

双模式可重构并联机构的构型及其在酒盒产线中的应用

张磊¹, 李瑞琴^{1*}, 宁峰平¹, 柴超¹, 崔鑫佳¹, 郭文孝^{1,2}

(1. 中北大学 机械工程学院, 太原 030051;

2. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司, 太原 030006)

摘要: **目的** 为实现酒盒生产线上酒盒胶线点胶和酒盒底座清废环节的自动化, 提出一种双模式可重构并联机构。**方法** 基于螺旋理论分析该机构在 2 种模式下的自由度, 利用闭环矢量法和 D-H 法求得对应模式下的位置逆解, 采用数值法求解机构工作空间、灵巧度和转动能力指标, 给出该机构的应用实例。**结果** 该机构在 2-URU/RRC 模式下具有 3T 自由度, 2-URU/URC 模式下具有 3T1R 自由度, 工作空间连续且无空洞, 获得 2-URU/RRC 模式下灵巧度指标分布规律和 2-URU/URC 模式下动平台转动能力。**结论** 该机构在 2-URU/RRC 模式下可满足胶线点胶作业需求, 在 2-URU/URC 模式下可满足底座清废作业需求, 提高了酒盒生产线自动化程度。

关键词: 可重构并联机构; 点胶; 清废; 灵巧度; 酒盒生产线

中图分类号: TB486; TH112 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)01-0201-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.01.023

Configuration of Dual-mode Reconfigurable Parallel Mechanism and Its Application in Wine Box Production Line

ZHANG Lei¹, LI Ruiqin^{1*}, NING Fengping¹, CHAI Chao¹, CUI Xinxia¹, GUO Wenxiao^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. China Coal Technology & Engineering Group Taiyuan Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a dual-mode reconfigurable parallel mechanism to realize automation of the dispensing of the wine box glue line and the scrap-clearing of the wine box base in the wine box production line. The degrees of freedom of the mechanism in two modes were analyzed based on screw theory. The closed-loop vector method and D-H method were used to obtain the inverse solution of the position in the corresponding mode. The numerical method was used to solve the workspace, dexterity and rotation ability indexes of the mechanism. The application example of the mechanism was given. The mechanism had 3T degrees of freedom in 2-URU/RRC mode and 3T1R degrees of freedom in 2-URU/URC mode. The workspace was continuous and there was no hole. The distribution of dexterity index in 2-URU/RRC mode and the rotation ability of moving platform in 2-URU/URC mode were obtained. The mechanism can meet the needs of dispensing operation under 2-URU/RRC mode, and can meet the needs of base scrap-clearing operation under 2-URU/URC mode, which improves the automation degree of wine box production line.

KEY WORDS: reconfigurable parallel mechanism; dispensing; scrap-clearing; degree of freedom; wine box production line

收稿日期: 2023-04-03

基金项目: 山西省重点研发计划 (202202150401018)

*通信作者

酒包装盒作为酒的配套产品,其市场需求巨大。酒盒点胶是内壁涂胶,要求胶头接近并在酒盒胶线平面移动,需要 3T 运动模式;底座清废为扭转底座盲孔处多余的裱纸,要求先绕垂直于底座平面转动,使其与底座分离,并通过三维移动将其运送至废料箱,需要 3T1R 运动模式。点胶和清废作业重复性大、生产空间小。众所周知,串联机械臂结构简单、工作空间大、定位精度低、稳定性差,主要适用于包装要求低、生产空间充足的场合^[1-2]。并联机构具有精度高、刚度大等优点,适用于生产空间狭小的场合^[3]。

米文博等^[4]提出用于药品装箱和码垛的 2-UPR/RSPR 并联机构,并分析了工作空间。Anvari 等^[5]以拾取 Delta 机器人作为研究对象,研究了灵巧度。彭红梅等^[6]提出一种生产线搬运分拣的 2PRPU 并联机构,对其进行了性能分析和优化设计。叶伟等^[7]提出一种冗余驱动的 3T 并联机构,分析了结构尺寸对灵巧度等性能指标的影响。Huang 等^[8]提出一种具有平行四边形闭环子链的三平移并联机构,对其运动学和工作空间进行了分析。沈惠平等^[9]提出一种 3T1R 的 2-(RPa3R)3R 并联机构,对其工作空间和转动能力等进行了分析。Zhao 等^[10]提出了一种 3T1R 的 4PPa-2PaR 并联机构,并对其可达工作空间进行了优化设计。

可重构并联机构能够进行构型的变换,具有更强的环境适应能力。Carbonari 等^[11]通过交替锁定球副中一个转动,实现不同的 3-CPU 运动配置及可重构。徐帅等^[12]提出了一种可重构 3-RRR 平面并联机构,采用运动副锁合的思想,实现机构在 3-RRR 模式和 3-RPR 模式之间转换。Hu 等^[13]提出了一种可重构并联球副,通过开启和锁定驱动关节,可实现一维定轴转动和一维变轴旋转、二维和三维旋转。Plitea 等^[14]对 Recrob 可重构六自由度并联机器人进行了研究,通过将主动关节转换为被动关节实现重构。Chablat 等^[15]对 3-PRPiR 并联机器人进行了研究,通过锁定移动副和转动副,使机构在 3T 模式和 4 种 2T1R 模式之间切换。Jia 等^[16]提出了一种基于变胞万向节的空间变胞四连杆机构,通过调整万向节的轴线位置,机构可以从 6 个自由度转变为 5、4、3 个自由度。

针对点胶和清废需要不同运动模式的机构,本文提出一种双模式可重构并联机构,通过运动副锁合,实现 3T 和 3T1R 这 2 种运动模式。机构在 2-URU/RRC 模式下具有 3T 的自由度,可应用于酒盒胶线点胶环节;在 2-URU/URC 模式下具有 3T1R 的自由度,可应用于酒盒底座清废环节。

1 可重构并联机构构型及自由度分析

1.1 可重构并联机构及可重构运动副的构型分析

可重构并联机构由静平台、动平台、2 条 URU

支链(分别为 URU-I 支链和 URU-II 支链)和可重构支链组成的并联机构。可重构支链由可重构运动副、R 副和 C 副组成,R 副轴线和 C 副轴线相互平行。静平台和动平台为正四边形,静平台上运动副位于所在边中点处,URU 支链与动平台相连的运动副位于所在边中点处,该机构三维模型如图 1 所示。

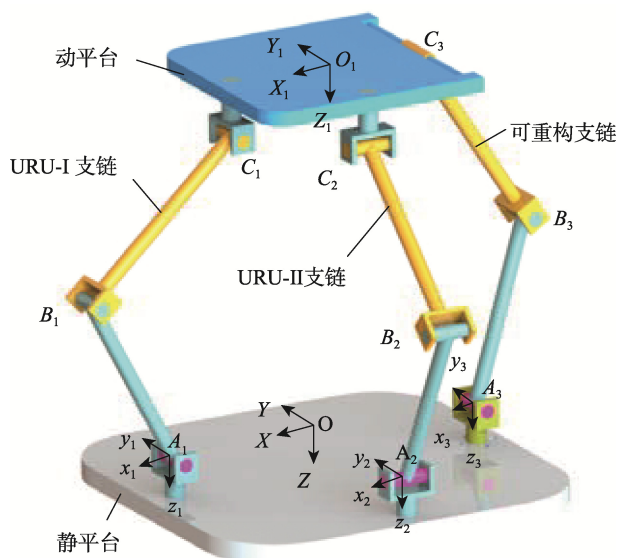


图 1 可重构并联机构

Fig.1 Reconfigurable parallel mechanism

可重构运动副由转轴 I、转轴 II 和锁紧件组成,转轴 I 轴线平行于 C 副轴线,转轴 II 轴线垂直于静平台。可重构运动副有 2 种运动副模式:当锁紧件锁紧转轴 II 时,其为 R 副模式,由转轴 I 组成;当锁紧件未锁紧转轴 II 时,其为 U 副模式,由转轴 I 和转轴 II 组成,如图 2 所示。可重构支链在 RRC 支链和 URC 支链之间转换,使并联机构具有 3T 和 3T1R 自由度。

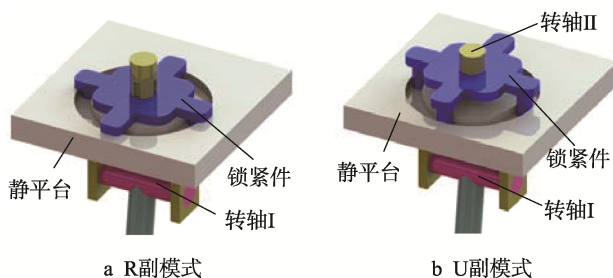


图 2 可重构运动副的 2 种模式

Fig.2 Two modes of the reconfigurable kinematic pair

1.2 可重构并联机构自由度分析

在可重构并联机构上建立坐标系,静平台边长为 $2R$,动平台边长为 $2r$ 。以静平台几何中心 O 为原点,建立静坐标系 $O-XYZ$, Z 轴垂直静平台向下, X 轴平

行于 A_1A_3 并指向 A_1 , Y 轴由右手螺旋定则确定; 以动平台几何中心 O_1 为原点, 建立动坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$, Z_1 轴垂直于动平台平面向下, X_1 轴与 C 副轴线垂直并指向 C_1 , Y_1 轴由右手螺旋定则确定。以 A_i ($i=1, 2, 3$) 为原点, 建立支链坐标系, 如图 1 所示。

URU-I 支链的螺旋系为:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{11} &= (0 \ 0 \ 1 \ ; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{12} &= (0 \ 1 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{13} &= (0 \ 1 \ 0 \ ; \ d_{11} \ 0 \ f_{11}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathcal{S}_{14} = (0 \ 1 \ 0 \ ; \ d_{21} \ 0 \ f_{21})$$

$$\mathcal{S}_{15} = (0 \ 0 \ 1 \ ; \ d_{31} \ f_{31} \ 0)$$

对式 (1) 求反螺旋, 可得出:

$$\mathcal{S}_{11}^r = (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 1 \ 0 \ 0) \quad (2)$$

同理可得, URU-II 支链的反螺旋为沿其支链坐标系 y_2 轴方向的约束力偶。

可重构支链的自由度分为 2 种情况讨论。

当可重构运动副处于 R 副模式时, RRC 支链的运动螺旋为:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{31} &= (0 \ 1 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{32} &= (0 \ 1 \ 0 \ ; \ d_{13} \ 0 \ f_{13}) \\ \mathcal{S}_{33} &= (0 \ 1 \ 0 \ ; \ d_{23} \ 0 \ f_{23}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mathcal{S}_{34} = (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 1 \ 0)$$

对式 (3) 求反螺旋, 可得出:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{31}^r &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}_{32}^r &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 1 \ 0 \ 0) \end{aligned} \quad (4)$$

联合式 (2) 和式 (4), 可得到 2-URU/RRC 模式下的运动螺旋系为:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_1 &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 1 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_2 &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 1 \ 0) \\ \mathcal{S}_3 &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 1) \end{aligned} \quad (5)$$

当可重构运动副处于 U 副模式时, URC 支链的运动螺旋为:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{31} &= (0 \ 0 \ 1 \ ; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{32} &= (0 \ 1 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{33} &= (0 \ 1 \ 0 \ ; \ d_{13} \ 0 \ f_{13}) \\ \mathcal{S}_{34} &= (0 \ 1 \ 0 \ ; \ d_{23} \ 0 \ f_{23}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\mathcal{S}_{35} = (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 1 \ 0)$$

对式 (7) 求反螺旋, 可得出:

$$\mathcal{S}_{31}^r = (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 1 \ 0 \ 0) \quad (7)$$

联合式 (2) 和式 (7), 可得到 2-URU/URC 模式下的运动螺旋系为:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_1 &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 1 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_2 &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 1 \ 0) \\ \mathcal{S}_3 &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}_4 &= (0 \ 0 \ 1 \ ; \ 0 \ 0 \ 0) \end{aligned} \quad (8)$$

综上可知, 当可重构运动副处于 R 副模式时, 机构具有沿 X 、 Y 、 Z 方向的移动; 当可重构运动副处于 U 副模式时, 机构具有沿 X 、 Y 、 Z 方向的移动和绕 Z 轴的转动。

由上述分析可知, 在 2-URU/RRC 时, 机构处于 3T 运动模式, 满足点胶需求; 在 2-URU/URC 时, 机构处于 3T1R 运动模式, 满足底座清废需求。

2 可重构并联机构运动学逆解分析

采用封闭矢量法对 URU 支链进行分析, 采用 D-H 法对可重构支链进行分析。

2.1 URU 支链的运动学逆解

动平台中心在静坐标系 $O-XYZ$ 下的位置矢量为 $\mathbf{OO}_1 = [x \ y \ z]^T$ 。 $\mathbf{l}_i$ ($i=1, 2$) 对应 URU 支链中与静平台相连的连杆 A_iB_i ($i=1, 2$) 对应的矢量, 长度为 m ; $\mathbf{l}_{2i}$ ($i=1, 2$) 分别对应 URU 支链中与动平台相连的连杆 B_iC_i ($i=1, 2$) 对应的矢量, 长度为 n ; ${}^0\mathbf{A}_i$ ($i=1, 2$) 为静平台相连接 U 副 A_i ($i=1, 2$) 在静坐标系 $O-XYZ$ 中的位置矢量, ${}^0\mathbf{C}_i$ ($i=1, 2$) 为与动平台相连接 U 副 C_i ($i=1, 2$) 在动坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 中的位置矢量, 则:

$${}^0\mathbf{A}_1 = [R \ 0 \ 0]^T \quad {}^0\mathbf{A}_2 = [0 \ -R \ 0]^T \quad (9)$$

$${}^0\mathbf{C}_1 = [r \ 0 \ 0]^T \quad {}^0\mathbf{C}_2 = [0 \ -r \ 0]^T$$

动坐标系相对于静坐标系的姿态变换矩阵 $\mathbf{T}$ 为:

$$\mathbf{T} = \text{Rot}(Z, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: γ 为动平台绕 Z 轴的转动角度。

当可重构运动副处于 R 副模式时, 机构自由度为 3T, 因此 $\gamma=0$ 。

动平台相连接的 U 副 C_i ($i=1, 2$) 在动坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 中的位置矢量转换到静坐标系 $O-XYZ$ 中, 其表达式为:

$${}^0\mathbf{C}_i = \mathbf{T} {}^0\mathbf{C}_i + \mathbf{OO}_1 \quad (i=1, 2) \quad (11)$$

当可重构运动副处于 R 副模式时, 位置矢量 ${}^0\mathbf{C}_i$ ($i=1, 2$) 在静坐标系中的坐标为 ${}^0\mathbf{C}_1 = (x+r, y, z)$ 、 ${}^0\mathbf{C}_2 = (x, y-r, z)$; 当可重构运动副处于 U 副模式时, 位置矢量 ${}^0\mathbf{C}_i$ ($i=1, 2$) 在静坐标系中的坐标为 ${}^0\mathbf{C}_1 = (x+rc\gamma, y+rs\gamma, z)$ 、 ${}^0\mathbf{C}_2 = (x+rs\gamma, y-rc\gamma, z)$ 。

所以, 位置矢量 $\mathbf{A}_iC_i$ ($i=1, 2$) 可以表示为:

$$\mathbf{A}_iC_i = {}^0\mathbf{C}_i - {}^0\mathbf{A}_i \quad (12)$$

$|\mathbf{A}_1B_1|=m$ 、 $|\mathbf{B}_1C_1|=n$ 、 $|\mathbf{A}_2C_2|=l_i$ ($i=1, 2$), 由余弦定理可得 URU 支链位置反解, 即 θ_i ($i=1, 2$):

$$\theta_i = \arccos \frac{m^2 + l_i^2 - n^2}{2ml_i} \text{ 或} \quad (13)$$

$$\theta_i = 2\pi - \arccos \frac{m^2 + l_i^2 - n^2}{2ml_i}$$

2.2 可重构支链的运动学逆解

采用 D-H 法建立 2 种模式下支链的坐标系, 见图 3 和图 4, 相应的 D-H 参数见表 1 和表 2。参数 R 、 r 、 l_{31} 、 l_{32} 为已知量, 参数 θ_{31} 、 θ_{32} 、 θ_{33} 、 θ_{34} 、 θ_{35} 、 d_3 、 d_4 为未知量。

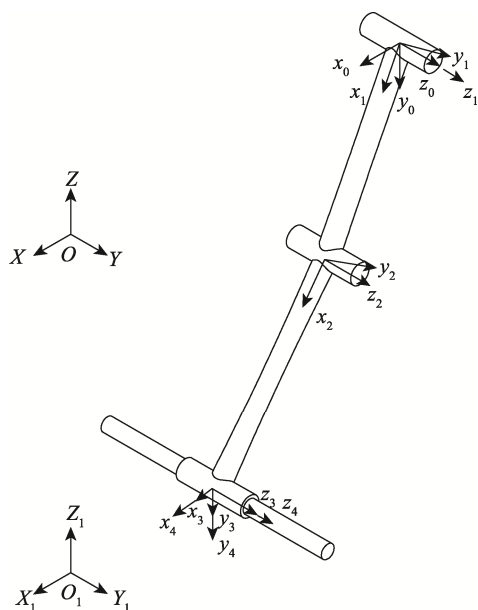


图 3 RRC 支链的 D-H 坐标系
Fig.3 D-H coordinate system of RRC limb

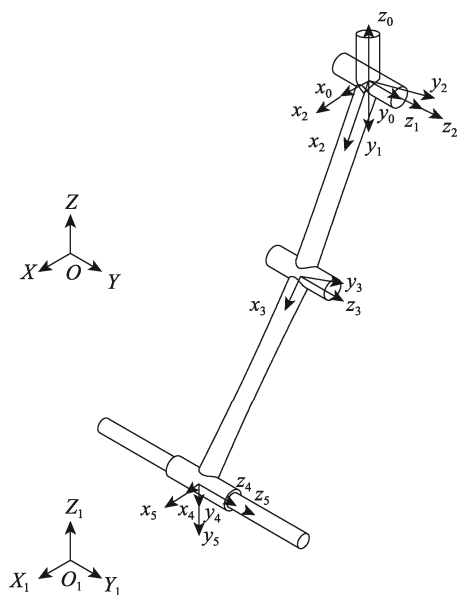


图 4 URC 支链的 D-H 坐标系
Fig.4 D-H coordinate system of URC limb

表 1 RRC 支链的 D-H 参数
Tab.1 D-H parameter of RRC limb

i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	a_{i-1}/mm	$\theta_i/(^{\circ})$	d_i/mm
0	-90	R	0	0
1	0	0	θ_{31}	0
2	0	l_{31}	θ_{32}	0
3	0	l_{32}	0	d_3
4	0	0	θ_{34}	0
O_1	90	r	0	0

表 2 URC 支链的 D-H 参数
Tab.2 D-H parameter of URC limb

i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	a_{i-1}/mm	$\theta_i/(^{\circ})$	d_i/mm
0	0	R	0	0
1	0	0	θ_{31}	0
2	-90	0	θ_{32}	0
3	0	l_{31}	θ_{33}	0
4	0	l_{32}	0	d_4
5	0	0	θ_{35}	0
O_1	90	r	0	0

根据表 1 和表 2 中数据可求得 2 种模式下, 动平台到静平台的变换矩阵为:

$${}^{O_1}T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_{O_1} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^{O_1}T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_{O_1} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \quad (15)$$

机构的欧拉角位姿矩阵 T 可写成:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & x \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

当可重构运动副处于 R 副模式时, $\gamma=0$ 。

坐标变换矩阵与欧拉角位姿矩阵对应位置的元素相等, 经过化简计算, 可求得该可重构支链的位置逆解:

当可重构运动副处于 R 副模式时, 有:

$$\begin{cases} \theta_{31} = \arctan \left\{ \frac{-(l_{31} + l_{32} \cos \theta_{32})z + l_{32} \sin \theta_{32}(x - R + r)}{(l_{31} + l_{32} \cos \theta_{32})(x - R + r) - l_{32} \sin \theta_{32}z} \right\} \\ \theta_{32} = \arccos \left[\frac{(x - R + r)^2 + z^2 - l_{31}^2 - l_{32}^2}{2l_{31}l_{32}} \right] \end{cases} \quad (17)$$

当可重构运动副处于 U 副模式时, 有:

$$\begin{cases} \theta_{31} = \gamma \\ \theta_{32} = \arctan \left\{ \frac{-[l_{32} \sin \theta_{33} S + \cos \theta_{31} z (l_{31} + l_{32} \cos \theta_{33})]}{(l_{31} + l_{32} \cos \theta_{33}) S - l_{32} \sin \theta_{33} \cos \theta_{31} z} \right\} \\ \theta_{33} = \arccos \left[\frac{S^2 - \cos^2 \gamma (l_{31}^2 + l_{32}^2 - z^2)}{2 l_{31} l_{32} \cos \gamma^2} \right] \\ d_4 = \frac{(y + r \sin \theta_{31})}{\sin \theta_{31}} - \frac{(x - R + r \cos \theta_{31})}{\cos \theta_{31}} \end{cases} \quad (18)$$

其中:

$$S = x - R + d_4 \sin \theta_{31} + r \cos \theta_{31} \quad (19)$$

3 工作空间分析

工作空间大小和形状关系到机构能否达到预期目标。并联机构初始参数: $R=800$ mm、 $r=200$ mm、支链 $l_1=700$ mm、 $l_2=800$ mm。URU 支链驱动设置为与静平台相连 U 副中与 R 副轴线平行的转动, 可重构支链驱动副设置为与静平台相连的可重构运动副, 角度变化设置范围为 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 。根据并联机构初始参数和位置逆解, 求出机构工作空间, 见图 5。

酒盒内壁尺寸为 280 mm $\times$ 130 mm $\times$ 113 mm, 清废酒盒尺寸为 120 mm $\times$ 120 mm $\times$ 80 mm。2-URU/RRC 模式下工作空间 X 方向的取值在 $[-300, 300]$ 区间内, Y 方向的取值在 $[-150, 150]$ 区间内。2-URU/URC 模式下工作空间 X 方向的取值在 $[-500, 220]$ 区间内, Y 方向的取值在 $[-150, 150]$ 区间内, 如图 5 所示。2 种模

式下并联机构工作空间均连续, 无空洞, 包含酒盒胶线点胶和酒盒底座清废所需的工作空间, 可以满足胶线点胶和底座清废的作业要求。

4 可重构机构的性能分析

4.1 2-URU/RRC 模式下的灵巧度分析

采用局部条件数作为灵巧度的评价指标, 其定义如下:

$$L_{CI} = \frac{1}{k(J)} \quad (20)$$

式中: $k(J)$ 为雅克比矩阵 J 的条件数, $k(J)=\|J \cdot J^{-1}\|$ 。 L_{CI} 的取值范围为 $0 \leq L_{CI} \leq 1$ 。 L_{CI} 越大, 说明其运动学性能越好。

从图 6 可以看出, 在 $Z=600$ mm 时, $X=0$ mm, $Y=150$ mm 时, 机构的灵巧度最大。酒盒放置在传送带中心处, 动平台与酒盒一侧平齐, 机构向 Y 轴正向运动。

4.2 2-URU/URC 模式下的转动能力分析

根据生产线环境分析可知, 选取 $Z=600$ mm, 分析操作空间内的并联机构的转动能力。经过生产实验, 扭撕废料所需的角度为 15° 时, 即可将废料与酒盒底座分离, 并联机构在操作空间内转动角度为 $[18^\circ, 72^\circ]$, 包含扭撕废料所需的转动角度, 如图 7 所示。因此操作空间内的并联机构的转动能力满足扭撕废料的需求。

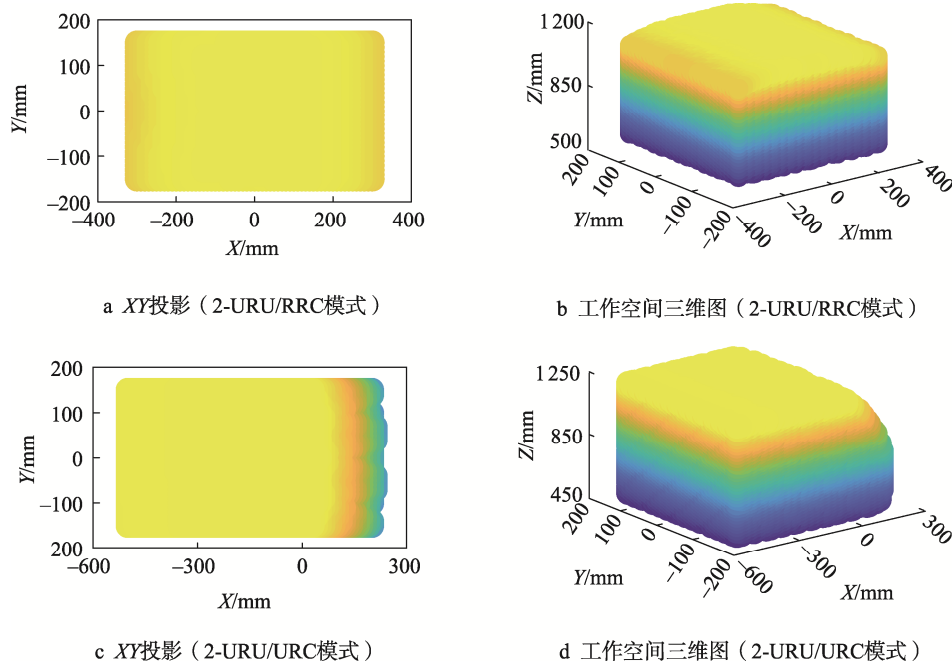


图 5 2 种模式下的工作空间

Fig.5 Workspace in two modes

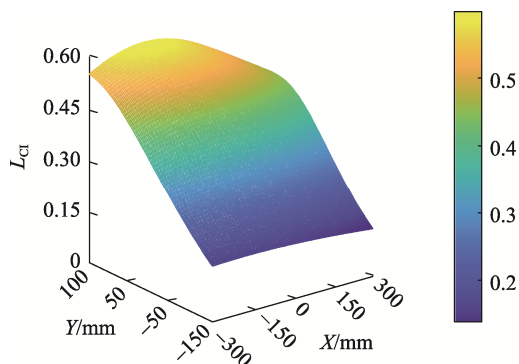


图6 $Z=600$ mm 平面局部灵巧度指标分布
Fig.6 Local degree of freedom index distribution of $Z=600$ mm plane

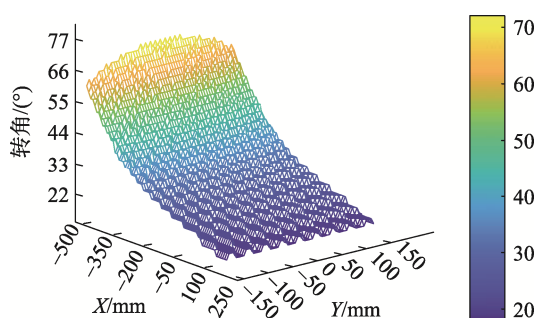
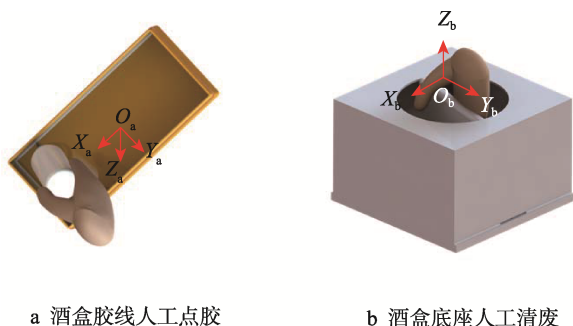


图7 $Z=600$ mm 时平面转动能力指标分布
Fig.7 Rotation ability index distribution of $Z=600$ mm plane

5 应用实例

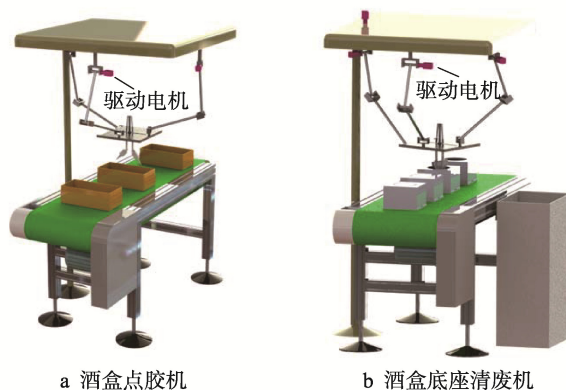
酒盒胶线点胶时,胶头沿 Z_a 轴移动至点胶平面,沿 X_a 轴和 Y_a 轴移动完成点胶,人工需要时间为 6~10 s,如图 8a 所示。酒盒底座清废时,先将废料绕 Z_b 轴转动,使其脱离,再沿 X_b 、 Y_b 、 Z_b 轴的三维移动完成清废,人工需要时间为 15~20 s,如图 8b 所示。在食品、医药、电子等包装工程领域,并联机构运行速度、工作效率等远高于人工^[17]。文中双模式可重构并联机构,可通过变化运动模式完成点胶和清废,一机多用,效率高于多机协同作业。



a 酒盒胶线人工点胶

b 酒盒底座人工清废

图8 酒盒生产线中的人工动作
Fig.8 Artificial action in wine box production line



a 酒盒点胶机

b 酒盒底座清废机

图9 双模式可重构并联机构在酒盒生产线中的应用

Fig.9 Application of dual-mode reconfigurable parallel mechanism in wine box production line

在 2-URU/RRC 模式下,机构通过控制 3 个驱动电机实现动平台的三维移动,完成点胶作业,如图 9a 所示。根据上述的工作空间和灵巧度性能分析,当机构进行点胶时,可将酒盒横向放置在机构动平台的正前方,酒盒一侧长边胶线与一个胶头对齐。

当机构为 2-URU/URC 模式时,机构通过控制 4 个驱动电机实现动平台的三维移动和绕 Z 轴的转动,完成清废作业,如图 9b 所示。根据上述的工作空间和转动能力性能分析,当机构进行酒盒底座清废时,可将酒盒放置在机构动平台的正下方。

6 结语

串联机械臂重复精度低,生产空间大,不适用于重复作业、生产空间狭小的酒盒点胶和底座清废场景。本文提出一种可应用于酒盒生产线的双模式可重构并联机构,该机构通过运动副锁合来实现 2-URU/RRC 和 2-URU/URC 间切换。应用螺旋理论求解得出 2 种运动模式下机构分别具有 3T 和 3T1R 自由度,通过运动学分析各模式下工作空间,内部连续无空洞,可以满足工作要求。分析 2-URU/RRC 模式下机构灵巧度和 2-URU/URC 模式下动平台转动能力,得出 2-URU/RRC 模式时,胶头向 Y 轴正方向运动;2-URU/URC 模式时,转动能力可以满足清废需求。结合应用实例,得出该机构在 2-URU/RRC 模式下可完成自动点胶,在 2-URU/URC 模式下可完成底座自动清废,具有一机多用的效果,节约了经济成本,提高了酒盒生产线的自动化程度。

参考文献:

- [1] 田勇,李俊霞.基于模糊神经网络的包装机械臂定位方法研究[J].包装工程,2022,43(9):171-175.

- TIAN Y, LI J X. Positioning Method of Packaging Mechanical Arm Based on Fuzzy Neural Network[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(9): 171-175.
- [2] 陈艳芳. 包装机械手轨迹规划和控制系统设计[J]. *包装工程*, 2020, 41(23): 236-241.
- CHEN Y F. Packaging Manipulator Trajectory Planning and Control System Design[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(23): 236-241.
- [3] 付瑞玲, 禹春来, 范甜甜. 基于并联机器人的包装分拣系统设计[J]. *包装工程*, 2018, 39(11): 204-208.
- FU R L, YU C L, FAN T T. Design of Packaging and Sorting System Based on Parallel Robot[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(11): 204-208.
- [4] 米文博, 马春生, 李瑞琴, 等. 应用于药品包装生产线的2-UPR/RSPR并联机构的工作空间分析[J]. *包装工程*, 2021, 42(3): 171-176.
- MI W B, MA C S, LI R Q, et al. Workspace of 2-UPR/RSPR Parallel Mechanism Applied to Medicine Packaging Production Line[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(3): 171-176.
- [5] ANVARI Z, ATAIE P, TALE MASOULEH M. Collision-Free Workspace and Kinetostatic Performances of a 4-DOF Delta Parallel Robot[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41(2): 1-7.
- [6] 彭红梅, 陈亚, 陆彩满, 等. 新型四自由度3T1R并联机器人机构运动学分析与优化设计[J]. *包装工程*, 2022, 43(5): 188-195.
- PENG H M, CHEN Y, LU C M, et al. Kinematics Analysis and Optimization Design of a New Four Degree of Freedom 3T1R Parallel Robot Mechanism[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(5): 188-195.
- [7] 叶伟, 胡利焕, 夏董新, 等. 冗余驱动的三平动并联机构性能分析与优化[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(11): 421-430.
- YE W, HU L H, XIA D X, et al. Performance Analysis and Optimization of Redundantly Actuated Three Translational Parallel Mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(11): 421-430.
- [8] HUANG Y D, LU Q G, WANG H Z, et al. Kinematics Analysis and Simulation of a Novel 3T Parallel Mechanism[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 3424012: 1-12.
- [9] 沈惠平, 许可, 杨廷力, 等. 一种零耦合度且运动解耦的新型3T1R并联操作手2-(RPa3R)3R的设计及其运动学[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(5): 53-64.
- SHEN H P, XU K, YANG T L, et al. New 3T1R Parallel Manipulator 2-(RPa3R)3R with Zero Coupling Degree and Partial Decoupling: Design and Kinematics[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(5): 53-64.
- [10] ZHAO J, WU C C, YANG G L, et al. Kinematics Analysis and Workspace Optimization for a 4-DOF 3T1R Parallel Manipulator[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 167: 1-15.
- [11] CARBONARI L, CALLEGARI M, PALMIERI G, et al. A New Class of Reconfigurable Parallel Kinematic Machines[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 79: 173-183.
- [12] 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 & Astronautics*, 2022, 54(3): 466-472.
- [13] HU X Y, LIU H Z. Design and Analysis of Full-Configuration Decoupled Actuating Reconfigurable Parallel Spherical Joint[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(2): 933-945.
- [14] PLITEA N, LESE D, PISLA D, et al. Structural Design and Kinematics of a New Parallel Reconfigurable Robot[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(1): 219-235.
- [15] CHABLAT D, KONG Xian-wen, ZHANG Cheng-wei. Kinematics, Workspace, and Singularity Analysis of a Parallel Robot With Five Operation Modes[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2018, 10(3): 1-17.
- [16] JIA P, LI D L, ZHANG Y K, et al. A Novel Reconfigurable Parallel Mechanism Constructed with Spatial Metamorphic Four-link Mechanism[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(8): 4120-4132.
- [17] 田涛. 一种高速拾取并联机器人的设计与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 1-7.
- TIAN T. Design and Implementation of a High-Speed Pick and Place Parallel Robot[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013: 1-7.