

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2024.10.015

基于互联与阻尼分配框架的电液伺服系统轨迹跟踪策略*

聂楸晓¹, 陈 剑², 龚俊杰¹, 吴晓暄¹, 龙 雨^{1*}

(1. 广西大学 机械工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 浙江大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:在中大型挖掘机电液伺服系统中存在复杂耦合非线性、模型不确定性,以及外部载荷不确定性等因素,都会造成挖掘机轨迹跟踪误差大,导致电液伺服系统的动态性能差。针对这一问题,提出了一种基于互联和阻尼分配(IDA)框架的反演控制器,以提高挖掘机工作装置在挖掘任务中的跟踪性能,并加强其鲁棒性。首先,利用先导阀、阀控非对称缸和阀控非对称缸模型构建了电液伺服系统的状态空间模型,并进一步基于哈密顿理论将该状态空间模型构造为具有扰动的三阶开环端口哈密顿系统(pH)。根据从pH系统中获得的互联矩阵和阻尼矩阵结构,逐步设计了虚拟控制信号,得到了控制律;然后,构造了一个匹配方程,以简化在其他系统上的设计和计算过程,并将期望的能量函数作为候选李雅普诺夫函数,根据李雅普诺夫稳定性定理证明了闭环系统在期望轨迹上的收敛性和稳定性;最后,以挖掘机铲斗及其电液伺服系统为对象,采用数值仿真实验验证了基于IDA框架的反演控制算法的轨迹跟踪性能。研究表明:在不考虑模型不确定性的情况下,所提出的控制器与其他三种控制器相比,在位置控制上的收敛速度可提高1.9%~6.3%;在轨迹跟踪上可保持优秀的收敛速度,且最大跟踪误差降低70%~81%;在模型不确定和时变负载的情况下,所提出的控制器与其他三种控制器相比,面对冲击时的最大跟踪误差仅增加0.004 m,调节所需控制输入降低4%~20%。这表明上述控制算法具有更优秀的综合跟踪性能和更强的鲁棒性。

关键词:挖掘机;电液伺服系统;铲斗系统;先导系统模型;阀控非对称缸模型;互联阻尼分配的无源控制(IDA-PBC);反演控制器

中图分类号:TH137.51;TU621

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2024)10-1865-10

Trajectory tracking control of electro-hydraulic servo system based on interconnection and damping assignment framework

NIE Qiuxiao¹, CHEN Jian², GONG Junjie¹, WU Xiaoxuan¹, LONG Yu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The complex coupling nonlinearity, model uncertainty, and external load uncertainty of the electro-hydraulic servo system of medium and large excavators resulted in large trajectory tracking errors and poor dynamic performance of the system. A backstepping controller based on interconnection and damping assignment (IDA) framework was proposed to improve the tracking performance and robustness of excavator working devices in mining tasks. Firstly, a state space model of the electro-hydraulic servo system was constructed using pilot valve, valve controlled asymmetric cylinder, and valve controlled asymmetric cylinder models. Furthermore, based on Hamiltonian theory, the state space model was constructed as a third order open-loop port Hamiltonian (pH) system with disturbances. Based on the interconnection matrix and damping matrix structure obtained from the pH system, the virtual control signal was gradually designed and the control law was ultimately obtained. Then, a matching equation was constructed to simplify the design and calculation process on other systems, and the expected energy function was used as a candidate Lyapunov function. Based on the Lyapunov stability theorem, the convergence and stability of the closed-loop system at the expected trajectory were proved. Finally, the trajectory tracking

收稿日期:2023-09-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFE0203500);中央财政引导地方科技发展专项(GKZY21195029);广西重点研发计划项目(AB20325004,AB23026101)

作者简介:聂楸晓(1996-),男,贵州毕节人,硕士研究生,主要从事非线性控制和无源控制方面的研究。E-mail:qiuxiao.nie@st.gxu.edu.cn

通信联系人:龙雨,男,教授,博士生导师。E-mail:longyu@gxu.edu.cn

performance of the proposed control algorithm was verified through numerical simulation experiments on the excavator bucket and its electro-hydraulic servo system. The research results show that, without considering model uncertainty, the proposed controller improves convergence speed in position control by 1.9% to 6.3% compared to the other three controllers; maintaining excellent convergence speed in trajectory tracking while reducing maximum tracking error by 70% to 81%. In the case of model uncertainty and time-varying loads, the maximum tracking error in the face of impact only increases by 0.004 m, and the required control input for adjustment is reduced by 4% to 20%. The above results indicate that the proposed control algorithm has better comprehensive tracking performance and robustness.

Key words: excavator; electro-hydraulic servo system; bucket system; lead system model; valve controlled asymmetric cylinder model; interconnection and damping assignment passivity-based control (IDA-PBC); backstepping controller

0 引 言

近年来,随着控制工程技术的迅猛发展,智能化已逐渐成为挖掘机研究的热点。

由于快速响应、高精度、高功率和高可靠性等特点,电液伺服系统在大中型挖掘机中得到了广泛应用。

挖掘机的工作装置包括动臂、斗杆和铲斗,其利用阀控非对称液压缸进行驱动,将流体动能转化为线性运动,并输出驱动力。

因此,实现快速响应和高精度的跟踪控制是挖掘机智能化的重要目标。

比例-积分-微分 (proportion integration differentiation, PID) 控制器具有原理简单、鲁棒性强和实用面广等优点,在工业中得到了广泛应用。研究人员利用 PID 优化技术和控制方法,对如何实现良好的位置控制进行了广泛的研究。翁文文等人^[1]提出了一种改进粒子群优化算法,并将其应用于液压系统 PID 参数的优化整定中。FENG Hao 等人^[2]提出了一种改进的遗传算法(improved genetic algorithm, IGA),用以搜索机器人挖掘机的最优 PID 控制器参数。夏正兵^[3]采用了蚁群算法,对铲斗位置的 PID 控制器参数进行了优化。

然而,由于 PID 控制器的线性特性和电液伺服系统的非线性特性,使得采用 PID 控制器参数整定及寻优的方法,难以保证实际作业过程中挖掘机系统具备强大的鲁棒性和优秀的跟踪性能。

针对电液伺服系统的非线性、不确定性和复杂性问题,研究人员对挖掘机进行了非线性控制相关的研究。SHEN Wei 等人^[4]提出了一种动态曲面自适应鲁棒控制方法,并简化了控制器的设计过程,降低了控制器的计算成本。JOSE J T 等人^[5]研究了一种增益调度模型预测控制器(model predictive control, MPC),用于提高挖掘机动臂的动态性能。李捷等人^[6]采用了一种基于迭代学习控制与滑模控制相结合的控制策略,以提高挖掘机工作装置各个关节的跟踪速度和精度。

这些控制器不仅在一定程度上解决了具有非线性

和不确定动力学特性的液压系统控制问题,还表明了非线性控制策略相比传统线性控制方法具有更好的性能。

与其他非线性控制器相比,基于无源性的控制策略(passivity-based control, PBC)具有天然的鲁棒性,能够应对系统的不确定性。相较于其他方法,PBC 方法源于信号处理,能够基于能量概念实现控制的目的。基于哈密顿理论的端口哈密顿(port-Hamiltonian, pH)系统不仅可以描述系统的能量特性,还能够阐明能量与子系统^[7]之间的相互关系,为非线性多物理系统提供了自然的建模框架。

基于 pH 理论,研究人员开发出了许多基于无源性的控制器,例如,互联控制^[8]、能量塑形和阻尼注入控制^[9]等。近年来,ORTEGA R 等人^[10]提出的基于互联和阻尼分配的无源性控制方法具有较强的鲁棒性、易实现性和广泛的适用性,在电力电子^[11-13]、机器人^[14-16]等领域受到了广泛的关注。

在液压系统 PBC 方法研究方面,熊义等人^[17]提出了一种基于液压无源性理论的非线性鲁棒控制方法,实现了系统在负载干扰下的精确轨迹跟踪性能,并保持了系统较强的鲁棒性。SAKAI S 等人^[18]基于 Casimir 函数提出了一种新的液压臂系统建模,并基于该模型提出了一种动态渐进稳定的无源控制器。DU Hao-hao 等人^[19]提出了一种基于无源的自适应鲁棒超扭曲非线性控制器,用于抑制系统的扰动和不确定性。

随着互联和阻尼分配(IDA)技术的发展,目前并没有基于互联阻尼分配的无源控制(IDA-PBC)的研究,也没有液压系统使用基于互联阻尼分配的无源控制(IDA-PBC)方法。而与上述无源控制器相比,IDA-PBC 具有以下优势:1) 可通过互联与阻尼矩阵,简单地描述系统状态之间的关系,并通过互联的框架确保系统的稳定性;2) 可通过哈密顿函数真实地反映系统能量;3) 可通过系统的互联与阻尼矩阵结构匹配方程,轻松求解控制律,而不需求解偏微分方程。

在电液伺服系统^[20]中,由于流体能量计算的复杂性,导致构建和计算 pH 系统变得十分困难。在电力

电子领域哈密顿函数^[13]的启发下,笔者将状态变量和状态误差的二次型函数,分别用作开环系统和闭环误差系统的广义哈密顿函数。

由于铲斗工作时要暴露在复杂的外部环境中,且需要完成大量的任务,因此,笔者将挖掘机铲斗系统作为研究对象。

首先,笔者建立铲斗电液伺服系统的状态空间模型,将其构建为 pH 系统;然后,根据获得的互联和阻尼矩阵,为铲斗电液伺服系统设计一种基于 IDA 的反演轨迹跟踪控制器,进一步构造匹配方程,简化控制器的设计过程以适用于其他系统;其次,将闭环系统的哈密顿函数作为李雅普诺夫函数,通过 pH 系统的耗散特性证明控制器的稳定性;最后,采用 MATLAB/Simulink 对该控制器的有效性进行仿真验证。

1 铲斗系统模型

液压挖掘机铲斗由机械系统和液压系统两部分组成,如图 1 所示。

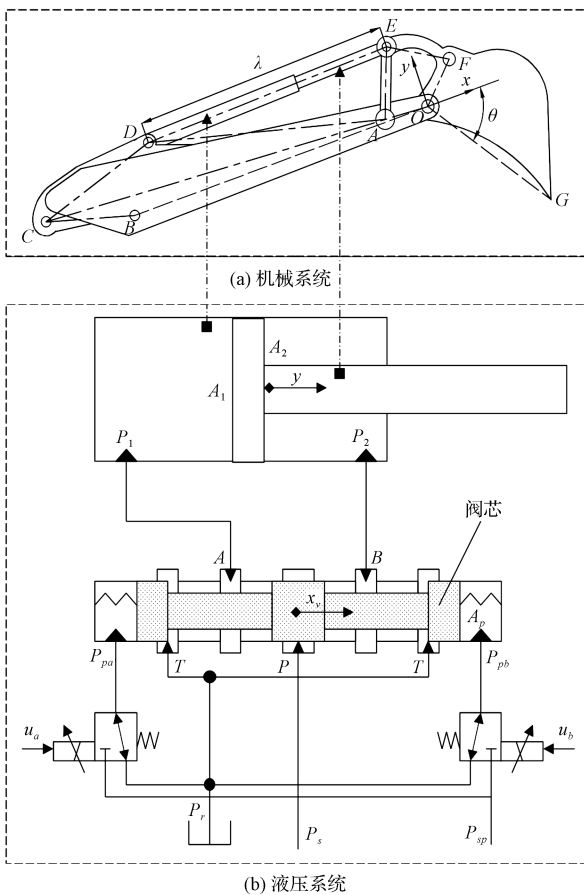


图 1 铲斗系统结构图

Fig. 1 Bucket system structure diagram

从图 1(a)中的几何关系可以很容易地获得液压缸长度与铲斗尖端位置之间的映射关系,而图 1(b)是

与铲斗系统相对应的电液伺服系统原理图。

该系统可简化为三部分:1)由输入电压控制的先导比例阀;2)由先导比例阀产生压力控制的液压换向阀(阀控对称缸);3)由换向阀控制的非对称液压缸(阀控非对称缸)。

1.1 先导系统模型

由于伺服阀的响应比系统的动态响应快得多,其动态性能对可控性的影响很小^[21]。因此,先导阀芯的输入电压和输出压力之间的关系可以描述为:

$$P_p = K_{pu} \cdot u, \tag{1}$$

式中: u 为先导阀的输入电压; K_{pu} 为先导阀比例增益系数; P_p 为先导阀输出压力。

笔者假设图 1(b)中两个先导阀不同时工作, u_a, u_b 为两个先导阀的输入电压, $u_a = u (u \geq 0), u_b = |u| (u < 0)$,由此,可以获得两个先导比例阀的压力分别为:

$$P_{pa} = \begin{cases} P_p, u \geq 0 \\ P_r, u < 0 \end{cases}, P_{pb} = \begin{cases} P_r, u \geq 0 \\ P_p, u < 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中: P_r 为油箱压力。

1.2 阀控对称缸模型

根据两个先导比例阀的输出压力,可以得到换向阀阀芯的控制力为:

$$F_p = A_p (P_{pa} - P_{pb}) \tag{3}$$

式中: A_p 为换向阀阀芯的控制面积。

根据牛顿第二定律,换向阀阀芯的动力学方程为:

$$m_v \ddot{x}_v = F_p - B_v \frac{dx_v}{dt} - F_s \tag{4}$$

式中: m_v 为换向阀阀芯的质量; x_v 为换向阀阀芯的开度; B_v 为黏性阻尼系数; F_s 为弹簧力, $F_s = K_v x_v, K_v$ 为对中弹簧等效刚度。

1.3 阀控非对称缸模型

与对称液压缸不同的是,挖掘机工作装置的驱动力是由不对称液压缸产生的。

由于不对称液压缸两侧面积不等,液压缸的伸缩运动特性不同,因此需建立滑阀正、负两个方向的系统动力学方程,即^[22]:

$$\begin{cases} Q_1 = C_d \omega_v \sqrt{2/\rho} \cdot x_v [\text{sig}(x_v) \sqrt{|P_s - P_1|} + \text{sig}(-x_v) \sqrt{|P_1 - P_r|}] \\ Q_2 = C_d \omega_v \sqrt{2/\rho} \cdot x_v [\text{sig}(x_v) \sqrt{|P_2 - P_r|} + \text{sig}(-x_v) \sqrt{|P_s - P_2|}] \end{cases} \tag{5}$$

式中: Q_1, Q_2 为液压缸的流入率和流出率; P_1, P_2 为液压缸的工作压力; C_d 为流量系数; ω_v 为滑阀端口面积

梯度; ρ 为液压油密度; P_s, P_r 为换向阀端口 P 处的供油压力和端口 T 处的回油压力。

符号函数 $\text{sig}(x_v)$ 为:

$$\text{sig}(x_v) = \begin{cases} 1, & x_v \geq 0 \\ 0, & x_v < 0 \end{cases}$$

液压缸无杆腔和有杆腔的流量连续性方程为^[23]:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = \frac{\beta}{V_1} [Q_1 - A_1 \frac{dy}{dt} - C(P_1 - P_2) + q_1(t)] \\ \frac{dP_2}{dt} = \frac{\beta}{V_2} [-Q_2 + A_2 \frac{dy}{dt} + C(P_1 - P_2) - q_2(t)] \end{cases} \quad (6)$$

式中: A_1, A_2 为无杆腔和有杆腔的有效工作面积; y 为液压缸活塞的位移; β 为液压油体积弹性模量; C 为内部泄漏系数; $q_1(t), q_2(t)$ 为由内部泄漏引起的建模误差; V_1, V_2 为无杆腔和有杆腔的体积。

其中: $V_1 = V_{10} + A_1 y, V_2 = V_{20} - A_2 y, V_{10}$ 和 V_{20} 为无杆腔和有杆腔的初始体积。为了简化方程,假设 $V_{10} = V_{20} = V_0$ 。

根据牛顿第二定律,液压缸活塞杆的动力学方程可以写为:

$$M \cdot \ddot{y} = (A_1 P_1 - A_2 P_2) - B_c \frac{dy}{dt} - K_c y - F_L \quad (7)$$

式中: M 为等效负载质量; B_c 为黏性阻尼系数; K_c 为负载的等效弹簧刚度; F_L 为负载力。

2 基于互联阻尼分配的反演控制器

2.1 控制器设计

先简要介绍互联阻尼分配的无源控制 (IDA-PBC) 控制器的设计流程。

哈密顿方程由欧拉-拉格朗日方程经过一系列坐标变换后导出。

具有扰动的开环系统的 pH 形式可写为^[8]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \cdot u + \xi \\ \mathbf{y} = \mathbf{g}^T(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: \mathbf{x} 为状态向量; $H(\mathbf{x})$ 为哈密顿函数; $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 为系统的互连矩阵,满足 $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}^T(\mathbf{x})$; $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 为系统的阻尼矩阵,满足 $\mathbf{R}(\mathbf{x}) = \mathbf{R}^T(\mathbf{x}) \geq 0$; $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 为系统端口特征矩阵; u 为系统输入; ξ 为系统扰动。

IDA-PBC 的思想是推导控制律 u , 使闭环系统期望的状态变量 x_d (或预期平衡或不动点变量) 稳定, 则预期闭环系统为:

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})] \frac{\partial H_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{J}_d(\mathbf{x})$ 为期望的互连矩阵, 满足 $\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}_d^T(\mathbf{x})$; $\mathbf{R}_d(\mathbf{x})$ 为期望的阻尼矩阵, 满足 $\mathbf{R}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{R}_d^T(\mathbf{x}) \geq 0$; $H_d(\mathbf{x})$ 为期望的能量函数。

从以下匹配方程可以获得闭环控制律^[11]:

$$\begin{aligned} & [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) u + \xi = \\ & [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})] \frac{\partial H_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \end{aligned} \quad (10)$$

综上所述, IDA-PBC 方法包括设计期望的互连矩阵 $\mathbf{J}_d(\mathbf{x})$ 和阻尼矩阵 $\mathbf{R}_d(\mathbf{x})$, 用于建立系统状态之间的互连和约束关系。采用匹配方程可以获得控制律, 且不需求解偏微分方程。该方法已被证明在控制具有非线性动力学的复杂系统方面是有效的。

接下来, 笔者对所提出控制器的设计过程进行详细介绍。

相关研究表明, 在电液伺服系统中, 高性能先导阀的动态性能对可控性影响不大。因此, 为了简化后续控制器的设计过程, 笔者将阀控对称液压缸控制特性简化为:

$$x_v = K_p u \quad (11)$$

式中: K_p 为等效比例增益系数。

笔者取状态变量为 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T = [y, \frac{dy}{dt}, A_1 P_1 - A_2 P_2]^T$, 并考虑到电液伺服系统中, 流体动能计算的复杂性与 IDA-PBC 方法中使用的能量函数不同, 因此, 采用以下状态变量的二次形式作为系统广义能量函数:

$$H(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{x} \quad (12)$$

根据式(5) ~ 式(8) 和式(12), 可以得到铲斗电液伺服系统的状态空间模型, 将其改写为 pH 形式:

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}, u) + \xi \quad (13)$$

其中:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & \frac{1}{M} \\ 0 & -\frac{1}{M} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{B_c}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, u) = \begin{bmatrix} 0 \\ \left(1 - \frac{K_c}{M}\right)x_1 \\ \frac{1}{M}x_2 + \psi_1 u - \psi_2 \end{bmatrix},$$

$$\xi = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M}F_L \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\psi_1 = K_p \beta C_d \omega_v \sqrt{2/\rho} (\eta_1 + \eta_2),$$

$$\psi_2 = \beta \left(\frac{A_1^2}{V_1} + \frac{A_2^2}{V_2} \right) \frac{dy}{dt} + C\beta \left(\frac{A_1}{V_1} + \frac{A_2}{V_2} \right) P_1 - C\beta \left(\frac{A_1}{V_1} + \frac{A_2}{V_2} \right) P_2,$$

$$\eta_1 = \frac{A_1}{V_1} [\text{sig}(u) \sqrt{|P_s - P_1|} + \text{sig}(-u) \sqrt{|P_1 - P_r|}],$$

$$\eta_2 = \frac{A_2}{V_2} [\text{sig}(u) \sqrt{|P_2 - P_r|} + \text{sig}(-u) \sqrt{|P_s - P_2|}].$$

与系统的 pH 结构相似,笔者设计的控制律使得闭环误差系统具有相同的结构,即:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = [\mathbf{J}_d - \mathbf{R}_d] \frac{\partial H_d(\tilde{\mathbf{x}})}{\partial \tilde{\mathbf{x}}} \quad (14)$$

式中: $H_d(\tilde{\mathbf{x}})$ 为期望的能量函数, $H_d(\tilde{\mathbf{x}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}^T \tilde{\mathbf{x}}$; $\mathbf{J}_d, \mathbf{R}_d$ 为期望的互连和阻尼矩阵,其元素 $j_i, i = 1, 2$, 且 $r_o \geq 0, o = 1, 2, 3$ 。

其中:

$$\mathbf{J}_d = \begin{bmatrix} 0 & j_1 & 0 \\ -j_1 & 0 & j_2 \\ 0 & -j_2 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_d = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 \end{bmatrix}.$$

$\tilde{\mathbf{x}}, \dot{\tilde{\mathbf{x}}}$ 为系统的状态误差和状态误差的导数:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x} \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (15)$$

笔者结合系统互连矩阵 $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 和阻尼矩阵 $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 第一行的结构和反演方法,设计虚拟控制信号 x_{2d} 如下:

$$x_{2d} = \dot{x}_{1d} + r_1 \tilde{x}_1 - j_1 \tilde{x}_2 \quad (16)$$

根据系统式 (13) 矩阵方程的第二个等式和式 (15), 可得 \tilde{x}_2 的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_2 &= \dot{x}_{2d} - \dot{x}_2 = \dot{x}_{2d} + \frac{K_c}{M}x_1 + \frac{B_c}{M}x_2 - \frac{1}{M}x_3 + \frac{1}{M}F_L = \\ &\dot{x}_{2d} + \frac{K_c}{M}x_1 + \frac{B_c}{M}x_2 - \frac{1}{M}(x_{3d} - \tilde{x}_3) + \frac{1}{M}F_L \quad (17) \end{aligned}$$

基于上式,并结合 $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 矩阵第二行的结

构和式 (14) 矩阵方程的第二个等式,笔者设计虚拟控制信号 x_{3d} 如下:

$$x_{3d} = M\dot{\tilde{x}}_{2d} + Mj_1\tilde{x}_1 + Mr_2\tilde{x}_2 - Mj_2\tilde{x}_3 + K_c x_1 + B_c x_2 + F_L \quad (18)$$

根据系统式 (13) 矩阵方程的第三个等式和式 (15), 可以得到 \tilde{x}_3 的导数为:

$$\dot{\tilde{x}}_3 = \dot{x}_{3d} - \dot{x}_3 = \dot{x}_{3d} - \psi_1 u + \psi_2 \quad (19)$$

同理,结合 $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 矩阵第三行的结构和式 (14) 矩阵方程的第三个等式,可设计控制器的控制律为:

$$u = \frac{1}{\psi_1} (\dot{x}_{3d} + j_2 \tilde{x}_2 + r_3 \tilde{x}_3 + \psi_2) \quad (20)$$

至此,由式 (16)、式 (18) 和式 (20) 共同构成了控制器模型。

最后,为了使该控制策略能够适用于其他系统,笔者将式 (13) 和式 (14) 代入式 (15) 中,获得了与 IDA-PBC 方法类似的匹配方程,即:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, u) = -[\mathbf{J}_d(\tilde{\mathbf{x}}) - \mathbf{R}_d(\tilde{\mathbf{x}})] \frac{\partial H_d(\tilde{\mathbf{x}})}{\partial \tilde{\mathbf{x}}} - [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} - \xi + \dot{\mathbf{x}}_d \quad (21)$$

2.2 稳定性和收敛性分析

笔者将期望的哈密顿函数 $H_d(\tilde{\mathbf{x}})$ 定义为李雅普诺夫候选函数,即:

$$V = H_d(\tilde{\mathbf{x}}) \geq 0 \quad (22)$$

候选函数的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{dH_d(\tilde{\mathbf{x}})}{dt} = \left[\frac{\partial H_d(\tilde{\mathbf{x}})}{\partial \tilde{\mathbf{x}}} \right]^T \frac{d\tilde{\mathbf{x}}}{dt} = \left[\frac{\partial H_d(\tilde{\mathbf{x}})}{\partial \tilde{\mathbf{x}}} \right]^T \mathbf{R}_d(\tilde{\mathbf{x}}) \left[\frac{\partial H_d(\tilde{\mathbf{x}})}{\partial \tilde{\mathbf{x}}} \right] = -r_1 \tilde{x}_1^2 - r_2 \tilde{x}_2^2 - r_3 \tilde{x}_3^2 \leq 0 \quad (23) \end{aligned}$$

将式 (23) 和式 (24) 组合后可以得到:

$$V \geq 0, \dot{V} \leq 0 \quad (24)$$

由此, $H_d(\tilde{\mathbf{x}})$ 可以作为李雅普诺夫函数,确保了期望不动点的收敛性和稳定性。

3 仿真分析

3.1 仿真模型

为了证明上述基于 IDA 的反演控制器的有效性,笔者利用 MATLAB/Simulink-simscape 工具箱,搭建了挖掘机铲斗系统的物理模型,并对基于 IDA 的反演控制器进行了仿真实验。

控制流程图如图 2 所示。

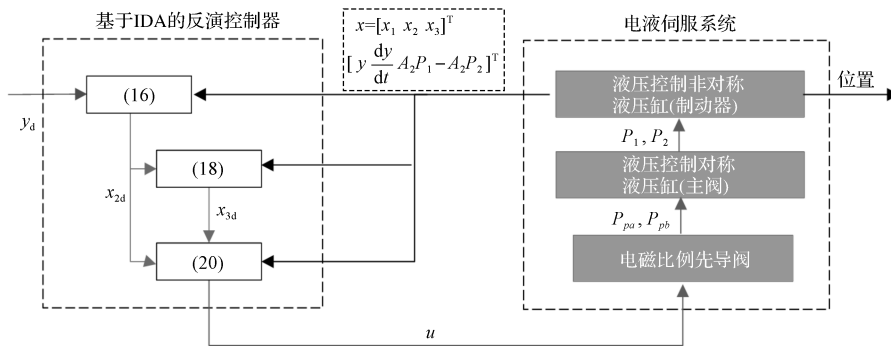


图 2 控制流程图

Fig. 2 Control flowchart

为了简化电液伺服系统模型,笔者假设恒压液压泵供油是充足的;并在控制器模型中,将 F_L 设为零。

为了突出基于 IDA 的反演控制器的优点,笔者将

其与其他三种控制器 (PID、反演控制器^[24] 和 IDA-PBC) 进行了比较。

相应的控制器模型和所设计的参数如表 1 所示。

表 1 控制器模型及设计参数

Table 1 Controller model and design parameters

| 控制器 | 控制器模型 | 参数值 |
|---------------|--|--|
| PID | — | $k_p = 200, k_d = 1, k_i = 0$ |
| 经典反演控制器 | $\begin{cases} \dot{x}_{2d} = \dot{x}_{1d} + k_1 \tilde{x}_1 \\ \dot{x}_{3d} = M \dot{x}_{2d} + M \tilde{x}_1 + K_c x_1 + B_c x_2 + F_L \\ u = \frac{1}{\psi_1} \left(\dot{x}_{3d} + \frac{A_1}{M} \tilde{x}_2 + k_3 \tilde{x}_3 + \psi_2 \right) \end{cases}$ | $k_1 = 100, k_2 = 4\ 000, k_3 = 100$ |
| IDA-PBC | $\begin{cases} \dot{x}_{2d} = r_1 \tilde{x}_1 - j_1 \tilde{x}_2 \\ \dot{x}_{3d} = M j_1 \tilde{x}_1 + M r_2 \tilde{x}_2 - M j_2 \tilde{x}_3 + K_c x_1 + B_c x_2 + F_L \\ u = \frac{1}{\psi_1} (j_2 \tilde{x}_2 + r_3 \tilde{x}_3 + \psi_2) \end{cases}$ | $j_1 = 1, j_2 = 0.001,$ $r_1 = 25, r_2 = 1\ 000, r_3 = 250$ |
| 基于 IDA 的反演控制器 | $\begin{cases} \dot{x}_{2d} = \dot{x}_{1d} + r_1 \tilde{x}_1 - j_1 \tilde{x}_2 \\ \dot{x}_{3d} = M \dot{x}_{2d} + M j_1 \tilde{x}_1 + M r_2 \tilde{x}_2 - M j_2 \tilde{x}_3 + K_c x_1 + B_c x_2 + F_L \\ u = \frac{1}{\psi_1} (\dot{x}_{3d} + j_2 \tilde{x}_2 + r_3 \tilde{x}_3 + \psi_2) \end{cases}$ | $j_1 = 1, j_2 = 0.001,$ $r_1 = 100, r_2 = 100, r_3 = 50$ |

此外,笔者给出了挖掘机铲斗系统的主要模型参数,如表 2 所示。

表 2 电液伺服系统主要模型参数

Table 2 Main model parameters of electro-hydraulic servo system

| 参数/单位 | 数值 |
|---|-----------------------|
| 先导阀比例增益系数 $K_{pu}/(\text{Pa}/\text{V})$ | 2.7×10^4 |
| 换向阀阀芯控制面积 A_p/m^2 | 3.15×10^{-4} |
| 换向阀对中弹簧等效刚度 $K_v/(\text{N}/\text{m})$ | 4.05×10^4 |
| 换向阀阀芯黏性阻尼系数 $B_v/[N/(m/s)]$ | 500 |
| 换向阀阀芯质量 M_v/kg | 1.14 |
| 流量系数 C_d | 0.82 |
| 滑阀开口面积梯度 ω_v/m | 0.01 |
| 液压缸活塞直径 D/m | 0.12 |
| 液压缸活塞杆直径 d/m | 0.085 |
| 液压缸无杆腔初始体积 V_{10}/m^3 | 0 |
| 液压缸有杆腔初始体积 V_{20}/m^3 | 0.085 |
| 活塞杆长度 L/m | 1.32 |
| 负载的等效弹簧刚度 $K_c/(\text{N}/\text{m})$ | 25 000 |

续表

| 参数/单位 | 数值 |
|---|-------------------|
| 液压缸黏性阻尼系数 $B_c/[N/(m/s)]$ | 13 250 |
| 等效负载质量 M/kg | 700 |
| 液压油体积弹性模量 $\beta/(\text{N}/\text{m}^2)$ | 1.7×10^9 |
| 液压油密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 890 |
| 供油压力 P_s/MPa | 34 |
| 油箱压力 P_r/MPa | 0.1 |
| 负载 F_L/N | 7 000 |
| 等效比例增益系数 $K_p/(\text{m}/\text{V})$ | 0.000 4 |

3.2 仿真结果

为了验证基于 IDA 的反演控制器的跟踪性能和鲁棒性,笔者进行了位置跟踪和轨迹跟踪两种情况的仿真试验。其中,在第一种情况中,考虑到挖掘机实际操作过程中对铲斗尖端点对点位置移动的需求,使用阶跃信号作为期望位置 y_d 来模拟挖掘机铲斗的位置跟踪性能。

位置跟踪结果如图 3 所示。

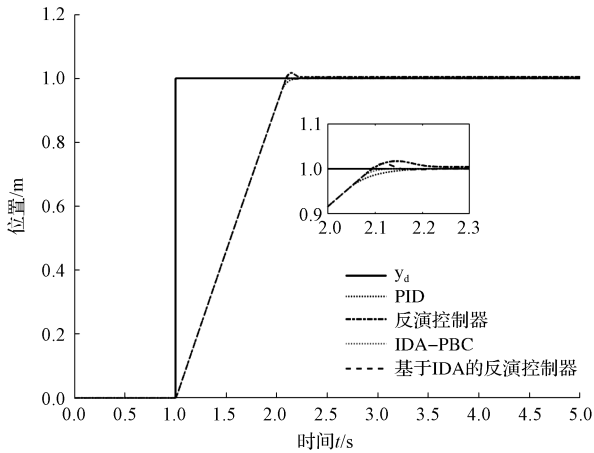


图 3 四种控制器位置跟踪结果

Fig. 3 Four types of controller position tracking results

位置跟踪误差如图 4 所示。

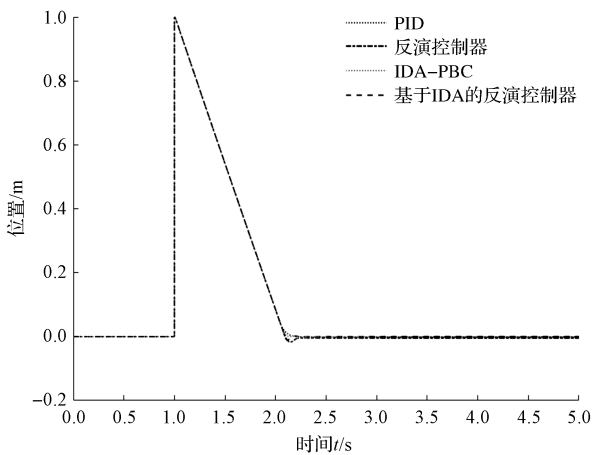


图 4 四种控制器位置跟踪误差

Fig. 4 Four types of controller position tracking errors

位置跟踪控制输入如图 5 所示。

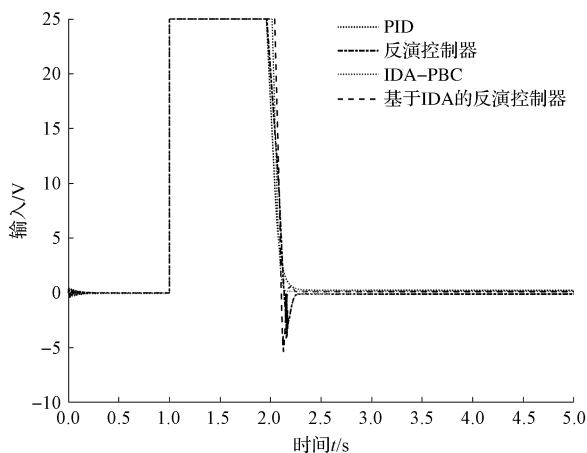


图 5 四种控制器位置跟踪控制输入

Fig. 5 Four types of controller position tracking control inputs

在图 3 ~ 图 5 中, $y_d(x_{1d})$ 为给定的预期位置,其他四条曲线对应四个控制器的位置跟踪结果(不考虑模

型参数的不确定性)。

由此可知:在瞬态和稳态跟踪性能方面,三种基于模型的控制都优于 PID 控制器;而基于 IDA 的反演控制器具有最快的收敛速度,相较于其他三个控制器提高了 1.9% ~ 6.3%。

随着挖掘机向自主化、无人化方向发展,不同于人工操作的挖掘机位置控制,无人挖掘机对铲斗末端任务轨迹提出了新的轨迹跟踪性能要求。

为了验证基于 IDA 的反演控制器的轨迹跟踪性能,笔者使用正弦曲线作为期望轨迹 y_d ,进行仿真验证;并将与其他三个控制器进行了比较(不考虑模型参数的不确定性和恒定的外部负载)。

轨迹跟踪结果如图 6 所示。

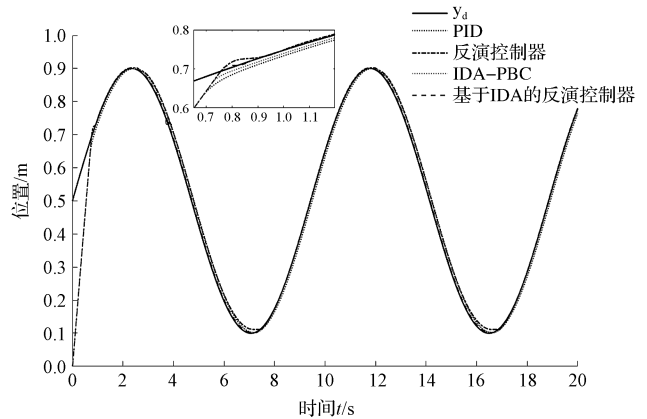


图 6 四种控制器轨迹跟踪结果

Fig. 6 Four types of controller trajectory tracking results

图 6 中,在 $t = 2.3$ s 和 $t = 12$ s 时刻,液压缸活塞从伸长运动切换到收缩运动;在 $t = 7$ s 和 $t = 16.7$ s 时刻,液压缸活塞从收缩运动切换到伸长运动。

由此可以观察到,由于液压缸的不对称性,这两种状态所需的控制输入是不同的。

在图 6 的局部放大图中,PID 控制器和 IDA-PBC 控制器虽然能迅速跟在目标轨迹附近,但并不能跟上目标轨迹,而反演控制器和基于 IDA 的反演控制器则能迅速跟上目标轨迹。这表明,在初始阶段,反演控制器和基于 IDA 的反演控制器具有更优秀的跟踪性能。

轨迹跟踪误差如图 7 所示。

由图 7 的局部放大图可以观察到:四种控制器在跟上目标轨迹之后,基于 IDA 框架的反演控制器拥有最好的跟踪精度;相比其他控制器,其最大跟踪误差降低了 70% ~ 81%。

轨迹跟踪控制输入如图 8 所示。

从图 8 可以观察到:由于液压缸的不对称性,两种状态所需的控制输入是不同的。

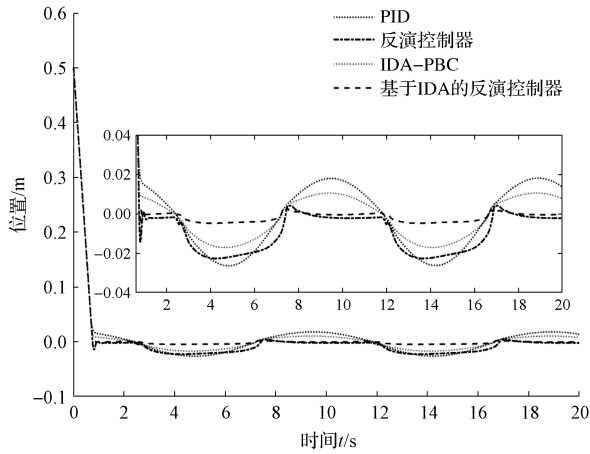


图 7 四种控制器轨迹跟踪误差

Fig. 7 Four types of controller trajectory tracking errors

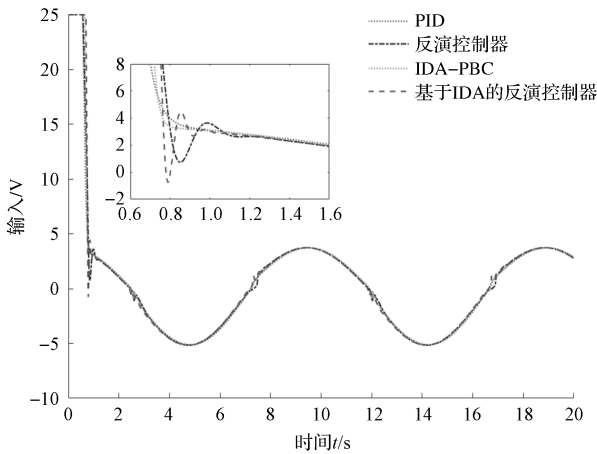


图 8 四种控制器轨迹跟踪控制输入

Fig. 8 Four types of controller trajectory tracking control inputs

结合表 1 中的控制器模型可以发现:基于 IDA 的反演控制器、IDA-PBC 和经典反演控制器的模型非常相似,都由误差控制项和状态反馈项组成,这三种控制器都比 PID 控制器具有更高的跟踪精度。

由于预期互连矩阵,IDA-PBC 和基于 IDA 的反演控制器具有更多的误差控制项,使这两个控制器的跟踪性能优于反演控制器。

与基于 IDA 的反演控制器和经典反演控制器相比,IDA-PBC 则缺少期望状态的导数项,这意味着控制器控制的目标状态是静止的或缓慢变化的,导致 IDA-PBC 失去了一些动态性能。而基于 IDA 的反演控制器不仅保留了预期状态的导数项,还增加了误差控制项,可确保控制器拥有更好的跟踪性能和动态性能。

在轨迹跟踪的情况下,为了进一步测试基于 IDA 框架的反演控制器的跟踪性能和鲁棒性,笔者将控制器使用的模型参数乘以系数 $\varepsilon \in [0.95, 1.05]$,以此来模拟电液伺服系统的模型不确定性。

此外,在挖掘机实际操作过程中,其铲斗是直接接触外部环境的装置,面临着复杂多变的环境。因此,笔者为系统添加了具有冲击的外部时变载荷,如图 9 所示。

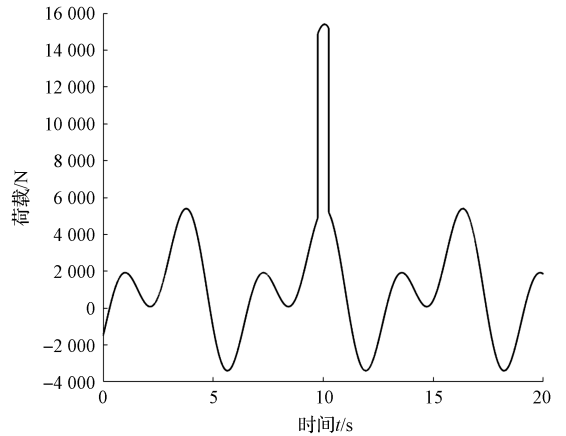


图 9 具有冲击的时变负载

Fig. 9 Time varying loads with impact

笔者在 $t = 10\text{ s}$ 内叠加宽度为 0.5 s 的阶跃信号,以模拟铲斗操作过程中所受到的冲击。在这种情况下,仿真的轨迹跟踪结果如图 10 所示。

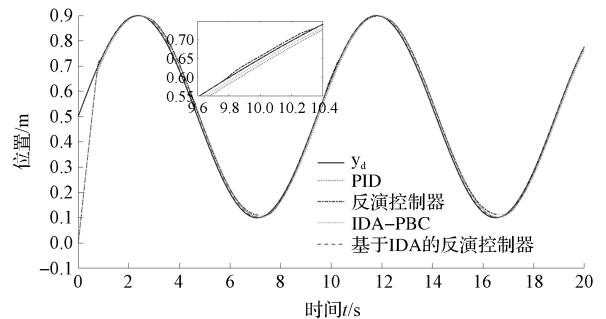


图 10 四种控制器轨迹跟踪结果(考虑模型误差)

Fig. 10 Four types of controller trajectory tracking results (considering model errors) inputs (considering model errors)

考虑到模型误差的轨迹跟踪误差如图 11 所示。

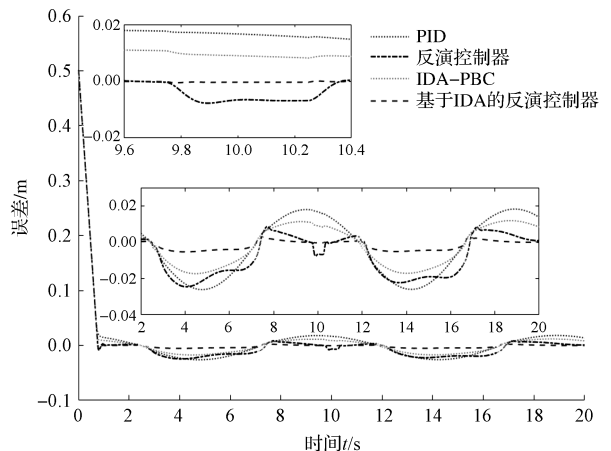


图 11 四种控制器轨迹跟踪误差(具有模型误差)

Fig. 11 Four types of controller trajectory tracking errors (considering model errors)

由图 10 和图 11 的局部放大图可以观察到:在模型具有不确定性,并受到外部时变载荷的情况下,受到冲击载荷时,基于 IDA 的反演控制器与其他三个控制器相比,跟踪结果几乎没有波动;此时的最大跟踪误差仅增加 0.004 m。

考虑到模型误差的轨迹跟踪控制输入如图 12 所示。

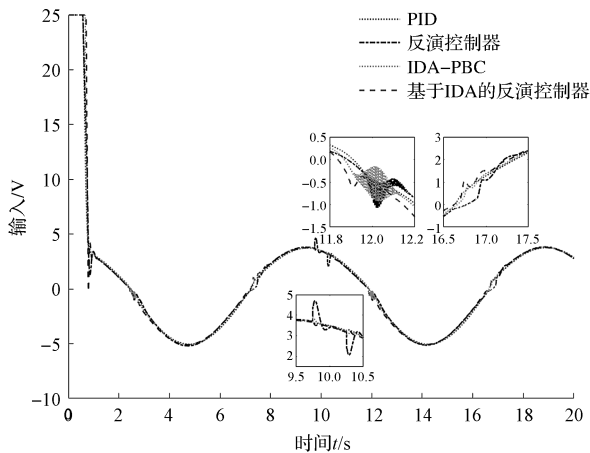


图 12 四种控制器轨迹跟踪控制输入(具有模型误差)

Fig. 12 Four types of controller trajectory tracking control

从图 12 中的局部放大图可以观察到:收敛后的跟踪精度与不考虑模型误差的情况相似。

此外,在液压缸伸长和收缩状态的切换过程中,由于外部负载的变化,反演控制器和 IDA-PBC 控制输入变得更加强烈(反之,基于 IDA 的反演控制器控制输入更稳定)。当面临外部冲击时,与反演控制器和 IDA-PBC 控制器相比,基于 IDA 的反演控制器调节所需的控制输入最大值为 3.77 V,与其他三种控制器相比降低了 4% ~ 20%。

以上结果进一步验证了先前分析和所提出的控制方法的优点,即基于 IDA 的反演控制器拥有更优秀的跟踪精度和更强的鲁棒性^[25]。

4 结束语

考虑到模型的不确定性和复杂的外部环境,笔者提出了一种基于 IDA 框架的反演控制器,以提高挖掘机电液伺服系统的精度,增强轨迹跟踪的鲁棒性;并根据 Lyapunov 稳定性定理,证明了闭环系统在期望轨迹的收敛性和稳定性;最后,采用数值仿真试验的方法,对基于 IDA 框架的反演控制器的有效性进行了验证。

研究结果表明:

1) 相较于三个对比控制器,在不考虑模型不确定性的情况下,基于 IDA 框架的反演控制算法在位置控

制上的收敛速度提高了 1.9% ~ 6.3%;在轨迹跟踪上,基于 IDA 框架的反演控制器的最大跟踪误差相比其他控制器降低了 70% ~ 81%,这表明其综合跟踪性能更好;

2) 在考虑模型不确定性和具有冲击的时变负载时,基于 IDA 框架的反演控制算法最大跟踪误差仅增加为 0.004 m;调节所需的控制输入最大值为 3.77 V,与其他三种控制器相比降低了 4% ~ 20%,这表明,基于 IDA 框架的反演控制算法具有更强的鲁棒性;

3) 不同于机械系统与电力电子系统,挖掘机电液伺服系统作为一种强非线性系统,其哈密顿能量函数构建计算复杂,进一步影响了哈密顿函数的构建和控制律的求解。基于 IDA 框架的反演控制算法充分考虑了上述问题,并构造了一个匹配方程,简化控制律的求解过程,而不需要求解偏微分方程。

目前,笔者所开发的算法是基于全状态反馈设计的,而一些实际状态信号(例如速度、外部负载等)却很难准确地测量。因此,在未来的研究中,笔者还需要开发一种能够观察系统状态和外部负载的观测器。此外,为了更好地应用上述方法,笔者还将对实际挖掘机进行改装,以进一步验证控制算法的有效性。

参考文献 (References):

- [1] 翁文文,殷晨波,冯浩,等.改进粒子群算法应用于挖掘机铲斗位置控制[J].机械设计与制造,2020,58(2):166-169.
WENG Wen-wen, YIN Chen-bo, FENG Hao, et al. Position control of hydraulic excavator system using an improved PSO algorithm [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020, 58(2):166-169.
- [2] FENG Hao, YIN Chen-bo, WENG Wen-wen, et al. Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 105(12):153-168.
- [3] 夏正兵. 液压挖掘机铲斗位置控制系统研究[J]. 液压与气动, 2020, 44(9):137-142.
XIA Zheng-bing. Bucket position control system of hydraulic excavator [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, 44(9):137-142.
- [4] SHEN Wei, WANG Jun-zheng, WANG Shou-kun. The control of the electro-hydraulic shaking table based on dynamic surface adaptive robust control [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2017, 39(8):1271-1280.
- [5] JOSE J T, DAS J, MISHRA S K. Dynamic improvement of hydraulic excavator using pressure feedback and gain scheduled model predictive control [J]. IEEE. Sensors Journal, 2021, 21(17):18526-18534.

- [6] 李捷, 王晓文, 王毫旗, 等. 基于迭代滑模的挖掘机工作装置控制策略[J]. 机电工程, 2022, 39(4): 561-566.
LI Jie, WANG Xiao-wen, WANG Hao-qi, et al. Control strategy of excavator working device based on iterative sliding mode[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(4): 561-566.
- [7] SCHAFT A V D, JELTSEMA D. Port-Hamiltonian systems theory: An introductory overview [J]. Foundations and Trends® in Systems and Control, 2014, 1(2-3): 173-378.
- [8] CASTAÑOS F, ORTEGA R, SCHAFT A V D, et al. Asymptotic stabilization via control by interconnection of port-Hamiltonian systems [J]. Automatica, 2009, 45(7): 1611-1618.
- [9] NUÑO E, ORTEGA R. Achieving consensus of Euler-Lagrange agents with interconnecting delays and without velocity measurements via passivity-based control[J]. IEEE. Transactions on Control Systems Technology, 2017, 26(1): 222-232.
- [10] ORTEGA R, SCHAFT A V D, MASCHKE B, et al. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems [J]. Automatica, 2002, 38(4): 585-596.
- [11] BELKHIER Y, ACHOUR A, BURES M, et al. Interconnection and damping assignment passivity-based non-linear observer control for efficiency maximization of permanent magnet synchronous motor[J]. Energy Reports, 2022, 8(12): 1350-1361.
- [12] MUNGPOORN P, THOUNTHONG P, YODWONG B, et al. Modeling and control of multiphase interleaved fuel-cell boost converter based on Hamiltonian control theory for transportation applications [J]. IEEE. Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(2): 519-529.
- [13] 王国盛, 林济铿, 罗萍萍. 基于互联与阻尼分配无源控制 (IDA-PBC) 的汽轮机调速系统控制器设计方法[J/OL]. 南方电网技术, 1-10 [2024-09-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20230914.0024.002.html>.
WANG Guo-sheng, LIN Ji-keng, LUO Ping-ping. Design method of turbine speed control system controller based on interconnection and damping assignment passivity-based control (IDA-PBC) [J/OL]. Southern Power System Technology, 1-10 [2024-09-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20230914.0024.002.html>.
- [14] MA Yan, CHEN Jian, WANG Jun-min, et al. Path-tracking considering yaw stability with passivity-based control for autonomous vehicles [J]. IEEE. Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(7): 8736-8746.
- [15] GUERRERO-SÁNCHEZ M E, HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ O, VALENCIA-PALOMO G, et al. Filtered observer-based IDA-PBC control for trajectory tracking of a quadrotor [J]. IEEE. Access, 2021, 9(8): 114821-114835.
- [16] RYALAT M, DAMIRI H S, ELMOAQET H. Particle swarm optimization of a passivity-based controller for dynamic positioning of ships [J]. Applied Sciences, 2020, 10(20): 7314.
- [17] 熊义, 魏建华, 胡波, 等. 基于液压无源性理论的电液系统非线性鲁棒控制方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 383-391.
XIONG Yi, WEI Jian-hua, HU Bo, et al. Hydraulic passivity based nonlinear robust control for electrohydraulic system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 383-391.
- [18] SAKAI S, STRAMIGIOLI S. Passivity Based Control of Hydraulic Robot Arms Using Natural Casimir Functions: Theory and Experiments [C]//2008 IEEE./RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice: IEEE., 2008: 538-544.
- [19] DU Hao-hao, JING Cheng-hu, YAN Bing-sheng, et al. Passivity-based adaptive robust super-twisting nonlinear control for electro-hydraulic system with uncertainties and disturbances [J]. Mechanics, 2023, 29(1): 51-58.
- [20] GAO Ling-chong, SHI Bo-yang, KLEEBERGER M, et al. Optimal Control of the Hydraulic Actuated Boom System based on Port-hamiltonian Formulation [C]//12th International Fluid Power Conference Dresden: [s. n.], 2020: 12-14.
- [21] YANG Teng, ZHANG Bin, HONG Hao-cen, et al. Motion control for earth excavation robot based on force pre-load and cross-coupling compensation [J]. Automation in Construction, 2022, 141(4): 104402.
- [22] RUDERMAN M. Full-and Reduced-order Model of Hydraulic Cylinder for Motion Control [C]//IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE. Industrial Electronics Society, Beijing: IEEE., 2017: 7275-7280.
- [23] MANRING N D, FALES R C. Hydraulic Control Systems [M]. John Wiley & Sons, 2019.
- [24] LI Lan, JIANG Yi, YANG Xiao-wei, et al. Rapid-erection backstepping tracking control for electrohydraulic lifting mechanisms of launcher systems [J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 893.
- [25] 王朋飞, 王志广. 无人机起落架电液伺服系统运动控制方法研究[J]. 液压气动与密封, 2023, 43(6): 59-62.
WANG Peng-fei, WANG Zhi-guang. Research on motion control method of UAV landing gear electro-hydraulic servo system [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023, 43(6): 59-62.

本文引用格式:

聂楸晓, 陈剑, 龚俊杰, 等. 基于互联与阻尼分配框架的电液伺服系统轨迹跟踪策略[J]. 机电工程, 2024, 41(10): 1865-1874.

NIE Qiuxiao, CHEN Jian, GONG Junjie, et al. Trajectory tracking control of electro-hydraulic servo system based on interconnection and damping assignment framework [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(10): 1865-1874.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>