

基于 2-RPS/UPRS 并联机构的自动分拣机运动分析

马振东, 马春生, 米文博, 尹晓秦, 程芳
(中北大学, 太原 030051)

摘要: **目的** 针对目前物流行业大都采用人工分拣, 耗费了大量人力成本的问题, 提出一种新型 2-RPS/UPRS 并联机构来解决这一问题。**方法** 首先进行机构的自由度分析和工作空间仿真, 以验证 2-RPS/UPRS 并联机构是否具有较大的工作空间。基于螺旋理论进行空间并联机构自由度分析, 在三维软件中建模, 添加合适的驱动验证其自由度。通过闭环矢量法和运动支链参数 D-H 矩阵表示法求解机构动平台的位置逆解。最后在 Matlab 程序中进行工作空间的仿真分析。**结果** 2-RPS/UPRS 并联机构末端执行器在空间中具有 2 个转动自由度, 2 个方向的移动自由度。工作空间形状规则, 无奇异位型。**结论** 基于 2-RPS/UPRS 并联机构的分拣装置结构简单, 可以在生产线上实现精准控制。该并联机构两转两移的运动特性能适应不同倾斜角斜面的分拣任务。

关键词: 并联机构; 自由度; 位置逆解; 工作空间

中图分类号: TB486; TH112 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)01-0157-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.01.022

Kinematics Analysis of Automatic Sorter Based on 2-RPS/UPRS Parallel Mechanism

MA Zhen-dong, MA Chun-sheng, MI Wen-bo, YIN Xiao-qin, CHENG Fang
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a new 2-RPS/UPRS parallel mechanism to solve the problems that manual sorting is mostly used in current logistics industry and consumes a lot of labor costs. The freedom analysis of the mechanism and working space simulation were carried out to verify whether the 2-RPS/UPRS parallel mechanism has a larger working space. Based on the spiral theory, the degree of freedom of the spatial parallel mechanism was analyzed. The model was established in 3D software, and the appropriate drive was added to verify the degree of freedom. By comparing the closed-loop vector method with the D-H matrix representation of motion branch chain parameters and the attitude Euler angle transformation matrix, the inverse position solution of the mechanism moving platform was solved. Finally, the simulation analysis of the working space was carried out in Matlab procedure. The end actuator of 2-RPS/UPRS parallel mechanism had 2 degree of freedom of rotation and 2 movement directions. The working space had a regular shape, without singular form. The sorting device based on 2-RPS/UPRS parallel mechanism has simple structure and can realize precise control on the production line. The motion characteristics of the parallel mechanism with two rotation freedom and two movement directions can adapt to the sorting tasks with different inclined angles.

KEY WORDS: parallel mechanism; degree of freedom; position reverse solution; working space

收稿日期: 2020-05-26

基金项目: 山西省自然科学基金 (201801D121183)

作者简介: 马振东 (1997—), 男, 中北大学硕士生, 主攻机构与机器学。

通信作者: 马春生 (1974—), 男, 博士, 中北大学副教授, 主要研究方向为机构理论与机器人技术。

目前的物流大都采用人工分拣,会消耗大量的人力成本。较少的物流中转中心会采用机器人进行分拣,但是需要工厂具有较大的面积。并联传动机构的特点是结构稳定,具有较大的传动承载能力及较高的控制精度^[1-2],可以将并联传动机构应用于快递物流行业,在产品包装及封箱码垛等需要大量重复的机械运动。在一般的物流分拣过程中,只需要三到四自由度就能够适应所需要的制造工序,因此,少自由度并联机构构型及并联机构工作空间的范围才是设计中主要所需求的^[3-5]。

杨映红等^[6]对 2-RPS/RPU 并联机构进行了运动学分析,验证了输入与输出之间具有良好的相应关系,分析了末端姿态的速度与加速度,验证其运动学性能良好。王永奉等^[7]对 3-RPS 并联机构的工作空间进行了分析。周嘉舜等^[8]提出了一种计算杆件自由度的新方法。樊大宝等^[9]对 3-UPRP 并联机构的运动学进行了分析。

目前研究的并联机构在水平方向工作空间较小,不能适用于长距离的操作平台,因此文中提出一种新型 2-RPS/UPRS 并联机构,并对机构的自由度,位置逆解及工作空间进行分析。少自由度并联机构还具有结构简单、约束较少、运动性能良好等优点^[10-13],对于产品包装、分拣这类需要进行大量重复运动和平稳运行的行业来说非常适用。

此外,少自由度并联机构具有结构简单、约束较少、运动性能良好等优点^[10-13],对于产品包装、分拣这类需要进行大量重复运动和平稳运行的行业来说非常适用。

1 机构描述及坐标建立

2-RPS/UPRS 并联机构由动平台、定平台和 3 条支链组成,通过 3 条支链将动平台与定平台相连接。3 条支链分别是 2 条 RPS 支链,1 条 UPRS 支链。支链中的 R 代表转动副,P 代表移动副,S 代表球面副,U 代表万向铰。

在动平台和定平台中分别建立坐标见图 1。定平台几何中心为原点 O , X 轴方向与 RPS 支链中转动副方向平行, Z 轴方向与移动副方向平行。动平台上坐标为 P - xyz ,定平台上坐标为 O - XYZ 。

2 并联机构自由度分析

1997 年,黄真等^[14-15]提出空间螺旋理论来求解机构自由度,从理论上阐明了如何求解空间机构的自由度。并求解了四杆机构的公共约束和自由度验证了其方法的正确性。

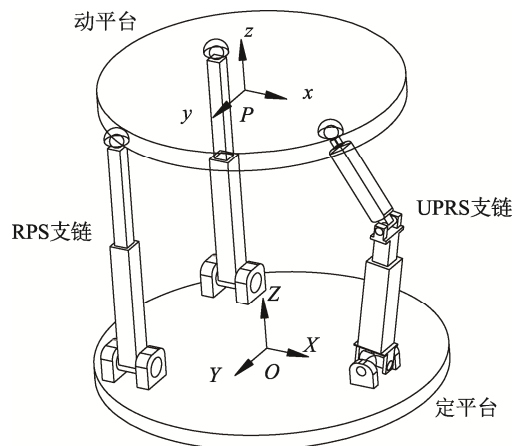


图 1 2-RPS/UPRS 并联机构
Fig.1 2-RPS/UPRS parallel mechanism

基于螺旋理论对 2-RPS/UPRS 并联机构进行自由度求解,将机构的 3 条支链分解。首先对 RPS 支链进行自由度求解,建立一个空间坐标系,见图 2。在此坐标系下,RPS 支链的自由度可以通过 5 个运动螺旋进行表示:

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{i1} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{i2} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ e_2 \ g_2) \\ \mathcal{S}_{i3} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ e_2 \ g_3) \\ \mathcal{S}_{i4} = (0 \ 1 \ 0; 0 \ e_2 \ g_3) \\ \mathcal{S}_{i5} = (0 \ 0 \ 1; 0 \ e_2 \ g_3) \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)求反螺旋系,可得:

$$\mathcal{S}_{i1}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \quad (2)$$

同理,对 UPRS 进行自由度分析,可得该支链的运动螺旋系:

$$\begin{cases} \mathcal{S}_1 = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_2 = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_3 = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}_4 = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ g_3) \\ \mathcal{S}_5 = (1 \ 0 \ 0; e_5 \ f_5 \ g_5) \\ \mathcal{S}_6 = (0 \ 1 \ 0; e_5 \ f_5 \ g_5) \\ \mathcal{S}_7 = (0 \ 0 \ 1; e_5 \ f_5 \ g_5) \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)求反螺旋系,可得:

$$\mathcal{S}_1^r = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \quad (4)$$

整合式(2)和式(4)进行分析,由于一个 RPS 支链会在动平台上施加一个沿 X 方向的约束力,该机构中包含 2 个 RPS 支链,会产生 2 个约束力来限制动平台绕 Z 轴的转动。根据此结论所得出的为并联机构的约束螺旋系,再求解反螺旋,就可以得出整个机构的运动螺旋系为:

$$\begin{cases} \mathcal{S}_1 = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_2 = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_3 = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0) \\ \mathcal{S}_4 = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \end{cases} \quad (5)$$

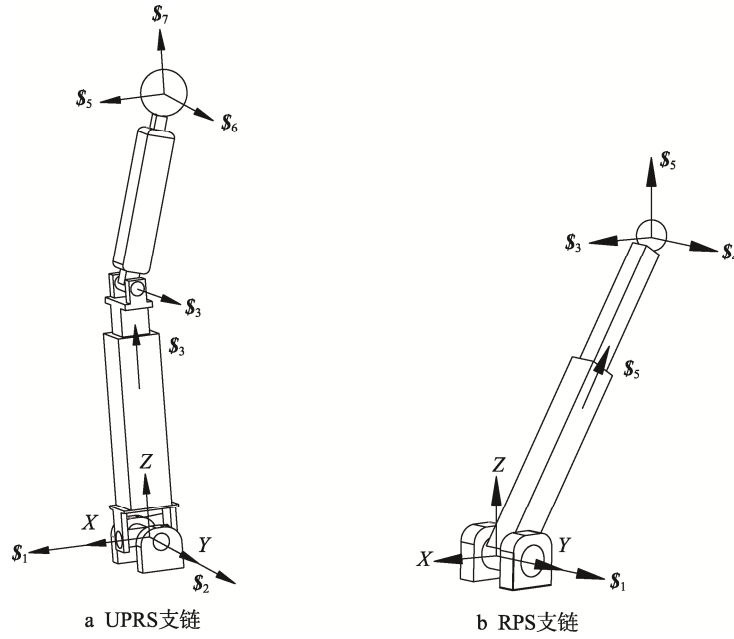


图 2 RPS 支链和 UPRS 支链运动螺旋

Fig.2 RPS branched chain spiral and UPRS branched chain spiral

通过分析机构的运动螺旋系, 可以得出以下结论: 2-RPS/UPRS 并联机构在空间中共有两转两移 4 个自由度, 分别是绕 X 轴和 y 轴 2 个方向的转动, 1 个沿 y 轴方向的移动和 1 个沿 z 轴方向的移动。

3 位置反解

求解并联机构运动逆解, 就是给定动平台的位姿

$$\mathbf{R}_{ot} = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x \\ l_y & m_y & n_y \\ l_z & m_z & n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \cos \gamma \sin \alpha & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \gamma \cos \alpha \\ \sin \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \gamma \cos \alpha & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (6)$$

在定平台坐标系 $O-XYZ$ 下, A 点坐标为 $(\frac{\sqrt{3}}{2}R, \frac{1}{2}R, 0)$ 。在动平台 $P-xyz$ 坐标下, B 点坐标为 $(\frac{\sqrt{3}}{2}r, \frac{1}{2}r, 0)$, B 点在静坐标系 $O-XYZ$ 下的位置矢量为:

$$\mathbf{OB}_i = \mathbf{OA}_i + \mathbf{A}_i \mathbf{B}_i \quad (7)$$

根据该机构的结构特征, 可以建造如图 4 所示的封闭矢量环, 并建造矢量环方程:

$$\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i = \mathbf{OP} + \mathbf{PB}_i - \mathbf{OA}_i \quad (8)$$

根据式 (6—8) 可以求出 RPS 支链的运动学逆解:

$$\begin{cases} l_1 = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2 + \sqrt{3}(R-r)X - (R-r)Y} \\ l_2 = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2 + \sqrt{3}(R-r)X - (R-r)Y} \end{cases} \quad (9)$$

3.2 UPRS 支链运动逆解

运用 D-H 法来求解 UPRS 支链运动逆解, 设定定平台半径 R , 动平台半径 r , UPRS 支链中 U 副和 R 副之间的杆长 l_3 , R 副与 S 副之间的距离 S 。

参数, 如 $(X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma)$, 来求解各个支链中移动副的伸长量或转动副的转动量等。

3.1 RPS 支链运动逆解

动平台位姿可以用 Z-Y-X 型欧拉角表示。Rot 为 Z-Y-X 型欧拉角的姿态转换矩阵, 其中设 l_1, l_2 表示 $\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i (i=1, 2)$ 的长度。

首先根据坐标变换法的原理写出相应的 D-H 参数, 见表 1。利用前置坐标系的坐标变换矩阵进行计算, 得到从定平台坐标原点到动平台坐标原点的坐标

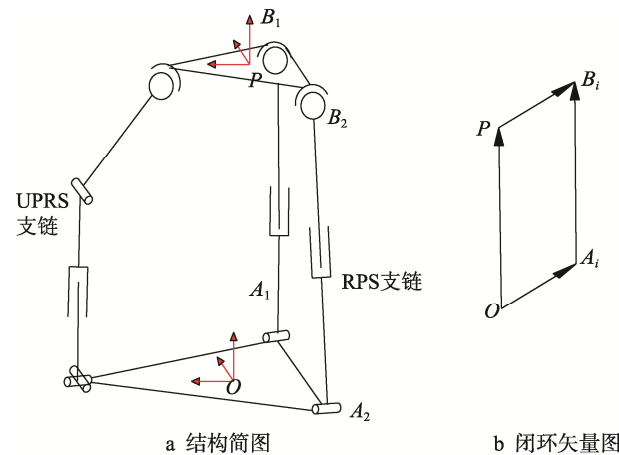


图 3 RPS 支链运动反解矢量环

Fig.3 RPS branch chain motion inverse solution vector loop

表1 UPRS支链D-H参数
Tab.1 UPRS branch chain D-H parameter

序号	θ_i	$\alpha_{i-1,i}$	$a_{i-1,i}$	d_i
1	θ_1	90°	R	0
2	θ_2	90°	0	0
3	0	90°	0	l_3
4	θ_4	90°	0	0
5	θ_5	90°	S	S
6	θ_6	90°	0	0
7	θ_7	90°	0	0
8	0	0	r	0

$$T = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & X_p \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & Y_p \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma & Z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据式(10—12)可得:

$$\theta_1 = \arctan \frac{\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma}{\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma} - \arcsin(\sin \theta_5 \sin \theta_6) \quad (13)$$

$$l_3 = Ar + S(\cos \theta_4 - \cos \theta_5 \sin \theta_4) + Y_p \sin \theta_1 \sin \theta_2 - Z_p \cos \theta_2 - R \sin \theta_2 \quad (14)$$

其中:

$$A = \cos \theta_4 \sin \theta_6 \cos \theta_7 - \sin \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 \cos \theta_7 - \sin \theta_4 \sin \theta_5 \sin \theta_7 \quad (15)$$

变换矩阵,将坐标变换矩阵与欧拉角位姿矩阵对比,利用 Matlab 编程可以求解得到 UPRS 支链中驱动副的参数表达式。

前置坐标系变换矩阵:

$$T_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad i=1,2,\dots,8 \quad (10)$$

动平台到定平台的变换矩阵:

$$T_{18} = T_{0,1} T_{1,2} T_{2,3} T_{3,4} T_{4,5} T_{5,6} T_{6,7} T_{7,8} \quad (11)$$

欧拉角矩阵表达式:

4 工作空间

4.1 工作空间仿真分析

将求出的位置反解编写程序带入 Matlab 软件中,设定 l_1 和 l_2 初始杆长为 900 mm,伸长量为 700 mm, l_3 杆长为 700 mm,伸长量为 500 mm,进行运算,即可得出该并联机构的工作空间,见图 5。该机构在空间中有较大的工作范围,整体工作空间沿 x - z 平面对称分布,较 3-RPS 机构而言,在 Y - Z 方向工作空间范

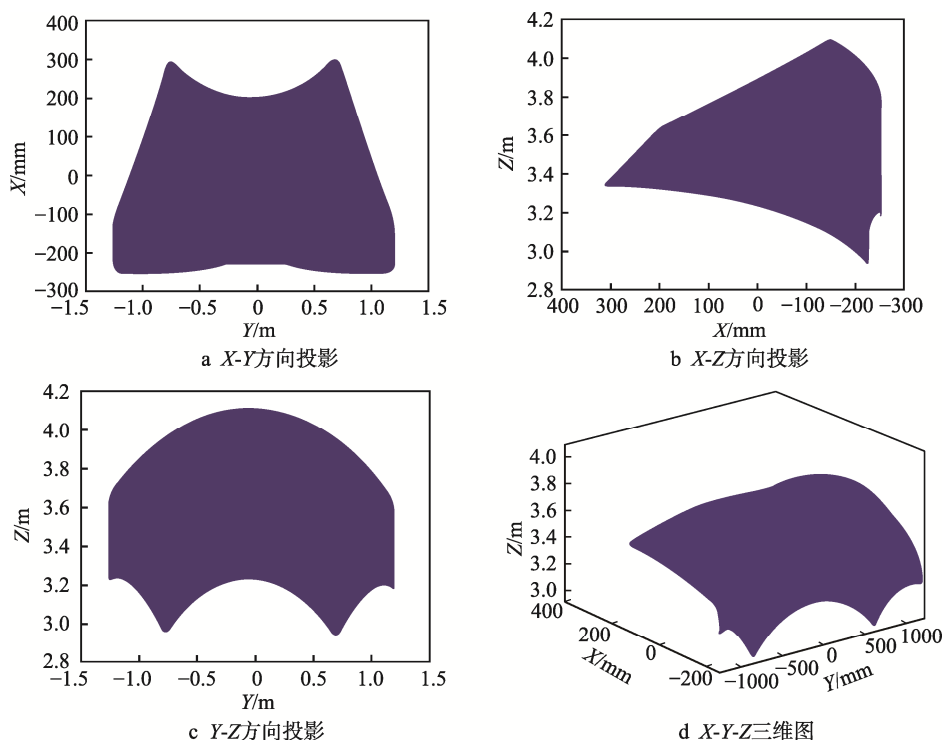


图4 2-RPS/UPRS 并联机构可达工作空间

Fig.4 Reachable working space of 2-RPS/UPRS parallel mechanism

围更大。整体工作空间区域紧凑, 无断点, 无空洞。

4.2 包装分拣实例分析

2-RPS/UPRS 并联机构在 Y-Z 平面具有较大的工作空间, 可以适应需要横向工作范围较大的工作。分拣示意图 5。采用并联机构进行分拣工作时, 一方面可以节省人力成本, 另一方面可以增强车间内的空间利用率。利用该机构进行分拣工作, 可以剔除生产过程中因客观因素产生的残次品, 或者进行物流分拣工作, 能够在有限的空间内进行分拣产品。

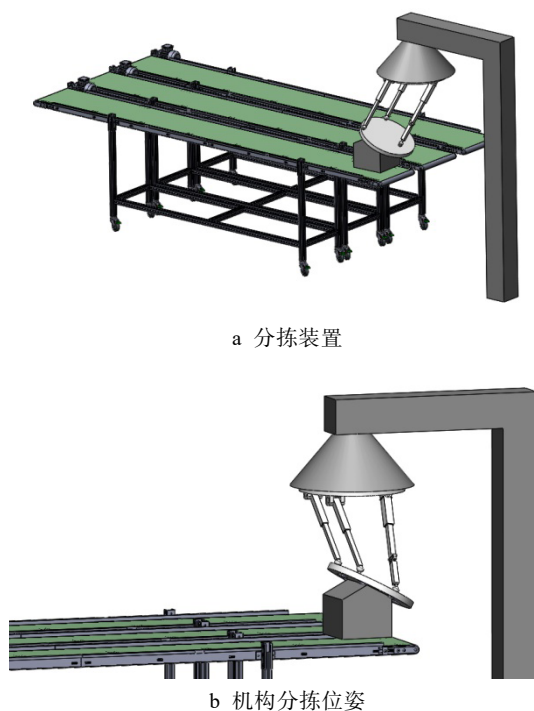


图 5 分拣示意

Fig.5 Schematic diagram of sorting

5 结语

首先通过 SolidWorks 三维软件对 2-RPS/UPRS 并联机构进行建模分析, 然后利用螺旋理论对机构自由度进行分析, 写出该空间机构所有的运动螺旋, 得出该机构为 4 自由度空间机构。应用闭环矢量法和 D-H 参数法进行机构逆解计算, 再通过 Matlab 软件分析得出该机构的工作空间。通过与 3-RPS 并联机构进行比较, 可以看出在其他 2 个方向工作空间不变的情况下, 2-RPS/UPRS 在 Y-Z 方向的活动范围增大了近 2 倍, 这使得该机构的用途更加广泛, 可以应用到产品生产包装流水线或物流分拣工位等。

参考文献:

[1] 梁世杰, 李瑞琴, 孟宏伟, 等. RPR/RRPR 球面并联

机构的建模与工作空间分析[J]. 包装工程, 2017, 38(23): 128—132.

LIANG Shi-jie, LI Rui-qin, MENG Hong-wei, et al. Modeling and Workspace Analysis of RPR/RRPR Spherical Parallel Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(23): 128—132.

[2] 华为实. 基于 3-RSR 并联机器人机构的天线支撑[J]. 机械, 2000(5): 10—11.

HUA Wei-shi. Antenna Support Based on 3-RSR Parallel Robot Mechanism[J]. Machinery, 2000(5): 10—11.

[3] CARBONI A P, SIMAS H, MARTINS D. Actuation Scheme Enumeration and Optimal Selection for Parallel Mechanisms Based on Matroid Theory[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 151: 1—15.

[4] WANG L, FANG Y F, QU H B, LI L Q. Design and Analysis of Novel 2R1T Generalized Parallel Mechanisms with Large Rotational Angles[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 150: 1—23.

[5] MENG Q Z, XIE F G, LIU X J, et al. An Evaluation Approach for Motion-force Interaction Performance of Parallel Manipulators with Closed-loop Passive Limbs[J]. Pergamon, 2020, 149(C): 1—20.

[6] 杨应洪, 尹显明. 一种 2RPS-RPU 并联机构的动力学分析[J]. 机械设计与制造, 2019(9): 58—62.

YANG Ying-hong, YIN Xian-ming. Dynamic Analysis of a 2RPS-RPU Parallel Mechanism[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2019(9): 58—62.

[7] 周嘉舜, 王璠, 欧妍君, 等. 计算杆件结构的自由度[J]. 力学与实践, 2019, 41(1): 95—98.

ZHOU Jia-shun, ZHANG Fan, OU Yan-jun, et al. Calculating the Degrees of Freedom of the Bar Structure[J]. Mechanics and Practice, 2019, 41(1): 95—98.

[8] 王永奉, 范顺成, 张小俊, 等. 具有弧形移动副 3-RPS 并联机构的运动学分析[J]. 机床与液压, 2018, 46(15): 7—11.

WANG Yong-feng, FAN Shun-cheng, ZHANG Xiao-jun, et al. Kinematics Analysis of 3-RPS Parallel Mechanism with Arc-shaped Moving Pair[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2018, 46(15): 7—11.

[9] 樊大宝, 孙虎儿, 李瑞琴, 等. 一种新型 3-UPRP 并联机构的运动学分析[J]. 包装工程, 2018, 39(7): 168—172.

FAN Da-bao, SUN Hu-er, LI Rui-qin, et al. Kinematics Analysis of a New 3-UPRP Parallel Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(7): 168—172.

[10] THANH T D, KOTLARSKI J, HEIMANN B, et al. Dynamics Identification of Kinematically Redundant Parallel Robots Using the Direct Search Method[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 55(52):

- 277—295.
- [11] KWON S H, CHOI H J, LEE J W, et al. Magn-eorheology of Xanthan-gum-coated Soft Magnetic Carbonyliron Microspheres and Their Polishing Characteristics[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2013, 62(12): 2118—2122.
- [12] HOU Y L, ZHANG G X, ZENG D X. An Efficient Method for the Dynamic Modeling and Analysis of Stewart Parallel Manipulator based on the Screw Theory[J]. Sage Publications, 2020, 234(3): 808—821.
- [13] HASHIM I, MUHAMMAD U A K, YI B J. Analysis of Duality-based Interconnected Kinematics of Planar Serial and Parallel Manipulators Using Screw Theory[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2020, 13(1): 47—62.
- [14] 黄真, 李艳文, 高峰. 空间运动构件姿态的欧拉角表示[J]. 燕山大学学报, 2002, 26(3): 189—192.
- HUANG Zhen, LI Yan-wen, GAO Feng. Euler Angle Representation of Space Motion Component Attitude[J]. Journal of Yanshan University, 2002, 26(3): 189—192.
- [15] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 111—151.
- HUANG Zhen, ZHAO Yong-sheng, ZHAO Tie-shi. Advance Space Mechanism[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 111—151.