

基于改进 PSO 算法的多维振动铸件分拣平台设计与调姿优化

李康康¹ 王智慧¹ 朱梓豪¹ 王成军¹ 尹豪宇¹ 郑艳²

(1. 安徽理工大学 人工智能学院, 合肥 231131)

(2. 淮南师范学院 机械电气工程学院, 淮南 232038)

摘要:【目的】针对传统铸件分拣平台运动自由度受限及调姿精度不足的问题,设计一种多维振动调姿平台并提出相应的优化算法。【方法】首先,研发了一种具有拨动机构的创新结构,并引入多维振动激励模块以实现铸件位姿调整;其次,提出了一种自适应动态调整权重的改进粒子群优化(Improved Particle Swarm Optimization, IMPSO)算法,通过引入自适应干扰力和动态权重机制,提升了算法的收敛性能;再次,建立了以位置和姿态偏差为目标的适应度函数,通过 Matlab 软件仿真对比了 IMPSO 算法与粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)、遗传粒子群优化(Genetic Algorithm-Particle Swarm Optimization, GA-PSO)、混沌粒子群优化(Chaotic Particle Swarm Optimization, CPSO)算法的性能;最后,搭建了样机试验平台进行实验验证。【结果】仿真结果表明,相比于传统算法,IMPISO 算法的迭代收敛速度提升了 10%~27%;样机试验显示,平台对铸件的位置与姿态调整最大偏差分别控制在 0.396 74 cm 与 0.244 13° 以内,能够满足复杂工业场景下的高精度柔性分拣需求。

关键词: 多维振动; 拨动机构; 自适应权重; 调姿; 分拣

中图分类号: TH122; TP18 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.03.008

0 引言

铸造生产是获得机械产品毛坯的主要方法之一,是装备制造业发展不可或缺的重要环节,是众多主机和重大技术装备^[1-3]发展的重要支撑,在国民经济中占有重要地位。现有铸件生产中,在造型、浇注、喷涂等工艺环节均已引进机器人技术或实现自动化生产,而在铸件分拣与清理等作业环节中,分拣机器人系统或装置很少。

分拣装置的类型包括辊道式^[4]、斜带式^[5]、链式^[6]、托盘式^[7]、旋转式^[8]等。各国学者通过对当前的分拣装置进行改进,设计了新型的分拣装置,使其功能特性得到进一步的提高,分拣速率也得到了极大改善。刘德喜^[9]等对现有的分拣机进行分析,研究了各种分拣机的设计原理,基于 TRIZ 理论改进创新了一种新型分拣装置,该分拣装置可有效解决目前市场上分拣装置结构复杂、成本高和效率低等问题。刘波等^[10]通过对图书分拣装置存在的问题进行了系统性的研究,提出了一种新型的图书分拣装置的设计方案,该分拣

装置通过模块化的设计,可极大地提高图书分拣的效率。陈志华等^[11]对分拣装置的翻转机构进行了优化设计,提出一种自动化程度较高且动作简洁的分拣机构。该分拣机分拣效率远远高于人工分拣,可以快速、准确地完成工件分拣入垛,极大地提高了工件的分拣效率。GE 等^[12]基于机器视觉设计了一种应用于医疗领域的抓取分拣系统,通过引入自适应抓取柔性分类(Adaptive Grasping Flexible Classification, AGFC)模型和添加类别属性,可区分复杂场景下的试管排列,并对其进行抓取分拣,各种场景的试验结果表明,分拣系统在试管分拣上实现了 95% 的成功率。

分拣装置性能的持续提升,特别是效率、准确性和适应性方面的突破,越来越依赖于智能化技术的深度融入。除了上述结构改进和机器视觉的应用,如何更高效地优化分拣路径、调度策略以及控制参数,以应对复杂多变的分拣场景和需求,已成为研发的关键挑战与前沿方向。随着 AI 技术的发展,群体智能优化算法被广泛研究并应用到各类最优化问题中。群体智能优化算法是一种生物启发式优化方法,主要包括

收稿日期: 2025-06-24 修回日期: 2025-08-13

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(K2230074); 国家级大学生创新创业训练项目(202410361096, S202410361196); 安徽省教育厅重点研究项目(2024AH051746)

作者简介: 李康康,男,1993年生,江苏徐州人,硕士,助理实验师; 主要研究方向为智能机械与机器人、机器人智能感知与控制; E-mail: likk_jn@163.com。

王智慧(通信作者),女,1996年生,江苏淮安人,硕士; 主要研究方向为智能机械与机器人; E-mail: wangzhihui0424@163.com。

引用格式: 李康康,王智慧,朱梓豪,等. 基于改进 PSO 算法的多维振动铸件分拣平台设计与调姿优化[J]. 机械强度, 2026, 48(3): 68-76.

LI Kangkang, WANG Zhihui, ZHU Zihao, et al. Design and posture adjustment optimization of a multi-dimensional vibration casting sorting platform based on an improved PSO algorithm[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(3): 68-76.



免费获取

蚁群算法,粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、人工蜂群算法等。相较于其他优化算法,PSO 具有更少的参数和更好的计算效率。朱绪胜等^[13]研发了一种综合考虑卫星舱段装配过程中的多个控制目标的多目标位姿参数优化算法,利用 PSO 算法求解多目标优化函数,仿真结果证实了此算法的可行性。张帅等^[14]采用遗传粒子群优化(Genetic Algorithm-Particle Swarm Optimization, GA-PSO)算法对地砖铺设机器人的工作点位置进行优化,能够快速准确地得到作业点最优解;陈志远等^[15]提出一种改进 PSO 算法来求解飞机位姿评估问题,以调姿基准点误差总和以及最大误差为优化目标,动态改变点位约束条件,求解得到调姿测量点最大误差。耿增显等^[16]提出的基于混沌粒子群优化(Chaotic Particle Swarm Optimization, CPSO)算法的城市无人机路径规划,引入 Zaslavskii 混沌序列生成随机数,构建城市无人机路径规划经济效益、飞行高度和障碍物规避 3 个适应度函数,与传统 PSO 算法相比,更具有优越性。以上各种路径规划策略,从多种角度对粒子群算法进行了改进,但 PSO 算法在不同的应用场景中,依旧拥有更深层次的优化潜力。本文在传统 PSO 算法的基础上,以误差总和最小为优化条件,通过引入自适应干扰力和权值动态自适应调节,避免算法陷入局部最优的问题,从而实现铸件姿态的调整。

传统分拣机器人多应用于抓取对象位姿参数预先设定的标准化工业场景^[17-18],其作业路径与操作序列,一般基于固定坐标系进行离线编程。一旦待分拣工件的摆放位置或姿态出现变动,这类机器人便难以精准抓取工件以完成分拣任务,往往需要人工辅助进行姿态调整。若采用人工分拣调姿的工作模式,需要投入大量人力物力,高温、高噪声、多粉尘以及劳动强度大的恶劣工作环境会对工人的生命安全造成威胁,人工成本会进一步攀升,从而增加企业的生产成本。显然,这 2 种方式无法满足日益提速的自动化生产线

的工作需求。本文针对当前铸件分拣系统的工作特性,设计了一种能够自动调姿分拣的装置。该装置可替代人工完成铸件的分拣与调姿工作,不仅能将操作工人从繁重、单调的体力劳动中解放出来,还能有效地提高铸件分拣效率,减少人工成本,提高产业链的自动化水平。促进企业向自动化、智能化制造转变,具有很好的应用推广和产业化前景。

1 多维振动分拣调姿平台的机械设计

1.1 多维振动调姿平台的机械结构设计

多维振动调姿平台主要包括横向调姿装置、纵向传输装置、整体框架、升降机构、纵向传动机构等。图 1 所示为多维振动调姿平台的三维模型。

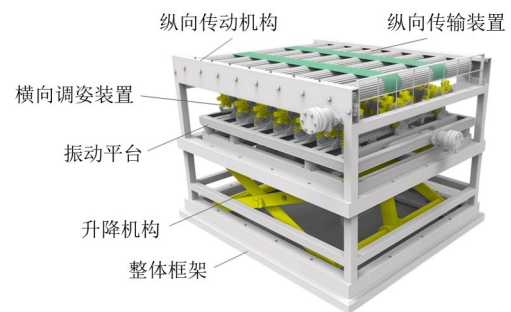


图 1 多维振动铸件分拣调姿平台整体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the overall structure of the multi-dimensional vibration casting sorting and pose adjustment platform

横向调姿装置由三自由度振动平台、拨动机构两部分组成。三自由度振动平台包括横向支架、悬架支架、剪切弹簧、激振器,其整体尺寸长为 1 100 mm,宽为 900 mm,如图 2 所示。2 个激振器对称安装在横向支架的底部左右两侧,剪切弹簧的两端分别通过螺钉安装在横向支架的底部和悬架支架的顶部。横向调姿装置可通过激振器和剪切弹簧产生 3 个方向的振动,完成对铸件姿态的微调工作。拨动机构通过翻转支撑架安装在三自由度振动平台上,如图 3 所示。主要包括翻转支撑架、翻转轮 A、翻转轮 B、链轮、轴承、

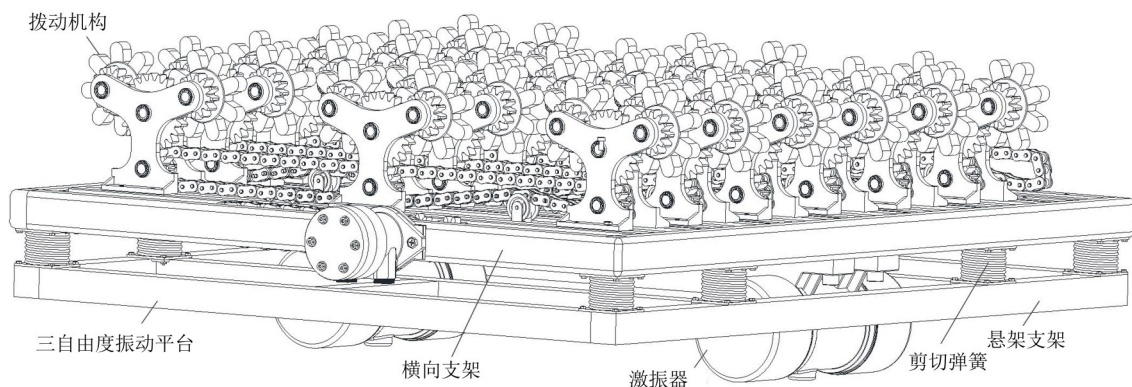


图 2 横向调姿装置结构组成图

Fig. 2 Structural composition diagram of the lateral posture adjustment device

件在横向方向上的位姿。输送辊转速 w_{r1} 、线速度 v_1 分别为

$$w_{r1} = w_{m1} \lambda_1 \quad (1)$$

$$v_1 = w_{r1} r_1 \quad (2)$$

式中, w_{m1} 为电动机转速; λ_1 为传动机构的效率; r_1 为输送辊半径。

对于翻转轮, 相邻两排拨动机构的翻转轮转速、线速度分别为

$$\begin{cases} w_{r2} = w_{m2} \lambda_2 \\ v_2 = w_{r2} r_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} w_{r3} = w_{m3} \lambda_3 \\ v_3 = w_{r3} r_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, w_{m2} 、 w_{m3} 为相邻两排拨动机构的电动机转速; λ_2 、 λ_3 为相邻两排的拨动机构的传动机构效率; r_2 为翻转轮的半径。

建立全局坐标系 $O-XYZ$, 采用三维空间坐标和欧拉角表示铸件姿态。设铸件在全局坐标系中的位置坐标为 (x, y, z) , 旋转姿态为 (α, β, γ) , 其中, α 为绕 x 轴的旋转角度(俯仰角), β 为绕 y 轴的旋转角度(偏航角), γ 为绕 z 轴的旋转角度(滚转角)。

如图 5 所示, $(x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ 为铸件点 P_0 的原始位姿, 当输送辊运行单位距离为 Δs_1 时, 铸件的坐标变化为 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。同时, 引起可能的姿态角度变化为 $(\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma)$ 。当翻转轮运行单位距离为 Δs_2 时, 铸件在横向方向的位置变化为 $(\Delta x', \Delta y', \Delta z')$ 。同时, 引起可能的姿态角度变化为 $(\Delta \alpha', \Delta \beta', \Delta \gamma')$ 。得到经运输辊和拨动机构调节后的铸件位姿为

$$(x_i, y_i, z_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) = F[(x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0), s_1, s_2] \quad (5)$$

式中, s_1 、 s_2 分别为输送辊、翻转轮的运行距离。

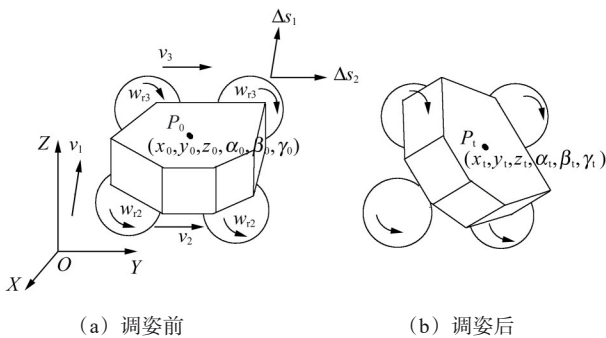


图 5 铸件调姿过程的运动学分析模型

Fig. 5 Kinematic analysis model of the casting pose adjustment process

2.2 基于 IMPSO 算法的铸件最优姿态评价分析

在机器人执行分拣作业的过程中, 铸件的位姿对于机器人能否成功抓取起着关键作用。为解决这一问题, 设计了一种多维振动分拣平台, 该平台首先借

助纵向传输装置, 将铸件运输至合理位置; 接着, 通过三自由度振动平台与拨动机构协同工作, 对铸件的姿态进行调节。

PSO 算法是一种进化算法技术, 源于对鸟群觅食行为的研究^[19]。每个粒子的可能位置代表了铸件的 1 个位姿, 通过不断更新速度和位置, 最终收敛到铸件位姿的最优解。然而, 传统 PSO 算法存在易陷入局部最优、收敛精度有限等问题^[20]。因此, 本文提出了一种自适应权值 PSO 算法, 可以根据历史适应度和迭代次数来调整权值。

改进后的 PSO 算法步骤为:

1) 粒子群初始化。在工作空间随机生成 N 个粒子, 每个粒子随机选择一个初始位置 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 和一个初始移动速度 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 。每个粒子可以确定铸件的一个位姿 $T_{ij}(t)$, 其中, i 为粒子数, $i = 1, 2, \dots, N$, j 为粒子的维度, $j = 1, 2, \dots, d$, t 为迭代次数。

2) 目标函数适应度。根据铸件实际位姿与目标位姿之间的偏差建立适应度函数 f 。当铸件位置越接近目标位姿时, f 的值越小。

$$f_1 = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (6)$$

$$f_2 = \sqrt{(\alpha_i - \alpha_0)^2 + (\beta_i - \beta_0)^2 + (\gamma_i - \gamma_0)^2} \quad (7)$$

$$f = \mu_1 f_1 + \mu_2 f_2 \quad (8)$$

式中, $(x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ 为铸件原始位姿; $(x_i, y_i, z_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 为铸件目标位姿; μ_1 、 μ_2 均为权重系数。

3) 找出个体历史的最佳适应值 $f_{ij\text{best}}$, 即第 i 个粒子前 t 次迭代的最佳适应值, 其对应的粒子位置为 $p_{ij\text{best}}$ 。

4) 求出种群的最佳适应值 $f_{ij\text{gbest}}$, 即所有粒子中的最佳适应值, 则该粒子位置为 $p_{ij\text{gbest}}$ 。

5) 更新粒子的速度和位置。传统粒子群算法在解决优化问题时常面临粒子陷入局部最优, 无法达到全局最优的问题。因此, 本文在粒子速度更新式中引入自适应干扰力^[21]。自适应干扰力 F_{ij} 的表达式为

$$\begin{cases} F_{ij} = k' \frac{x_i - x_n}{d_{in}} \\ d_{in} = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{ik} - x_{nk})^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中, k' 为自适应干扰系数; d_{in} 为粒子 i 与粒子 n 的距离; d 为维度。

引入自适应干扰力的粒子群速度迭代更新计算式为

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r'_1[p_{ij\text{best}} - x_{ij}(t)] + c_2r'_2[p_{ij\text{gbest}} - x_{ij}(t)] + F_{ij} \quad (10)$$

式中, w 为权重系数; r'_1, r'_2 为 $[0, 1]$ 内的随机数; c_1, c_2 为学习因子。

为防止由于速度过快而发生对粒子的盲搜索和跳过最优解, 需要限制速度的最大值。粒子位置的更新计算式为

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (11)$$

传统 PSO 算法中, w, c_1, c_2 都是固定值, 实际应用中难以找到合适的参数。本文提出自适应权值 $w_i(t)$, $w_i(t)$ 和粒子的当前适应度值 $f_{ij}(t)$ 均与前一次迭代的适应度值 $f_{ij}(t-1)$ 有关。这种自适应的调整方式, 使得算法能够根据粒子在搜索空间中的适应度表现, 动态地改变惯性权重, 从而更好地平衡算法的全局搜索与局部搜索能力, 以适应不同阶段的优化需求。

如果 $\frac{f_{ij}(t)}{f_{ij}(t-1)} \geq 1$, 说明粒子当前的适应度值较

前一次迭代变差, 粒子可能陷入局部最优或者正在偏离较优区域。此时应增大自适应权值 $w_i(t)$, 即

$$w_i(t) = w_{\min} + w_{\min} \frac{f_{ij}(t)}{f_{ij}(t-1)} \quad (12)$$

式中, w_{\min} 为自适应权值的最小值。

如果 $\frac{f_{ij}(t)}{f_{ij}(t-1)} < 1$, 说明粒子当前的适应度值较

前一次迭代有改善, 粒子朝着较好的方向移动。此时应减小惯性权重 $w_i(t)$, 即

$$w_i(t) = w_{\max} - w_{\max} \frac{f_{ij}(t)}{f_{ij}(t-1)} \quad (13)$$

式中, w_{\max} 为惯性权重的最大值。

在算法初期, c_1 可以设置较大, 让粒子更倾向于参考自身的最优经验, 加强局部搜索能力。随着迭代的进行, c_2 逐渐增大, 使粒子更多地考虑群体的最优经

验, 有利于跳出局部最优解^[22]。

$$c_1 = c_{1\max} - (c_{1\max} - c_{1\min}) \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{t}{T}\right) \quad (14)$$

$$c_2 = c_{2\max} - (c_{2\max} - c_{2\min}) \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{t}{T}\right) \quad (15)$$

式中, $c_{1\max}, c_{1\min}$ 分别为 c_1 的最大值、最小值; $c_{2\max}, c_{2\min}$ 分别为 c_2 的最大值、最小值; T 为最大迭代次数。

3 样机试验

3.1 基于改进 PSO 多维振动铸件调姿平台铸件最优姿态仿真试验

根据所设计的多维振动调姿平台样机尺寸, 设定铸件调姿的测量范围。X 轴的测量范围为 $-25 \text{ cm} \leq X \leq 25 \text{ cm}$, Y 轴的测量范围为 $-25 \text{ cm} \leq Y \leq 25 \text{ cm}$, Z 轴的测量范围为 $60 \text{ cm} \leq Z \leq 110 \text{ cm}$, 绕 X、Y、Z 轴的旋转角度范围均为 $(-\pi/2, \pi/2)$ 。为验证所设置目标函数的优化程度, 基于式(6)~式(8)开展 PSO 算法、GA-PSO 算法、CPSO 算法与 IMPSO 算法在铸件多维振动分拣平台上给定目标位姿后寻优的多维度对比试验。根据 X、Y、Z 轴的测量范围, 设定给定目标位置为 $(10 \text{ cm}, -15 \text{ cm}, 83 \text{ cm})$, 姿态为 $(-\pi/4 \text{ rad}, -\pi/6 \text{ rad}, \pi/4 \text{ rad})$ 。定量评估 4 种算法在全局寻优能力、收敛效率、误差收敛精度等关键指标的表现。通过试验数据, 验证改进算法在求解铸件最优调姿位姿方面的优越性, 确保获得与目标位姿误差最小的最优解。

适应度函数值直接反映了粒子(即铸件的候选位姿)的优劣程度。适应度函数值越小, 表示该粒子所代表的铸件位姿与目标位姿的误差越小, 该粒子越优秀。为全面评估算法的性能, 分别运行 PSO 算法、GA-PSO 算法、CPSO 算法、IMPSO 算法各 100 次, 4 种算法参数如表 1 所示, 表 2 为仿真结果汇总。4 种算法的适应度值随迭代次数的变化关系曲线如图 6 所示。

表 1 4 种对比算法的初始参数设置

Tab. 1 Initial parameter settings of the four comparative algorithms

算法	种群规模	最大迭代次数	c_1	c_2	c_{\max}	c_{\min}	w	w_{\max}	w_{\min}	交叉率	突变率	混沌率
PSO 算法	100	100	1.09	1.79	—	—	0.53	—	—	—	—	—
GA-PSO 算法	100	100	2.50	2.50	—	—	0.70	—	—	0.70	0.08	—
CPSO 算法	100	100	2.50	2.50	—	—	—	0.95	0.25	—	—	0.10
IMPSO 算法	100	100	—	—	3.50	0.25	—	0.95	0.25	—	—	—

由表 2 可知, PSO、GA-PSO、CPSO、IMPSO 算法均能够有效规避局部最优的问题, 最优值均为 0。在单次寻优方面, 相较于 PSO、GA-PSO、CPSO 算法, IMPSO 算法的收敛速度分别提高了 26%、10%、27%, 且 IMPSO 算法的平均适应度值分别降低了 75%、28%、48%, 标准差分别降低了 58%、3.7%、17%。验证

了 IMPSO 算法在求解精度、鲁棒性方面的优势。

由图 6 可知, IMPSO 算法比 PSO、GA-PSO、CPSO 算法收敛更快。尽管其初始平均适应度值略高于 PSO 算法, 但通过动态权重调节机制快速进入精细搜索阶段。在算法的初始阶段(迭代次数处于 1~30 次的区间时), 粒子呈现出分散分布的状态。此时, 权重 w 自适

应调节在 0.4~0.9,使得粒子具备较快的飞行速度。这一特性赋予了粒子在更广阔的空间范围内开展搜索的能力,有利于发现全局最优解可能存在的区域。随着迭代次数的增加,粒子的分布更加集中,权重 w 也相应地变小(0.4~0.5),以便进行精细搜索,如图 7 所示。综上所述,IMPSO 算法更适用于在多维振动铸件调姿平台上铸件位姿寻优,为复杂工况下的铸件调姿提供了更优的解决方案。

表 2 不同算法的寻优性能指标对比

Tab. 2 Comparison of optimization performance indicators among different algorithms

算法	单次寻优时间/s	是否陷入局部最优	最优值	平均适应度值	标准差
PSO 算法	0.69	否	0	0.334	1.86
GA-PSO 算法	0.57	否	0	0.114	0.81
CPSO 算法	0.82	否	0	0.157	0.94
IMPSO 算法	0.51	否	0	0.082	0.78

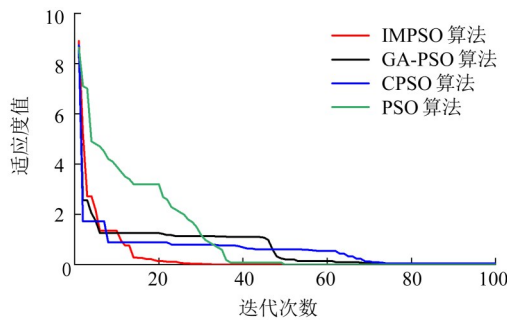


图 6 4 种优化算法的适应度收敛性能对比曲线

Fig. 6 Comparison of fitness convergence performance curves among four optimization algorithms

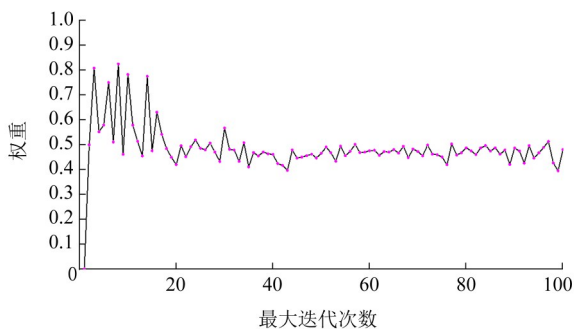


图 7 IMPSO 算法惯性权重随迭代次数的自适应变化曲线

Fig. 7 Adaptive variation curve of inertia weight with iteration number in IMPSO algorithm

3.2 样机试验

为全面评估所提 IMPSO 算法及多维振动调姿平台的实际效能,验证其在工业场景中的可行性与可靠性,本文构建了物理样机并将算法部署于硬件系统中进行测试,试验环境如图 8 所示。试验采用 AprilTag 视觉定位技术,通过相机采集附着于铸件表面的标签图像并进行解码,实时输出出标签 ID 及位姿数据。最

终,利用坐标系转换关系,精确算出铸件相对于调姿平台的实时位姿信息。

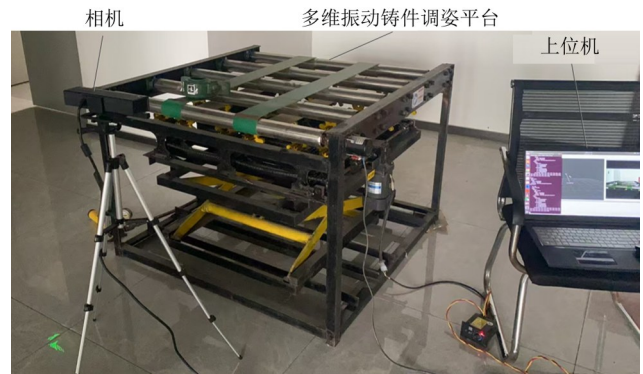


图 8 多维振动调姿平台样机试验现场布置

Fig. 8 Experimental setup of the prototype for the multi-dimensional vibration pose adjustment platform

3.2.1 盘形铸件 1 原地转向调姿过程

为了测试多维振动铸件调姿平台的性能,记录铸件 1 的初始坐标为(-2.17 cm, 2.66 cm, 86.50 cm),姿态为(175.81°, -29.88°, -3.83°)。规定铸件 1 的目标终点坐标为(0, 2 cm, 86 cm),姿态为(2°, 30°, 5°)。用相机记录铸件 1 在多维振动铸件调姿平台上的运动过程,如图 9 所示。通过相机采集的铸件 1 的实际终点坐标为(0.12 cm, 2.29 cm, 86.15 cm),姿态为(2.12°, 29.91°, 4.98°)。铸件 1 坐标发生变化的原因为 AprilTag 码的位置并非铸件的质心位置。

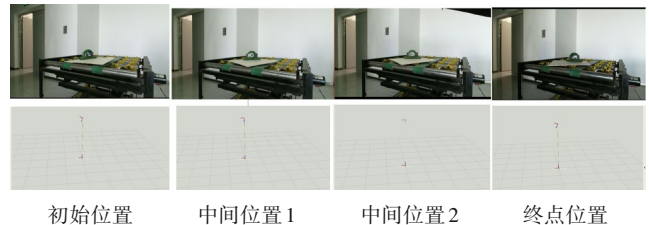


图 9 盘形铸件原地转向调姿试验序列图

Fig. 9 Experimental sequence of in-situ rotation adjustment for the disc-shaped casting

3.2.2 盘形铸件 1 的横向调姿过程

铸件 1 的初始坐标为(2.56 cm, 3.30 cm, 66.11 cm),姿态为(5.56°, -61.56°, -4.96°),规定铸件 1 的目标终点坐标为(16 cm, 2 cm, 95 cm),姿态为(3°, -34°, -2.5°)。用相机记录铸件 1 在多维振动铸件调姿平台上的运动过程,如图 10 所示。通过相机采集的铸件 1 的实际终点坐标为(15.89 cm, 2.38 cm, 94.87 cm),其姿态为(2.93°, -34.17°, -2.48°)。

3.2.3 圆柱形铸件 2 的纵向调姿过程

铸件 2 的初始坐标为(14.20 cm, 2.75 cm, 50.84 cm),姿态为(2.78°, -14.39°, -1.94°),规定铸件 2 的目标终点坐标为(14 cm, 2 cm, 66 cm),姿态为(0°, -4°, 0°)。

用相机记录铸件2在多维振动铸件调姿平台上的运动过程,如图11所示。通过相机标定的铸件2的实际终点坐标为(14.05 cm, 1.71 cm, 66.13 cm),姿态为(0.12°, -4.16°, -0.14°)。

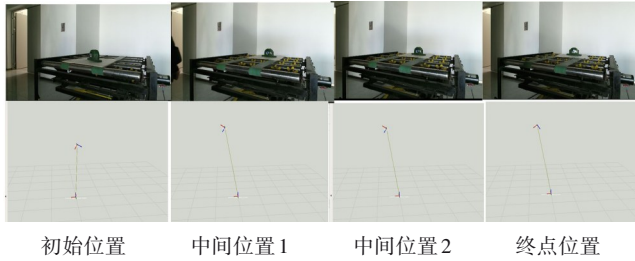


图10 盘形铸件横向平移调姿试验序列图

Fig. 10 Experimental sequence of lateral translation adjustment for the disc-shaped casting

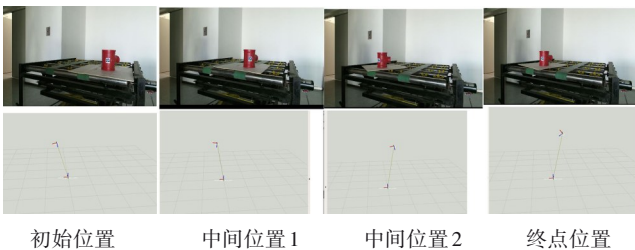


图11 圆柱形铸件纵向输送调姿试验序列图

Fig. 11 Experimental sequence of longitudinal transmission adjustment for the cylindrical casting

3.2.4 复杂铸件3的横向纵向调姿过程

铸件3的初始坐标为(14.17 cm, 2.87 cm, 56.21 cm),姿态为(7.21°, 11.46°, 12.40°),规定铸件3的目标终点坐标为(22 cm, 8 cm, 93 cm),姿态为(7°, -14°, -3°)。用相机记录铸件3在多维振动铸件调姿平台上的运动过程,如图12所示。通过相机采集的铸件3的

表3 铸件调姿试验的目标位姿与实际位姿误差分析

Tab. 3 Error analysis between target and actual poses in casting adjustment experiments

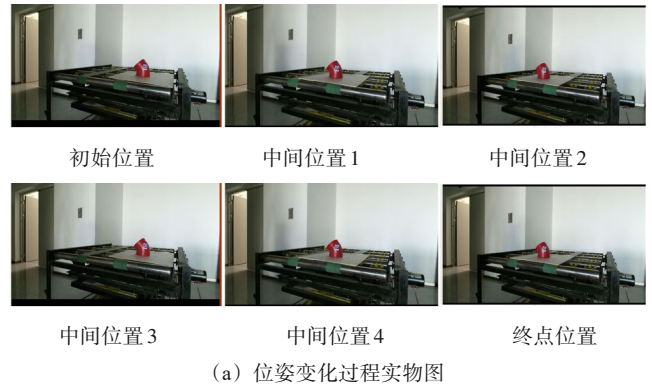
试验名称	目标终点坐标/cm	实际终点坐标/cm	坐标偏差/cm	终点目标姿态/(°)	终点实际姿态/(°)	姿态偏差/(°)
铸件1原地转向	(0, 2, 86)	(0.12, 2.29, 86.15)	0.347 85	(2, 30, 5)	(2.12, 29.91, 4.98)	0.151 33
铸件1横向	(16, 2, 95)	(15.89, 2.38, 94.87)	0.396 74	(3, -34, -2.5)	(2.93, -34.17, -2.48)	0.184 93
铸件2纵向	(14, 2, 66)	(14.05, 1.71, 66.13)	0.321 71	(0, -4, 0)	(0.12, -4.16, -0.14)	0.244 13
铸件3横向纵向	(22, 8, 93)	(21.94, 7.88, 93.06)	0.146 97	(7, -14, -3)	(7.20, -14.07, -3.12)	0.243 52

由表3可知,多维振动铸件调姿平台调姿后的铸件坐标的最大偏差为0.396 74 cm,姿态的最大偏差为0.244 13°,均在夹具抓取铸件的调节范围内。与只能在规定路线上的传统分拣平台相比,铸件被分拣的位姿变多,验证了所提多维振动铸件调姿平台的优越性。

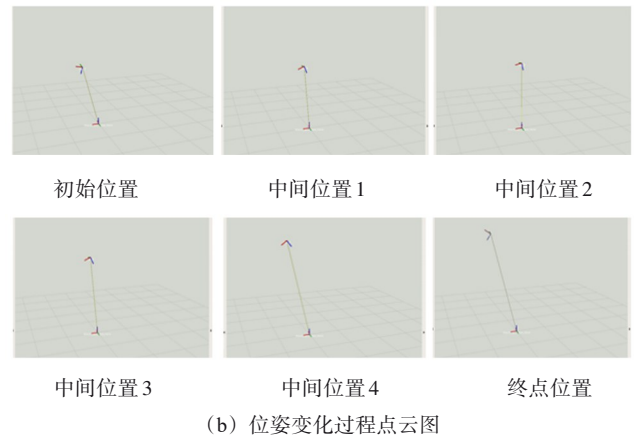
4 结论

围绕提升铸件分拣柔性与精度的核心需求,从硬件架构、控制策略2个层面进行创新。构建了一种新

实际终点坐标为(21.94 cm, 7.88 cm, 93.06 cm),姿态为(7.20°, -14.07°, -3.12°)。



(a) 位姿变化过程实物图



(b) 位姿变化过程点云图

图12 异形铸件(弯管)多维复合调姿试验过程

Fig. 12 Multi-dimensional composite pose adjustment experiment process for the irregular casting (pipe)

基于以上试验进行了多轮测量,分别记录了每次试验的终点目标坐标、目标姿态和终点实际坐标、实际姿态,进而计算了各组实际测量数据的平均值。多次测量的平均值如表3所示。

型多维振动调姿平台,并深度融合 IMPSO 算法,通过试验验证了所提算法对于复杂铸件姿态控制精度的影响。得出主要结论如下:

1)提出了一种基于物场分析的多维振动调姿平台和 IMPSO 控制算法。在铸件的姿态调整过程中,以铸件的位姿差适应度函数为目标函数,进行了 IMPSO、PSO、GA-PSO、CPSO 算法的仿真对比,试验结果表明,IMPSO 算法的迭代收敛速度相较于 PSO、GA-PSO、CPSO 算法分别提高了 26%、10%、27%。验

证了所提算法在实际场景中的有效性。

2)搭建了多维振动调姿平台样机,通过相机采集铸件上的 AprilTag 标记的图像信息,由多维振动激励模块与拨动机构协同作用,实现了铸件的位姿调节。试验结果表明,调整后的位置与姿态最大偏差稳定在 0.396 74 cm、0.244 13°,误差在可接受范围内,证明了多维振动调姿平台对复杂铸件异形特征的适应性较强。为智能制造场景下高精度、柔性化分拣装备的开发,提供了理论支撑与技术路径。

当前的研究基于实验室环境,未来需进一步开展大规模工业场景下的与分拣机器人协作分拣测试,探索振动调姿机构与视觉检测系统的实时闭环控制,提升复杂工况下的鲁棒性。

参考文献(References)

- [1] 杜坤,赵书锋,任冰峰,等. 工业机器人在铸造生产中的应用[J]. 中国铸造装备与技术,2024,59(5):85-88.
DU Kun, ZHAO Shufeng, REN Bingfeng, et al. The application of industrial robots in foundry production [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2024, 59(5): 85-88. (In Chinese)
- [2] 杨亚昆,张小俊,秦康. 仿人机械手臂结构设计与运动学分析[J]. 机械传动,2024,48(2):96-103.
YANG Yakun, ZHANG Xiaojun, QIN Kang. Structural design and kinematic analysis of humanoid robot arms [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(2): 96-103. (In Chinese)
- [3] 潘澳,俞成涛,孙学斌,等. 新型可减小压背感的抬背机构设计与优化[J]. 机械传动,2024,48(7):76-84.
PAN Ao, YU Chengtao, SUN Xuebin, et al. Design and optimization of a new type of the back pressure reducing back-lifting mechanism [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(7): 76-84. (In Chinese)
- [4] ALMADHOUN H R. Bell pepper classification using deeplearning [J]. International Journal of Academic Engineering Research, 2021, 5(1): 75-79.
- [5] WU L, LI J X, ZHANG H Y, et al. Research on a system for the diagnosis and localization of conveyor belt deviations in belt conveyors [J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(3): 035110.
- [6] ŽÍDEK M, ROZBROJ J, JEZERSKA L, et al. Effective use of DEM to design chain conveyor geometry [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 167: 25-36.
- [7] FEDTKE S, BOYSEN N. Layout planning of sortation conveyors in parcel distribution centers [J]. Transportation Science, 2014, 51(1): 3-18.
- [8] BISEN R D, BAKANE P H, SAKKALKAR S R. Design, development and performance evaluation of rotary onion grader [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(6): 2370-2380.
- [9] 刘德喜,刘福,张彦辉,等. 基于 TRIZ 的食品分拣机分拣装置的创新设计[J]. 北京印刷学院学报,2017,25(2):58-60.
LIU Dexi, LIU Fu, ZHANG Yanhui, et al. The innovative design of sorting device of food sorting machine based on TRIZ theory [J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2017, 25(2): 58-60. (In Chinese)
- [10] 刘波,梅瑛,李瑞琴. 基于 TRIZ 理论的图书分拣机的设计研究[J]. 机械设计与制造,2013(2):23-25.
LIU Bo, MEI Ying, LI Ruiqin. Design and research on book sorting device based on the TRIZ theory [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(2): 23-25. (In Chinese)
- [11] 陈志华,刘泉. 光伏玻璃分拣设备翻转机构优化设计[J]. 机床与液压,2018,46(13):88-92.
CHEN Zhihua, LIU Quan. Optimal design on turnover mechanism of PV glass sorting equipment [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(13): 88-92. (In Chinese)
- [12] GE S H, HOU B P, ZHU W, et al. Pixel-level collision-free grasp prediction network for medical test tube sorting on cluttered trays [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(12): 7897-7904.
- [13] 朱绪胜,郑联语. 基于关键装配特性的大型零部件最佳装配位姿多目标优化算法[J]. 航空学报,2012,33(9):1726-1736.
ZHU Xusheng, ZHENG Lianyu. Multiple-objective optimization algorithm based on key assembly characteristics to posture best fit for large component assembly [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(9): 1726-1736. (In Chinese)
- [14] 张帅,陈柏,鞠锋,等. 基于 GA-PSO 的地砖铺设机器人作业点优化[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1):164-166.
ZHANG Shuai, CHEN Bai, JU Feng, et al. Optimization of construction robot's operation point based on GA-PSO [J]. Machine Building & Automation, 2021, 50(1): 164-166. (In Chinese)
- [15] 陈远志,黄杰,章易镰,等. 改进的粒子群算法求解飞机位姿评估问题[J]. 航空制造技术,2020,63(6):90-96.
CHEN Yuanzhi, HUANG Jie, ZHANG Yilian, et al. Improved particle swarm optimization algorithm for aircraft posture evaluation problems [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(6): 90-96. (In Chinese)
- [16] 耿增显,广鑫,陈俊宇,等. 基于混沌粒子群算法的城市无人机路径规划[J]. 西华大学学报(自然科学版),2024,43(6):1-7.
GENG Zengxian, GUANG Xin, CHEN Junyu, et al. Urban UA route planning based on chaotic PSO algorithm [J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2024, 43(6): 1-7. (In Chinese)
- [17] 李鑫炎,周敏. 基于改进的 ORB 算法的机械臂识别定位及抓取研究[J]. 机械传动,2024,48(10):11-18.
LI Xinyan, ZHOU Min. Research on recognition, positioning and grasping of robotic arms based on an improved ORB algorithm [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(10): 11-18. (In Chinese)
- [18] 李万艳,阮观强,张振东. 基于 YOLOv5 与迁移学习的目标检测和机械臂抓取位姿估计[J]. 机械传动,2024,48(3):170-176.

- LI Wanyan, RUAN Guanqiang, ZHANG Zhendong. Target detection and robotic arm grasp pose estimation based on YOLOv5 and transfer learning[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2024, 48(3):170-176. (In Chinese)
- [19] TIAN D P, SHI Z Z. MPSO: modified particle swarm optimization and its applications [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2018, 41:49-68.
- [20] ZHANG S X, LI A, REN J X, et al. Kinematics inverse solution of assembly robot based on improved particle swarm optimization [J]. *Robotica*, 2024, 42(3):833-845.
- [21] 陈洪芳, 吴欢, 王子帅, 等. 基于改进粒子群算法的三坐标测量机最佳测量区域评价方法[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(11):197-205.
- CHEN Hongfang, WU Huan, WANG Zishuai, et al. An evaluation method for optimal measurement region of coordinate measuring machines based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(11):197-205. (In Chinese)
- [22] SONG B Y, WANG Z D, ZOU L. An improved PSO algorithm for smooth path planning of mobile robots using continuous high-degree Bezier curve[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 100:106960.

Design and posture adjustment optimization of a multi-dimensional vibration casting sorting platform based on an improved PSO algorithm

LI Kangkang¹ WANG Zhihui¹ ZHU Zihao¹ WANG Chengjun¹ YIN Haoyu¹ ZHENG Yan²

(1. School of Artificial Intelligence, Anhui University of Science & Technology, Hefei 231131, China)

(2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Huainan Normal University, Huainan 232038, China)

Abstract: [Objective] To address the issues of limited degrees of freedom and insufficient accuracy in traditional casting sorting platforms, a multi-dimensional vibration posture adjustment platform and an associated optimization algorithm are proposed. [Methods] Firstly, an innovative toggle mechanism and a multi-dimensional vibration excitation module were developed to achieve flexible posture adjustment. Secondly, an improved particle swarm optimization (IMPSO) algorithm was proposed, incorporating adaptive interference forces and dynamic weight adjustment to enhance global search capabilities. Then, a fitness function targeting position and posture deviations was established, comparative simulations between IMPSO, particle swarm optimization (PSO), genetic algorithm-particle swarm optimization (GA-PSO), and chaotic particle swarm optimization (CPSO) were performed using Matlab. Finally, a physical prototype was constructed to verify the performance through experimental tests. [Results] The results show that the IMPSO algorithm improves the convergence speed by 10% to 27% compared with other algorithms. Prototype tests demonstrate that the maximum position and orientation deviations are controlled within 0.35 cm and 0.25°, respectively. This study provides a theoretical and technical reference for high-precision flexible sorting in complex industrial scenarios.

Key words: Multi-dimensional vibration; Toggle mechanism; Adaptive weight; Pose adjustment; Sorting

Corresponding author: WANG Zhihui, E-mail: wangzhihui0424@163.com

Fund: Anhui Provincial Natural Science Foundation (K2230074); National College Student Innovation and Entrepreneurship Training Program (202410361096, S202410361196); Key Research Project of the Education Department of Anhui Province (2024AH051746)

Received: 2025-06-24 Revised: 2025-08-13

(编辑:李立)