

基于改进 MOPSO 和多目标的 SCARA 并联机器人的食品分拣轨迹优化

金光¹ 李若琪² 郑强仁³

(1. 郑州铁路职业技术学院, 河南 郑州 451460; 2. 河南工程学院, 河南 郑州 451191;
3. 河北工业大学, 天津 300401)

摘要: [目的] 针对 SCARA 高速并联机器人在食品分拣过程中运行冲击与能耗难以兼顾的问题, 通过轨迹优化方法提升其综合性能, 满足食品分拣场景对平稳、低耗的实际需求。[方法] 在对整个食品分拣系统进行分析的基础上, 提出了一种结合改进非均匀五次 B 样条和多目标模型的 SCARA 高速并联机器人食品分拣轨迹优化方法。通过始末路径引入虚拟路径点优化非均匀五次 B 样条插值方法构建 SCARA 高速并联机器人食品分拣轨迹, 以运行冲击和运行能耗综合最优为多目标轨迹优化模型, 通过外部档案、全局最优粒子、惯性权重优化的多目标粒子群算法求解模型, 完成 SCARA 高速并联机器人轨迹优化。通过试验对所提轨迹优化方法的运行冲击和能耗进行分析。[结果] 所提轨迹优化方法可有效实现 SCARA 高速并联机器人食品分拣过程中运行冲击与能耗的综合优化, 轨迹平滑性与算法求解性能均得到显著提升。与优化前相比, 运行冲击和运行能耗降低 50% 以上, 不同分拣速度下的误差未超过 1 mm。[结论] 通过结合改进非均匀五次 B 样条与多目标模型的轨迹优化方法, 可实现机器人在食品分拣过程中运行冲击和能耗的综合最优。

关键词: 高速并联机器人; 食品分拣; 轨迹优化; 五次 B 样条; 多目标粒子群算法

Trajectory optimization for food sorting based on improved MOPSO and multi-objective SCARA parallel robots

JIN Guang¹ LI Ruqi² ZHENG Qiangren³

(1. Zhengzhou Railway Vocational and Technical College, Zhengzhou, Henan 451460, China; 2. Henan University of Engineering, Zhengzhou, Henan 451191, China; 3. Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: [Objective] To balance the impact and energy consumption of SCARA high-speed parallel robots during food sorting, trajectory optimization methods are used to improve their comprehensive performance and meet the practical needs of smooth and low-energy-consumption food sorting. [Methods] Based on the analysis of the entire food sorting system, a trajectory optimization method for food sorting is proposed, combining an improved non-uniform quintic B-spline interpolation with multi-objective SCARA high-speed parallel robots. By introducing virtual path points into the starting and ending paths, a non-uniform quintic B-spline interpolation is used to construct the food sorting trajectory of SCARA high-speed parallel robots. The multi-objective trajectory optimization model is based on the simultaneous minimization of operational impact and energy consumption. The model is solved by a multi-objective particle swarm algorithm integrating external archives, global optimal particles, and inertia weight to achieve the trajectory optimization of SCARA high-speed parallel robots. The operational impact and energy consumption of the proposed method are analyzed through experiments. [Results]

基金项目: 河南省科技厅科技攻关项目(编号: 242102240130)

通信作者: 金光(1980—), 男, 郑州铁路职业技术学院副教授, 硕士。E-mail: nndsgl@2980.com

收稿日期: 2025-04-23 **改回日期:** 2025-07-29

引用格式: 金光, 李若琪, 郑强仁. 基于改进 MOPSO 和多目标的 SCARA 并联机器人的食品分拣轨迹优化[J]. 食品与机械, 2025, 41(8): 85-92.

Citation: JIN Guang, LI Ruqi, ZHENG Qiangren. Trajectory optimization for food sorting based on improved MOPSO and multi-objective SCARA parallel robots[J]. Food & Machinery, 2025, 41(8): 85-92.

The proposed method effectively achieves comprehensive optimization of operational impact and energy consumption in the food sorting of SCARA high-speed parallel robots, and significantly improves trajectory smoothness and algorithm solving performance. Compared with the pre-optimization method, the operational impact and energy consumption are reduced by more than 50%, and the error at different sorting speeds does not exceed 1 mm. **[Conclusion]** The combination of the improved non-uniform quintic B-spline and multi-objective trajectory optimization achieves the comprehensive optimization of operational impact and energy consumption for robots in food sorting.

Keywords: high-speed parallel robot; food sorting; trajectory optimization; quintic B-spline; multi-objective particle swarm algorithm

在中国制造 2025 战略背景下,智能制造与柔性自动化成为轻工业转型升级的核心方向。高速并联机器人凭借自由度少、响应速度快、定位精度高等显著优势,在食品、医药等领域得到了广泛应用^[1-2]。SCARA 高速并联机器人作为一种特殊的并联构型,其结构特性为食品分拣作业带来了独特优势与挑战。现有轨迹规划方法多采用多项式插值或简单样条曲线,虽能保证基本运动学约束,却难以在运行冲击和能耗之间实现多目标平衡^[3-4]。

目前,有较多学者对高速并联机器人末端轨迹规划方法进行研究,并取得了一些显著的成果。在样条曲线应用方面,部分学者^[5-6]采用 B 样条曲线进行轨迹规划,通过调整控制点来优化轨迹的平滑性,有效降低了机器人运动过程中的冲击。在智能算法优化方面,遗传算法、粒子群算法等智能优化算法被广泛用于轨迹参数的优化,在提升效率或降低能耗上取得了一定成效。Wang 等^[7]提出一种结合改进的多目标金鹰优化算法和五次 B 样条曲线的机器人轨迹规划方法,以运行时间和运行冲击最优为优化目标构建优化模型。该方法可在保证机器人运行效率(缩短任务时间)的同时,降低了运行过程中的加加速度,使机器人运动更平稳,减少了机械磨损和振动,提升了轨迹跟踪精度。为提升并联机器人的轨迹规划性能,赵涛等^[8]提出了一种基于 B 样条曲线的轨迹规划方法,该方法使机器人运动过程中柔索的张力波动幅度降低 23%,轨迹跟踪误差控制在 0.5 mm 以内,有效提升了机器人的运动稳定性和控制精度。为有效提高机器人在食品分拣中的效率和安全性,傅明娣等^[9]提出了一种基于改进蜣螂优化算法和多目标模型的分拣策略。与传统分拣策略相比,该方法的分拣效率提升了 18%,食品破损率降低了 25%,能耗降低了 12%,显著提升了食品分拣机器人的综合性能。郭彤颖等^[10]采用 4-3-3-4 多项式插值构建并联机器人的运动轨迹,建立了改进多目标灰狼算法求解多目标模型。优化后的轨迹运行时间缩短了 10.2%,关节冲击峰值降低了 18.5%,验证了该方法的有效性。针对并联机器人运动学耦合复杂、轨迹规划难度大等问题,来海滨等^[11]提出了一种基于 345 修正梯形运动规律的轨迹规划方法。相比于传统方法,该方法使机器人运动过程中的最大加速度降低了 12%,运行平稳性得到显著提升,同时运动时间较传统梯形运动规律缩短了 5.6%,实现了效率与平稳性的较好平衡。虽然上述方法可以实现高速

并联机器人轨迹优化,满足基本的运动学约束,但难以在运行冲击和能耗之间实现多目标平衡。

基于此,试验以 SCARA 高速并联机器人为研究对象,聚焦食品分拣场景的“稳定—能耗”综合需求,提出一种基于改进多目标粒子群算法(multi objective particle swarm optimization, MOPSO)与非均匀五次 B 样条的末端轨迹优化方法。通过构建融合运行冲击与能耗的多目标优化模型,结合改进 MOPSO 算法的全局寻优能力与五次 B 样条的高平滑特性,实现机器人末端分拣轨迹的精准优化。旨在为食品自动化生产线的平稳低耗运行提供技术支撑。

1 SCARA 并联机器人食品分拣系统概述

SCARA 并联机器人食品分拣系统如图 1 所示,主要由视觉采集、运动控制和人机交互三部分组成。视觉采集模块是系统的“眼睛”,负责对输送线上的食品进行实时图像采集与信息分析,为分拣决策提供数据支撑。运动控制模块是系统的“手臂”,基于计算机的指令,控制 SCARA 并联机器人完成抓取、搬运、放置等动作,核心在于高速响应与定位精度。人机交互模块是系统的“大脑控制台”,负责操作人员与设备的信息交互,简化操作流程并支持系统监控与调试^[12-13]。

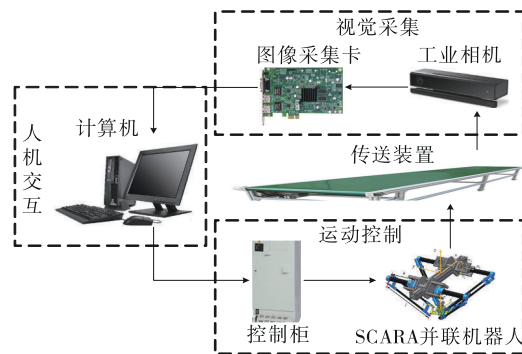


图 1 SCARA 并联机器人食品分拣系统

Figure 1 Food sorting system of SCARA parallel robots

四自由度 SCARA 并联机器人平台如图 2 所示,其机械结构设计围绕高精度运动传递与多自由度协同展开,核心由四部分构成:静平台、动平台(上、下动平台、滚珠丝杠、末端执行器)、4 条动力传递运动支链及驱动部件,最终实现末端动平台在 4 个自由度上的高精度运动,满足复杂作业场景的需求^[14]。

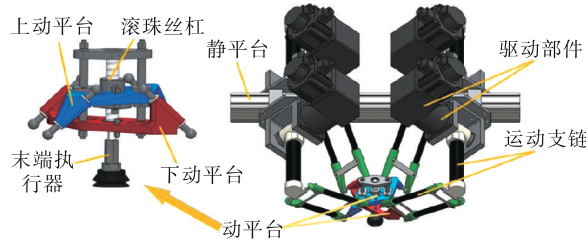


图2 机器人平台

Figure 2 Robot platform

2 SCARA 并联机器人轨迹优化

在对 SCARA 并联机器人末端轨迹规划研究中,选择关节空间开展试验测试,借助改进的非均匀五次 B 样条来规划 SCARA 并联机器人末端运行轨迹。该方法能有效保证轨迹的平滑性与连续性,为机器人的稳定运动奠定基础。同时,以运行冲击和工作能耗综合最优为多目标,构建了科学合理的轨迹优化模型,充分兼顾了机器人作业的稳定性与节能性。在此基础上,通过改进的 MOPSO 算法对该模型进行求解,凭借算法的优良寻优能力,精准找到最优轨迹参数,完成 SCARA 高速并联机器人末端轨迹优化。

2.1 改进的非均匀五次 B 样条末端轨迹规划

末端轨迹规划采用改进的非均匀五次 B 样条,利用其在曲率连续性上的优势(可保证轨迹的位置、速度、加速度及加加速度均连续),为机器人高速运动提供平滑基础^[15-17]。具体改进措施:

(1) 针对性引入虚拟路径点。在常规非均匀五次 B 样条基础上,于轨迹始末路径点各额外添加两个虚拟路径点,通过虚拟点的参数配置,直接对启停时刻的跃度形成约束,从源头确保运动初始与终止阶段无冲击。采用美国 Adept 公司提出的标准取放轨迹作为基础路径。

(2) 节点矢量的适应性调整。为匹配虚拟路径点,对应增加两个虚拟节点(u_{k+2} 和 u_{k+f+1}),使节点总数满足 $m+1=2(k+1)+f$,同时保持两端节点重复度为 6 的要求。内部节点仍采用累积弦长参数化归一化,既保证型值点分布特征的精准反映,又通过虚拟节点与路径点的对应关系,强化节点矢量对高阶连续性的支撑。

(3) 控制顶点反算的约束强化。因虚拟节点导致控制顶点数量增加,通过补充“轨迹始末两端跃度为零”的限制条件,使等式数目与控制顶点数目匹配,确保反算过程有唯一解。这一改进既解决了参数冗余问题,又通过跃度约束进一步巩固了连续特性,保证机器人关节运动的平稳性。

图 3 为改进非均匀五次 B 样条末端轨迹规划曲线。

2.2 对目标优化模型

为实现 SCARA 并联机器人分拣轨迹的进一步优化,

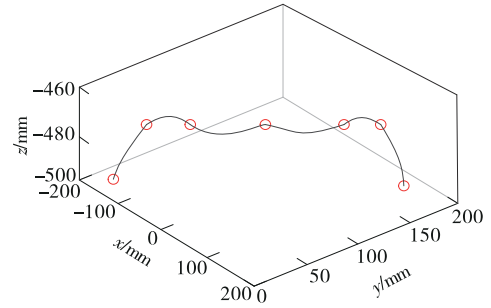


图3 改进非均匀五次B样条末端轨迹规划曲线

Figure 3 End-point trajectory planning based on improved non-uniform quintic B-spline

试验以运行冲击和能耗为多优化目标构建轨迹优化模型。其中,运行冲击主要通过关节角跃度(加加速度)来量化表征,因其直接反映了运动过程中机械结构所受的瞬时冲击强度,跃度值越大,冲击越剧烈,易导致机器人振动、部件磨损加剧甚至影响分拣精度。工作能耗聚焦于驱动电机的能量消耗,构建如式(1)所示的目标函数^[18-19]。

$$\begin{cases} G_1 = \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (j_n)^2 dt} \\ G_2 = \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (q_n \tau_n)^2 dt} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:

G_1 ——运行冲击, mm/s^3 ;

G_2 ——运行能耗, J;

T ——单次分拣时间, s;

N ——节点数;

τ_n ——关节 n 在时刻 t 的驱动力矩, $\text{N}\cdot\text{mm}$;

q_n ——关节 n 在时刻 t 的旋转角速度, rad/s ;

j_n ——关节 n 在时刻 t 的加速度, mm/s^3 。

约束如式(2)所示。

$$\begin{cases} |v_n(t)| \leq v_{\max} \\ |a_n(t)| \leq a_{\max} \\ |j_n(t)| \leq j_{\max} \\ |\tau_n(t)| \leq \tau_{\max} \\ |F_n(t)| \leq F_{\max} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:

$v_{\max}$ ——速度最大值, mm/s ;

$a_{\max}$ ——加速度最大值, mm/s^2 ;

$j_{\max}$ ——加加速度最大值, mm/s^3 ;

$\tau_{\max}$ ——力矩最大值, $\text{N}\cdot\text{mm}$;

$F_{\max}$ ——载荷最大值, N。

2.3 优化模型求解

多目标粒子群算法(MOPSO)作为传统粒子群优化

算法(PSO)在多目标领域的延伸,凭借其独特的优化机制,在求解多目标优化问题时展现出显著优势。传统 PSO 通过粒子间的信息共享和群体协作实现单目标寻优,而 MOPSO 在此基础上引入了针对多目标特性的核心改进,使其能够高效处理存在多个相互冲突目标函数的复杂问题^[20]。试验采用 MOPSO 求解多目标优化模型。

多目标粒子群算法(MOPSO)在处理多目标优化问题时,面临解的多样性、收敛速度、全局最优选择等挑战。针对上述问题,试验提出了多种改进方法。

(1) 外部档案优化:通过优化外部档案的维护机制,保留高质量非支配解,提升解的多样性和收敛性。根据档案中解的拥挤度动态调整档案规模,删除冗余解(被支配或拥挤度过高的解),保留分布均匀的非支配解。拥挤度计算如式(3)所示。

$$c_{\text{rowd}, il} = \begin{cases} \infty, \text{极值点} \\ \frac{f_l(i+1) - f_l(i-1)}{f_{l, \max} - f_{l, \min}}, \text{others} \end{cases}, \quad (3)$$

式中:

$c_{\text{rowd}, il}$ ——档案中第 i 个解在第 l 个目标上的拥挤度;

$f_l(i)$ ——第 i 个解的第 l 个目标值;

$f_{l, \max}, f_{l, \min}$ ——档案中第 l 个目标的最大值和最小值。

当档案规模超过阈值 N 时,删除拥挤度最小的解(分布过密的解)。

(2) 全局最优粒子优化:传统 MOPSO 随机选择全局最优,易导致收敛方向混乱。改进方法通过引导粒子向更优方向进化,根据档案中解的“适应度”(如非支配层级+拥挤度)分配选择概率,优先选择层级高、分布均匀的解作为全局最优。选择概率如式(4)所示。

$$P(s) = \frac{r_{\text{ank}}(s)^{-1} + c_{\text{rowd}}(s)}{\sum_{s' \in A_{\text{chose}}} [r_{\text{ank}}(s')^{-1} + c_{\text{rowd}}(s')]}, \quad (4)$$

式中:

s' ——外部档案中任意一个解;

$r_{\text{ank}}(s)$ ——解 s 的非支配层级;

$c_{\text{rowd}}(s)$ ——总拥挤度。

(3) 惯性权重优化:动态调整惯性权重,平衡全局搜索(探索)和局部搜索(开发)能力。初期用较大 ω 增强全局搜索,后期减小 ω 增强局部收敛,如式(5)所示。

$$\omega(t) = \omega_{\text{end}} + (\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}}) \times \left(1 - \frac{t}{T_{\max}}\right)^2, \quad (5)$$

式中:

t ——当前迭代次数;

$T_{\max}$ ——最大迭代次数;

ω_{start} ——初始权重, $[0.9, 1]$;

ω_{end} ——结束权重, $[0.4, 0.6]$ 。

算法求解步骤:

步骤 1:初始化参数,设定粒子群规模、最大迭代次

数、初始惯性权重、结束权重、外部档案阈值等参数,随机生成粒子初始位置和速度。

步骤 2:评估粒子适应度,计算每个粒子的多目标函数值,确定各粒子的非支配层级 $\text{rank}(s)$ 。

步骤 3:更新外部档案,将非支配解加入外部档案,依据相关公式计算档案中各解的拥挤度,删除被支配的冗余解,若档案规模超过阈值 N ,删除拥挤度最小的解。

步骤 4:判断是否满足终止条件,若当前迭代次数达到 $T_{\max}$,输出外部档案中的帕累托最优解集,通过 TOPSIS 方法选择最优解,流程结束;否则,继续下一步。

步骤 5:选择全局最优粒子,根据相关公式计算外部档案中各解的选择概率,依据概率选择全局最优粒子。

步骤 6:更新惯性权重,计算当前迭代次数 t 对应的惯性权重。

步骤 7:更新粒子速度和位置,根据惯性权重、个体最优和全局最优,更新粒子的速度和位置。

步骤 8:迭代次数加 1,使当前迭代次数向最大迭代次数逼近,返回步骤 2,重复上述过程。

求解流程如图 4 所示。

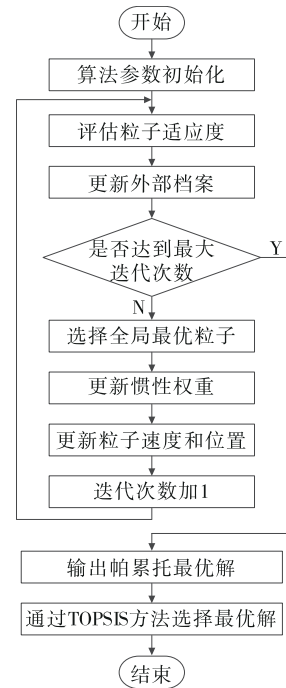


图 4 算法求解流程

Figure 4 Algorithm solving process

3 SCARA 并联机器人轨迹优化试验

3.1 试验参数

为验证试验所提 SCARA 并联机器人在食品分拣轨迹优化中的优越性,搭建了 SCARA 并联机器人食品分拣试验平台如图 5 所示,并选取袋装食品(包括薯片、面包、

坚果)作为试验目标,通过对袋装食品的抓取、搬运、放置等动作,检验优化后轨迹的性能。计算机采用华为笔记本,具体配置为搭载 Windows 11 64 位旗舰版操作系统,配备英特尔酷睿 i7-13700 处理器(主频达 5.2 GHz),为试验中的数据处理、轨迹规划算法运行以及人机交互提供强大的算力支持,所有试验数据的分析和轨迹规划均在 MATLAB 中完成。试验平台的具体组成见表 1,机器人参数见表 2,规划路径轨迹点见表 3。模型求解算法参数见表 4。

表 1 试验平台组成

Table 1 Composition of the experimental platform			
设备	组成	设备	组成
试验目标	袋装食品	编码器	OMRONE6B2-CW5B
机器人	SCARA 并联机器人	减速器	NPFR120vL2-B
相机	深度相机 Kinect V2	伺服电机	ECMA-E11310RS
传送带	速度可调	驱动器	ASD-A2-1021-E

3.2 轨迹优化试验分析

为验证试验所提末端轨迹规划方法的优越性,试验以 SCARA 高速并联机器人作为研究对象,通过改进 MOPSO 对规划曲线的时间序列展开优化,优化前后末端轨迹曲线见图 6。

由图 6 可以看出,优化前的末端轨迹曲线在部分区间存在明显的波动与突变。具体而言,在运动轨迹的起始阶段和转向节点处,曲线斜率变化剧烈,这意味着机器人

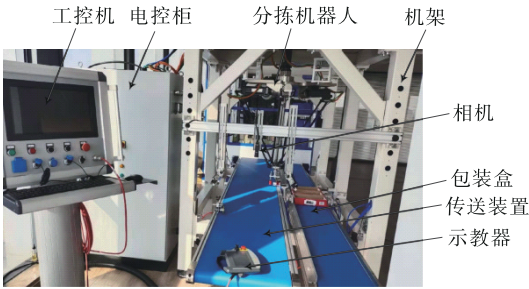


图 5 试验平台
Figure 5 Test platform

在这些位置运动时,很可能会产生较大的加速度突变,进而导致运行过程中的冲击与振动。这种非平滑的轨迹不仅会影响机器人运动的稳定性,还加剧关节磨损,缩短设备的使用寿命,同时也会对运动精度造成不利影响,难以满足高精度作业场景的需求。相比之下,经过优化后的轨迹曲线得到了显著的改善。整体曲线更加平滑,不存在明显的拐点和剧烈波动,斜率变化均匀连续。表明试验方法规划曲线更加平滑,各关节的速度、加速度变化更为平稳,有效降低了冲击和振动的产生。优化前后 4 个自由度方向上加加速度见图 7,优化前后的运行冲击和运行能耗见表 5。

由图 7 和表 5 可以看出,试验方法在运行冲击和能耗方面均展现出显著优势。在平均运行冲击上,试验方法的 445 m/s^3 相较于改进非均匀五次 B 样条曲线的 $1\,232 \text{ m/s}^3$,降低了约 63.88%。表明优化后有效降低了机

表 2 机器人参数

Table 2 Robot parameters								
主、从动臂 长度/mm	分拣速率/ (次·min ⁻¹)	关节速度约束/ (mm·s ⁻¹)	关节加速度约束/ (mm·s ⁻²)	关节加加速度约束/ (mm·s ⁻³)	力矩约束/ (N·mm)	载荷约束/ N	最大转角/ (°)	定位误差/ mm
300,600	120	6×10^2	6×10^4	6×10^6	21.6	2	$[-60,60]$	$[0,0.1]$

表 3 规划路径轨迹点

Table 3 Trajectory points of plan path			
轨迹点	(x,y,z)数值/m	轨迹点	(x,y,z)数值/mm
1	-150,-20,-491	5	51,116,-466
2	-122,16,-466	6	86,136,-466
3	-87,36,-466	7	114,152,-491
4	-18,76,-466		

表 4 模型求解算法参数

Table 4 Algorithm parameters for model solving			
参数	数值	参数	数值
种群大小	50	外部档案	50
最大迭代次数	100	学习因子	2.0
惯性权重	$[0.4,0.9]$		

器人运行过程中的冲击,有利于提升机器人运动稳定性,减少关节因冲击产生的磨损,延长设备使用寿命。在平均能耗方面,试验方法的 4.15 J 比改进非均匀五次 B 样条

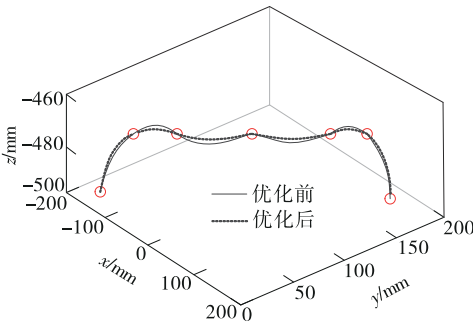


图 6 优化前后末端轨迹曲线
Figure 6 End-point trajectory before and after optimization

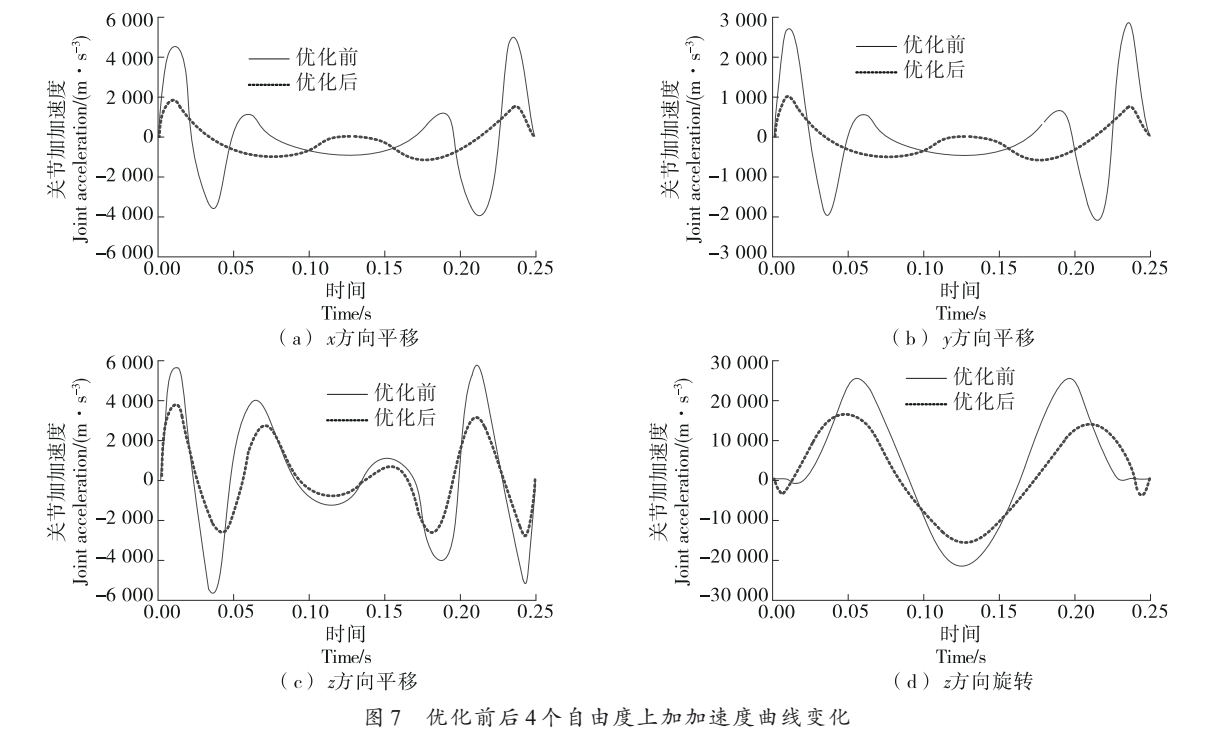


图 7 优化前后 4 个自由度上加加速度曲线变化

Figure 7 Acceleration changes for four degrees of freedom before and after optimization

表 5 优化前后运行冲击和运行能耗		
Table 5 Operational impact and energy consumption before and after optimization		
方法	平均运行冲击/($\text{m}\cdot\text{s}^{-3}$)	平均能耗/J
改进非均匀五次 B 样条曲线	1 232	8.62
试验方法	445	4.15

曲线的 8.62 J 降低了约 51.9%。表明优化后机器人各关节加速度变化更为平稳,加速度的平稳变化降低了驱动力矩的波动,实现了能耗的大幅降低。试验方法结合改进非均匀五次 B 样条和多目标进行优化,不仅提升了机器人轨迹的平滑性,保证了运动精度,还在降低运行冲击和能耗方面表现出色,能够很好地满足高精度、低能耗、高稳定性作业场景的需求,具有较高的工程应用价值。

为了进一步验证试验所提方法的优越性,以自研四自由度并联机器人为研究对象,将试验方法与文献[7](运行时间和运行冲击)改进的多目标金鹰优化算法优化五次 B 样条曲线、文献[8](运行时间和运行张力)改进蜣螂优化算法优化五次多项式插值法、文献[10](运行时间、运动能耗等)改进的多目标灰狼优化算法优化 4-3-3-4 插值法进行对比分析。在设定轨迹上连续循环 100 次,与理论位置进行对比,不同速度的位置误差见表 6。

由表 6 可以看出,试验方法的位置误差在各坐标轴、各速度段均最小,且随速度提升的误差增长趋势最平缓。相比文献[7]的五次 B 样条、文献[8]的五次多项式插值、

表 6 不同速度下的位置误差					
Table 6 Position error at different speeds					
速度/ (次· min^{-1})	坐标轴	位置误差/mm			
		文献[7]	文献[8]	文献[10]	试验方法
80	x	0.3	0.5	0.3	0.2
	y	0.4	0.6	0.3	0.2
	z	0.4	0.6	0.4	0.3
120	x	0.5	0.8	0.5	0.2
	y	0.6	0.9	0.5	0.4
	z	0.7	0.9	0.6	0.4
150	x	0.8	1.1	0.8	0.6
	y	0.8	1.1	0.8	0.7
	z	0.9	1.2	0.8	0.7

文献[10]的七次 B 样条,试验方法在速度 80 次/min 时,误差降低幅度 $>50\%$,在速度 120 次/min 时,误差降低幅度 $>30\%$,在速度 150 次/min 时,误差降低幅度 $>12\%$,在保证计算效率的同时,进一步提升了轨迹跟踪精度,尤其适用于高速、高精度的作业场景。这主要是因为改进非均匀五次 B 样条曲线具备更高阶连续性,能更好地拟合理论轨迹,改进的多目标粒子群算法在优化过程中,同时平衡了轨迹平滑性、运行冲击和能耗,减少了因动态特性波动导致的跟踪误差。

在 100, 200 mm/s 的输送速度下,分拣样品薯片、面包、坚果各 500 个,不同方法的分拣效果见表 7。

表 7 不同方法的分拣效果

Table 7 Sorting effectiveness of different methods

方法	输送速度 100 mm/s			输送速度 200 mm/s		
	输送食品数/个	分拣食品数/个	分拣成功率/%	输送食品数/个	分拣食品数/个	分拣成功率/%
文献[7]	1 500	1 488	99.20	1 500	1 450	96.67
文献[8]	1 500	1 450	96.67	1 500	1 355	90.33
文献[10]	1 500	1 500	100.00	1 500	1 470	98.00
试验方法	1 500	1 500	100.00	1 500	1 485	99.00

由表 7 可以看出,试验方法在分拣成功率上表现优异。在 100 mm/s 的输送速度下,试验方法与文献[10]一样,实现了 100% 的分拣成功率,优于文献[7]的 99.20% 和文献[8]的 96.67%。而在 200 mm/s 的高速输送场景中,试验方法的分拣成功率为 99.00%,高于文献[10]的 98.00%,显著高于文献[7]的 96.67% 和文献[8]的 90.33%。表明试验方法在不同输送速度下均能保持较高的分拣稳定性,尤其在高速输送时,相比其他方法更能适应动态变化,充分体现了所提方法在实际食品分拣作业中的优越性,能够满足高效、高精度的分拣需求。

4 结论

试验方法以运行冲击和能耗为多目标构建优化模型,在改进 MOPSO 算法的求解下,达成了两者的综合最优。优化后平均运行冲击降至 445 mm/s³,较改进前的 1 232 mm/s³降低 63.88%,显著减少了机器人运动过程中的机械振动与关节磨损,为高速分拣作业的稳定性提供了基础保障。优化后平均能耗降至 4.15 J,较改进前的 8.62 J降低 51.9%,降低了驱动力矩的波动幅度,进而减少了电机的能量损耗,验证了模型在“平稳—低耗”双目标优化中的有效性。

与文献[7]、文献[8]、文献[10]方法相比,在 80~150 次/min 的分拣速度下,试验方法的 x 、 y 、 z 轴位置误差均为最小,体现了高平滑轨迹对跟踪精度的提升作用。在实际分拣试验中,试验方法在 100 mm/s 输送速度下实现 100% 成功率,200 mm/s 时达 99.00%,优于文献方法,验证了其在动态场景下的分拣可靠性。

后续研究可进一步结合机器视觉的实时反馈,实现动态轨迹的在线优化,以适应更复杂的分拣场景。

参考文献

[1] 傅明娣,李忠,王倩茹,等. 基于多目标优化的油茶果分选机器人轨迹规划方法研究[J]. 食品与机械, 2023, 39(10): 105-111.
FU M D, LI Z, WANG Q R, et al. Research on trajectory planning method for *Camellia oleifera* fruit sorting robot based on multi-objective optimization[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 105-111.

[2] HU X, WU H, SUN Q L, et al. Robot time optimal trajectory planning based on improved simplified particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Access, 2023, 11: 44 496-44 508.
[3] 陈明生,郑玉璐,姚笛. 工业机器人应用对地区经济差距的影响研究[J]. 财经研究, 2024, 50(1): 139-153.
CHEN M S, ZHENG Y L, YAO D. The impact of industrial robot application on regional economic disparity[J]. Journal of Finance and Economics, 2024, 50(1): 139-153.
[4] 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 robot based on improved gravity search algorithm[J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 82-86.
[5] 左国玉,李宓,郑榜贵. 基于改进自适应多目标粒子群算法的机械臂最优轨迹规划方法[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(3): 184-191.
ZUO G Y, LI M, ZHENG B G. Optimal trajectory planning for robotic arms based on improved adaptive multi-objective particle swarm algorithm[J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41(3): 184-191.
[6] 封燕芳,吴必瑞,赵倩. 基于改进门字形轨迹的番茄生产线 Delta 分选机器人轨迹规划[J]. 食品与机械, 2023, 39(8): 71-75, 154.
FENG Y F, WU B R, ZHAO Q. A trajectory planning method for DELTA sorting robot in tomato production line based on improved gateshaped trajectory[J]. Food & Machinery, 2023, 39(8): 71-75, 154.
[7] WANG S L, ZHANG B K, ZHOU J, et al. Time-jerk optimal trajectory planning for industrial robots with coupled interpolation function selection[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(4): 917-941.
[8] 赵涛,何燕妮,高永航,等. 三自由度欠约束柔索驱动并联机器人的轨迹规划[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(19): 8 142-8 149.
ZHAO T, HE Y N, GAO Y H, et al. Trajectory planning of a 3-DOF under-constrained cable-suspended parallel robot[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(19): 8 142-8 149.

- [9] 傅明娣, 李忠, 王倩茹, 等. 基于改进 DBO 和多目标模型的食品分拣机器人分拣策略[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 88-93.
- FU M D, LI Z, WANG Q R, et al. Sorting strategy of food sorting robot based on improved DBO and multi-objective model[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 88-93.
- [10] 郭彤颖, 叶相涛, 陈宇. 基于改进 MOGWO 算法的并联机器人轨迹优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2025(6): 20-25.
- GUO T Y, YE X T, CHEN Y. Trajectory optimization of parallel robot based on improved MOGWO algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2025(6): 20-25.
- [11] 来海滨, 汪满新, 刘松涛, 等. 基于 345 修正梯形运动规律的 4-RR(SS)₂ 并联机器人运动轨迹规划[J/OL]. 农业机械学报. (2024-01-31) [2025-01-29]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1964.S.20240130.1719.022>.
- LAI H B, WANG M X, LIU S T, et al. Trajectory planning of a 4-RR(SS)₂ parallel robot based on 345-corrected trapezoidal motion law[J/OL]. Journal of Agricultural Machinery. (2024-01-31) [2025-01-29]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1964.S.20240130.1719.022>.
- [12] XIONG J, GUO P H, LI J Y. Multi-objective multi-variable large-size fan aerodynamic optimization by using multimodel ensemble optimization algorithm[J]. Journal of Thermal Science, 2024, 33(3): 914-930.
- [13] YE P D, YOU J J, XI F F, et al. An interval discretization method for workspace determination of parallel mechanisms [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(7): 1-23.
- [14] 张文, 方巍. 基于蚁群融合 D*Lite 的动态改航路径规划[J]. 计算机系统应用, 2023, 32(8): 250-258.
- ZHANG W, FANG W. Dynamic diversion path planning based on combination of ant colony optimization and D * Lite[J]. Computer Systems and Applications, 2023, 32(8): 250-258.
- [15] 万薇, 卜莹雪, 王祥, 等. 基于改进 ResNet 模型的食品新鲜度识别方法[J]. 食品与机械, 2023, 39(9): 123-127.
- WAN W, BU Y X, WANG X, et al. Food freshness recognition method based on improved ResNet model[J]. Food & Machinery, 2023, 39(9): 123-127.
- [16] YIN J N, JIANG P, YAO R. Pose optimization of the FAST feed support system based on the new feed cabin mechanism [J]. Science China-Physics, Mechanics & Astronomy, 2023, 66(3): 182-191.
- [17] 程欢, 邓立营. 煤矿巷道七自由度喷浆机器人轨迹规划与跟踪控制[J]. 工矿自动化, 2024, 50(1): 115-121.
- CHENG H, DENG L Y. Trajectory planning and tracking control of a seven degree of freedom shotcrete robot in coal mine roadway[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(1): 115-121.
- [18] XUE Y X, LI J H, LIU J X, et al. Analysis of cargo sorting robot based on multiple photoelectric sensors[J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2023, 18(11): 1 351-1 356.
- [19] SHI K, YANG L Y, WU Z T, et al. Multi-robot dynamic path planning with priority based on simulated annealing[J]. Journal of the Franklin Institute, 2025, 362(1): 107396.
- [20] 肖瑶星, 刘立新, 胡柳, 等. 基于三维模型的食品分拣机器人抓取控制方法[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 77-82, 162.
- XIAO Y X, LIU L X, HU L, et al. Grab control method of food sorting robot based on 3D model[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 77-82, 162.