

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.04.020

基于迭代滑模的挖掘机工作装置控制策略*

李 捷¹, 王晓文¹, 王毫旗¹, 张贵喜²

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024;

2. 君泽汇通科技发展有限公司, 北京 100010)

摘要: 由于挖掘机工作装置具有复杂强耦合非线性及时滞性的特点, 并且其在工作过程中存在负载不确定的问题, 导致挖掘机的作业效率低、机械磨损大。针对这一问题, 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, 对挖掘机工作装置各关节轨迹的跟踪控制性能进行了研究。首先, 利用拉格朗日力学法, 建立了挖掘机工作装置的动力学模型; 然后, 推导定义了控制律, 并利用 Lyapunov 理论验证了控制器的稳定性; 最后, 设计了迭代滑模控制器, 以小松 PC02-1 挖掘机为平台, 确定了其轨迹控制所需的变量, 利用 MATLAB 对挖掘机工作装置的轨迹跟踪性能进行了数值仿真。研究结果表明: 在面对外部扰动的情况下, 该方法可有效地提高挖掘机工作装置各关节的跟踪速度与跟踪精度, 同时可在一定程度上削弱传统滑模控制的抖振现象, 系统的鲁棒性强; 该结果表明, 迭代学习控制与滑模控制相结合的控制方法具有较好的控制性能。

关键词: 液压挖掘机; 轨迹跟踪; 迭代学习控制; 滑模控制; MATLAB

中图分类号: TH24; TU621

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2022)04-0561-06

Control strategy of excavator working device based on iterative sliding mode

LI Jie¹, WANG Xiao-wen¹, WANG Hao-qi¹, ZHANG Gui-xi²

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. JunzeHuitong Technology Development Co., Ltd., Beijing 100010, China)

Abstract: The excavator working device had the characteristics of complex, strong coupling, nonlinearity and time lag, and there was also the problem of load uncertainty in the working process, resulting in low working efficiency of the excavator and large mechanical wear. Aiming at the problem, a control strategy combining iterative learning control and sliding mode control was adopted to study the tracking control performance of each joint trajectory of the excavator working device. First of all, the dynamic model of the working device of the excavator was established by using the Lagrangian method of mechanics. Then, the control law was deduced and defined, and the stability of the controller was verified by the Lyapunov theory. Finally, an iterative sliding mode controller was designed. Using the mini Komatsu excavator PC02-1 as a platform, the variables required for trajectory control were determined, and the trajectory tracking performance of the excavator working device was numerically simulated by MATLAB. The research results show that this method can effectively improve the tracking speed and tracking accuracy of each joint of the excavator working device in the face of external disturbances, and weaken the chattering phenomenon of traditional sliding mode control to a certain extent. The uncertainty of the system has strong robustness, which verifies that the proposed control method has better control performance.

Key words: hydraulic excavator; trajectory tracking; iterative learning control; sliding mode control; MATLAB

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(201901D111245)

作者简介: 李捷(1965-), 男, 四川华蓥人, 硕士, 副教授, 主要从事车辆动态特性仿真及工程车辆设计理论及安全性、非线性振动方面的研究。

E-mail: 906622745@qq.com

0 引 言

随着在自动化、人工智能和信息物联网等技术的高速发展,挖掘机智能化作业已成为了业界的研究热点,受到了国内外研究学者们的广泛关注^[1]。

挖掘机轨迹跟踪控制是实现挖掘机自动化和智能化的一个重要前提。由于挖掘机工作装置具有复杂强耦合非线性和时滞性的特点,以及其在工作过程中还存在负载不确定性的问题^[2],只有工作装置控制系统具有良好的控制性能,才能提高挖掘机的作业精度和效率,在对外界干扰和参数不确定性影响下,仍具有较强的鲁棒性。

CHOI J 等人^[3]设计了一种带有模糊算法的时变滑模控制器,并且开发了挖掘机的自动跟踪控制系统,对自动跟踪控制系统的性能进行了实验研究。王刚等人^[4]提出了一种变增益迭代学习控制律,并且在扰动存在的情况下,对三自由度机械臂各关节末端轨迹跟踪控制非线性系统的跟踪效率较低的问题进行了研究。CHEN S 等人^[5]提出了一种新型的迭代学习控制方法,并且对涉及的两个或多个控制子系统的协同跟踪控制问题进行了研究。黄茹楠等人^[6]通过在滑模变结构的输出端加入低通滤波器,在模型误差和外部扰动存在的情况下,研究了液压挖掘机轨迹的高精度快速跟踪方法。针对液压挖掘机工作装置的高度非线性、时滞性和参数不确定性,李发喜等人^[7]采用带低通滤波器的滑模算法,对液压挖掘机工作装置的控制进行了研究。针对滑模控制中的抖振现象,张金萍等人^[8]采用滑模控制和自适应模糊控制相结合的方法,对挖掘机工作装置的轨迹跟踪问题进行了研究。KIM J Y 等人^[9]提出了一种基于时间延迟控制(time delay control, TDC)结合终端滑模控制(terminal sliding mode control, TSMC)的离散无模型鲁棒控制器,对挖掘机器人的运动控制进行了研究,使挖掘机器人具备了较高的位置跟踪精度。YIN X X 等人^[10]提出了一种鲁棒自适应滑模控制器,使得机器人机械手在不确定的任务空间中,既能抵抗不确定性的影响,又具有高精度的轨迹跟踪性能。为了使平地平整作业更有效, XU J Q 等人^[11]在 Simulink 中开发了挖掘机机械臂模型,并设计了挖掘机机械臂滑模控制器,对机械臂分级任务的轨迹跟踪控制进行了研究。为了削弱系统抖振现象,解培强^[12]以模糊集合来替换滑模控制中的切换增益的方式,研究了挖掘机工作装置的轨迹跟踪问题。刘阔等人^[13]针对挖掘机工作装置的非线性和参数不

确定性,设计了一种自适应模糊滑模控制器,并对挖掘机的动臂和斗杆轨迹跟踪进行了仿真研究。针对外界干扰对船舶动力的定位控制问题,陈海力等人^[14]提出了一种迭代滑模控制策略,对船舶的动力定位问题进行了研究。

综上所述,学者们采用迭代学习控制或者滑模控制方式,对挖掘机工作臂的轨迹跟踪问题做了大量研究。迭代学习控制虽然适合于解决强非线性、强耦合、建模难、运动具有重复性的高精度控制问题,但是其系统存在鲁棒性问题。滑模控制虽然不需要系统提供精确的模型,同时拥有响应速度快、鲁棒性好等优点,但是其在控制过程中存在抖振现象,会影响其控制的精确性。所以,将滑模控制理论引入到迭代学习控制理论中,对研究挖掘机工作装置的轨迹跟踪问题是很有必要的。

在目前挖掘机工作装置轨迹控制的研究工作中,采用滑模控制与迭代学习控制相结合的控制策略的较少,为此,笔者提出一种迭代滑模控制器,并采用 MATLAB 对该控制策略的有效性进行仿真验证。

1 挖掘机工作装置动力学模型

液压挖掘机工作装置的坐标系简图如图 1 所示。

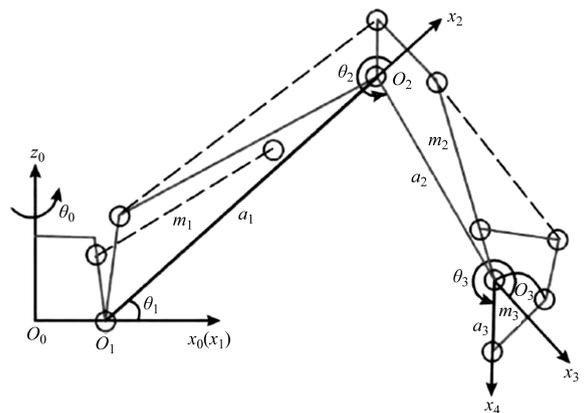


图 1 挖掘机工作装置坐标系简图

l_1 —动臂长度; m_1 —动臂质量; θ_1 —动臂转角; l_2 —斗杆长度; m_2 —斗杆质量; θ_2 —斗杆转角; l_3 —铲斗长度; m_3 —铲斗质量; l_3 —铲斗转角; g —重力加速度; τ_1, τ_2, τ_3 —关节驱动力矩

图 1 中,令 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$, 则挖掘机工作臂的拉格朗日动力学模型为:

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G(\theta) - f(t) \quad (1)$$

式中: τ —控制信号矢量, $\tau \in R^3$; $f(t)$ —系统建模误差、不确定参数和其他因素,为外界扰动; θ —广义关节坐标矢量, $\theta \in R^3$; $M(\theta)$ —工作装置的惯性矩阵,为正定矩阵, $M(\theta) \in R^{3 \times 3}$; $C(\theta, \dot{\theta})$ —哥氏力与离心力矢量, C

$(\theta, \dot{\theta}) \in R^{3 \times 3}; G(\theta)$ —重力负载矢量, $G(\theta) \in R^{3 \times 3}$ 。

2 迭代滑模控制器的设计

根据已推导的挖掘机工作装置动力学模型,工作装置各关节的位置跟踪误差定义为:

$$e(t) = \theta_d(t) - \theta(t) \quad (2)$$

式中: $\theta(t)$ —关节实际位置表示; $\theta_d(t)$ —关节理想位置。

对式(2)进行二次求导,可得:

$$\ddot{e} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} \quad (3)$$

设计滑模面为:

$$s = ce + \dot{e} \quad (4)$$

对上式求导,可得:

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} \quad (5)$$

将式(1,3)代入式(5),可得:

$$s = c\dot{e} + \ddot{\theta} - M^{-1}[\tau + f(t) - G - C\dot{\theta}] \quad (6)$$

为削弱滑模控制系统引起的抖振,笔者定义指数趋近率^[15,16]为:

$$\dot{s} = -\eta \text{sign}(s) - ks \quad (7)$$

其中: $\eta > 0, k > 0$ 。

将式(6)代入式(7),并化简可得控制律为:

$$\tau = M[\ddot{\theta} + c\dot{e} + \eta \text{sign}(s) + ks] + G + C - f \quad (8)$$

则迭代滑模控制算法的控制律可定义为:

$$\tau = u_{k+1}(t) - u_k(t) \quad (9)$$

选取 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{s^2}{2} \quad (10)$$

在利用上式证明式(9)的稳定性时,由于上式大于零,笔者先对上式两端进行求导,然后引入式(5),可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s(c\dot{e} + \ddot{e}) = \\ & s\{[\ddot{\theta} - M^{-1}(\tau + f - C - G)] + c\dot{e}\} \quad (11) \end{aligned}$$

将式(8)代入上式可得:

$$\dot{V} = s(-c\dot{e} - \eta \text{sign}(s) - ks + c\dot{e}) \leq -ks^2 - \eta|s| \quad (12)$$

上式显然小于零,即 $\dot{V} < 0$,而 $V > 0$,所以根据李雅普诺夫(第二方法)稳定性判别法可知,该系统是渐进稳定的。

针对式(12),当相关参数选取合适时,系统的跟踪误差趋近于零,可以有效提高跟踪精度^[17]。

3 控制器仿真实验

3.1 挖掘机工作装置参数设定

此处的仿真实验以迷你型小松挖掘机 PC02-1 为平台。挖掘机 PC02-1 的参数分别为:

$m_1 = 112 \text{ kg}, m_2 = 50 \text{ kg}, m_3 = 32 \text{ kg}; g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}; a_1 = 1.13 \text{ m}, a_2 = 0.51 \text{ m}, a_3 = 0.3 \text{ m}; l_{g1} = 0.565 \text{ m}, l_{g2} = 0.23 \text{ m}, l_{g3} = 0.16 \text{ m}$ 。

其中: l —各连杆的等效长度; l_g —连杆重心到铰接点的长度。

建模的不确定部分为:

$$f(t) = [2\sin(\pi t) 2\cos(\pi t) 2\sin(\pi t)] \quad (13)$$

关节位置指令为:

$$\theta_{1d} = \sin(\pi t) \quad (14)$$

$$\theta_{2d} = \cos(\pi t) \quad (15)$$

$$\theta_{3d} = \sin(\pi t) \quad (16)$$

工作装置的系统初始状态为 $[0.5 \ 0 \ 0.5 \ 0 \ 0.5 \ 0]$;控制参数取 $\text{diag}(c_1, c_2, c_3) = \text{diag}(80, 80, 80)$;趋近率系数为 $k = 0.5, \eta = 0.5$ 。

为验证所提迭代滑模控制策略的优良控制性能,笔者选取传统滑模方法进行对比研究,其方法如下:

传统滑模控制为:

$$\begin{cases} s_1 = ce + \dot{e} \\ \tau_1 = M[\ddot{\theta} + c\dot{e} + \varepsilon \text{sign}(s) + ks] + C + G - f \end{cases} \quad (17)$$

迭代滑模控制为:

$$\begin{cases} s_1 = ce + \dot{e} \\ \mu_{k+1}(t) = \mu_k(t) + M[\ddot{\theta} + c\dot{e} + \varepsilon \text{sign}(s) + ks] + \\ C + G - f \end{cases} \quad (18)$$

设迭代次数为 10 次,基于以上两种方法,笔者利用 MATLAB7.4/Simulink 对系统进行仿真。

控制系统结构框图如图 2 所示。

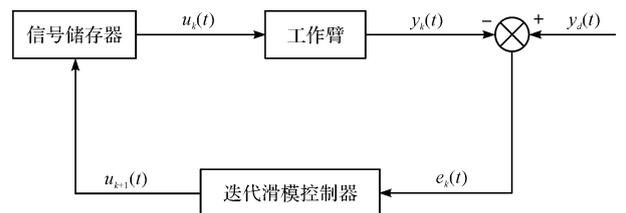


图2 基于迭代滑模控制的系统框图

$u_k(t), u_{k+1}(t)$ —前一次控制和当前控制的信号; $y_k(t), y_d(t)$ —输入信号和反馈信号; $e_k(t)$ —误差

3.2 仿真及结果分析

笔者利用 3.1 所提出的两种控制算法,采用上述

仿真参数分别进行仿真。

动臂关节位置跟踪曲线及其局部放大曲线如图 3 所示。

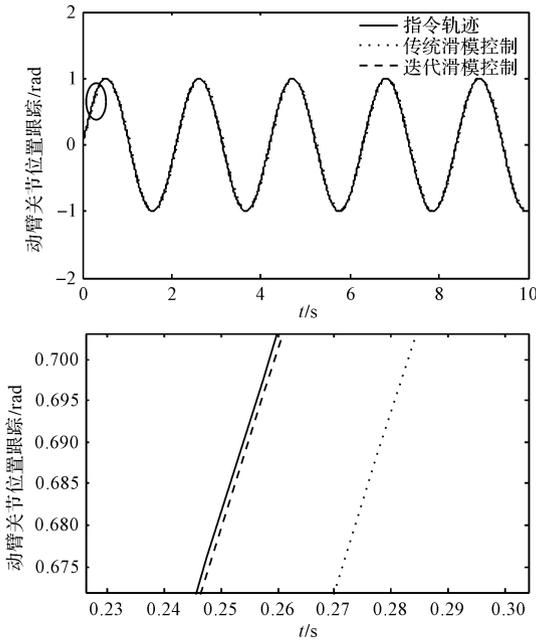


图 3 动臂关节位置跟踪曲线

从图 3 可以看出：

传统滑模控制方法和笔者所提迭代滑模控制策略都具有良好的轨迹跟踪性能,但由于结合了迭代学习控制和滑模控制的优点,迭代滑模控制器具有更小的跟踪误差,在完成已设置的迭代次数后,动臂关节位置跟踪效果明显优于采用传统滑模控制策略,说明笔者所提出的迭代滑模控制策略具有更好的跟踪性能,即能够使各关节跟踪速度更快、跟踪精度更高。

斗杆关节位置跟踪曲线及其局部放大曲线如图 4 所示。

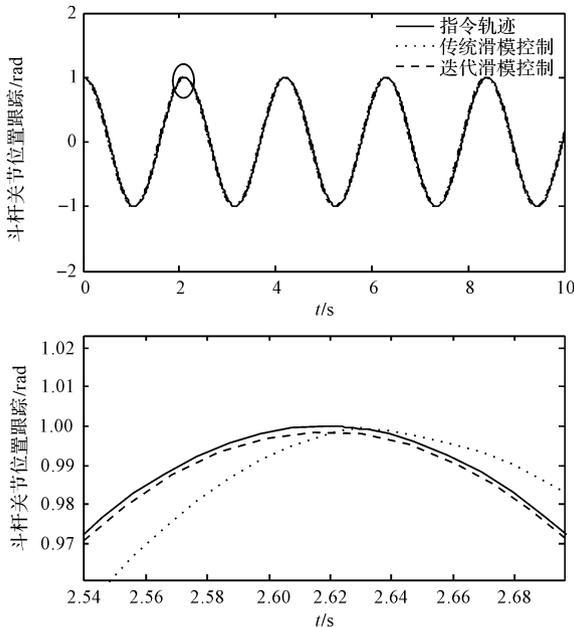


图 4 斗杆关节位置跟踪曲线

从图 4 可以看出：

在斗杆关节的位置跟踪曲线中,所提出的迭代滑模控制策略响应速度更快,跟踪误差更小。传统滑模控制方法的位置跟踪不仅误差大,而且响应时间更滞后。因此,在斗杆关节位置跟踪中,该迭代滑模控制策略具有更好的控制性能。

铲斗关节位置跟踪曲线及其局部放大曲线如图 5 所示。

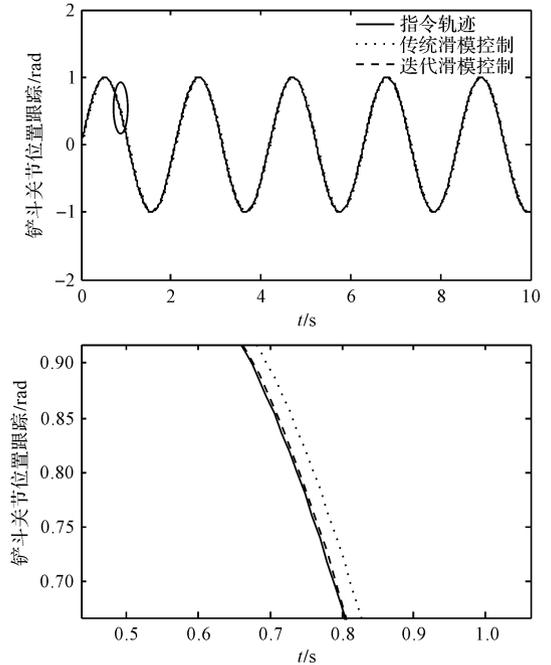
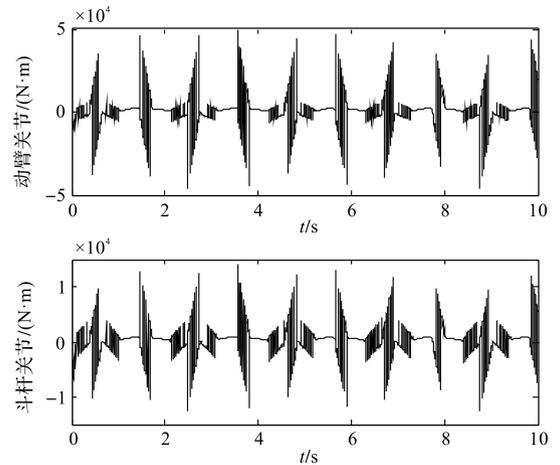


图 5 铲斗关节位置跟踪曲线

从图 5 可以看出：

在铲斗关节的位置跟踪中,两种控制方法都表现出了良好的响应速度,但传统滑模控制方法的跟踪误差仍远大于迭代滑模控制。由此可见,在铲斗关节位置跟踪中,迭代滑模控制策略具有良好的响应速度和极小的跟踪误差。

动臂、斗杆和铲斗各关节的实际控制输入如图 6 所示。



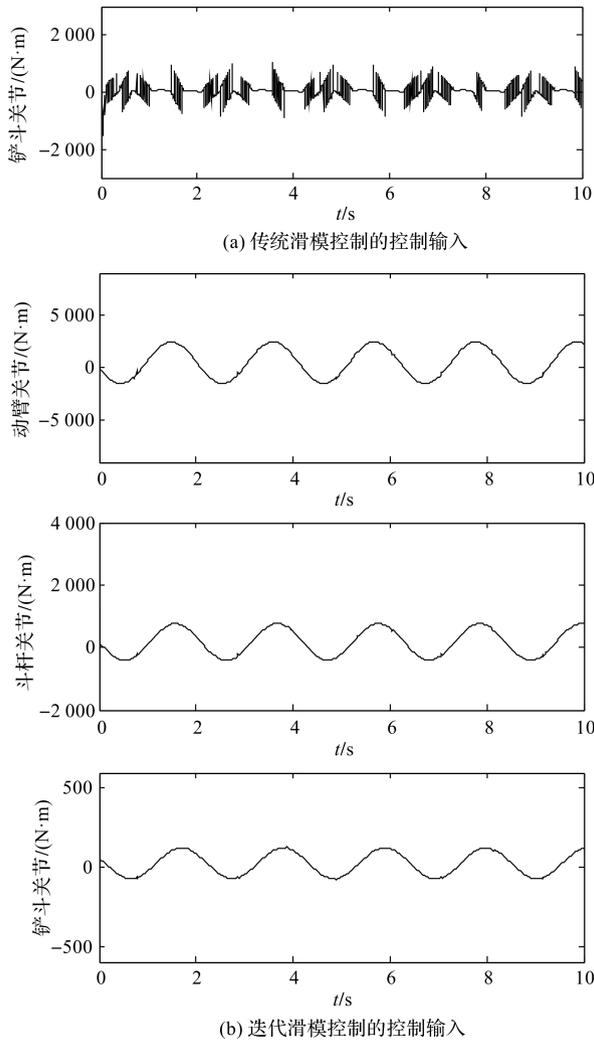


图6 传统滑模控制与迭代滑模控制的控制输入

从图6可知:

传统滑模控制方法下动臂、斗杆和铲斗有很大的扭矩,存在于各关节的控制输入曲线中,且随着时间不断变化,说明控制系统有严重的抖振现象;相比之下,图6(b)中迭代滑模控制下的控制输入曲线明显比图6(a)传统滑模控制下的曲线要更平滑,这说明迭代滑模控制器有效地滤除了高频信号,即迭代滑模控制策略能够更好地抑制抖振现象,且其鲁棒性强。由此可以证明,迭代滑模控制方法下动臂、斗杆和铲斗有良好的动态响应,更利于实际应用。

在两种控制方法下,传统滑模控制与迭代滑模控制的位置跟踪误差曲线如图7所示。

由图7可知:迭代滑模控制方法下动臂、斗杆和铲斗各关节的位置跟踪误差极小,并能更稳定地趋近于零。由此可见,迭代滑模控制策略能够优化系统的运动轨迹,有更好的跟踪性能,在跟踪精度上明显优于传统滑模控制策略。

两种控制方法下单位阶跃响应曲线如图8所示。

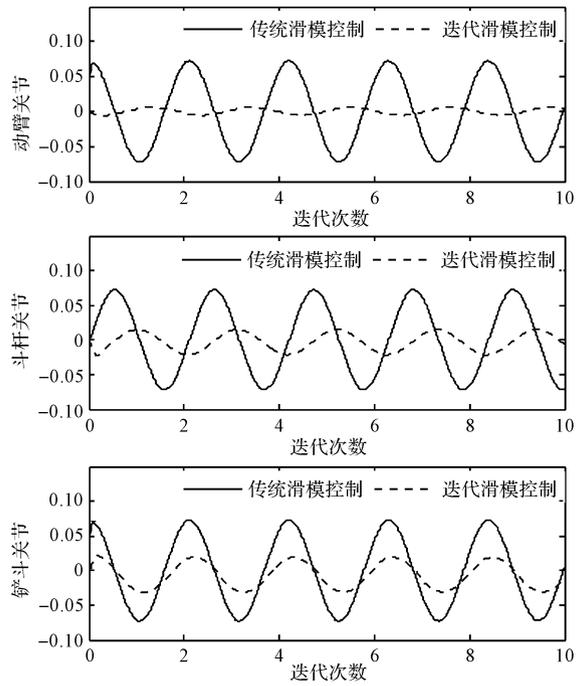


图7 两种控制方法下的位置跟踪误差

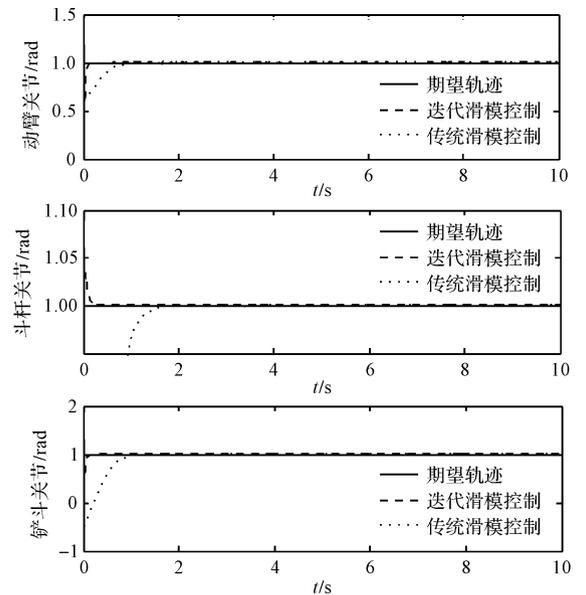


图8 两种方法控制下的单位阶跃响应

从图8中曲线可以看出,笔者所提出的控制方法可以使系统表现出更优的动态响应。

两种控制方法下的单位阶跃响应性能指标如表1所示。

表1 单位阶跃响应指标

控制方法	工作装置	最大超调量 $\sigma/\%$	调整时间 t_s/s	稳态误差 e_{ss}/rad
传统滑模控制	动臂	0.002	1.23	<0.000 5
	斗杆	0.010	1.29	<0.000 8
	铲斗	0.002	1.20	<0.000 6
迭代滑模控制	动臂	0.001	0.22	<0.000 2
	斗杆	0.040	0.21	<0.000 1
	铲斗	0.001	0.17	<0.000 1

由表 1 的数据可知,笔者所提出的迭代滑模控制方法调整时间更短,稳态误差更小,能更好地实现单位阶跃响应中动态性能指标和稳态性能指标。

4 结束语

由于挖掘机工作装置的非线性、时滞性特点,导致其工作效率低和机械磨损大,为此,笔者采用了一种迭代学习控制与滑模控制相结合的控制策略,对挖掘机工作装置各关节轨迹跟踪控制性能进行了研究。

笔者首先利用拉格朗日方程建立了挖掘机运动机构的动力学模型,然后采用所提迭代滑模控制策略,设计了存在系统建模误差和外界干扰等不确定因素的控制方案,并利用 Lyapunov 理论验证了所提控制器的稳定性,最后利用 MATLAB 对挖掘机工作装置的轨迹跟踪性能进行了数值仿真。

研究表明:

(1) 采用在迭代学习控制中引入滑模控制律的控制方法,可以实现对挖掘机工作装置各关节的位置跟踪。对于迭代次数的选择,仿真结果表明,7 次左右迭代就可以实现收敛,10 次迭代完全能够实现系统的高精度位置轨迹跟踪;相比于高次迭代,大大减小了其运算量;

(2) 该控制方法可以使控制器输入信号更加平滑,控制力矩更小、更合理,对抖振现象的抑制有很好的表现;该结果说明,与传统滑模控制方法相比,迭代滑模控制方法有更好的控制精度和更强的鲁棒性;

(3) 通过分析单位阶跃性能指标可以发现,笔者所采用的控制方法调整时间短、稳态误差小,具有更好的动态响应。

笔者提出的迭代滑模控制策略对解决挖掘机工作装置的非线性和参数不确定性问题具有很好的适用性,可将其应用于复杂工况下的挖掘机轨迹跟踪。

在后续的研究中,笔者拟将智能控制技术应用于工程机械,重点研究 5G 远程操控技术在挖掘机中的应用,实现智能型挖掘机控制系统的性能升级。

参考文献 (References):

- [1] 李运华,范茹军,杨丽曼,等. 智能化挖掘机的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报,2020,56(13):165-178.
- [2] 刘广军,刘可臻,孙波,等. 基于刚-柔耦合的反铲液压

挖掘机工作装置多体动力学分析与仿真[J]. 同济大学学报:自然科学版,2021,49(7):1053-1060.

- [3] CHOI J. Development of Time Varying Sliding Mode Controller with Fuzzy System for Automatic Excavator[C]//International Symposium on Automation & Robotics in Construction. Korea:[s. n.],2011:1267-1272.
- [4] 王刚,宋英杰,唐武生,等. 基于迭代学习的三自由度机械臂轨迹跟踪控制[J]. 吉林大学学报:信息科学版,2021,39(4):389-396.
- [5] CHEN S, FREEMAN C T. A decentralised iterative learning control framework for collaborative tracking[J]. **Mechatronics**,2020,72(3):102465.
- [6] 黄茹楠,顾波. 挖掘机轨迹跟踪的滑模变结构控制[J]. 控制工程,2010,17(2):131-134.
- [7] 李发喜,邓子龙,邓文娟. 基于低通滤波器的液压挖掘机工作装置轨迹跟踪滑模控制[J]. 辽宁石油化工大学学报,2016,36(3):50-53.
- [8] 张金萍,刘阔,林剑峰,等. 挖掘机的 4 自由度自适应模糊滑模控制[J]. 机械工程学报,2010,46(21):87-92.
- [9] KIM J, JIN M, CHOI W, et al. Discrete time delay control for hydraulic excavator motion control with terminal sliding mode control[J]. **Mechatronics**,2019,60:15-25.
- [10] YIN X X, PAN L, CAI S B. Robust adaptive fuzzy sliding mode trajectory tracking control for serial robotic manipulators[J]. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**,2021,72:101884.
- [11] XU J Q, YOON H S. Sliding mode control of hydraulic excavator for automated grading operation[J]. **SAE Int**,2018,11(2):113-123.
- [12] 解培强. 模糊滑模控制在挖掘机控制中的应用[D]. 太原:太原科技大学电子信息工程学院,2014.
- [13] 刘阔,郭大猛,刘杰,等. 液压挖掘机自适应模糊滑模控制的研究与仿真[J]. 东北大学学报:自然科学版,2009,30(11):1649-1652.
- [14] 陈海力,任鸿翔,杨柏丞,等. 基于迭代滑模的船舶动力定位非线性控制[J]. 上海海事大学学报,2020,41(3):31-35.
- [15] 索小娟,卫前伟. 改进模糊 PID 的称重式包装机智能控制[J]. 包装与食品机械,2020(1):55-60.
- [16] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2015.
- [17] DADRAS S, MOMENI H R. Fractional terminal sliding mode control design for a class of dynamical systems with uncertainty[J]. **Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation**,2012,17(1):367-377.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

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.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>