

多算法融合的并联食品分拣机器人 轨迹跟踪控制方法

Multi algorithm fusion based trajectory tracking control method for parallel food sorting robots

李云峰¹ 王 聪² 李玉琴³

LI Yunfeng¹ WANG Cong² LI Yuqin³

(1. 山西工程科技职业大学, 山西 晋中 030619; 2. 太原理工大学, 山西 太原 030024;
3. 山西大学, 山西 太原 030006)

(1. Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong,
Shanxi 030619, China; 2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024,
China; 3. Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

摘要:目的:解决并联食品分拣机器人轨迹跟踪控制方法存在的控制精度低和运动稳定性差等问题。方法:在四自由度并联机器人结构基础上,提出将滑模控制算法、模糊控制算法和改进蝙蝠算法相结合用于并联食品分拣机器人轨迹跟踪控制。通过改进蝙蝠算法对模糊算法带宽进行寻优,通过优化的模糊控制算法自适应调整滑膜控制算法的模糊增益和滑膜面斜率,降低控制器的跟踪误差,提高抗干扰能力,并验证所提轨迹跟踪控制方法的优越性。结果:所提轨迹跟踪控制方法实际分拣准确率为 99.90%,平均分拣时间为 0.509 s。结论:与常规方法相比,所提轨迹跟踪控制方法的关节轨迹跟踪精度更高,抗干扰能力更强,输出力矩更加平滑。

关键词:并联机器人;轨迹跟踪;滑模控制算法;模糊控制器;蝙蝠算法;四自由度

Abstract: Objective: To solve the problems of low control accuracy and poor motion stability in the trajectory tracking control method of parallel food sorting robots. **Methods:** On the basis of analyzing the structure of a four degree of freedom parallel robot, a combination of sliding mode control algorithm, fuzzy control algorithm, and improved bat algorithm was proposed for trajectory tracking control of a parallel food sorting robot. Optimizing the bandwidth of fuzzy algorithms by improving the bat algorithm, and adaptively adjusting the fuzzy gain and sliding surface slope of the sliding membrane control

algorithm through the optimized fuzzy control algorithm, the tracking error of the controller was reduced, improve anti-interference ability, and verify the superiority of the proposed trajectory tracking control method. **Results:** The proposed trajectory tracking control method had an actual sorting accuracy of 99.90% and an average sorting time of 0.509 seconds. **Conclusion:** Compared with conventional methods, the proposed trajectory tracking control method has higher joint trajectory tracking accuracy, stronger anti-interference ability, and smoother output torque.

Keywords: parallel robots; trajectory tracking; sliding mode control algorithm; fuzzy controller; bat algorithm; four degrees of freedom

并联机器人以其高速、高精度、高灵活性和刚度大等优点,被广泛应用于食品生产^[1-2]。轨迹跟踪作为并联机器人关键技术之一,可以实现预定轨迹准确运行,已成为当前研究的一大热点。目前,有关并联机器人轨迹跟踪控制方法的研究主要集中在 PID 控制方法、模糊控制方法和滑模控制方法等方面^[3-5]。严智敏等^[6]提出了一种用于并联机器人轨迹跟踪控制的模糊控制方法,该方法可以有效提高控制精度,响应非常迅速。杨桃月等^[7]针对并联机器人存在的强耦合和非线性等特点,提出了将粒子群优化的模糊 PID 控制方法用于并联机器人轨迹跟踪控制,该方法具有较高的跟踪精度,较快的响应能力和较强的抗干扰能力。张铁等^[8]针对并联机器人轨迹跟踪精度差等问题,提出了将前馈力矩补偿与滑模变结构控制相结合用于并联机器人轨迹跟踪控制,所提方法有

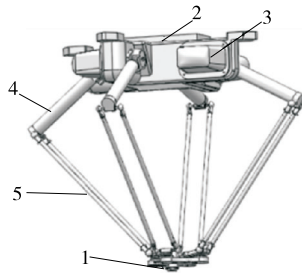
基金项目:山西省教育科学“十四五”规划课题(编号:SZ-21140)
作者简介:李云峰(1974—),男,山西工程科技职业大学副教授。
E-mail:liyunf1974@163.com
收稿日期:2023-11-16 **改回日期:**2024-04-10

效提高了轨迹跟踪精度,具有较强的鲁棒性。董慧芬等^[9]针对并联机器人末端控制精度较低等问题,提出了一种用于并联机器人轨迹跟踪控制的模糊自适应PID控制方法,所提方法大大提高了响应速度和控制精度,具有优良的轨迹跟踪精度。以上方法可以实现并联机器人轨迹跟踪控制,但在强耦合和未知干扰等场合的实际应用中,这些轨迹跟踪控制方法存在跟踪精度低、运动稳定性差等问题,适应性有待进一步提高。

研究拟提出以四自由度并联食品分拣机器人为研究目标,结合滑模控制算法、模糊控制算法和改进蝙蝠算法用于并联食品分拣机器人轨迹跟踪控制。通过改进蝙蝠算法优化模糊控制隶属函数的带宽,通过优化的模糊控制算法调整滑膜控制算法中切换增益和滑膜面斜率,降低控制器的跟踪误差,提高抗干扰能力,并通过验证实验分析其性能,旨在为提高并联食品分拣机器人关节轨迹跟踪精度和抗干扰能力,实现更稳定和高效的分拣提供依据。

1 系统概述

试验以四自由度并联机器人为研究对象,完成食品分拣,实现工业生产自动化^[10-12]。四自由度并联食品分拣机器人主要由动平台、静平台、伺服电机、主动臂和从动臂等组成(图1)。动平台与从动臂连接,静平台与主动臂通过转动副连接,执行器固定在动平台上,可根据实际食品分拣要求实现不同的功能。



1. 动平台 2. 静平台 3. 伺服电动机 4. 主动臂 5. 从动臂

图1 四自由度并联机器人结构

Figure 1 Four degree of freedom parallel robot structure

2 轨迹跟踪控制方法

2.1 超螺旋二阶滑模控制器

采用超螺旋二阶滑模控制器进行轨迹跟踪控制,相比于传统滑膜控制,超螺旋二阶滑模控制器控制项不连续,极大地降低了抖振。设计中需要完成高阶滑膜面选取和控制率设计^[13-16]。

首先,定义系统状态变量,如式(1)所示。

$$\begin{cases} x_1 = \theta \\ x_2 = \dot{\theta} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

x_1 ——输入量;

x_2 ——变化量;

θ ——关节角度,rad;

$\dot{\theta}$ ——关节角变化量,rad。

工业机器人领域内通常取式(2)所示滑膜面。

$$s = e^k + \beta e, \quad (2)$$

式中:

s ——滑膜面;

e, e^k ——实际值与理想值的差和变化量;

β ——滑膜面参数($\beta = \text{diag}([\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3 \ \beta_4])$), $\beta_i > 0$)。

控制律为

$$u = u_{eq} + u_{sw}, \quad (3)$$

$$u_{eq} = \mathbf{M}(x_1)(x_2^{ref} - \beta e^k) + \mathbf{C}(x_1, x_2)x_2 + \mathbf{G}(x_1), \quad (4)$$

$$u_{sw} = -K \text{sign}(s), \quad (5)$$

式中:

u_{eq}, u_{sw} ——等效和切换控制律;

K ——常数 对角 矩阵 ($K = \text{diag}([k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4])$, $k_i > 0$);

$\text{sign}(s)$ ——符号函数;

$\mathbf{M}(x_1), \mathbf{C}(x_1, x_2), \mathbf{G}(x_1)$ ——机器人的惯量矩阵、科氏矩阵以及重力矩阵。

切换函数为

$$\begin{cases} u_{sw} = -K_1 \sqrt{|s|} \text{sign}(s) + v \\ v^k = -K_2 \text{sign}(s) \end{cases} \quad (6)$$

式中:

K_1, K_2 ——设计参数($K_1 = \text{diag}([k_{11} \ k_{12} \ k_{13} \ k_{14}])$, $K_2 = \text{diag}([k_{21} \ k_{22} \ k_{23} \ k_{24}])$);

v, v^k ——机器人速度(rad/s)和加速度(rad/s²)。

由式(6)可知,轨迹跟踪控制切换函数主要由“ $\sqrt{|s|} \text{sign}(s)$ ”和“ $\text{sign}(s) \int 1 dt$ ”组成,“ $\sqrt{|s|} \text{sign}(s)$ ”使曲线连续,降低切换抖动,“ $\text{sign}(s) \int 1 dt$ ”补偿切换误差。

2.2 改进的超螺旋二阶滑膜控制器

模糊控制结构主要由输入量模糊(将数字量转换为模糊语言)、模糊规则库(通用规则)、模糊推理(找到一致的模糊规则)和解模糊(模糊量转换为数字量)组成(图2)^[17-18]。

通过优化的模糊控制算法自适应调整滑膜控制算法滑膜增益和滑膜面斜率。

(1) 滑膜增益调整 k_{1i} ($i=1, 2, 3, 4$): $A_1 \dots A_n$ 为系统滑动模式状态向量(s, s^k)在不同时刻处于状态空间的位

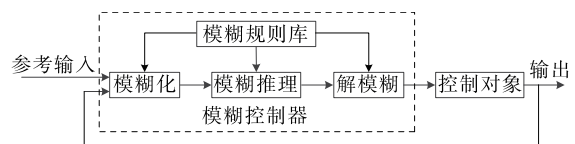


图2 模糊控制原理图

Figure 2 Schematic diagram of control system

置,当系统状态 (s, s^k) 位于 A_1 点时,系统状态远离稳定状态 $(s, s^k) = (0, 0)$,增益 $k_{1i} (i=1, 2, 3, 4)$ 取较大值,尽快达到滑膜面,降低响应时间;当系统状态 (s, s^k) 位于 A_n 点时,系统状态接近稳定状态 $(s, s^k) = (0, 0)$,增益 $k_{1i} (i=1, 2, 3, 4)$ 取较小值,缓慢到达滑膜面,降低切换函数作用。

(2) 滑膜面倾斜 β_i 调整:当系统状态远离滑膜面 $s = e^k + \beta_0 e$ 且倾斜较大的方向上,滑膜面斜率调整为 $s = e^k + \beta_1 e$,使系统状态向量快速到达滑膜面;当系统状态远离滑膜面 $s = e^k + \beta_0 e$ 且倾斜较小的方向上,滑膜面斜率调整为 $s = e^k + \beta_2 e$,使系统状态向量快速到达滑膜面;当系统状态离滑膜面 $s = e^k + \beta_0 e$ 不远,则无需调整滑膜面斜率。

控制器的系统结构如图 3 所示。

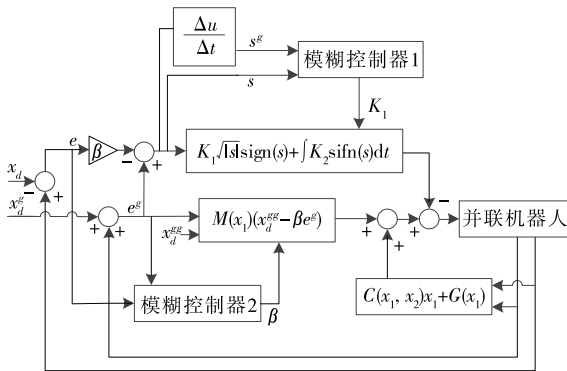


图 3 控制系统结构图

Figure 3 Control system structure diagram

如果模糊控制中带宽设置不合理会导致状态频繁切换动作,因此通过改进蝙蝠算法对其进行优化。

模糊控制器 1 为 2 个输入变量 s, s^k 和 1 个输出变量,模糊控制器 2 为两个输入变量 e, e^k 和一个输入 β_i 。两个控制器由 42 段带宽组成。

以关节累积误差最小和输出力矩振动最小为多目标函数,如式(7)所示。

$$\min f(e, s, t_s) = w_1 \int |e(t)| dt + w_2 \frac{1}{10\ 000} \sum_{k=1}^n \left(\frac{|\text{sign}(s_k) - \text{sign}(s_{k-1})|}{2} \right), \quad (7)$$

式中:

w_1, w_2 ——目标权重;

$\text{sign}(s_k)$ ——符号函数;

t_s ——运行时间, s;

s ——系统滑膜面。

通过改进蝙蝠算法来优化控制器参数,蝙蝠通过随机速度 $v_i(t)$ 在位置 $x_i(t)$ 飞行,而蝙蝠具有不同的波长、响度 A_i 和脉冲发射率 r_i ,如式(8)~式(12)所示^[19-20]。

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\zeta, \quad (8)$$

$$v_i(t+1) = v_i(t) + (x_i(t) - g_{\text{best}})f_i, \quad (9)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1), \quad (10)$$

$$A_i(t+1) = \alpha A_i(t), \quad (11)$$

$$r_i(t+1) = r_i(0)(1 - e^{-\gamma}), \quad (12)$$

式中:

f_{\min}, f_{\max} —— f_i 脉冲频率的最小值和最大值;

ζ ——随机数, (0, 1);

g_{best} ——历史最优位置;

α ——衰减系数, (0, 1);

γ —— >0 的增加系数。

虽然蝙蝠算法收敛较快,但其存在易陷入局部最优和早熟等问题。引入粒子群算法的速度更新解决上述问题,蝙蝠速度更新为

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 f_i(x_i(t) - g_{\text{best}}) + c_2 f_i(x_i(t) - p_{i,\text{best}}), \quad (13)$$

式中:

$v_i(t)$ —— t 代粒子速度, rad/s;

c_1, c_2 ——加速因子。

3 试验结果与分析

3.1 参数设置

为了验证所提轨迹跟踪控制方法的优越性,以袋装食品面包为研究对象,通过并联食品分拣机器人进行轨迹跟踪控制,试验设备为华为 PC,操作系统为 windows11 64 位旗舰, CPU 为 Core i7 13700, 5.2 GHz 频率, 32 GB 内存。并联食品分拣机器人参数见表 1。并联食品分拣机器人控制器为 Coac-otobx-uct2h-4pv-m23, 伺服电机为 TS4609N7185E200; 400W 绝对式电机, 伺服驱动为 GTHD-0062AAP1。轨迹跟踪控制算法参数见表 2。

表 1 并联食品分拣机器人参数

Table 1 Parameters of parallel food sorting robot

参数	单位	数值
静平台半径	mm	200
动平台半径	mm	50
主动臂长度	mm	880
从动臂长度	mm	620
轨迹规划(B 样条)	次	5
最大负载	kg	0.2

表 2 轨迹跟踪控制算法参数

Table 2 Trajectory tracking control algorithm parameters

参数	数值	参数	数值
K_1	[10, 40]	响度衰减系数	0.97
β	[100, 1 000]	初始频率	1
K_2	$\text{diag}([1\ 1\ 1\ 1]) \cdot 10^3$	脉冲系数	0.1
种群数	40	飞行尺度	1.5
迭代次数	1 000	权值系数 w_1, w_2	0.5, 0.5
初始响度	1		

3.2 轨迹跟踪控制试验

为了验证试验轨迹跟踪控制方法的优越性,对并联机器人进行轨迹跟踪试验,通过光电编码器测量关节角度,对试验方法与优化前的模糊滑膜控制方法进行对比,

为更好地评价控制器的轨迹跟踪性能,加入变干扰项,分别在无干扰和干扰的情况下对系统进行试验分析。优化前各关节误差曲线如图4所示,试验方法的各关节误差曲线如图5所示。优化前后各关节的平均误差见表3。

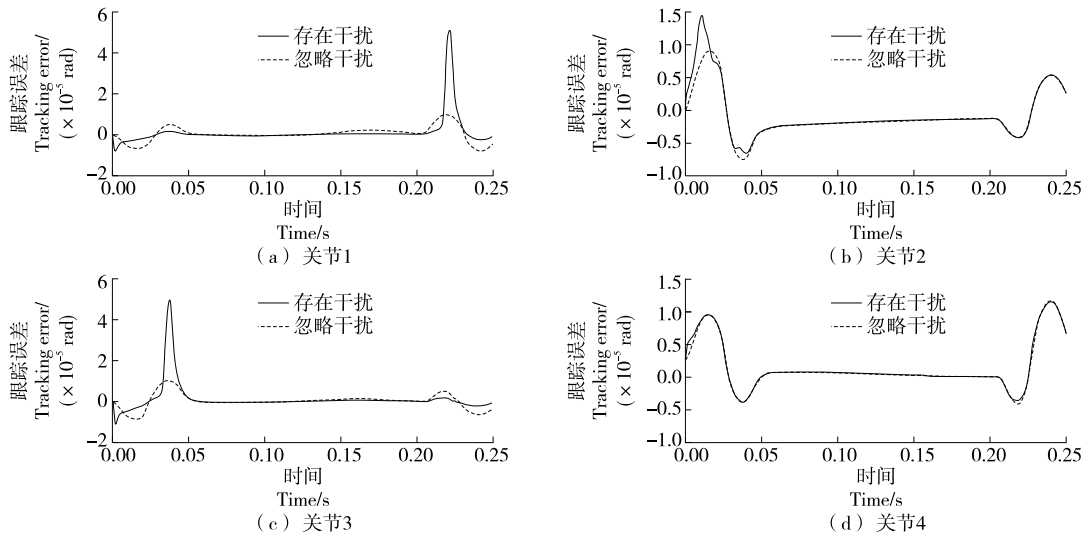


图4 优化前各关节误差曲线

Figure 4 Error curves of each joint before optimization

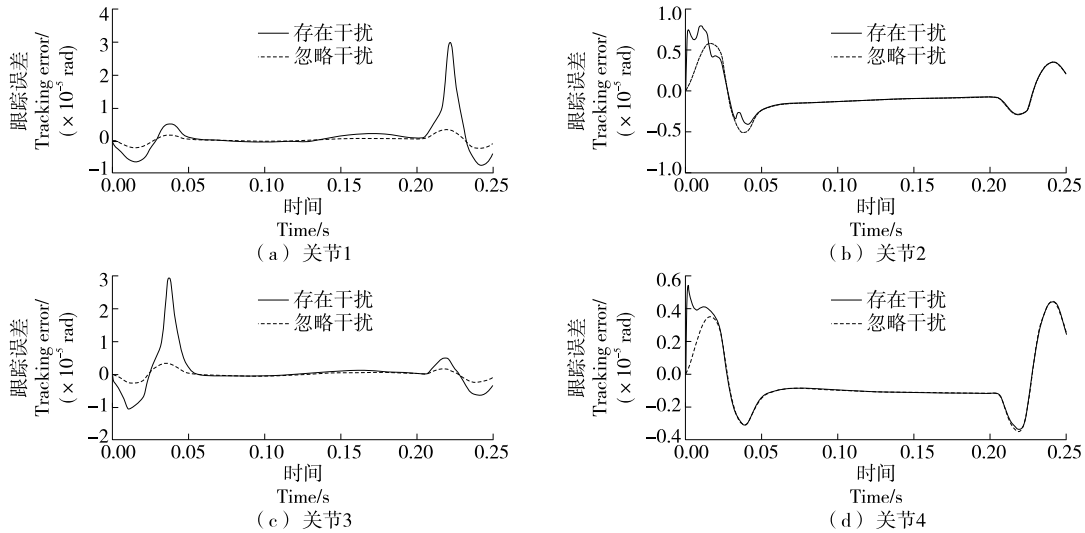


图5 试验方法各关节误差曲线

Figure 5 Error curve of each joint test method

表3 优化前后各关节平均误差

Table 3 Error of each joint before and after optimization $\times 10^{-5}$ rad

关节	试验方法		模糊滑膜控制方法	
	有干扰	忽略干扰	有干扰	忽略干扰
1	0.086	0.006	3.02	0.12
2	0.048	0.045	0.79	0.32
3	0.056	0.005	2.99	0.18
4	0.072	0.043	0.54	0.23

由图4、图5和表3可知,试验方法在有干扰和忽略干扰的情况下,各关节的平均误差变化较小,但与优化前模糊滑膜控制方法相比,无论有干扰还是忽略干扰,试验方法的各关节平均跟踪误差都有明显提高。在有干扰的情况下,与模糊滑膜控制方法相比,试验方法的关节1、2、3、4的平均误差分别降低了97.15%,93.92%,98.13%,86.67%。在忽略干扰的情况下,与模糊滑膜控制方法相比,试验方法的关节1、2、3、4的平均误差分别降低了

95.00%, 85.00%, 97.22%, 81.30%。综上,由改进蝙蝠算法优化后的模糊滑膜控制器比优化前具有更高的跟踪精度和抗干扰能力。

为了进一步验证试验所提轨迹跟踪控制方法的优越

性,将试验方法与文献[7]粒子群优化的模糊 PID 控制和文献[21]RBF 神经网络优化的滑动控制器进行对比。传送带速度为 50~200 mm/s,袋装食品面包数 5 000,随机分布,不同方法分拣效果见表 4。

表 4 不同方法的分拣效果

Table 4 Sorting effects of different methods

传送速度/ (mm · s ⁻¹)	试验方法		文献[7]		文献[21]	
	分拣成功率/%	平均分拣时间/s	分拣成功率/%	平均分拣时间/s	分拣成功率/%	平均分拣时间/s
50	99.94	0.805	99.00	0.985	98.28	0.978
100	99.90	0.509	98.96	0.705	98.24	0.745
150	94.30	0.512	90.00	0.722	90.90	0.780
200	85.10	0.512	80.10	0.722	82.00	0.780

由表 4 可知,试验方法比文献[7]和文献[21]具有更高的分拣成功率和更短的平均分拣时间。当传送带速度为 100 mm/s 时,试验方法的分拣成功率和平均分拣时间综合最优,与文献[7]和文献[21]相比,其分拣成功率分别提高了 0.95%, 1.69%, 平均分拣时间分别降低了 27.80%, 31.68%。这是因为试验方法结合了滑动控制算法、模糊控制算法和改进蝙蝠算法用于并联食品分拣机器人轨迹跟踪控制,提高了并联食品分拣机器人分拣的准确率和效率,具有较高的轨迹跟踪精度和抗干扰能力。

4 结论

结合滑膜控制算法、模糊控制算法和改进蝙蝠算法对并联机器人轨迹跟踪进行控制,有效提高了并联食品分拣机器人的轨迹跟踪精度,具有较高的效率和抗干扰能力。与文献[7]和文献[21]相比,试验方法的分拣成功率分别提高了 0.95% 和 1.69%, 平均分拣时间分别降低了 27.80% 和 31.68%。但研究仅对四自由度并联食品分拣机器人进行试验,后期将不断完善模型,提高整个控制方法的通用性。

参考文献

[1] JIANG L, WANG S, XIE Y, et al. Decoupled fractional supertwisting stabilization of interconnected mobile robot under harsh terrain conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(8): 8 178-8 189.

[2] 胡国喜, 王超, 刘宇珩. 基于改进光滑滑模阻抗控制的水果分拣机器人夹持机构控制方法[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 123-126.

HU G X, WANG C, LIU Y H. Control method of fruit sorting robot clamping mechanism based on improved smooth sliding mode impedance control[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 123-126.

[3] YAO M, XIAO X, TIAN Y, et al. A fast terminal sliding mode control scheme with time-varying sliding modesur-faces[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(10): 5 386-5 407.

[4] 解则晓, 李斌, 任凭. 基于能量指标的 Delta 并联机器人拾放轨

迹参数优化及验证[J]. 计算机集成计算系统, 2018, 24(12): 3 073-3 081.

XIE Z S, LI B, REN P. Optimization and verification of delta parallel robot pickup and release trajectory parameters based on energy index[J]. Computer Integrated Computing System, 2018, 24(12): 3 073-3 081.

[5] 章鸿. Delta 快速分拣机器人轨迹优化算法研究[J]. 机械设计与制造, 2021, 12(6): 288-295.

ZHANG H. Research on trajectory optimization algorithm of delta rapid sorting robot[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021, 12(6): 288-295.

[6] 严智敏, 徐顺建, 简辉华. 3-RPS 并联机器人动力学分析及模糊控制仿真[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 537-541, 567.

YAN Z M, XU S J, JIAN H H. Dynamics analysis and fuzzy control simulation of 3-RPS parallel robots[J]. Journal of North Central University (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 537-541, 567.

[7] 杨桃月, 陈国雄, 曹阳, 等. 基于 PSO 优化模糊 PID 的 3-PRS 并联机器人控制仿真分析[J]. 装备制造技术, 2022, 12(8): 12-16.

YANG T Y, CHEN G X, CAO Y, et al. Simulation analysis of 3-PRS parallel robot control based on PSO optimized fuzzy PID[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022, 12(8): 12-16.

[8] 张铁, 曹亚超, 邹焱颀, 等. 具有线性位置解的 3-CRU 并联机器人轨迹跟踪[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 16-22.

ZHANG T, CAO Y C, ZOU Y B, et al. Trajectory tracking of 3-CRU parallel robots with linear position solutions[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(6): 16-22.

[9] 董慧芬, 王渗, 宋金海. Delta 并联清洗机构轨迹跟踪控制方法研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(11): 27-32.

DONG H F, WANG S, SONG J H. Research on trajectory tracking control method for Delta parallel cleaning mechanism[J]. Computer Simulation, 2021, 38(11): 27-32.

[10] 刘现伟, 颀潭成, 徐彦伟, 等. 基于合成运动的 Delta 机器人轨迹规划[J]. 制造业自动化, 2021, 43(7): 19-23, 47.

- LIU X W, JIE T C, XU Y W, et al. Delta robot trajectory planning based on synthetic motion[J]. *Manufacturing Automation*, 2021, 43(7): 19-23, 47.
- [11] LI W, XIONG R. A hybrid visual servo control method for simultaneously controlling anonholonomic mobile and a manipulator[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(2): 141-154.
- [12] 徐岩. 基于改进引力搜索算法的高速并联机器人轨迹优化[J]. *食品与机械*, 2022, 38(5): 82-86.
- XU Y. Trajectory optimization of high-speed parallel robots based on improved gravity search algorithm[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(5): 82-86.
- [13] 姚学峰, 李超. 基于改进 NURBS 曲线插补算法的食品分拣机器人轨迹规划[J]. *食品与机械*, 2022, 38(3): 80-85.
- YAO X F, LI C. Trajectory planning of food sorting robots based on improved NURBS curve interpolation algorithm[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(3): 80-85.
- [14] 朱大昌, 盘意华, 杜宝林, 等. 一种并联机器人轨迹规划算法研究[J]. *机床与液压*, 2023, 51(5): 14-22.
- ZHU D C, PAN Y H, DU B L, et al. Research on a trajectory planning algorithm for parallel robots [J]. *Machine Tool and Hydraulic*, 2023, 51(5): 14-22.
- [15] 张灵枝, 黄艳, 于英杰, 等. 基于近红外光谱技术的六大茶类快速识别[J]. *食品与生物技术学报*, 2024, 43(1): 48-59.
- ZHANG L Z, HUANG Y, YU Y J, et al. Rapid identification of six major tea categories based on near-infrared spectroscopy technology[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2024, 43(1): 48-59.
- [16] 张皓宇, 刘晓伟, 任川, 等. 并联机器人正运动学与 NURBS 轨迹规划[J]. *机械设计与制造*, 2021, 12(4): 282-292.
- ZHANG H Y, LIU X W, REN C, et al. Forward kinematics and NURBS trajectory planning of parallel robot [J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2021, 12(4): 282-292.
- [17] 张鑫, 秦东晨, 谢远龙, 等. 基于双环自适应滑模的移动机器人轨迹跟踪控制[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2024, 47(1): 13-20.
- ZHANG X, QIN D C, XIE Y L, et al. Mobile robot trajectory tracking control based on dual loop adaptive sliding mode[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 47(1): 13-20.
- [18] AZUMAYA C M, DAYS E L, VINSON P N, et al. Screening for AMPA receptor auxiliary subunit specific modulators [J]. *PLoS One*, 2017, 12(3): 1 523-1 538.
- [19] 朱光耀. 基于无标定视觉伺服的全向移动机械臂跟踪控制[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(23): 23-29.
- ZHU G Y. Tracking control of omnidirectional mobile manipulator based on uncalibrated visual servo [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(23): 23-29.
- [20] 王曦, 王宗彦, 张宇廷, 等. 基于 NSGA-II 算法的并联机器人多目标轨迹规划 [J]. *机械设计与制造工程*, 2022, 51(12): 72-77.
- WANG X, WANG Z Y, ZHANG Y T, et al. Multi objective trajectory planning for parallel robots based on NSGA - II algorithm[J]. *Mechanical Design and Manufacturing Engineering*, 2022, 51(12): 72-77.
- [21] 任鹏飞, 耿世勇. 3-RRR 平面并联机器人神经网络滑模控制研究[J]. *机床与液压*, 2018, 46(15): 16-19.
- REN P F, GENG S Y. Research on neural network sliding mode control of 3-RRR planar parallel robots [J]. *Machine Tool & Hydraulic*, 2018, 46(15): 16-19.

(上接第 71 页)

- [14] YU B, YANG J, WANG D, et al. An updated review of recent advances on modified technologies in transcritical CO₂ refrigeration cycle[J]. *Energy*, 2019, 189: 116147.
- [15] GULLO P, TSAMOS K M, HAFNER A, et al. Crossing CO₂ equator with the aid of multi-ejector concept: A comprehensive energy and environmental comparative study[J]. *Energy*, 2018, 164: 236-263.
- [16] ZHU J, YANG D Z, ZHANG Q, et al. Performance analysis of multi-refrigerant multi-variable environment refrigeration system based on marine cold chamber[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2 195(1): 012037.
- [17] AHAMED J U, SAIDUR R, MASJUKI H H. A review on exergy analysis of vapor compression refrigeration system[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(3): 1 593-1 600.
- [18] ZHENG L, HU Y, MI C, et al. Advanced exergy analysis of a CO₂ two-phase ejector [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 209: 118247.
- [19] HASAN C, HAKAN C. Advanced exergy analyses and optimization of a cogeneration system for ceramic industry by considering endogenous, exogenous, avoidable and unavoidable exergies under different environmental conditions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 140: 110730.
- [20] OZGUR B, HAKAN A, ONDER T. Enhanced dynamic exergy analysis of a micro-jet (μ -jet) engine at various modes[J]. *Energy*, 2022, 239: 121911.
- [21] MENGTING S, YU Z, LEI Z, et al. Advanced exergy analysis for the solid oxide fuel cell system combined with a kinetic-based modeling pre-reformer [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 245: 114560.
- [22] LIU Z, LIU Z H, YANG X Q, et al. Advanced exergy and exergoeconomic analysis of a novel liquid carbon dioxide energy storage system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112391.
- [23] ELBARGHTHI A F A, HAFNER A, BANASIAK K, et al. An experimental study of an ejector-boosted transcritical R744 refrigeration system including an exergy analysis [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 238: 114102.