

控制与决策

Control and Decision

基于改进无模型自适应控制的挖掘机无人作业方法

陈阔, 刘畅, 骆曦, 华长春, 蔡登胜, 耿波

引用本文:

陈阔, 刘畅, 骆曦, 等. 基于改进无模型自适应控制的挖掘机无人作业方法[J]. *控制与决策*, 2025, 40(3): 785-793.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0363>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制](#)

Global sliding mode control of vehicle-mounted hybrid energy storage system based on exponential reaching law
控制与决策. 2021, 36(4): 885-892 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0478>

[求解约束优化问题的改进果蝇优化算法及其工程应用](#)

Improved fruit fly optimization algorithm for solving constrained optimization problems and engineering applications
控制与决策. 2021, 36(2): 314-324 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0557>

[输入受限下自主水下航行器路径跟踪的级联控制](#)

Path-following control of an AUV in cascade under input saturation
控制与决策. 2021, 36(12): 2964-2972 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0411>

[基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度](#)

Flight deck operations scheduling based on dual population fuzzy gravitational search algorithm
控制与决策. 2021, 36(11): 2751-2759 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0523>

[基于反步法的四轮车体跟踪控制半实物仿真研究](#)

Tracking control for four-wheel vehicle semi-physical simulation based on back-stepping method
控制与决策. 2021, 36(1): 90-96 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0471>

基于改进无模型自适应控制的挖掘机无人作业方法

陈阔¹, 刘畅¹, 骆曦^{1†}, 华长春¹, 蔡登胜², 耿波¹

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 广西柳工股份有限公司, 广西 柳州 545007)

摘要: 针对挖掘机无人作业, 考虑挖掘机工作装置液压系统的强非线性、参数不确定性、时变载荷和高能耗问题, 提出一种改进的全格式动态线性化无模型自适应控制方法. 首先, 通过分析驱动空间与任务空间的映射关系, 将挖掘机铲斗齿尖的轨迹跟踪问题转化为液压缸活塞杆伸缩量跟踪问题; 其次, 为了保证轨迹的连续性和平顺性、降低计算复杂度、减少系统在启动和停止时的不稳定性, 利用 5 次 NURBS 曲线插值方法对挖掘轨迹进行规划; 进一步, 设计改进的全格式动态线性化无模型自适应控制算法实现挖掘机无人作业, 为减少能量消耗在输入准则函数中引入能量函数的惩罚项, 在确保良好跟踪精度的同时实现最优能耗; 最后, 对所提方法进行实例仿真, 验证该方法的可行性和优越性.

关键词: 液压挖掘机; 无人作业; 轨迹跟踪; 无模型自适应控制; 数据驱动; 节能控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0363

引用格式: 陈阔, 刘畅, 骆曦, 等. 基于改进无模型自适应控制的挖掘机无人作业方法 [J]. 控制与决策, 2025, 40(3): 785-793.

Improved model-free adaptive control based unmanned excavator operation scheme

CHEN Kuo¹, LIU Chang¹, LUO Xi^{1†}, HUA Chang-chun¹, CAI Deng-sheng², GENG Bo¹

(1. College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Guangxi LiuGong Machinery Co., Ltd, Liuzhou 545007, China)

Abstract: This paper proposes an improved model-free adaptive control scheme for the unmanned operation of excavators, taking into account that the hydraulic system of excavators has strong nonlinearity, parameter uncertainty, time-varying load and high energy consumption of the excavator during operation. Firstly, the trajectory tracking problem of the bucket tooth tip of the excavator is transformed into a hydraulic cylinder piston rod expansion and contraction tracking problem by analyzing the mapping relationship between the drive space and the task space. Then, a quintic five times NURBS curve interpolation method is used to ensure the continuity and smoothness of the trajectory, reduce computational complexity and minimise system instability during startup and shutdown. Furthermore, the improved full-format dynamic linearized model-free adaptive control algorithm is designed to realize the unmanned operation of the excavator, and in order to reduce the energy consumption, a penalty term of the energy function is introduced into the input criterion function to realize the optimal energy consumption while ensuring the good tracking accuracy. Finally, an example simulation of the proposed scheme is carried out to verify its feasibility and superiority.

Keywords: hydraulic excavator; unmanned operation; trajectory tracking; model-free adaptive control; data-driven; energy saving control

0 引言

在经济增长迅猛的今天, 工程机械在国家经济发展中扮演着至关重要的角色, 特别是具备强大适应性的液压挖掘机, 广泛应用于众多行业, 如基础设施建设、物流、采矿和林业^[1]. 然而, 目前液压挖掘机的施

工质量在很大程度上仍然依赖于操作员的熟练程度和操作经验, 并且在有毒、危险的工作环境中, 可能危及操作人员的安全. 传统的液压挖掘机在实际作业中, 存在智能化程度低、可控性差、自主作业能力和适应性弱、控制系统可靠性和精确度不高以及灵

收稿日期: 2024-04-03; 录用日期: 2024-07-06.

基金项目: 广西科技重大专项 (桂科 AA22067064); 柳州市科技计划项目 (2022AAB0101).

责任编辑: 张国山.

[†]通信作者. E-mail: luox@ysu.edu.cn.

活性差等问题, 这些问题对施工效率和质量产生了严重的负面影响^[2-3]. 无人化作业是挖掘机发展的重要方向, 因为它可以提高挖掘作业的精度和效率, 应对危险和恶劣的工作条件, 并降低劳动力成本^[4-5]. 无人挖掘机实现自主挖掘的关键技术在于工作装置的轨迹规划与跟踪控制.

在无人挖掘机执行挖掘任务时, 轨迹规划是一个重要的环节, 它涉及将铲斗齿尖的预期作业路径转化为工作装置的一系列具体动作^[6]. 这个过程需要确保动作的平稳性和关节间的低冲击, 以满足特定的动态性能指标^[7].

无人挖掘机工作装置的运动控制是一个非常具有挑战性的课题, 因为其液压系统具有强非线性、参数不确定性和负载时变等特点, 严重影响了铲斗齿尖的跟踪精度^[8-9]. 为了解决这些问题, 国内外已有很多控制器被应用于挖掘机工作装置的轨迹跟踪. Feng 等^[10]为了提高典型重型电液位置系统的轨迹跟踪精度和鲁棒性, 提出了一种模糊自适应滑模控制器, 但滑模控制存在抖振现象, 影响控制精度. 此外, 基于非线性扰动观测器的滑模控制^[11]、模糊神经网络控制^[12]、终端滑模控制^[13]、扩展状态观测器^[14]等多种控制方法应用于挖掘机的轨迹跟踪控制, 均取得了满意的控制效果. 然而, 上述控制方法结构复杂, 通常依赖于模型, 并且参数调整复杂, 难以在工程实践中广泛应用.

当工作过程非常复杂且具有强非线性时, 准确数学模型是很难或不可能获得的, 近年来, 为了解决这些问题, 人们提出了数据驱动控制 (DDC) 方法. Okada 等^[15]考虑到环境条件会影响挖掘作业的性能, 设计了一种基于数据驱动模型预测控制 (DD-MPC) 系统. 虽然, 此方法不需要模型数据, 但是需要提前建立输入输出模型数据库, 增加了实际应用中的工作量. 无模型自适应控制 (MFAC) 是一类离散时间非线性系统的有效控制方法, 仅依赖于受控系统的在线测量数据, 而不依赖于任何模型信息^[16]. 此外, 它不需要任何外部的测试信号或训练过程. 基于上述优势, MFAC 算法近年来成为热门研究课题, 然而, MFAC 在挖掘机控制领域的研究仍然很少.

考虑到实际生产中降低成本的问题, 挖掘机的燃油消耗及能量消耗已成为衡量挖掘机作业的一个重要指标. 为此需要提出一种更优的控制方法, 使控制精度高的同时能够实现节能运行.

基于以上分析, 本文提出一种液压挖掘机工作装置轨迹规划及控制方法, 采用 5 次 NURBS 曲线插值方法对挖掘轨迹进行规划, 并设计基于改进的

全格式动态线性化无模型自适应控制的控制器.

本文的主要贡献有:

1) 本文利用外部倾角传感器检测挖掘机的姿态, 通过驱动空间与关节空间的映射关系, 将挖掘机各关节角转化为液压缸长度. 该方法简单方便、实时性高、便于调试维护.

2) 针对挖掘机挖掘轨迹需要保证连续性和平顺性、降低计算复杂程度、减少系统在启动和停止时的不稳定性问题, 本文采用 5 次 NURBS 曲线插值方法对挖掘轨迹进行规划.

3) 针对挖掘机工作装置液压系统有强非线性、参数不确定性和时变载荷的问题, 考虑到挖掘机工作时能量消耗大, 本文利用受控系统的输入输出数据设计改进的全格式动态线性化无模型自适应控制器, 在输入准则函数中加上能量函数的惩罚项, 在确保良好跟踪精度的同时实现最优能耗.

1 无人挖掘机系统

1.1 系统描述

该系统的工作原理描述如下: 工控机负责根据作业任务目标进行轨迹规划并将轨迹规划结果传递到车载控制器; 车载控制器接收来自传感器的位姿数据和轨迹规划信息, 通过执行控制算法, 计算出相应的控制量, 控制器随后通过发送信号调整电磁铁的磁力, 进而改变阀芯的位置, 控制工作阀的开闭, 以调节液压系统中液压缸的液流方向和流量. 这样的操作使得挖掘机工作装置的液压缸活塞杆能够精确地伸缩, 从而控制关节角的转动, 进而控制铲斗的位姿, 实现挖掘作业的自动化控制.

图 1 显示了无人挖掘机系统硬件原理, 包括工控机、挖掘机主体、液压缸、铲斗和倾角传感器.

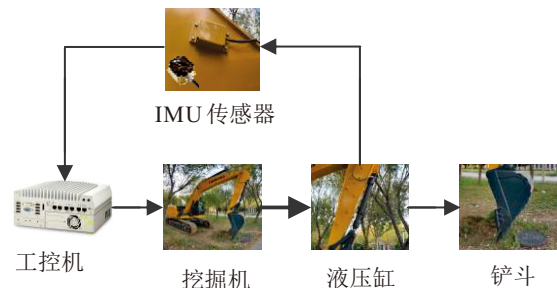


图1 无人挖掘机系统

1.2 数学模型的运动学分析

为了实现挖掘机工作装置的轨迹规划和跟踪控制, 必须对其运动学模型进行分析. 在本文中, 通过对液压挖掘机工作机理的深入研究, 采用 D-H 参数法和几何方法, 成功地建立液压挖掘机工作装置的运动学模型. 此外, 本文确定了铲斗齿尖的位

姿、各关节的旋转角度以及液压缸的长度之间的相互关系, 这些成果为后续的路径规划和控制策略提供了关键的理论依据。

本文在研究液压挖掘机的工作装置时, 将其视为一个具有 4 个自由度的连杆系统, 根据机器人学的 D-H 坐标系建立方法, 在工作装置的 4 个连接点及铲斗齿尖分别建立 D-H 坐标系. 如图 2 所示, 本文选取某型号的液压挖掘机作为研究对象, 并依据其具体的结构尺寸, 构建 D-H 表, 如表 1 所示。

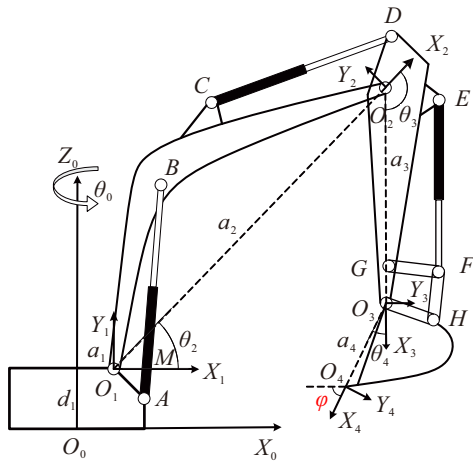


图2 挖掘机工作装置 D-H 坐标系

表1 挖掘机工作装置 D-H 坐标系参数

n	a_i/mm	d_i/mm	$\alpha_i/(\text{°})$	$\theta_i/(\text{°})$
1	270	1430	90	-180 ~ 180
2	3610	0	0	-40.18 ~ 59.17
3	1600	0	0	-153.7 ~ -36
4	950	0	0	-147.4 ~ 31

旋转坐标系是在回转中 \$O_0\$ 处建立的; \$O_1\$ 是动臂和底座的铰接点, 动臂坐标系建立在该铰接点处; \$O_2\$ 是斗杆和动臂的铰接点, 斗杆坐标系建立在该铰接点处; \$O_3\$ 是铲斗和斗杆的铰接点, 铲斗坐标系建立在该铰接点处; 齿尖坐标系建立在铲斗齿尖 \$O_4\$ 处。

\$[x, y, z, \varphi]^T\$ 是末端执行器即铲斗的位姿, 其中 \$[x, y, z]^T\$ 是铲斗齿尖相对于回转中心的坐标, \$\varphi\$ 是铲斗姿态角. 回转平台、动臂、斗杆与铲斗的关节角用 \$[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T\$ 表示, 其中 \$\theta_1\$ 是回转关节角, \$\theta_2\$ 是动臂关节角, \$\theta_3\$ 是斗杆关节角, \$\theta_4\$ 是铲斗关节角. 回转马达与液压缸活塞杆的运动对于各自所对应装置运动的影响用 \$[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4]^T\$ 表示. 其中: \$\lambda_1\$ 是回转马达转动角度, 与 \$\theta_1\$ 相等; \$\lambda_2\$ 是动臂液压缸长度; \$\lambda_3\$ 是斗杆液压缸长度; \$\lambda_4\$ 是铲斗液压缸长度。

为了实现无人挖掘机按照期望的轨迹运动, 首先, 通过逆运动学求解, 将铲斗位姿 \$[x, y, z, \varphi]^T\$ 转换为各关节角 \$[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T\$, 然后通过几何法求解, 将

关节空间描述 \$[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T\$ 转化为驱动空间描述 \$[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4]^T\$. 为了得到铲斗齿尖的实际轨迹与期望轨迹之间的误差, 还需要进行正运动学求解, 根据每个关节角计算出铲斗的位置。

1.2.1 正运动学分析

本文对挖掘机工作装置进行正运动学分析, 根据工作装置的各个关节角度求解得到的铲斗齿尖位姿坐标为

$$\begin{cases} x = \cos(\theta_1)[a_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos(\theta_2) + a_1], \\ y = \sin(\theta_1)[a_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos(\theta_2) + a_1], \\ z = a_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \sin(\theta_2) + d_1, \\ \varphi = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4. \end{cases} \quad (1)$$

1.2.2 逆运动学分析

由于挖掘机可以看作四自由度连杆机构, 自由度较少, 本文采用几何法对挖掘机进行运动学逆解分析. 将笛卡尔空间描述 \$[x, y, z, \varphi]^T\$ 逆解为关节空间描述 \$[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4]^T\$, 具体关系如下:

$$\begin{cases} \theta_1 = \tan^{-1} \frac{y}{x}, \\ \theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{a_2^2 + l_{O_1O_3}^2 - a_3^2}{2a_2l_{O_1O_3}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{z_{O_3} - d_1}{\frac{X_{O_3}}{\cos \theta_1} - a_1} \right), \\ \theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - l_{O_1O_3}^2}{2a_2a_3} \right) - \pi, \\ \theta_4 = \varphi - \theta_2 - \theta_3. \end{cases} \quad (2)$$

回转与动臂铰接点 \$O_1\$ 和斗杆与铲斗铰接点 \$O_3\$ 的距离 \$l_{O_1O_3}\$ 为

$$l_{O_1O_3} = \sqrt{\left(\frac{x_{O_4}}{\cos \theta_1} - a_1 \right)^2 + (z_{O_4} - d_1)^2}. \quad (3)$$

斗杆与铲斗铰接点 \$O_3\$ 的坐标值为

$$\begin{cases} x_{O_3} = x - \cos \theta_1 a_4 \cos \varphi, \\ y_{O_3} = y - \sin \theta_1 a_4 \cos \varphi, \\ z_{O_3} = z - a_4 \sin \varphi. \end{cases} \quad (4)$$

1.2.3 关节空间与驱动空间转化

在挖掘过程中, 液压挖掘机的各项动作都是通过控制液压缸活塞杆的伸缩实现的. 液压缸的长度改变导致关节角度改变, 这意味着工作装置的关节角度可以通过测量液压缸长度获得. 相反, 如果关节角度已知, 则同样可以计算出相应液压缸长度。

为方便计算, 设动臂液压缸 \$AB\$ 与水平轴线 \$x_1\$

的交点为 M .

根据关节空间描述 $[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T$ 求解驱动空间描述 $[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4]^T$ 的关系如下:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \theta_1, \\ \lambda_2 = [l_{O_1A}^2 + l_{O_1B}^2 - 2l_{O_1A}l_{O_1B} \cos(\angle AO_1M + \angle O_2O_1B + \theta_2)]^{\frac{1}{2}}, \\ \lambda_3 = [l_{O_2C}^2 + l_{O_2D}^2 - 2l_{O_2C}l_{O_2D} \cos(\pi - \angle O_1O_2C - \angle DO_2O_3 - \theta_3)]^{\frac{1}{2}}, \\ \lambda_4 = \sqrt{l_{GE}^2 + l_{GF}^2 - 2l_{GE}l_{GF} \cos \angle EGF}. \end{cases} \quad (5)$$

由于铲斗液压缸活塞杆的伸缩动作必须通过两个复杂的连杆机构传递,才能转换成铲斗绕斗杆的旋转运动.铲斗关节角度 θ_4 的变化导致铲斗机构的几何关系也相应改变,对于 $\angle EGF$ 进行求解时,需要根据两种不同的情况分别讨论.

$\angle EGF$ 的求解如下:

$$\begin{cases} l_{GH} = \sqrt{l_{O_3G}^2 + l_{O_3H}^2 - 2l_{O_3G}l_{O_3H} \cos \angle GO_3H}, \\ \angle O_3GH = \cos^{-1} \left(\frac{l_{O_3G}^2 + l_{GH}^2 - l_{O_3H}^2}{2l_{O_3G}l_{GH}} \right), \\ \angle FGH = \cos^{-1} \left(\frac{l_{GF}^2 + l_{GH}^2 - l_{FH}^2}{2l_{GF}l_{GH}} \right), \\ \angle EGF = 2\pi - \angle O_2GO_3 - \angle O_2GE - \angle FGH - \angle O_3GH. \end{cases} \quad (6)$$

其中:当 $\theta_4 \geq -95^\circ$ 时,有

$$\angle GO_3H = \pi - \angle O_2O_3G - \theta_4 - \angle HO_3O_4; \quad (7)$$

当 $\theta_4 < -95^\circ$ 时,有

$$\angle GO_3H = \pi + \angle O_2O_3G + \theta_4 + \angle HO_3O_4. \quad (8)$$

根据驱动空间描述 $[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4]^T$ 求解关节空间描述 $[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T$ 的关系如下:

$$\begin{cases} \theta_1 = \lambda_1, \\ \theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{l_{O_1A}^2 + l_{O_1B}^2 - \lambda_2^2}{2l_{O_1A}l_{O_1B}} \right) - \angle AO_1M - \angle O_2O_1B, \\ \theta_3 = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{l_{O_2C}^2 + l_{O_2D}^2 - \lambda_3^2}{2l_{O_2C}l_{O_2D}} \right) - \angle O_1O_2C - \angle DO_2O_3. \end{cases} \quad (9)$$

与上述过程中求解 $\angle EGF$ 类似,由于铲斗液压缸长度 λ_4 的变化导致铲斗机构的几何关系也相应改变,对于 θ_4 进行求解时,需要根据两种不同的情况分别讨论.

当 $\lambda_4 \leq 1.458\ 25\ \text{m}$, θ_4 的求解如下:

$$\theta_4 = \pi - \angle GO_3H - \angle O_2O_3G - \angle HO_3O_4. \quad (10)$$

当 $\lambda_4 > 1.458\ 25\ \text{m}$, θ_4 的求解如下:

$$\theta_4 = \angle GO_3H - \pi - \angle O_2O_3G - \angle HO_3O_4. \quad (11)$$

其中:

$$\begin{cases} \angle EGH = \cos^{-1} \left(\frac{l_{GE}^2 + l_{GF}^2 - \lambda_4^2}{2l_{GE}l_{GF}} \right), \\ \angle O_3GF = 2\pi - \angle O_2GO_3 - \angle O_2GE - \angle FGH - \angle EGF, \\ l_{O_3F} = \sqrt{l_{O_3G}^2 + l_{GF}^2 - 2l_{O_3G}l_{GF} \cos \angle O_3GF}, \\ \angle GO_3F = \cos^{-1} \left(\frac{l_{O_3G}^2 + l_{O_3F}^2 - l_{GF}^2}{2l_{O_3G}l_{O_3F}} \right), \\ \angle FO_3H = \cos^{-1} \left(\frac{l_{O_3F}^2 + l_{O_3H}^2 - l_{FH}^2}{2l_{O_3F}l_{O_3H}} \right), \\ \angle GO_3H = 2\pi - \angle GO_3F - \angle FO_3H. \end{cases} \quad (12)$$

本文所选挖掘机的工作装置的机械参数如表2所示.

表2 挖掘机工作装置的机械参数

符号	数值/mm	符号	数值/(°)
l_{O_1A}	540	$\angle AO_1M$	59
l_{O_1B}	1500	$\angle BO_1O_2$	25
$l_{O_1O_2}$	3600	$\angle O_1O_2C$	35
l_{O_2C}	1650	$\angle GO_3O_2$	5
l_{O_2D}	450	$\angle O_3O_2D$	150
l_{EG}	1150	$\angle O_2GO_3$	174
l_{O_3G}	250	$\angle EGO_2$	19
$l_{O_3O_4}$	950	$\angle HO_3O_4$	90
l_{O_3H}	310	$\angle EGO_3$	167
l_{GF}	400		
l_{FH}	400		

2 基于5次NURBS曲线插值的轨迹规划

在考虑铲斗齿尖轨迹的平滑性、计算复杂性、路径精度以及减少系统在启动和停止时的不稳定性等多个因素的基础上,本文选择采用5次非均匀有理B样条(NURBS)曲线插值方法,通过在挖掘机工作装置的关节空间进行轨迹规划,可以保证在整个操作过程中,工作装置的速度和加速度的连续性得到满足.

一条由 $n+1$ 个控制点定义的 k 次的 NURBS 曲线常常可以定义为

$$p(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)}. \quad (13)$$

其中: $u = \{a, \dots, a, \underbrace{u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}}_{k+1}, \underbrace{b, \dots, b}_{k+1}\}$,

一般的 $a = 0, b = 0, u$ 为 NURBS 曲线的节点矢量; ω_i 为第 i 个控制顶点对应的权重因子, 首末权重因子 $\omega_0, \omega_n > 0$, 其余 $\omega_i \geq 0$; d_i 为 NURBS 曲线的控制顶点坐标. 根据 Cox-deBoor 递推公式可以给出定义在非均匀节点矢量上 u 的第 i 个 k 阶规范 B 样条基函数 $N_{i,k}(u)$, 其表达式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1}; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u), & k \geq 1. \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0. \end{array} \right. \quad (14)$$

为了体现 5 次 NURBS 曲线插值的轨迹规划的优越性, 与实际中应用较多的多项式插值方法进行对比. 以无人挖掘机进行挖掘任务为例, 选取关键路径点如表 3 所示, 代入计算可求得符合挖掘机作业要求的挖掘轨迹.

表3 挖掘关键路径点及对应关节角度

时间/s	路径点坐标	动臂关节角/(°)	斗杆关节角/(°)	铲斗关节角/(°)
0	(5,-0.025)	11.80	-64.329	-23.91
4	(4.85,-1.025)	-4.10	52.31	-27.91
8	(4.5,-1.625)	-11.91	-49.31	-33.22
12	(4,-1.625)	-11.22	-59.03	-41.51
16	(3.65,-1.025)	-5.10	-68.659	-60.52
20	(3.5,-0.025)	9.51	-82.60	-73.65

基于 5 次 NURBS 曲线插值的关节空间轨迹规划结果与多项式插值的关节空间轨迹规划结果的对比如图 3 和图 4 所示.

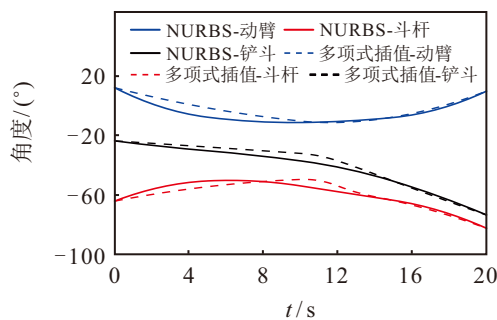


图3 关节空间 NURBS 曲线插值关节角

将得到的关节空间的轨迹规划结果, 通过上文所述的正运动学进行分析, 可以求得规划后的挖掘作业轨迹如图 5 所示.

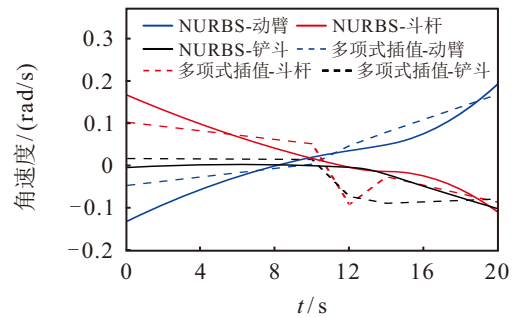


图4 挖掘机各关节角速度

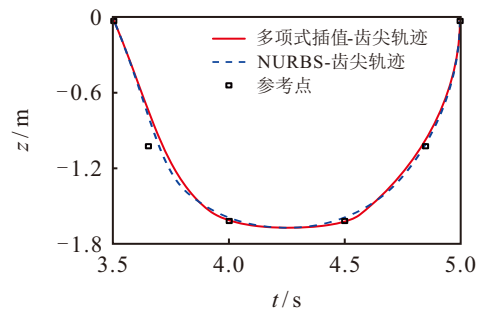


图5 挖掘机铲斗齿尖轨迹

上述轨迹规划的结果表明, 两种规划方法得到的铲斗齿尖的运动轨迹几乎通过了期望轨迹上的所有关键点, 但是利用 NURBS 曲线在关节空间中进行规划所得的关节角度曲线和角速度曲线相对较为平滑.

3 改进的无模型自适应控制

3.1 全格式动态线性化

本文对系统动态线性化处理时同时考虑到某一滑动时间窗口内的全部控制输入变化量以及系统输出变化量对下一时刻输出变化量的影响, 称为全格式动态线性化 (FFDL) 方法. 使用该方法可提供更多的伪梯度分量, 能更好地描述原系统中可能存在的复杂动态特性.

由于挖掘机工作装置液压系统是一个非线性的、时变的、难以建模的系统, 可以用一般单输入单输出 (SISO) 离散时间非线性系统表示, 即

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), \dots, u(k-n_u)). \quad (15)$$

其中: $u(k) \in \mathbb{R}, y(k) \in \mathbb{R}$ 分别是 k 时刻系统的输入和输出; n_y 和 n_u 是两个未知正整数; $f(\cdot)$ 是未知的非线性函数.

针对挖掘机工作装置液压控制系统 (15) 定义 $\mathbf{H}_{L_y, L_u}(k) \in \mathbb{R}^{L_y + L_u}$ 为一个在输入相关的滑动时间窗口 $[k - L_u + 1, k]$ 内的所有控制输入信号以及在输出相关的滑动时间窗口 $[k - L_y + 1, k]$ 内的所有系统输出信号组成的向量, 即

$$\mathbf{H}_{L_y, L_u}(k) = [y(k), \dots, y(k - L_y + 1), \\ u(k), \dots, u(k - L_u + 1)]^T, \quad (16)$$

其中当满足 $k \leq 0$ 时, 有 $\mathbf{H}_{L_y, L_u}(k) = \mathbf{0}_{L_y + L_u}$. 整数 $L_y, L_u (0 \leq L_y \leq n_y, 0 \leq L_u \leq n_u)$ 被称为伪阶数, $\mathbf{0}_{L_y + L_u}$ 是维度为 $L_y + L_u$ 的零向量. 给出如下假设.

假设 1 系统 (13) 的输入输出数据可测、可控, 即对于一致有界的期望输出信号 $y^*(k)$, 存在一致有界可行的输入信号 $u(k)$, 使得在该输入信号驱动下, 系统的输出 $y(k)$ 趋于期望输出信号 $y^*(k)$.

假设 2 $f(\cdot)$ 关于各变量都存在连续的偏导数.

假设 3 系统满足广义 Lipschitz 条件, 即对于 $k_1 \neq k_2, k_1, k_2 \geq 0$ 和 $\mathbf{H}_{L_y, L_u}(k_1) \neq \mathbf{H}_{L_y, L_u}(k_2)$, 有如下不等式:

$$|y(k_1 + 1) - y(k_2 + 1)| \leq \\ b \|\mathbf{H}_{L_y, L_u}(k_1) - \mathbf{H}_{L_y, L_u}(k_2)\|. \quad (17)$$

其中: $y(k_i + 1) = f(y(k_i), \dots, y(k_i - n_y), u(k_i), \dots, u(k_i - n_u))$; $i = 1, 2$; $b > 0$ 是一个常数.

记 $\Delta \mathbf{H}_{L_y, L_u}(k) = [\Delta y(k), \dots, \Delta y(k - L_y + 1), \Delta u(k), \Delta u(k - L_u + 1)]$, 给出如下引理.

引理 1^[17] 若非线性系统满足假设 1~假设 3, 给定 $0 \leq L_y \leq n_y, 0 \leq L_u \leq n_u$, 当 $\|\mathbf{H}_{L_y, L_u}(k)\| \neq 0$ 时, 一定存在一个被称为伪梯度 (PG) 的时变参数向量 $\phi_{f, L_y, L_u}(k) \in \mathbb{R}^{L_y + L_u}$, 使得系统 (15) 可以转化为如下基于全格式动态线性化数据模型^[17]:

$$\Delta y(k + 1) = \phi_{f, L_y, L_u}^T(k) \Delta \mathbf{H}_{L_y, L_u}(k). \quad (18)$$

其中: 对于任意时刻 k , $\phi_{f, L_y, L_u}(k) = [\phi_1(k), \dots, \phi_{L_y}(k), \phi_{L_y+1}(k), \dots, \phi_{L_y+L_u}(k)]^T \in \mathbb{R}^{L_y+L_u}$ 为未知但有界的.

3.2 改进的无模型自适应控制准则函数

考虑能量函数的惩罚项, FFDL-iMAFAC 的改进控制输入准则函数选为

$$J(u(k)) = |y^*(k + 1) - y(k + 1)|^2 + \\ \lambda |u(k) - u(k - 1)|^2 + \xi |u(k)|^2. \quad (19)$$

其中: $\lambda > 0, \xi > 0$ 是权重因子, 作用是限制控制输入的变化率和挖掘机的能量消耗.

将式 (18) 代入准则函数 (19) 中, 对 $u(k)$ 求导, 并令其等于零, 得到如下控制律表达式:

$$u(k) = \frac{(\lambda + |\phi_{L_y+1}(k)|^2)u(k - 1) + \\ \frac{\rho_{L_y+1} \phi_{L_y+1}(k)(y^*(k + 1) - y(k))}{\lambda + |\phi_{L_y+1}(k)|^2 + \xi} - \\ \frac{\phi_{L_y+1}(k) \sum_{i=1}^{L_y} \rho_i \phi_i(k) \Delta y(k - i + 1)}{\lambda + |\phi_{L_y+1}(k)|^2 + \xi} - \\ \frac{\phi_{L_y+1}(k) \sum_{i=L_y+2}^{L_y+L_u} \rho_i \phi_i(k) \Delta u(k - L_y - i + 1)}{\lambda + |\phi_{L_y+1}(k)|^2 + \xi}}{\lambda + |\phi_{L_y+1}(k)|^2 + \xi}. \quad (20)$$

其中: $\rho_i \in (0, 1]$, $i = 1, 2, \dots, L_y + L_u$ 是步长因子, 可使控制算法设计具有更大的灵活性.

3.3 PG 估计算法

需要对时变参数矩阵 $\phi_{f, L_y, L_u}(k)$ 进行实时估计, 引入 PG 向量估计准则函数^[17]

$$J(\phi_{f, L_y, L_u}(k)) = \\ |y(k) - y(k - 1) - \phi_{f, L_y, L_u}^T(k) \Delta \mathbf{H}_{L_y, L_u}(k - 1)|^2 + \\ \mu \|\phi_{f, L_y, L_u}(k) - \hat{\phi}_{f, L_y, L_u}(k - 1)\|^2, \quad (21)$$

其中 $\mu > 0$ 是约束相邻参数的变化率的权重因子.

根据最优条件, 对式 (21) 关于 $\phi_{f, L_y, L_u}(k)$ 求极值, 利用矩阵求逆引理可得如下 PG 的估计算法:

$$\hat{\phi}_{f, L_y, L_u}(k) = \\ \hat{\phi}_{f, L_y, L_u}(k - 1) + \\ \frac{\eta \Delta \mathbf{H}_{L_y, L_u}(k - 1)}{\mu \|\mathbf{H}_{L_y, L_u}(k - 1)\|^2} \times [y(k) - y(k - 1) - \\ \hat{\phi}_{f, L_y, L_u}(k - 1) \Delta \mathbf{H}_{L_y, L_u}(k - 1)]. \quad (22)$$

其中: 加入步长因子 $\eta \in (0, 2]$ 是为了使控制算法的设计具有灵活性; $\hat{\phi}_{f, L_y, L_u}(k)$ 是 $\phi_{f, L_y, L_u}(k)$ 的估计值.

3.4 具有参数重置算法的控制方案

为了增强算法的鲁棒性, 提高 PG 估计算法对时变参数的跟踪能力, 给出一种参数重置机制^[17].

如果 $\|\hat{\phi}_{f, L_y, L_u}(k)\| \leq \varepsilon$ 或 $\|\Delta \mathbf{H}_{L_y, L_u}(k - 1)\| \leq \varepsilon$ 或 $\text{sign}(\hat{\phi}_{L_y+1}(k)) \neq \text{sign}(\hat{\phi}_{L_y+1}(1))$, 则

$$\hat{\phi}_{f, L_y, L_u}(k) = \hat{\phi}_{f, L_y, L_u}(1). \quad (23)$$

其中: $\hat{\phi}_{f, L_y, L_u}(1)$ 是 $\hat{\phi}_{f, L_y, L_u}(k)$ 的初始化值, ε 是一个充分小的正数, $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数.

综上所述, 控制算法 (20)、PG 估计算法 (22) 和

重置算法 (23) 共同构成了 FFDL-iMFAC 控制器, 其结构框图见图 6。

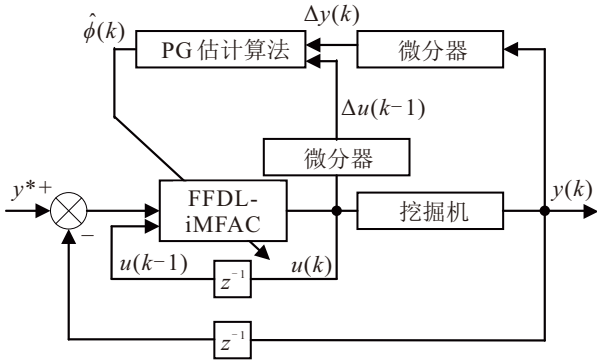


图6 FFDL-iMFAC 控制结构

4 仿真验证

为了证实本文提出的无人挖掘机轨迹跟踪方法的有效性以及 FFDL-iMFAC 控制策略的优越性, 本节将对挖掘机控制系统进行仿真验证, 对 PID、变论域模糊 PID、FFDL-MAFAC 和 FFDL-iMFAC 控制器进行联合仿真, 对比 4 种控制方法的仿真效果。除了采用常规的阶跃响应信号验证控制器的效果之外, 还特定设计了在挖掘作业这一工况下, 验证控制器对挖掘机工作装置轨迹跟踪的控制效果。

挖掘机工作装置液压控制系统如图 7 所示。

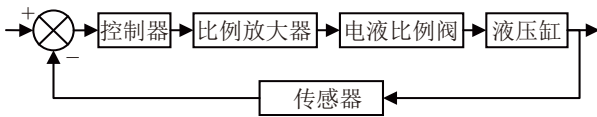


图7 挖掘机工作装置液压控制系统

经分析可得液压控制系统简化的数学模型

$$\frac{w_h^2 K_a K_b K_q}{\tau A} U = y^{(4)} + \left(2\xi_h w_h + \frac{1}{\tau}\right) y^{(3)} + \left(w_h^2 + \frac{2\xi_h w_h}{\tau}\right) \ddot{y} + \frac{w_h^2}{\tau} \dot{y}. \quad (24)$$

其中: U 是输入电压; y 是活塞杆的位移; τ 是液压缸的时间常数; w_h 是液压缸的固有频率; ξ_h 是液压缸的液压阻尼比; K_a 是比例放大系数; K_b 是电液比例阀流量增益; K_q 是滑阀流量增益系数; A 是液压缸无杆腔的有效工作面积。

动臂、斗杆、铲斗仿真系统的具体参数见表 4~表 6。

表4 动臂液压控制系统参数

符号	数值	符号	数值
τ	0.0318	$K_a/(A/V)$	0.3
w_h/Hz	755.497	$K_b/(\text{m}^3/(\text{s} \cdot A))$	6.014×10^{-3}
ξ_h	0.0625	$K_q/(\text{m}^2/\text{s})$	2.539
A/m^2	5.766×10^{-3}		

表5 斗杆液压控制系统参数

符号	数值	符号	数值
τ	0.0318	$K_a/(A/V)$	0.3
w_h/Hz	843.049	$K_b/(\text{m}^3/(\text{s} \cdot A))$	6.014×10^{-3}
ξ_h	0.0383	$K_q/(\text{m}^2/\text{s})$	2.539
A/m^2	7.812×10^{-3}		

表6 铲斗液压控制系统参数

符号	数值	符号	数值
τ	0.0318	$K_a/(A/V)$	0.3
w_h/Hz	870.388	$K_b/(\text{m}^3/(\text{s} \cdot A))$	6.014×10^{-3}
ξ_h	0.0566	$K_q/(\text{m}^2/\text{s})$	2.539
A/m^2	6.348×10^{-3}		

通过多次的仿真实验分析, 根据试凑法确定了一组较为理想的 PID 控制参数 $K_p = 5, K_i = 200, K_d = 1$ 。参考文献 [18] 利用 Matlab 上专用于模糊控制器设计的 fuzzy toolbox 搭建变论域模糊 PID 控制器模型。MFAC 算法因其自身有良好的鲁棒性, 其性能受参数变动的的影响较小, 且由于伪梯度是慢时变参数, 对参数的变动和系统结构不敏感。仿真实验表明, 在一定参数范围内, 不同参数值的选取均可实现满意的控制效果。选择 FFDL-MFAC、FFDL-iMFAC 的参数为 $\eta = 0.2, \mu = 0.5, \rho_1 = \rho_2 = 1, \lambda = 0.04$, FFDL-iMFAC 的能量限制常数 $\xi = 0.05$ 。

为了更清晰地比较 4 种控制方案的跟踪性能, 引入均方根误差 (RMSE) 指标的计算公式

$$\text{RMSE}(\cdot) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |s_n|^2}. \quad (25)$$

其中: 式 (25) 是跟踪误差的均方根; s_n 是第 n 个采样时刻, 实际位置点与期望轨迹上相应时刻位置点之间的距离。

定义能量消耗性能指标公式为

$$W = \sum_{n=1}^N u_n^2. \quad (26)$$

其中: 式 (26) 是能量消耗性能指标, u_n 是第 n 个采样时刻输入的电压信号。

4.1 对阶跃输入的响应

以挖掘机动臂为例, 为对比 PID、变论域模糊 PID、FFDL-MAFAC 和 FFDL-iMFAC 四种控制方法的动态响应特性, 将阶跃信号作为控制器的输入, 得到动臂液压缸活塞杆伸缩量的曲线, 4 种控制方法的控制效果对比如图 8 和表 7 所示。

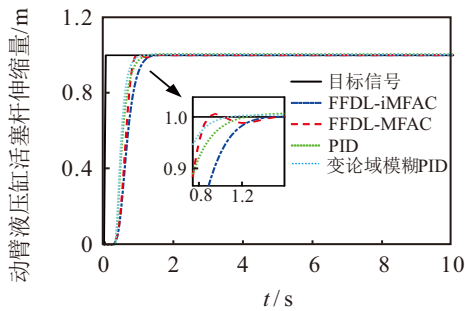


图8 阶跃输入动臂液压缸跟踪效果

表7 阶跃输入动臂液压缸跟踪性能对比

控制方法	误差均方根	改善比/%	能量消耗	节约率/%
PID	0.169	—	79.292	—
变论域模糊PID	0.151	10.650	98.933	-24.770
FFDL-MFAC	0.154	8.876	67.390	15.010
FFDL-iMFAC	0.143	15.385	46.902	40.849

从图8和表7中可以观察到,所有4种控制算法均能满足控制要求.然而,明显可见FFDL-iMFAC控制算法未出现超调现象,并且其均方根误差和能量消耗均为最低,因此相较于其他几种控制算法,FFDL-iMFAC控制器更贴合挖掘机控制的需求.

4.2 对挖掘轨迹跟踪

针对挖掘机进行挖掘作业的情况,本文采用上述提出的5次NURBS曲线插值方法规划铲斗齿尖的运动轨迹,并将此轨迹作为控制对象的目标轨迹.在此基础上,研究分析4种不同控制算法在实际挖掘作业中对工作装置运动轨迹跟踪控制的效果,轨迹跟踪控制效果对比如图9和表8所示.

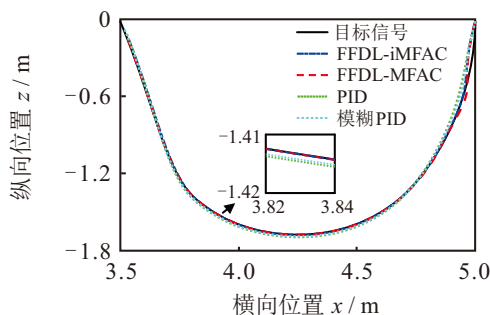


图9 挖掘机铲斗齿尖轨迹跟踪效果

表8 挖掘机铲斗齿尖轨迹跟踪性能对比

控制方法	误差均方根	改善比/%	能量消耗	节约率/%
PID	0.071	—	1.870	—
变论域模糊PID	0.063	11.268	1.987	-6.257
FFDL-MFAC	0.033	53.521	1.568	16.150
FFDL-iMFAC	0.045	36.620	1.284	31.337

在仿真实验的初始阶段,4种控制策略均未能立即追踪铲斗的运动轨迹,这主要是由于从控制器发出指令到铲斗开始实际挖掘的一系列控制指令转换

环节中存在时间延迟,这一现象与实际工作中的情况相符.在对比中可以看出,FFDL-MFAC和FFDL-iMFAC控制系统的铲斗齿尖轨迹跟踪能力明显优于传统PID控制和变论域模糊PID控制,尤其是FFDL-iMFAC控制系统,在均方根误差较低的情况下能量消耗最低.验证了在挖掘机工作装置轨迹跟踪控制中应用FFDL-iMFAC算法的优越性.

5 结论

本文针对挖掘机无人作业,提出了一种改进的全格式动态线性化无模型自适应控制方法.首先,采用5次NURBS曲线插值方法对挖掘轨迹进行规划,并将挖掘机铲斗齿尖的轨迹跟踪问题转化为液压缸活塞杆伸缩量跟踪问题.考虑到挖掘机工作装置液压系统模型不确定性大和工作时能量消耗高,设计了一种改进的全格式动态线性化无模型自适应控制器,并在输入准则函数中引入能量函数的惩罚项以降低能量消耗.这种方法可以在确保良好跟踪精度的同时实现最优能耗.利用Matlab进行仿真验证,通过分析对比可知,使用FFDL-iMFAC算法的控制方法能使挖掘机以最小的能量消耗,较小的误差跟踪目标轨迹.下一步的工作是考虑挖掘机系统实际工作中存在执行器受限问题.

参考文献 (References)

- [1] Dadhich S, Bodin U, Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines[J]. *Automation in Construction*, 2016, 68: 212-222.
- [2] Jung T, Raduenz H, Krus P, et al. Boom energy recuperation system and control strategy for hydraulic hybrid excavators[J]. *Automation in Construction*, 2022, 135: 104046.
- [3] Vahdatikhaki F, Langroodi A K, Scholtenhuis L O, et al. Feedback support system for training of excavator operators[J]. *Automation in Construction*, 2022, 136: 104188.
- [4] He X Y, Jiang Y. Review of hybrid electric systems for construction machinery[J]. *Automation in Construction*, 2018, 92: 286-296.
- [5] Yang T, Zhang B, Hong H C, et al. Motion control for earth excavation robot based on force pre-load and cross-coupling compensation[J]. *Automation in Construction*, 2022, 141: 104402.
- [6] Zhang L J, Zhao J X, Long P X, et al. An autonomous excavator system for material loading tasks[J]. *Science Robotics*, 2021, 6(55): 3164.
- [7] 贾龙飞, 乔尚岭, 陶云飞, 等. 冗余机械臂逆运动学求解方法研究进展[J]. *控制与决策*, 2023, 38(12): 3297-3316.
(Jia L F, Qiao S L, Tao Y F, et al. Research progress on

- inverse kinematics solution methods of redundant manipulators[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(12): 3297-3316.)
- [8] Guo Y P, Cui H T, Li S L. Excavator joint node-based pose estimation using lightweight fully convolutional network[J]. *Automation in Construction*, 2022, 141: 104435.
- [9] Feng H, Yin C B, Cao D H. Trajectory tracking of an electro-hydraulic servo system with an new friction model-based compensation[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28(1): 473-482.
- [10] Feng H, Jiang J Y, Chang X D, et al. Adaptive sliding mode controller based on fuzzy rules for a typical excavator electro-hydraulic position control system[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 126: 107008.
- [11] Wang Q, Shen Y Y, Wang J X, et al. Free-shape contour control for excavators based on cross-coupling and double error pre-compensation[J]. *Automation in Construction*, 2024, 160: 105336.
- [12] Shen W, Wang J H. Adaptive fuzzy sliding mode control based on pi-sigma fuzzy neural network for hydraulic hybrid control system using new hydraulic transformer[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, 17(7): 1708-1716.
- [13] Kim J, Jin M L, Choi W, et al. Discrete time delay control for hydraulic excavator motion control with terminal sliding mode control[J]. *Mechatronics*, 2019, 60: 15-25.
- [14] Dao H V, Na S, Nguyen D G, et al. High accuracy contouring control of an excavator for surface flattening tasks based on extended state observer and task coordinate frame approach[J]. *Automation in Construction*, 2021, 130: 103845.
- [15] Okada T, Yamamoto T, Doi T, et al. Database-driven model predictive control system for online adaptation of an autonomous excavator to environmental conditions[J]. *Control Engineering Practice*, 2024, 145: 105843.
- [16] 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: 1-13.
(Hou Z S, Jin S T. Model-free adaptive control: Theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2013: 1-13.)
- [17] Hou Z S, Xiong S S. On model-free adaptive control and its stability analysis[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(11): 4555-4569.
- [18] 唐家朋. 无人操纵挖掘机轨迹规划与控制[D]. 西安: 长安大学, 2021: 54-58).
(Tang J P. Trajectory planning and control of unmanned excavator[D]. Xi'an: Changan University, 2021: 54-58.)

作者简介

陈阔 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为非线性控制、工程机械系统智能化, E-mail: ck@stumail.yzu.edu.cn;

刘畅 (1999-), 男, 博士生, 主要研究方向为挖掘机智能控制方案, E-mail: changliu@stumail.yzu.edu.cn;

骆曦 (1989-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为非线性动力系统的控制及应用、智能控制与智能装备、工程机械系统智能化, E-mail: luox@yzu.edu.cn;

华长春 (1979-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为非线性动力系统的控制及应用、网络化控制系统的分析与综合、基于数据驱动的故障诊断和容错控制, E-mail: cch@yzu.edu.cn;

蔡登胜 (1971-), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要研究方向为工程机械整机系统控制、电液运动控制、智能遥控操作、物联网、无人驾驶自主作业, E-mail: caids@liugong.com;

耿波 (1998-), 男, 硕士生, 主要研究方向为智能控制与智能装备、工程机械系统智能化, E-mail: geng_bo@163.com.