

自动化与智能化技术

基于3P(4S)机构的易损线辊包装线设计与分析

刘毅, 韩伟达, 耿旭森, 赵永生, 丰宗强, 刘晓飞

(燕山大学 河北省并联机器人与机电系统实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: **目的** 防止大质量的线辊表面的金刚线在包装工作中受到碰撞、挤压, 同时解决包装工艺流程复杂、空间布局不合理及人工效率低等问题。**方法** 基于三平动并联机构设计易损类线辊包装生产线, 首先分析系统的整体结构功能, 采用模块设计法分别对包装线的关键模块进行结构设计。针对3P(4S)并联机器人利用矢量法进行位置正反解分析, 使用数值法对其工作空间进行求解, 利用拉格朗日法分析并联机器人的动力学, 并在Adams与Matlab软件中验证分析结果。最后, 基于MCD与Simulink软件对包含有并联机器人模块的易损类线辊包装生产线进行联合仿真。**结果** 在NX MCD与Simulink联合仿真中, 各部分运动连续且并联机械手模块运动稳定并到达所需位置。整个易损类线辊包装生产线可完整连续工作, 实现了易损类线辊包装生产线的自动化包装, 包装的生产效率由2 min提高到46 s。**结论** 基于3P(4S)机构的易损类线辊包装线能很好地解决表面易损类线辊包装线自动化问题, 可应用于稳定性要求高、大负载、包装工艺复杂的线辊类产品包装生产线中。

关键词: 表面易损类线辊; 包装线自动化; 并联机械手; 联合仿真

中图分类号: TB486; TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)11-0204-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.11.023

Design and Analysis of Vulnerable Wire Roller Packaging Line Based on 3P(4S) Mechanism

LIU Yi, HAN Wei-da, GENG Xu-sen, ZHAO Yong-sheng, FENG Zong-qiang, LIU Xiao-fei

(Laboratory of Parallel Robotics and Mechatronic Systems in Hebei Province, Yanshan University, Hebei Qinhuangdao 066004, China)

ABSTRACT: The work aims to prevent the diamond wire on the surface of heavy wire roller from being collided and squeezed in packaging, and solve the problems of complex packaging process, unreasonable space layout and low labor efficiency. Based on the three translation parallel mechanism, the vulnerable wire roller packaging production line was designed. First, the overall structure and function of the system were analyzed, and the key modules of the packaging line were designed by module design method. For 3P (4S) parallel robot, vector method was used to analyze the positive and negative position solutions, numerical method was used to solve its workspace, Lagrangian method was used to analyze the dynamics of the parallel robot, and the analysis results were verified in Adams and Matlab software. Finally, based on MCD and Simulink software, the vulnerable wire roller packaging production line including parallel robot module was jointly simulated. In joint simulation of NX MCD and Simulink, the motion of each part was continuous and the motion of

收稿日期: 2022-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2037202, 52105036)

作者简介: 刘毅 (1991—), 男, 博士生, 主要研究方向机构理论与机器人技术。

通信作者: 丰宗强 (1990—) 男, 硕士, 助理实验师, 主要研究方向并联机构, 机电系统集成技术。

the parallel manipulator module was stable and reached the desired position. The vulnerable wire roller packaging production line can work continuously, realizing the automatic packaging of the vulnerable wire roller packaging production line, and the production efficiency of packaging was improved from 2 min to 46 s. The vulnerable wire roller packaging line based on 3P (4S) mechanism can well solve the automation problem of the surface vulnerable wire roller packaging line, and can be applied to the wire roller packaging production line with high stability requirements, heavy load and complex packaging process.

KEY WORDS: surface vulnerable roller; packaging line automation; parallel manipulator; joint simulation

机器人技术引进包装生产中, 提高了自动化水平。并联机器人结构刚度大、模块化程度高、控制相对容易, 在自动化包装领域中得到成功应用^[1]。ABB 公司生产了以 IRB340 为代表的 Delta 并联机器人^[2]。FANUC^[3]推出了分别针对小轻型零件、中轻型零件以及大重型零件搬运问题的不同系列 Delta 并联机器人; Adept 公司先后推出了具有 H4 结构的 Delta 并联机器人^[4]。CODIAN 推出了针对大型码垛的二轴 Delta 机器人, 用于食品生产线的四轴 Delta 机器人^[5]。董旭等^[6]提出了一种三自由度并联包装机构。樊文龙等^[7]提出一种 2-RPU/2-SPU 并联机构用于物流快递分拣。孔一啸等^[8]提出一种基于 2-CPR/UPS 并联机构的三平移移印机。马振东等^[9]提出一种基于 2-RPS/UPRS 并联机构的自动分拣机。米文博等^[10]将 2-UPR/RSPR 并联机构应用于药品包装生产线。上述应用于包装产线的并联机构自由度少, 承载能力弱, 不适合于多姿态、大范围、高负载的工件分拣与包装。

易损类线辊包装生产线系统属于包装机械领域的机电一体化设备, 具有执行机构多, 工艺路线复杂且连续性要求高, 以及系统安全稳定性要求高等特性。本文基于三平动并联机器人设计能实现线辊自动化

的包装生产线, 分析 3P(4S)并联机构位置正反解、工作空间及动力学, 通过对整体结构联合仿真来验证设计的可行性。

1 易损类线辊包装线设计

1.1 包装线设计

本文研究对象为易损类线辊包装生产线, 包含机械运动方案设计和空间布局设计^[11]。易损类线辊包装线实现线辊的转运、套袋、抽真空、装箱包装。目前, 线辊包装线上下料、套袋、装箱都需要人工操作, 生产效率低, 劳动强度大。为实现线辊包装自动化, 提高生产率, 设计基于三平动并联机构的线辊自动化包装线, 设计分析如图 1 所示。

在易损类线辊包装线工艺流程基础上, 合理布置整条包装线设备。在有限空间内实现包装生产线所需功能以及人机交互布局^[12], 如图 2 所示。易损类线辊包装生产线总体方案包括运料车、并联机械手、末端旋转撑爪、套袋单元、抽真空单元, 通过机械手和其他功能模块配合完成线辊的上料、运料、翻转、套袋、抽真空、下料装箱等流程, 具有精度高、速度快、工作稳定、结构紧凑等优点, 关键参数见表 1。

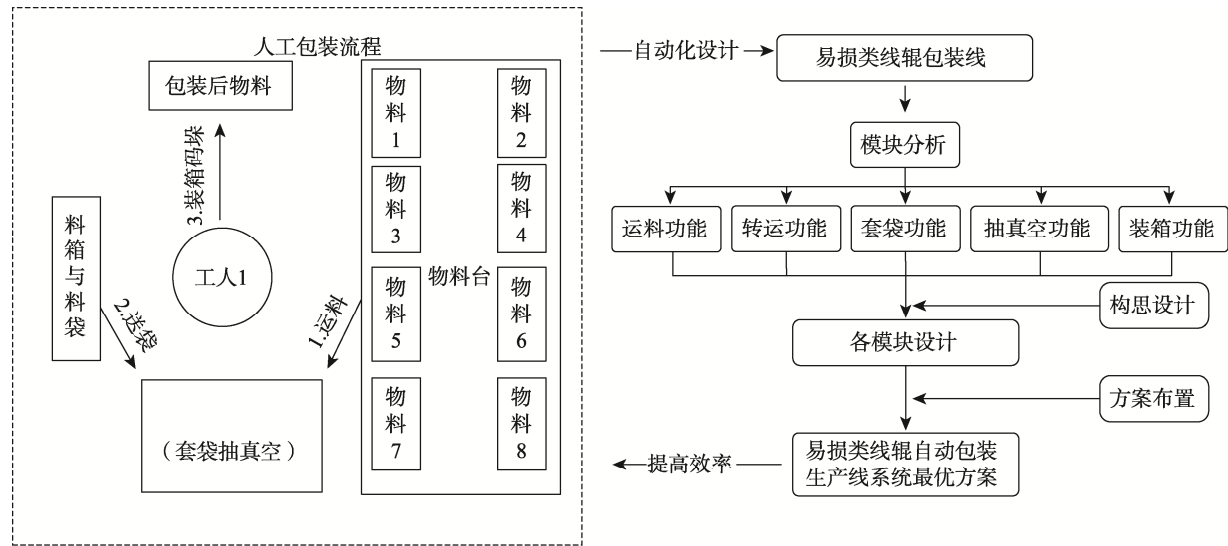


图 1 易损类线辊包装生产线设计分析框图
Fig.1 Analysis block diagram of vulnerable wire roller packaging production line

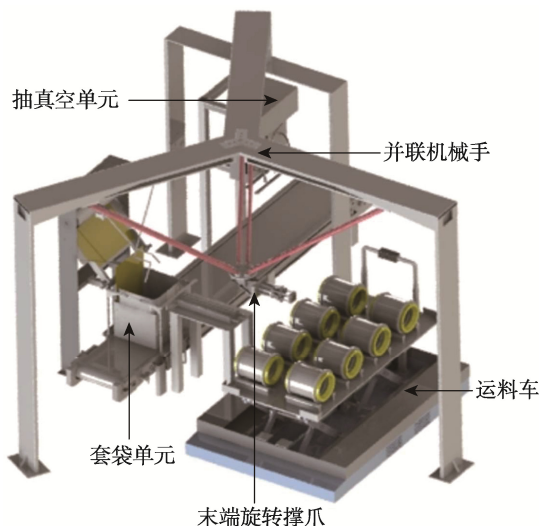


图2 易损类线辊包装线方案布置
Fig.2 Scheme layout of vulnerable wire roller packaging line

表 1 设计参数
Tab.1 Design parameters

名称	技术参数	说明
包装速度/(个·h ⁻¹)	60 ~ 80	针对表面易损辊类线辊
线辊质量/kg	20 ~ 40	形状规则、质量均匀
上料高度/mm	≤350	与上一工序对接
料袋尺寸/mm	D350×600	PE 塑料包装袋
供袋方式	驱动卷袋	挤压折叠袋口
热封形式/°C	150 ~ 200	挤压热封
输送速度/(m·s ⁻¹)	0.2 ~ 0.4	皮带输送机
抽真空速度/(L·min ⁻¹)	150	电机功率 580 W
场地尺寸/mm	6 000×5 000×3 000	长×宽×高

1.2 包装线整体构成及工作流程

1) 运料车结构设计。如图 3 所示, 运料车通过剪叉机构实现升降运动。驱动舵轮与随动万向轮组合, 实现运料车灵活运动。

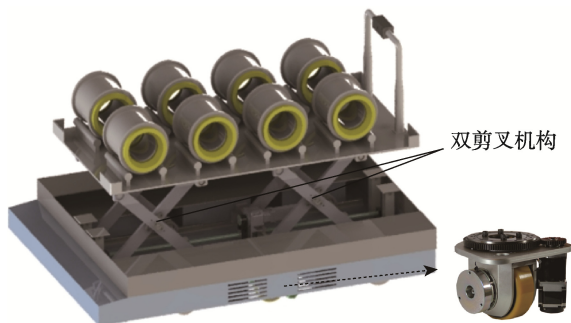


图3 运料车结构
Fig.3 Structure of hopper car

2) 套袋机单元设计。如图 4 所示, 套袋机由供袋单元、撑袋单元和送袋单元组成。供袋单元: 料袋置于套袋机机架上, 通过卷轴驱动换袋。撑袋单元: 包含吸切封刀和旋转拨杆, 切封刀可实现料袋封切, 吸盘可实现料袋撑口, 旋转拨杆可调整袋口形状。送袋单元: 由直线模组和气动手指组成, 实现送料且保证料袋不变形。

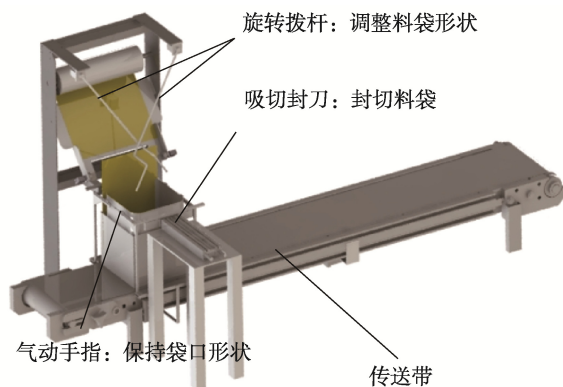


图4 套袋机结构
Fig.4 Structure of bagging machine

3) 抽真空单元设计。如图 5 所示, 电磁夹杆夹持送袋, 将料袋送入抽真空口处, 真空泵抽出料袋内空气, 将料袋封口。

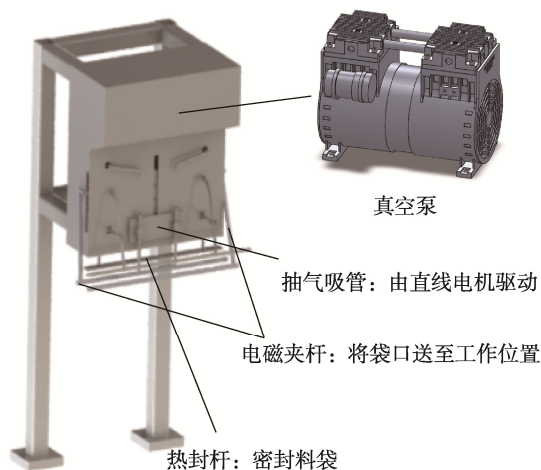


图5 抽真空机
Fig.5 Vacuumizer

4) 并联机械手运料模块设计。将 3P(4S)并联机构在运料模块中应用, 如图 6 所示, 3 组连杆相对动平台中心对称分布, 具有相同的运动链且均含一个闭环平面四边形机构。相较于串联三轴机械手, 并联机械手具有刚度大、承载能力强、精度高、末端惯性小、稳定性好等优点, 保障易损线辊的稳定分拣、转移。

末端旋转撑爪: 在线辊包装过程中需将水平状态

的线辊翻转 90°, 使其竖直放置到套袋工位, 末端旋转撑爪采用 3 组气缸来实现撑爪的 90° 转动。用丝杠滑块结构实现从线辊内部将线辊张开撑紧固定, 保证在转运过程中线辊的稳定, 如图 7 所示。

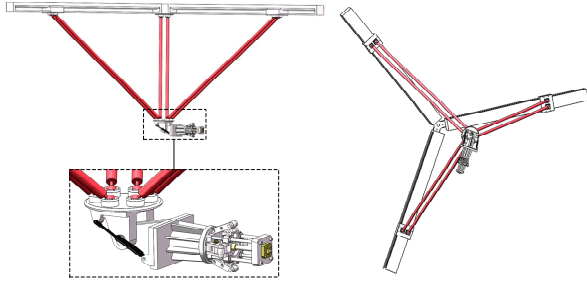


图 6 三平动并联机械手
Fig.6 Three translation parallel manipulator

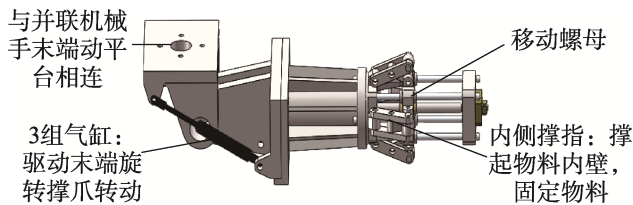


图 7 末端机械手
Fig.7 End manipulator

易损类线辊包装生产线的具体工艺流程: 运料车将线辊运送至包装工位并完成对接; 转运机械手将线辊从运料车上取料, 并通过末端翻转手翻转线辊, 运动到箱口上方; 套袋机提供料袋并撑开料袋口; 机械手将线辊放进料袋, 套袋机调整袋口形状, 2 组移动气缸指将料袋的两角夹紧, 完成套袋; 线辊与料箱随传送带运动至抽真空单元, 2 组移动气缸指在直线模组驱动下与传送带同步运动; 抽真空机开始工作, 抽出料袋内空气; 抽真空机工作同时, 下一

个线辊的包装工作开始运行, 依次循环, 进行线辊的连续包装工作。

2 工作空间分析及求解

2.1 3P(4S)并联机构位置分析

如图 8 所示, 以定平台对称成 120° 分布的 3 个支架外接圆心为坐标原点, x 轴与驱动 1 分支重合, y 轴与驱动分支 1 垂直, z 轴竖直向下, 支链杆长 l 为 1 500 mm, 动平台球铰点到动平台中心距离 r 为 60 mm^[13]。

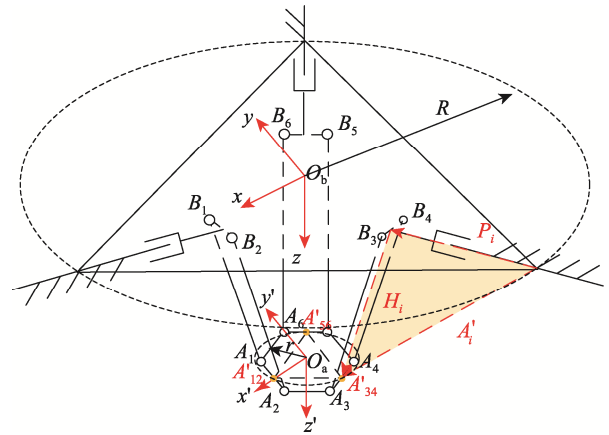


图 8 3P(4S)并联机构简图
Fig.8 A sketch of 3P (4S) parallel mechanism

2.1.1 3P(4S)并联机构位置反解

通过分析该并联机构一个分支即可分析其位置反解。动平台上球铰 A_i 点在固定坐标系中的向量 A' 可通过矢量关系表示出来, 见式 (1)。

$$A'_i = [T]A_i + O_a \quad (1)$$

姿态矩阵见式 (2)。

$$T = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta & x \\ \sin \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \beta & y \\ \sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \beta & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

分支简图中的矢量关系可表示为:

$$A'_i = P_i + H_i \quad (3)$$

是中: P_i 为移动副的位移量; H_i 为杆长向量。

根据位姿坐标变换矩阵可计算该机构中动平台上 3 个点相对于固定坐标系的坐标, 分别为:

$$A'_{12} = \begin{pmatrix} r+x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}, \quad A'_{34} = \begin{pmatrix} x_0 - \frac{1}{2}r \\ y_0 - \frac{\sqrt{3}}{2}r \\ z_0 \end{pmatrix}, \quad A'_{56} = \begin{pmatrix} x_0 - \frac{1}{2}r \\ y_0 + \frac{\sqrt{3}}{2}r \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

将各个坐标关系代入式 (4) 后平方计算, 整理后可得移动副的位移见式 (5)。

$$\begin{cases} P_1 = x_0 + r + \sqrt{h^2 - y_0^2 - z_0^2} \\ P_2 = r + \frac{\sqrt{3}y_0 - x_0 + \sqrt{(x_0 - \sqrt{3}y_0)^2 + 4(h^2 - y_0^2 - z_0^2 - x_0^2)}}{2} \\ P_3 = r + \frac{-\sqrt{3}y_0 - x_0 + \sqrt{(x_0 + \sqrt{3}y_0)^2 + 4(h^2 - y_0^2 - z_0^2 - x_0^2)}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

2.1.2 3P(4S)并联机构位置正解

采用数值法或解析法解决并联机构的正解问题^[14]。

设定平台三角形外接圆半径为 R , 动平台虚线三角形部分外接圆半径为 r , 点 O_a 的坐标为 $O_a = (x, y, z)$, 可求得 3 个移动副中心点坐标为:

$$\begin{aligned} b_{12} &= (R - P_1, 0, 0) \\ b_{34} &= \left(-\frac{R - P_2}{2}, -\frac{\sqrt{3}(R - P_2)}{2}, 0 \right) \\ b_{56} &= \left(-\frac{R - P_3}{2}, \frac{\sqrt{3}(R - P_3)}{2}, 0 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

动平台中虚线三角形各顶点坐标为:

$$\begin{aligned} a_{12} &= (x + r, y, z) \\ a_{34} &= \left(x - \frac{r}{2}, y - \frac{\sqrt{3}r}{2}, z \right) \\ a_{56} &= \left(x - \frac{r}{2}, y + \frac{\sqrt{3}r}{2}, z \right) \end{aligned} \quad (7)$$

4S 支链杆的长度为 l , 可得到一个三元二次方程组, 见式 (8)。

$$\begin{cases} (x + r - R + P_1)^2 + y^2 + z^2 = l^2 \\ \left(x - \frac{r}{2} + \frac{R - P_2}{2} \right)^2 + \left(y - \frac{\sqrt{3}r}{2} + \frac{\sqrt{3}(R - P_2)}{2} \right)^2 + z^2 = l^2 \\ \left(x - \frac{r}{2} + \frac{R - P_3}{2} \right)^2 + \left(y + \frac{\sqrt{3}r}{2} - \frac{\sqrt{3}(R - P_3)}{2} \right)^2 + z^2 = l^2 \end{cases} \quad (8)$$

解此方程组可得到 x, y, z 的值即得位置正解。

2.2 工作空间分析

本文用数值法分析工作空间^[15]。

1) 移动副的运动距离。移动副的运动范围应介

于最大值和最小值之间, 见式 (9)。

$$0 \text{ mm} = P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} = 1440 \text{ mm} \quad (9)$$

2) 球铰的转角约束。 k_1 和 k_2 是球副两端的 2 个向量, 则两连杆间的夹角, 可表示为:

$$\theta = \arccos \frac{k_1 \cdot k_2}{|k_1||k_2|} \quad (10)$$

且转角介于最大值与最小值之间, 见式 (11)。

$$15^\circ = \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} = 60^\circ \quad (11)$$

3P(4S)并联机构定平台和动平台半径分别为 1 722、100 mm, 连杆长度均为 1 500 mm。利用 Matlab 采用边界搜索法绘制工作空间, 如图 9 所示。

每个线辊的位置坐标如表 2 所示。

如图 10 所示, 并联机械手在其工作过程中的极限点的位置都在所描绘的工作空间范围内。

3 并联机械手运料模块动力学分析

3.1 动力学建模

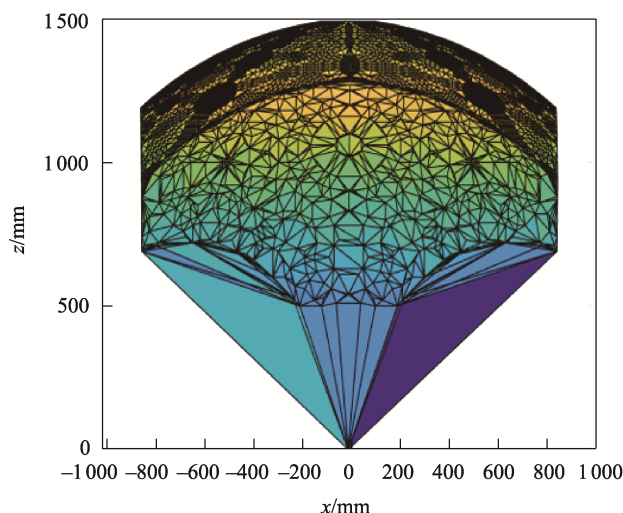
位置反解关系式的两端同时对时间 t 求导可得:

$$\frac{dP}{dt} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial x_0} & \frac{\partial P_1}{\partial y_0} & \frac{\partial P_1}{\partial z_0} \\ \frac{\partial P_2}{\partial x_0} & \frac{\partial P_2}{\partial y_0} & \frac{\partial P_2}{\partial z_0} \\ \frac{\partial P_3}{\partial x_0} & \frac{\partial P_3}{\partial y_0} & \frac{\partial P_3}{\partial z_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \\ \dot{z}_0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

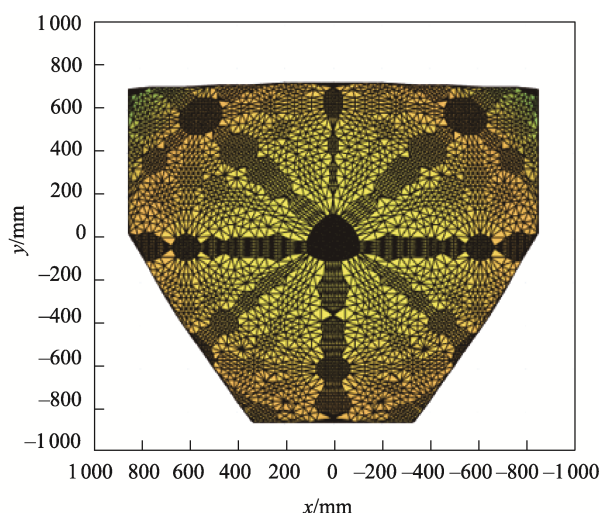
用 v_p 表示输入速度, v 表示输出速度, 则输入速度与输出速度之间的关系可表示为:

$$v_p = G \cdot v \quad (13)$$

通过求导可得到 G :



a xz平面视图



b xy平面视图

图 9 工作空间
Fig.9 Workspace diagram

表 2 workspace关键位置点
Tab.2 Key location points of workspace

动作	位置名称	位置坐标/mm
取第 1 个线辊	第 1 个线辊外边缘圆心	(120, 545, 1 190)
取第 2 个线辊	第 2 个线辊外边缘圆心	(120, 185, 1 190)
取第 3 个线辊	第 3 个线辊外边缘圆心	(120, -185, 1 190)
取第 4 个线辊	第 4 个线辊外边缘圆心	(120, -545, 1 190)
取第 5 个线辊	第 5 个线辊外边缘圆心	(360, 545, 1 190)
取第 6 个线辊	第 6 个线辊外边缘圆心	(360, 185, 1 190)
取第 7 个线辊	第 7 个线辊外边缘圆心	(360, -185, 1 190)
取第 8 个线辊	第 8 个线辊外边缘圆心	(360, -545, 1 190)
运至料箱上方	料箱上方	(-750, 0, 750)
放进料箱	料箱内	(-750, 0, 1 220)

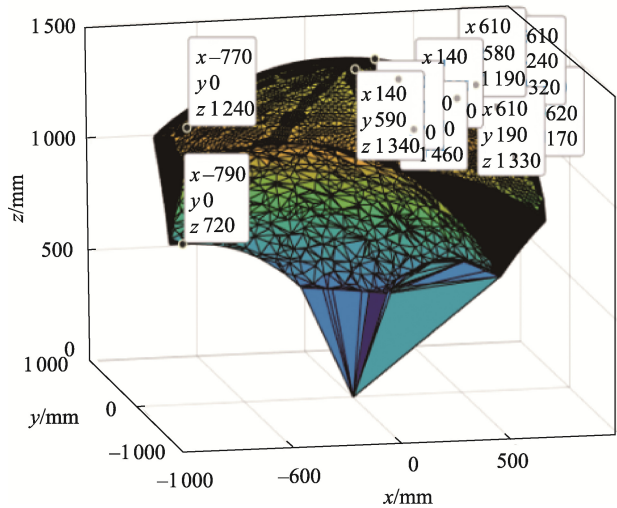


图 10 位置点图
Fig.10 Map of positions

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{y_0}{\sqrt{h^2 - y_0^2 - z_0^2}} & \frac{z_0}{\sqrt{h^2 - y_0^2 - z_0^2}} \\ \frac{1}{2} \frac{6x_0 + 2\sqrt{3}y_0}{4C_1} & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2\sqrt{3}x_0 + 2y_0}{4C_1} & \frac{-2z_0}{C_1} \\ \frac{1}{2} \frac{-6x_0 + 2\sqrt{3}y_0}{4C_1} & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2\sqrt{3}x_0 - 2y_0}{4C_1} & \frac{-2z_0}{C_2} \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中, $C_1 = 4\sqrt{4h^2 - 3x_0^2 - 2\sqrt{3}x_0y_0 - y_0^2 - 4z_0^2}$ 、
 $C_2 = \sqrt{4h^2 - 3x_0^2 + 2\sqrt{3}x_0y_0 - y_0^2 - 4z_0^2}$ 。

$$\mathbf{v} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{v}_p \quad (15)$$

$\mathbf{J}$ 为并联机构的雅可比矩阵, 见式 (16)。

$$\mathbf{J} = [\mathbf{G}]^{-1} \quad (16)$$

滑块速度 $\mathbf{v}_p$ 与广义速度 $\mathbf{v}_q$ 之间的关系为 $\mathbf{v}_p = \mathbf{G}\mathbf{v}_q$, 求解支链杆的速度, 并进行速度分析, 如图 11 所示。

假设连杆向上做平面运动, 滑块运动方向和动平台运动方向见图 11, 求解连杆质心 C 点运动速度。

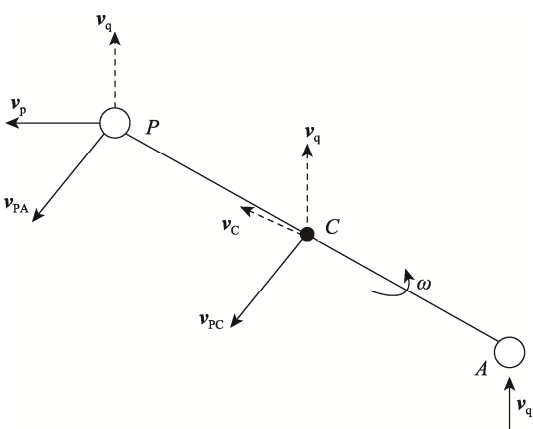


图 11 分支速度关系图
Fig.11 Branch speed diagram

$$\begin{cases} \mathbf{v}_P = \mathbf{G} \cdot \mathbf{v}_q \\ \mathbf{v}_P = \mathbf{v}_q + \mathbf{v}_{PA} \\ \mathbf{v}_{PA} = \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{h} \\ \mathbf{v}_C = \mathbf{v}_q + \mathbf{v}_{PC} \end{cases} \quad (17)$$

质心相对 P 点的速度为:

$$\mathbf{v}_{PC} = \boldsymbol{\omega} \cdot \frac{1}{2} \mathbf{h} \quad (18)$$

根据分析的各构件速度, 以拉格朗日动力学建模方法为理论基础, 求解 L 函数, 分析系统总能量^[16]。

1) 动能分析。3P(4S)并联机构在工作过程中的所有活动构件包括 3 个滑块、6 根支链杆和动平台, 分析各个构架的动能如下。

滑块的动能:

$$M_1 = \frac{1}{2} m_1 (\mathbf{v}_{P1}^T \mathbf{v}_{P1} + \mathbf{v}_{P2}^T \mathbf{v}_{P2} + \mathbf{v}_{P3}^T \mathbf{v}_{P3}) \quad (19)$$

式中: m_1 为滑块总质量; $\mathbf{v}_{P1}$ 、 $\mathbf{v}_{P2}$ 、 $\mathbf{v}_{P3}$ 分别为滑块的移动速度。

连杆动能:

$$M_2 = \frac{1}{2} I \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\omega} + \frac{1}{2} m_2 \mathbf{v}_C^T \mathbf{v}_C \quad (20)$$

式中: I 为支链杆转动惯量; $\boldsymbol{\omega}$ 为支链杆转动角速

度; m_2 为 6 根支链杆总质量; $\mathbf{v}_c$ 为支链杆质心速度。

动平台动能:

$$M_3 = \frac{1}{2} m_3 (\mathbf{v}_x^2 + \mathbf{v}_y^2 + \mathbf{v}_z^2) \quad (21)$$

式中: m_3 为动平台总质量; $\mathbf{v}_x$ 、 $\mathbf{v}_y$ 、 $\mathbf{v}_z$ 分别为动平台质心 3 个移动方向的运动速度。

综上, 可得 3P(4S) 并机构系统的总动能为:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 \quad (22)$$

2) 势能分析。以定平台为零势能面, 并联机构的总势能见式 (23)。

$$E = m_2 \mathbf{g}^T \mathbf{z}_1 + m_3 \mathbf{g}^T \mathbf{z}_2 \quad (23)$$

式中: $\mathbf{z}_1$ 、 $\mathbf{z}_2$ 分别为平行四边形支链杆质心和动平台质心到零势能面的位置矢量。

3) 广义力分析。拉格朗日动力学方程见式 (24)。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = Q_i \quad (24)$$

式中: L 为拉格朗日因子, $L = M - E$; q_i 为广义坐标; $\dot{q}_i$ 为广义坐标的一阶导数; Q_i 为广义力。

根据虚功原理, 总虚功为:

$$\begin{aligned} \delta W &= \mathbf{F}_1 \delta P_1 + \mathbf{F}_2 \delta P_2 + \mathbf{F}_3 \delta P_3 = \\ &\mathbf{F}_1 \frac{\partial P_1}{\partial z} \delta z + \mathbf{F}_2 \frac{\partial P_2}{\partial z} \delta z + \mathbf{F}_3 \frac{\partial P_3}{\partial z} \delta z \end{aligned} \quad (25)$$

广义力为:

$$\mathbf{Q}_z = \frac{\delta W}{\delta z} = \mathbf{F}_1 \frac{\partial P_1}{\partial z} + \mathbf{F}_2 \frac{\partial P_2}{\partial z} + \mathbf{F}_3 \frac{\partial P_3}{\partial z} \quad (26)$$

同理可得其他 2 轴方向的广义力, 联立 3 组广义力方程和雅可比矩阵可得广义力与驱动力的关系为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^{-T} \cdot \mathbf{Q} \quad (27)$$

由式 (27) 可求解出滑块驱动力唯一解, 可通过给定动平台的负载以及运动参数求解滑块的驱动力。

3.2 动力学仿真

将动力学方程在 Matlab 软件中进行编程, 给定动平台的参数及轨迹方程, 动平台运动轨迹参数方程见式 (28)。

$$\begin{cases} x_0 = 100 \cos(2\pi t) \\ y_0 = 100 \sin(2\pi t) \\ z_0 = 100t + 780 \end{cases} \quad (28)$$

表 3 构件参数

Tab.3 Component parameters

构件	质量/kg	质心位置/mm	转动惯量/($10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)
滑块 1	7.01	(1 222, 0, 0)	(3.456, 2.385, 1.72)
滑块 2	7.01	(-583, -1 150, 0)	(3.456, 2.385, 1.72)
滑块 3	7.01	(-583, 1 150, 0)	(3.456, 2.385, 1.72)
支链杆 1	8.31	(611, 0, 390)	(8.22, 8.22, 233.1)
支链杆 2	8.31	(-286.5, -575, 390)	(8.22, 8.22, 233.1)
支链杆 3	8.31	(-286.5, 575, 390)	(8.22, 8.22, 233.1)
动平台	3.25	(0, 0, 780)	(1.504, 7 740, 7 740)

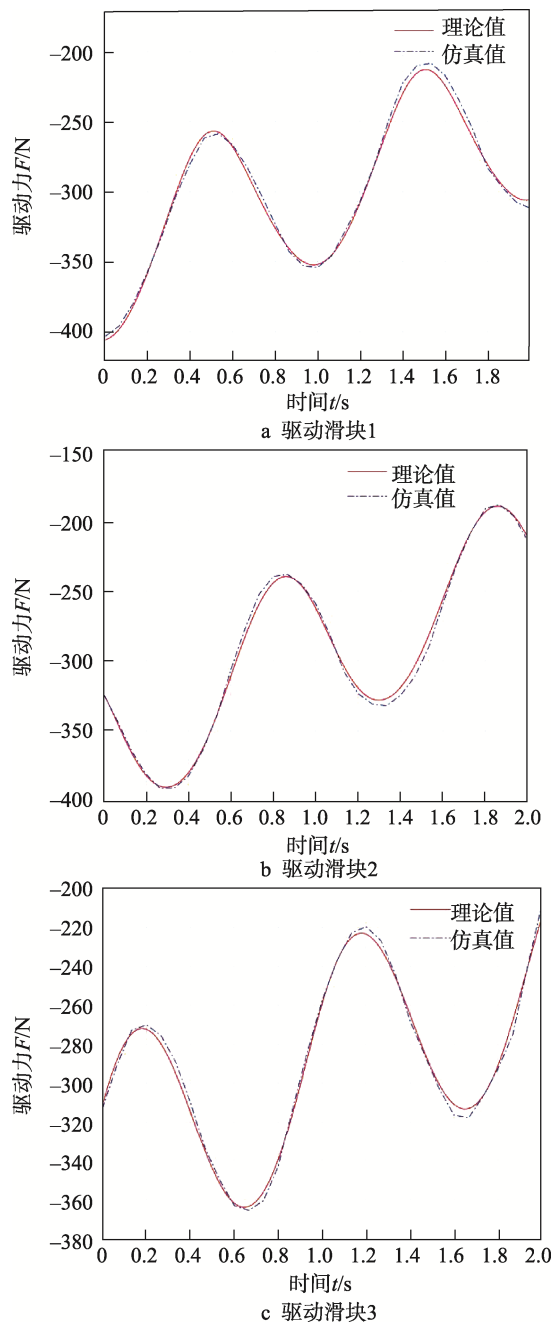


图 12 滑块驱动力对比
Fig.12 Comparison of driving force of slider

4 包装线仿真分析

在 UG NX-MCD 仿真平台中建立线辊包装生产线虚拟样机模型。仿真流程如图 13 所示, 将模型导入机电概念设计模块中, 添加各模块物理属性, 定义包装生产线模型运动行为特性, 添加控制执行器与传感器使产线完整地进行仿真运动。在 Simulink 中添加 OPC 服务器组件, 输入与输出信号通过 OPC 进行传递与交互。根据并联机构及各个驱动需要到达的位置建立相应关系。其中, 根据并联机构末端位置建立时间与速度关系式, 如表 4 所示。

虚拟样机模型按照设定运行，包装线整体依次进行转运线辊、翻转线辊、线辊套袋装箱、料袋整形、传送线辊、抽真空等流程^[17]。包装工艺流程如图 14 所示。

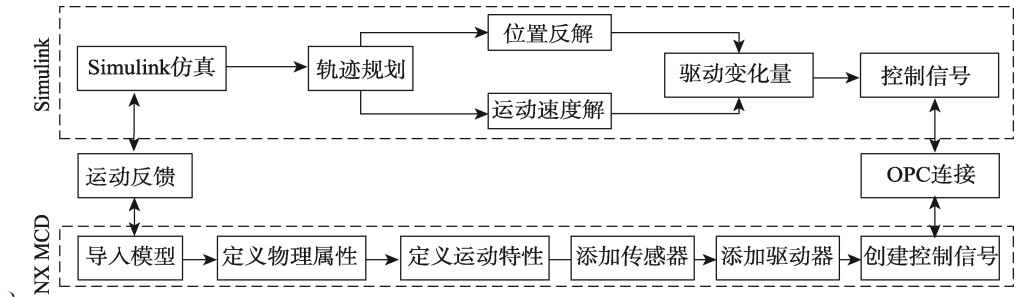


图 13 联合仿真流程
Fig.13 Joint simulation process

表 4 并联机械手轨迹路线
Tab.4 Parallel manipulator trajectory route

时间/s	动作	轨迹方程	驱动方程
0 ~ 4	运动至第 1 个线辊口	$x=-28t$ $y=135t$ $z=52.5t+980$	V11 V12 V12
4 ~ 7	伸进线辊内部	$x=100t-512$ $y=540$ $z=1\ 190$	V21 V22 V23
7 ~ 9	撑起线辊	$x=188$ $y=540$ $z=-145t+2\ 205$	V31 V32 V33
9 ~ 15	运至料箱上方	$x=-164t+1\ 664$ $y=-90t+1\ 350$ $z=-26t+1\ 134$	V41 V42 V43
15 ~ 19	套袋放进箱	$x=-796$ $y=0$ $z=90t-606$	V51 V52 V53
19 ~ 23	上升复位	$x=-796$ $y=0$ $z=-100t+3\ 004$	V61 V62 V63
23 ~ 27	复位	$x=199t-5\ 373$ $y=0$ $z=47t-457$	V71 V72 V73

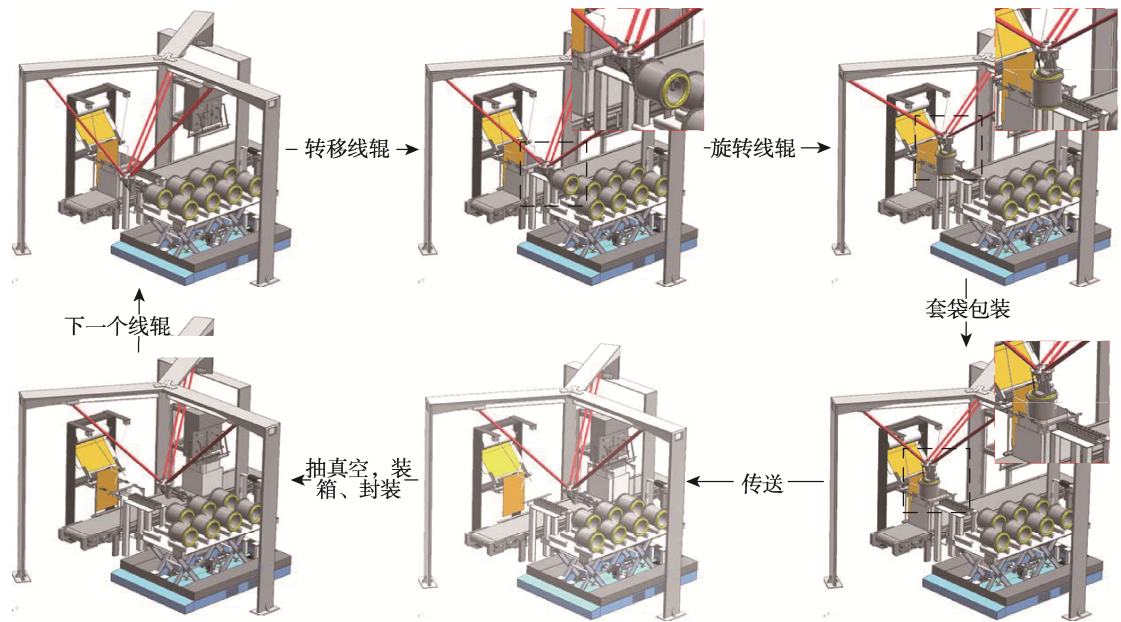


图 14 包装工艺流程
Fig.14 Process flow of packaging

并联机械手转运模块：并联机械手按规划轨迹运动，运动至第1个线辊口—伸进线辊内部—撑起线辊—翻转线辊并运至料箱上方—套袋放进箱—上升复位—机械手复位，共耗时27 s。

套袋机模块：并联机械手模块将线辊放进箱后复位过程中，2个旋转拨杆进行袋口整形，随后气缸推指夹住两边袋口，在直线模组驱动下与传送带同步运动至抽真空工位。抽真空机开始工作，气缸推指复位，复位后套袋机提供料袋至料箱内，封切刀将新的料袋上端连接处封口，下端切开，吸板将袋口撑开，为下一周期开始做准备。

各部分运动连续，并联机械手模块运动稳定并到达所需位置，整个易损类线辊包装生产线完整、连续，并联机构按规划的轨迹运动，其轨迹如图15所示，与设定的规划轨迹一致。

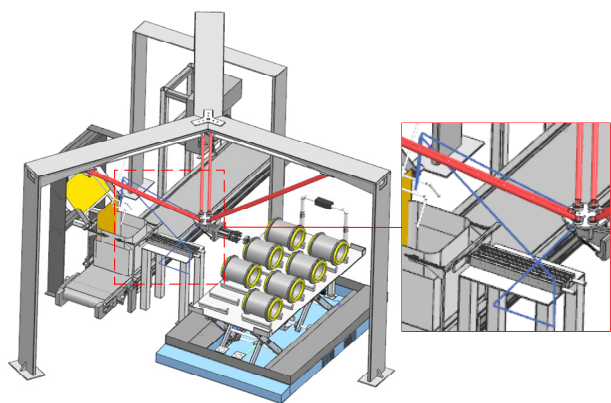


图15 整体运动仿真轨迹
Fig.15 Overall motion simulation trajectory

对易损类线辊包装线整体的虚拟仿真过程中，从运料车运动至指定位置且运料板也上升到指定位置开始，并联机械手搬运第1个线辊，到并联机械手开始搬运第2个线辊停止，完成1个线辊包装流程。该过程共耗时约46 s，提高了包装效率，验证了并联机构功能设计的正确性。

5 结语

本文针对表面易损类线辊线辊，设计了自动化包装生产线，并基于三平动并联机器人技术对该包装线进行了分析与研究，通过联合仿真证明了设计的可行性。得到如下结论：

1) 提出了一种与并联机械手配合工作的套袋方法，实现线辊的自动化包装，3P(4S)并联机构实现了易损线辊稳定搬运。

2) 利用矢量分析法完成了3P(4S)并联机构正解分析，利用数值法对并联机构的工作空间进行求解，证明所设计的机构满足工作要求。分析了并联机构中各构件间的速度关系，利用拉格朗日动力学建模

方法建立了动力学模型，求解出各驱动滑块的驱动力，并由仿真分析验证了动力学分析的正确性。

3) 基于MCD与Simulink对包含有并联机器人模块的易损类线辊包装生产线进行了联合仿真，实现了易损类线辊包装生产线整体虚拟运动仿真，验证了并联机械手模块的性能以及整体包装线的可行性。

参考文献：

- [1] 李俊帅, 马春生, 李瑞琴, 等. 3UPS+1RPU 非对称并联机构的刚度与模态分析[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 127-131.
LI Jun-shuai, MA Chun-sheng, LI Rui-qin, et al. Stiffness and Modal Analysis of 3UPS+1RPU Asymmetrical Parallel Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 127-131.
- [2] 冯李航, 张为公, 龚宗洋, 等. Delta 系列并联机器人研究进展与现状[J]. 机器人, 2014, 36(3): 375-384.
FENG Li-hang, ZHANG Wei-gong, GONG Zong-yang, et al. Developments of Delta-Like Parallel Manipulators - a Review[J]. Robot, 2014, 36(3): 375-384.
- [3] LIU C, CAO G, QU Y. Safety Analysis Via Forward Kinematics of Delta Parallel Robot Using Machine Learning[J]. Safety Science, 2019, 117: 243-249.
- [4] CHOI H B, KONNO A, UCHIYAMA M. Design, Implementation, and Performance Evaluation of a 4-dof Parallel Robot[J]. Robotica, 2010, 28: 107-118.
- [5] GALLARDO-ALVARADO J, BALMACEDA-SANTAMARIA A L, CASTILLO-CASTANEDA E. An Application of Screw Theory to the Kinematic Analysis of a Delta-Type Robot[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(9): 3785-3792.
- [6] 董旭, 高铁红. 三自由度并联包装机构动力学建模与分析[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 81-87.
DONG Xu, GAO Tie-hong. Dynamic Modeling and Analysis of 3-DOF Parallel Packaging Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(15): 81-87.
- [7] 樊文龙, 李瑞琴, 王春臻, 等. 一种用于物流快递分拣的 2-RPU/2-SPU 并联机构设计[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 178-183.
FAN Wen-long, LI Rui-qin, WANG Chun-zhen, et al. Design of a 2-RPU/2-SPU Parallel Mechanism for Logistics and Express Sorting[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 178-183.
- [8] 孔一啸, 田宝俊, 李瑞琴. 基于 2-CPR/UPS 三平移并联机构的移印机运动学分析[J]. 包装工程, 2021, 42(3): 207-213.
KONG Yi-xiao, TIAN Bao-jun, LI Rui-qin. Kinematics Analysis of Pad Printing Machine Based on 2-CPR/UPS

- Three-Translation Parallel Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 207-213.
- [9] 马振东, 马春生, 米文博, 等. 基于 2-RPS/UPRS 并联机构的自动分拣机运动分析[J]. 包装工程, 2021, 42(1): 157-162.
- MA Zhen-dong, MA Chun-sheng, MI Wen-bo, et al. Kinematics Analysis of Automatic Sorter Based on 2-RPS/UPRS Parallel Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(1): 157-162.
- [10] 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 Wen-bo, MA Chun-sheng, LI Rui-qin, et al. Workspace of 2-UPR/RSPR Parallel Mechanism Applied to Medicine Packaging Production Line[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 171-176.
- [11] 唐彦昆. 卷袋式全自动吨袋包装线的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 14-16.
- TANG Yan-kun. Research on full Automatic Ton Bag Packaging Line[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 14-16.
- [12] 袁佳伦. 基于西门子 PLC 的啤酒包装线多道自控系统设计[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2019: 5-10.
- YUAN Jia-lun. Design of Multi-Channel Automatic Control System for Beer Packaging Line Based on Siemens PLC[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2019: 5-10.
- [13] 郑东志, 邓子龙. 六自由度并联机器人的位置分析及仿真研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(2): 163-166.
- ZHENG Dong-zhi, DENG Zi-long. Location Analysis and Simulation Study of the Six Degree of Freedom Parallel Robot[J]. Machine Building & Automation, 2016, 45(2): 163-166.
- [14] 李清, 丰玉玺, 刘荣帅, 等. 2-UPS/(S+SPR)R 并联机构伴随运动与正反解分析[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 164-168.
- LI Qing, FENG Yu-xi, LIU Rong-shuai, et al. Concomitant Motion and Forward and Inverse Solutions of 2-UPS/(S+SPR)R Parallel Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(7): 164-168.
- [15] DESAI R, MUTHUSWAMY S. A Forward, Inverse Kinematics and Workspace Analysis of 3rps and 3rps-r Parallel Manipulators[J]. Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Mechanical Engineering, 2021, 45(1): 115-131.
- [16] NUELLE K, STERNECK T, LILGE S, et al. Modeling, Calibration, and Evaluation of a Tendon-Actuated Planar Parallel Continuum Robot[J]. Ieee Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 5811-5818.
- [17] 赵永信, 黎玲萍. 基于 MCD 平台的气动手抓设计与控制仿真研究[J]. 装备制造技术, 2020(8): 20-22.
- ZHAO Yong-xin, LI Ling-ping. The Research of Design and Control Simulation of Pneumatic Gripper Based on MCD Platform[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(8): 20-22.

责任编辑: 曾钰婵