

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614976

挖掘机器人轨迹跟踪控制优化及协同评价研究

范厚禄, 贺湘宇, 吴卓禹, 杨子涵, 蔡世鳌

(长沙理工大学机械与运载工程学院 长沙 410004)

摘要:为了探究挖掘机器人在作业工况下能效协同优化机制,建立了挖掘机器人机械系统、液压系统和轨迹跟踪控制系统的联合仿真平台,并采用了 3 种典型工况环境。轨迹规划采用五次多项式插值法,控制器模型则采用模糊比例-积分-微分控制器(F-PID)控制方法。基于轨迹跟踪原理,提出分布式液动力单元驱动回路。同时,基于轨迹跟踪控制,提出了一种综合协同优化粒子群算法的算法(ISO-PSO),用于优化 F-PID 控制器的参数,并在此基础上还提出了一种多指标协同评价模型,以评价控制策略的效果,仿真得出在 3 种工况下使用 ISO-PSO 算法控制的下动臂、上动臂、斗杆、铲斗的多指标综合数值显著减小,以 WC-I 为例,下动臂基于 ISO-PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值比比例-积分-微分控制器(PID)、F-PID 和粒子群优化算法(PSO)优化 F-PID 的平均多指标综合数值分别减小了 63%、54% 和 30%,上动臂基于 ISO-PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值比 PID、F-PID 和 PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值分别减小了 63%、56% 和 38%,斗杆基于 ISO-PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值比 PID、F-PID 和 PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值分别减小了 64%、56% 和 30%,铲斗基于 ISO-PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值比 PID、F-PID 和 PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值分别减小了 41%、34% 和 12%。最后,面向挖掘机器人的机-液一体化建模和联合仿真平台搭建了挖掘机器人轨迹跟踪控制实验验证体系,证明了挖掘机器人轨迹跟踪控制实验验证体系具有可行性。

关键词: 挖掘机器人; 轨迹跟踪; F-PID; ISO-PSO; 多指标协同评价

中图分类号: TH137.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.45

Trajectory tracking control optimization and collaborative evaluation of an excavator robots

Fan Houlu, He Xiangyu, Wu Zhuoyu, Yang Zihan, Cai Shiao

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: To investigate the energy-efficiency collaborative optimization mechanism of excavator robots under typical operating conditions, this paper establishes a co-simulation platform integrating the mechanical system, hydraulic system and trajectory tracking control system of excavator robots for three typical working conditions. Quintic polynomial interpolation is used for trajectory planning, and fuzzy PID (F-PID) is adopted for controller design. Based on the principle of trajectory tracking, a distributed hydraulic power unit drive circuit is proposed. Meanwhile, an integrated synergistic optimized particle swarm optimization (ISO-PSO) algorithm is proposed to optimize the parameters of the F-PID controller, and a multi-index collaborative evaluation model is further established to evaluate the performance of control strategies. Simulation results indicate that the comprehensive multi-index values of the lower boom, upper boom, arm and bucket optimized by the ISO-PSO algorithm are significantly decreased under all three working conditions. Taking WC-I as an example, compared with the conventional proportional-integral-derivative (PID), F-PID, and PSO-optimized F-PID, the average multi-index comprehensive values based on ISO-PSO-optimized F-PID are reduced by 63%, 54%, and 30% for the lower boom, respectively; 63%, 56%, and 38% for the upper boom, respectively; 64%, 56%, and 30% for the stick, respectively; and 41%, 34%, and 12% for the bucket, respectively. Finally, an experimental verification system for trajectory tracking control of excavator robots is constructed based on electromechanical - hydraulic integrated modeling and the co-simulation platform, demonstrating the feasibility of the proposed system.

Keywords: excavator robot; trajectory tracking; F-PID; ISO-PSO; multi-index collaborative evaluation

0 引言

挖掘机器人被广泛应用于道路施工、土石方开挖和矿山采掘,其运动性能直接关系到整机的施工效率与能效水平^[1-2]。随着工程机械向智能化、自主化发展,自主成形、精细作业和协同施工等新型应用场景^[3-4],对挖掘机器人的轨迹跟踪精度、运动平稳性及能耗控制提出了更高要求,而其多自由度耦合和机-电-液一体化特性也显著增加了轨迹控制的复杂性^[5]。

在机-电-液混合驱动条件下,挖掘机器人存在液压非线性强、参数时变和负载扰动显著等特点,执行缸在换向及重载工况下易产生冲击与振动,进而导致末端轨迹误差增大、系统平稳性下降和能量利用效率降低。这一问题不仅影响作业质量,也加剧了部件磨损与能量浪费,因此亟需在保证轨迹精度的前提下,实现液压缸运动平稳性与整机能耗表现的协同优化。

在挖掘机器人及机电液控制系统的轨迹控制领域^[6],已有大量工作围绕执行器位置控制提出改进算法,如自适应滑模、比例-积分-微分控制器(proportional-integral-derivative, PID)、遗传算法或粒子群优化的PID等方法。例如Yan等^[7]提出了一种改进的粒子群优化算法,结合了交叉和突变技术。该算法优化了多个航点的时间分配,并利用最小抖动法生成笛卡尔轨迹。优化器与轨迹生成器之间的合作最终决定了最优轨迹。最后,还进行数值模拟和物理实验以验证轨迹优化方法的有效性。结果表明,所提方法有效减少了运动中因链节柔韧性引起的轨迹跟踪误差,并抑制了运动后残余振动。Zheng等^[8]提出一种将递归最小二乘法与改进的非线性粒子群优化算法相结合的参数辨识算法,在电液伺服控制系统识别和位置跟踪控制实验中,所提出的方法具有更高的识别和控制精度。Yang等^[9]提出一种基于精英策略的非支配排序遗传算法优化电液伺服泵控制系统的动态性能,最大限度地降低热功率损失,提高了系统的动态和高效节能特性。Ding等^[10]提出一种基于倾斜位移映射的挖掘机械臂轨迹规划与控制方法,在95 t大型挖掘机上进行了实验测试,结果显示安装方便、维护要求低、轨迹规划平滑、跟踪精度高等优点。这类工作均在不同程度上提升了跟踪精度和抗扰性能,但多以单一或少数性能指标为目标,侧重轨迹误差的改善。

围绕系统综合性能,也有研究从多目标轨迹规划、参数辨识及能耗优化等方面展开,利用改进粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)、非支配排序遗传算法II(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)等算法在精度与能效之间寻求折中。姜金叶等^[11]通过引入惯性权重、异步变化和精英突变操作改进基本粒子

群优化算法。刘运忠等^[12]提出了一种基于粒子群优化的模糊PID(fuzzy PID, F-PID)恒力控制方法。Chen等^[13]提出一种基于自适应滑模控制的阀控缸位置控制策略方法,在2 Hz正弦跟踪过程中,控制器的最大偏差比PID控制器降低了47.7%,相位滞后更小。Coskun等^[14]针对具有不确定阀特性和供应压力变化的非线性电液系统设计了智能PID控制器,采用PSO进行优化参数,实验结果表明,智能PID控制器的跟踪效果明显优于经典PID控制器。Feng等^[15]为了提高挖掘机轨迹跟踪性能,提出了一种改进的遗传算法来搜索挖掘机的最佳PID控制器参数,实验表明该方法可有效提高跟踪精度。Wang等^[16]提出了一种具有抗扰功能的输出反馈控制器,用于电液非对称气缸系统的位置控制,实验表明所提控制器不仅能够建立仅输出信号的模型控制器,而且能够实现对未知扰动情况下的无反步控制。Shen等^[17]为了解决新型液压变压器控制液压缸的参数耦合和本征非线性的控制问题,提出了一种基于状态估计的模糊滑模速度控制器,将模糊方法与估计方法相结合,对得到的外部扰动进行补偿,从而在保证滑模到达条件的情况下实现开关增益的最小化,然后对开关增益进行模糊自调节。然而,这类工作多基于阀-缸传递函数等简化模型展开,较少充分考虑实际挖掘机器人的机-液耦合特性与典型工况下的能效特征。

周希亮等^[18]提出了一种三节臂液压挖掘机结构,并设计配套的分布式液压动力驱动系统,以增强控制精度与响应能力,针对液压系统的非线性特征,研究自适应F-PID控制方法。并且分别对PID与F-PID控制器进行轨迹跟踪仿真。此研究虽然提出了一种新型三节臂液压挖掘机的轨迹跟踪控制方法,但是未进行实验验证以及控制算法优化,故在此基础上进行后续挖掘机器人运动控制研究。

总体来看,现有研究仍存在3个方面不足:1)多侧重轨迹误差,缺乏同时兼顾轨迹精度、运动平稳性与能耗的统一评价体系,难以支撑能效协同优化;2)虽然F-PID相比固定参数PID具有一定优势,但其参数仍主要依赖经验整定,多工况、多指标条件下的系统优化方法及智能算法的稳定性有待提升;3)面向挖掘机器人的机-液一体化建模及仿真-实验协同验证体系尚不完善,轨迹控制优化与能效协同评价的理论分析与工程应用之间仍存在一定脱节。

针对上述问题,本文以三节臂挖掘机器人为研究对象,面向典型挖掘工况,旨在实现轨迹精度、运动平稳性与能耗之间的协同优化。围绕“F-PID轨迹跟踪控制优化”和“能效协同评价”两个核心目标,构建集机-液一体建模、智能优化与仿真和实验验证体系于一体的研究框架。

1 系统建模与问题描述

本章搭建了挖掘机器人的机械挖掘结构与液压系统,并且进行了挖掘机器人的运动学建模与典型工况分析,提出了挖掘机器人机-液动力学与轨迹跟踪问题。

1.1 挖掘结构与液压系统

本系统采用挖掘机器人物理模型。工作装置主要包括固定平台、下动臂、上动臂、斗杆、铲斗及其驱动液压缸。图1为挖掘机器人机械结构示意图。

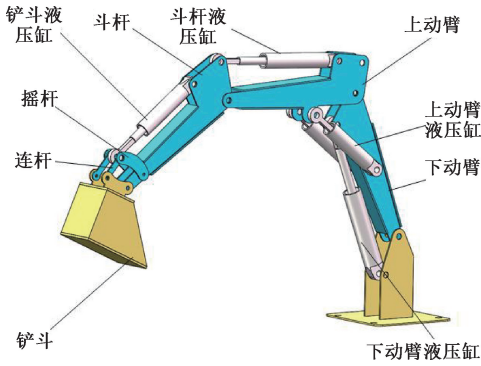


图1 挖掘机器人机械结构

Fig.1 Mechanical structure of excavator robot

挖掘机器人机械系统由下动臂液压缸驱动下动臂运动,两个上动臂液压缸同步驱动上动臂运动,斗杆液压缸驱动斗杆运动,铲斗液压缸驱动铲斗运动,所有液压缸可独立驱动挖掘机器人复合运动。

液压系统^[19]采用了两个分布式液压动力单元,分别用于驱动下动臂液压缸和上动臂液压缸、斗杆液压缸和铲斗液压缸。图2为挖掘机器人液压系统原理图。

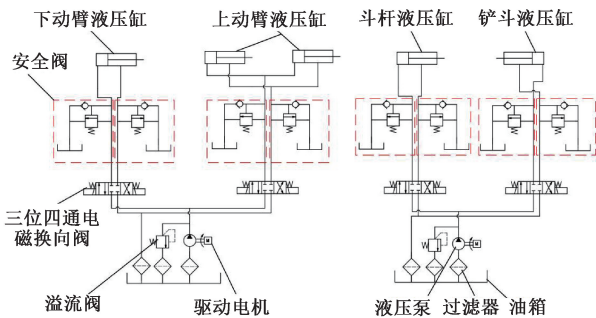


图2 挖掘机器人液压系统原理

Fig.2 Schematic of hydraulic system for excavator robot

1.2 运动学建模与典型工况

本节将基于挖掘机器人的运动学模型,分析液压缸位移与关节转角关系,采用3种工况作为工作环境,并采

用五次多项式插值法^[20] (quintic interpolation method, QTM)作为轨迹规划方法。

挖掘机器人工作装置坐标系如图3所示。根据坐标系右手定则,建立了全局坐标系和工作装置的局部坐标系。

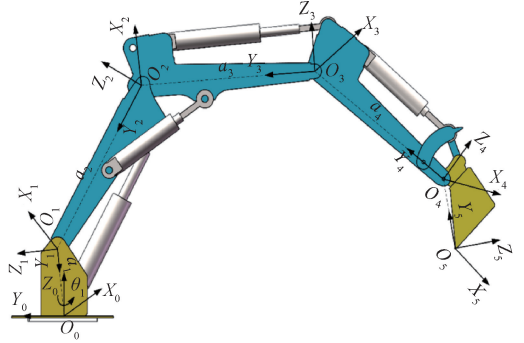


图3 挖掘机器人坐标系

Fig.3 Coordinate system of excavator robot

其中, $O_0 - X_0Y_0Z_0$ 为旋转平台固定于地面的全局坐标系; $O_1 - X_1Y_1Z_1$ 大为下动臂运动的局部坐标系; $O_2 - X_2Y_2Z_2$ 为上动臂运动的局部坐标系; $O_3 - X_3Y_3Z_3$ 为斗杆运动的局部坐标系; $O_4 - X_4Y_4Z_4$ 为铲斗运动的局部坐标系; $O_5 - X_5Y_5Z_5$ 为铲斗末端位置变化的局部坐标系。 $i = 1 \sim 5$; a_i 为 X_{i-1} 到 X_i 沿 Y_i 平移的距离,即为连杆长度; α_i 为 X_{i-1} 到 X_i 绕 Y_i 旋转的角度,即为连杆扭角; d_i 为 Y_{i-1} 到 Y_i 沿 X_{i-1} 平移的距离,即为偏置距离; θ_i 为 Y_{i-1} 到 Y_i 绕 X_{i-1} 旋转的角度,即为关节角。

挖掘机器人运动学正解^[21],通过各个关节旋转的角度和各连杆的长度,通过变换坐标矩阵求解铲斗末端的位置姿态。根据标准 D-H 法则,坐标系 i 相对于坐标系 $i-1$ 的变化矩阵 T_i^{i-1} 表达式如式(1)所示。

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将式(1)代入各个相邻关节转换矩阵 $T_n^0 = \prod_{i=0}^n T_i^{i-1}$, 得到:

$$T_5^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 \quad (2)$$

$$T_5^0 = \begin{bmatrix} c_1 c_{2345} & -c_1 s_{2345} & s_1 & c_1 (a_5 c_{2345} + a_4 c_{234} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + a_1) \\ s_1 c_{2345} & -s_1 s_{2345} & -c_1 & s_1 (a_5 c_{2345} + a_4 c_{234} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + a_1) \\ s_{2345} & c_{2345} & 0 & a_5 s_{2345} + a_4 s_{234} + a_3 s_{23} + a_2 s_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & X \\ n_y & o_y & a_y & Y \\ n_z & o_z & a_z & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $[n_x, n_y, n_z]^T = [c_1 c_{2345}, s_1 c_{2345}, s_{2345}]^T$, $[o_x, o_y, o_z]^T = [-c_1 s_{2345}, -s_1 s_{2345}, c_{2345}]^T$, $[a_x, a_y, a_z]^T = [s_1, -c_1, 0]^T$ 。

最后得到铲斗末端的位置姿态坐标 (x, y, z, ξ) , 其表达式为:

$$\begin{cases} x = c_1(a_5 c_{2345} + a_4 c_{234} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + a_1) \\ y = s_1(a_5 c_{2345} + a_4 c_{234} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + a_1) \\ z = a_5 s_{2345} + a_4 s_{234} + a_3 s_{23} + a_2 s_2 + d_1 \\ \xi = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $c_{1,2,3,\dots,i} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_i)$, $s_{1,2,3,\dots,i} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_i)$, ξ 为铲斗末端的姿态角。

挖掘机器人运动学反解,则是通过铲斗末端的位置姿态坐标 (x, y, z, ξ) 求解各个关节旋转的角度 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$ 。由于运动学反解是非线性超越方程,所以会存在多个解的方案。由于确定了挖掘机器人关节旋转角度的范围,可以用解析法进行求解,求出在某一特定的铲斗末端位置姿态坐标下的各个关节旋转的角度。

通过逆变换求解式(2),求出各个关节旋转的角度如式(5)所示。

$$\begin{cases} \theta_1 = -\arctan \frac{a_x}{a_y} \\ \theta_2 = \arctan \frac{a_z}{a_x c_1 + a_y s_1} \\ \theta_3 = -\arccos \frac{\mp a_2 c_2 \pm (a_x c_1 + a_y s_1) s_2}{\sqrt{a_z^2 + a_x^2 \cos^2 \theta_1^2 + a_y^2 \sin^2 \theta_1^2 + a_x a_y \sin(2\theta_1)}} \\ \theta_4 = -\theta_2 - \theta_3 + \arcsin \frac{-d_1 - a_5 n_z + Z - a_2 s_2 - a_3 s_{23}}{a_4} \\ \theta_5 = \arctan \frac{n_z}{o_z} - \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 \end{cases} \quad (5)$$

在本研究中,使用工况 I (work condition I, WC-I) 挖斜坡和平整土地、工况 II (work condition II, WC-II) 挖长方形坑和工况 III (work condition III, WC-III) 挖圆弧沟。这 3 种工况分别对应平面/斜面、直角多边形、连续曲线 3 类几何特征,能够全面考核挖掘机器人机械臂轨迹控制算法的核心性能。图 4^[16] 为 WC-I、WC-II、WC-III 的示意图。

1.3 机-液动力学与轨迹跟踪问题

挖掘机器人采用液压驱动,系统动态特性同时受到机械执行结构惯性、负载变化以及液压压力与流量耦合影响,其表现为强非线性、时变性及明显的不确定性。机

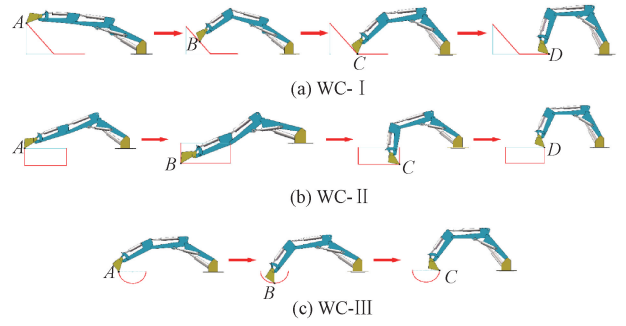


图 4 WC-I、WC-II、WC-III 示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of WC-I、WC-II、WC-III

械运动主要依赖液压系统产生的驱动力,而液压压力又随执行机构运动发生反馈调节,从而构成机-液一体的闭环耦合过程。该耦合机理使系统对建模误差、阀口非线性、摩擦及外界扰动高度敏感。挖掘机器人机-液耦合系统原理图如图 5 所示。

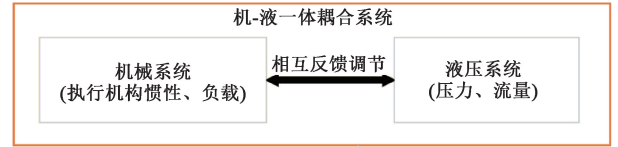


图 5 挖掘机器人机-液体耦合系统原理

Fig. 5 Excavator robot mechanical-hydraulic coupling system schematic

在运动轨迹控制中,挖掘机器人通常需要根据给定轨迹实现高精度位置或速度跟踪,但在上述耦合和不确定因素作用下,传统控制方法难以同时保证稳态精度与鲁棒性。因此,本研究在统一机-液动力学框架下,将轨迹跟踪视为受扰动的非线性控制问题,旨在通过针对性控制策略提升跟随能力和抗扰性能。

2 模糊 PID 轨迹跟踪控制策略研究

本章基于粒子群优化的挖掘机器人轨迹跟踪控制器,提出一种综合协同优化 PSO 算法 (integrated synergy optimisation PSO, ISO-PSO) 优化 F-PID 参数,并且考虑能耗、冲击和平稳性等指标,建立多指标能效协同评价模型。

2.1 模糊 PID 轨迹跟踪控制器设计

本研究采用 PSO 优化 F-PID 参数,对初始参数量化因子 K_e 和 K_{ec} 、比例因子 $K_{\Delta p}$ 、 $K_{\Delta i}$ 和 $K_{\Delta d}$ 进行优化,同时也对传统 PSO 算法进行改进,提升优化效果^[22-23]。

F-PID 控制器相比于 PID 控制器,使用了模糊逻辑、模糊参数,实现 PID 参数的自适应整定,具有很好的适应

性和鲁棒性。

F-PID 基本表达式如式(6)所示。

$$\begin{cases} u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = \\ K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \\ K_p = K_{p0} + K_{\Delta p} \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + K_{\Delta i} \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + K_{\Delta d} \Delta K_d \end{cases} \quad (6)$$

其中, $u(t)$ 为控制器的输出量, $e(t)$ 为期望 $r(t)$ 与实际 $y(t)$ 的差值, T_i 为积分时间, T_d 为微分时间, K_p 、 K_i 和 K_d 为 F-PID 输出的参数值, K_{p0} 、 K_{i0} 和 K_{d0} 为初始 PID 的参数值, $K_{\Delta p}$ 、 $K_{\Delta i}$ 和 $K_{\Delta d}$ 为模糊控制器输出的比例因子, ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 为模糊控制器输出的变化量。

F-PID 控制器: 设置所有模糊控制器的输入 e 、 ec 的论域为 $[-10, 10]$ 、 $[-10, 10]$, 模糊控制器的输出 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的论域设置为 $[-10, 10]$ 、 $[-10, 10]$ 、 $[-10, 10]$, K_{p0} 、 K_{i0} 和 K_{d0} 的参数均为 PID 初始参数, 所有的输入、输出变量的模糊子集均定义为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 并且采用三角形隶属度函数, 模糊规则通用定义格式为: *If e is NB and ec is NB, then ΔK_p is PB, ΔK_i is NB, ΔK_d is PB*。设定工况 WC-I、工况 WC-II 和工况 WC-III 的 K_e 和 K_{ec} 量化因子、 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 比例因子的参数设置如表 1 所示。

表 1 量化因子和比例因子参数表

Table 1 Quantization and scaling factors parameters

液压缸模糊 控制器	量化因子		比例因子		
	K_e	K_{ec}	$K_{\Delta p}$	$K_{\Delta i}$	$K_{\Delta d}$
下动臂	0.1	0	3	1	0.3
上动臂	0.1	0	3	1	0.3
斗杆	0.1	0	3	1	0.3
铲斗	0.1	0	3	1	0.3

2.2 基于 ISO-PSO 的模糊 PID 参数优化方法

传统 PSO 算法在复杂非线性优化问题中, 存在易陷入局部最优、种群多样性不足以及收敛稳定性较差等问题。针对上述问题, 本文并非针对单一机制进行改进, 而是从系统优化角度出发, 围绕着全局搜索能力、局部开发能力、约束处理能力和收敛稳定性这四个关键环节, 对 PSO 算法进行协同改进, 构建综合协同优化粒子群算法 ISO-PSO^[24]。其改进点为:

1) 针对 PSO 算法在搜索初期与后期能力分配不合理的问题, 在粒子速度更新状态里引入惯性权重 ω , 并且

采用非线性递增策略。与以往非线性递减策略相比, 采用非线性递增策略后, 前期 ω 取值较小且具有较强的局部搜索能力, 后期 ω 取值较大且具有较强的全局搜索能力。非线性 ω 表达式如式(7)所示。

$$\begin{cases} \omega = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times (1 - e^{a \times (\lg(b+t))^p}) + k \\ t = (MaxIter - iter) / MaxIter \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\omega_{\min}$ 表示惯性权重 ω 的下限, $\omega_{\max}$ 表示惯性权重 ω 的上限, a 表示指数常数, b 表示对数常数, p 表示幂指数常数, k 表示增量常数, t 表示粒子群最大迭代次数与当前迭代次数的函数关系, $MaxIter$ 表示最大迭代次数, $iter$ 表示当前迭代次数。

引入惯性权重 ω 后的表达式为:

$$\begin{cases} x_i(T+1) = x_i(T) + v_i(T+1) \\ v_i(T+1) = c_1 r_1 [pbest_i(T) - x_i(T)] + \\ c_2 r_2 [gbest_i(T) - x_i(T)] + \omega \times v_i(T) \end{cases} \quad (8)$$

2) 为进一步协调个体认知与群体协同之间的搜索关系, 对学习因子 c_1 和 c_2 采用非线性动态调整策略: c_1 非线性递增, c_2 非线性递减。在此策略下, 当 c_1 取值较小而 c_2 取值较大时, 算法被赋予较强的局部搜索能力; 反之, 当 c_1 取值较大而 c_2 取值较小时, 则有助于增强算法的全局搜索能力。学习因子 c_1 、 c_2 的表达式为:

$$\begin{cases} c_1 = c_{1_{\min}} + (c_{1_{\max}} - c_{1_{\min}}) \times \\ (1 + (\lg(b + e^{-a \times t}))^p) + k_1 \\ c_2 = c_{2_{\min}} + (c_{2_{\max}} - c_{2_{\min}}) \times \\ (1 + (\lg(b + e^{-a \times t}))^p) + k_2 \\ t = (MaxIter - iter) / MaxIter \end{cases} \quad (9)$$

其中, $c_{1_{\min}}$ 、 $c_{2_{\min}}$ 表示学习因子 c_1 、 c_2 的下限, $c_{1_{\max}}$ 、 $c_{2_{\max}}$ 表示学习因子 c_1 、 c_2 的上限, b 表示对数常数, a 表示指数常数, p 表示幂指数常数, k_1 、 k_2 表示增量常数, t 表示粒子群最大迭代次数与当前迭代次数的函数关系, $MaxIter$ 表示最大迭代次数, $iter$ 表示当前迭代次数。

3) 针对 F-PID 参数优化过程中存在的约束优化问题, 融合拉格朗日乘数法调整粒子的位置, 处理粒子的约束优化问题, 有利于找到全局最优解。

拉格朗日乘数法表达式为:

$$\begin{cases} L(x, \lambda) = f(x) + \lambda g(x) \\ \min f(x), \text{ s. t. } g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m \end{cases} \quad (10)$$

其中, $f(x)$ 表示目标函数, $g(x)$ 表示约束函数, λ 表示拉格朗日乘数, $\min f(x)$, $\text{s. t. } g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m$ 表示其带约束条件的优化问题形式。

在优化 PSO 算法里, 每个粒子 j 的拉格朗日函数其表达式为:

$$\begin{cases} L_j = f(\text{Swarm}(j, :)) + \lambda g(\text{Swarm}(j, :)) \\ g(x) = \sum_{j=1}^n \max(0, x_j - Ub_j) + \max(0, Lb_j - x_j) \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\text{Swarm}(j, :)$ 表示粒子的位置, $f(\text{Swarm}(j, :))$ 表示粒子 j 的目标函数值, λ 表示拉格朗日乘数, $g(x)$ 表示粒子超出边界时的值, Ub_j 表示第 j 维的上界, Lb_j 表示第 j 维的下界。当计算到拉格朗日函数 L_j 比历史的最佳值要好, 就会更新新的个体最佳位置和新的个体最佳适应值进行计算。

4) 针对粒子群在迭代过程中易陷入局部最优的问题, 融合禁忌搜索算法 (tabu search, TS), 在粒子迭代中提高整体搜索性能并避免陷入局部最优。

通过设立一个短期的禁忌列表防止 PSO 搜索陷入局部最优, 基于式 (8), 在粒子每次迭代过程中, 对每个粒子进行 TS, 在当前解 x 邻域内生成的候选解中选择目标函数值最小的解且不在禁忌列表中的最优解:

$$\begin{cases} x_{\text{new}} = \arg \min_{x' \in N(x_t), x' \notin T} f(x') \\ N(x_t) = \{x_t + \Delta x_i, i = 1, 2, \dots, n\} \end{cases} \quad (12)$$

其中, x_{new} 表示当前的新解, $f(x')$ 表示解 x' 的适应值, $N(x_t)$ 表示领域解集合, T 表示禁忌列表, 更新禁忌列表, 将新解 x_{new} 添加到禁忌列表中, 即 $T = t \cup \{x_{\text{new}}\}$; 如果禁忌列表 T 的长度 $|T|$ 超过最大长度 L , 则将去除禁忌列表 T 最早进入的解。并且将当前解更新为新解, 即 $x_t = x_{\text{new}}$ 。通过重复计算迭代达到终止条件: 最大迭代次数或适应值达到规定阈值。

综上, ISO-PSO 算法并非简单叠加多种改进策略, 而是围绕粒子群优化过程中的不同关键环节进行分层设计。各策略在统一框架下形成互补机制, 从而提升算法在复杂工况下的整体优化性能。

ISO-PSO 优化 F-PID 的工作流程为: 首先, 初始化粒子群参数, 生成粒子群并计算各粒子的适应度值; 随后, 利用 ISO-PSO 算法更新粒子个体最优值 $pbest$ 和全局最优值 $gbest$, 并迭代调整粒子速度和位置, 持续搜索 F-PID 控制器参数的最优解。当满足最大迭代次数或适应度达到设定阈值时, 终止优化过程, 获得最优量化因子 K_e 和 K_{ec} 、比例因子 $K_{\Delta p}$ 、 $K_{\Delta i}$ 和 $K_{\Delta d}$ 。优化结果输入 F-PID 控制器, 通过误差 e 及误差变化率 ec 实时调整控制参数, 经 PID 控制器生成控制信号驱动电磁阀及液压执行机构, 实现下动臂、上动臂、斗杆和铲斗液压缸的轨迹跟踪控制, 同时系统输出位移反馈与参考轨迹构成闭环反馈, 用于持续修正控制误差, 提高轨迹跟踪精度与系统综合性能。

表 2 和 3 中的关键参数, 均参考了已有研究中的典型设定^[25-26], 并结合本研究的液压系统控制对象特性进行适当调整与优化, 以兼顾全局搜索能力与收敛效率。

ISO-PSO 算法的基本参数设置如表 2 所示, 基于 PSO 与 ISO-PSO 算法, 其量化因子 K_e 和 K_{ec} 、比例因子 $K_{\Delta p}$ 、 $K_{\Delta i}$ 和 $K_{\Delta d}$ 的参数范围设置表 3 所示。

表 2 ISO-PSO 算法的基本参数表

Table 2 Basic parameters of ISO-PSO algorithm

c_{1_max}	c_{2_max}	c_{1_min}	c_{2_min}	ω_{max}	ω_{min}	v_{max}	v_{min}	$MaxIter$
2	2	0.5	0.5	0.9	0.4	2	-2	100

表 3 量化因子与比例因子参数范围表

Table 3 Quantization and scale factor parameter range table

量化因子		比例因子		
K_e	K_{ec}	$K_{\Delta p}$	$K_{\Delta i}$	$K_{\Delta d}$
[0, 5]	[0, 5]	[0, 50]	[0, 50]	[0, 5]

基于第 3 章 Amesim 与 MATLAB 联合仿真环境和 QTM 规划的 WC-I、WC-II、WC-III 的各个液压缸期望位移变化曲线数据, 分别得到各个工况下的 PSO 算法、ISO-PSO 算法优化 F-PID 的量化因子和比例因子参数值, 如表 4 和 5 所示。

表 4 PSO 算法优化 WC-I 量化因子和比例因子参数表

Table 4 Quantization and scaling factor parameters for WC-I optimized using PSO

液压缸模糊控制器	量化因子		比例因子		
	K_e	K_{ec}	$K_{\Delta p}$	$K_{\Delta i}$	$K_{\Delta d}$
下动臂	0.192	0	4.951	5.455	0.912
上动臂	0.181	0	5.001	5.129	1.243
斗杆	0.178	0	4.876	5.164	1.154
铲斗	0.194	0	5.101	5.252	0.922

表 5 ISO-PSO 算法优化 WC-I 量化因子和比例因子参数表

Table 5 Quantization and scaling factor parameters for WC-I optimized using ISO-PSO

液压缸模糊控制器	量化因子		比例因子		
	K_e	K_{ec}	$K_{\Delta p}$	$K_{\Delta i}$	$K_{\Delta d}$
下动臂	0.502	0	21.522	15.140	1.413
上动臂	0.511	0	22.117	15.010	1.378
斗杆	0.471	0	21.341	14.811	1.411
铲斗	0.489	0	20.011	14.796	1.401

2.3 多指标能效协同评价模型

在机械运动控制中, 轨迹跟踪精度是传统的核心评估指标。然而, 针对特殊的机械运动, 还需考虑能耗、运

动冲击及平稳性的影响。为此,本研究提出一种多指标能效协同评价模型,包含:轨迹跟踪精度、液压缸平稳性及液压泵能耗指标。

轨迹跟踪精度:在挖掘机器人运动时,误差越小,则控制算法的跟踪精度越高。本研究采用跟踪误差来作为衡量轨迹跟踪精度的指标,其表达式为:

$$e = |x_{sj} - x_{qw}| \quad (13)$$

其中, e 表示跟踪误差(单位为 mm), x_{sj} 表示运动实际位移(单位为 mm), x_{qw} 表示轨迹规划方法期望位移(单位为 mm)。

液压缸运动平稳性指标:在挖掘机器人运动时,液压缸会产生影响整体运动平稳性的冲击,冲击越小,平稳性越好。液压缸实际位移加速度变化过大则冲击过大、平稳性越差,因此,本研究采用平均冲击量来作为衡量液压缸运动平稳性的指标,其表达式为:

$$S_i = \left| \frac{\int_0^t \ddot{x}_i dt}{t} \right| \quad (14)$$

其中, $\ddot{x}_i$ 表示第 i 节液压缸实际位移的加加速度, t 表示运动总时间(单位为 s), S_i 表示第 i 节液压缸运动的平均冲击量(单位为 mm/s^3)。

液压泵能耗指标:本研究采用两个液压泵供油,为了考虑控制算法在挖掘机器人运动时的能耗问题,采用液压泵输出能量作为衡量能耗指标,输出能量大,则能耗高。其表达式为:

$$\begin{cases} P_0 = p \times Q \\ E = \int_0^t P_0 dt \end{cases} \quad (15)$$

其中, Q 表示液压泵的输出流量(单位为 m^3/s), p 表示液压泵输出压力(单位为 Pa), P_0 表示液压泵输出功率(单位为 W), t 表示运动总时间(单位为 s), E 表示液压泵输出能量(单位为 J)。

为了将不同的性能指标结合到一起,对性能指标数

值进行最小-最大标准化(Min-Max Scaling)处理,将其数据缩放映射到 $[-1, 1]$ 范围,其表达式为:

$$X' = \frac{2 \times (X - X_{\min})}{X_{\max} - X_{\min}} - 1 \quad (16)$$

其中, X' 表示标准化后的数据, X 表示原始数据, $X_{\max}$ 表示原始数据的最大值, $X_{\min}$ 表示原始数据的最小值。在本研究中,规定轨迹跟踪误差 e 的 $X_{\max} = 20$, $X_{\min} = -20$; 液压缸运动平均冲击量 S_i 的 $X_{\max} = 99\,999\,999$, $X_{\min} = -99\,999\,999$; 液压泵的输出能量 E 的 $X_{\max} = 100\,000$, $X_{\min} = -100\,000$ 。

当3种性能指标数据进行标准化处理后,通过附加权重系数进行3种性能指标综合,其综合指标模型表达式为:

$$f = k_1 \times e' + k_2 \times (S_i)' + k_3 \times E' \quad (17)$$

其中, f 表示多指标综合数值, e' 表示跟踪误差标准化后的数值, $(S_i)'$ 表示液压缸运动的平均冲击量标准化后的数值, E' 表示液压泵输出能量标准化后的数值, k_1 、 k_2 、 k_3 表示各个数值的权重系数, $k_1 = 0.6$, $k_2 = 0.2$, $k_3 = 0.2$ 。通过对比多指标综合数值 f , f 越小,则说明控制算法的轨迹跟踪精度越高、越有利于提高平稳性和降低液压能耗。

3 联合仿真与控制性能分析

本章进行了 MATLAB 轨迹规划运动建模。建立 Amesim 与 MATLAB 联合仿真框架,并通过联合仿真求得 ISO-PSO 算法优化的量化因子和比例因子的参数。

3.1 联合仿真平台与模型构建

MATLAB 轨迹规划与运动建模如图 6 所示,根据输入的轨迹点、时间及约束条件求解出轨迹点的位置、速度、加速度数据,并经由运动学正、逆解模块输出铲斗末端位置姿态坐标,最后基于液压缸与关节转角的映射关系,计算各液压缸的位移变化曲线。

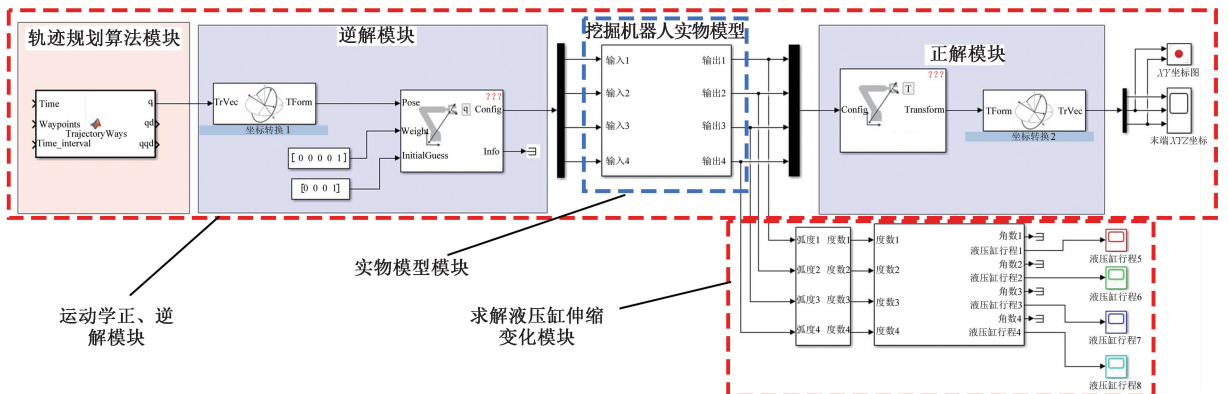


图6 MATLAB 轨迹规划运动建模总图

Fig. 6 MATLAB trajectory planning and motion modeling overview

通过 MATLAB 轨迹规划运动求解,最终得到 Amesim 与 MATLAB 联合仿真的轨迹跟踪的期望数据。

将挖掘机器人的机械结构模型导入 Amesim。Amesim 的机械结构模型如图 7 中 Amesim 机械系统所示。

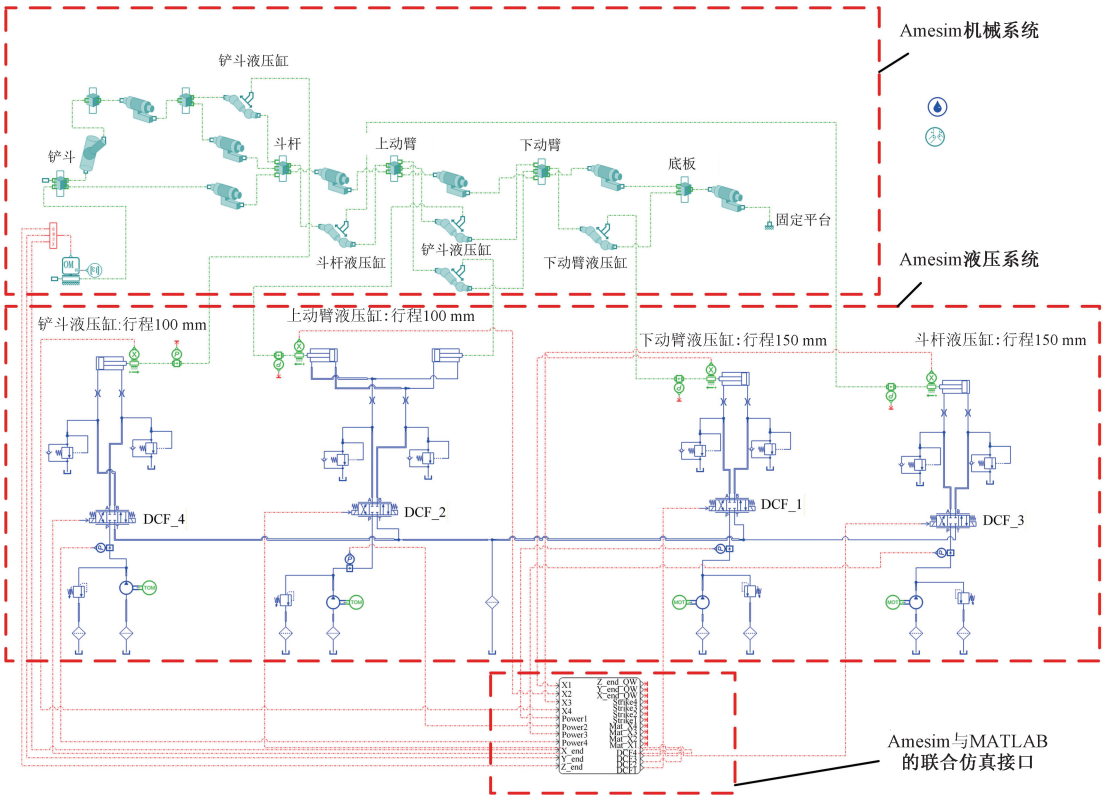


图 7 Amesim 与 MATLAB 联合仿真整体模块框架

Fig. 7 Amesim-MATLAB co-simulation overall module framework

本研究在 Amesim 的液压系统主要包括 2 个驱动电机、2 个独立主泵供液压油、1 个下动臂液压缸、2 个上动臂液压缸、1 个斗杆液压缸、1 个铲斗液压缸、4 个三位四通电磁换向阀、4 个溢流阀、8 个安全阀。

将 Amesim 的机械系统与液压系统进行连接后,建立 Amesim 与 MATLAB 的联合仿真,在 MATLAB 里搭建不同的控制方法来为后续轨迹规划跟踪控制提供环境基础。其 Amesim 与 MATLAB 联合仿真整体框架如图 7 所示。

由于是进行迭代求解联合仿真,还需要分别进行 WC-I、WC-II、WC-III 这 3 种工况的轨迹跟踪。4 个控制器分别加入 4 个适应度函数,在进行联合仿真时通过算法迭代流程求解出优化的 F-PID 参数。

3.2 轨迹跟踪仿真结果对比

将以 QTM 轨迹方法得到 WC-I、WC-II、WC-III 的液压缸期望位移变化曲线为基础,在 Amesim 与 MATLAB 联合仿真平台中分别以 PID、F-PID、PSO 优化 F-PID、ISO-PSO 优化 F-PID 这 4 种控制算法进行轨迹跟踪仿真。因篇幅限制只展示 WC-I 工况下液压缸位移跟踪曲线如图 8 所示。

WC-I 下动臂液压缸的位移误差变化曲线如图 9 所示。WC-I 工况下液压缸位移跟踪平均误差统计表如表 6 所示。

表 6 WC-I 下各液压缸位移跟踪平均误差统计表

Table 6 Statistical table of average displacement tracking error for each hydraulic cylinder under WC-I (mm)

液压缸	PID	F-PID	PSO-F-PID	ISO-PSO-F-PID
下动臂	3.434 3	2.547 3	1.235 9	0.545 2
上动臂	3.025 1	2.388 1	1.433 9	0.499 9
斗杆	2.915 9	2.121 5	0.914 4	0.350 2
铲斗	1.206 4	0.966 4	0.442 2	0.194 2

通过对图 9 下动臂液压缸位移误差峰值以及 WC-I 工况下的轨迹跟踪平均误差统计表可以看出,本文提出的 ISO-PSO 优化 F-PID 控制算法在整体控制性能方面具有明显优势,该控制算法能够有效降低铲斗末端执行点的轨迹跟踪误差,提高跟踪精度。然而,在部分工况中仍出现个别异常现象,例如 WC-III 工况下的轨迹跟踪曲线

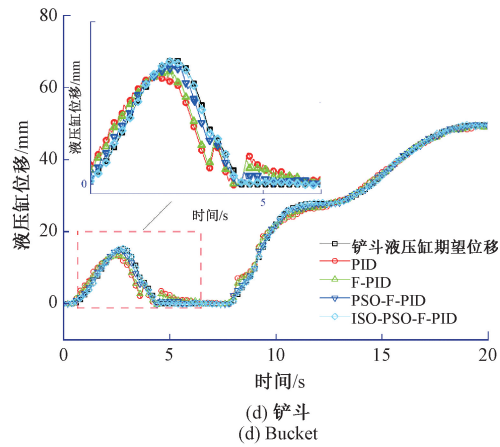
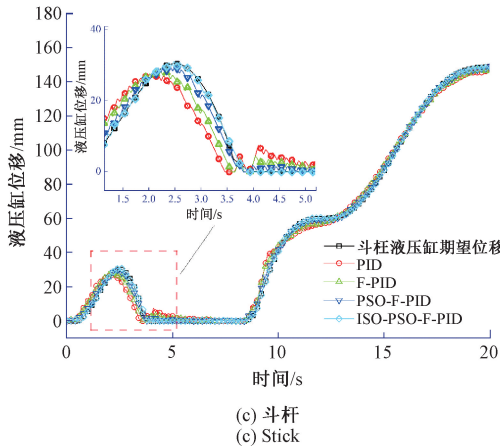
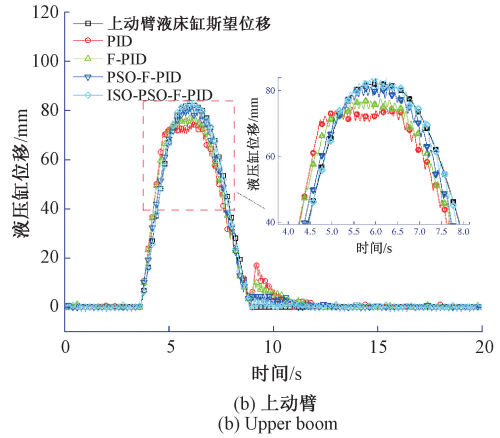
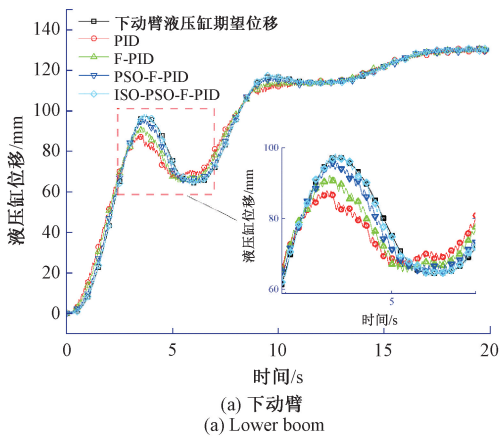


图8 WC-I 液压缸位移跟踪曲线
Fig. 8 WC-I hydraulic cylinder displacement tracking curve

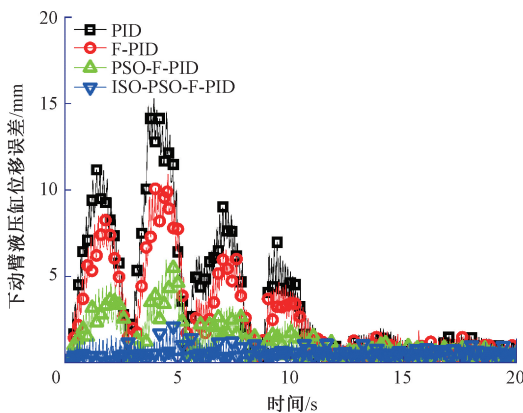


图9 WC-I 下动臂液压缸的位移误差变化曲线
Fig. 9 Displacement error curve of the lower boom hydraulic cylinder under WC-I

有存在局部偏差,这是因为机械臂在轨迹跟踪过程中,机械臂之间的联动性以及液压系统的耦合效应较强,导致机械臂或液压缸的动态响应发生变化时,会通过结构连接和液压系统相互传递影响其他部件的稳定性。

3.3 多指标能效评价与分析

通过轨迹跟踪仿真分别得到在 WC-I、WC-II、WC-III 下的轨迹跟踪误差、液压缸运动平均冲击量、液压泵输出能量,并通过本文提出的一种多指标能效协同评价模型来判定控制算法效果。

在 WC-I、WC-II、WC-III 下的各个关节的多指标综合数值 f 的变化曲线如图 10、11 和 12 所示。

从图 10~12 中明显看出,在 WC-I、WC-II、WC-III 中基于 ISO-PSO 优化 F-PID 参数使得下动臂、上动臂、斗杆、铲斗的多指标综合数值显著减小,这说明 ISO-PSO 优化 F-PID 控制算法体现的轨迹跟踪精度越高、越有利于提高平稳性和越有利于降低液压能耗。在 3 种工况下各液压缸的平均多指标综合数值 f_a 如表 7、8、9 和 10 所示。

以 WC-I 为例,下动臂基于 ISO-PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值 f_a 比 PID、F-PID 和 PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值 f_a 分别减小了 63%、54% 和 30%,上动臂基于 ISO-PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值 f_a 比 PID、F-PID 和 PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值 f_a 分别减小了 63%、56% 和 38%,斗杆基于 ISO-PSO

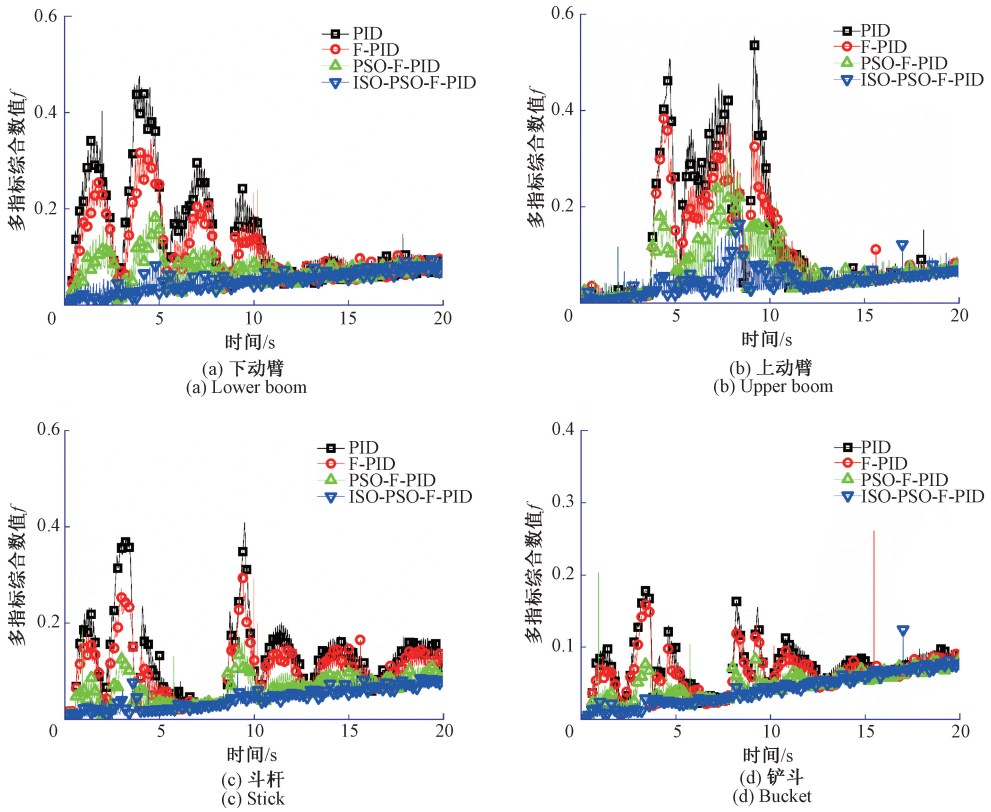


图 10 WC-I 下各个关节的多指标综合数值变化曲线
Fig. 10 Curve of the comprehensive multi-index value for each joint under WC-I

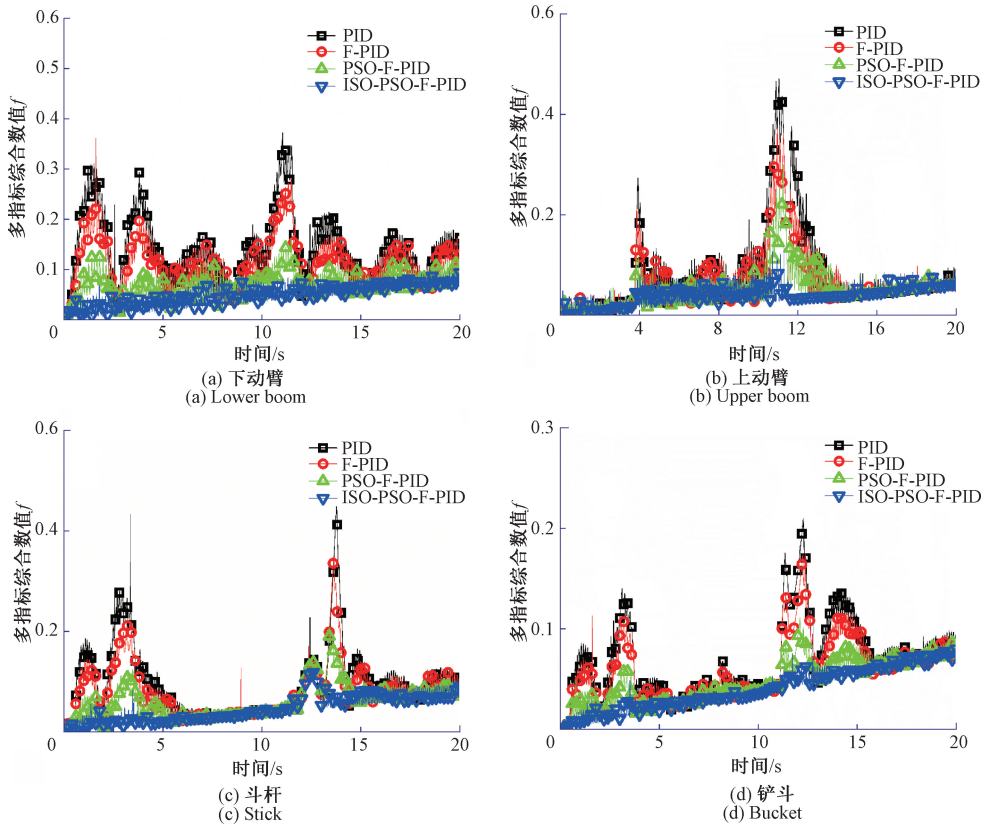


图 11 WC-II 下各个关节的多指标综合数值变化曲线
Fig. 11 Curve of the comprehensive multi-index value for each joint under WC-II

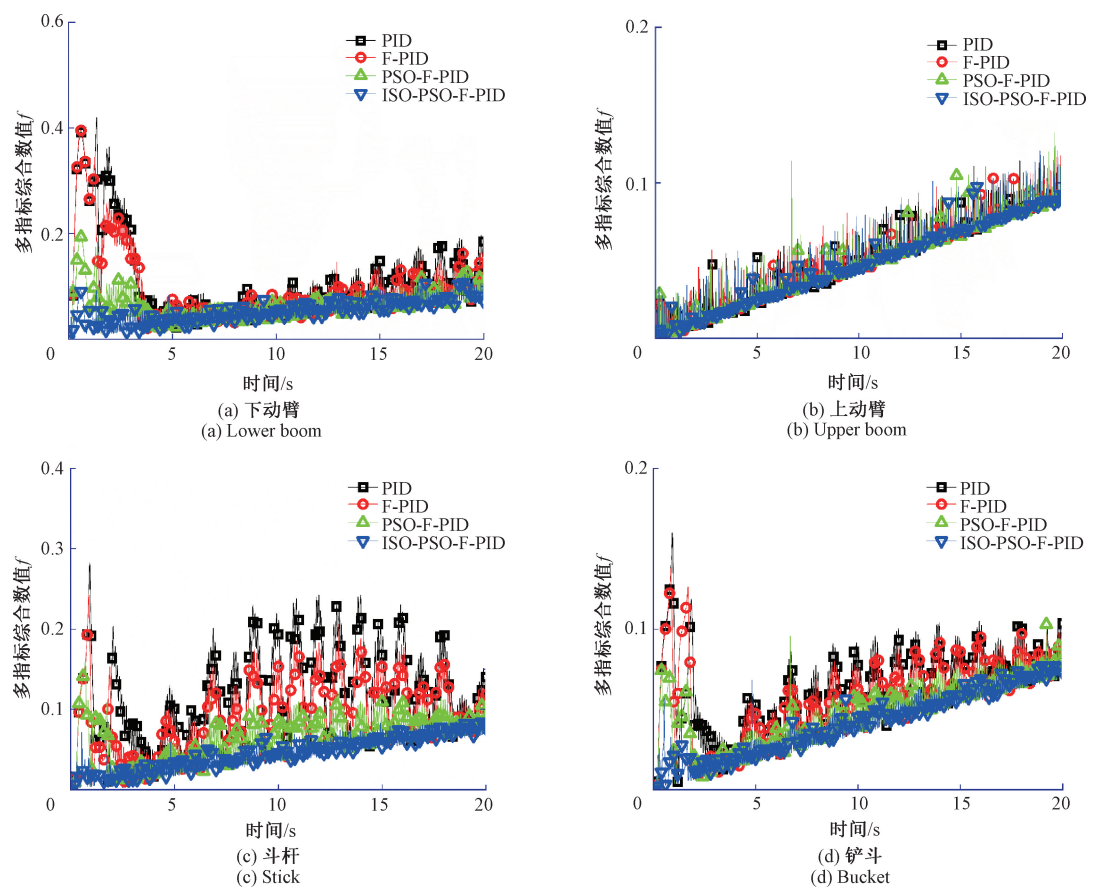


图 12 WC-Ⅲ下各个关节的多指标综合数值变化曲线

Fig. 12 Curve of the comprehensive multi-index value for each joint under WC-Ⅲ

表 7 下动臂的平均多指标综合数值 f_a 统计表

Table 7 Statistics of the average multi-index comprehensive value f_a for the lower boom

工况	PID	F-PID	PSO-F-PID	ISO-PSO-F-PID
WC-Ⅰ	0.137 7	0.110 9	0.072 2	0.050 9
WC-Ⅱ	0.137 1	0.112 5	0.069 2	0.050 8
WC-Ⅲ	0.107 7	0.095 8	0.065 1	0.054 4

表 8 上动臂的平均多指标综合数值 f_a 统计表

Table 8 Statistics of the average multi-index comprehensive Value f_a for the upper boom

工况	PID	F-PID	PSO-F-PID	ISO-PSO-F-PID
WC-Ⅰ	0.121 4	0.101 8	0.073 1	0.045 0
WC-Ⅱ	0.077 8	0.065 5	0.051 9	0.040 7
WC-Ⅲ	0.048 2	0.048 5	0.048 3	0.048 5

表 9 斗杆的平均多指标综合数值 f_a 统计表

Table 9 Statistics of the average multi-index comprehensive value f_a for the stick

工况	PID	F-PID	PSO-F-PID	ISO-PSO-F-PID
WC-Ⅰ	0.122 2	0.099 0	0.062 7	0.044 0
WC-Ⅱ	0.091 7	0.079 5	0.059 9	0.046 7
WC-Ⅲ	0.116 5	0.092 0	0.063 1	0.045 6

表 10 铲斗的平均多指标综合数值 f_a 统计表

Table 10 Statistics of the average multi-index comprehensive value f_a for the bucket

工况	PID	F-PID	PSO-F-PID	ISO-PSO-F-PID
WC-Ⅰ	0.070 9	0.063 4	0.048 0	0.042 1
WC-Ⅱ	0.067 4	0.059 4	0.047 8	0.040 7
WC-Ⅲ	0.062 1	0.057 6	0.047 4	0.041 1

优化 F-PID 的平均多指标综合数值 f_a 比 PID、F-PID 和 PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值 f_a 分别减小了 64%、56%和 30%,铲斗基于 ISO-PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值 f_a 比 PID、F-PID 和 PSO 优化 F-PID 的平均多指标综合数值 f_a 分别减小了 41%、34%和 12%。

4 实验验证体系与结果分析

本章进行了挖掘机器人轨迹跟踪控制实验验证体系

的搭建。并且使用 PID 以及 F-PID 控制器在 3 种典型工况场景进行轨迹跟踪实验,以证明挖掘机器人轨迹跟踪控制实验验证体系具有可行性。

4.1 实验体系

为了方便进行挖掘机器人实物模型轨迹跟踪控制,采用 LabVIEW 软件搭建其上位机控制系统。为了更好的进行挖掘机器人轨迹跟踪控制及监测,本实验体系主要使用硬件如图 13 所示^[27]。挖掘机器人实验硬件参数如表 11 所示。

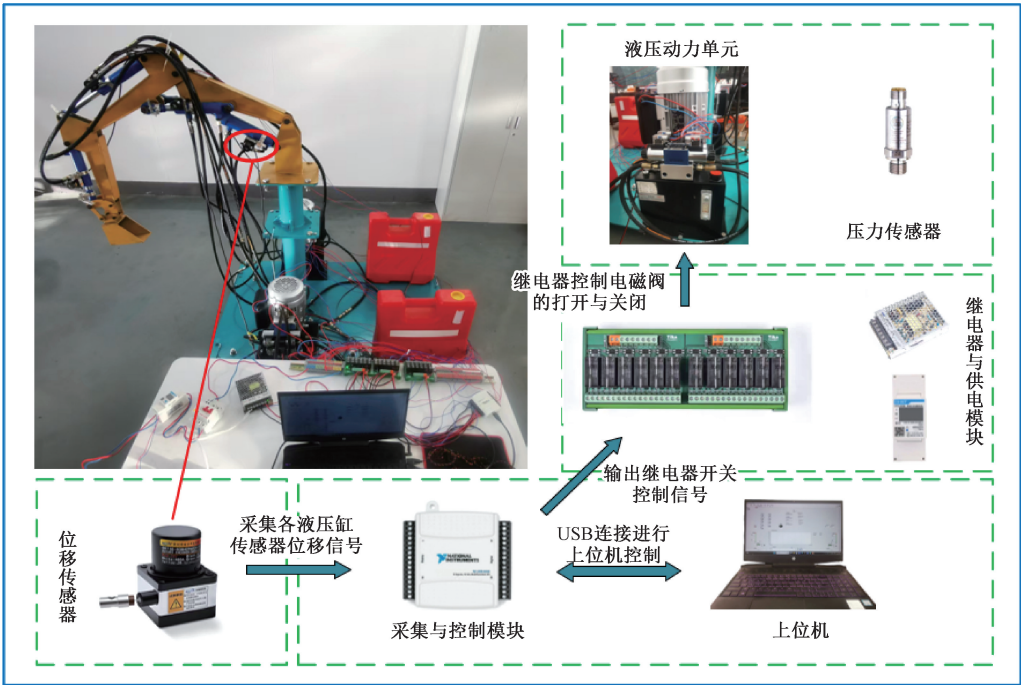


图 13 挖掘机器人实验体系整体结构

Fig. 13 Overall structure of the excavator robot experimental system

表 11 实验硬件参数表

Table 11 Experimental hardware parameters

名称	数量	参数 1	参数 2	参数 3	参数 4
NI-6009 数据采集卡	1	8 个 AI 口	2 个 AO 口	13 个 DIO 口	1 个 32 位计数器
模拟信号拉绳位移传感器	4	BRETT	最大工作速度为 1 m/s	工作电压是 0~5 V	工作量程为 500 mm
光耦隔离继电器模组	2	OMRON 6 路、12 路 继电器模组	信号电压为 3.3 V,继电器 电压为 24 V	触点结构是 1 开 1 闭	动作时间为 0.01 s, 复位时间为 0.004 s
压力传感器	1	IFM PT3550	抗压强度为 600 bar	测量范围为 0~400 bar	
多功能电能表	1	CHNT DDSU666	带有 RS-485 通讯协议		
开关电源	1	DELIXI LED	输出电压为 24 V		

4.2 挖掘机器人轨迹跟踪控制实验结果

利用实验平台使用 PID 以及 F-PID 控制器在 3 种典型工况场景进行轨迹跟踪实验,进行仿真得到的各液压缸期望位移与实际工作测量位移值进行误差分析。工况

实际场景图如图 14 所示。

所采用的 PID 控制器参数 K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 40、0.008、0。由于在实验过程中 F-PID 控制器参数实时变化波动过大且因过于复杂难以实现稳定控制,而且曲

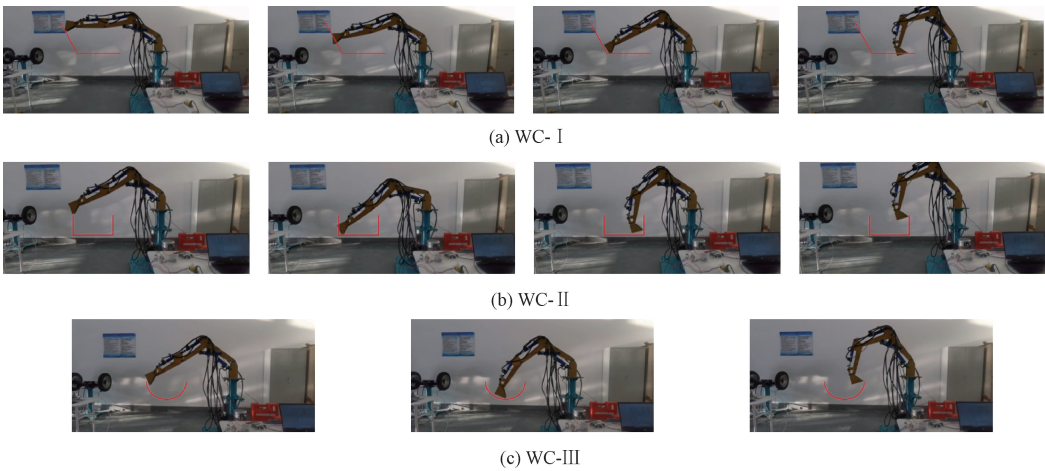


图 14 3 种工况示意图

Fig. 14 Diagram of the three working conditions

线轨迹是固定的,故采用增益调度 PID 代替 F-PID,当液压缸位移实际测量曲线与液压缸位移期望曲线时处于阶段 1、阶段 4(平稳阶段)时,此时液压缸工作状态为保持平衡,根据此时的 F-PID 参数中取最优增益调度 PID 参数 K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_{d1} 分别为 5、0.016、0;当液压缸位移实际测量曲线与液压缸位移期望曲线时处于阶段 2(上升阶段)时,此时液压缸工作状态为拉伸,取最优增益调度 PID 参数 K_{p2} 、 K_{i2} 、 K_{d2} 分别为 40、0.008、0;当液压缸位移实际测量曲线与液压缸位移期望曲线时处于阶段 3(下降阶段),此时液压缸工作状态为收缩,取最优增益调度 PID 参数 K_{p3} 、 K_{i3} 、 K_{d3} 分别为 70、0.008、0。增益调度 PID 轨迹曲线分段图如图 15 所示。

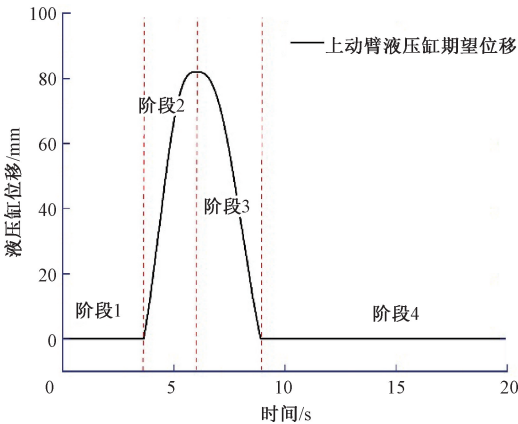


图 15 增益调度 PID 轨迹曲线分段图

Fig. 15 Segmented diagram of gain-scheduled PID trajectory curves

在 WC- I、WC- II、WC-III 分别使用 PID 控制器与 F-PID 控制器进行实验得到各液压缸位移期望曲线与位移

时间及测量曲线,因篇幅限制以 WC- I 所示,如图 16 和 17 所示。

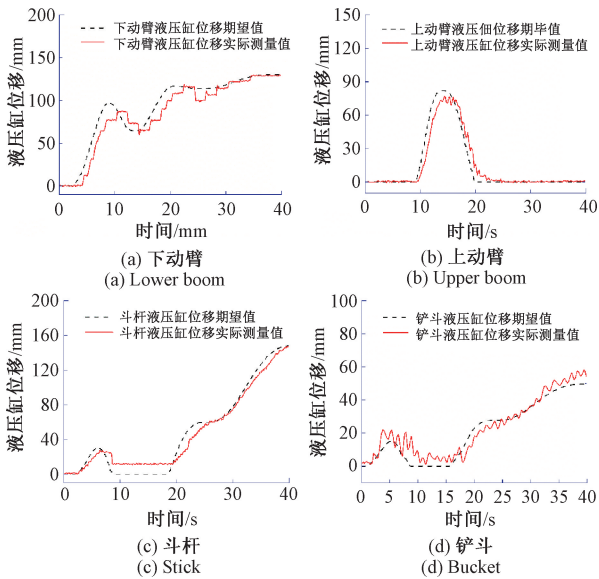
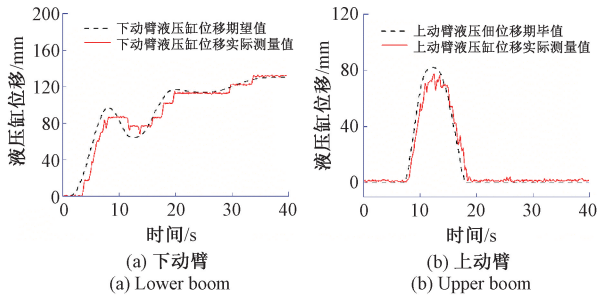


图 16 WC- I 在 PID 控制器下液压缸位移轨迹跟踪曲线
Fig. 16 Lower hydraulic cylinder tracking curve under WC-I (PID)



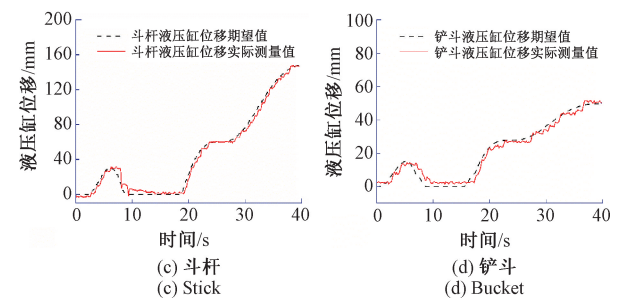


图 17 WC- I 在 F-PID 控制器下液压缸位移轨迹跟踪曲线
Fig. 17 Lower hydraulic cylinder tracking curve under WC-I (F-PID)

对所得结果进行液压缸平均位移误差性能计算出 F-PID 控制器下相对于 PID 控制器的增益百分比如表 9、10 和 11 所示。其表达式为:

$$P = \frac{E_b - E_n}{E_b} \times 100\%$$

(18)

其中, E_b 表示在 PID 控制器下液压缸平均位移误差 (单位为 mm), E_n 表示在 F-PID 控制器下液压缸平均位移误差 (单位为 mm), P 表示性能增益百分比 (单位为%)。

通过 P 值大小可以看出在 F-PID 控制器下的液压缸平均误差比在 PID 控制器下的小的多, P 值越大说明性能增益越大。WC- I、WC- II 和 WC- III 下各液压缸平均位移误差统计表如表 12、13 和 14 所示。

表 12 WC- I 下各液压缸平均位移误差统计表
Table 12 Statistics of average hydraulic cylinder displacement error under WC-I

液压缸	E_b/mm	E_n/mm	$P/\%$
下动臂	8.74	6.67	23.68
上动臂	4.04	3.79	6.19
斗杆	7.41	3.27	55.87
铲斗	3.89	2.26	41.90

表 13 WC- II 下各液压缸平均位移误差统计表
Table 13 Statistics of average hydraulic cylinder displacement error under WC- II

液压缸	E_b/mm	E_n/mm	$P/\%$
下动臂	10.95	8.02	26.76
上动臂	2.80	2.34	16.43
斗杆	7.04	3.23	54.12
铲斗	2.36	1.64	30.51

表 14 WC- III 各液压缸平均位移误差统计表
Table 14 Statistics of average hydraulic cylinder displacement error under WC- III

液压缸	E_b/mm	E_n/mm	$P/\%$
下动臂	7.40	6.11	17.43
上动臂	1.97	1.75	11.17
斗杆	3.14	2.51	20.06
铲斗	2.33	1.05	54.94

5 结 论

本文基于一种挖掘机器人物理模型,对其轨迹规划与跟踪控制问题进行了深入研究,提出了同时兼顾轨迹跟踪精度、液压缸运动平稳性与液压泵能耗等多重指标的协同评价体系,以支撑能效协同优化。本文基于挖掘机器人的轨迹跟踪控制,提出了一种综合协同优化算法 ISO-PSO 对控制器的参数进行优化,提升了智能算法的稳定性。最后,面向挖掘机器人的机-液一体化建模和联合仿真平台搭建了挖掘机器人轨迹跟踪控制实验验证体系,证明了挖掘机器人轨迹跟踪控制实验验证体系具有可行性。

由于条件受限实验平台目前只进行了挖掘机器人轨迹跟踪控制实验验证体系的验证,通过进行实验测试,得到了实际 PID 与增益调度 PID 控制器下实际位移曲线并分别与仿真得到的期望运动轨迹曲线期望进行了对比,尽管存在一定误差,实际路径仍保持在期望范围内,可证明挖掘机器人轨迹跟踪控制实验验证体系具有可行性。后续还需进行 MATLAB 与 LabVIEW 联合控制平台的搭建,并且进行 PSO 算法下与 ISO-PSO 算法下轨迹跟踪实验,验证实际工况下算法的优化效果。

参考文献

[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.
LI Y H, FAN R J, YANG L M, et al. Research status and development trends of intelligent excavators [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13): 165-178.
[2] 宋学官,张天赐,付涛,等. 智重装备的结构与控制多学科一体化优化设计方法[J]. 机械工程学报,2022, 58(17): 26-40.
SONG X G, ZHANG T C, FU T, et al. Multidisciplinary integrated optimization design method for structure and control of intelligent heavy equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(17): 26-40.

- [3] 龚涛,卢宁,郑宏远. 智能控制技术在工程机械中的应用研究[J]. 中国工程机械学报, 2025, 23(2): 249-253.
- GONG T, LU N, ZHENG H Y. Research on the application of intelligent control technology in construction machinery [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2025, 23(2): 249-253.
- [4] NGUYEN V H, AHN K K. Triad of three system: AI-driven hydraulics for autonomous electric excavators with sustainable energy savings [J]. Automation in Construction, 2025, 180: 106543.
- [5] MATTILA J, KOIVUMÄKI J, CALDWELL D G, et al. A survey on control of hydraulic robotic manipulators with projection to future trends[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 669-680.
- [6] 翁文文,殷晨波,冯浩,等. 挖掘机器人自主挖掘轨迹规划方法[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(2): 5-9.
- WENG W W, YIN CH B, FENG H, et al. Autonomous excavation trajectory planning method for excavation robots [J]. Machine Design and Research, 2018, 34(2): 5-9.
- [7] YAN X L, SHI L L, SHAN M H, et al. Vibration-suppressed trajectory planning for flexible space manipulators during on-orbit operations [J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113(16): 20977-21000.
- [8] ZHENG Y K, SUN R Y, LI F M, et al. Parameter identification and position control for helical hydraulic rotary actuators based on particle swarm optimization[J]. Mechatronics, 2023, 94: 103006.
- [9] YANG M K, YAN G SH, ZHANG Y H, et al. Research on high efficiency and high dynamic optimal matching of the electro-hydraulic servo pump control system based on NSGA-II[J]. Heliyon, 2023, 9(3): 13805.
- [10] DING H G, SANG Z W, LI ZH P, et al. Trajectory planning and control of large excavator robots based on inclination-displacement mapping [J]. Automation in Construction, 2024, 158: 105209.
- [11] 姜金叶,冯浩,常潇丹,等. 改进 LuGre 模型的挖掘机器人摩擦补偿控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(2): 139-147.
- JIANG J Y, FENG H, CHANG X D, et al. Friction compensation control of excavator robot based on improved LuGre model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(2): 139-147.
- [12] 刘运忠,姜宏,章翔峰. 基于 PSO 优化的模糊 PID 恒力控制研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(9): 16-22.
- LIU Y ZH, JIANG H, ZHANG X F. Research on constant force control of fuzzy PID based on PSO optimization [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(9): 16-22.
- [13] CHEN L J, JIANG J SH, GAO W, et al. Position control for a hydraulic loading system using the adaptive backsliding control method [J]. Control Engineering Practice, 2023, 138: 105586.
- [14] COSKUN M Y, İTİK M. Intelligent PID control of an industrial electro-hydraulic system [J]. ISA Transactions, 2023, 139: 484-498.
- [15] FENG H, YIN CH B, WENG W W, et al. Excavator robot trajectory control using an improved GA based PID controller [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 105: 153-168.
- [16] 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.
- [17] SHEN W, WANG J H, HUANG H L, et al. Fuzzy sliding mode control with state estimation for velocity control system of hydraulic cylinder using a new hydraulic transformer[J]. European Journal of Control, 2019, 48: 104-114.
- [18] 周希亮,贺湘宇,陈毅,等. 新型三节臂液压挖掘机的轨迹跟踪控制方法[J]. 机床与液压, 2025, 53(17): 22-30.
- ZHOU X L, HE X Y, CHEN Y, et al. Trajectory tracking control method for a novel three-segment boom hydraulic excavator [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2025, 53(17): 22-30.
- [19] 汪飞雪,薛雄伟,曹晓明,等. 双缸液压同步控制系统建模及仿真[J]. 锻压技术, 2018, 43(9): 113-118.
- WANG F X, XUE X W, CAO X M, et al. Modeling and simulation of a dual-cylinder hydraulic synchronous control system [J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(9): 113-118.
- [20] 胡小平,彭涛,左富勇. 一种基于多项式和 Newton 插值法的机械手轨迹规划方法[J]. 中国机械工程, 2012, 23(24): 2946-2949.
- HU X P, PENG T, ZUO F Y. A Trajectory planning method for manipulators based on polynomial and newton interpolation[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(24): 2946-2949.
- [21] 任志贵,陈进,贺康生,等. 基于运动学分析的挖掘机器人轨迹规划新方法[J]. 中国工程机械学报, 2012, 10(2): 150-155.
- REN ZH G, CHEN J, HE K SH, et al. A novel trajectory planning method for excavation robots based on

- kinematic analysis[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2012, 10(2): 150-155.
- [22] 武晓雯,郭孟营,胡阿建,等. 基于改进遗传粒子群算法的无人机路径规划[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 315-325.
- WU X W, GUO M Y, HU A J, et al. UAV path planning based on an improved genetic particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 315-325.
- [23] 谢嘉,吴家桢,李永国,等. 改进粒子群优化算法在机械臂轨迹规划中的应用[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(10): 1681-1686.
- XIE J, WU J ZH, LI Y G, et al. Application of an improved particle swarm optimization algorithm in manipulator trajectory planning[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(10): 1681-1686.
- [24] 吴海波,杨梦琦,杨宇恒,等. 基于数字孪生的机械臂路径规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2026, 47(2): 173-185.
- WU H B, YANG M Q, YANG Y H, et al. Research on manipulator path planning based on digital twin[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2026, 47(2): 173-185.
- [25] 张晓婷,李德镇,梁仁旺,等. 挖掘机铲斗电液伺服改进 PSO-PID 参数整定位置控制[J]. 机械设计与制造, 2023(9): 181-184.
- ZHANG X T, LI D ZH, LIANG R W, et al. Position control of excavator bucket electro-hydraulic servo system based on improved PSO-PID parameter tuning[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(9): 181-184.
- [26] 孙超,郭乃宇,严明蝶,等. 改进自适应粒子群算法的 PID 参数优化[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(5): 377-382.
- SUN CH, GUO N Y, YAN M D, et al. PID parameter optimization based on an improved adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2023, 21(5): 377-382.
- [27] 赵子弈,朱利丰,宋爱国. 地外风化层采样机械臂自主避障控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 133-142.
- ZHAO Z Y, ZHU L F, SONG AI G. Autonomous obstacle avoidance control method for sampling manipulator in extraterrestrial regolith[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 133-142.

作者简介



范厚禄, 2023 年于九江学院获得学士学位, 现为长沙理工大学研究生, 主要研究方向为挖掘机器人。

E-mail: 2758138417@qq.com

Fan Houlu received his B. Sc. degree from Jiujiang University in 2023. He is currently a master's student at Changsha University of Science and Technology. His main research interest includes excavation robots.



贺湘宇(通信作者), 2008 年于中南大学获得博士学位, 现为长沙理工大学副教授, 主要研究方向为工程机械液压系统节能、机电液控制等。

E-mail: hexiangyu@csust.edu.cn

He Xiangyu (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Central South University in 2008. He is currently an associate professor at Changsha University of Science and Technology. His main research interests include energy-saving of hydraulic systems for construction machinery, electromechanical-hydraulic collaborative control, and so on.