基于 2-PSR/UPU 并联机构的旋盖装置设计及性能分析

王新宇,李虹,李亚丽,马春生,李瑞琴 (中北大学 机械工程学院,太原 030051)

摘要:目的 针对生产线上的旋盖工序,提出一种基于 2-PSR/UPU 并联机构的旋盖装置,解决生产线上不同倾角斜面上的旋盖问题。方法 建立 2-PSR/UPU 并联机构模型;根据定杆长约束条件求解机构的位置反解,并通过相应的运动算例验证其反解位姿,通过对多个反解位姿进行对比,从中得出有效解;利用三维坐标搜索法求解工作空间。结果 该并联机构动平台下方 10 mm 参考点工作空间连续且没有出现空洞,能适应 0~35°范围斜面上的旋盖问题,给出了该并联机构在 25°,30°,35°斜面情况下旋盖的实例。结论 基于 2-PSR/UPU 并联机构的旋盖装置结构简单,机构具有可调性,可以在生产线上实现精准控制。该并联机构一移两转的特性能适应不同倾斜角斜面的旋盖任务。

关键词:2-PSR/UPU 并联机构;自由度;位置反解;工作空间;旋盖装置

中图分类号:TB486; TH112 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2020)03-0188-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.03.029

Design and Performance Analysis of a Novel Capping Device Based on 2-PSR/UPU Parallel Mechanism

WANG Xin-yu, LI Hong, LI Ya-li, MA Chun-sheng, LI Rui-qin

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

ABSTRACT: The paper aims to propose a capping device based on the 2-PSR/UPU parallel mechanism to solve the capping process on the production line today, to solve the problem of the capping on the inclined surface of different inclination angles on the production line. The 2-PSR/UPU parallel mechanism model was established. The reverse position solution of the mechanism was solved according to the fixed length constraint condition, and the reverse position solution pose was verified by the corresponding motion example. By comparing the multiple reverse postures, the effective solution was solved; the workspace was solved by the three-dimensional coordinate search method. The workspace of the 10mm reference point below the moving platform of the parallel mechanism was continuous and free from voids, and could adapt to the screwing problem on the inclined surface of the 0-35° range, and the parallel mechanism was provided with an example of a capping in the case of 25°, 30°, and 35°. The capping device based on the 2-PSR/UPU parallel mechanism has a simple structure and adjustable mechanism, and can achieve precise control on the production line. The special function of 1-translation and 2-rotation of the parallel mechanism is adapted to the capping task of the inclined surface with different inclination angles.

收稿日期: 2019-07-08

基金项目:山西省自然科学基金(201801D121183)

作者简介:王新宇(1995—), 男, 中北大学硕士生, 主攻机构与机器人学。

通信作者: 李虹(1966—), 女, 硕士, 中北大学副教授, 主要研究方向为机构理论与机器人技术。

KEY WORDS: parallel mechanism of 2-PSR/UPU; degree of freedom; reverse position solution; workspace; capping device

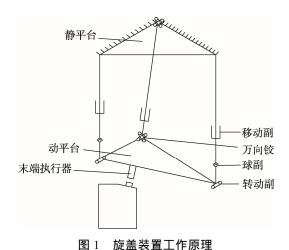
在现代自动化生产线上,对瓶体进行最后的旋盖包装时,大多数都是以垂直的方向进行。如果瓶口与瓶底不平行,很多生产线不能对这类包装进行大批量的自动旋盖。特别是当一个瓶体有2个以上瓶口的时候,几乎没有简易设备可以一次在一个瓶体上进行2次或2次以上精准定位并旋盖。

文中的 2-PSR/UPU 并联机构是基于生产线中存 在的旋盖问题提出的。该并联机构是根据 3-PSR 并 联机构[1]和 3-UPU 并联机构[2],经过机构构型综合[3] 得出的一种一平移二转动的新型机构。张伟中等[4] 对 2-PUR-PSR 并联机构的运动学进行了分析,并得 出了基于螺旋理论得到描述机构运动/力传递性能 的局部传递指标,和全域优质运动/力传递空间比指 标;黄秀琴等[5]对一平移二转动并联机构的位置参 数进行了分析,通过分析输出变量随输入变量的变 化趋势,确定了输入变量和输出变量的理想取值范 围;田海波等[6]对一种三构态变胞并联机构运动学 及工作空间进行了分析,对并联机构的尺度综合和 运动规划提供了理论依据 : 孟宏伟[7]对非对称 3-UPU 并联机构的六足步行机器人进行了研究,并对六足 步行机器人进行了步态规划的仿真分析 :ZHAO 等[8] 对 6UPS/(3PRRR)+S 并联机构进行了分析,最终证 明了该机构有良好的平衡性能; WANG 等[9-10]对 3-PUU 并联机构进行了设计和研究,证明了该机构 有良好的运动性能,并对该机构的尺寸进行了优化, 得出了最佳尺寸。

文中对 2-PSR/UPU 并联机构进行研究,得出该机构的位姿反解,并通过 Matlab 进行位姿分析,得出该机构所有反解位姿图。通过观察位姿图有无异常情况,快速地确定反解公式中的符号。最后,对该机构在包装生产线上用于多角度旋盖进行说明。

1 旋盖装置工作原理

基于 2-PSR/UPU 并联机构的旋盖装置原理见图 1。并联机构动平台的角度通过每个支链上的移动副来调节。当每个支链上的移动副移动一定的距离,每个支链上的球副、转动副和万向铰都会转动一定的角度,最终带着动平台转动。通过调节移动副的移动距离,可以使动平台的平面与瓶口平行。此时,末端执行器可以精准地执行旋盖过程。由于该机构的自由度是一移二转,加在动平台上的末端执行器可以作为局部自由度,恰好可以补偿一个方向的旋转。



2 并联机构及其自由度计算

2.1 并联机构的坐标系建立

并联机构的模型见图 2。在模型中,并联机构一共有 3 条支链。支链 1 和支链 2 都是 PSR 支链,上面都有一个 P 副(移动副)、S 副(球副)和 R 副(转动副);支链 3 是 UPU 支链,在支链 3 上有 2 个 U 副(万向铰)和一个 P 副。动平台(下平台)和静平台(上平台)的形状都是等边三角形(因满足运动和安装需要,动平台和静平台的每个角都被切去了相同的部分)。在静平台中心建立固定坐标系 O_A - X_A Y_AZ_A,其中 Z_A 轴垂直于静平台平面, X_A 轴平行于静平台等边三角形的一边,并在静平台平面上, Y_A 轴垂直于 X_A 轴;在动平台的中心建立动坐标系 O_B - X_B Y_BZ_B,其中 Z_B 轴垂直于动平台平面, X_B 轴垂直于 X_B 轴。

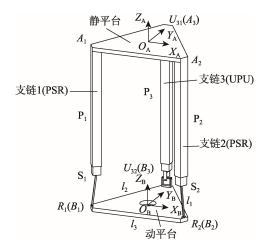


图 2 2-PSR/UPU 机构模型 Fig.2 Model of 2-PSR/UPU mechanism

2.2 自由度分析计算

第 1 步,对该并联机构的支链 1 , 2 , 3 进行螺旋分析[11] , 见图 3 。

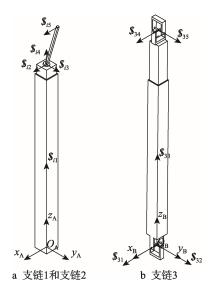


图 3 支链螺旋分析 Fig.3 Analysis on limb spiral

支链 1 的运动螺旋表示为:

$$\begin{cases}
\mathbf{\$}_{11} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\
\mathbf{\$}_{12} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ e_1 \ 0) \\
\mathbf{\$}_{13} = (0 \ 1 \ 0; -e_1 \ 0 \ 0) \\
\mathbf{\$}_{14} = (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\
\mathbf{\$}_{15} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ e_2 \ -f)
\end{cases} \tag{1}$$

通过式(1)计算支链 1 的反螺旋,得出支链 1 约束螺旋系为:

$$\mathbf{S}_{1}^{r} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ e_{1} \ 0) \tag{2}$$

此约束螺旋是一个平行于 x_A 轴的力线矢,约束 x_A 方向的平移。

支链 2 的分布方式和支链 1 相同 ,所以支链 2 的运动螺旋与式 (1) 相同 ,约束螺旋系与式 (2) 相同。

支链 3 的运动螺旋表示为:

$$\begin{cases}
\$_{31} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\
\$_{32} = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\
\$_{33} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\
\$_{34} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ e \ 0) \\
\$_{35} = (0 \ 1 \ 0; -e \ 0 \ 0)
\end{cases}$$
(3)

通过式(3)计算支链 3 的反螺旋,得出支链 3 的约束螺旋系:

$$\mathbf{S}_{3}^{r} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \tag{4}$$

此约束螺旋是一个平行于 z_B 轴的力偶矢,约束 z_B 轴方向的转动。

用螺旋理论证明了该机构的自由度是 3 ,即沿 z_A 方向平移、绕 x_A 轴和 y_A 轴转动。

第2步,用 K-G 公式加以验证:

$$F = d(n-g-1) + \sum_{i=1}^{g} f_i + v - \zeta = 3$$
 (5)

式中:并联机构的阶数 d 为 6 ,总构件数 n 为 8 ,总运动副数 g 为 9 ,冗余约束 v 为 0 ,局部自由度 为 0 ,最终的并联机构自由度 F 为 3。

螺旋理论和 K-G 公式同时验证了该并联机构具有 3 自由度。

3 并联机构的位置反解

3.1 位置反解分析

动平台的位置姿态 $[12^{-13}]$ 可以用 Z-X-Y 型欧拉角表示,即 α , β , γ 为坐标系 $\{B\}$ 相对于坐标系 $\{A\}$ 的姿态。动平台最先绕 O_A - $X_AY_AZ_A$ 的 Z_A 轴旋转 γ 角生成新的坐标系,之后在新的坐标系下绕 Y_A 轴旋转 β 角,最后绕 X_A 轴旋转 α 角,旋转矩阵可以描述为:

$$\mathbf{Rot} = \begin{bmatrix} c \ \gamma c \ \beta & c \ \gamma s \ \beta s \ \alpha - s \ \gamma c \ \alpha & c \ \gamma s \ \beta c \ \alpha + s \ \gamma c \ \alpha \\ s \ \gamma c \ \beta & s \ \gamma s \ \beta s \ \alpha + c \ \gamma c \ \alpha & s \ \gamma s \ \beta c \ \alpha - c \ \gamma s \ \alpha \\ - s \ \beta & c \ \beta s \ \alpha & c \ \beta c \ \alpha \end{bmatrix}$$

$$(6)$$

式中: s表示 sin, c表示 cos, 以下同。

由式 (2) 和 (4) 可知,该并联机构可以沿 Z_A 方向平移、绕 X_A 轴和 Y_A 轴转动,所以该并联机构旋转矩阵可表示为:

$$\mathbf{Rot} = \begin{bmatrix} \mathbf{c} \ \boldsymbol{\beta} & \mathbf{s} \ \boldsymbol{\beta} \mathbf{s} \ \boldsymbol{\alpha} & \mathbf{s} \ \boldsymbol{\beta} \mathbf{c} \ \boldsymbol{\alpha} \\ \mathbf{0} & \mathbf{c} \ \boldsymbol{\alpha} & -\mathbf{s} \ \boldsymbol{\alpha} \\ -\mathbf{s} \ \boldsymbol{\beta} & \mathbf{c} \ \boldsymbol{\beta} \mathbf{s} \ \boldsymbol{\alpha} & \mathbf{c} \ \boldsymbol{\beta} \mathbf{c} \ \boldsymbol{\alpha} \end{bmatrix}$$
(7)

动平台一点 B_i 在坐标系 $\{B\}$ 中的位置参数表示为:

$${}^{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{1} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}r\\ -\frac{1}{2}r\\ 0 \end{bmatrix}, {}^{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{2} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}r\\ -\frac{1}{2}r\\ 0 \end{bmatrix}, {}^{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{3} = \begin{bmatrix} 0\\ r\\ 0 \end{bmatrix}$$
(8)

式中:r 表示动平台中心到各个支链顶端的距离。 静平台一点 A_i 在坐标系 $\{A\}$ 中的位置参数表示为:

$${}^{A}A_{1} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}R\\ -\frac{1}{2}R\\ d_{1} \end{bmatrix}, {}^{A}A_{2} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}R\\ -\frac{1}{2}R\\ d_{2} \end{bmatrix}, {}^{A}A_{3} = \begin{bmatrix} 0\\ R\\ d_{3} \end{bmatrix}$$
(9)

式中: R 为静平台中心到各个支链底端的距离; d_1 , d_2 , d_3 为每个支链移动副的位移。

点 B_i 在坐标系 $\{A\}$ 中的位置参数表示为:

$${}^{\mathbf{A}}\mathbf{B}_{\mathbf{i}} = \mathbf{Rot} \cdot {}^{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{\mathbf{i}} + \mathbf{P} \tag{10}$$

式中: $P = (x, y, z)^{\mathrm{T}}$ 。

经过式(10)的坐标变换,点 B_i 在坐标系{A}中的位置参数表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \mathbf{B}_{1} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} r \mathbf{c} \ \beta - \frac{1}{2} r \mathbf{s} \ \beta \mathbf{s} \ \alpha + x \end{bmatrix} \\ -\frac{1}{2} r \mathbf{c} \ \alpha + y \\ \frac{\sqrt{3}}{2} r \mathbf{c} \ \beta - \frac{1}{2} r \mathbf{c} \ \beta \mathbf{s} \ \alpha + z \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \mathbf{B}_{2} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} r \mathbf{c} \ \beta - \frac{1}{2} r \mathbf{s} \ \beta \mathbf{s} \ \alpha + x \end{bmatrix} \\ -\frac{1}{2} r \mathbf{c} \ \alpha + y \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} r \mathbf{c} \ \beta - \frac{1}{2} r \mathbf{c} \ \beta \mathbf{s} \ \alpha + z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \mathbf{B}_{3} = \begin{bmatrix} r \mathbf{s} \ \beta \mathbf{s} \ \alpha + x \\ r \mathbf{c} \ \alpha + y \\ r \mathbf{c} \ \beta \mathbf{s} \ \alpha + z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \mathbf{B}_{3} = \begin{bmatrix} r \mathbf{s} \ \beta \mathbf{s} \ \alpha + x \\ r \mathbf{c} \ \alpha + y \\ r \mathbf{c} \ \beta \mathbf{s} \ \alpha + z \end{bmatrix}$$

该并联机构中存在约束关系为:

$$\begin{cases}
\mathbf{L} \cdot \mathbf{l}_1 = 0 \\
\mathbf{L} \cdot \mathbf{l}_2 = 0
\end{cases}$$
(12)

式中:L代表支链 1 和支链 2 移动副和转动副之间连杆的长度;l代表动平台的边长。

由式(12)解得:

$$\begin{cases} x = \frac{rs \alpha s \beta}{2} \\ y = \frac{R - Rr - rc \beta + r^2 c \alpha}{2r} \end{cases}$$
 (13)

则该并联机构运动学反解可以由式(14)求得:

$$\begin{cases} |||{}^{A}\boldsymbol{B}_{i} - {}^{A}\boldsymbol{\Lambda}_{i}|| = L & (i = 1,2) \\ |||{}^{A}\boldsymbol{B}_{3} - {}^{A}\boldsymbol{\Lambda}_{3}|| = d_{3} \end{cases}$$
 最终解得:

$$\begin{cases} d_1 = z \pm a + b - c \\ d_2 = z \pm a - b - c \end{cases}$$

$$\begin{cases} d_3 = \frac{\left(R - 3Rr - rc\beta + 3r^2c\alpha\right)^2 + \left(2rz + 2r^2c\beta s\alpha\right)^2 + \left(3r^2s\alpha s\beta\right)^2}{8r^2(z + rc\beta s\alpha)} \end{cases}$$
(15)

式中: $a = \sqrt{4L^2r^2 - r^2c^2\beta - 3r^4c^2\beta - R^2 - 3R^2r^2 + 2Rrc\beta + 6Rr^3c\beta}/2r$, $b = \frac{\sqrt{3}rs\beta}{2}$, $c = \frac{rc\beta s\alpha}{2}$

3.2 位置反解算例分析及验证

给并联机构取初始值 :R=70 mm ,r=70 mm ,L=40 mm ,假设该并联机构的动平台位姿为 z=-100 mm , α =30° , β =30° ,把式(15)中的所有结果经过编程输入 Matlab 中,得出该并联机构的所有反解位姿,见表 1 和图 4。

由表 1 和图 4 可知,第 1 种结果,即当 d_1 , d_2 都取正号时为有效解。

表 1 所有反解位姿参数
Tab.1 All reverse pose parameters mm

| 序号 | d_1 | d_2 | d_3 |
|----|-----------|-----------|----------|
| 1 | -45.6778 | -106.2996 | -41.1947 |
| 2 | -124.0113 | -106.2996 | -41.1947 |
| 3 | -45.6778 | -184.3661 | -41.1947 |
| 4 | -124.0113 | -184.3661 | -41.1947 |

4 工作空间分析

该并联机构的可达工作空间,是指在动平台上安装的未端执行器的位置在运行时可达到的空间区域。 末端执行器端点在动坐标系{B}中的位置可以表示为

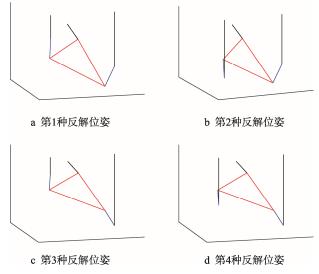


图 4 所有反解位姿 Fig.4 All reverse postures

 $G' = (0, 0, H)^T$,则末端执行器端点在静坐标系 $\{A\}$ 中的位置为:

$$G = \operatorname{Rot} \cdot G' + P = \begin{bmatrix} Hs \ \beta c \ \alpha \\ -Hs \ \alpha \\ Hc \ \beta c \ \alpha + z \end{bmatrix}$$
 (16)

在并联机构初始条件和式(15)的位置反解已知的情况下,可以通过 Matlab 编程,使用三维坐标搜索法[14—15]求解出末端执行器的端点可以达到的所有位置点,也就是该并联机构的工作空间。具体搜索参

数:沿 Z_A 方向的平移 z 范围为[-150 mm, 0 mm],绕 X_A 轴方向的转动 α 的范围为[-35° , 35°],绕 Y_A 轴方向的转动 β 的范围为[-35° , 35°]。最终的工作空间见图 5。

由图 5 可以得出,该并联机构在约束参数范围内的工作空间连续且没有出现空洞。这说明设计的2-PSR/UPU 并联机构在工作空间内的运动没有奇异位置,具有良好的运动性能。

5 旋盖实例分析

2-PSR/UPU 并联机构通过调节动平台位姿来获得不同的角度,最终应用于自动化生产线中不同倾斜角度斜面上的旋盖。对瓶体进行不同倾斜角度斜面上旋盖的仿真结果见图 6—7。

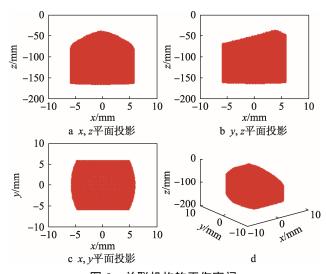


图 5 并联机构的工作空间 Fig.5 Workspace of parallel mechanism

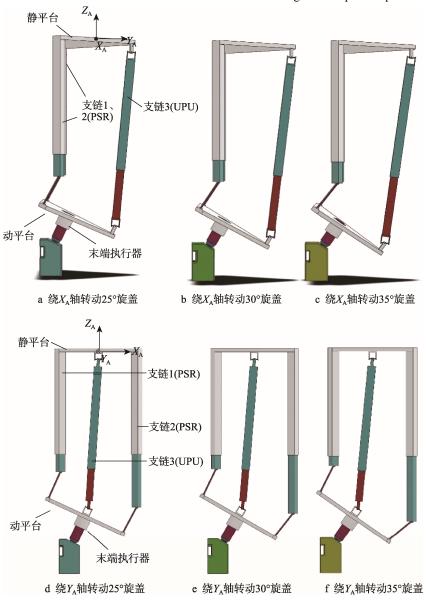


图 6 不同倾斜角度斜面上旋盖的仿真结果

Fig.6 Simulation results of capping on inclined planes with different tilt angles

该并联机构有 2 个转动,即动平台可以绕 X_A 轴和 Y_A 轴旋转。由图 6 可以看出,当并联机构绕 X_A 轴分别旋转 25° ,30°,35°时,每个支链上的移动副没有超出自己的移动范围,并且机构的每个构件之间没有干涉。同理,并联机构绕 Y_A 轴分别旋转 25° ,30°,35°时,工作正常。

6 结语

提出的 2-PSR/UPU 三自由度并联机构过约束少,具有非对称并联机构的优点。该并联机构有沿 Z_A 方向的移动、绕 X_A 和 Y_A 轴的转动。用定杆长约束条件得到了其位置反解表达式,并且用反解算例验证了其正确性,分析了其工作空间,证明其运动性能良好。该并联机构可以解决自动化生产线中不同倾斜角度斜面上旋盖的问题。

参考文献:

- [1] SHAO Jie-jie, CHEN Wen-yu, FU Xin. Position, Singularity and Workspace Analysis of 3-PSR-O Spatial Parallel Manipulator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(3): 437—450.
- [2] ABOULISSANE B, HAIEK D E, BAKKALI L E. 3-UPU Robotic Mechanism Performance Evaluation Through Kinematic Indexes[J]. Procedia Manufacturing, 2018(22): 468—475.
- [3] 杨彦东, 甄春江, 侯雨雷, 等. 对称单自由度螺旋运动并联机构型综合[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 27—33. YANG Yan-dong, ZHEN Chun-jiang, HOU Yu-lei, et al. Type Synthesis of Structural Symmetry One Degree-of-freedom of Helical Motion Parallel Mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 27—33.
- [4] 张伟中, 徐灵敏, 童俊华, 等. 2-PUR-PSR 并联机构 的运动学分析及尺度综合[J]. 机械工程学报, 2018, 54(7): 45—53. ZHANG Wei-zhong, XU Ling-min, TONG Jun-hua, et

al. Kinematic Analysis and Dimensional Synthesis of 2-PUR-PSR Parallel Manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(7): 45—53.

- [5] 黄秀琴,辛秀梅,沈惠平.一种新颖一平移二转动并 联机构的位置与结构参数分析[J].机械设计,2014, 31(12):41—44.
 - HUANG Xiu-qin, XIN Xiu-mei, SHEN Hui-ping. Structure Parameters and Place Analysis of a Novel 1-translation and 2-rotation Parallel Mechanism[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(12): 41—44.
- [6] 田海波,马宏伟,马琨,等.一种三构态变胞并联机构运动学及工作空间分析[J]. 机器人,2019,41(3):414—424.
 - TIAN Hai-bo, MA Hong-wei, MA Kun, et al. Kine-

- matics and Workspace Analysis of a Metamorphic Parallel Mechanism with Three Configurations[J]. Robot, 2019, 41(3): 414—424.
- [7] 孟宏伟. 基于非对称 3-UPU 并联机构的六足步行机器人的研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.

 MENG Hong-wei. Research on Hexapod Walking Robot Based on Asymmetric 3-UPU Parallel Mechanism[D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [8] ZHAO Yan-zhi, LIANG Bo-wen. The Constant Balancing 6UPS/(3PRRR)+S Parallel Mechanism and Its Balancing Performance Analysis[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 126: 79—91.
- [9] WANG Li-ping, XU Hua-yang. A Novel 3-PUU Parallel Mechanism and Its Kinematic Issues[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016(42): 86—102.
- [10] WANG Li-ping, XU Hua-yang. Optimal Design of a 3-PUU Parallel Mechanism with 2R1T DOFs[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 114: 190—203.
- [11] 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, 2014.
 HUANG Zhen, ZHAO Yong-sheng, ZHAO Tie-shi. Advanced Spatial Mechanism[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [12] 张俊辕, 马春生, 李瑞琴, 等. 2-RPU/UPR 并联机构的自由度与工作空间分析[J]. 包装工程, 2018, 39(23): 138—142.

 ZHANG Jun-yuan, MA Chun-sheng, LI Rui-qin, et al. Degree of Freedom and Working Space of 2-RPU/UPR Parallel Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(23): 138—142.
- [13] 李虹,李亚丽,李瑞琴,等. 新型单支链含球铰闭环并联机构的位置分析[J]. 包装工程,2018,39(23):158—163.

 LI Hong, LI Ya-li, LI Rui-qin, et al. Position of New Single-branch Closed-loop Parallel Mechanism with Ball Joints[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(23):158—163.
- [14] 刘小娟, 李虹, 汪辉, 等. 3-RRP 平面并联机构的工作空间和灵巧度分析[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2016, 42(4): 523—526.

 LIU Xiao-juan, LI Hong, WANG Hui, et al. Workspace and Dexterity Analysis of 3-RRP Planar Parallel Mechanism[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2016, 42(4): 523—526.
- [15] 丁泽华,董虎,王见,等. 五自由度混联机构运动学及工作空间分析[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2019, 45(1): 102—108.

 DING Ze-hua, DONG Hu, WANG Jian, et al. Kinematic Analysis and Workspace of 5-DOF Hybrid Mechanism[J]. Journal of Donghua University (Natural

Science), 2019, 45(1): 102-108.