

控制与决策

Control and Decision

不确定受扰电液伺服系统智能自学习PID控制

姚文龙, 亓冠华, 池荣虎, 邵巍

引用本文:

姚文龙, 亓冠华, 池荣虎, 邵巍. 不确定受扰电液伺服系统智能自学习PID控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(3): 654–660.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于模型信息的电静液作动器降阶线性自抗扰控制](#)

Reduced order linear active disturbance rejection control based on model information of electro–hydrostatic actuator
控制与决策. 2023, 38(3): 681–689 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1339>

[基于变速趋近律的机电伺服系统自适应滑模控制](#)

Adaptive sliding mode control of electromechanical servo system based on variable rate reaching law
控制与决策. 2022, 37(4): 1067–1073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1166>

[基于降阶扩张状态观测器的重复控制系统设计](#)

A method of designing a reduced–order–extended–observer–based repetitive–control system
控制与决策. 2022, 37(4): 933–943 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1377>

[基于数据驱动的非线性网络系统自适应迭代学习控制](#)

Data driven adaptive learning control of nonlinear network system
控制与决策. 2021, 36(6): 1523–1528 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1182>

[基于强化学习的小型无人直升机有限时间收敛控制设计](#)

Finite time control based on reinforcement learning for a small–size unmanned helicopter
控制与决策. 2020, 35(11): 2646–2652 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0328>

不确定受扰电液伺服系统智能自学习PID控制

姚文龙[†], 亓冠华, 池荣虎, 邵巍

(青岛科技大学 自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 针对具有参数不确定和外负载扰动的不确定受扰电液伺服系统, 提出一种智能自学习PID控制策略. 该方法不依赖于系统的精确模型, 是一种数据驱动的控制方法. 首先, 通过改进的动态线性化方法将非线性非仿射的电液伺服系统等效为含有时变参数项和非线性不确定项的线性仿射形式; 然后, 采用梯度估计算法和时间差分算法分别对时变参数项和非线性不确定项进行估计; 接着, 利用 iPID 控制引入附加误差信息对过度线性化丢失的信息进行补偿; 最后, 根据最优准则, 设计不确定受扰电液伺服系统的参数更新律和学习控制律. 通过理论分析和仿真实验验证所提出控制策略的收敛性, 并通过对比实验, 验证该控制方案应用于电液伺服系统的优越性和精确性. 实验结果表明, 所提出方法能够抑制非线性扰动对系统造成的不良影响, 实现理想轨迹的精确跟踪.

关键词: 电液伺服系统; 智能自学习PID控制; 时间差分估计; 梯度参数估计; 不确定受扰系统; 无模型自适应控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1001

引用格式: 姚文龙, 亓冠华, 池荣虎, 等. 不确定受扰电液伺服系统智能自学习PID控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 654-660.

Intelligent self-learning PID control of electro-hydraulic servo system with uncertain disturbances

YAO Wen-long[†], QI Guan-hua, CHI Rong-hu, SHAO Wei

(School of Automation Science and Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266100, China)

Abstract: This paper explores an intelligent self-learning PID control strategy for uncertain disturbed electro-hydraulic servo system with parameter uncertainty and external load disturbance. This method is a data-driven control strategy which is independent of the precise model of the system. Firstly, the linear affine electro-hydraulic servo system with the time-varying parameter term and nonlinear uncertainty term is devised using an improved dynamic linearization method. Then, the gradient estimation method and the time difference method are utilized to estimate the time-varying parameter term and nonlinear uncertainty term respectively. Furthermore, the lost information of over-linearization is compensated by additional error information from iPID. Finally, the parameter updating law and learning control law of the electro-hydraulic servo system are designed according to optimal criteria. The convergence of control strategy is proved by theoretical analysis and simulation experiments. And the superiority and accuracy of the method are verified by comparative experiments. The paper shows that the adverse effect of nonlinear disturbance is suppressed and the accurate tracking of ideal trajectory is realized.

Keywords: electro hydraulic servo system; model free adaptive PID control; time-difference estimator; gradient parameter estimator; uncertain disturbed system; model-free adaptive control

0 引言

电液伺服控制具有功率比重大、响应快和抗负载刚性等突出优点, 其发展关系到工业技术的发展. 电液伺服系统的控制从以PID控制为主体的经典

控制理论, 到以状态空间法为主体的现代控制理论, 再到对真实系统描述更加准确的非线性控制理论, 克服参数不确定性和外负载扰动以实现不确定受扰电液伺服系统的高精度跟踪控制是不变的目標.

收稿日期: 2021-06-08; 录用日期: 2021-12-09.

基金项目: 青岛市自主创新重大专项项目(21-1-2-14-zh); 山东省重点扶持区域引进急需紧缺人才项目(鲁发改重大办[2019]391号); 国家自然科学基金项目(61873139); 山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE071).

责任编辑: 关治洪.

[†]通讯作者. E-mail: yaowenlong@qust.edu.cn.

由于液压系统在实际工程应用中,负载质量、液压弹性模量以及伺服阀流量增益等均会随着系统运行而变化,同时存在外负载扰动、泄漏、摩擦阻尼等不能精确建模的参数,使得电液伺服系统成为存在参数不确定性和不确定扰动等非线性问题的不确定受扰系统. 不确定受扰电液伺服系统的高度非线性使得大部分依赖系统精确模型的控制方法存在建模误差、跟踪性能差和收敛性难以保证等问题,如自适应鲁棒控制(ARC)^[1-2]、自适应积分鲁棒控制^[3]、自适应反步控制^[4]和滑模控制^[5]等. 因此,设计一种所需系统模型信息少,抗干扰能力强且适合不确定受扰电液伺服系统实际应用的控制方法具有重要意义.

为解决电液伺服系统存在的参数不确定性和外负载扰动问题,实现高精度的轨迹跟踪,专家学者给出了不同的非线性控制方案. 文献[6]为解决电液伺服系统的轨迹跟踪精度问题,提出了一种改进的粒子群算法以优化比例积分导数(PID)控制器的系数. 文献[7]针对液压伺服系统存在大量未知的匹配和不匹配建模不确定性,设计了一种非线性自适应输出反馈鲁棒控制器,该方法通过反步技术合成能够处理强匹配和不匹配参数不确定性的液压闭环控制器,并利用扩展状态观测器引入非线性扰动观测器进行非线性扰动的估计. 文献[6]和文献[7]是在电液伺服系统应用最广泛的PID控制和反步控制的基础上进行改进和优化的两种控制方法. 文献[8]提出了基于扩张状态观测器的反步滑模控制方法,利用扩张状态观测器实现复合扰动的在线估计,进一步利用反步滑模控制器实现位置信号的控制. 文献[9]为提高跟踪性能,利用扩展状态观测器进行未知扰动和不确定参数的估计,进而通过输出预测方程进行实时更新. 文献[10]设计了基于未知系统动态估计器的输出反馈控制方法,该控制方法避免使用反步控制和系统的全部状态,利用输出反馈控制器实现系统输出的精确跟踪. 上述控制方法为实现未知负载扰动的补偿,均设计了扰动估计器.

虽然上述控制方法能够实现系统的精确跟踪,但是控制器设计的复杂度使得上述算法在实际应用中难以实现. PID算法以其结构简单、运行可靠、性能稳定等优点在实际工程中被广泛使用. 基于保守性假设的经典PID控制在电液伺服系统中的应用是线性控制器的设计,在非线性非仿射电液伺服系统的控制中存在跟踪滞后、收敛性差的问题. 随着智能控制算法的兴起和发展,部分学者积极探索将PID控制与智能算法相结合以处理实际过程中遇到的强非线性

性、强干扰问题. 现在iPID控制算法已在液压^[11]、电力^[12]、机械^[13]等领域得到了应用. 但是,由于iPID的采样频率过高,在很多实际应用中难以实现.

侯忠生等^[14-15]提出的基于数据驱动控制的无模型自适应控制可以仅利用受控系统在线或离线I/O数据进行控制器设计,为难以建立系统精确模型的非线性系统提供了一种新的方法. 但是,当系统外部负载扰动造成的不确定性和非线性太强时,会造成伪偏导数的动态特性难以估计. 文献[16]提出了一种iCFDL-MFA-PID(improved compact format dynamic linearization-model free adaptive-PID)控制方法,结合了MFAC(model free adaptive control)与iPID两种控制方法的优点,将只适用于非线性连续时间系统的iPID控制算法扩展至非线性非仿射离散系统,并解决了iCFDL-MFA控制算法过度线性化造成的模型信息缺失.

基于以上分析,本文提出不确定受扰电液伺服系统智能自学习PID控制方法. 首先,将非线性非仿射的电液伺服系统动态线性化为线性仿射的形式;然后,采用梯度估计法和时间差分法分别对时变参数项和不确定非线性项进行估计;接着,利用iPID控制引入附加误差信息对iCFDL-MFA控制过度线性化造成的信息丢失进行补偿;最后,根据最优准则,得到系统的参数更新律和学习控制律. 该控制方法仅利用系统的I/O信息进行控制器的设计,不需要系统的精确模型信息,克服了参数不确定性对控制器设计造成的影响. 仿真结果验证了所提出方法应用于电液伺服系统的有效性,且能够抑制系统外负载扰动对系统的不良影响,实现良好的跟踪性能.

1 电液伺服系统建模

本文针对单出杆的非线性电液伺服系统进行位置跟踪控制. 液压油流量与伺服阀阀芯位移之间的关系^[17]描述为

$$Q_1 = \begin{cases} C_\xi w x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_s - P_1|}, & x_v \geq 0; \\ C_\xi w x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_1 - P_T|}, & x_v < 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$Q_2 = \begin{cases} C_\xi w x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_2 - P_T|}, & x_v \geq 0; \\ C_\xi w x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_s - P_2|}, & x_v < 0. \end{cases} \quad (2)$$

其中: Q_1 、 Q_2 分别为液压油缸进油口和回油口流量, w 为伺服阀面积梯度, x_v 为伺服阀阀口开度大小, ρ 为液压油密度, P_1 、 P_2 分别为进油腔和回油腔的压力, P_s 为油泵压力, P_T 为回油压力, C_ξ 为伺服阀流量系

数.

液压油缸流量连续方程^[17]为

$$Q_1 = A_1 \frac{dx_1}{dt} + C_t P_1 + C_{ip}(P_1 + P_2) + \frac{V_{10} + A_1 x_1}{\beta_e} \cdot \frac{dP_1}{dt}, \quad (3)$$

$$Q_2 = A_2 \frac{dx_1}{dt} + C_t P_2 + C_{ip}(P_1 - P_2) + \frac{V_{20} + A_2 x_1}{\beta_e} \cdot \frac{dP_2}{dt}. \quad (4)$$

其中: x_1 为液压油缸活塞杆位移量, C_t 为液压缸外泄露系数, C_{ip} 为液压缸内泄露系数, V_{10} 、 V_{20} 分别为液压缸有杆腔和无杆腔的初始容积, β_e 为液压油等效体积弹性模量, A_1 为液压油缸有杆腔活塞作用面积, A_2 为液压油缸无杆腔活塞作用面积.

系统的力平衡方程^[18]为

$$A_1 P_1 - A_2 P_2 - K_l x_1 - B_c \frac{dx_1}{dt} - F = M_t \frac{d^2 x_1}{dt^2}. \quad (5)$$

其中: M_t 为折算到柱塞上的总负载质量, K_l 为负载弹性刚度系数, B_c 为活塞的粘性阻尼系数, F 为外负载力.

伺服阀输入电压与阀芯位移的关系可等效为比例环节^[19], 即

$$k_v = \frac{x_v}{u}. \quad (6)$$

其中: k_v 为比例增益系数, u 为伺服阀输入电压.

令 $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, $x_3 = \ddot{x}$. 其中: x_2 为液压缸活塞杆速度, x_3 为液压缸活塞杆加速度. 联立式(6)得到电液伺服系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \dot{x}_3 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 g(x_v) u(t) + d, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{4\beta_e C_t K_l}{M_t V_t}, \\ a_2 &= -\frac{K_l}{M_t} - \frac{4\beta_e}{M_t V_t} \cdot (A_1^2 + C_t B_c), \\ a_3 &= -\frac{B_c}{M_t} - \frac{4\beta_e C_t}{V_t}, \\ a_4 &= \frac{M_t V_t \sqrt{\rho}}{4A_p \beta_e C_\xi w k_v}, \\ g(x_v) &= \sqrt{P_s - P_T \text{sign}(x_v)}, \\ d &= -\frac{1}{M_t} \left(\dot{F} - F \cdot \frac{4\beta_e C_t}{V_t} \right). \end{aligned}$$

在系统运行过程中, 负载质量 M_t 、液压弹性模量 β_e 、伺服阀面积梯度 w 、粘性摩擦系数 B_c 等都会随着工作状态、温度和设备磨损的变化而变化. 系统方程

中的参数均为系统额定负载时的标准值, 实际系统中 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 均是未知时变的, 并将系统的外负载扰动、未建模动态、可分离参数均归至 d 中.

2 控制器设计

所提出控制器的控制目标是在给定期望的输出轨迹 $y^*(k)$, $k \in \{0, 1, \dots, K\}$ 条件下 (K 为采样时间), 找到合适的控制输入 $u(k)$, 使得跟踪误差 $e(k+1) = y^*(k+1) - y(k+1)$ 在 k 趋于无穷时收敛至 0. 取采样周期为 h , 采用前向差分法, 得到如下差分公式:

$$x_2(k) = \frac{x_1(k+1) - x_1(k)}{h}, \quad (8)$$

$$x_3(k) = \frac{x_1(k+2) - 2x_1(k+1) + x_1(k)}{h^2}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{x_3(k+1) - x_3(k)}{h} = \\ a_1 x_1(k) + a_2 x_2(k) + a_3 x_3(k) + a_4 g(x_v) u(k) + d, \end{aligned} \quad (10)$$

$$y(k) = x_1(k). \quad (11)$$

将式(11)整理为离散时间非线性系统, 有

$$\begin{aligned} y(k+1) &= b_1 y(k) + b_2 y(k-1) + \\ & b_3 y(k-2) + b_4 u(k) + b_5 d(k). \end{aligned} \quad (12)$$

其中: $b_1 = 3 + a_3 h$, $b_2 = -(3 + 2a_3 h - a_2 h^2)$, $b_3 = 1 + a_3 h - a_2 h^2 + a_1 h^3$, $b_4 = a_4 h^3 g(x_v)$, $b_5 = h^3$.

将离散时间非线性系统整理为如下标准形式^[20]:

$$\begin{aligned} y(k+1) &= \\ & f(y(k), y(k-1), y(k-2), u(k), d(k)). \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $u(k) \in R$, $y(k) \in R$ 分别为 k 时刻系统的输入和输出, $k \in \{0, 1, \dots, K\}$; $f(\cdot)$ 为系统未知的非线性函数; $d(k)$ 包含 k 时刻系统未知负载扰动、未建模动态、可分离参数等, $|d(k)| < b_d$, b_d 为正常数.

2.1 改进的动态线性化

假设1 除有限时刻外, $f(\cdot)$ 关于控制输入信号 $u(k)$ 的偏导数存在连续且有界.

假设2 除有限时刻外, 系统满足广义 Lipschitz 条件, 即对于任意时刻 $k_1 \neq k_2$, $u(k_1) \neq u(k_2)$ 和 $d(k_1) \neq d(k_2)$, 有

$$\begin{aligned} |y(k+1) - y(k)| \leq \\ p_1 |u(k) - u(k-1)| + p_2 |d(k) - d(k-1)|, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $p_1 > 0$, $p_2 > 0$ 为常数.

定理1 对于满足假设1和假设2的非线性系统(13), 若满足假设1和假设2, 则当 $|\Delta u(k)| \neq 0$ 时, 一定存在时变参数 $\theta(k)$, 使得^[21]

$$\Delta y(k+1) = \theta(k) \Delta u(k) + \xi(k). \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) &= y(k+1) - y(k), \\ \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1). \end{aligned}$$

证明 由系统(13),有

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) &= y(k+1) - y(k) = \\ &f(y(k), y(k-1), y(k-2), u(k), d(k)) - \\ &f(y(k), y(k-1), y(k-2), u(k-1), \\ &d(k-1)) + f(y(k), y(k-1), y(k-2), \\ &u(k-1), d(k-1)) - f(y(k-1), \\ &y(k-2), y(k-3), u(k-1), d(k-1)) = \\ &\frac{\partial f^*}{\partial u(k)} \Delta u(k) + \xi(k). \end{aligned} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} F(k) &= f(y(k), y(k-1), y(k-2), u(k)) - \\ &f(y(k), y(k-1), y(k-2), u(k-1)). \end{aligned} \quad (17)$$

令 $\theta(k) = \frac{\partial f^*}{\partial u(k)}$, $\Delta d(k) = d(k) - d(k-1)$, $\xi(k) = \Delta d(k) + F(k)$. 故得到如下数据模型:

$$\Delta y(k+1) = \theta(k) \Delta u(k) + \xi(k). \quad (18)$$

由此定理1得证. □

注1 在实际应用中,这些强加于受控系统的假设是合理和可接受的. 假设1是一般非线性系统进行控制系统设计的典型条件;假设2限制了由控制输入的变化所驱动的系统输出的变化速率.

注2 在动态线性化过程中, $\xi(k)$ 是需要进一步表示为线性关系(24),且基于紧格式动态线性化的非线性项 $|\xi(k)| < \bar{b}_\xi$ 是有界的, \bar{b}_ξ 为 $|\xi(k)|$ 的上界, $\bar{b}_\xi > 0$ 为正常数.

2.2 iPID-MFAC控制器设计

根据等价反馈原理,由式(15),得到

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + \frac{\rho}{\lambda + \theta(k)} \times \\ &[y^*(k+1) - y(k) - \xi(k)]. \end{aligned} \quad (19)$$

其中: $\rho \in (0, 1]$ 为步长因子, $\lambda > 0$ 为权重因子.

与iPID^[22]相似,为提高控制器的鲁棒性,加入误差反馈项,得到如下控制算法:

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + \frac{\rho(y^*(k+1) - y(k) - \xi(k))}{\lambda + \theta(k)} + \\ &k_p(e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + \\ &k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)). \end{aligned} \quad (20)$$

其中: $\theta(k)$ 和 $\xi(k)$ 是未知的,因此需要设计估计算法进行估计; k_p 、 k_i 和 k_d 分别为PID比例系数、积分系数、微分系数.

为估计 $\theta(k)$,给出如下控制准则函数:

$$\begin{aligned} J[\theta(k)] &= |\Delta y(k) - \xi(k-1) - \theta(k) \Delta u(k-1)|^2 + \\ &\mu |\theta(k) - \hat{\theta}(k-1)|^2. \end{aligned} \quad (21)$$

其中: $\hat{\theta}(k)$ 为 $\theta(k)$ 的估计, $\mu > 0$ 为权重因子.

将式(18)代入(21),对 $\theta(k)$ 求极值,得到伪偏导数的估计算法为

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + \frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + |\Delta u(k-1)|} [\Delta y(k) - \\ &\xi(k-1) - \hat{\theta}(k-1) \Delta u(k-1)], \end{aligned} \quad (22)$$

其中 $\eta \in (0, 2)$ 为步长因子. 为使控制算法更加通用和灵活,给出如下重置算法:若 $|\hat{\theta}(k)| \leq \varepsilon$ 或 $|\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon$ 或 $\text{sign}(\hat{\theta}(k)) \neq \text{sign}(\hat{\theta}(1))$,则有

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(1). \quad (23)$$

$\xi(k)$ 的估计算法采用先前的I/O信息, $\hat{\xi}(k)$ 可描述为

$$\begin{aligned} \hat{\xi}(k) &= \xi(k-1) = \\ &y(k) - y(k-1) - \hat{\theta}(k-1) \Delta u(k-1). \end{aligned} \quad (24)$$

注3 在构造控制准则函数估计时变参量的 $\theta(k)$ 的过程中,本文基于伪偏导数(pseudo partial derivative, PPD)的概念,采用改进的投影算法对控制准则函数(21)求极值,相较于采用一阶Taylor展开忽略高阶余项,该方法具有精确等价性.

注4 $\theta(k)$ 与 $\xi(k)$ 的估计方法不同,分别采用梯度估计算法(22)和时间差分算法(24).

所设计的基于紧格式动态线性化的智能自学习PID控制律组成^[23]如下:

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + \frac{\rho(y^*(k+1) - y(k) - \hat{\xi}(k))}{\lambda + \hat{\theta}(k)} + \\ &k_p(e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + \\ &k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)). \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + \frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + |\Delta u(k-1)|} [\Delta y(k) - \\ &\hat{\xi}(k-1) - \hat{\theta}(k-1) \Delta u(k-1)]. \end{aligned} \quad (26)$$

若 $|\hat{\theta}(k)| \leq \varepsilon$ 或 $|\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon$ 或 $\text{sign}(\hat{\theta}(k)) \neq \text{sign}(\hat{\theta}(1))$,则有

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(1), \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \hat{\xi}(k) &= \xi(k-1) = \\ &y(k) - y(k-1) - \hat{\theta}(k-1) \Delta u(k-1). \end{aligned} \quad (28)$$

3 收敛性分析

引理1^[24] $A_1 \in C^{n \times n}$, a_1, a_2, \dots, a_n 为矩阵 A_1 的特征值. A_1 的谱半径 $s(A_1) = \max_j |a_j|, j \in \{1, 2, \dots, n\}$.

引理2^[25] $A_2 \in C^{n \times n}$,若存在一个很小的常数

$\sigma > 0$, 则矩阵范数 $\| \cdot \|_v$ 满足 $\|A_2\| \leq s(A_2) + \sigma$.

不确定受扰电液伺服系统的智能自学习PID控制方法的收敛性由如下定理保证.

定理2 被控系统(13)在满足假设1和假设2的情况下,采用所提出的基于紧格式局部线性化的智能自学习PID控制方案(25)~(28),可以保证:1) $\hat{\theta}(k)$ 是有界的;2)当控制器参数满足以下条件时,跟踪误差 $e(k+1)$ 可收敛至一个很小的界:

$$0 < |\bar{b}_{\hat{\theta}}(k_p + k_i + k_d)| < 1, 0 < \bar{b}_{\hat{\theta}} < 1.$$

注5 智能自学习PID控制算法的伪偏导数 $\theta(k)$ 和跟踪误差 $e(k+1)$ 的收敛性已在文献[16]中被证明,本文不再赘述,系统的稳定性证明详见文献[15].

4 仿真分析

为验证所提出控制方案的跟踪效果,在Matlab/Simulink仿真环境下建立了阀控非对称缸的液压伺服系统,仿真初始参数如表1所示.为验证不确定受扰电液伺服系统智能自学习PID控制算法的优越性,将本文控制方法分别与iCFDL-MFAC、PID、iPID、自适应控制(APC)算法^[18]进行比较,仿真过程中考虑了参数时变,外负载扰动等对系统的影响.

表1 电液伺服系统参数

参数	数值	参数	数值
β_e / Pa	6.5×10^8	$B_c / (\text{N} \cdot \text{s} / \text{m})$	10^6
C_ξ	0.61	A_1 / m^2	10^{-3}
$\rho / (\text{kg} / \text{m}^3)$	850	A_2 / m^2	5×10^{-4}
M_t / kg	100	$C_t / (\text{m}^5 / (\text{N} \cdot \text{s}))$	5×10^{-16}
k_v	1.65×10^{-3}	F / N	1.4×10^6
w / m	0.0025	$K_l / (\text{N} / \text{m})$	2.5×10^{-9}
P_s / Pa	2×10^7	P_T / Pa	0

在iPID-MFAC算法中,首先考虑期望信号为 $y^* = 0.5 \times \sin(3 \times \pi \times h)$, 扰动信号为 $d(k) = 2 \times 10^6 \times \sin(\pi \times h)$, 仿真参数选择为 $\eta = 0.99, \mu = 0.99, \rho = 0.93, \lambda = 0.0001, \beta = 0.61, k_p = 0.9, k_i = 0.00001, k_d = 1$. 采样时间为 $h = 0.0001$. iCFDL-MFA控制算法中 η, ρ, μ, λ 的取值与iPID-MFAC控制算法相同. PID控制算法中, $k_p = 8000, k_i = 0.3, k_d = 0$, 且采样时间为 $h = 0.00001$.

为验证所提出控制算法的有效性和可靠性,将所提出控制算法与传统的iCFDL-MFAC以及在工程实践中广泛应用的PID控制进行仿真对比,仿真结果如图1和图2所示.在仿真过程中,系统跟踪参考信号与初始状态完全相同,3种算法的位置跟踪对比如图1所示,跟踪误差对比如图2所示.其中:横轴为仿真运行时间,纵轴为系统控制参量.由图1可见:基于PID控制的电液伺服系统,输出信号有一定的滞后效应,且跟踪误差难以收敛;基于iCFDL-MFAC的电液伺

服系统,输出信号难以对期望信号进行有效跟踪,且跟踪误差有较大的振荡;所提出控制算法优于以上两种控制方法,能够实现精确跟踪.由图2可见:所提出控制算法相较于其他两种算法跟踪误差小,跟踪误差能够在 $[-0.015, 0.01]$ 范围内收敛.

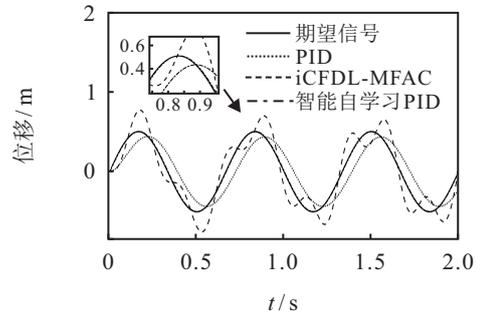


图1 与PID、iCFDL-MFAC的输出位移跟踪曲线对比

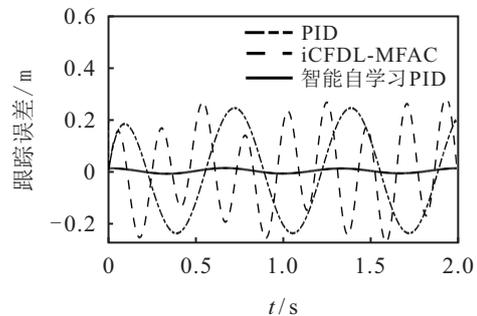


图2 与PID、iCFDL-MFAC的跟踪误差曲线对比

为进一步验证所提出控制算法的优越性和先进性,将本文控制算法分别与iPID控制算法、自适应控制(APC)算法进行比较,仿真结果如图3~图6所示.在仿真过程中,系统跟踪参考信号与初始状态完全

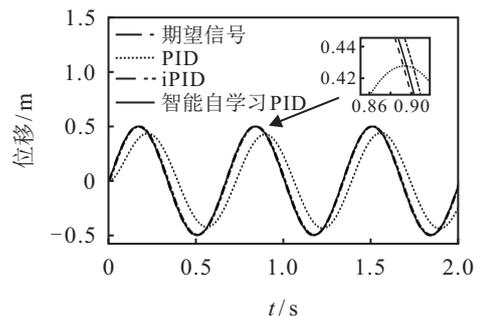


图3 与PID、iPID的输出位移跟踪曲线对比

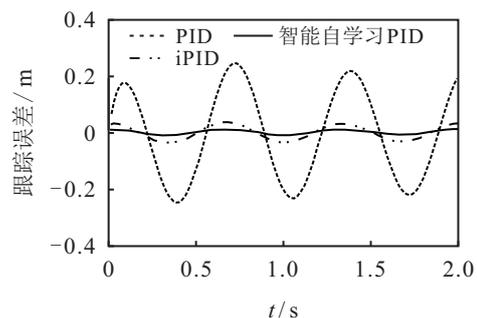


图4 与PID、iPID的跟踪误差曲线对比

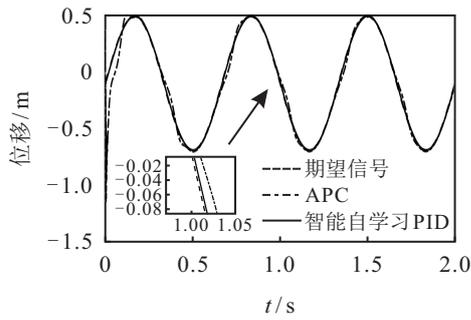


图5 与APC的输出位移跟踪曲线对比

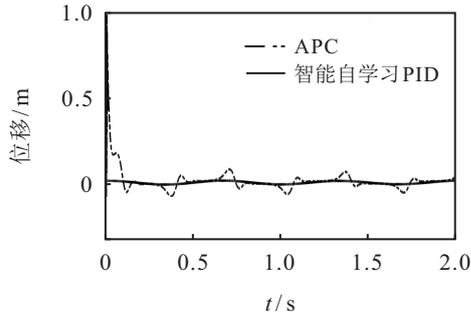


图6 与APC的跟踪误差曲线对比

相同,横轴为仿真运行时间,纵轴为系统控制参量.其中,图3和图4分别为电液伺服系统智能自适应PID控制方法与PID、iPID控制算法的位移跟踪曲线和跟踪误差对比曲线.由图3可见,iPID控制算法相比传统的PID控制算法,解决了跟踪曲线存在的滞后问题,但相较于所提出控制算法,其跟踪误差仍然较大.图5和图6分别为所提出控制算法与APC算法的位移跟踪曲线和跟踪误差对比曲线.仿真结果表明,自适应控制算法在仿真0.2s之前难以有效跟踪期望信号,且在跟踪过程中存在振荡.由此可见,智能自适应PID控制算法应用于非线性非仿射电液伺服系统具有更强的抗干扰能力.

5 结论

本文针对具有参数不确定和不确定性非线性的电液伺服系统提出了不确定受扰电液伺服系统智能自学习PID控制算法,并通过理论分析和仿真实验验证了控制器的收敛性.首先,通过改进的动态线性化方法将非线性非仿射的电液伺服系统等效为含有时变参数项和非线性不确定项的线性仿射形式;然后,采用梯度估计算法和时间差分算法分别对时变参数项和不确定非线性项进行估计;接着,利用iPID控制引入附加误差信息对iCFDL-MFAC过度线性化造成的信息丢失进行补偿;最后,通过最优准则函数,得到系统的参数更新律和学习控制律.通过对比仿真实验,验证了所提出控制方案应用于不确定受扰电液伺服系统的有效性.当系统存在参数时变和外负载扰动时,所提出控制方法能够有效利用输入输出信息克

服不确定性,抑制非线性扰动对系统稳定性造成的影响,提高系统的鲁棒性和控制效果,实现系统输出的精确跟踪.另外,所提出方法计算负担小、可靠性高,针对非线性程度高、参数不确定性强、外负载扰动大的电液伺服系统具有很好的工程实践意义.

参考文献(References)

- [1] 成旭华, 姚建勇, 乐贵高. 电液伺服系统多模型鲁棒自适应控制[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 156-162.
(Cheng X H, Yao J Y, Le G G. Multiple model robust adaptive control of electro-hydraulic servo systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 156-162.)
- [2] Yao B, Al-Majed M, Tomizuka M. High-performance robust motion control of machine tools: An adaptive robust control approach and comparative experiments[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1997, 2(2): 63-76.
- [3] Yao J Y, Jiao Z X, Ma D W, et al. High-accuracy tracking control of hydraulic rotary actuators with modeling uncertainties[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(2): 633-641.
- [4] Guo Q, Sun P, Yin J M, et al. Parametric adaptive estimation and backstepping control of electro-hydraulic actuator with decayed memory filter[J]. ISA Transactions, 2016, 62: 202-214.
- [5] Igumnov L A, Metrikin V S. On the effect of correcting the electro-hydraulic servo drive on the dynamic characteristics of the «servo rive-mass» system of an airplane[J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(11): 640-644.
- [6] Feng H, Ma W, Yin C B, et al. Trajectory control of electro-hydraulic position servo system using improved PSO-PID controller[J]. Automation in Construction, 2021, 127: 103722.
- [7] Gomaa H A H, Li Y Y. A novel optimized hybrid fuzzy logic intelligent PID controller for an interconnected multi-area power system with physical constraints and boiler dynamics[J]. ISA Transactions, 2017, 71: 364-379.
- [8] 张震阳, 汪成文, 郭新平, 等. 基于ESO的电液位置伺服系统反步滑模控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 49(05): 771-784.
(Zhang Z Y, Wang C W, Guo X P, et al. Backstepping sliding mode control of electro hydraulic position servo system based on ESO[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 49(05): 771-784.)
- [9] Gu W W, Yao J Y, Yao Z K, et al. Output feedback model predictive control of hydraulic systems with disturbances compensation[J]. ISA Transactions, 2019, 88: 216-224.

- [10] 那靖, 董宇, 丁海港, 等. 含执行机构未知动态的液压伺服系统输出反馈控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1077-1084.
(Na J, Dong Y, Ding H G, et al. Output feedback control for hydraulic servo systems with unknown actuator dynamics[J]. Control and Decision, 2020, 35(5): 1077-1084.)
- [11] 李明泽. 智能模糊控制精密液压伺服系统[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
(Li M Z. Intelligent fuzzy control precision hydraulic servo system[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.)
- [12] Du H, Shi J J, Chen J D, et al. High-gain observer-based integral sliding mode tracking control for heavy vehicle electro-hydraulic servo steering systems[J]. Mechatronics, 2021, 74: 102484.
- [13] Gomaa H A H, Li Y Y. A novel optimized hybrid fuzzy logic intelligent PID controller for an interconnected multi-area power system with physical constraints and boiler dynamics[J]. ISA Transactions, 2017, 71: 364-379.
- [14] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 650-667.
(Hou Z S, Xu J X. On data-driven control theory: The state of the art and perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 650-667.)
- [15] 侯忠生, 金尚泰. 无模型自适应控制: 理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 54-67.
(Hou Z S, Jin S T. Model free adaptive control: Theory and applications[M]. Beijing: Science Press, 2013: 54-67.)
- [16] Zhang S H, Chi R H. Model-free adaptive PID control for nonlinear discrete-time systems[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, 42(10): 1797-1807.
- [17] Wang Y F, Zhao J Y, Ding H G, et al. Output feedback control of electro-hydraulic asymmetric cylinder system with disturbances rejection[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(3): 1839-1859.
- [18] 焦宗夏, 姚建勇. 电液伺服系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 110-153.
(Jiao Z X, Yao J Y. Electro-hydraulic servo nonlinear control[M]. Beijing: Science Press, 2016: 110-153.)
- [19] Milić V, Situm Z, Essert M. Robust H_∞ position control synthesis of an electro-hydraulic servo system[J]. ISA Transactions, 2010, 49(4): 535-542.
- [20] 卜旭辉, 侯忠生, 金尚泰. 扰动抑制无模型自适应控制的鲁棒性分析[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(3): 358-362.
(Bu X H, Hou Z S, Jin S T. The robustness of model-free adaptive control with disturbance suppression[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(3): 358-362.)
- [21] 惠宇, 池荣虎. 基于迭代扩张状态观测器的数据驱动最优迭代学习控制[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 1672-1679.
(Hui Y, Chi R H. Iterative extended state observer based data driven optimal iterative learning control[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(11): 1672-1679.)
- [22] Yu C Y, Wu J L. Intelligent PID control for two-wheeled inverted pendulums[C]. International Conference on System Science and Engineering. Taiwan, 2016.
- [23] 张淑华. 局部线性化及智能自学习控制方法设计与分析[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.
(Zhang S H. Design and analysis of local linearization and intelligent self-learning control methods[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2020.)
- [24] 徐仲, 张凯院, 陆全, 等. 矩阵论简明教程[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 2014.
(Xu Z, Zhang K Y, Lu Q, et al. The theory of Matrices[M]. The 3rd edition. Beijing: Science Press, 2014.)
- [25] 黄琳. 系统与控制理论中的线性代数[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 97-143.
(Huang L. Linear algebra system and control theory[M]. Beijing: Science Press, 1984: 97-143.)

作者简介

姚文龙(1981—), 男, 副教授, 博士生, 从事数据驱动控制、自适应控制等研究, E-mail: yaowenlong@qust.edu.cn;

亓冠华(1996—), 女, 硕士生, 从事电液伺服控制、数据驱动控制、自适应控制等研究, E-mail: qiguanhua2016@163.com;

池荣虎(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 从事数据驱动控制、自适应控制、学习控制、智能交通等研究, E-mail: rhchi@163.com;

邵巍(1980—), 男, 教授, 博士生, 从事数据驱动控制、自适应控制、学习控制等研究, E-mail: shaowei_qd@126.com.

(责任编辑: 魏冰)