

基于斑马优化算法的出炉机器人位姿调整机构模糊PID 控制与实验研究

张梦涵¹, 董佳希¹, 宋敬伟¹, 李仕华^{1,2*}

1. 燕山大学 河北省并联机器人与机电系统实验室, 河北 秦皇岛 066004

2. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004

DOI: 10.61369/TACS.2026060034

摘要 : 为提高铁合金出炉机器人的控制精度, 本文基于4-RPC/PPR 并联机构设计了出炉机器人位姿调整机构的控制系统。首先对4-RPC/PPR 并联机构进行结构介绍。为提高出炉机器人的控制精度, 设计了出炉机器人位姿调整机构模糊PID 控制器。然后, 采用斑马优化算法对模糊PID 控制器进行初始化调参以提高调参效率。最后搭建了实验样机, 通过实验验证了设计的控制策略具有较高的控制精度。

关键词 : 出炉机器人; 并联机构; 斑马优化算法; 模糊PID 控制器

Fuzzy PID Control and Experimental Research on Posture Adjustment Mechanism of Tapping Robot Based on Zebra Optimization Algorithm

Zhang Menghan¹, Dong Jiaxi¹, Song Jingwei¹, Li Shihua^{1,2*}

1. Hebei Parallel Robot and Mechatronic System Laboratory, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004

Abstract : To improve the control accuracy of the ferroalloy tapping robot, a control system for the posture adjustment mechanism of the tapping robot is designed based on the 4-RPC/PPR parallel mechanism in this paper. Firstly, the structure of the 4-RPC/PPR parallel mechanism is introduced. Secondly, a fuzzy PID controller is designed for the posture adjustment mechanism of the tapping robot to enhance its control precision. Then, the Zebra Optimization Algorithm is adopted to initialize and tune the parameters of the fuzzy PID controller, so as to improve the parameter tuning efficiency. Finally, an experimental prototype is built. Experimental results verify that the designed control strategy possesses high control accuracy.

Keywords : tapping robot; parallel mechanism; zebra optimization algorithm; fuzzy PID controller

引言

铁合金冶炼炉前开眼、堵眼作业环境恶劣、安全风险大, 自动化出炉机器人已成发展趋势。为满足重载工况下高刚度、高精度作业要求, 其位姿调整机构多采用并联结构, 开展相关高精度控制系统研究具有重要意义。

在并联机构控制领域, 国内外学者们将多种算法和控制策略进行结合, 以提高并联机构的控制性能。在协同控制与解耦控制方法方面, Pan 等^[1]以三自由度并联机构为研究对象, 提出了一种可实现同步与差动运动的协同控制方法。Wang 等^[2]提出了二自由度并联机构的解耦姿态控制方法。Nouri 等^[3]提出了一种含可重构平台的运动学冗余并联机构, 并实现了实时运动规划与控制。在鲁棒控制方法方面, Liu 等^[4]提出了自适应模糊滑模阻抗控制方法。Xu 等^[5]采用 H_∞ 反馈与最优前馈混合控制方法, 对并联指向平台进行主动隔振与稳定指向控制。Gao 等^[6]基于设计了多维隔振器的鲁棒最优控制算法。Jiang 等^[7]提出了融合三阶自抗扰控制与多智能体一致性控制的协同位姿跟踪控制策略。此外, 还有学者将智能优化算法与传统控制方法结合以提升控制性能, Zhu 等^[8]基于高速分拣并联机构, 设计了基于遗传算法优化的模糊PID 控制器。Guo 等^[9]实现了五自由度空间并联机构的带DNN 反馈补偿的计算力矩控制。Zhou 等^[10]实现了无需额外传感器的高精度轨迹跟踪控制。

现有研究虽在并联机构控制方面取得一定成果, 但针对强耦合、非线性的少自由度并联机构, 在复杂工况下仍难以同时满足快速响应、高精度与强鲁棒性的要求。传统PID 控制性能受限, 模糊PID 虽具备一定自适应能力, 但其参数依赖经验整定, 难以实现全局最优。因此, 首先本文采用4-RPC/PPR 并联机构作为出炉机器人位姿调整机构, 构建了其位姿调整系统的控制模型。然后, 设计了模糊PID 控制器, 以提高系统对复杂工况的适应能力和动态响应性能。同时, 引入斑马优化算法对模糊PID 参数进行优化初始化与全局寻优, 以提升控制精度和稳定性。最后, 通过仿真分析与实验样机测试对所提出的控制策略进行了验证。

项目信息: 新型智能铁合金冶炼出炉机器人系统研发, 河北省重点研发计划资助; 编号: 22371801D。

一、出炉机器人位姿调整机构运动分析与设计指标

本文的出炉机器人位姿调整机构为三自由度4-RPC/PPR 冗余驱动并联机构，机构由定平台、动平台、四条 RPC 支链和中间 PPR 支链构成，具有两个沿 Y 向和 Z 向的移动自由度和一个绕 Y 轴的转动自由度，其机构如图1所示。

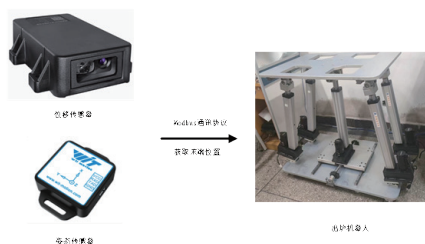


图1 4-RPC/PPR 并联机构图

二、基于斑马优化算法的模糊控制器设计

(一) 基于斑马优化算法的 PID 参数整定

并联机构由于其结构耦合性强、动力学模型复杂，使得运动控制系统设计难度较大。传统 PID 控制器结构简单、易于实现，但在并联机构高精度控制中容易出现响应滞后、超调量较大以及稳态误差难以减小的问题。为提高控制系统的稳定性与精度，本文设计了一种基于斑马优化算法（ZOA）的模糊 PID 控制器。斑马优化算法是一种模拟斑马群体觅食与躲避捕食者行为机制的群智能优化算法，具有全局搜索能力强、收敛速度快等特点。

首先利用 ZOA 对 PID 控制器参数 K_p 、 K_i 、 K_d 进行全局搜索，以获得较优的 PID 初始参数。随后结合模糊控制策略，根据系统运行过程中产生的误差及误差变化率对 PID 参数进行在线调整，实现参数的动态优化。基于上述方法构建了相应的 Simulink 控制系统模型，如图2所示。

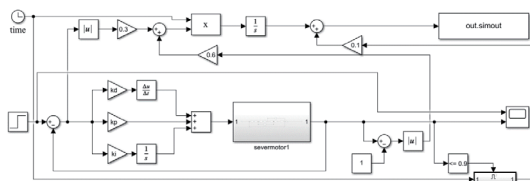


图2 斑马优化算法整定 PID 的仿真图

为了综合评价不同 PID 参数组合下控制系统的性能，在考虑系统超调量、响应速度以及稳态误差的基础上构建综合性能指标函数，并分配各性能指标不同权重，其表达式为：

$$ITAE = \int_0^t (0.3 \cdot |e(t)| + 0.6 \cdot |y(t) - 1|) \cdot t dt + 0.1t_r \quad (1)$$

其中， $e(t)$ 为误差， $y(t)-1$ 为超调量， t_r 为上升时间。

在 ZOA 优化过程中，将每组 PID 参数代入 Simulink 控制系统模型进行仿真计算，并根据系统响应曲线计算指标函数值作为适应度函数，以此评价参数优劣。图3给出了 ITAE 性能指标随迭代次数的变化曲线。从图中可以看出，在优化初期 ITAE 值下降较快，由初始的较大值迅速降低至较小范围，说明斑马优化算法能够快速找到最优解。随着迭代次数的增加，ITAE 值逐渐趋于

稳定，在约 7 - 10 次迭代后基本收敛，表明算法已获得最优的 PID 参数组合。

图4展示了 PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d 在优化过程中的整定曲线。可以看出，在迭代开始阶段各参数变化幅度较大。随着迭代进行，参数逐渐稳定，其中比例系数 K_p 最终稳定在约 36 左右，积分系数 K_i 收敛至较小范围，微分系数 K_d 变化较为平缓并保持较低取值，各参数在约 10 次迭代后基本收敛。

综合图3和图4可以看出，随着 PID 参数不断优化，系统 ITAE 指标持续减小并最终稳定，说明参数整定过程具有良好的收敛性和稳定性。斑马优化算法能够在较少迭代次数内完成 PID 参数寻优，为模糊 PID 控制器提供合理的初始参数，从而提高并联机构控制系统的动态响应性能和控制精度。

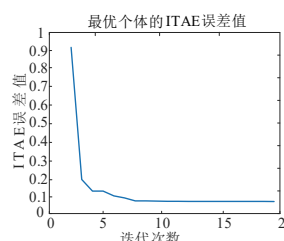


图3 ITAE 随迭代次数变化曲线

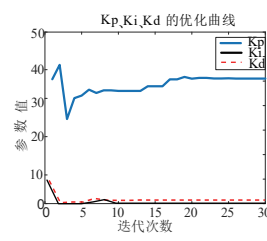


图4 K_p 、 K_i 、 K_d 整定曲线

(二) 模糊 PID 控制器设计

通过斑马优化算法对 PID 参数进行了优化整定后，获得了较优的初始参数。但由于并联机构系统具有一定的非线性和时变性，固定 PID 参数难以始终保持良好的控制效果，因此在此基础上引入模糊控制对 PID 参数进行在线调整。

所设计模糊 PID 控制器，选取系统偏差与偏差变化率作为模糊控制器的输入变量，再以常规 PID 控制器的比例、积分、微分三个参数修正量作为模糊控制器输出变量。

设 K_{p1} 、 K_{i1} 和 K_{d1} 为 PID 控制器初始整定参数，经过模糊规则在线自整定后，可实时更新得到控制器实际运行的参数 K_p 、 K_i 和 K_d 为：

$$\begin{cases} K_p = K_{p1} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i1} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d1} + \Delta K_d \end{cases} \quad (2)$$

模糊 PID 控制器详细设计步骤如下：

(1) 论域选取与变量模糊化

结合控制器初始参数确定各变量基本论域，再依托仿真实验进行调整，将 e 和 ec 的论域设为 $[-6, 6]$ ， ΔK_p 的论域设为 $[-10, 10]$ ， ΔK_i 的论域设为 $[-0.5, 0.5]$ ， ΔK_d 的论域设为 $[-1, 1]$ 。将各语句变量在其论域内划分为七个模糊子集：{ 负大 NB，负中 NM，负小 NS，零 ZRO，正小 PS，正中 PM，正大 PB }。

(2) 隶属度函数的选取设计

隶属度函数用于表征输入输出变量归属各模糊集合的隶属程度。为简化运算、降低计算开销且不影响中间区间模糊取值精度，变量中间区域采用三角形隶属度函数；论域两端边缘区间对系统控制效果影响更为敏感，因此采用高斯型函数曲线，具体如图5所示。

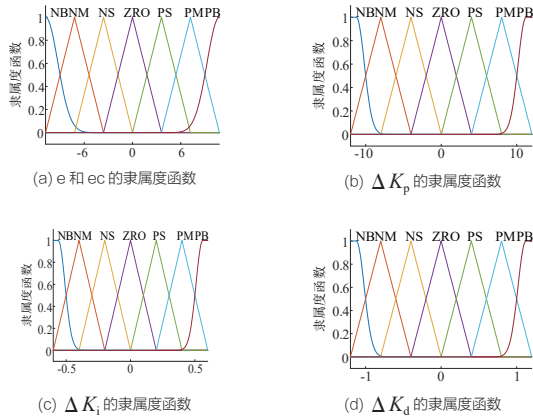


图5隶属度函数图

(3) 模糊规则的构建

当系统偏差值较大时,适当增大 K_p 值来缩短调节时间,同时减小 K_i 和 K_d 值来提升响应速度;当偏差处于适中范围时, K_p 取小以减少系统的超调量, K_i 和 K_d 选取中间合适数值;当系统偏差较小时,适当增大 K_p 和 K_i 以保障系统的稳态控制精度。据此建立模糊控制规则,详见表1~表3所示。

表1 ΔK_p 模糊规则表

ec	e						
	NB	NM	NS	ZRO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZRO	ZRO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZRO	NS
NS		PM	PM	PS	ZRO	NS	NS
PM							
ZRO	PM	PM	PS	ZRO	NS	NM	NM
PS	PM	PS	ZRO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZRO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZRO	ZRO	NM	NM	NM	NB	NB

表2 ΔK_i 模糊规则表

ec	e						
	NB	NM	NS	ZRO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZRO	ZRO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZRO	ZRO
NS	NB	NM	NS	NS	ZRO	PS	PS
ZRO	NM	NM	NS	ZRO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZRO	PS	PS	PM	PB
PM	ZRO	ZRO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZRO	ZRO	PS	PM	PM	PB	PB

表3 ΔK_d 模糊规则表

ec	e						
	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZRO
NS	ZRO	NS	NM	NM	NS	NS	ZRO
ZRO	ZRO	NS	NM	NM	NS	NS	ZRO
PS	ZRO	ZRO	ZRO	ZRO	ZRO	ZRO	NM
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

(4) 模糊推理与解模糊化

采用了 Mamdani 方法作为模糊化的方法;解模糊化方法采用代数积-重心法。将设计的 ZOA 模糊 PID 控制器与 PID 控制器进行对比仿真,模型如图6所示。通过添加阶跃信号并进行仿真得到对比曲线如图7所示。

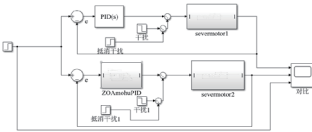


图6 对比仿真模型

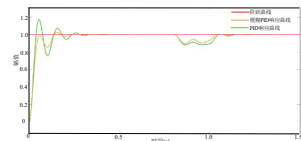


图7 阶跃信号轨迹跟踪的仿真对比

从图7可以看出,ZOA 模糊 PID 相较于 PID 控制器具有更快的响应速度和更小的超调量。在外界干扰条件下,传统 PID 控制系统产生的偏差偏大、恢复过程迟缓,且抗干扰误差更为明显;而模糊 PID 控制下系统偏差与恢复速度明显优于常规 PID 控制。

三、位姿调整机构控制系统设计与实验验证

位姿调整机构控制系统硬件通过研华 UNO-3073G 工控机与乐创 MPC2860 运动控制卡直接通信实现控制指令处理与发送。运动控制卡通过脉冲信号驱动东菱 DS2P 伺服驱动器,该驱动器控制伺服电动机执行运动。控制系统硬件整体架构如图8所示。根据上述设计,搭建出炉机器人位姿调整控制系统如图9所示。

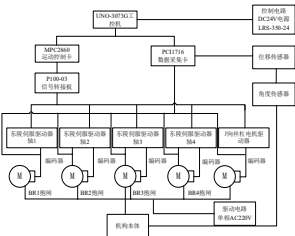


图8 控制系统硬件架构

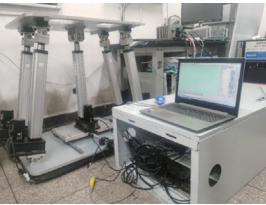


图9 出炉机器人位姿调整机构控制系统

位姿调整机构人机交互界面设计如图10所示。软件界面包含运动测试、点位运动、轨迹运动、Y 向运动及回原点五大功能模块。其中运动测试模块用于各驱动轴的给定速度与位置程序测试;点位运动模块通过输入位姿参数执行定点运动;轨迹运动模块根据轨迹参数实现连续运动;Y 向运动模块基于解耦原理独立执行轴向运动;回原点模块支持机构从任意位置返回初始位置。



图 10 位姿调整机构人机交互界面

通过角位移传感器和激光测距仪实现对出炉机器人位姿调整机构转动角度和位移的测量。

(1) 设计指标验证实验

为检验实验样机能否达到预设设计的指标，分别开展样机进行 Y 向极限位移，Z 向极限位移以及 Y 向极限转角的测试实验。利用角位传感器采集 Y 向转角的极限值，借助激光测距传感器获取 Z 向位移的极限数据；测试结果表明，最大转角可达 30° ，Z 向极限位移区间为 720–1100mm，Y 向正负最大距离可达 $\pm 115\text{mm}$ ，各项参数均符合设计标准。

动平台升至最高 1100mm 的姿态如图 11(a)，沿 Y 偏移 110mm 位姿如图 11(b)。动平台绕 Y 轴正向旋转 20° 位姿如图 11(c)。反向旋转 20° 位姿如图 11(d) 所示。

为验证实验样机是否达到设计指标，开展 Y 向极限转角的实验验证。通过角位传感器获取 Y 向转角极限值，实验测得最大转角达 30° ，均满足设计要求。动平台绕 Y 轴正 / 反向旋转 20° 位姿分别如图 11(a)、(b) 所示。



(a) 绕 Y 轴正向旋转 20° (b) 绕 Y 轴反向旋转 20°
图 11 位姿调整机构设计指标验证

(2) 运动精度测试实验

本小节对该位姿调整机构整体精度开展试验验证。首先在上位机设定 Z 轴期望高度 900 mm 和绕 Y 轴期望转角 20° ，待机构平稳运行后采集角位传感器与激光测距仪数据，重复实验 10 次并将数据记录于表 4。

表 4 精度实验数据表

次数	姿态	
	y 轴角度	z 轴位移
理想	20	900
1	19.737	902
2	19.673	901
3	20.214	900
4	19.515	898
5	19.212	899
6	20.914	902
7	19.602	901

8	20.313	899
9	19.706	900
10	20.193	901

由表 4 可知，Y 轴转动 20° 的实测偏差为 $-1.185^\circ \sim 1.113^\circ$ ，Z 轴 900 mm 位移的重复定位偏差为 $-2\text{ mm} \sim 2\text{ mm}$ 。实验数据表明：(1) 角度控制方面，Y 轴转动偏差范围小于 $\pm 1.2^\circ$ ，控制精度达到设计要求；(2) 位置控制方面，Z 向重复定位偏差控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 范围内，满足运动精度指标。机构整体可实现精确位姿控制。

四、结论

本文针对并联机构控制中传统 PID 存在响应滞后和控制精度不足的问题，提出了一种基于斑马优化算法的模糊 PID 控制方法。首先利用斑马优化算法对 PID 参数进行优化整定，获得较优初始参数，并在此基础上引入模糊控制策略，根据系统误差及其变化率对 PID 参数进行在线调整，实现参数自适应调节。最后通过实验，验证了所提方法能够实现稳定可靠的位姿调节并满足设计要求。

参考文献

- [1]Pan H, Tang S, Chen G, et al. Active Control of Contact Force for a Quasi-Translational Flexible-Link Parallel Mechanism[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2024, 16(7): 071015.
- [2]Wang L, Song B, Sun Z, et al. Flapping trajectory characteristics and attitude control approach of a flapping-wing robot with 2-DOF parallel mechanism[J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 147: 109020.
- [3]Nouri Rahmat Abadi B, Carretero J A. Modeling and real-time motion planning of a class of kinematically redundant parallel mechanisms with reconfigurable platform[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2023, 15(2): 021004.
- [4]Liu P, Wang L, Duan X, et al. On the contact dynamics and adaptive fuzzy sliding mode impedance control for 4-PS parallel mechanism with model uncertainties and external disturbances[J]. Advanced Robotics, 2026, 40(2): 93–111.
- [5]Xu A, Xu Z, Zhang H, et al. Design of active vibration isolation controller for pointing stabilization mechanism based on feedforward – feedback hybrid control[J]. Journal of Vibration and Control, 2025, 31(15–16): 3258–3271.
- [6]Gao X, Niu J, Jia R. Grey relation analysis of natural frequency and semi-active robust optimal control of a multi-dimensional isolator based on parallel mechanism and magneto-rheological damper[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(10): 5181–5191.
- [7]Jiang Z, Chen Z, Xu K, et al. Distributed collaborative control to pose tracking for six-DOF parallel mechanism under multi-cylinder communication[J]. ISA transactions, 2025, 159: 312–325.
- [8]Zhu Z, Liu Y, He Y, et al. Fuzzy PID control of the three-degree-of-freedom parallel mechanism based on genetic algorithm[J]. Applied Sciences, 2022, 12(21): 11128.
- [9]Guo D, Xie Z, Sun X, et al. Dynamic modeling and model-based control with neural network-based compensation of a five degrees-of-freedom parallel mechanism[J]. Machines, 2023, 11(2): 195.
- [10]Zhou Z, Gao J, Zhang L. A model-free decoupled and robust repetitive controller for trajectory tracking performance of a three-axis parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2025, 39(2): 857–875.