

基于网络的液压马达伺服位置系统 自适应鲁棒积分控制

沈 伟¹, 刘 帅¹, 武 毅²

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 中国船舶集团公司 第七〇三研究所, 哈尔滨 150000)

摘要: 针对基于网络的液压伺服控制系统面临的网络延时和阀控马达建模结构不确定性问题, 提出了基于 Pade 定理和反步推导方法合成的误差符号鲁棒积分自适应控制器。该控制器使用 Pade 定理近似处理时变网络引起的延时, 降低延时对控制系统跟踪性能的影响, 应用自适应率逼近系统结构不确定性和延时误差值, 采用误差符号控制方法补偿剩余的结构不确定性。通过构造合适的 Lyapunov 函数, 验证了闭环系统的全局稳定性, 保证闭环系统所有信号的有界性和跟踪误差渐进收敛性。仿真结果表明了该控制方法的高精度跟踪性能。

关键词: 电液伺服系统; 自适应鲁棒积分; 反步控制; 时变网络延迟; Lyapunov 函数

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

Adaptive robust integral control of hydraulic motor servo position system based on network

SHEN Wei¹, LIU Shuai¹, WU Yi²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. NO. 703 Research Institute of China State Shipbuilding Corporation Limited, Harbin 150000, China)

Abstract: For the problems of network delay and uncertainty in modeling the structure of the valve-controlled motor faced by the network-based hydraulic servo control system, a robust integral adaptive controller with error sign synthesized based on Pade's theorem and the backstepping derivation method was proposed. Pade's theorem was used by the controller to approximate the time delay caused by the time-varying network, and reduced the impact of the delay on the tracking performance of the control system. The adaptive rate was applied to approximate the structural uncertainty and delay error values of the system. The error sign control method was used to compensate for the remaining structural uncertainty. By constructing a suitable Lyapunov function, the global stability of the closed-loop system was verified, and the boundedness of all signals of the closed-loop system and the asymptotic convergence of the tracking error were guaranteed. The simulation results show the high-precision tracking performance of the control method.

收稿日期: 2020-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975376)

第一作者: 沈 伟(1984-), 男, 副教授。研究方向: 液压控制工程, 液压系统节能。E-mail: shenwei@usst.edu.cn

Keywords: *electro-hydraulic servo system; adaptive robust integration; backstepping control; time-varying network delay; Lyapunov function*

在实时反馈控制闭环回路中，传感器的采样信号通过共享网络发送到控制器，控制器接收并更新，之后控制信息通过共享网络发送到执行器，这样的新型控制系统被称为网络控制系统（NCS）。NCS拥有以下优势：a. 系统搭建成本低；b. 提高了系统的安装灵活性，易于维护；c. 突破了物理空间上的限制，有利于实现远程访问和控制等^[1-2]。这些优势使 NCS 迅速应用于机器人、远程医疗和许多其他领域^[3-4]。基于网络的液压伺服控制系统面临时变网络引起的延迟和阀控马达模型的结构和非结构不确定性等问题，这些因素不仅会降低整个系统的性能，而且会导致系统失稳。

Yi 等^[5]考虑利用 BP 神经网络预测网络的延时，但是，该方法仅适用于线性动态系统，没有考虑系统的稳定性。Pade 定理可以近似用于系统中可变的网络诱导延时的建模^[6-7]。Shen 等^[8]在液压变压器中使用网络控制，并且针对网络延时和液压变压器的非线性提出了解决方案，但是，将网络控制系统与液压系统结合的文献并不多见。麦云飞等^[9]提出的分数阶 PID(比例积分控制器)常被用来处理液压系统的复杂模型，但是，需要将液压系统中非线性项进行线性化。因此，误差符号的鲁棒积分(RISE)被提出用来补偿光滑的有界扰动，且这个方法对非结构不确定性有着极强的包容性。文献[10-11]将 RISE 用于液压系统中，控制器具有

渐近跟踪性能。

本文提出了一种新的基于 Pade 定理的自适应鲁棒积分控制器，通过反推的方法，将复杂的非线性系统逐层降阶，并由辅助误差得到虚拟控制律。仿真结果证明了该控制策略在液压系统远程控制中的可行性和优越性。

1 问题描述和数学模型

基于网络的液压伺服系统原理如图 1(a)所示，图 1(b)为系统结构原理图。 i 为输入电流信号， Q_1 ， Q_2 分别为进油腔室和出油腔室液压油流量。借助先进的控制算法，控制器可以远程精确控制带有惯性负载的阀控马达旋转位置。通过设计物理系统的状态空间方程，有利于推导出先进的控制算法。

伺服阀的流体动力学模型为非线性，负载时马达的输出流量 Q_L 与阀芯位移 x_v 的数学关系可表示为

$$Q_L = C_d w x_v \sqrt{\frac{P_s - P_L \text{sign } x_v}{\rho}} \tag{1}$$

$$\text{sign } x_v = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中： C_d 为小孔系数； w 为伺服阀的面积梯度； ρ 为油液的密度； P_s 为进油口压力； P_L 为相邻两

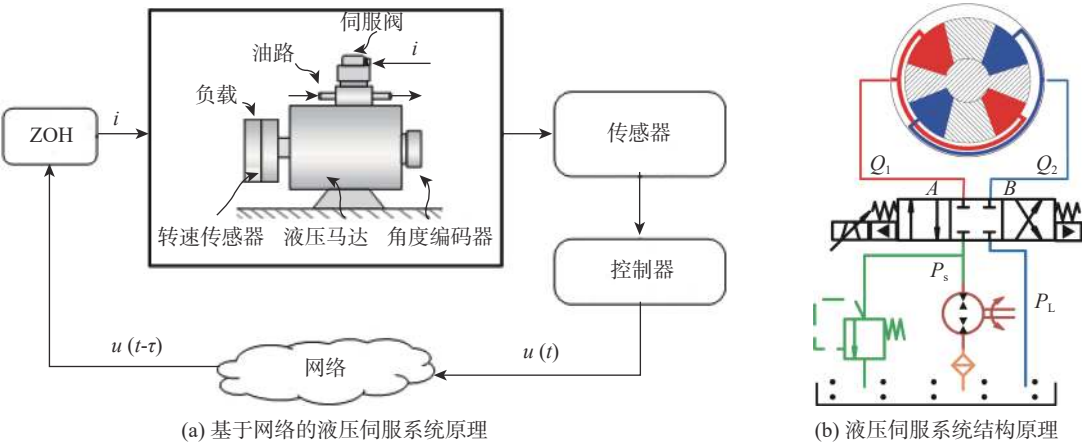


图 1 基于网络的电液伺服系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of electro-hydraulic servo system based on network

腔室压力差, $P_L = P_1 - P_2$, P_1 , P_2 分别为进油腔室和出油腔室压力。

液压旋转执行器的流动连续性方程为

$$Q_L - C_L P_L + Q(t) = D_m \dot{\theta} + \frac{V_t}{4\beta_e} \dot{P}_L \quad (3)$$

式中: D_m , V_t 分别为液压马达旋转位移和腔室总的体积; $Q(t)$, β_e 分别为时变不确定流量和油液体积模量; C_L 为总泄漏系数; $\dot{\theta}$ 为阀控马达的角速度。

根据牛顿第二定律, 可以得到力的平衡方程

$$J\ddot{\theta} = P_L D_m - B\dot{\theta} + F(t) \quad (4)$$

式中: J 表示液压马达总转动惯量; B 为粘性阻尼系数; $F(t)$ 表示外部负载随时间变化的扰动值; $\ddot{\theta}$ 为阀控马达的角加速度。

目前, 伺服阀的制造技术成熟、控制精度高。本文采用的伺服阀的工作频率远高于液压马达, 因此, 可以将伺服阀的动态特性简化为比例环节 $x_v = k_i u$, k_i 为伺服阀的动态比例系数, u 为控制电压。伺服阀的流量方程为

$$Q_L = k_t u \sqrt{P_s - P_L \text{sign } u} \quad (5)$$

$$k_t = C_d w k_i \sqrt{1/\rho} \quad (6)$$

式中: k_t 为总的流量增益。

选择状态变量

$$\mathbf{X} = (x_1 \ x_2 \ x_3)^T = \left(\theta \ \dot{\theta} \ \frac{D_m P_L}{J} \right)^T \quad (7)$$

假设外界扰动 $|d(t)| < D$, D 为未知外干扰上边界。通过将网络控制系统中的延时转变为系统中存在一个时变的输入时滞, 从而得到非线性动态系统的模型, 由式(1)~(7)可知, 基于网络的阀控马达系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b x_2 + d(t) \\ \dot{x}_3 = g(u, x_3) u(t - \tau) + f(x_2, x_3) + d_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$b = \frac{-B}{J}, d(t) = \frac{F(t)}{J},$$

$$g(u, x_3) = \frac{4D_m \beta_e k_t}{J V_t} \sqrt{P_s - \frac{J}{D_m} (\text{sign } u) x_3},$$

$$f(x_2, x_3) = -\frac{4D_m^2 \beta_e k_t}{J V_t} x_2 - \frac{4\beta_e C_L}{V_t} x_3, d_2 = \frac{4D_m \beta_e Q(t)}{J V_t}$$

式中: τ 为网络时变参数, 表示网络诱导的延时; τ 取决于网络的状态; d_2 为建模不确定项误差。

为了满足上面的阀控马达系统数学模型, 必须考虑以下假设:

a. 不考虑管道的摩擦损失、流体质量。

b. 液压回转马达的每个腔室中的压力在任何地方都是相等的。

c. 液压马达中的每处泄漏都是层流。

d. 干扰 $d(t)$ 在系统模型中是足够平滑的, 且满足 $|\dot{d}(t)| \leq \delta_1, |\ddot{d}(t)| \leq \delta_2$. δ_1, δ_2 均为已知的正数。

利用 Pade 定理来逼近系统的输入延时是可行的。因此, 有

$$\begin{aligned} \phi\{u(t - \tau)\} &= \exp(-\tau s) \phi\{u(t)\} = \\ &= \frac{\exp(-\tau s/2)}{\exp(\tau s/2)} \phi\{u(t)\} = \frac{1 - \tau s/2}{1 + \tau s/2} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\phi\{u(t)\}$ 为 $u(t)$ 的拉普拉斯变换; s 为拉普拉斯变量。

一种新的状态变量 x_4 定义为

$$\frac{1 - \tau s/2}{1 + \tau s/2} = \phi\{x_4(t)\} - \phi\{u(t)\} \quad (10)$$

经过拉普拉斯变换可以得到

$$u - \frac{\tau \dot{u}}{2} = x_4 + \frac{\tau}{2 \dot{x}_4} u - u - \frac{\tau \dot{u}}{2} \quad (11)$$

定义 $\gamma = 2/\tau$, 可得

$$\dot{x}_4 = -\frac{2}{\tau} x_4 + \frac{4}{\tau} u = -\gamma x_4 + 2\gamma u \quad (12)$$

则延时动态系统(8)可以改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b x_2 + d(t) \\ \dot{x}_3 = g(u, x_3)(x_4 - u(t)) + f(x_2, x_3) + d_2 \\ \dot{x}_4 = -\gamma x_4 + 2\gamma u(t) \end{cases} \quad (13)$$

2 自适应鲁棒积分控制器设计

控制目标是确保惯性负载能够跟踪期望的时变轨迹 x_{1d} , 为量化此目标, 定义位置跟踪误差

$$e_1 = x_1 - x_{1d} \quad (14)$$

假设理想的位置轨迹 $x_{1d} \in C_3$, 且有界。

为了简便设计过程, 首先对式(13)中前2个方程构造二次 Lyapunov 函数, 定义跟踪误差 e_2, e_3 和辅助误差 r 。

$$\begin{aligned} e_2 &= \dot{e}_1 + k_1 e_1 = x_2 - \alpha_1, \alpha_1 = \dot{x}_{1d} - k_1 e_1, \\ r &= \dot{e}_2 + k_2 e_2, e_3 = x_3 - \alpha_2 + \frac{g}{\lambda} x_4 \end{aligned} \quad (15)$$

式中: k_1, k_2 为正常数; α_1, α_2 分别为对 x_2, x_3 的虚拟控制律。

根据式(13)~(15)可求得辅助误差 r 。

$$\begin{aligned} r &= \dot{e}_2 + k_2 e_2 = e_3 + \alpha_2 - b x_2 + \\ &= d_1 - \ddot{x}_{1d} + (k_1 + k_2) \dot{e}_1 + k_1 k_2 e_1 \end{aligned} \quad (16)$$

根据 r 的静态方程式 (16), 设计虚拟控制律

$$\alpha_2 = \alpha_{2a} + \alpha_{2s1} + \alpha_{2s2}, \alpha_{2a} = \int_0^t (b\ddot{x}_{1d} + \ddot{x}_{1d})dt, \\ \alpha_{2s1} = -k_r e_2, \alpha_{2s2} = \int_0^t (-k_r k_2 e_2 - \hat{\beta} \text{sign } e_2)dt \quad (17)$$

式中: k_r 为反馈增益, $k_r > 0$; α_{2a} 为模型的前馈控制律; α_{2s} 为模型鲁棒控制律; α_{2s1} 为稳定液压系统模型的线性鲁棒反馈律; α_{2s2} 为积分鲁棒项; $\hat{\beta}$ 为 α_{2s2} 的鲁棒反馈增益。

$$\dot{\hat{\beta}} = -\phi r \text{sign } e_2 \quad (18)$$

式中, ϕ 为自适应率增益, $\phi > 0$ 。

由式 (14)~(18) 可以求得 r 的时间导数。

$$\dot{r} = \dot{e}_3 + \dot{\alpha}_2 - b\dot{x}_2 + \dot{d}_1 - \ddot{x}_{1d} + (k_1 + k_2)r + k_1^3 e_1 + (-k_1^2 - k_2^2 - k_1 k_2) e_2 \quad (19)$$

将式 (14), (16), (18) 代入式 (19), 则

$$\dot{r} = \dot{e}_3 + (-k_1^2 b + k_1^3) e_1 - \hat{\beta} \text{sign } e_2 + \dot{d}_1 + (k_1 + k_2 - b - k_r)r + (-k_1^2 - k_2^2 - k_1 k_2 + k_1 b + k_2 b) e_2 = g x_4 - g u + f(x_2, x_3) - \dot{\alpha}_2 + \tau(x_4, t) + \frac{g}{\xi} (-\xi x_4 + 2\xi u) + (-k_1^2 b + k_1^3) e_1 - \hat{\beta} \text{sign } e_2 + \dot{d}_1 + (k_1 + k_2 - b - k_r)r + (-k_1^2 - k_2^2 - k_1 k_2 + k_1 b + k_2 b) e_2 \quad (20)$$

$$\tau(x_4, t) = d_2 + \frac{g}{\xi} x_4$$

式中, $\frac{g}{\xi} x_4$ 为输入时滞引起的误差。

$\tau(x_4, t)$ 的自适应更新律

$$\dot{\hat{\tau}}(x_4, t) = -\eta(e_3 + r) \quad (21)$$

式中, η 为自适应增益, $\eta > 0$ 。

由于式 (21) 中的 $\hat{\tau}(x_4, t)$ 的不确定性, 提出如下实际控制律 u :

$$u = u_a + u_s, \quad u_a = u_{a1} + u_{a2}, \\ u_{a1} = -\frac{\dot{\alpha}_2 - f(x_2, x_3)}{g}, \quad u_{a2} = -\frac{\hat{\tau}(x_4, t)}{g}, \\ u_s = -\frac{k_3 e_3}{g} \quad (22)$$

式中: k_3 为正反馈增益; u_s 为鲁棒控制项。

根据式 (22), 式 (20) 可以改写为

$$\dot{r} = (\tau_s - \hat{\tau}_s) - k_3 e_3 + (-k_1^2 b + k_1^3) e_1 - \hat{\beta} \text{sign } e_2 + \dot{d}_1 + (k_1 + k_2 - b - k_r)r + (-k_1^2 - k_2^2 - k_1 k_2 + k_1 b + k_2 b) e_2 \quad (23)$$

另外, e_3 的动态误差导数可以表示为

$$\dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{\alpha}_2 + \frac{g}{\xi} x_4 + \frac{g}{\xi} \dot{x}_4 = (\tau_s - \hat{\tau}_s) - k_3 e_3 \quad (24)$$

3 稳定性证明

定理 在自适应律式 (18) 和式 (21) 控制下, 选择合适的反馈增益 k_1, k_2, k_3, k_r , 所提出的控制律式 (22) 能够保证系统信号 (e_1, e_2, e_3) 在闭环操作下都是有界的, 在此基础上, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 系统的位置跟踪误差 $e_1 \rightarrow 0$ 。

引理 1 设辅助函数

$$H(t) = r[\dot{d}_1 - \beta \text{sign } e_2] \quad (25)$$

选择增益 β 满足下面的条件:

$$\beta \geq \delta_1 + \frac{\delta_2}{k_2} \quad (26)$$

那么, 函数 $P(t)$ 总是正的。

$$P(t) = \beta |e_2(0)| - e_2(0) \dot{d}_1(0) - \int_0^t H(t) dt \quad (27)$$

设 $V(t)$ 为连续可微的正定函数, 定义

$$V = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} e_3^2 + \frac{1}{2} r^2 + P(t) + \frac{1}{2\chi} \tilde{\eta}^2 + \frac{1}{2\alpha} \tilde{\beta}^2 \quad (28)$$

其中, $\tilde{\beta} = \hat{\beta} - \beta, \tilde{\eta} = \hat{\eta} - \eta$ 。利用式 (15) 和式 (22), 式 (28) 的时间导数

$$\dot{V} = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + e_3 \dot{e}_3 + r \dot{r} + \dot{P} + \frac{1}{\chi} \tilde{\eta} \dot{\tilde{\eta}} + \frac{1}{\alpha} \tilde{\beta} \dot{\tilde{\beta}} = -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 + e_3 (\tau_s - \hat{\tau}_s) + r (\tau_s - \hat{\tau}_s) + r \dot{d}_1 - r \hat{\beta} \text{sign } e_2 - k_3 r e_3 + r \beta \text{sign } e_2 - r \dot{d}_1 + r^2 (-b - k_r + k_1 + k_2) + e_1 r (-k_1^2 b + k_1^3) + e_2 r (b k_1 + b k_2 - k_1^2 - k_2^2 - k_1 k_2 + 1) + \frac{1}{\chi} \tilde{\eta} \dot{\tilde{\eta}} + \frac{1}{\alpha} \tilde{\beta} \dot{\tilde{\beta}} \quad (29)$$

根据式 (18) 和式 (21), 式 (29) 可以表示为

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(\Lambda) (e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + r^2) \quad (30)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} k_1 & -1/2 & (-1/2)\sigma_1 & 0 \\ -1/2 & k_2 & (-1/2)\sigma_2 & -1/2 \\ (-1/2)\sigma_1 & (-1/2)\sigma_2 & k_4 & -k_3/2 \\ 0 & -1/2 & -k_3/2 & k_3 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_2 = b k_1 + b k_2 - k_1^2 - k_2^2 - k_1 k_2 + 1, \\ \sigma_1 = -k_1^2 b + k_1^3, \quad k_4 = -b - k_r + k_1 + k_2$$

式中, $\lambda_{\min}(\Lambda)$ 是 Λ 最小特征值, $\lambda_{\min} > 0$ 。

根据 Barbalat 定理^[12] 可得, $\lim_{t \rightarrow \infty} e_i \rightarrow 0, i = 1, 2, 3$, 即可以得到系统的位置跟踪误差是收敛的。

4 仿真实验

4.1 系统参数选取

为了验证本文提出的自适应鲁棒积分控制算

法,依据给出的阀控马达位置伺服系统的实际工况,在 Matlab/Simulink 软件中搭建系统仿真模型,设置仿真步长为 0.001 s。物理系统主要参数如表 1 所示。

表 1 液压马达伺服系统主要参数

Tab.1 Main nonnominal parameter of hydraulic motor servo system

参数	数值
$D_m/(\text{m}^3 \cdot \text{rad}^{-1})$	1.2×10^{-4}
$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.327
$B/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	40
V_t/m^3	1.15×10^{-4}
$K_t/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1/2})$	2.16×10^{-8}
β_e/Pa	1.25×10^9
$C_t/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$	2.336×10^{-12}
$Q(t)/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	6×10^{-6}
$F(t)/(\text{N} \cdot \text{m})$	$100[1 - \exp(-0.1t^3)]$

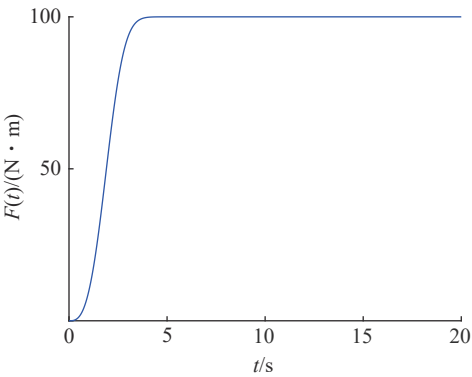


图 2 外界扰动扭矩

Fig. 2 External disturbance torque

时变范围(0.001 s < τ < 0.2 s)。Matlab/Simulink 软件的 Variable Time Delay 模块能够使延时均匀概率分布,对 2 个控制器的仿真结果进行对比,以验证所提控制方案的有效性。

a. 自适应鲁棒积分控制器。控制增益给定如下: $k_1 = 800, k_2 = 800, k_3 = 100, k_4 = 100, k_r = 900$, 控制器的自适应增益 $\eta = 0.5$ 。

b. PID。通过试错法得到控制器增益 $k_p = 900, k_i = 1\,000, k_d = 0$ 。

输入信号①为正弦平滑轨迹, $x_{1d} = 10(1 - \cos(\pi t))(1 - \exp(-t))^\circ$ 。如图 3(a)所示,将自适应鲁

4.2 比较实验结果

图 2 为外部负载随时间变化的扰动轨迹。考虑网络控制系统的诱导延时常常是不稳定的,可以将丢包认为是一种大延时状态^[13],因此,考虑

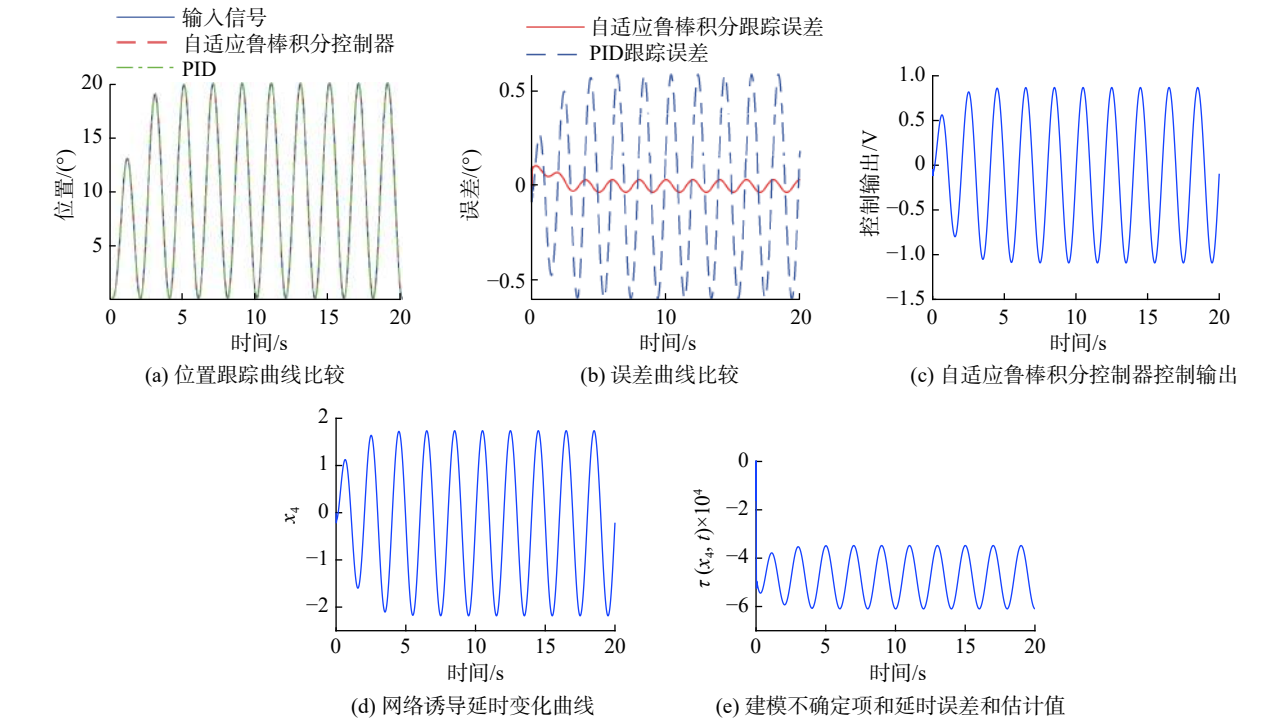


图 3 输入信号①时,扰动和网络诱导延时影响下的阀控马达响应

Fig.3 When the input signal is ①, the response of the valve-controlled motor under the influence of disturbance and network-induced delay

棒积分控制器和PID控制器跟踪曲线进行比较,自适应鲁棒积分控制器输出位置能够很好地跟踪期望轨迹。图3(b)为2种控制器的跟踪误差曲线。由表2可知,相比于PID控制器,自适应鲁棒积分控制器具有较小的跟踪误差,并且最终保持良好的稳态跟踪性能。图3(c)为自适应鲁棒积分控制器的控制信号。此外, x_4 是一个重要的参数,该参数的振动可能导致控制信号振荡,为了避免这些振荡,如图3(d)所示,必须保持稳定的延时补偿信号。图3(e)是建模不确定项和延时误差和的估计值。仿真结果表明,当网络控制系统存在时变延时, PID 的最终跟踪误差是自适应鲁棒积分控制器的4倍多,这是因为自适应鲁棒积分控制器中的Pade定理补偿了网络系统中的时变延时和自适应律补偿了液压系统中的结构不确定性。

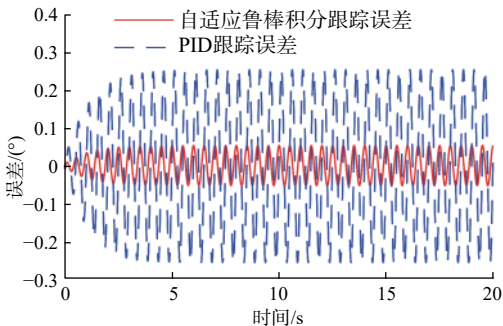
为了更加直观地展现2个控制器最终的跟踪精度, Deng等^[14]使用3个性能指标衡量设计的控制算法的质量,即跟踪误差的最大值 M_e ,平均值 μ_e 和标准差 σ_e ,由表2的指标参数可以看出,设计

表2 在输入信号①状态下整个周期的性能指标
Tab.2 Performance indicators for the entire cycle under the input signal ① state

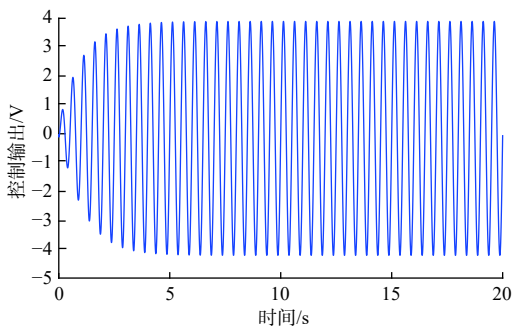
控制器	M_e	μ_e	σ_e
自适应鲁棒积分器	0.0219	0.0125	0.0051
PID	0.0736	0.0441	0.0227

的自适应鲁棒积分控制器在各个性能方面均优于PID。

输入信号②为快速运动轨迹, $x_{1d}=10(1-\cos(4\pi t))(1-\exp(-t))^{\circ}$,最大角速度为 $125.6(^{\circ})/s$ 。图4(a)给出了自适应鲁棒积分控制器和PID的跟踪误差对比, PID并不能很好地处理这种快速变化的运动,出现了 $\pm 0.27^{\circ}$ 左右的跟踪误差。图4(b)为自适应鲁棒积分控制器在快速轨迹运动时的输出信号,在整个运行过程中,自适应鲁棒积分控制器的跟踪误差控制在 $\pm 0.06^{\circ}$ 以内,对比表3的指标参数,说明本文所设计的自适应鲁棒积分控制算法在提高阀控马达跟踪精度方面具备较好的效果。



(a) 误差曲线比较



(b) 自适应鲁棒积分控制器控制输出

图4 输入信号为②时,在扰动和网络诱导延时影响下的阀控马达响应

Fig.4 When the input signal is ②, the response of the valve-controlled motor under the influence of disturbance and network-induced delay

表3 在输入信号②状态下整个周期的性能指标
Tab.3 Performance indicators for the entire cycle under the input signal ② state

控制器	M_e	μ_e	σ_e
自适应鲁棒积分器	0.0533	0.0321	0.0164
PID	0.2577	0.1536	0.0799

5 结 论

提出了一种基于网络的液压伺服系统高精度

跟踪控制算法,不仅考虑了系统的非线性不确定性,而且针对网络中的延时,利用Pade定理补偿。对状态方程反向推导,在得到的虚拟控制律中引入积分鲁棒项和自适应律,通过构造Lyapunov函数验证了闭环系统的全局稳定性,保证闭环系统所有信号的有界性和跟踪误差渐进收敛性。仿真结果验证了自适应鲁棒积分控制算法的有效性。在未来的工作中,也可以考虑建立具有丢包情况的模型,利用多层神经网络、状态观测器等来设计基于网络的液压伺服控制器。

参考文献:

- [1] ZHANG D, SHI P, WANG Q G, et al. Analysis and synthesis of networked control systems: a survey of recent advances and challenges[J]. *ISA Transactions*, 2017, 66: 376–392.
- [2] 游科友, 谢立华. 网络控制系统的最新研究综述 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(2): 101–118.
- [3] GUPTA R A, CHOW M Y. Networked control system: overview and research trends[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(7): 2527–2535.
- [4] ZHANG L X, GAO H J, KAYNAK O. Network-induced constraints in networked control systems—a survey[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(1): 403–416.
- [5] YI J Q, WANG Q, ZHAO D B, et al. BP neural network prediction-based variable-period sampling approach for networked control systems[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 185(2): 976–988.
- [6] PROBST A, MAGAÑA M E, SAWODNY O. Using a Kalman filter and a Padé approximation to estimate random time delays in a networked feedback control system[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2010, 4(11): 2263–2272.
- [7] KHANESAR M A, KAYNAK O, YIN S, et al. Adaptive indirect fuzzy sliding mode controller for networked control systems subject to time-varying network-induced time delay[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2015, 23(1): 205–214.
- [8] SHEN W, WANG J H. A robust controller design for networked hydraulic pressure control system based on CPR[J]. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2019, 12(6): 1651–1661.
- [9] 麦云飞, 童骏民. 基于分数阶控制的液压加载系统设计与仿真 [J]. *上海理工大学学报*, 2015, 37(6): 589–593.
- [10] 岳欣, 姚建勇. 基于积分鲁棒的电液负载模拟器渐近跟踪控制 [J]. *航空学报*, 2017, 38(2): 289–298.
- [11] YAO Z K, YAO J Y, SUN W C. Adaptive RISE control of hydraulic systems with multilayer neural-networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(11): 8638–8647.
- [12] SLOTINE J J E, LI W P. *Applied nonlinear control*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.
- [13] YU M, WANG L, CHU T G, et al. Stabilization of networked control systems with data packet dropout and transmission delays: continuous-time case[J]. *European Journal of Control*, 2005, 11(1): 40–49.
- [14] DENG W X, YAO J Y. Extended-state-observer-based adaptive control of electrohydraulic servomechanisms without velocity measurement[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(3): 1151–1161.

(编辑: 石 瑛)