

可变胞混联机械手臂构型设计与刚度特性分析

王翹楚¹, 张静^{2,3}, 史创⁴, 寇子明¹, 郭宏伟⁴, 刘荣强⁴

(1. 太原理工大学机械工程学院, 030024, 太原; 2. 燕山大学机械工程学院, 066004, 河北秦皇岛;

3. 河北省轻质结构装备设计与制备工艺技术创新中心, 066004, 河北秦皇岛;

4. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 150001, 哈尔滨)

摘要: 针对工业转运机器人普遍存在的末端轨迹误差大, 多种转运需求难以适应等问题, 基于混联机构和变胞机构的思想, 设计了一种具有两种运动模式的可变胞混联机械手臂, 并对腕部、肩部空间机构进行了刚度特性分析与优化。基于螺旋理论, 根据自由度需求完成腕部和肩部机构的拓扑构型综合设计, 继而通过变胞设计, 实现运动模式切换。基于并联机构刚度叠加原理, 建立了腕部、肩部机构的关节刚度模型, 并以补偿误差为目的, 提出腕部和肩部机构的刚度设计目标。以拓扑尺寸为设计变量, 将刚度模型与刚度设计目标进行匹配, 分析设计变量对刚度特性的影响, 从而确定拓扑尺寸的设计方向。利用 ANSYS 软件对腕部和肩部机构进行静力学仿真, 得到各个机构的关节最大变形量。仿真结果表明: 在恒定载荷下, 腕部机构拓扑尺寸调整后关节最大变形量增幅达 2.85%~121.21%; 肩部机构拓扑参数变化后各最大变形量降幅达 3.18%~19.75%, 验证了拓扑尺寸设计方向与机构的刚度设计方向一致。该研究为机构多目标优化以及误差补偿方法提供了参考。

关键词: 混联机构; 螺旋理论; 变胞机构; 关节刚度模型; 误差补偿; 拓扑尺寸

中图分类号: TP242; TH112 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202507014 **文章编号:** 0253-987X(2025)07-0140-10

Configuration Design and Stiffness Characteristics Analysis of Metamorphic Hybrid Robot Arm Mechanism

WANG Qiaochu¹, ZHANG Jing^{2,3}, SHI Chuang⁴, KOU Ziming¹,

GUO Hongwei⁴, LIU Rongqiang⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of

Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China; 3. Hebei Innovation

Center for Equipment Light Weight Design and Manufacturing, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

4. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To address the common issues of large end-effector trajectory errors and the difficulty in meeting diverse transport requirements in industrial transfer robots, based on the ideas of hybrid and metamorphic mechanisms, a metamorphic hybrid robotic arm with two motion modes is designed. The stiffness characteristics of the wrist and shoulder spatial mechanisms are analyzed and optimized. Based on screw theory and the required degrees of freedom, a topological design of the wrist and shoulder mechanisms is completed, followed by mode switching through metamorphic

收稿日期: 2024-12-02。 作者简介: 王翹楚(1998—), 男, 硕士生; 张静(通信作者), 女, 副教授, 硕士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3407101); 山西省科技创新领军人才团队资助项目(202204051002003); 海安太原理工大学先进制造与智能装备产业研究院开放研发资助项目(2023HA-TYUTKFYF026)。

网络出版时间: 2025-03-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250312.1105.002>

design. Using the principle of stiffness superposition for parallel mechanisms, joint stiffness models for the wrist and shoulder mechanisms are established, and stiffness design objectives are proposed to compensate for errors. Topological dimensions are treated as design variables, and the stiffness models are matched with the stiffness design objectives to analyze the impact of design variables on stiffness characteristics, thereby determining the design direction for topological dimensions. Static simulations of the wrist and shoulder mechanisms are conducted using ANSYS software to obtain the maximum joint deformation of each mechanism. The simulation results indicate that, under a constant load, the maximum joint deformation of the wrist mechanism increases by 2.85% to 121.21% after adjusting the topological dimensions. In contrast, the maximum deformation of the shoulder mechanism decreases by 3.18% to 19.75% following changes in topological parameters. These simulation results verify that the design direction of topological dimensions is consistent with the stiffness design direction of the mechanisms. This study provides a reference for multi-objective optimization of mechanisms and error compensation methods.

Keywords: hybrid robot; spiral theory; metamorphic mechanism; joint stiffness model; error compensation; topological dimensions

早期的工业机器人可分为串联和并联机器人。串联机器人具有工作空间大、可避免驱动轴相互耦合的优点,但存在弹性变形较大、误差叠加、运动精度低等缺点^[1-2]。并联机器人具有刚度大、结构稳定、承载能力强、精度高、运动范围小等特点^[3]。显然,两种机器人的特点具有互补的关系。因此,拥有大刚度和高灵活性的混联机构受到广泛关注。

空间混联机构结构复杂,许多学者对空间混联机构的自由度分析^[4]和构型综合方法^[5-6]进行了探索。Romdhane^[7]将两个并联机构串联,得到一种类steward平台,两个并联机构分别具有3个移动和3个转动自由度,因此该平台可实现空间6自由度运动。Shen等^[8]通过并联机构分支拆分和等效复制的方式,综合出了一系列6自由度的并联机构,同时将混联机构自由度进行合理分配,提出基于自由度分配和方位特征集的混联机器人构型设计方法^[9]。学者们对混联机构拓扑结构的拆分与简化进行了大量的研究,但对其力学性能的研究还很少。

机器人的刚度特性是评估机器人性能和生产效率的重要指标,直接影响了机器人末端轨迹的精度及误差^[10-14],因此对混联机构的刚度特性进行分析尤为重要。机构的刚度特性与材料、拓扑、构件尺寸和几何形状等因素有关。Lum等^[15]提出了一种结构优化方法来综合和优化并联机构子链的拓扑、形状和尺寸,以获得最佳的刚度特性。文献^[16-19]定义了刚度矩阵加权因子,将刚度矩阵的对角元作为目标函数,实现3自由度和6自由度并联机构的刚度优化设计。同样,Kang等^[20]采用不同方向刚度

的加权和来定义刚度度量,并对2自由度并联机构进行了可操纵性和刚度优化设计。然而,对于如何提高机器人末端轨迹精度和减小误差,学者们探索了末端控制技术^[21-22]、机器学习及深度学习^[23-24]、视觉反馈^[25]等方法,但并未将刚度优化与误差结合,从刚度特性设计角度进行误差控制。

本文提出了一种用于工程转运的可变胞混联机械手臂的基本构型,并通过自由度分析,设计了两种3自由度空间并联机构分别作为机械手臂的腕部和肩部。对腕部机构提出了误差补偿设计目标,使其通过关节柔性变形来补偿末端与物料之间的误差。对肩部机构进行变胞重构设计以增强工况适应性,同时提出高刚度的设计目标以减小误差。利用螺旋理论构建并联机构总刚度模型,并将总刚度模型与设计目标进行刚度匹配,得到机构拓扑尺寸的设计方向。

1 混联机器人机械手臂构型设计

1.1 混联机械手臂设计

为解决机械手臂运动轨迹误差大的问题,利用混联机构的思想,结合空间并联机构及平面连杆机构,设计了混联机构机械手臂的基本构型,如图1所示。

该机械手臂为肩部、大小臂和腕部混联构型。具体的:肩部采用空间并联机构作为核心承载模块,兼顾高刚度支撑和大幅转动俯仰功能,静平台固接基座,动平台连接大小臂机构;大小臂配置10杆12副平面连杆机构作为高效传动模块,可进行大幅俯

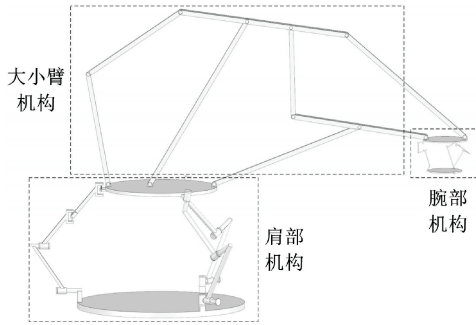


图1 混联机械手臂基本构型

Fig. 1 Basic configuration of hybrid robotic arm

仰运动,其输出端与腕部静平台相连;腕部采用空间并联机构作为误差补偿终端,具有较好的灵活性和误差补偿的功能,其动平台驱动末端执行器。该架构融合并联机构的高刚度、高承载特性和平面连杆的高效传动优势,有效解决了传统串联机械臂的刚性和灵活性之间的矛盾。

1.2 腕部并联机构构型设计

腕部机构作为末端执行器的直接驱动模块,采用3R并联构型设计,具有高运动灵活性和补偿角度误差的能力。机构的3个移动自由度定义为 T_x 、 T_y 、 T_z ,3个绕轴转动自由度定义为 R_x 、 R_y 、 R_z 。基于螺旋理论和少自由度并联机构设计原理,根据自由度需求对腕部并联机构进行设计。

3R 并联机构的运动螺旋系标准基为

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1 = [1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ \mathbf{R}_2 = [0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ \mathbf{R}_3 = [0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0] \end{cases} \quad (1)$$

基于运动链最简原则,结合标准基运动螺旋的自由度方向,采用周向对称排布于动静平台间的3个相同的分支作为机构支链。为提高腕部灵活性,基于标准基,将分支设计为4R支链, S_2 、 S_3 、 S_4 轴线相交于坐标原点,轴线两两共面,如图2所示。固定平台半径为 r_1 ,动平台半径为 r_2 ,坐标原点到动平台高为 h ; a_1 、 b_1 、 c_1 表示 S_3 轴线的单位矢量在 x 、 y 、 z 轴的映射,满足 $a_1^2 + b_1^2 + c_1^2 = 1$,3分支呈 120° 圆周对称分布,尺寸标注以及机构坐标系如图2和图3所示。

L_1 分支螺旋系表达为

$$\begin{cases} \mathbf{S}_1 = [0 & 0 & 1 & -r_1 & 0 & 0] \\ \mathbf{S}_2 = [0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ \mathbf{S}_3 = [a_1 & b_1 & c_1 & 0 & 0 & 0] \\ \mathbf{S}_4 = [0 & -\frac{r_2}{A} & \frac{h}{A} & 0 & 0 & 0] \end{cases} \quad (2)$$

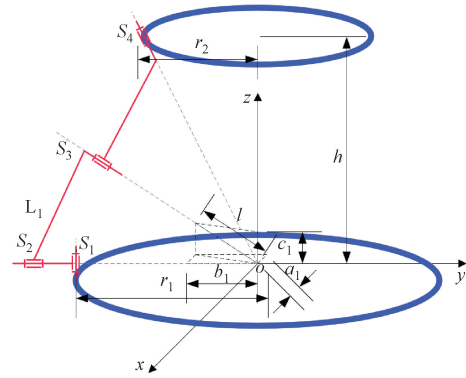


图2 分支运动副分布及尺寸标注

Fig. 2 Distribution and dimensioning of branch motion pairs

式中: $A = \sqrt{r_2^2 + h^2}$ 。

根据螺旋理论的螺旋互逆积,可得式(2)的2个反螺旋,分别为

$$\begin{cases} \mathbf{S}_1^i = [0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ \mathbf{S}_2^i = [0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0] \end{cases} \quad (3)$$

两个反螺旋表示 y 向和 z 向的约束力,位置均过原点,如图3中 F_1 和 F_2 。 L_2 、 L_3 分支与 L_1 相同,约束力也与 L_1 相同,约束力方向相隔 120° ,如图3中 F_2 、 F_3 和 F_1 。

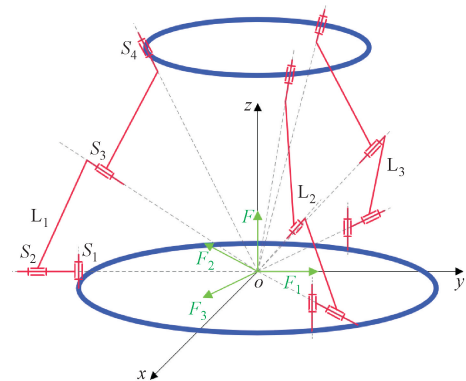


图3 腕部并联机构所有反螺旋位置

Fig. 3 All anti helix positions of the parallel mechanism

该机构3个相同约束力 F 限制了 T_z ,为公共约束。 xoy 平面上的力 F_1 、 F_2 、 F_3 线性相关,秩为2,存在1个冗余约束,其共同限制了 T_x 、 T_y ,经约束分析,该机构为3转动自由度机构。

根据修正的 Grübler-Kutzbach 公式 $M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v$,该机构公共约束 $\lambda = 1$,阶数 $d = 6 - \lambda = 5$,冗余约束 $v = 1$,构件数 $n = 11$,关节数 $g = 12$, $\sum_{i=1}^g f_i = 12$,计算得到机构的自由度为3。

计算得到的机构自由度与螺旋理论约束分析得到的机构自由度一致,因此该机构符合设定的3转动自由度。机构的运动输入量为 $[\varphi_1 \quad \delta_1 \quad \theta_1]$,其中 $\varphi_1, \delta_1, \theta_1$ 分别代表 $L_1 \sim L_3$ 分支 S_2 角位移。

1.3 肩部可变胞并联机构构型设计

针对工业转运机器人典型的抓取堆垛与回转运输双重作业模式需求,基于变胞理论,构建了一种具有双运动模式的2T1R肩部并联机构,并对其进行尺寸标注,如图4所示。

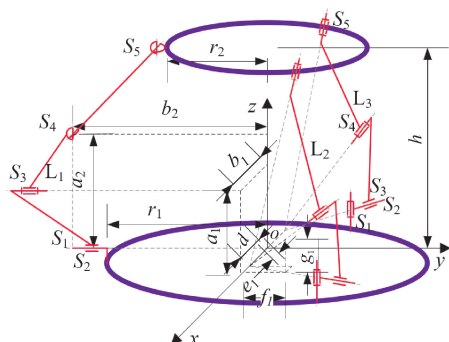


图4 分支运动副分布及尺寸标注

Fig. 4 Distribution and dimensioning of branch motion pairs

L_1 分支为CRUU支链,是肩部机构的可变胞支链,C代表圆柱副,R代表转动副,U代表万向节,其中的两个万向节转轴为 x 轴和 z 轴。 L_2 和 L_3 为RCRR支链,其中的 S_2, S_3, S_4, S_5 关节轴线交于一点,分支以及交点均关于 yoz 平面对称。

如图5所示, L_2 和 L_3 分支的约束为 z 向约束力,如图中 F_2, F_3 ,约束了机构 T_z 和 R_y 两个自由度。 L_1 分支的两个万向节是支链的变胞位置。变胞构态1的万向节 R_x 生效, R_z 失效, L_1 提供 z 向约束力偶 T_1 ,机构自由度为 R_x, T_x, T_y 。变胞构态2的万向节 R_z 生效, R_x 失效, L_1 提供 x 向约束力偶 T_2 ,机构自由度为 R_z, T_x, T_y 。

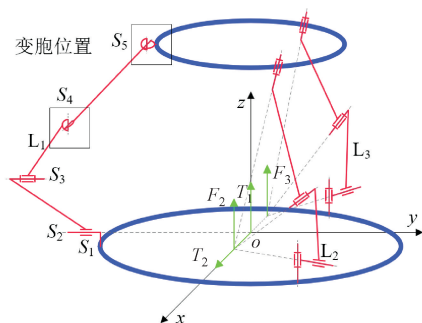


图5 肩部并联机构所有反螺旋位置

Fig. 5 All anti helix positions of shoulder parallel mechanism

机构在两种状态下均不存在公共约束和冗余约束,则 $\lambda = 0, d = 6, v = 0, n = 11, g = 12, \sum_{i=1}^g f_i =$

15,经计算可得机构自由度为3。计算结果与设计构思一致,符合设定的自由度要求。变胞构态1时,机构的运动输入量为 $[\varphi_2 \quad u_2 \quad \theta_2]$,变胞构态2时,机构的运动输入量为 $[u_2 \quad \delta_2 \quad \theta_2]$ 。其中, φ_2, u_2 代表 L_1 分支 S_1 角位移和 S_2 的线位移, δ, θ_2 代表 L_2, L_3 分支 S_2 角位移。

2 拓扑尺寸影响下的刚度特性分析

以补偿误差为目的,对前文设计的腕部、肩部并联机构提出了刚度设计目标,并通过改变拓扑尺寸以达到设计目标。然而,确定拓扑尺寸需要通过机构刚度建模和分析来实现。

2.1 空间并联机构关节刚度模型建立

基于并联机构刚度可叠加原理推导的并联机构总刚度矩阵,对腕部和肩部并联机构的总刚度矩阵进行数学建模。

腕部机构总刚度矩阵可通过一个分支的刚度矩阵旋转叠加得到。以 L_1 为例,分支中具有4个转动副。定义 L_1 的螺旋矩阵为

$$J_1 = [J_{11} \quad J_{21} \quad J_{31} \quad J_{41}] \quad (4)$$

同式(2), $J_{11} = S_1^T, J_{21} = S_2^T, J_{31} = S_3^T, J_{41} = S_4^T$ 。螺旋向量 $J_{1i} (i = 1, 2, \dots, 6)$ 的6个值可视为6个自由度方向, L_1 分支仅有4个自由度,在进行6自由度方向刚度特性分析时不全面,因此增加两个线性无关的螺旋列向量。根据式(3),两个线性无关的螺旋列向量为

$$\begin{cases} J_{51} = (S_1')^T \\ J_{61} = (S_2')^T \end{cases} \quad (5)$$

则 L_1 对应的满秩 6×6 螺旋矩阵为

$$J_1 = [J_{11} \quad J_{21} \quad J_{31} \quad J_{41} \quad J_{51} \quad J_{61}] \quad (6)$$

螺旋向量中的未知数为拓扑尺寸值。设定分支4个关节的关节刚度系数为 k_1, k_2, k_3, k_4 。新增螺旋属于被约束螺旋,因此对应的关节刚度为 ∞ 。则分支关节刚度系数矩阵为

$$\text{diag}[k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad \infty_1 \quad \infty_2] \quad (7)$$

刚度矩阵求解公式表示为

$$K_{L_j} = (J_j^T)^{-1} \text{diag}[k_{1j}, k_{2j}, \dots, k_{nj}] J_j^{-1} \quad (8)$$

将式(6)和(7)代入到式(8),得到 L_1 的刚度矩阵 K_1 为

$$K_1 = (J_1^T)^{-1} \text{diag}[k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad \infty_1 \quad \infty_2] J_1^{-1} \quad (9)$$

此外, L_2 和 L_3 的刚度矩阵利用旋转矩阵求得。通过旋转矩阵求其他分支刚度矩阵时, 6 个方向的位姿元素均进行了旋转, 因此绕 z 轴旋转的旋转矩阵 $R_z(\varphi)$ 为

$$\begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: φ 为旋转角。

L_1 与 L_2 之间 $\varphi_2 = 2\pi/3$, 与 L_3 分支之间 $\varphi_3 = -2\pi/3$ 。则 L_2 的螺旋矩阵为

$$J_2 = [J_{12} \ J_{22} \ J_{32} \ J_{42} \ J_{52} \ J_{62}] \quad (11)$$

式中: $J_{i2} = R_z(\varphi_2) J_{i1}$ 。故得到

$$J_2 = R_z(\varphi_2) J_1 \quad (12)$$

同样可得 J_3 。结合式(7)、(9)、(12), 可得 L_2 、 L_3 分支的刚度矩阵 K_2 、 K_3 为

$$K_2 = R_z(\varphi_2) K_1 R_z^{-1}(\varphi_2) \quad (13)$$

$$K_3 = R_z(\varphi_3) K_1 R_z^{-1}(\varphi_3) \quad (14)$$

根据并联机构分支的刚度叠加原理, 腕部并联机构总刚度矩阵 K 为

$$K = K_1 + K_2 + K_3 \quad (15)$$

刚度矩阵的主对角线元素反映了机构特定方向上的刚度, 非对角线元素表示某一方向单位位移引起的在另一方向上的力。本文主要研究机构在 6 个自由度方向上的刚度特性, 因此仅分析主对角线元素。主对角线元素从上至下依次定义为 u 、 v 、 w 、 x 、 y 、 z , 前 3 个表示 3 个转动方向刚度值, 后 3 个表示 3 个移动方向刚度值。

同样对肩部并联机构进行刚度建模。由于肩部机构 L_1 与 L_2 、 L_3 的关节不相同, 因此将 L_2 、 L_3 通过刚度叠加得到这两个分支的总刚度矩阵为 K_2 , 再对 L_1 变胞前后分别进行建模, 得到变胞构态 1 的关节刚度矩阵为 K_{1x} , 变胞构态 2 的关节刚度矩阵为 K_{1z} 。

2.2 并联机构关节刚度的设计目标

图 6 为末端执行器与物料间的全类型位姿误差。本设计通过腕部关节的微变形实现误差补偿: 当执行器与物料存在位姿误差并产生力或力矩时, 机构将发生相应方向的弹性形变以消除偏差。基于此补偿机理, 腕部需在 u 、 v 、 w 、 x 、 y 方向保持低刚度特性。同时, 为提升承载方向稳定性, 在物料抓取 z

方向采用高刚度设计。对应的刚度设计目标为

$$M_1 = \text{diag}[\downarrow \ \downarrow \ \downarrow \ \downarrow \ \downarrow \ \uparrow] \quad (16)$$

式中: $\downarrow$ 为低刚度; $\uparrow$ 为高刚度。

作为混联机械手臂的承载根基, 肩部机构需具备全方向高刚度特性以应对高承载工况。根据动态载荷分布特征, 优先强化 u 、 y 、 z 承重方向的刚度配置。对应的刚度设计目标为

$$M_2 = \text{diag}[\uparrow \ \uparrow \ \uparrow \ \uparrow \ \uparrow \ \uparrow] \quad (17)$$

式中: $\uparrow$ 为重要高刚度; $\uparrow$ 为次要高刚度。

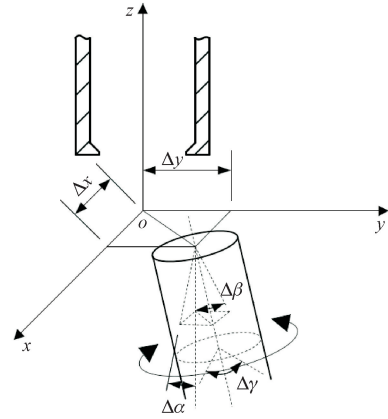


图 6 全类型位姿误差

Fig. 6 All types of position and posture errors

2.3 并联机构刚度矩阵特性分析与仿真验证

为分析拓扑尺寸变化对刚度模型的影响, 要对拓扑尺寸进行初步赋值以及定义尺寸变化范围。腕部并联机构拓扑尺寸包含 r_1 、 r_2 、 a_1 、 b_1 、 c_1 、 h , 初始值与变化区间见表 1。此外, 令关节刚度系数 $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 1$, 腕部机构刚度矩阵 K 的 x 、 y 、 z 元素包含 ∞ 的刚度系数, 则不做研究。在尺寸变化区间内取多个变量作为刚度特性分析的研究对象, 基于这些取值, 计算得到 u 、 v 、 w 方向对应的刚度, 并绘制了点线图, 如图 7 所示。

表 1 腕部机构拓扑尺寸初始值及变化区间

Table 1 Initial values and variation intervals of topological dimensions of wrist mechanism

拓扑尺寸	初始值	变化区间
r_1/mm	200	
r_2/mm	150	[50 250]
a_1/mm	$-3/\sqrt{50}$	$ a_1 \in [0, 1]$
b_1/mm	$-1/\sqrt{10}$	$ b_1 \in [0, 1]$
c_1/mm	$6/\sqrt{50}$	[0, 1]
h/mm	250	[150, 350]

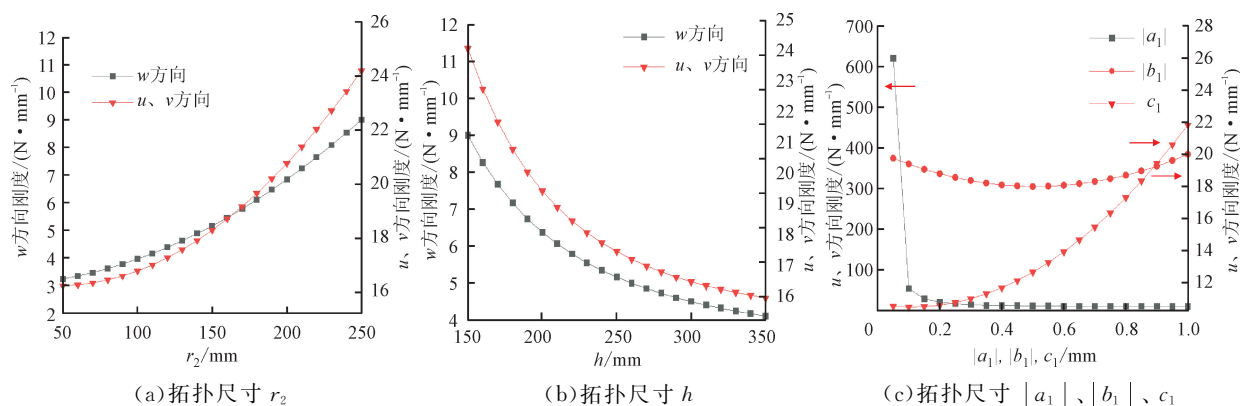
图 7 腕部机构 u 、 v 、 w 方向刚度变化趋势Fig. 7 Trend of stiffness changes in the u , v , and w directions of the wrist mechanism

图 7(a)、(b)显示刚度值随 r_2 单调递增,随 h 单调递减,结合式(16)设计目标 $\mathbf{M}_1$,得到 r_2 应取小值, h 取大值。图 7(c) 中刚度随 $|b_1|$ 非单调变化,随 $|a_1|$ 、 c_1 单调变化,则 $|a_1|$ 取大值, c_1 取小值。但 $|a_1|$ 对刚度变化的灵敏度较低,故首先将 c_1 取小,再根据 $|b_1|$ 曲线将 $|b_1|$ 取大,最后结合 $a_1^2 + b_1^2 + c_1^2 = 1$,得到 $|a_1|$ 。综合分析表明,为实现机构刚度的

定向改变, r_2 、 $|a_1|$ 、 $|b_1|$ 应取相对大于初始值的值, h 和 c_1 应取相对小于初始值的值,并存在 $a_1^2 + b_1^2 + c_1^2 = 1$ 的约束条件。

对各尺寸参数进行对照取值,并在相同的受力情况下通过机构最大变形量,验证尺寸变化后机构刚度是否满足设计需要。尺寸参数的对照取值见表 2。

表 2 腕部机构拓扑尺寸变化前后变形量的对比

Table 2 Comparison data of deformation before and after topology size optimization of wrist mechanism

组别	r_2/mm	h/mm	$ a_1 /\text{mm}$	$ b_1 /\text{mm}$	c_1/mm	最大变形量/ mm	变形量增幅/%
初始组	150	250	0.42	0.32	0.85	19.66	0
对照组 1	100	250	0.42	0.32	0.85	20.22	2.85
对照组 2	150	300	0.42	0.32	0.85	21.18	7.73
对照组 3	150	250	0.59	0.71	0.39	43.49	121.21

在 ANSYS 软件中导入机构三维模型,设定构件材料为结构钢,摩擦系数为 0.2,在动平台施加 x 、 y 方向各 50 N 载荷,在 x 、 y 、 z 方向施加各 $7.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 力矩,以此进行静态结构仿真。仿真得到腕部机构不同尺寸组的最大变形量等数据见表 2。仿真结果表明,对照组的关节最大变形量相较于初始变形量均有所增加,增幅比例达 2.85%~121.21%。这表示在尺寸改变后,当抓手与物料之间存在误差并接触产生力或力矩时,机构将更容易发生相应方向的弹性形变以消除偏差,满足设计要求,同时也验证了拓扑尺寸设计方向的正确性。

同样对肩部机构的变量取值以进行刚度特性分析,表 3 为拓扑尺寸初始值以及尺寸变化区间。关节刚度系数 $k_8 = 0.5$, $k_7 = k_9 = k_{10} = k_{11} = 1$ 。矩阵 $\mathbf{K}_{1x}$ 的 v 、 y 和 w 元素不受拓扑尺寸影响,因此不做分析,计算 u 、 x 、 z 随拓扑尺寸变化的趋势并绘制点线图,如图 8 所示。同样,矩阵 $\mathbf{K}_{1z}$ 去除掉固定以及无穷

大元素,计算 w 、 x 、 z 随拓扑尺寸变化的趋势并绘制点线图,如图 9 所示。

表 3 肩部机构拓扑尺寸初始值及变化区间

Table 3 Initial values and variation intervals of topological dimensions of shoulder mechanism

拓扑尺寸	初始值	变化区间
r_1/mm	750	[250, 1 250]
r_2/mm	500	[100, 900]
h/mm	1 400	[900, 1 900]
a_1/mm	500	[100, 900]
b_1/mm	250	[50, 450]
a_2/mm	900	[400, 1 400]
b_2/mm	800	[300, 1 300]
d/mm	250	[50, 450]
e_1/mm	$4/\sqrt{50}$	[0, 1]
f_1/mm	$3/\sqrt{50}$	[0, 1]
g_1/mm	$5/\sqrt{50}$	[0, 1]

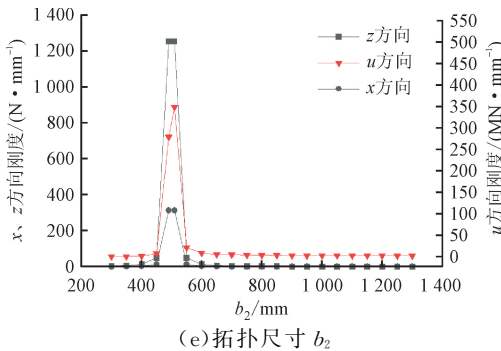
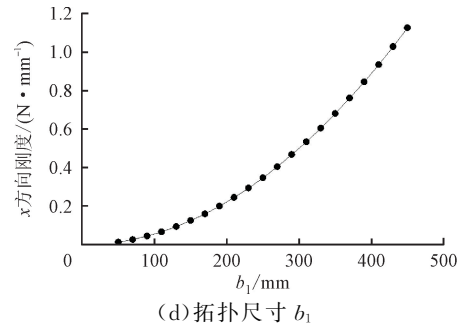
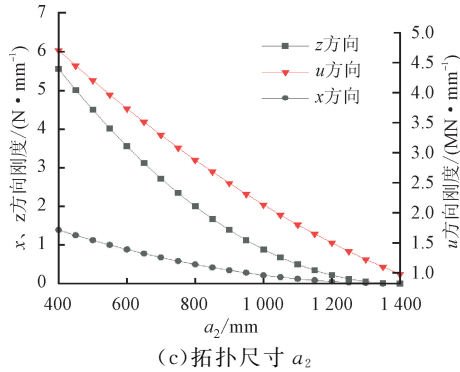
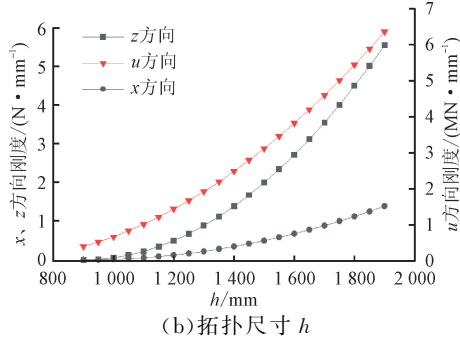
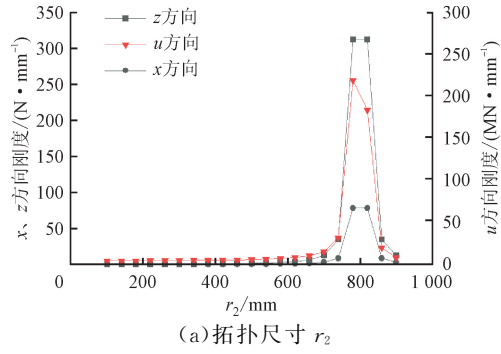


图8 刚度矩阵 $\mathbf{K}_{1x}$ 在 u, x, z 方向刚度变化趋势

Fig. 8 Trend of stiffness variation of stiffness matrix $\mathbf{K}_{1x}$ in u, x , and z directions

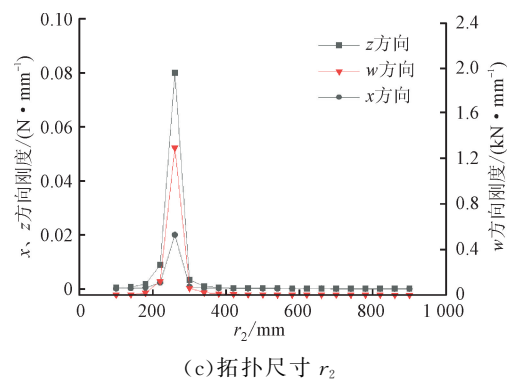
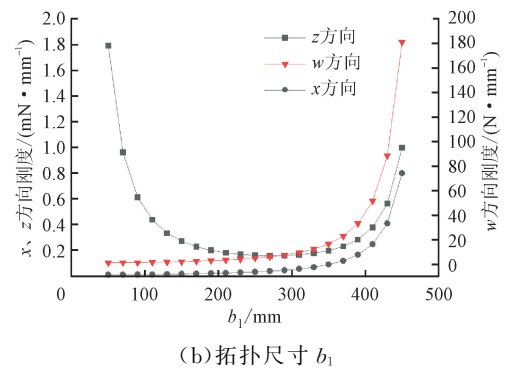
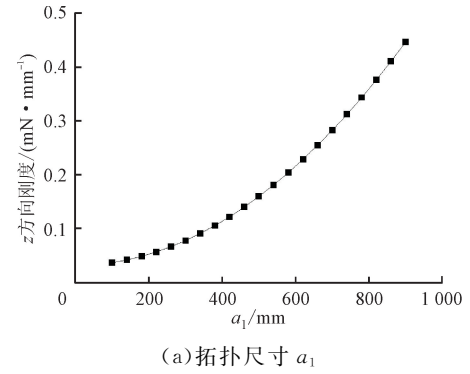


图9 刚度矩阵 $\mathbf{K}_{1z}$ 在 w, x, z 方向刚度变化趋势

Fig. 9 Trend of stiffness variation of stiffness matrix $\mathbf{K}_{1z}$ in w, x , and z directions

式(17)中 $\mathbf{M}_2$ 的高刚度设定存在优先级,故当刚度随拓扑尺寸的变化存在相悖的趋势时,优先选择 u, y, z 元素增大时对应的尺寸取值。结合图8、9,得到拓扑尺寸 h 应取大值、 a_2 取小值、 a_1 取大值。矩阵 $\mathbf{K}_{1z}$ 的 w 元素分子存在多项式 $b_1^2 + r_2^2$,结合图8(a)可知 r_2 取大值。部分对角线元素的分子中存在因式 $(r_2 - b_2)^2, (r_2 - b_1)^2$,则 b_2, b_1 值应靠近 r_2 。最后,分析矩阵 $\mathbf{K}_2$ 的 u, w, x, y 元素的变化趋势。变化趋势的点线图如图10~图16所示。

根据图10~图13,得到拓扑尺寸 r_1, h 取大值, d 取小值。图11中 r_2 出现相悖的变化趋势,结合 $\mathbf{M}_2$ 中的重要高刚度优先设定,将拓扑尺寸 r_2 取大值。根据图14、图15可知, g_1 影响趋势为单调递减,因此应取小值, f_1 和 e_1 则是相反的取值趋势,则优先

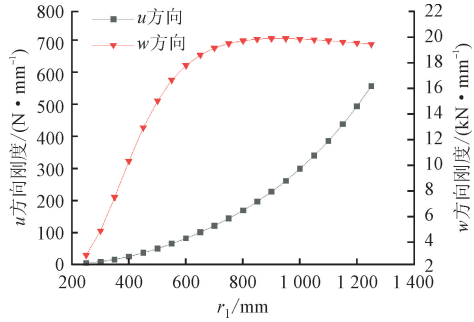


图 10 刚度矩阵 $\mathbf{K}_2$ 随拓扑尺寸 r_1 的变化趋势
Fig. 10 Variation trend of stiffness matrix $\mathbf{K}_2$ with topological size r_1

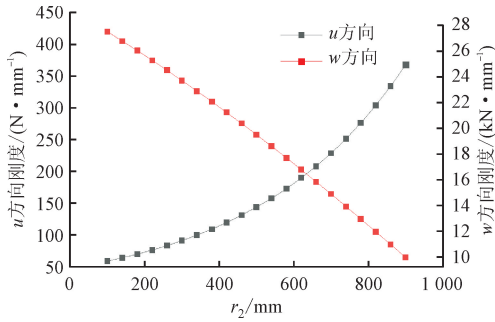


图 11 刚度矩阵 $\mathbf{K}_2$ 随拓扑尺寸 r_2 的变化趋势
Fig. 11 Variation trend of stiffness matrix $\mathbf{K}_2$ with topological size r_2

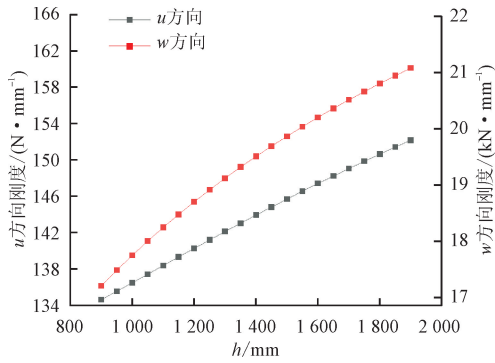


图 12 刚度矩阵 $\mathbf{K}_2$ 随拓扑尺寸 h 的变化趋势
Fig. 12 Variation trend of stiffness matrix $\mathbf{K}_2$ with topological size h

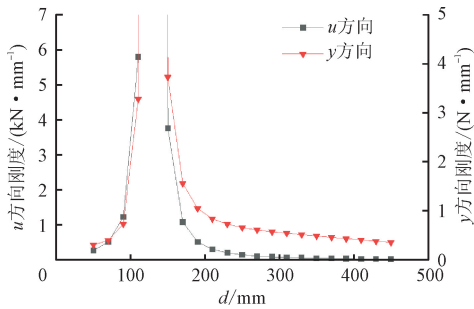


图 13 刚度矩阵 $\mathbf{K}_2$ 随拓扑尺寸 d 的变化趋势
Fig. 13 Variation trend of stiffness matrix $\mathbf{K}_2$ with topological size d

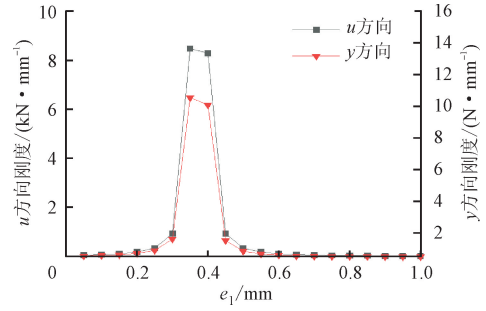


图 14 刚度矩阵 $\mathbf{K}_2$ 随拓扑尺寸 e_1 的变化趋势
Fig. 14 Variation trend of stiffness matrix $\mathbf{K}_2$ with topological size e_1

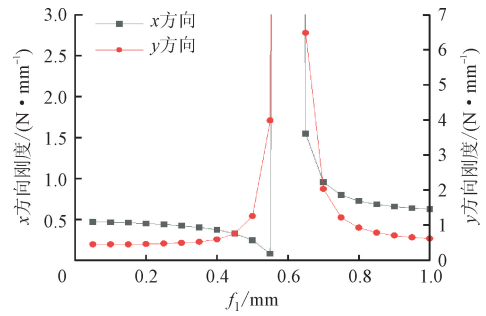


图 15 刚度矩阵 $\mathbf{K}_2$ 随拓扑尺寸 f_1 的变化趋势
Fig. 15 Variation trend of stiffness matrix $\mathbf{K}_2$ with topological size f_1

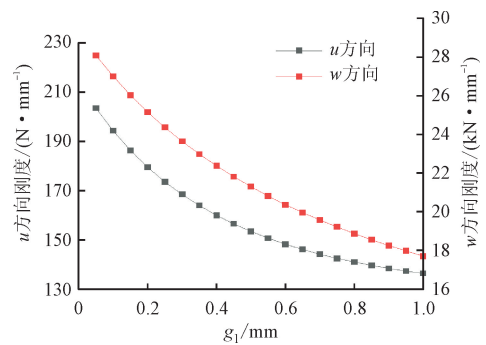


图 16 刚度矩阵 $\mathbf{K}_2$ 随拓扑尺寸 g_1 的变化趋势
Fig. 16 Variation trend of stiffness matrix $\mathbf{K}_2$ with topological size g_1

对 g_1 进行赋值,然后结合 $e_1^2 + f_1^2 + g_1^2 = 1$ 确定 f_1 、 e_1 的尺寸。综合分析表明, r_1 、 r_2 、 h 、 a_1 、 f_1 应取相对大于初始值的值, d 、 a_2 、 e_1 、 g_1 应取相对小于初始值的值,而 b_2 、 b_1 应趋近于 r_2 ,此外存在 $e_1^2 + f_1^2 + g_1^2 = 1$ 的约束条件。

对各尺寸参数取对照尺寸并建立对应的机构三维模型。在 ANSYS 软件中导入肩部机构三维模型,设定肩部机构动平台在 z 方向上施加 500 N 的力以及 x 方向上 $-1\,000\text{ N}\cdot\text{m}$ 的力矩。仿真得到不同组的最大变形量见表 4。仿真结果表明,对照

组的关节最大变形量相较于初始变形量均有所减小,降幅达 3.18%~19.75%,表明上述拓扑尺寸的改变可以增强刚度并抑制变形,验证了拓扑尺寸设计方向的正确性。

通过将腕部机构、肩部机构与各自设计目标进行刚度匹配设计,得到了两个空间并联机构拓扑尺寸的设计方向,利用上述拓扑尺寸设计得到的并联机构可以实现误差补偿和高刚度的设计目标。

表4 肩部机构拓扑尺寸变化前后变形量的对比

Table 4 Comparison data of deformation before and after topology size optimization of shoulder mechanism

组别	r_1 / mm	r_2 / mm	h / mm	d / mm	a_1 / mm	a_2 / mm	b_1 / mm	b_2 / mm	e_1 / mm	f_1 / mm	g_1 / mm	最大变形量/ mm	变形量增幅/ %
初始组	750	500	1 400	250	500	900	250	800	0.57	0.42	0.71	3.14	
对照组 1	1 000	500	1 400	250	500	900	250	800	0.57	0.42	0.71	2.94	-6.37
对照组 2	750	900	1 400	250	500	900	250	800	0.57	0.42	0.71	2.83	-9.87
对照组 3	750	500	1 500	250	500	900	250	800	0.57	0.42	0.71	2.71	-13.69
对照组 4	750	500	1 400	115	500	900	250	800	0.57	0.42	0.71	3.04	-3.18
对照组 5	750	500	1 400	250	600	620	450	625	0.57	0.42	0.71	2.52	-19.75
对照组 6	750	500	1 400	250	500	900	250	800	0.39	0.85	0.36	2.57	-18.15

3 结 论

本文针对抓取型工业机器人存在的刚度较差以及末端误差问题,设计了一种由两个空间并联机构和一个平面连杆机构混合形成的混联机械手臂。

(1)利用螺旋理论和少自由度并联机构设计原理,对空间并联机构进行设计。所设计的腕部机构为 3R 并联机构,肩部机构为可变胞的 2T1R 并联机构。混联机械手臂具有并联和串联机构的优点,改善了传统转运机器人刚度弱,叠加误差大以及复杂工况不适用等问题。

(2)对肩部并联机构进行了变胞设计。肩部并联机构具有两种变胞构态,通过机构中万向节运动副的失效与生效,使机构分支的反螺旋约束发生变化,从而改变机构整体的自由度,达到变胞效果。在两种变胞构态下肩部机构的运动轨迹不同,因此混联机械手臂可应对转运工作中的多种工况。

(3)利用并联机构刚度叠加原理,求得腕部和肩部并联机构的总刚度矩阵。提出机构刚度的设计目标,并将总刚度矩阵与设计目标进行匹配,得到机构拓扑尺寸的设计方向。利用 ANSYS 静态结构仿真验证了数值计算结果的正确性。该拓扑尺寸设计方向可使腕部机构通过关节形变来实现误差补偿,以及可提高肩部机构的整体刚度。

参考文献:

[1] 王现富,张冰林. 当前工控界常见主流机器人特点及

原理[J]. 中国高新技术企业, 2014(13): 32-33.

WANG Xianfu, ZHANG Binglin. The characteristics and principles of common mainstream robots in the current industrial control industry [J]. China High-Tech Enterprises, 2014(13): 32-33.

[2] 孟昭然. 一种面向 3C 行业的新型六自由度高速并联机器人动静态性能分析 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2023.

[3] 李永刚,宋轶民,冯志友. 并联机器人机构静刚度研究现状与展望[J]. 机械设计, 2010, 27(3): 1-4.

LI Yonggang, SONG Yimin, FENG Zhiyou. Overview of the study on the stiffness of parallel manipulators [J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(3): 1-4.

[4] 黄真. 基于约束螺旋理论的自由度简易计算方法 [C]//全国印刷、包装机械凸轮、连杆机构学术研讨会暨第 6 届全国凸轮机构学术年会. 北京: 中国机械工程学会, 2005: 36-39, 45.

[5] 黄真,李秦川. 少自由度并联机器人机构的型综合原理 [J]. 中国科学: E 辑, 2003, 33(9): 813-819.

HUANG Zhen, LI Qinchuan. Principle of type synthesis for parallel robot mechanisms with few degrees of freedom [J]. Science in China: Series E, 2003, 33(9): 813-819.

[6] 黄真,曾达幸. 机构自由度计算: 原理和方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.

[7] ROMDHANE L. Design and analysis of a hybrid serial-parallel manipulator [J]. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34(7): 1037-1055.

[8] SHEN Huiping, YANG Tingli, MA Lvzhong. Synthesis and structure analysis of kinematic structures of

- 6-dof parallel robotic mechanisms [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, 40(10): 1164-1180.
- [9] 沈惠平, 赵海彬, 邓嘉鸣, 等. 基于自由度分配和方位特征集的混联机器人机型设计方法及应用 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(23): 56-64.
SHEN Huiping, ZHAO Haibin, DENG Jiaming, et al. Type design method and the application for hybrid robot based on freedom distribution and position and orientation characteristic set [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(23): 56-64.
- [10] MEGGIOLARO M A, DUBOWSKY S, MAVROIDIS C. Geometric and elastic error calibration of a high accuracy patient positioning system [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, 40(4): 415-427.
- [11] DUMAS C, CARO S, CHÉRIF M, et al. A methodology for joint stiffness identification of serial robots [C]//2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 464-469.
- [12] KLIMCHIK A, WU Y, DUMAS C, et al. Identification of geometrical and elastostatic parameters of heavy industrial robots [C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 3707-3714.
- [13] CELIKAG H, SIMS N D, OZTURK E. Cartesian stiffness optimization for serial arm robots [J]. *Proceedia CIRP*, 2018, 77: 566-569.
- [14] ZHAO Yiyang, LIU Xun, CAO Jiabin, et al. A calibration and compensation method for an industrial robot with high accuracy harmonic reducers [J]. *Science China Technological Sciences*, 2024, 67(3): 725-739.
- [15] LUM G Z, TEO T J, YEO S H, et al. Structural optimization for flexure-based parallel mechanisms - towards achieving optimal dynamic and stiffness properties [J]. *Precision Engineering*, 2015, 42: 195-207.
- [16] GAO Zhen, ZHANG Dan, GE Yunjian. Design optimization of a spatial six degree-of-freedom parallel manipulator based on artificial intelligence approaches [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, 26(2): 180-189.
- [17] SHIN H, LEE S, JEONG J I, et al. Antagonistic stiffness optimization of redundantly actuated parallel manipulators in a predefined workspace [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(3): 1161-1169.
- [18] GAO Zhen, ZHANG Dan. Performance analysis, mapping, and multiobjective optimization of a hybrid robotic machine tool [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(1): 423-433.
- [19] GUO Fan, SUN Tao, WANG Panfeng, et al. Synchronous design method of stiffness and topology for parallel flexible mechanisms with various joints [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 180: 105137.
- [20] KANG B H, WEN J T Y, DAGALAKIS N G, et al. Analysis and design of parallel mechanisms with flexure joints [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(6): 1179-1185.
- [21] 姚莹. 多自由度机器人抓取末端振动自动稳健性控制技术 [J]. *机械制造与自动化*, 2023, 52(4): 164-168.
YAO Ying. Automatic robustness control technology for vibration of multi DOF robot grasping end [J]. *Machine Building & Automation*, 2023, 52(4): 164-168.
- [22] 陈钢, 黄泽远, 江涛, 等. 多臂空间机器人稳定抓取力分配和柔顺控制策略 [J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 112-120.
CHEN Gang, HUANG Zeyuan, JIANG Tao, et al. Force distribution and compliance control strategy for stable grasping of multi-arm space robot [J]. *Control and Decision*, 2024, 39(1): 112-120.
- [23] MONFORTE M, FICUCIELLO F. A reinforcement learning method using multifunctional principal component analysis for human-like grasping [J]. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2021, 13(1): 132-140.
- [24] 杨硕. 复杂场景下机械臂抓取与码垛技能学习方法研究 [D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [25] 沈微微, 姜晓燕, 张兵, 等. 机器人抓取视觉传感目标精确定位方法 [J]. *传感技术学报*, 2023, 36(5): 763-768.
SHEN Weiwei, JIANG Xiaoyan, ZHANG Bing, et al. Precise positioning method of robot grasping visual sensing target [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2023, 36(5): 763-768.

(编辑 杜秀杰)