

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2023.04.018

基于粒子群算法的挖掘机 PD 控制器设计*

周有明¹,刘凯磊^{1,2,3},强红宾^{1,3},康绍鹏¹

(1.江苏理工学院机械工程学院,江苏常州 213001;2.国机重工集团常林有限公司,江苏常州 213136;

3.江苏大学流体机械工程技术研究中心,江苏镇江 212013)

摘要:针对挖掘机精确轨迹控制问题,构建了挖掘机动力学模型,搭建了 Simulink 仿真环境下挖掘机动力学模块、PD 控制系统模块和可自动调用的 PD 参数输入模块;通过 PSO 最优搜寻得到 PD 权重参数,然后在 PSO 程序中定义挖掘机动力学模型,最后在动态控制下进行一个闭环快速自适应整定联合仿真。仿真结果表明,采用基于粒子群算法的挖掘机 PD 控制器与传统的试凑法都能达到期望的轨迹控制,且都能较好地贴近理论值,但基于粒子群算法的挖掘机 PD 控制器能够快速自适应整定。在挖掘轨迹起始过程中,相较于试凑法中 K_p 和 K_v 组合为 200-5,粒子群算法的 PD 控制器要收敛近 75%,降低了系统的稳态误差,大大提高了液压挖掘机的稳定性和精确性。

关键词:挖掘机;动力学;PD 控制器;粒子群算法

中图分类号:TP273.2

文献标识码:A

文章编号:1007-4414(2023)04-0063-04

Design of Excavator PD Controller Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

ZHOU You-ming¹, LIU Kai-lei^{1,2,3}, QIANG Hong-bin^{1,3}, KANG Shao-peng¹

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, Jiangsu, China;

2.Sinomach Changlin Co., Ltd, Changzhou 213136, Jiangsu, China; 3.Research Center of Fluid Machinery

Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the problem of precise trajectory control of excavator, the dynamics model for excavator is built, and the automatic call of excavator dynamics module, PD control system module and PD parameter input module is built under the Simulink simulation environment. The PD weight parameters are obtained through the PSO optimal search. The excavator dynamics model is defined in the PSO program, and a closed-loop fast adaptive tuning joint simulation is carried out under the dynamic control. The simulation results show that the excavator PD controller based on the particle swarm optimization algorithm can achieve the desired trajectory control compared with the traditional trial and error method, and both of them are close to the theoretical value; but the excavator PD controller based on the particle swarm optimization algorithm can quickly adapt to the adjustment, and it converges by 75% compared with the 200-5 combination of K_p and K_v in the trial and error method in the initial process of the excavation trajectory, which reduces the steady-state error of the system. It greatly improves the stability and accuracy of hydraulic excavator.

Key words: excavating machinery; dynamics; PD controller; particle swarm optimization

0 引言

挖掘机在工业与民用建筑、交通运输、水力工程等领域都有广泛的应用^[1]。然而随着人类社会建设的进步,工业自动化程度随之提高,传统控制算法已很难满足挖掘机的控制精度要求。因此,挖掘机的精确轨迹控制问题成为现阶段工程机械控制领域的一个研究热点。

实现挖掘机精确轨迹控制的核心关键是设计一

个控制性能优异的控制器的,通过输入目标信息驱使液压缸输出相对精确的控制力矩,从而驱动挖掘机各关节的运动以达到所期望的位置与位姿。目前,国内外众多的科研人员对此有了一定的研究。Long C 等^[2]通过对雅克比矩阵进行自适应整定后估测未知运动学参数,并采用了 3 层神经网络对动力学和未建模项动态进行补偿。胡海兵等^[3]针对外部扰动以及内部不确定性(建模误差、耦合影响等)对挖掘机器人

* 收稿日期:2023-02-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目:基于机液压差补偿的负载口独立控制系统被动柔顺控制(编号:51805228);

江苏省高等学校自然科学基金项目:液压并联车载主动减振平台复合柔顺控制策略研究(编号:22KJB460021);

常州市科技支撑计划项目:基于机电液耦合系统的大型高速运载装备行驶非线性动力学行为研究及应用(社会发展)(编号:CE20209002);

常州市领军型创新人才引进培育项目资助;复杂工况下多轴线运载装备智能连杆转向系统研究及应用(编号:CQ20210093);

江苏省研究生科研与实践创新计划项目:液压挖掘机自动挖掘轨迹规划与多执行器协同运动控制(编号:SJGX21_1323)。

作者简介:周有明(1996-),男,江西上饶人,硕士研究生,研究方向:机械与液压系统设计。

通信作者:刘凯磊(1988-),男,甘肃嘉峪关人,副教授,博士,研究方向:电液控制技术。

轨迹运行精度影响的问题,引入鲁棒项抑制关节神经网络控制器并使用滤错训练算法估算神经网络未知权重系数,利用 Lyapunov 函数证明稳定性且获得良好的成效。然而,这些算法需要大量的样本数据进行网络的训练,实现过程较为复杂,控制精确度会出现稍许的滞后现象。粒子群算法是模拟鸟类觅食的一种算法,每只鸟都可看作一个粒子,鸟群在寻找食物的过程中,需不断地改变自己的速度和位置,直到找到食物^[4]。该算法具有结构简单、容易实现且算法的收敛速度快、精确度高的特点^[5]。

因此,笔者引入粒子群算法,通过构建挖掘机动力学模型,搭建 Simulink 仿真环境下挖掘机动力学模块、PD 控制系统模块和 PD 参数输入模块,通过 PSO 程序最优搜寻得到 PD 权重参数,并在 PSO 程序中定义挖掘机动力学模型,利用 PSO 自身快速自适应整定参数优选及其收敛速度优势,达到缩减周期,实现高精度控制的目的。

1 挖掘机动力学模型

液压挖掘机动力学模型应用拉格朗日法求解获得基于关节空间的动力学数学方程。

针对液压挖掘机的非线性系统,忽略关节摩擦和末端负载,整理成如下的动力学模型:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

式中: q 、 \dot{q} 、 \ddot{q} 分别为关节角度、角速度、角加速度矢量; $M(q)$ 为对称正定惯性矩阵; $C(q, \dot{q})$ 为哥氏力和离心力矩阵; $G(q)$ 为重力矢量; $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ 为控制力矩矢量。

实现挖掘精确轨迹控制,需要找到一个容许控制 τ ,使得实际的关节角度与给定的关节角度误差最小。

2 动态 PD 控制器设计

为补偿挖掘轨迹过程中因建模误差、耦合影响和外部扰动等造成的精度误差,需进行动态 PD 控制计算。根据第一章的动力学方程,在给定基本参数时,可以计算出 $M(q)$ 、 $C(q, \dot{q})$ 和 $G(q)$ 的估计值 $\hat{M}(q)$ 、 $\hat{C}(q, \dot{q})$ 和 $\hat{G}(q)$,且通过 $u = \ddot{q}$ 作为新的输入量来考虑非线性反馈控制律,如图 1 所示。

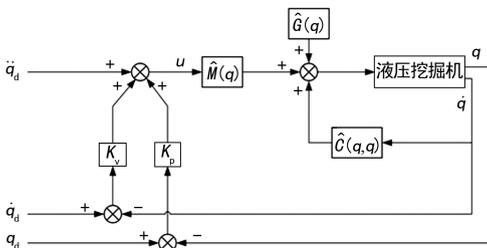


图 1 PD 反馈控制律框图

定义该系统轨迹误差为:

$$e = q_d - q \quad (2)$$

$$\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$$

将式(2)代入式(1)得:

$$M(q)\ddot{e} + C(q, \dot{q})\dot{e} + G(q) + K_p e = -K_v \dot{e} \quad (3)$$

简化可以得到:

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \quad (4)$$

式中: e 为给定角位移 q_d 与实际角位移 q 的误差值; \dot{e} 为给定角速度 \dot{q}_d 与实际角速度 \dot{q} 的误差值; \ddot{e} 为给定角加速度 \ddot{q}_d 。式(4)可以适当地设定权重 K_p 和 K_v ,使轨迹误差有可能收敛到 0。

3 搭建挖掘机 PD 控制系统联合仿真模型

如图 2 所示,在 Simulink 里建立 PD 反馈控制律模型,通过接口设置与 ADAMS 模型进行联合仿真。

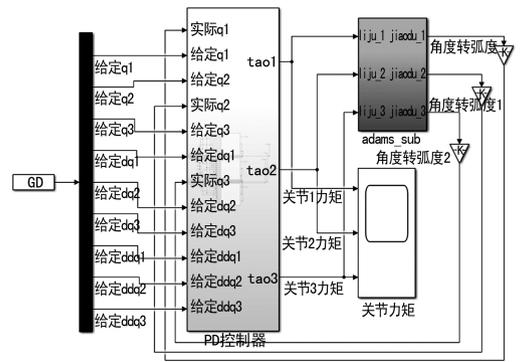


图 2 Simulink 与 ADAMS 联合仿真模型图

将基本参数以模块参数的形式从 MATLAB 工作区里封装读取,设置交互时间为 0.01 s,仿真时间为 20 s。

根据上述可知,通过适当地设定权重 K_p 和 K_v ,就有可能使轨迹误差更小、更精确。优化挖掘机轨迹 PD 控制系统模型,需要将待优化参数进行编码形成一个决策向量。文中引入粒子群算法,仿真运行后,挖掘机动力学模块和 PD 参数调用模块的关系如图 3 所示。

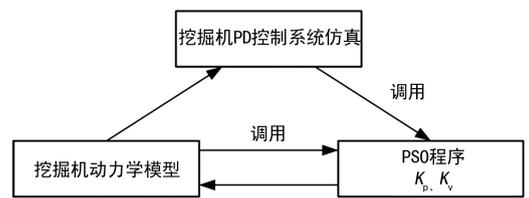


图 3 模块连接关系

挖掘机动力学模型的定义在 PSO 程序中实现,当联合仿真开始时,PSO 程序将被调用运行,PSO 根

据目标适应度函数优选出最优 PD 参数,实现挖掘机的快速自适应 PD 控制。

4 基于 PSO 的 PD 参数快速自适应整定

将 PSO 引入到搜寻最优挖掘机 PD 参数中,其流程图如图 4 所示。

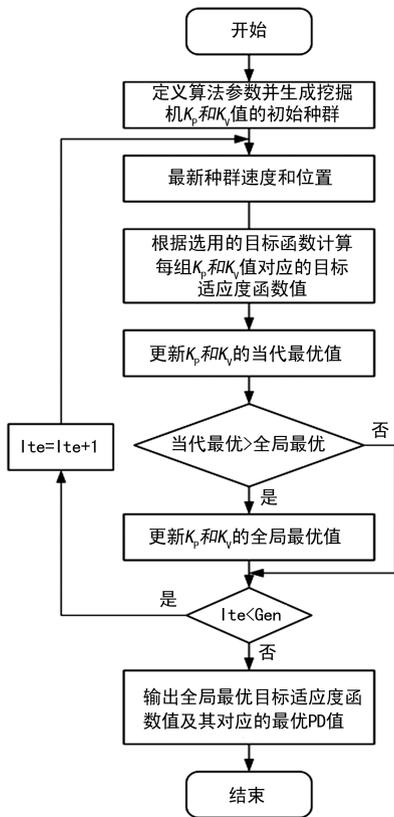


图 4 PSO 整定 PD 参数流程

(1) 种群初始化

在种群初始化中,定义 PD 种群大小 $Sizepop = 50$,粒子的最大速度 $V_{max} = 0.5$ 和最小速度 $V_{min} = -0.5$,最大迭代次数 $Gen_{max} = 100$,惯性权值 $w = 0.3$,学习因子 $c_1 = 6$ 和 $c_2 = 0.3$; K_p 的取值范围为 $[0, 400]$ 和 K_v 的取值范围为 $[0, 200]$ 。

(2) 计算目标适应度

为了获取较好的动态收敛趋势,对于目标适应度的选取,采用绝对误差收敛为 0 的准则作为该研究算法的目标函数。

5 仿真结果及分析

本文采用试凑法和 PSO 两种方法对挖掘机 PD 控制进行研究,通过仿真结果分析比较两种方法对控制系统动态性能的影响,从而搜寻出最优权重参数。

5.1 PSO 迭代结果与分析

设置种群的初始参数,当 PSO 程序被调用时,运行结果如图 5 所示。

根据图 5 所示结果可得,迭代过程中需不断更新

最优权重的取值,其最终最优权重 K_p 的取值为 287, K_v 的取值为 2.9。将最优权重参数以模块参数的形式从 MATLAB 工作区里进行封装,并将其读取到 Simulink 内已搭建好的挖掘机 PD 控制系统模型进行仿真。

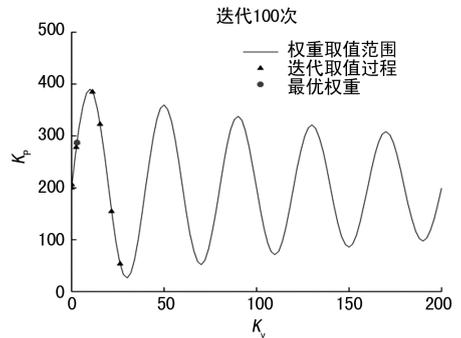


图 5 迭代结果分析图

5.2 仿真数据分析对比

为证明权重参数优化的有效性,需进行动态 PD 控制下的联合仿真,通过试凑法和 PSO 两种方法对比分析,仿真结果如图 6、7 所示。

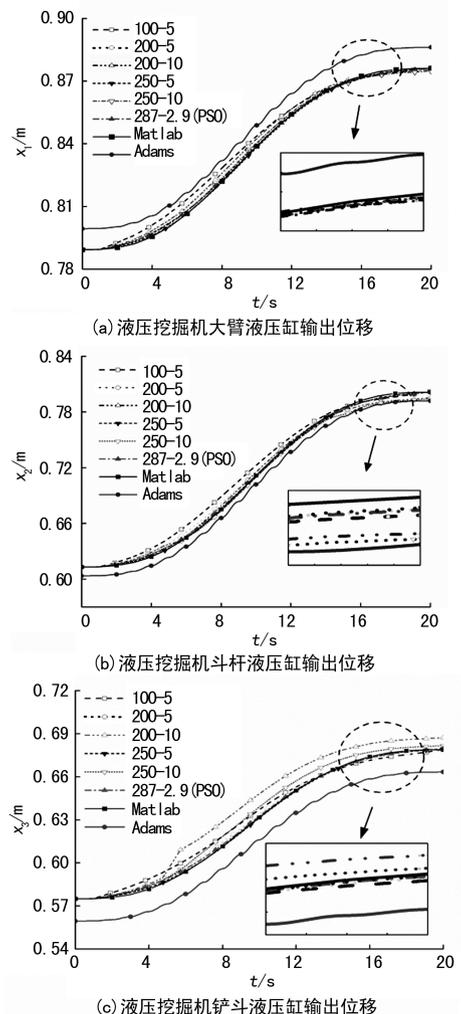
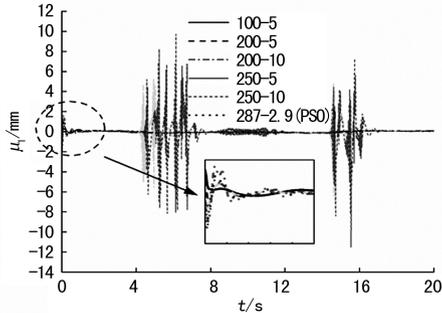


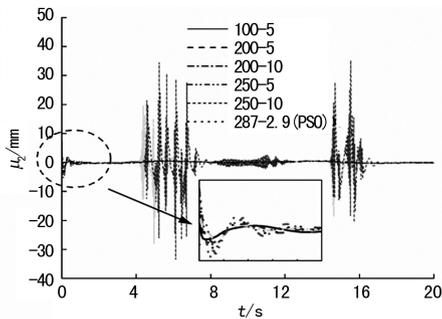
图 6 液压挖掘机液压缸输出位移对比图

图6中: x_1 为大臂液压缸输出位移; x_2 为斗杆液压缸输出位移; x_3 为铲斗液压缸输出位移。

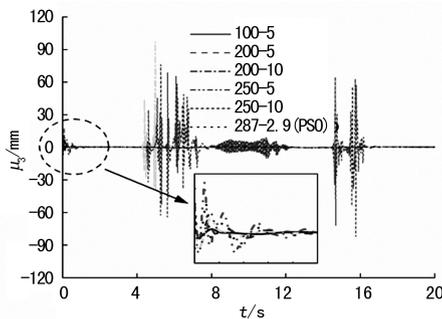
由图6可知,文中首先采用试凑法采集了5组数据分别进行仿真,其次基于粒子群算法对PD控制器权重参数优化后进行仿真,其中,试凑法中 K_p 和 K_v 组合为200-5与PSO优化后较为贴近,更接近期望轨迹,因还需进一步对比分析。



(a) 液压挖掘机大臂液压缸运动收敛趋势



(b) 液压挖掘机斗杆液压缸运动收敛趋势



(c) 液压挖掘机铲斗液压缸运动收敛趋势

图7 液压挖掘机液压缸运动收敛趋势对比图

图7中: μ_1 为大臂液压缸运动收敛趋势; μ_2 为斗杆液压缸运动收敛趋势; μ_3 为铲斗液压缸运动收敛趋势。

由图7知,在整个挖掘机轨迹规划仿真过程中,运动收敛趋势都将趋于0,但PSO优化后的PD控制器在起始过程中,相较于试凑法中 K_p 和 K_v 组合为200-5要收敛近75%,大大提高了液压挖掘机的稳定性和精确性。

6 结语

文中构建了挖掘机动力学模型,搭建了Simulink仿真环境下挖掘机动力学模块、PD控制系统模块和自动调用的PD参数输入模块,其中PD权重参数经PSO最优搜寻得到,挖掘机动力学模型在PSO程序中定义,并在动态控制下进行一个闭环快速自适应整定联合仿真。仿真结果表明,采用基于粒子群算法的挖掘机PD控制器与传统的试凑法都能达到期望轨迹控制,且都能较好地贴近理论值,但基于粒子群算法的挖掘机PD控制器能够快速自适应整定。在挖掘轨迹起始过程中,相较于试凑法中 K_p 和 K_v 组合为200-5,基于PSO的PD控制器收敛近75%,降低了系统的稳态误差,大大提高了液压挖掘机稳定性和精确性。因此,基于粒子群算法的挖掘机PD控制系统将达到更加精确和高效的控制效果。

参考文献:

- [1] 龙峰,冯志君.基于AMESim的液压挖掘机负载模拟系统研究[J].机械研究与应用,2020,33(6):55-58+63.
- [2] Long C, Zeng-Guang H, Min T, et al. Adaptive Neural Network Tracking Control for Manipulators with Uncertainties[J].IFAC Proceedings Volumes,2008,41(2):2382-2387.
- [3] 胡海兵,杨建德,张结文,等.基于分散化神经鲁棒控制的轨迹跟踪算法研究[J].现代电子技术,2019,42(3):111-115.
- [4] 李欣然,樊永生.改进量子行为粒子群算法智能组卷策略研究[J].计算机科学,2013,40(4):236-239.
- [5] 赵亚琪,王景成,张浪文,等.基于粒子群算法的TBM液压系PID参数优化[J].控制工程,2016,23(8):1242-1246.