problem. *Taking the saturation characteristic into account sufficiently, the adaptive state feedback trajectory tracking controller was designed with an adaptive law to real-time adjust the disturbance parameters and the bounded hyperbolic tangent functions to promise the bounded of the control law.* Moreover, the complete stability and performance analysis were presented using Lyapunov theory. Simulation results show the effectiveness of the designed controller for the trajectory tracking in the present of actuators saturation.

Keywords

hydraulic servo position system, adaptive state feedback control, bounded input, neural network

Recommended Citation

Shi Jianfei, Yi Shujuan. Adaptive Control for Hydraulic Servo Position System with Bounded Input[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(3): 676-682.

输入有界的电液位置伺服系统的自适应控制

石建飞, 衣淑娟

(黑龙江八一农垦大学信息技术学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: 综合考虑参数不确定性、外部干扰和输入饱和非线性对电液位置伺服系统控制性能的影响, 提出一种基于人工神经网络的自适应状态反馈轨迹跟踪控制算法。该控制算法引入神经网络对系统输入饱和非线性进行在线拟合, 设计基于有界双曲正切函数的状态反馈控制器, 实现电液位置伺服系统的高精度轨迹跟踪。该方法不需要对系统非线性部分进行线性化, 而且对线性部分的控制和参数的在线估计不相关, 因此控制器具有较强的鲁棒性和工程实用性。通过构造合适的 Lyapunov 函数, 证明了闭环系统具有全局渐近稳定性, 仿真结果验证了所设计控制器的可行性和有效性。

关键词: 电液位置伺服系统; 自适应状态反馈控制; 饱和特性; 神经网络拟合

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 03-0676-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201703028

Adaptive Control for Hydraulic Servo Position System with Bounded Input

Shi Jianfei, Yi Shujuan

(College of Information Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

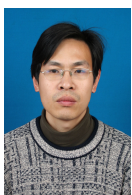
Abstract: An adaptive state feedback controller based on neural network fitting was proposed for hydraulic servo position systems containing parameter uncertainties, external disturbance and bounded input problem. Taking the saturation characteristic into account sufficiently, the adaptive state feedback trajectory tracking controller was designed with an adaptive law to real-time adjust the disturbance parameters and the bounded hyperbolic tangent functions to promise the bounded of the control law. Moreover, the complete stability and performance analysis were presented using Lyapunov theory. Simulation results show the effectiveness of the designed controller for the trajectory tracking in the present of actuators saturation.

Keywords: hydraulic servo position system; adaptive state feedback control; bounded input; neural network

引言

电液伺服系统具有精度高、响应速度快的优点, 因此在实际工程中, 采用液压缸作为执行器的电液伺服系统得到了广泛的应用^[1-2]。文献[3]通过

使用自适应滑模面和自适应增益, 得到了针对电液位置伺服系统的滑模变结构控制策略。文献[4]利用反步控制方法, 把一个自适应控制器和一个鲁棒控制器结合, 提出了一种高精度的电液位置伺服系统轨迹跟踪控制律。然而, 电液伺服系统是一种具有参数不确定性的非线性系统。因此, 采用液压缸作为执行机构的电液伺服控制系统设计面临着很多的挑战^[5]。针对电液位置伺服系统的位置跟踪控制问题, 很多学者进行了深入的研究。文献[6]针



收稿日期: 2016-04-01 修回日期: 2016-06-26;
基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAD06B01),
黑龙江八一农垦大学校内培育课题资助计划
(XZR2014-13);
作者简介: 石建飞(1975-), 男, 黑龙江大庆, 博士生,
讲师, 研究方向为新能源新技术和智能控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 676 •

对电液伺服系统轨迹跟踪控制问题设计了几种非线性控制律。文献[7]基于线性矩阵不等式, 针对具有模型参数不确定性的电液伺服系统位置跟踪控制问题, 提出了一种鲁棒 H_∞ 控制算法。

控制输入饱和作为控制系统设计过程中经常出现的现象, 同样会出现在电液位置伺服系统中。当输入达到饱和时, 液压缸的实际输入与控制器的输出不相等, 此时液压缸输出的压力和位移都无法满足控制系统要求, 从而导致控制系统性能下降, 甚至影响系统的稳定性。文献[8]基于自适应反步控制原理, 设计了一个自适应位置跟踪控制器。这篇文章的主要特点是, 通过引入一个特殊的自适应律对系统饱和和非线性和参数不确定性进行补偿, 从而得到一个修正的反步控制算法。文献[9]针对存在输入饱和及外部干扰的电液伺服系统, 设计了一种鲁棒自适应控制器。针对存在死区特性和参数不确定性的电液位置伺服系统, 文献[10]提出了一种基于反步法的自适应鲁棒死区补偿控制器。文献[11]针对存在模型不匹配和参数不确定的电液位置伺服系统, 提出了一种基于状态观测器的输出反馈非线性鲁棒控制策略。在这篇文章中, 一个推广的状态观测器和一个非线性鲁棒控制器通过反步法结合到一起。文献[12]针对一类带有输入饱和的电液位置伺服系统, 提出了一种带有多模型结构的自适应模糊控制策略。文献[13]针对存在死区特性和噪声干扰的电液位置伺服系统, 设计了一种自适应鲁棒干扰补偿控制器。

尽管上述文献对于电液位置伺服系统的控制问题均给出了可行的控制方案, 但综合考虑系统参数不确定性、外部干扰和控制输入饱和等因素的研究相对欠缺。本文综合考虑上述问题, 针对使用液压缸作为执行机构的电液位置伺服系统, 提出了基于人工神经网络的自适应状态反馈控制算法。该算法不需要对系统非线性参数进行线性化, 而是引入人工神经网络对系统输入非线性进行在线拟合, 系统线性部分的控制和非线性参数估计不相关, 因此有效减弱了模型参数不确定性、输入饱和和受限和外

部干扰对控制系统性能的不利影响。

1 电液伺服系统数学模型

1.1 模型建立

考虑输入受限的电液位置伺服系统结构如图 1 所示。

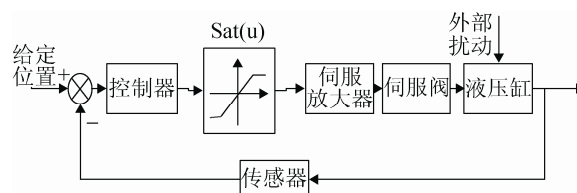


图 1 输入受限的电液位置伺服系统结构图

Fig. 1 Structure of hydraulic servo position system with input constraints

通常情况下, 图 1 所示的电液位置伺服系统的数学描述主要由伺服阀流量方程、液压缸流量连续方程和活塞的力平衡方程构成。伺服阀流量方程是典型的非线性方程, 即

$$Q_L = C_d \omega x_v(t) \sqrt{\frac{P_S - \text{sgn}(x_v(t)) P_L}{\rho}} \quad (1)$$

式中: Q_L 为负载流量; C_d 为阀口流量系数; ω 为伺服阀开口梯度; $x_v(t)$ 为伺服阀阀芯位移; P_L 为负载压力; P_S 为液压泵出口压力; ρ 为液压油密度。当把伺服阀看作一个零阶环节时, 伺服阀芯位移可以表示为:

$$x_v(t) = k_a u(t)$$

式中: k_a 为伺服放大器增益; $u(t)$ 是伺服阀控制输入信号。

液压缸的流量连续方程为

$$Q_L = A_p \dot{x}(t) + \frac{V_t}{4\beta_e} \dot{P}_L + K_{ce} P_L \quad (2)$$

式中: A_p 为液压缸活塞有效面积; V_t 为液压缸油腔总容积; β_e 为系统等效体积弹性模量; K_{ce} 为液压外泄漏系数; $x(t)$ 为油缸活塞位移。

活塞的力平衡方程为

$$A_p P_L = M_t \ddot{x}(t) + B_L \dot{x}(t) + K_S x(t) + F_f \quad (3)$$

式中: M_t 为活塞和负载的总质量; B_L 为活塞的粘性阻尼系数; K_S 为弹性刚度系数; F_f 为作用在活

塞上的外负载力。

通常情况下,电液位置伺服系统可简化的描述为式(1)~(3)。选取状态 $x_1(t) = x(t)$, $x_2(t) = \dot{x}(t)$, $x_3(t) = \ddot{x}(t)$, $x_1(t)$, $x_2(t)$ 和 $x_3(t)$ 分别代表活塞位移、速度和加速度。整理式(1)、式(2)和式(3),可得系统的状态空间表达式和输出方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) = a_1 x_1(t) + a_2 x_2(t) + a_3 x_3(t) \\ \quad + \gamma g(t)u(t) + d(t) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{式中: } a_1 = -\frac{K_S}{M_t} \beta_1, a_2 = -\frac{K_S}{M_t} - \frac{B_L}{M_t} \beta_1 - \frac{A_p^2}{M_t} \alpha_1,$$

$$a_3 = -\frac{B_L}{M_t} - \beta_1, d = -\frac{1}{M_t} \dot{F}_f - \frac{1}{M_t} \beta_1 F_f,$$

$$\gamma = \frac{A_p C_d \omega}{M_t \sqrt{\rho}} \alpha_1 k_a, g(t) = \sqrt{P_S - \text{sgn}(x_v(t)) P_L},$$

$$\alpha_1 = \frac{4\beta_e}{V_t}, \beta_1 = \alpha_1 K_{ce},$$

$d(t) \in \mathbb{R}$ 为系统外部扰动, $y(t) \in \mathbb{R}$ 为系统位置输出。

系统工作环境和温度变化时,参数 β_1 , B_L 和 K_S 是不能精确获得的。并且,在实际工程中,总容积 V_t , 总质量 M_t 和外负载力 F_f 的精确值也很难确定。因此,系统(4)中的系数 a_1 , a_2 , a_3 和 γ 都存在不确定性。并且,电液位置伺服系统中还存在控制输入饱和的问题,这种问题可以描述为:

$$\text{sat}(u(t)) = \begin{cases} u_M \text{sgn}(u(t)), |u(t)| \geq u_M \\ u(t), |u(t)| < u_M \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_M 是 $u(t)$ 的饱和限幅值。考虑到系统控制输入的饱和特性,令 $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T$, 将式(4)写成:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A(t))x(t) + B(t)\text{sat}(u(t)) + D(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $x(t) \in \mathbb{R}^3$, $u(t) \in \mathbb{R}$, $y(t) \in \mathbb{R}$ 分别代表系统状态变量,控制输入和系统输出。系统状态矩阵 A 、输入矩阵 $B(t)$ 、干扰量 $D(t)$ 和输出矩阵 C 分别表示为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 \end{bmatrix}, B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \gamma g(t) \end{bmatrix}, D(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d(t) \end{bmatrix}, \\ C = [1 \ 0 \ 0].$$

其中: $a_i, i=1,2,3$ 是系统参数的标称部分, $\Delta A(t) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为系统参数的不确定部分,可以表示为:

$$\Delta A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \Delta a_1(t) & \Delta a_2(t) & \Delta a_3(t) \end{bmatrix}$$

其中: $\Delta a_i(t), i=1,2,3$ 存在已知的上界,即 $|\Delta a_i(t)| \leq D_i$ 。这里, $D_i > 0, i=1,2,3$ 。接下来,本文将电液位置伺服系统(6)为基础,进行自适应状态反馈控制算法的设计。

1.2 问题描述

本文的主要目标:针对具有输入饱和和非线性、参数不确定性和外部扰动的电液位置伺服系统(6),设计一种抗饱和、抗干扰的人工神经网络自适应状态反馈控制器,使得闭环系统稳定并且系统输出 y 能够快速有效地跟踪参考轨迹 y_d 。

在本节的最后,给出在下节的控制器设计中将用到的双曲正切函数 $\text{Tanh}(\xi) \in \mathbb{R}$ 和双曲余弦函数 $\text{Cosh}(\xi) \in \mathbb{R}$ 的性质:

$$\text{Cosh}(\xi) \geq 1, \lim_{\xi \rightarrow 0} \frac{\xi^2}{\text{Tanh}^2(\xi)} = 1 \quad (7)$$

其中: $\xi \in \mathbb{R}$ 。

2 自适应控制器设计

在简化的数学模型(6)基础上,对液压伺服位置系统设计控制律实现在控制输入受限条件下对期望位置的轨迹跟踪。

假设 1: 期望跟踪轨迹 y_d 满足

$$|\dot{y}_d(t)| \leq \lambda_{dv}, |\ddot{y}_d(t)| \leq \lambda_{da}$$

其中: λ_{dv} 和 λ_{da} 分别为活塞运动速度和加速度的上界。

假设 2: 实际系统外部干扰 $d(t)$ 满足

$$|d(t)| \leq d_{\max}$$

其中: d_{\max} 为系统外部干扰的上界。

定义 1: 增广误差 $\sigma(t) \in R$ 为:

$$\sigma(t) = e(t) + \alpha \text{Tanh}\left(\int e(t)\right) \quad (8)$$

其中: 跟踪误差 $e(t) = y(t) - y_d(t)$; 增益 $\alpha \in R$ 为常值。对式(8)求取时间导数整理变形可得:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}(t) = & \dot{e}(t) + \alpha e(t) \text{Cosh}^{-2}\left(\int e(t)\right) + d(t) = \\ & C(A + \Delta A(t))x(t) - \dot{y}_d(t) + d(t) + \\ & \alpha e(t) \text{Cosh}^{-2}\left(\int e(t)\right) + CB(t)\tilde{u}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\tilde{u}(t)$ 为待设计的控制器。接下来, 对式(9)中需要自适应估计的部分进行线性提取。根据文献[14]的结果, 由神经网络拟合知识可知, 总存在最佳权值矩阵 $W \in R^n$, 使得下式成立

$$\dot{\sigma}(t) = W^T X + b(t)\tilde{u}(t) \quad (10)$$

其中: $b(t) = CB(t)$; X 为径向基函数。为了达到较好的仿真效果, 本文采用 RBF 径向基函数。在此基础上, 设计一个自适应状态反馈控制器如下所示:

$$\begin{aligned} \tilde{u}(t) = & -\frac{1}{b(t)}(\hat{W}^T X + K_p \text{Tanh}\left(\int e(t)\right) + \\ & K_v \text{Tanh}(\sigma(t))) \end{aligned} \quad (11)$$

其中: K_p, K_v 均为正常数。设 $\hat{W} \in R^n$ 表示 W 的动态估计, 动态估计值 \hat{W} 满足自适应律

$$\dot{\hat{W}} = X\sigma(t) \quad (12)$$

定义系统真实参数 W 与参数估计值 \hat{W} 之差为 \tilde{W} , 即

$$\tilde{W} = W - \hat{W} \quad (13)$$

根据假设 1 和假设 2, 期望轨迹 y_d 具有连续有界的一阶和二阶导数, 因此 $\|W\|$ 是有界的, 参数的自适应估计值满足下面的约束条件

$$\underline{W} \leq \hat{W} \leq \bar{W}$$

其中: \underline{W} 和 \bar{W} 分别表示参数估计值的上界和下界。再根据函数 $\text{tanh}(\cdot)$ 的性质和投影算子作用下 \hat{W} 的有界性, 可得

$$|\tilde{u}(t)| \leq |W^T X| + |K_p| + |K_v|$$

由上式可知, 本文设计的控制器 $\tilde{u}(t)$ 是有界的, 并且可以通过调节参数 K_p, K_v 以及 α 来调节 $|\tilde{u}(t)|$ 的大小。也就是说, 当执行机构出现饱和现象时, 通过神经网络机构对控制器进行补偿, 消除系统执行机构的饱和特性, 从而使跟踪误差继续减小。因此,

本文所设计的控制算法可以有效的削弱饱和受限对系统性能指标产生的不利影响。

3 稳定性分析

上一节设计的控制器(11)和参数自适应律(12)的基础上, 通过下面的定理给出本文的主要结论。

定理 1: 考虑具有输入饱和特性的电液位置伺服系统(6), 满足假设 1 和假设 2。如果系统选取控制输入式(11)和参数自适应律式(12), 并且选择适当的控制参数 K_p, K_v , 那么系统跟踪误差渐进稳定, 即: $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 。

证明: 选取 Lyapunov 函数如下

$$V(t) = \frac{1}{2} \sigma^2(t) + K_p \ln(\text{Cosh}\left(\int e(t)\right)) + \text{tr}(\tilde{W}^T \tilde{W}) \quad (14)$$

由式(7)很容易发现, 所选的 Lyapunov 函数是正定的。

接下来, 根据 Lyapunov 稳定性理论证明所设计控制器的全局稳定性。

首先, 对式(14)两边求导并代入式(10)和式(13), 整理后可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sigma(t)\dot{\sigma}(t) + K_p \text{Tanh}\left(\int e(t)\right)e(t) - \text{tr}(\tilde{W}^T \dot{\hat{W}}) = \\ & \sigma(t)(W^T X + b(t)\tilde{u}(t)) + K_p \text{Tanh}\left(\int e(t)\right)e(t) - \\ & \text{tr}(\tilde{W}^T \dot{\hat{W}}) \end{aligned} \quad (15)$$

将式(11)代入到式(15)中, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sigma(t)W^T X K_p + \text{Tanh}\left(\int e(t)\right)e(t) - \\ & \sigma(t)(\hat{W}^T X + K_p \text{Tanh}\left(\int e(t)\right)) - \\ & \sigma(t)K_v \text{Tanh}(\sigma(t)) - \text{tr}(\tilde{W}^T \dot{\hat{W}}) \end{aligned}$$

继续整理可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \text{tr}(\tilde{W}^T X \sigma(t)) - \sigma(t)K_v \text{Tanh}(\sigma(t)) - \\ & K_p \text{Tanh}\left(\int e(t)\right)\alpha \text{Tanh}\left(\int e(t)\right) - \text{tr}(\tilde{W}^T \dot{\hat{W}}) = \\ & \text{tr}(\tilde{W}^T (X \sigma(t) - \dot{\hat{W}})) - \sigma(t)K_v \text{Tanh}(\sigma(t)) - \\ & K_p \alpha \text{Tanh}^2\left(\int e(t)\right) \end{aligned} \quad (16)$$

将式(12)代入到式(16)中可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & -K_v \text{Tanh}^2(\sigma(t)) - K_p \alpha \text{Tanh}^2\left(\int e(t)\right) \leq \\ & -K_v |\sigma(t)|^2 - K_p \alpha \left|\int e(t)\right|^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

由式(17)及 Lyapunov 稳定性判据可知, 系统渐进稳定。也就是说, 本文所设计的控制算法(11)可以保证跟踪误差变量 $e(t)$ 最终收敛至原点的一个充分小的邻域内, 定理 1 得证。

说明 1: 系统跟踪的快速性依赖于系统的初始误差 $e(0)$, 与控制器的参数 K_p, K_v 有关。当初始误差值 $e(0)$ 越小, 跟踪快速性越好。同时, 可以通过增加控制器增益 K_p, K_v 来改善跟踪性能。由于参数 α 同时影响到跟踪性能, 因此在调节控制器参数时, 可以通过固定 α 调节 K_p, K_v 来获得满意的跟踪效果。

说明 2: 利用神经网络对非线性部分进行拟合, 也就是用神经网络来逼近非线性函数。本文使用的智能径向基函数(RBF)神经网络采用一种局部接受域来进行函数映射, 是由一个隐含层和一个线性输出层构成的前向网络结构。

4 仿真研究

本节将以某轧机电液位置伺服系统为应用背景, 验证当执行机构存在输入饱和现象时, 采用本文所设计的自适应状态反馈控制算法(简称为 ASFCM)的轨迹跟踪效果。采用文献[15]中所给出的液压位置伺服系统的物理参数和外部干扰力矩, 具体如下: $M_t = 1500 \text{ kg}$, $K_{ce} = 5.0 \times 10^{-16} \text{ m}^5 / (\text{N} \cdot \text{s})$, $\omega = 0.025$, $V_t = 3.768 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, $A_p = 0.1256 \text{ m}^2$, $P_s = 30 \times 10^5 \text{ Pa}$, $B_L = 2.25 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}$, $k_a = 4 \times 10^{-4} \text{ m/V}$, $C_d = 0.61$, $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$, $\beta_e = 7 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。

为了检验 ASFCM 算法的跟踪特性, 分别进行空载和带负载两种情况的仿真实验。在缸活塞没接触到轧机刚性负载前的空载情况下, $K_s = 0 \text{ N/m}$, $F_t = 0 \text{ N}$; 在带负载的情况下, $K_s = 2.5 \times 10^9 \text{ N/m}$, $F_t = 2 \times 10^6 \text{ N}$ 。把参数带到模型(4)中, 得到空载时的标称参数为: $a_1 = 0$, $a_2 = -7.8151 \times 10^6$, $a_3 = -1.5 \times 10^3$, $\gamma = 4.0683$; 同理, 得到系统在带负载情况下, 伺服系统标称参数为: $a_1 = -6.1925 \times 10^2$, $a_2 = -9.4818 \times 10^6$, $a_3 = -1.5 \times 10^3$, $\gamma = 4.0683$ 。系统参数的不确定部分按下形式给定: $\Delta a_i = a_i \times 0.08 \sin(\pi t)$, $i = 1, 2, 3$, $\Delta \gamma = \gamma \times 0.02 \sin(\pi t)$ 。

数值仿真中选取电液位置伺服系统的初始状态为: $x_0 = [0.1 \ 0 \ 0]^T$, 给定期望轨迹为正弦信号 $y_d(t) = 0.2 \sin(\pi t)$, 饱和限幅为 $u_M = \pm 10 \text{ V}$ 。接下来, 针对上述电液位置伺服系统, 对本文设计得到的控制器(11)进行仿真分析, 并与 PID 控制进行比较。仿真分别在系统外部干扰为零与系统外部干扰不为零两种工况下进行, 验证本文所设计控制器的控制性能。

4.1 无外部干扰条件下的仿真分析

在系统没有外部干扰的情况下, 采用控制器(11), 并与传统 PID 控制进行仿真比较, 仿真结果如图 2~4 所示。仿真中, 选取控制器(11)的参数在空载时为: $K_p = 40$, $K_v = 30$; 带负载时, 为: $K_p = 62$, $K_v = 48$ 。其中, 图 2 和图 3 分别为系统在空载时和带负载时的轨迹跟踪效果图。从仿真图中可以看出, 在输入力矩受限的条件下, PID 控制及本文所设计的控制器均能有效跟踪期望轨迹。相比 PID 控制器, 显然本文设计的控制器在不同负载条件下的跟踪精度更高, 跟踪误差更小。另外, PID 控制的超调量很大, 初始控制力矩也很大, 在输入饱和和情况下, 控制系统性能指标会下降。观察图 4 可知, 本文设计的控制器, 在不同负载条件下控制力矩始终维持在一定范围内, 因此控制器饱和和受限不会使控制系统的性能指标下降。

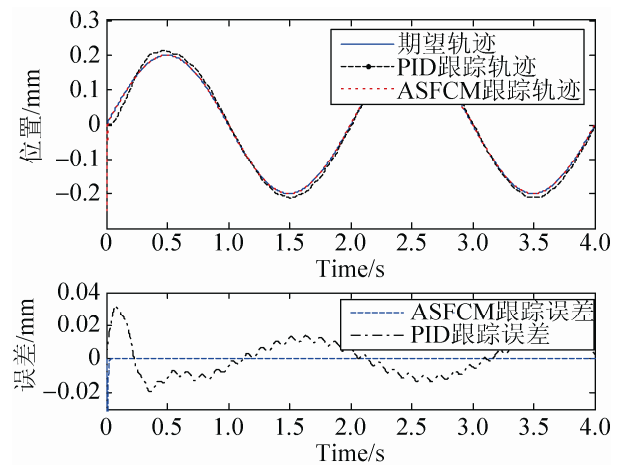


图2 无外部干扰时轨迹跟踪曲线(空载)

Fig. 2 Tracking trajectory without disturbance(no-load)

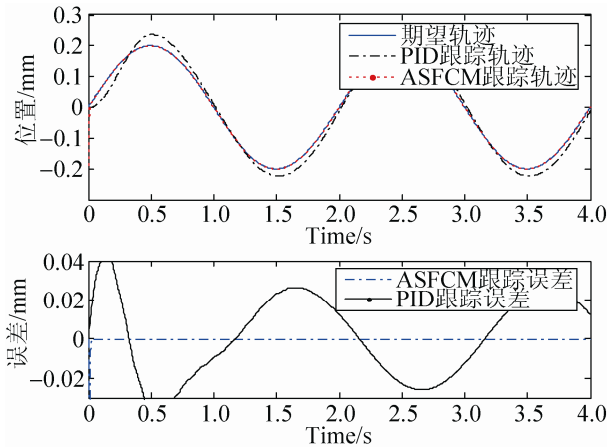


图 3 无外部干扰时轨迹跟踪曲线(带负载)

Fig. 3 Tracking trajectory without disturbance (on load)

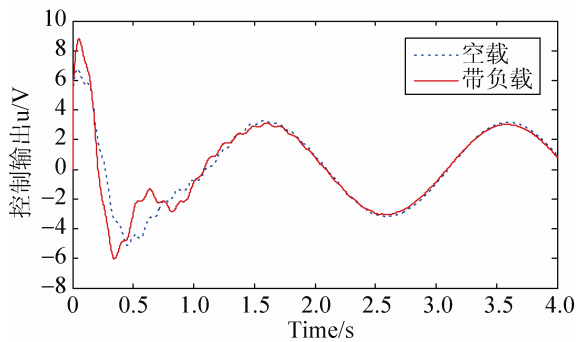


图 4 控制量曲线

Fig. 4 The curves of control input

4.2 系统存在外部干扰条件下的仿真分析

本节验证当电液位置伺服系统受到正弦干扰信号影响时, 采用本文设计的控制器(11)的跟踪性能, 同样与传统 PID 控制进行比较。仿真时, 空载和带负载时选取主要控制参数分别为 $K_p = 50$, $K_v = 35$ 和 $K_p = 70$, $K_v = 45$

设定外部扰动为 $d(t) = -2.47 + 0.5\sin(\pi t)$ 。加入外部干扰后, 系统位置轨迹跟踪仿真结果如图 5~7 所示。

类似无干扰的情况, 图 5 和图 6 分别给出了两种控制器在空载和带负载条件下对期望轨迹跟踪的效果图。图 7 则给出了控制器(11)在不同负载条件下的控制量曲线。观察仿真结果可知, 外部干扰对电液位置伺服控制系统的轨迹跟踪控制精度产生了一定的影响, 系统在控制器(11)和传统 PID 控制器的作用下, 也都能实现对期望轨迹的跟踪。但

通过图 6 可以看出, 本文设计的控制算法相对于传统 PID 控制算法来说, 具备更好的鲁棒性。在不同负载条件下, 跟踪精度都比 PID 控制器高很多。另外, 图 7 表明, 当存在外部干扰和参数不确定的情况时, 控制器(11)的幅值在饱和限幅以内。因此, 在这种工况下, 控制器(11)同样可以有效减弱饱和和受限带来的不利影响。

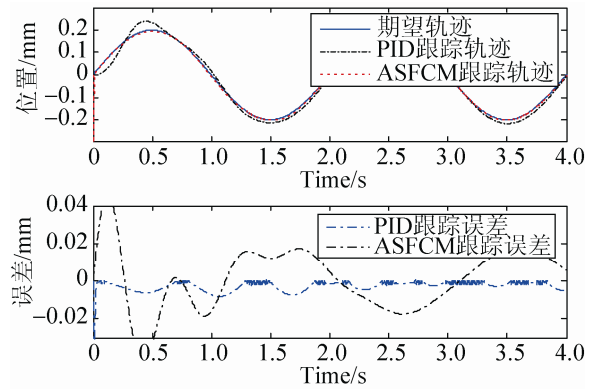


图 5 有外部干扰时轨迹跟踪曲线(空载)

Fig. 5 Tracking trajectory with external disturbance (no-load)

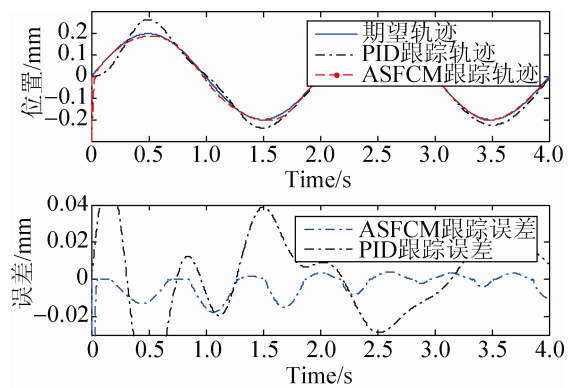


图 6 有外部干扰时轨迹跟踪曲线(带负载)

Fig. 6 Tracking trajectory with external disturbance (on load)

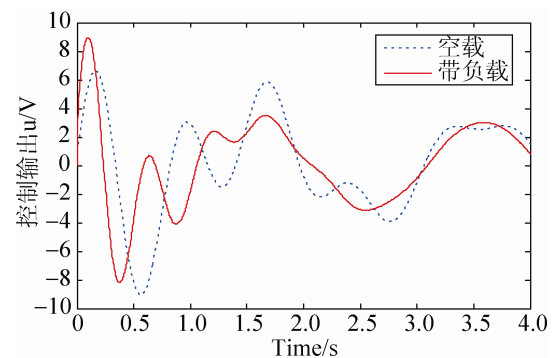


图 7 控制量曲线

Fig. 7 The curves of control input

另外, 观察图 4 和图 7 可知控制力矩 $u(t)$ 并不是收敛到零的, 而是始终保持在一定范围以内。这是因为, 实际系统需要的活塞位移是实时变化的, 则控制信号 $u(t)$ 理论上应该实时的作用于系统。因此, 使用控制器(11)实现了电液位置伺服系统自适应控制。同时, 抗饱和和环节的引入, 使得本文设计的控制器相比 PID 控制, 可以更快的退出饱和, 需要的控制力矩也更小。

5 结论

本文针对存在参数不确定性、饱和受限和外部干扰的电液位置伺服系统轨迹跟踪控制问题, 提出了基于人工神经网络的自适应状态反馈控制律。本文设计控制律的突出之处是: 1) 有效的削弱了输入饱和对系统性能指标的影响。2) 所设计控制律和参数在线估计不相关, 控制器结构比较简单, 易于实现。另外, 通过 Lyapunov 稳定性理论, 证明了控制算法的全局收敛性。仿真实例发现, 本文设计的控制器, 有很好的鲁棒性。同时, 有效的削弱了系统饱和和非线性对控制系统性能的影响。

参考文献:

- [1] Kaddissi C, Kenne J P, Saad M. Indirect adaptive control of an electrohydraulic servo system based on nonlinear backstepping [J]. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* (S1083-4435), 2011, 16(6): 1171-1177.
- [2] Ferik S E, Ayinde B O, Ibrir S, et al. Backstepping-based output feedback control of an electro-hydraulic servo system [C]// *Systems, Signals & Devices (SSD), 2015 12th International Multi-Conference on*. USA: IEEE, 2015: 1-6.
- [3] Gdoura E K, Feki M, Derbel N. Sliding mode control of a hydraulic servo system position using adaptive sliding surface and adaptive gain [J]. *International Journal of Modelling, Identification and Control* (S1746-6180), 2015, 23(3): 248-259.
- [4] Yao J, Jiao Z, Ma D, et al. High-accuracy tracking control of hydraulic rotary actuators with modeling uncertainties [J]. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* (S1083-4435), 2014, 19(2): 633-641.
- [5] Yao J, Jiao Z, Yao B. Nonlinear adaptive robust backstepping force control of hydraulic load simulator: Theory and experiments [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology* (S1738-494X), 2014, 28(4): 1499-1507.
- [6] Ursu I, Toader A, Halanay A, et al. New stabilization and tracking control laws for electrohydraulic servomechanisms [J]. *European Journal of Control* (S0947-3580), 2013, 19(1): 65-80.
- [7] Milić V, Šitum Ž, Essert M. Robust H-infinite position control synthesis of an electro-hydraulic servo system [J]. *ISA transactions* (S0019-0578), 2010, 49(4): 535-542.
- [8] Ahn K K, Nam D N C, Jin M. Adaptive backstepping control of an electrohydraulic actuator [J]. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* (S1083-4435), 2014, 19(3): 987-995.
- [9] Wen C, Zhou J, Liu Z, et al. Robust adaptive control of uncertain nonlinear systems in the presence of input saturation and external disturbance [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control* (S0018-9286), 2011, 56(7): 1672-1678.
- [10] He Y, Wang J, Hao R. Adaptive robust dead-zone compensation control of electro-hydraulic servo systems with load disturbance rejection [J]. *Journal of Systems Science and Complexity* (S1009-6124), 2015, 28(2): 341-359.
- [11] Yao J, Jiao Z, Ma D. Extended-state-observer-based output feedback nonlinear robust control of hydraulic systems with backstepping [J]. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* (S0278-0046), 2014, 61(11): 6285-6293.
- [12] Zhang M, Hu S. Fuzzy control of nonlinear systems with input saturation using multiple model structure [J]. *ICIC Express Letters* (S1881-803X), 2008, 2(2): 131-136.
- [13] Jung J, Lee D, Kim J S, et al. Adaptive robust disturbance compensating control for a servo system in the presence of both friction and deadzone [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* (S1009-6124), 2015: 54-22.(DOI: 10.1177/0954406215616422)
- [14] W Gao, R R Selmic. Neural network control of a class of nonlinear systems with actuator saturation [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks* (S1045-9227), 2006, 17(1): 147-156.
- [15] 方一鸣, 王志杰, 解云鹏, 等. 轧机液压伺服位置系统的多模型切换滑模变结构控制 [J]. *电机与控制学报*, 2010, 14(5): 12-18. (Fang Yiming, Wang Zhijie, Xie Yunpeng, et al. Sliding mode variable structure control of multi-model switching for rolling mill hydraulic servo position system [J]. *Electric Machines and Control* (S1007-449X), 2010, 14(5): 12-18.)