

面向酒盒生产线的多模式码垛机器人构型设计及尺度优化

李航, 李瑞琴*, 张磊, 刘娟, 程月琳
(中北大学 机械工程学院, 太原 030051)

摘要: **目的** 针对白酒酒盒生产线后端码垛任务中的单点重复任务及多点灵活任务, 提出了一种多模式混联码垛机器人机构。**方法** 对酒盒生产线中常见的码垛模式进行分析, 提出了码垛机器人机构的拓扑结构, 通过锁定变胞方法实现了机构由 2 自由度模式向多种不同轨迹的单自由度模式的变换, 并对机构的多种模式进行了运动学分析及尺度优化。**结果** 该机构在多种模式下的运动方程均符合码垛机器人实际任务要求, 且通过尺度综合优化了机构的结构尺寸。**结论** 设计的多模式混联码垛机器人机构能够适应实际码垛任务中多变的作业轨迹需求, 验证了锁定变胞方法在码垛机器人机构设计中的可行性和有效性。

关键词: 酒盒生产线; 码垛机器人; 锁定变胞方法; 构型设计; 尺度优化; 运动学分析

中图分类号: TB486; TH112 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2025)03-0158-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.019

Configuration Design and Dimension Optimization of a Multi-mode Palletizing Robot for Wine Box Production Line

LI Hang, LI Ruiqin*, ZHANG Lei, LIU Juan, CHENG Yuelin

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: This work aims to propose a multi-mode hybrid palletizing robot mechanism for the single-point repetitive task and multi-point flexible task in the palletizing task at the backend of the Baijiu wine box production line. The common palletizing modes in the wine box production line were analyzed. A topological structure for the palletizing robot mechanism was proposed, the transformation of the mechanism from 2-DOF mode to single-DOF mode with multiple different trajectories was realized by locking metamorphosis. Then, the kinematics was analyzed and the dimensions were optimized on the mechanism with different modes. The results showed that the motion equations of the mechanism in various modes satisfied the actual task requirements of the palletizing robot. The structure dimensions of the mechanism were optimized by dimension synthesis. The designed multi-mode hybrid palletizing robot mechanism can adapt to the changing operation trajectory requirements in the actual palletizing task, and verify the feasibility and effectiveness of the locking metamorphic method in the design of the palletizing robot mechanism.

KEY WORDS: wine box production line; palletizing robot; locking metamorphosis method; configuration design; dimension optimization; kinematic analysis

随着工业自动化的发展, 码垛机器人在物流和自动化生产线中的应用日益增多。然而, 码垛机器人的

设计仍面临诸多挑战, 如结构复杂性、运动稳定性等问题亟待解决^[1]。码垛机器人本体采用并联及混联结

收稿日期: 2024-10-12

基金项目: 山西省重点研发计划项目 (202202150401018); 山西省高等学校科技创新项目 (2023L563)

*通信作者

构,可以弥补串联机构在系统刚性、运动耦合等方面的不足^[2-5]。

变胞机构通过改变杆件和自由度数目,可实现多功能和高适应性的拓扑结构变化^[6]。锁定变胞^[7]是机构变胞的方式之一,其通过转动构件的锁定改变机构结构。张磊等^[8]设计的可重构运动副,以及徐帅等^[9]提出的 3-RRR 平面并联机构,展示了多模式运动的能力。许海罡^[10]设计了灵活多变的操作臂关节,提升了操作臂的承载能力和灵活性。在多模式码垛机器人领域,王汝贵等^[11-12]研发的变胞码垛机器人融合了变胞原理与多自由度控制,实现了稳定输出和高精度定位;陈辉庆^[13]设计了一种能实现多构态的变胞码垛机器人机构,并将机构分为本质支链和支撑支链进行了尺度分析。

目前,诸多学者针对机构的拓扑结构进行了机构可动性及驱动选取研究。Ding 等^[14]提出的环路代数理论为刚性子链的自动判别提供了可操作的方法;Pan 等^[15]基于等效力学模型,提出了闭环构建映射的同构识别方法;王英等^[16]根据运动链可动因子的概念,考虑多环运动链环路间的相互作用,提出了一种用于识别多自由度运动链中驱动的方法。

本文结合白酒酒盒生产线后端码垛机器人的实际任务需求,将锁定变胞机构引入码垛机器人的机构设计中,提出多模式混联式码垛机器人机构。该机器人机构可通过锁定变胞实现高效、平稳的单驱动圆弧轨迹、竖直线轨迹码垛,进一步通过尺度分析得出该机器人机构的尺度范围与最优值,为机构的尺寸优选提供理论基础。

1 机构构型设计

1.1 码垛机器人工作模式分析

目前,码垛机器人普遍采用点到点(Point to Point, PTP)运动模式,这种模式确保了运动起始位置和结束位置的精确性,且不对中间路径设置严格规定^[1]。在规划轨迹点时,必须进行边界点检查,确保所有轨迹点都位于机器人的工作空间内。为了使码垛机器人能在满足上述条件的前提下灵活地适应不同的码垛场景,通过更换工作模式来提高码垛效率^[13],对酒盒生产线中几种较为典型的码垛场景进行分析。

1.1.1 单/多点抓取-多点放置

图 1 所示为酒盒生产线后端的装箱、封箱和码垛模型。该生产线采用双线并行布局,共用 1 个码垛机器人。在该场景中,货物从抓取点到放置点的转移可分解为以下 2 种: 1) 平面内垂直方向的 2 个平移运动(Δz 与 Δd); 2) 码垛机器人的底座绕平行于 z 轴的轴线的旋转($\Delta\theta$)。由于放置点的高度和距离各异,

机器人需至少具备 2 个平移自由度。目前,多数码垛机器人采用平面 2T^[2,3,5,12]或 2T1R^[4,13]自由度配置以实现所需运动。

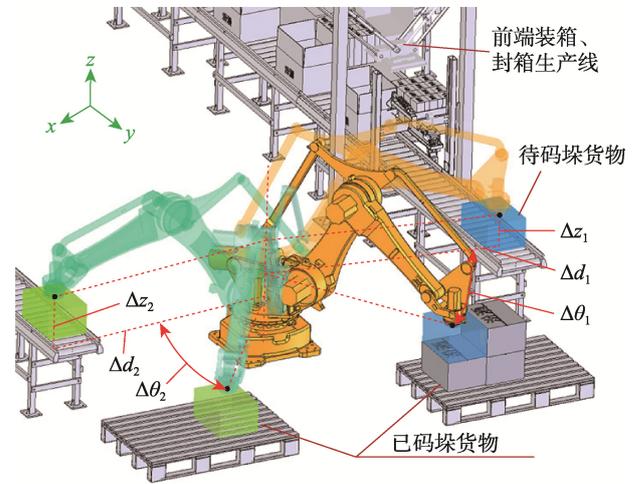


图 1 酒盒装箱、封箱、码垛场景建模
Fig.1 Modeling of wine box packing, sealing and palletizing

1.1.2 单点抓取-单点放置

在实际码垛场景中,常常会出现固定点之间重复作业,这时仅需一条作业轨迹即可实现从抓取点到放置点的转移。在这种情况下,单自由度机构的效率优于 2 自由度机构。

如图 2 所示,不同码垛场景下的作业轨迹各异。图 2a 所示为酒盒被整理成 3 行 4 列后,由码垛机器人一次性装箱的过程。在此过程中, Δz 与 Δd 均为固定值,且不必对中间路径设置严格规定,机器人的作业轨迹为一段圆弧。图 2b 展示了纸板加工后单张纸板的堆放过程。由于托盘中心和传送带抓取中心都与机器人中心距离相等, Δd 方向的运动为 0,仅需调整 Δz 值即可实现不同高度的纸板堆叠,其作业轨迹为竖直线。

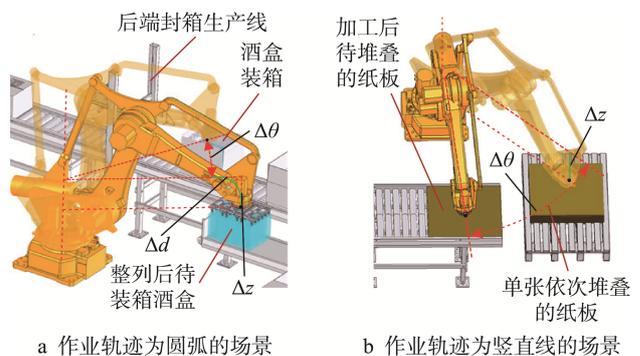


图 2 2 种不同码垛场景
Fig.2 Two palletizing scenes

1.2 构型设计及拓扑结构分析

1.2.1 构型设计

为设计一种能够适应单/多点抓取-多点放置以及单点抓取-单点放置工作模式的码垛机器人, 本文提出采用平面锁定的变胞机构。该机构在未锁定状态下具有 2T 自由度, 通过锁定特定运动副, 可转变为单自由度形式, 以实现不同的作业轨迹, 并确保末端执行器始终与地面保持平行。

在满足自由度要求的基础上, 本文通过拓扑结构分析, 对平面九杆以内机构中所有 2T 自由度不含复铰及含单个复铰的机构进行综合与筛选, 最终选择了图 3a 所示的七杆 2T 自由度机构。在此基础上, 设计了图 3b 所示的混联式码垛机器人机构, 其伸缩杆移动方向始终垂直于地面, 实现了在垂直于地面方向的运动解耦。

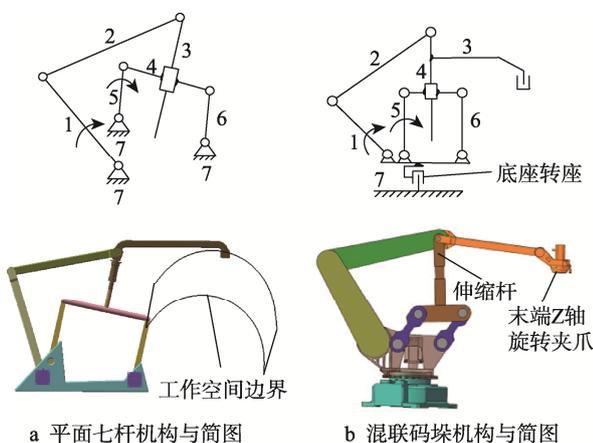


图 3 平面主体机构及整体机构简图与模型
Fig.3 Diagram and model of planar main body mechanism and overall mechanism

1.2.2 拓扑结构分析

为实现机构的多模式运动, 需要探讨如何通过锁定变胞操作, 将 1.2.1 节所述机构转变为所需的单自由度运动模式。

依据环路代数理论^[14], 闭式运动链的拓扑结构中, 单个环路的自由度 (可动因子) 可表示该环路中可选取驱动的个数, 式 (1) 和式 (2) 分别描述了单个回路及多个回路所构成的合并回路中可动因子的计算方法。

$$w_i = N_i - 3 > 0 \quad (1)$$

$$w_{i \cup j \cup k \dots} = 3(N_{i \cup j \cup k \dots} - 1) - 2P_{L, i \cup j \cup k \dots} - P_{H, i \cup j \cup k \dots} > 0 \quad (2)$$

式中: $i \cup j \cup k \dots$ 表示各基本回路的并集, 即各基本回路合并后的合并回路; N 表示回路中的构件数; P_L 与 P_H 分别表示回路中的低副数与高副数。

在多回路耦合的拓扑结构中, 构件可能参与多个不同的回路。在评估构件是否可被选为驱动件, 以及考虑锁定运动副导致 2 个构件合并时, 必须分析合并

后构件所涉及的回路中可动因子是否降至 0 形成刚性子链, 或降至低于所选驱动件数, 导致机构的第 2 类干涉。因此, 本文提出了一种基于基本回路原理的分析方法, 以评估锁定运动副后机构的可动因子变化。该方法的具体步骤如下。

1) 分析锁定运动副后的可动因子变化。应用式 (1) 和式 (2) 评估锁定操作是否导致刚性子链的形成。若形成的刚性子链的可动因子 $w=0$, 则将该子链视为单一构件并重新进行分析; 若 $w<0$, 则排除该运动副的锁定选项。若无刚性子链形成, 则认为机构具有可动性。

2) 驱动选取规则。选择驱动件时, 要保证每个基本回路以及合并回路中, 确定的驱动件个数要小于等于该基本回路及合并回路的可动因子, 即保证各回路满足式 (3)。

$$N_{Fi} \leq w_i; N_{Fi} \leq w_{i \cup j};$$

$$N_{Fi} \leq w_{i \cup k}; N_{Fi} \leq w_{i \cup j \cup k} \dots \quad (3)$$

式中: N_{Fi} 表示基本回路 i 中的驱动件个数; $i \cup j$, $i \cup k$, $i \cup j \cup k \dots$ 表示基本回路 i 的各合并回路。

若对驱动位置有要求, 如必须为连架杆或必须为相邻构件, 则从上述选择的驱动中找出符合条件的构件组。例如, 运动链自由度为 3, 则每 3 个不重复的符合要求的驱动件为一组, 即为可选驱动件组。

3) 分析机构运动的独立性。若锁定运动副后的机构不含刚性子链, 且可以选择合适的驱动, 则要考虑新机构是否存在可分离自由度, 评估机架选择对机构独立性的影响。

根据上述方法, 首先分析未锁定运动副的七杆 2 自由度机构的拓扑结构, 如图 4 所示。其中, 实心点表示构件, 线表示转动副, “□”表示移动副。通过 Johnson 算法生成的单回路包括: $H_1=1-2-3-4-5-7-1$, $H_2=4-5-7-6-4$, $H_3=1-2-3-4-6-7-1$ 。合并回路有 $H_4=H_1 \cup H_2=H_3 \cup H_2=H_1 \cup H_3$ 。各回路的可动因子计算结果: $w_1=3$, $w_2=1$, $w_3=3$, $w_4=2$, 验证了选择连架杆 1 和 5 作为驱动件的合理性。表 1 所示为该平面机构各运动副锁定后的分析过程。

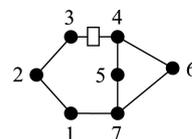


图 4 平面七杆 2 自由度机构的拓扑结构

Fig.4 Topological structure of the planar seven-bar 2-DOF mechanism

表 1 的拓扑结构中, 构件 2 和 3 的合并、1 和 7 的合并以及 1 和 2 的合并属于同构构型, 构件 4 和 6 的合并、6 和 7 的合并、5 和 7 的合并以及 4 和 5 的合并也属于同构构型, 因此除了构件 1 和 2 的合并以及构件 4 和 5 的合并外, 其他情况被忽略。

表 1 运动副锁定后的拓扑结构分析
Tab.1 Topological structure analysis after locking kinematic pair

机构拓扑结构	各回路可动因子变化	是否产生刚性子链	可选驱动件 (要求为连架杆)
	$w_1=2$ $w_2=1$ $w_3=2$ $w_4=1$	否	构件 1 或构件 5 或构件 6
	$w_1=2$ $w_2=1$ $w_3=2$ $w_4=1$	否	构件 1(2)或构件 5 或构件 6
	$w_1=2$ $w_2=0$ $w_3=3$ $w_4=1$ ↓ $w_1=1$	是	构件 1 或构件 3

根据表 1 的分析, 该机构在执行锁定变胞操作并排除同构体后, 共有 3 种不同情况。这些情况均不包含可分离自由度。其中 1 种情况会产生刚性子链, 导致机构转变为平面摇杆滑块机构形成平面内的竖直线轨迹; 其余 2 种情况通过尺寸约束后, 可形成以不同点为圆心的圆弧, 以满足单自由度模式下的 2 种工作模式需求。

2 机构运动学分析

2.1 2 自由度模式机构运动学分析

2.1.1 运动学正、逆解

图 5 所示为该混联式码垛机器人机构的结构参数。根据图 5 中几何关系, 可得该机构末端的位置正解表达式, 见式 (4)。

$$\begin{cases} x_p = l_3 \cos \theta_3 + a_x = h_4 - h_3 + l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + a_x \\ y_p = l_3 \sin \theta_3 + h_2 + a_y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 - h_1 + a_y \end{cases} \quad (4)$$

消去中间变量 θ_2 及 h_2 , 得式 (5)。

$$\begin{cases} x_p = l_3 \cos \theta_3 + a_x \\ y_p = l_1 \sin \theta_1 - h_1 + l_2 \sqrt{1 - \frac{(h_3 - h_4 - l_1 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_3)^2}{l_2^2}} + a_y \end{cases} \quad (5)$$

同样, 根据图 5 所示机构参数, 可以得到机构末端位置的运动学逆解。

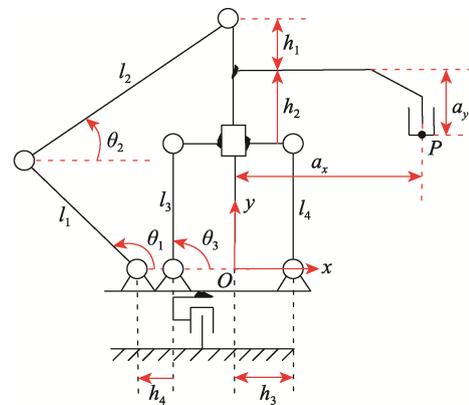


图 5 混联式码垛机器人机构的结构参数与运动参数

Fig.5 Structure parameters and motion parameters of hybrid palletizing robot mechanism

驱动角 θ_3 的运动学逆解方程见式 (6)。

$$\begin{cases} \cos \theta_3 = \frac{x_p - a_x}{l_3} \\ \sin \theta_3 = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x_p - a_x}{l_3} \right)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: \pm 表示该机构在 2 个不同的 θ_3 输入条件下, 输出相同, 且这 2 个角度之和为 0。

驱动角 θ_1 的逆解方程见式 (7)。

$$\begin{cases} \cos \theta_1 = \frac{x_p - a_x - h_4 + h_3 - l_2 \sqrt{1 - \left(\frac{y_p - a_y + h_1 - l_1 \sin \theta_1}{l_2} \right)^2}}{l_1} \\ \sin \theta_1 = \frac{y_p - a_y + h_1 - l_2 \sqrt{1 - \left(\frac{x_p - a_x - h_4 + h_3 - l_1 \cos \theta_1}{l_2} \right)^2}}{l_1} \end{cases} \quad (7)$$

鉴于运动学正、逆解方程高度非线性且相互耦合,很难用解析方法求解,因此计算过程中采用数值方法。

为验证运动学正、逆解的准确性,设定参数 $l_1=100 \text{ mm}, l_2=130 \text{ mm}, l_3=40 \text{ mm}, h_3=25 \text{ mm}, h_4=52 \text{ mm}, h_1=10 \text{ mm}$ 。将一组驱动数据输入运动学正解程序,得到末端位置后,再将该位置数据代入运动学逆解程序以反向求解驱动数据。表2展示了正、逆解计算结果的对比。表2中, θ_3 根据逆解方程直接求得, θ_1 则使用粒子群算法搜索得出,迭代次数为100。

表2 正、逆解计算结果对比
Tab.2 Comparison of positive and inverse solution calculation results

输入参数/(°)	正解求得 末端位置/mm	代入逆解中 求得的结果/(°)
$\theta_1=135$ $\theta_3=90$	$x_p=80$ $y_p=98.1057$	$\theta_1=135.006$ $\theta_3=90$
$\theta_1=120$ $\theta_3=75$	$x_p=90.3528$ $y_p=130.13$	$\theta_1=120.029$ $\theta_3=75$
$\theta_1=110$ $\theta_3=60$	$x_p=100$ $y_p=145.19$	$\theta_1=109.985$ $\theta_3=60$
$\theta_1=100$ $\theta_3=45$	$x_p=108.284$ $y_p=158.804$	$\theta_1=99.998$ $\theta_3=45$

2.1.2 奇异性与无奇异工作空间

$$D = \frac{(h_3 - h_4 - l_1 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_3)}{l_2 \left(1 - \frac{(h_3 - h_4 - l_1 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_3)^2}{l_2^2} \right)} \quad (8)$$

对正运动学方程求一阶导数,得式(9)。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -l_3 \sin \theta_3 \\ l_1 \cos \theta_1 + D \cdot l_1 \sin \theta_1 & -D \cdot l_3 \sin \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(9)可知:1)当 $\theta_3=n\pi$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 时,机构处于输入奇异状态,表明在无奇异工作空间内,逆解方程中的2个解不能同时有效;2)当 $D=0$,即 $h_3 - h_4 - l_1 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_3 = 0$ 时,构件2与y轴平行, $\theta_2=\pi/2$,这时如果 $\theta_1=\pi/2$,机构将处于输入奇异,此情况仅在 $h_4=h_3$ 时出现,即机架与构件1之间的运动副位于坐标中心处;3)当 $h_3 - h_4 - l_1 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_3 = 0$ 时,机构处于输入奇异,此时构件2垂直于移动副,

$\theta_2=0$ 。

通过上述分析,得到了该机构的3类奇异位形,其中 $h_3 - h_4 - l_1 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_3 = 0$ 仅在连架杆1处驱动副位置与坐标原点重合时才会出现。其余2种奇异位形如图6所示。

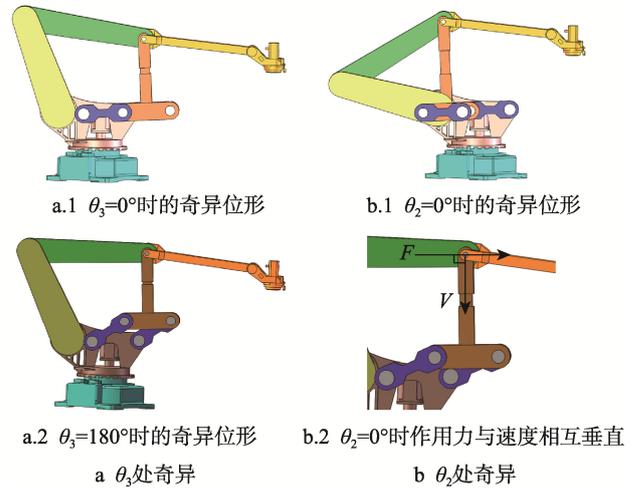


图6 机构的2种奇异位形
Fig.6 Two singular configurations of mechanism

根据奇异位形分析,为确保混联码垛机器人机构在2自由度下无奇异工作空间,需合理选择驱动构件的运动范围及构件2的活动范围。

如图7a所示,在给定结构参数 $l_1=100 \text{ mm}, l_2=130 \text{ mm}, l_3=40 \text{ mm}, h_3=25 \text{ mm}, h_4=40 \text{ mm}, h_1=0 \text{ mm}$ 的条件下,设定驱动角 θ_3 为 $10^\circ \sim 160^\circ$,构件2的活动范围 θ_2 为 $15^\circ \sim 80^\circ$,移动副的移动范围为 $5 \sim 100 \text{ mm}$ 。图7b展示了该工作空间边界函数的分析。通过对比图7a和图7b,验证了通过位置正解得出的工作空间的正确性。

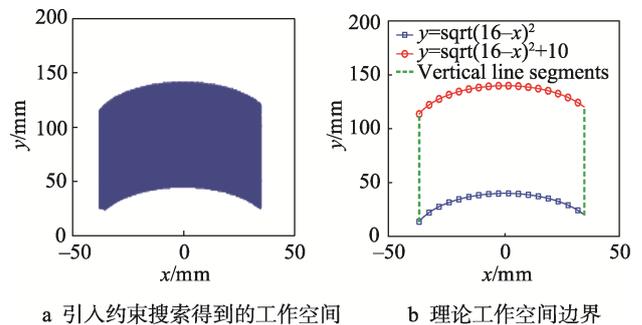


图7 平面2自由度机构的无奇异工作空间
Fig.7 Nonsingular workspace of planar 2-DOF mechanism

2.2 单自由度模式机构运动分析

根据1.2.2节分析结果,该机构在锁定构件3和4、1和2、4和5之间的运动副后,可生成3种结构不同的单自由度平面机构。下面分析这3种通过锁定

变胞生成机构的运动轨迹。

2.2.1 圆弧轨迹模式分析

1) 固定半径的圆弧轨迹的构型。如图 8a 所示, 当锁定机构中的移动导轨后, 机构变为单自由度, 且由于其中 1 条子链中仅剩 1 个沿着圆弧方向平动的 Pa 副, 故末端运动轨迹是半径为 l_3 的圆弧。

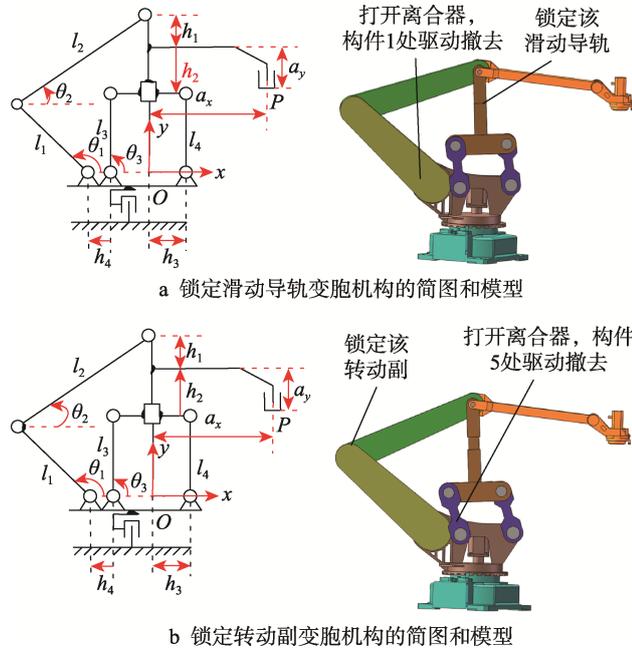


图 8 单自由度圆弧轨迹机构

Fig.8 Single-DOF arc trajectory mechanism

其轨迹方程见式 (10)。

$$\begin{cases} x_p = l_3 \cos \theta_3 + a_x \\ y_p = l_3 \sin \theta_3 + h_2 + a_y \end{cases} \quad (10)$$

图 9a 所示为不同 h_2 情况下该机构作业轨迹的集合。图 9a 表明, 只要合理调整 h_2 的长度, 那么作业轨迹可以是半径相同但圆心位置不同的圆弧。

2) 以构件 1 转动中心为圆心的圆弧轨迹的构型。如图 8b 所示, 当将构件 1、2 之间的运动副锁定后, 机构变为一个 2 回路单自由度机构, 且由于其中一条子链自由度为 2T, 另一条子链自由度为 1T1R, 故末端运动轨迹为在 2 条子链共同约束下以构件 1 转动中心为圆心的圆弧, 其轨迹方程见式 (11)。

$$\begin{cases} x_p = h_4 - h_3 + l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + a_x \\ y_p = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 - h_1 + a_y \end{cases} \quad (11)$$

由于此时构件 1 与构件 2 固联为同一构件, 因此可得式 (12)。

$$\theta_2 = \begin{cases} \theta_{12} - (180^\circ - \theta_1) & \theta_{12} > 180^\circ - \theta_1 \\ 180^\circ - \theta_1 - \theta_{12} & \theta_{12} \leq 180^\circ - \theta_1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: θ_{12} 为构件 1、2 间的固定夹角。

图 9b 所示为在不同 θ_{12} 情况下该机构的作业轨迹的集合。图 9b 表明, 只要合理调整 θ_{12} 的角度, 那么

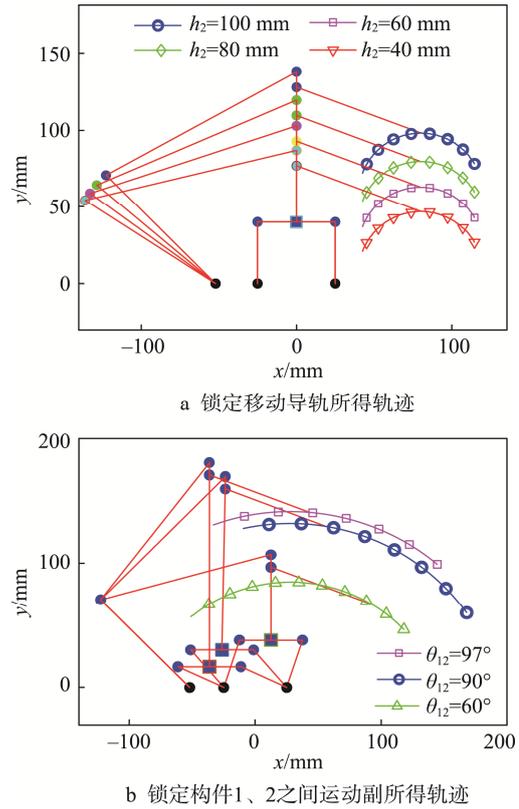


图 9 通过调整锁定参数改变轨迹
Fig.9 Changing trajectory by adjusting locking parameters

作业轨迹就可以是不同半径的圆弧。

可以发现, 虽然上述 2 种轨迹都是圆弧, 但 2 个圆弧半径差别非常大, 因此实际生产中, 可根据抓取距离不同选择不同的圆弧轨迹。

2.2.2 竖直线轨迹模式分析

如图 10 所示, 当将构件 4、5 之间的运动副锁定后, 机构中形成刚性子链, 2 回路七杆机构退化为 1 个单回路四杆机构, 其形式为偏置型摇杆滑块机构, 且偏置距离随运动副锁定时 θ_3 的角度变化而变化。其轨迹方程与 2 自由度时机构的正解方程相同, 只是其中 θ_3 变为固定值。

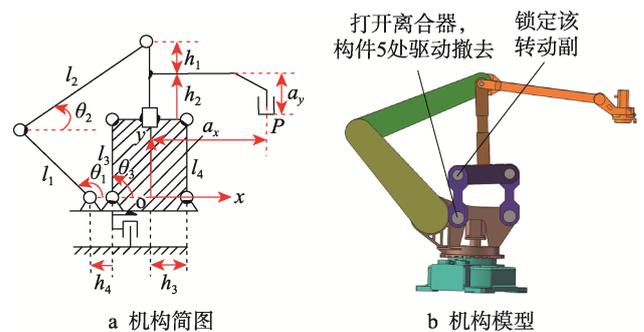


图 10 单自由度竖直线轨迹机构
Fig.10 Single-DOF vertical line trajectory mechanism

图 11 所示为在不同的锁定角度 θ_3 情况下该机构作业轨迹的集合。图 11 表明，只要合理调整锁定角度 θ_3 ，就可以得到不同偏距下的竖直线作业轨迹。

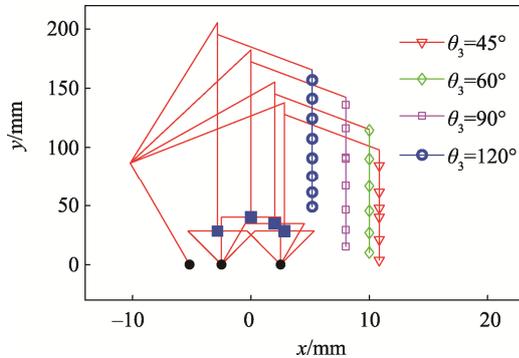


图 11 调整锁定角度 θ_3 以改变作业轨迹的偏距

Fig.11 Adjusting locking angle θ_3 to change offset of operating trajectory

3 机构尺度优化及模型验证

3.1 机构尺度优化

3.1.1 尺度分析

由 2.1.2 节中机构的无奇异工作空间可知，机构的工作空间边界由 4 条曲线构成。其中，上边界与下边界均为圆弧，该圆弧的半径即构件 5 的长度，工作空间的横向间距见式 (13)。

$$\begin{aligned} X &= x_{\max} - x_{\min} \\ x_{\min} &= l_3 \cos \theta_{3\min} + a_x; x_{\max} = l_3 \cos \theta_{3\max} + a_x \end{aligned} \quad (13)$$

式中： $\theta_{3\max}$ 与 $\theta_{3\min}$ 表示驱动角 θ_3 的最大运动范围和最小运动范围。

可见，一旦驱动角 θ_3 的运动范围及 l_3 确定，将无法再通过尺寸优化手段增加其横向间距。故将 l_3 以及 $\theta_{3\max}$ 、 $\theta_{3\min}$ 作为优化过程中的不变量，对其他

机构尺寸，包括 h_3 、 h_4 、 l_1 、 l_2 进行优化。

在进行机构尺寸优化时，设定了以下目标：1) 要求该机构在 l_1 、 l_2 尽可能短的情况下，不经过任何奇异位形获得如图 7 所示连续完整的无奇异工作空间；2) 保证工作空间的纵向距离全域内均可达到移动导轨的最大与最小运动范围，横向距离覆盖驱动角 θ_3 的全部运动范围。

因为机构的运动是连续的，所以为了简化约束方程，仅约束运动过程中的 6 个关键点，如图 12 所示。

图 12 中， c_1 、 c_2 、 c_3 表示机构末端位置为 P_2 、 P_4 、 P_6 时， l_1 处固定铰链与 l_2 处活动铰链间的距离，该距离可用式 (14) 计算。

$$c_i^2 = (h_{\max} + l_3 \sin \theta_3)^2 + (l_3 \cos \theta_3 + h_3 - h_4)^2 \quad i=1,2,3,\dots(14)$$

对该函数求导可得其最大值 c_{\max} 。为了保证机构运动范围内均可动，要求 $l_1 + l_2 > c_{\max}$ ，例如 2.1.2 节中所选参数，求得在 62.5° 时，取得 $c_{\max} = 15.27 \text{ mm}$ 。

且当机构末端位置为 P_1 ，即 $\theta = \theta_{\min}$ ， $h = h_{\min}$ 时，会出现 θ_2 的最小值。为了保证机构运行中不经过奇异点且具备良好的运动性能，须将此时 θ_2 限制在 25° 以上。当机构末端位置为 P_5 ，即 $\theta = \theta_{\max}$ ， $h = h_{\min}$ 时，则会出现 θ_1 的最大值，为了保证机构不与地面发生干涉，需保证此时 $\theta_1 < 180^\circ$ 。

3.1.2 尺寸优选及验证

图 13a 所示为 $l_3 = 90 \text{ mm}$ ， $h_{\max} = 150 \text{ mm}$ ， $h_{\min} = 100 \text{ mm}$ ， $h_1 = 15 \text{ mm}$ 、 $\theta_3 = \theta_{3\max}$ ，将 $h_4 - h_3$ 设置为 38 mm 时 l_1 和 l_2 的可行范围，并将此时对应的全域最大角度 θ_1 以等值线形式表示；图 13b 所示为前设条件下 $\theta_3 = \theta_{3\min}$ 时 l_1 和 l_2 的可行范围，并将此时对应的全域内最小角度 θ_2 以等值线形式表示。由图 13 可知，偏置距离 $h_4 - h_3$ 在 38 mm 附近时，2 个图中可取到交集（无法取得交集的偏置值未展示）。

为了验证符合条件的尺寸在工作空间内的连续无奇异，选择 $h_4 = 88 \text{ mm}$ ， $h_3 = 50 \text{ mm}$ 时一组尺寸较小的参数： $l_1 = 125 \text{ mm}$ ， $l_2 = 120 \text{ mm}$ ，使用 MATLAB 对图 12 所示 6 个关键点进行位置分析，结果如图 14 所示。

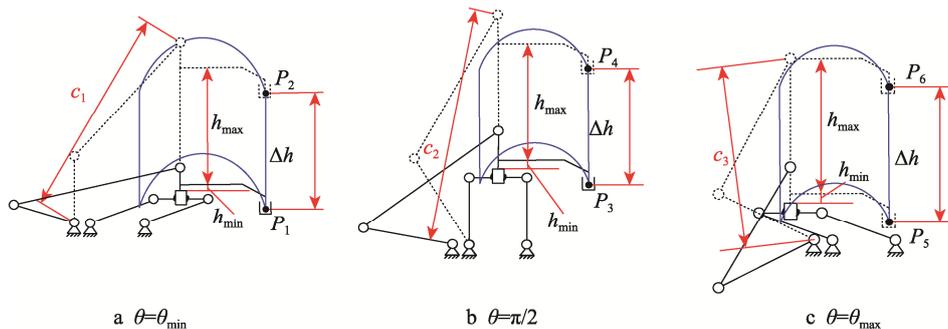


图 12 尺度优化时的 6 个关键点

Fig.12 Six key points in dimension optimization

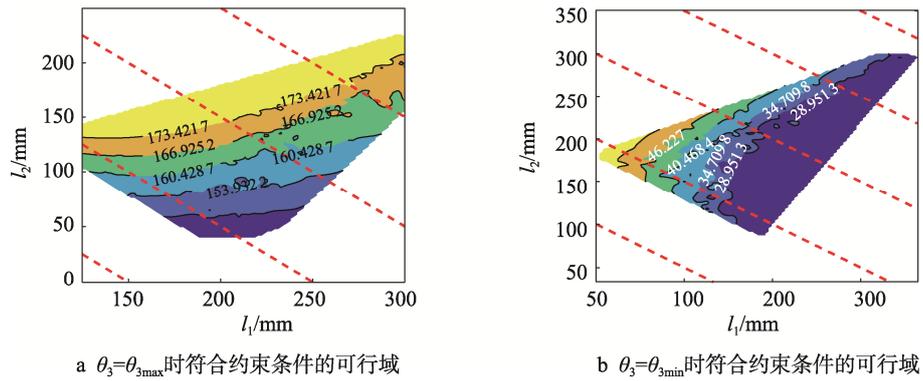


图 13 $\theta_3 = \theta_{3max}$ 及 $\theta_3 = \theta_{3min}$ 时的可行域
Fig.13 Feasible region when $\theta_3 = \theta_{3max}$ and $\theta_3 = \theta_{3min}$

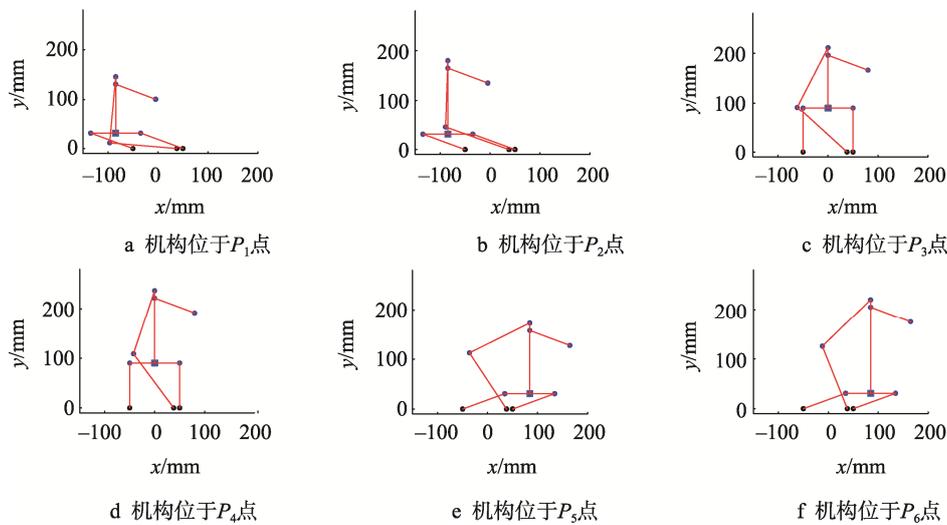


图 14 优化尺寸后机构的连续运动
Fig.14 Continuous motion of mechanism after dimension optimization

由图 14 可知, 机构在工作空间内运动时, 各点均未达到奇异值, 同时将 l_1 和 l_2 的尺寸约束到较小的值(优化前 $l_1=150$ mm, $l_2=170$ mm, 优化后 $l_1=125$ mm, $l_2=120$ mm)。优化后 2 杆的尺寸仅为优化前的 76%, 且优化后将 θ_{1max} 优化至 180° 以下, 并将 θ_{2min} 优化至

25° 以上, 因此尺度优化的结果合理。

3.2 模型验证

表 3 所示为 $l_3=90$ mm, $h_{max}=150$ mm, $h_{min}=100$ mm, $h_1=15$ mm, $\theta_3=\theta_{3max}$, 将 h_4-h_3 设置为 38 mm, 分别

表 3 优化前后机构理论与实际情况对比

Tab.3 Comparison between theoretical and actual values of mechanism parameters before and after optimization

构件尺寸/mm	输入参数($^\circ$)	理论值/mm	实际值/mm
$l_1=15, l_2=17$	$\theta_3=160, \theta_1=188.49$	$x_P=-4.572, y_P=100.782$	$x_P=-4.301, y_P=99.583$
	$\theta_3=160, \theta_1=169.34$	$x_P=-4.572, y_P=150.782$	$x_P=-4.785, y_P=149.632$
	$\theta_3=90, \theta_1=153.40$	$x_P=80, y_P=160$	$x_P=80.785, y_P=162.914$
	$\theta_3=90, \theta_1=136.72$	$x_P=80, y_P=210$	$x_P=79.529, y_P=211.053$
	$\theta_3=20, \theta_1=140.58$	$x_P=164.572, y_P=100.782$	$x_P=164.300, y_P=101.226$
	$\theta_3=20, \theta_1=132.31$	$x_P=164.572, y_P=150.782$	$x_P=164.732, y_P=148.491$
$l_1=12.5, l_2=12$	$\theta_3=160, \theta_1=168.14$	$x_P=-4.572, y_P=100.782$	$x_P=-4.838, y_P=102.195$
	$\theta_3=160, \theta_1=140.86$	$x_P=-4.572, y_P=150.782$	$x_P=-4.245, y_P=152.196$
	$\theta_3=90, \theta_1=131.61$	$x_P=80, y_P=160$	$x_P=79.21, y_P=158.680$
	$\theta_3=90, \theta_1=116.90$	$x_P=80, y_P=210$	$x_P=81.099, y_P=213.063$
	$\theta_3=20, \theta_1=122.28$	$x_P=164.572, y_P=100.782$	$x_P=164.838, y_P=102.173$
	$\theta_3=20, \theta_1=110.53$	$x_P=164.572, y_P=150.782$	$x_P=164.410, y_P=152.200$

取 $l_1=150\text{mm}$, $l_2=170\text{mm}$ 和 $l_1=125\text{mm}$, $l_2=120\text{mm}$, 机构位于不同位置时末端执行器处的理论位置和实际模型位置。由表 3 中数据可知: 1) 优化前机构 $\theta_{1\text{max}}=188.49^\circ>180^\circ$, 优化后 $\theta_{1\text{max}}=168.14^\circ<180^\circ$, 优化过程将 $\theta_{1\text{max}}$ 成功约束到 180° 以下; 2) 优化前后 θ_3 相同, 且机构位于不同极限位置时, 理论位置相同, 这说明机构的优化过程中各关键点的位置并未改变, 即工作空间并未改变; 3) 所测得实际值与理论值存在偏差, 且 y 轴方向偏差较大, 这说明机构在 y 轴方向的运动灵敏度较高, 实际控制时应应对驱动 θ_1 进行多级齿轮减速, 增大

运动副与电机之间的传动比, 以提高控制精度。

图 15 所示为优化后(尺寸为 $l_1=125\text{mm}$, $l_2=120\text{mm}$, $l_3=90\text{mm}$, $h_4=88\text{mm}$, $h_3=50\text{mm}$), 机构连续运动至各左、右、上、下极限位置及中间位置时的状态。从图 15 可看出, 机构运动过程中 θ_1 均 $<180^\circ$, 且 θ_2 均 $>25^\circ$, 符合预期。

图 16~18 所示为机构处于 2 自由度模式、单自由度圆弧轨迹模式、单自由度竖直线迹模式时的工作状态, 与 2.1、2.2.1、2.2.2 节所分析机构运动模式一一对应, 进一步验证了机构运动学分析的正确性。

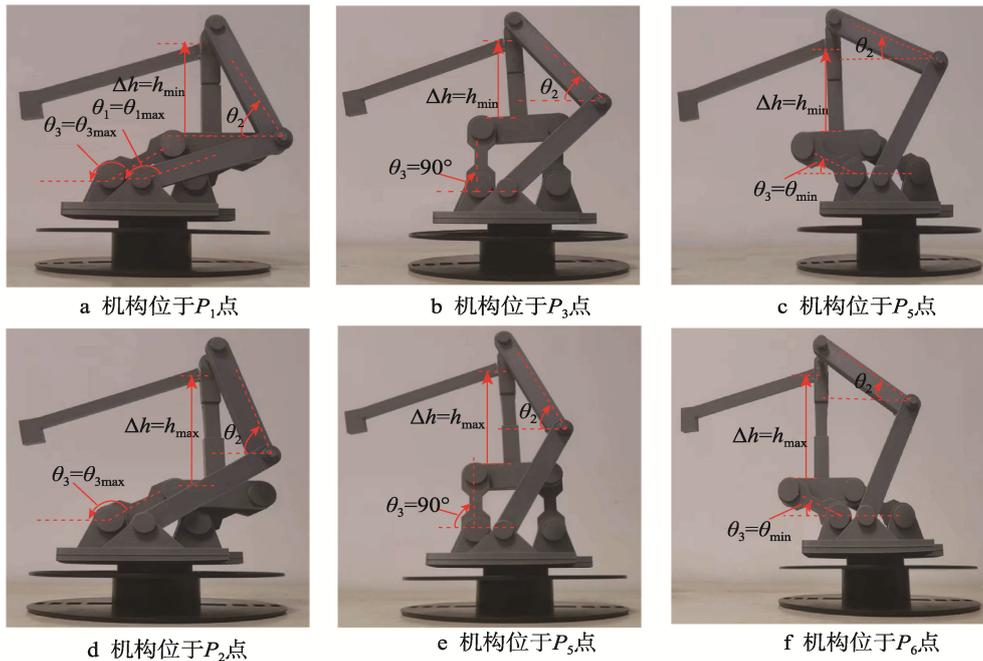


图 15 机构实物模型连续运动
Fig.15 Continuous motion of physical model of the mechanism

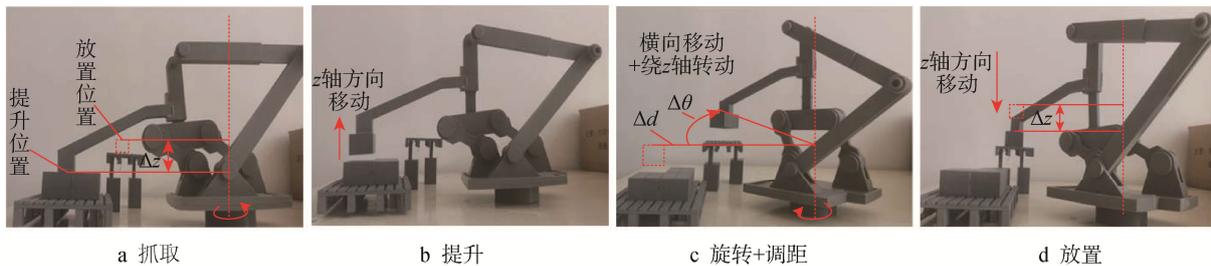


图 16 机构 2 自由度模式
Fig.16 Mechanism in 2-DOF mode

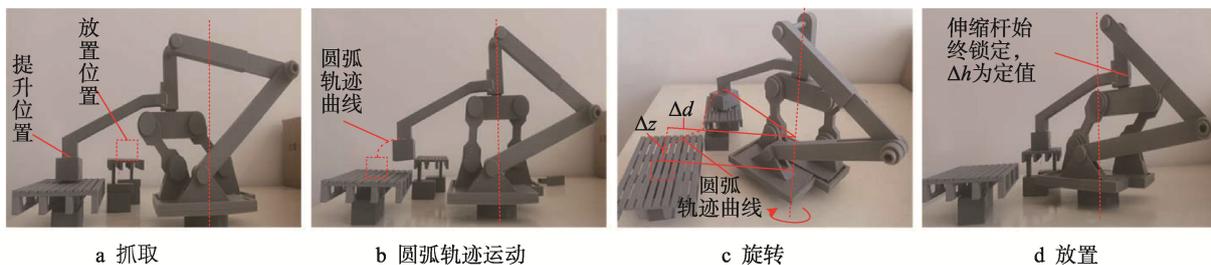


图 17 机构单自由度圆弧运动模式
Fig.17 Mechanism in single-DOF arc trajectory mode

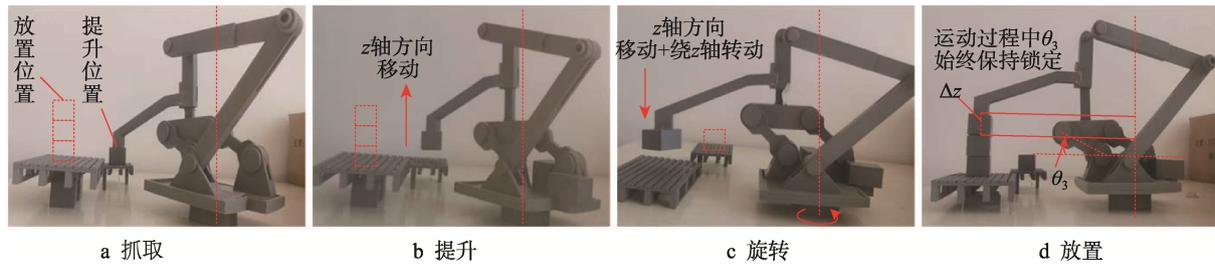


图 18 机构单自由度竖直线运动模式

Fig.18 Mechanism in single-DOF vertical line trajectory mode

4 结语

本研究提出的多模式混联码垛机器人机构在白葡萄酒生产线后端码垛任务中展现出显著的应用潜力。该机构能够通过锁定变胞技术实现从 2 自由度模式到单自由度模式的转变, 实现了单点抓取-多点放置及单点抓取-单点放置等多种工作模式。运动学分析证实了机构在不同模式下的运动方程均能满足实际码垛任务的要求, 且机构的工作空间内无奇异位形, 保证了运动的安全性和连续性。尺度优化进一步确保了机构结构尺寸的合理性, 优化后的机构在保持高效、稳定作业的同时, 有效避免了奇异位形, 确保了工作空间内的运动安全性和连续性。实验结果表明, 优化后的机构在关键性能指标上均有显著提升, 例如 θ_1 的最大角度从 188.49° 降低至 168.14° , 避免了与地面的干涉, 同时将 θ_2 的最小值约束到 25° , 提高了机构运动传递的整体效率。这些成果验证了锁定变胞方法在码垛机器人机构设计中的可行性和有效性, 为未来自动化码垛机器人的设计和应用提供了重要的理论和实践基础。

参考文献:

- [1] 黄冰鹏, 林义忠, 杨中华, 等. 码垛机器人的研究与应用现状[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 82-87.
HUANG B P, LIN Y Z, YANG Z H, et al. Research and Application Situation of Palletizing Robots[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 82-87.
- [2] 舒阳. 混联式重载码垛机器人设计与驱动配置[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
SHU Y. Design and Drive Configuration of Series-Parallel Heavy-Duty Palletizing Robot[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [3] 邹晓晖, 王红州, 陈润六, 等. 一种新型混联码垛机器人的设计与分析[J]. 制造业自动化, 2016, 38(11): 91-94.
ZOU X H, WANG H Z, CHEN R L, et al. Design and
- Analysis of a New Hybrid Palletizing Robot[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(11): 91-94.
- [4] CAO W A, LI S W, CHENG P, et al. Design and Development of a New 4 DOF Hybrid Robot with Scara Motion for High-Speed Operations in Large Workspace[J]. Mechanism and Machine Theory, 2024, 198: 105656.
- [5] LI J Q, DING H S, DUAN B L, et al. Dynamic Analysis and Structural Optimization of a Novel Palletizing Robot[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 19(3): 274-278.
- [6] ZHANG L P, DAI J S. An Overview of the Development on Reconfiguration of Metamorphic Mechanisms[C]//2009 ASME/IFToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots. London, UK. IEEE, 2009: 8-12.
- [7] DAI J S, JONES J R. Matrix Representation of Topological Changes in Metamorphic Mechanisms[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 127(4): 837-840.
- [8] 张磊, 李瑞琴, 宁峰平, 等. 双模式可重构并联机构的构型及其在酒盒产线中的应用[J]. 包装工程, 2024, 45(1): 201-207.
ZHANG L, LI R Q, NING F P, et al. Configuration of Dual-Mode Reconfigurable Parallel Mechanism and Its Application in Wine Box Production Line[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(1): 201-207.
- [9] 徐帅, 尤晶晶, 叶鹏达, 等. 一种可重构 3-RRR 平面并联机构及其工作空间分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(3): 466-472.
XU S, YOU J J, YE P D, et al. A Reconfiguration 3-RRR Planar Parallel Mechanism and Its Workspace Analysis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 54(3): 466-472.
- [10] 许海罡. 可调柔性操作臂的机构设计及力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
XU H G. Research on Mechanism Design and Mechan-

- ical Characteristics of Adjustable Flexible Manipulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [11] CHEN H Q, ZHOU N Q, WANG R G. Design and Dimensional Optimization of a Controllable Metamorphic Palletizing Robot[J]. IEEE Access, 2020, 8: 123061-123074.
- [12] 王汝贵, 陈辉庆, 戴建生. 新型可控变胞式码垛机器人机构动态稳定性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 39-47.
- WANG R G, CHEN H Q, DAI J S. Dynamic Stability Study of a Novel Controllable Metamorphic Palletizing Robot Mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 39-47.
- [13] 陈辉庆. 面向码垛应用的变胞机构设计与尺度分析[J]. 机械传动, 2022, 46(4): 148-153.
- CHEN H Q. Design and Dimensional Analysis of a Metamorphic Mechanism for Palletizing Application[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(4): 148-153.
- [14] DING H F, HUANG Z. A New Theory for the Topological Structure Analysis of Kinematic Chains and Its Applications[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(10): 1264-1279.
- [15] PAN W X, LI R Q. The Equivalent Mechanical Model of Topological Graphs and the Isomorphism Identification of Kinematic Chains[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2024, 16(7): 071014.
- [16] 王英, 李瑞琴, 张艳岗, 等. 多自由度运动链驱动件的自动识别[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 31-37.
- WANG Y, LI R Q, ZHANG Y G, et al. Identification of the Drivers of Multi-DOF Kinematic Chains[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 31-37.