

步行式并联铆孔机器人运动学建模及静力学性能分析

李慧梓, 许勇, 张宇豪, 陈御浩, 冯国鑫

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 为满足大型工件的多工位、高精度加工需求, 提出了一种基于 8-UPS 并联机构的步行式并联铆孔机器人。首先, 建立该机构的逆运动学模型, 求解各驱动杆的伸缩长度; 其次, 进行机构速度建模, 推导机构的雅可比矩阵, 获得动平台速度与驱动杆伸缩速度间的关系; 进而, 基于并联机构的广义载荷空间, 分析机构的静力学性能并进行仿真分析; 最后, 对铆枪承受最大载荷这一最恶劣工况下的整机强度和刚度进行有限元仿真。仿真结果表明, 步行式并联铆孔机器人工作空间静力学性能稳定, 且能够以正确的位置、良好的精度、平稳的作业过程完成机翼铆接任务。

关键词: 并联机构; 机翼铆接机器人; 广义载荷空间; 静力学性能

中图分类号: TH 112 **文献标志码:** A

Kinematics modeling and static performance analysis of a walk-behind parallel-joint riveting robot

Li Huizi, Xu Yong, Zhang Yuhao, Chen Yuhao, Feng Guoxin

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: To meet the requirements for multi-station, high-precision machining of large workpieces, a walking parallel riveting robot based on an 8-UPS parallel mechanism was proposed. First, an inverse kinematic model of the mechanism was established to solve for the extension and retraction lengths of each drive rod. Second, the mechanism's velocity was modeled, the Jacobian matrix was derived, and the relationship between the moving platform's velocity and the extension-retraction velocity of the drive rods was determined. Subsequently, based on the generalized load space of the parallel

收稿日期: 2026-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52475063)

第一作者: 李慧梓 (2001—), 女, 硕士研究生。研究方向: 机器人机构学。E-mail: 2404172757@qq.com

通信作者: 许勇 (1973—), 男, 副教授。研究方向: 机器人机构学。E-mail: brucexu2026@163.com

引文格式: 李慧梓, 许勇, 张宇豪, 等. 步行式并联铆孔机器人运动学建模及静力学性能分析[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(4): 420-429.

Citation: Li Huizi, Xu Yong, Zhang Yuhao, et al. Kinematics modeling and static performance analysis of a walk-behind parallel-joint riveting robot[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(4): 420-429.

mechanism, the mechanism's static performance was analyzed and simulated. Finally, finite element simulations were conducted to evaluate the overall strength and stiffness of the whole machine under the most severe operating condition, where the riveting gun bears the maximum load. The simulation results indicate that the working space of the walking parallel riveting robot exhibits stable static performance and is capable of completing wing riveting tasks with the correct posture, good accuracy, and a smooth operation process.

Keywords: *parallel mechanisms; wing riveting robots; generalized payload space; static performance*

一些大型复杂构件广泛应用于航空航天、轨道交通、能源、船舶等关键工业领域,如机翼壁板、高铁车厢、重型燃气轮机架构等。该类构件普遍具备尺寸跨度大、结构复杂、加工定位精度与表面质量要求严苛等特点,整体加工难度较高^[1]。现阶段,大型复杂构件的加工主要依托龙门式多轴数控机床的包络式加工模式完成,该类机床具备优异的结构刚度,可保障构件加工过程的精度与稳定性,能够适配大型构件的精密加工需求。然而,受工件超大外形尺寸的制约,龙门式多轴数控机床需匹配庞大的设备体积与自重,致使设备制造、现场安装调试及后期运维的综合成本居高不下,同时存在加工柔性 with 场景适应性不足的问题。相较而言,移动式机器人加工设备可有效弥补龙门式多轴数控机床的上述短板,能够在满足大型复杂构件高精度、高品质加工要求的同时,实现高效化加工,为大型复杂构件的智能制造提供更优的技术方案。

近年来,移动式并联机器人的设计及研发已持续受到国内外学术界的广泛关注。Liu等^[2]提出了六足并联行走机床,用于大型零件现场作业。Omran等^[3]基于三脚架 Stewart 平台设计了3 DOF 移动 CNC 机床。王洪波等^[4]提出了多种基于并联机械腿的四足/两足可重构步行机器人。王晓磊等^[5]和张金柱等^[6]也提出了基于 UPS 的可重构并联机构的双足、四足、六足步行机器人。张成军等^[7]提出一种基于 3-RPC 并联机构的新型步行机器人,行走时动平台和定平台轮流作为摆动腿进行运动。何雨鎬等^[8]首次系统提出移动式并联加工机器人,对比传统龙门机床缺陷,提出多移动机器人协同原位加工方案。Xie等^[9]报告了小型并联移动机床在低移动质量、5 自由度控制下的动态优势。刘晓飞等^[10]提出了一种基于 2RPU+2UPR+RPR 的多冗余驱动并联机器人。初永志^[11]提出了

一种具备大台面、大承载的冗余驱动六自由度并联机器人。赫利涛^[12]提出了基于 6-PRRRR-P-SPS 构型的混联机器人。立足当下产业发展格局,集成了并联机器人机构的移动式加工设备,兼顾刚性强度与运动灵活度两大核心优势,是航空航天、高端装备制造行业加工异形复杂工件专用设备的重点研发路线。

本文提出了一种基于 8-UPS 并联机构的步行式铆孔作业机器人。在构型设计方面,8-UPS 并联机构具有整体刚度高、受力均匀、承载能力强、结构紧凑的优点。在完成并联铆孔机器人的位置建模、速度建模之后,利用螺旋理论建立了雅可比矩阵;基于修正条件数指标,分析并联机构工作空间内的静力学性能,然后对工作空间内的静力学性能进行仿真分析。随后的铆孔作业仿真表明,铆枪位置正确可行、驱动杆长及速度变化光滑平稳,步行式并联铆孔机器人可实现预期的多工位、大作业空间的精密加工任务。

现有移动式并联机器人多采用 6 自由度非冗余 3、6 支链构型,存在承载不均、多工位连续铆接静力各向同性差、行走与作业耦合精度不足等问题;六足、四足步行机床面向通用切削,未针对飞机机翼薄壁铆孔工艺对静力学承载特性进行优化。为此,本文提出 8-UPS 步行式并联铆孔机器人,在构型创新上,采用 8 支链 UPS 冗余驱动空间对称布局,兼顾步行移动能力与铆接大载荷均载需求,区别于传统 6 支链并联机床;在理论方法创新上,基于螺旋理论推导冗余机构雅可比矩阵,引入 Zonotope(凸多面体)广义载荷空间和修正条件数指标,解决传统条件数无法评价冗余并联机构静力各向同性的缺陷;在工程应用创新上,融合运动轨迹仿真、静力学性能图谱、有限元强度刚度校核,完整验证装备航空铆接可行性。

1 步行式并联铆孔机器人工作原理

1.1 总体方案

图1为本文设计的可应用于大型复杂构件加工的步行式铆孔机器人。该机器人主要面向飞机壁板、机翼等大型构件开展自动化铆孔作业，这类工件整体尺寸偏大，超出了单套并联机构的有效工作范围，难以在固定位置完成全部加工。在图1所示的单工位铆孔作业中，机器人机构为8-UPS并联机构，机器人腿(支链)通过末端的锁紧环与支撑基座上的锁紧销紧密嵌合，在保持稳定站立的同时，调整动平台及铆枪位置，以实现对机翼壁板上的加工孔的精确对准及铆孔作业。如图2所示，当机翼壁板上的加工区域超出8-UPS并联机构的工作空间时，机器人可以通过行走到达新的工位和加工区域。重点研究机器人进

行机翼铆接作业过程中的运动学建模，以及分析铆枪受最大载荷这一最恶劣工况时的机构静力学性能。

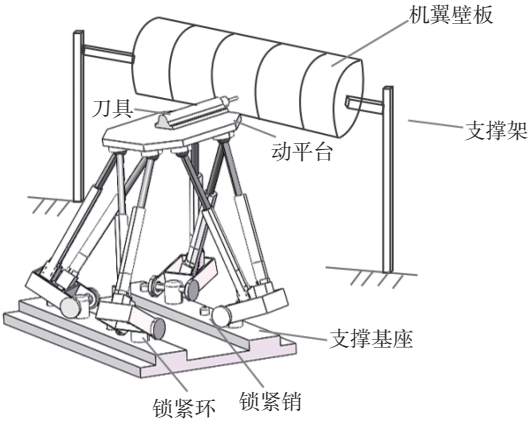


图1 步行式并联铆孔机器人钻铆作业场景
Fig. 1 Schematic diagram of drilling and riveting operations performed by a mobile parallel-processing robot

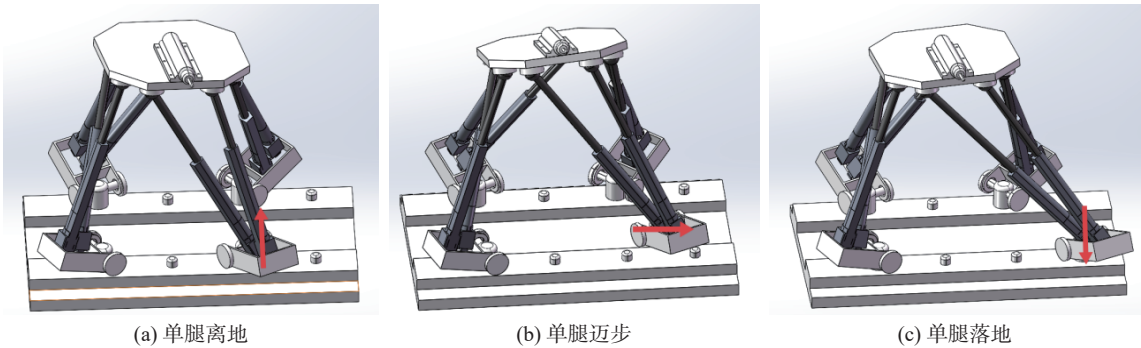


图2 并联铆接机器人在不同工位间的步行场景
Fig. 2 Schematic diagrams of the simulation of the parallel-joint riveting robot's motion pattern

1.2 构型描述

8-UPS型并联机构整体构型如图3(a)所示。该机构由一个动平台、8条相同的SPU支链(L1~L8)和固定基座组成，通过8条独立支链的协同驱动，实现动平台的6自由度运动控制，兼具高刚度、高承载能力与良好的运动灵活性。单条SPU支链中：S副安装于基座端，为支链提供3个正交自适应转动自由度，可实现支链在水平与俯仰方向的摆动；P副作为主动驱动副，提供1个沿支链轴线的伸缩自由度，通过改变支链长度驱动动平台运动；U副安装于动平台端，为支链提供2个转动自由度。支链呈空间对称分布，单个支链和整个机构均具有较大的承载能力，保证了机构在不同位置下的运动均匀性与受力对称性。

如图3(b)所示，垂直正交的 u'_L 、 v' 转轴等效

为一个U副， u'_R 、 v' 等效为另一个U副。正交 u_L 、 v 、 w 三转轴等效为一个S副， u_R 、 v 、 w 等效为另一个S副，且两S副汇交为复合S副。

2 并联铆孔机器人机构位置建模

本文研究的8-UPS并联机器人，驱动输入为每条支链的伸缩杆，因此，位置逆解的核心任务是建立平台运动过程中8根杆件长度随时间的函数模型^[13-14]。根据加工位置需求设定整体加工系统坐标系。本文构建定平台全局坐标系与动平台局部坐标系两套右手笛卡尔坐标系，两套坐标系协同支撑机构位置逆解、速度雅可比、静力学载荷映射与铆接轨迹规划计算，仅依靠单一坐标系无法完成动平台六自由度位置与驱动杆参数的定量

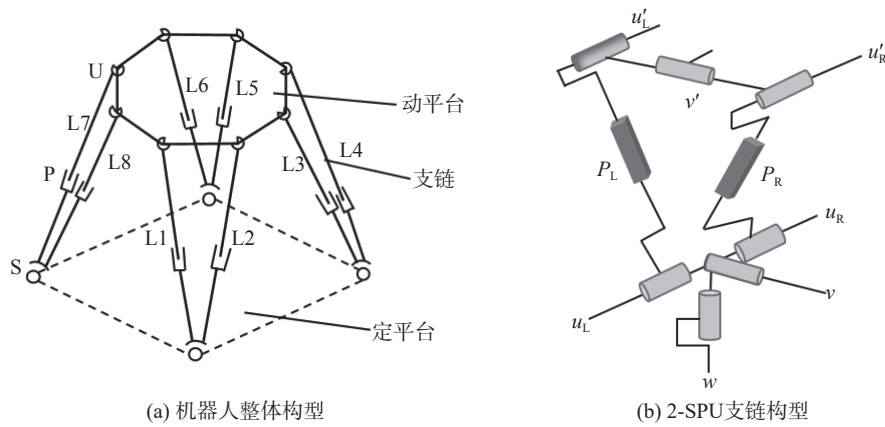


图 3 并联铆孔机器人机构整体构型简图

Fig. 3 Schematic diagram of the overall configuration of a parallel mechanism

求解。如图 4(a) 所示, 动平台坐标系 $P_0\text{-}u_p v_p w_p$ 中, 动平台形心 P_0 为坐标原点, u_p 轴方向由 P_0 指向 $P_{Li}P_{Ri}$ 的中点, z_p 轴方向垂直于动平台向上, w_p 轴根据右手定则确定。动平台上铰链点记

为 $P_i (i=1,2,\cdots,8)$, 呈八边形动平台外接圆半径为 r_p , d_p 为径向相对分支间的距离, d 为 P_{Li} 与 P_{Ri} 之间的距离, P_{Li} 、 P_{Ri} 分别为 2-SPU 支链中左侧支链铰点和右侧支链铰点。

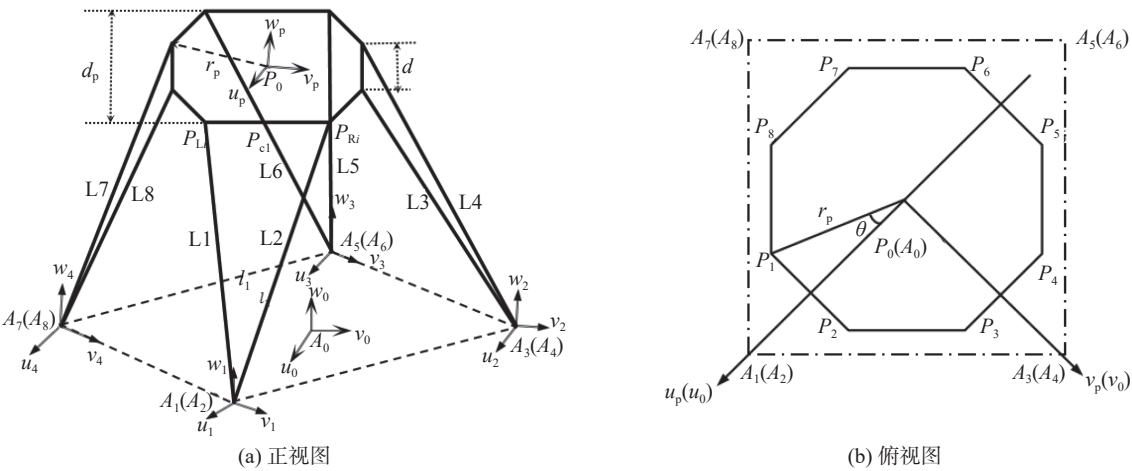


图 4 8-UPS 并联机构坐标系

Fig. 4 8-UPS parallel mechanism coordinate system

设定执行加工任务时定平台(支撑基座)上铰链点 A_i 呈正四边形分布。定平台坐标系 $A_0\text{-}u_0 v_0 w_0$ 中, 定平台形心 A_0 为坐标原点, 以形心为原点可简化 8 个基座铰点坐标计算, u_0 、 v_0 沿基座复合铰正方形边线布置, 贴合基座滑轨矩形结构, 适配机器人运动求解, w_0 垂直于基座平面向上, 4 个复合球面副构成的正四边形外接圆半径为 R 。机器人初始位置为动、定平台对应坐标轴相互平行, 且两坐标系原点在定平台上的投影重合, 如图 4(b) 所示。

如图 4(a) 所示, 动平台外接圆半径为 r_p , 则动平台上 8 个铰链点在动平台坐标系中对应的几

何坐标为

$$\begin{cases} P_1 = (r_p \cos \theta, -r_p \sin \theta, 0) \\ P_2 = (r_p \cos \theta, r_p \sin \theta, 0) \\ P_3 = (r_p \sin \theta, r_p \cos \theta, 0) \\ P_4 = (-r_p \sin \theta, r_p \cos \theta, 0) \\ P_5 = (-r_p \cos \theta, r_p \sin \theta, 0) \\ P_6 = (-r_p \cos \theta, r_p \sin \theta, 0) \\ P_7 = (-r_p \sin \theta, -r_p \cos \theta, 0) \\ P_8 = (r_p \sin \theta, -r_p \cos \theta, 0) \end{cases} \quad (1)$$

如图 4(b) 所示, 支撑基座上 4 个复合球铰链形心 $A_i (i = 1,2,\cdots,8)$, 在定平台坐标系中的几何坐标为

$$\begin{cases} A_1 = A_2 = (R, 0, 0) \\ A_3 = A_4 = (0, R, 0) \\ A_5 = A_6 = (-R, 0, 0) \\ A_7 = A_8 = (0, -R, 0) \end{cases} \quad (2)$$

动平台的姿态矩阵为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据该并联机构各构件间的空间矢量关系, 可求解得到各驱动杆伸缩长度矢量 $\mathbf{L}_i$ ($i=1,2,\dots,8$) 为

$$\mathbf{L}_i \mathbf{s}_i = \mathbf{P}_0 + \mathbf{T} \mathbf{P}_i - \mathbf{A}_i \quad (4)$$

式中, $\mathbf{s}_i$ 为驱动杆单位方向矢量。

3 机构速度建模

3.1 支链驱动速度求解

对驱动杆杆长公式两边同时求导:

$$\dot{\mathbf{L}}_i = \frac{d\mathbf{L}_i}{dt} \quad (5)$$

令驱动杆单位方向矢量:

$$\mathbf{s}_i = \frac{\mathbf{P}_i - \mathbf{A}_i}{\|\mathbf{P}_i - \mathbf{A}_i\|} \quad (6)$$

可得单根驱动杆伸缩速率:

$$\dot{\mathbf{L}}_i = \mathbf{s}_i^T \dot{\mathbf{P}}_i \quad (7)$$

铆枪在铆接机翼不同孔时, 机器人机构各支链驱动力的变化如图5所示。

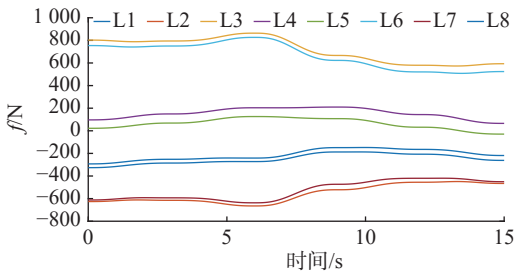


图5 铆接机翼上不同孔时机器人机构各支链驱动力

Fig. 5 Drive forces in each link of a robotic mechanism when riveting different holes on an airfoil

4 静力学性能建模

4.1 雅可比矩阵推导

设驱动关节速度矢量为

$$\dot{\mathbf{q}} = [\dot{L}_1, \dot{L}_2, \dot{L}_3, \dot{L}_4, \dot{L}_5, \dot{L}_6, \dot{L}_7, \dot{L}_8]^T \quad (8)$$

动平台的广义速度为

$$\mathbf{V}_p = \begin{bmatrix} \omega_p \\ \mathbf{v}_p \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: ω_p 为动平台角速度; $\mathbf{v}_p$ 为动平台中心线速度。

驱动速度与动平台广义速度之间满足:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_v \mathbf{V}_p \quad (10)$$

将每条支链视为开环运动链, 则动平台的瞬时运动旋量可表达为

$$\mathfrak{S}_v = \begin{bmatrix} \omega_p \\ \mathbf{v}_p \end{bmatrix} \quad (11)$$

单支链单位力旋量为

$$\mathfrak{S}_{wi} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_i \times \mathbf{s}_i \\ \mathbf{s}_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{p}_i$ 为动平台原点 P_0 指向动平台铰点 P_i 的位置矢量; $\mathbf{s}_i = \frac{\mathbf{P}_i - \mathbf{A}_i}{\|\mathbf{P}_i - \mathbf{A}_i\|}$ 为第 i 条支链的单位方向矢量。

对于 8-UPS 并联机构, 由螺旋理论推导得到, 运动旋量与单位力旋量做互易积得到驱动杆伸缩速度:

$$\dot{L}_i = \mathfrak{S}_{wi} \circ \mathfrak{S}_v = \mathbf{s}_i^T (\mathbf{v}_p + \omega_p \times \mathbf{p}_i) \quad (13)$$

对 8 条支链堆叠, 得到速度雅可比矩阵 $\mathbf{J}_v$ 为

$$\mathbf{J}_v = \begin{bmatrix} (\mathbf{p}_1 \times \mathbf{s}_1)^T & \mathbf{s}_1^T \\ (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{s}_2)^T & \mathbf{s}_2^T \\ \vdots & \vdots \\ (\mathbf{p}_8 \times \mathbf{s}_8)^T & \mathbf{s}_8^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

针对冗余驱动四足移动加工中心, 建立基于螺旋理论的静力学模型, 传统条件数不适用于冗余驱动并联机构^[15-16], 本文采用基于修正条件数的改进型各向同性指标 η_w 来表述 8-UPS 机构的静力各向同性和承载能力。

根据虚功原理, 驱动杆推力 $\mathbf{f}$ 与动平台上铆枪载荷 $\mathbf{w}$ 满足:

$$\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{f} = \mathbf{V}_p^T \mathbf{w} \quad (15)$$

将式 (9) 和式 (10) 代入式 (15) 可得:

$$\mathbf{w} = \mathbf{J}_v^T \mathbf{f} \quad (16)$$

因动平台广义位移包含平动和转动, 量纲不一致, 需引入含特征长度的加权矩阵 $\mathbf{W}_x$:

$$\mathbf{W}_x = \text{diag}\left(\frac{1}{r_p}, \frac{1}{r_p}, \frac{1}{r_p}, 1, 1, 1\right) \quad (17)$$

设驱动杆最大推力为 $\mathbf{f}_{\max}$, 且 8 个驱动器总和

为1, 则单个驱动杆最大推力为

$$f_{\max} = \frac{1}{8} \quad (18)$$

定义驱动端加权矩阵:

$$\mathbf{W}_q = f_{\max} \mathbf{I} \quad (19)$$

则加权后的力映射关系为

$$\mathbf{w} = \mathbf{H}\mathbf{f}, \hat{\mathbf{w}} = \mathbf{W}_x \mathbf{w}, \hat{\mathbf{f}} = \mathbf{W}_q \mathbf{f}, \mathbf{H} = \mathbf{W}_x \mathbf{J}_v^T \mathbf{W}_q^{-1} \quad (20)$$

式中: $\hat{\mathbf{w}}$ 为量纲统一标准化铆枪载荷向量; $\hat{\mathbf{f}}$ 为归一化驱动杆推力向量; $\mathbf{H}$ 为力传递矩阵。

广义的驱动力空间是一个由以下集合 $[F]$ 定义的超立方体:

$$[F] = \{\mathbf{f} | f_i \in [-f_{\max}, f_{\max}], 1 \leq i \leq n\} \quad (21)$$

因此, 铆枪的广义载荷空间 $[Z]$ 为

$$[Z] = \{\mathbf{w} | \exists \mathbf{f} \in [F] \text{ 使得 } \mathbf{w} = \mathbf{H}\mathbf{f}\} \quad (22)$$

如式 (20)~(23) 和图 6 所示, $w_{\min\max}$ 表示完全包含在凸多面体(广义载荷空间)内的最大内切球体的半径, 反映铆枪的最小载荷; $w_{\max}$ 表示完全包含凸多面体的最小外接球体的半径, 反映铆枪的最大载荷。 η_w 反映机构受力性能的各向同性: η_w 越小, 凸多面体的形状越接近一个球体, 机器人在各个方向上抵抗载荷的能力越均匀, 各向同性越好; η_w 越大, 凸多面体的形状越扁长, 机器人在某些方向上抵抗载荷的能力很强, 但在另一些方向上很弱, 说明各向同性越差^[17-18]。 η_w 越接近 1, 凸多面体载荷空间越接近球体, 机构各方向抵抗铆接载荷能力均匀, 无受力薄弱方向; 数值越大, 机构承载方向性差异显著, 存在受力短板。在机器人设计中, 通常希望力承载性能尽可能各向同性, 这样机器人不会出现“某一个方向一推就倒”的弱点, 因此, η_w 越小越好^[19]。适用条件: 指标针对冗余驱动 8 支链并联机构设计, 通过加权矩阵 $\mathbf{W}_x$ 统一平动、转动量纲, 解决传统条件数因量纲冲突无法评价 6 自由度机构的问题, 假设所有驱动杆最大输出推力一致。

$$w_{\min\max} = \min_{u \in R^n, \|u\|=1} \left(\max_{k \geq 0} \{k | ku \in z\} \right) \quad (23)$$

$$w_{\max} = \max_{w \in z} (\|w\|) \quad (24)$$

$$\eta_w = \frac{w_{\max}}{w_{\min\max}} \quad (25)$$

如图 7 所示为求解并联铆孔机器人静力学性能指标 η_w 的流程图。

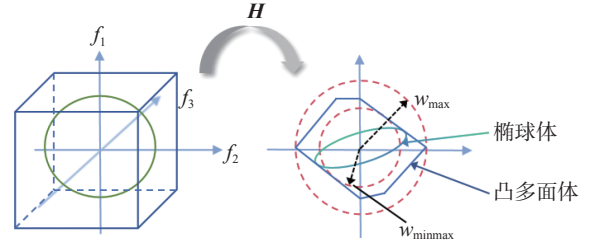


图 6 广义驱动力空间(左)和广义载荷空间(右)及静力学性能指标示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the generalized drive space (left) and generalized load space (right), along with static performance metrics

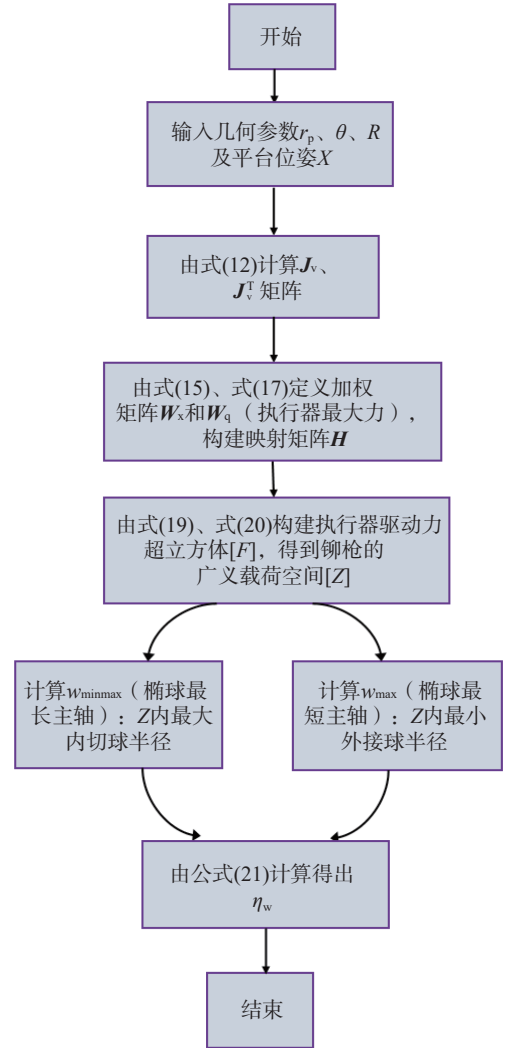


图 7 并联铆孔机器人静力学性能指标 η_w 求解流程

Fig. 7 Flowchart for calculating the static performance index η_w of a parallel-axis riveting robot

4.2 静力学性能的仿真与分析

为全面评价机构在工作空间内的静力学性能, 基于图 7 所示的计算流程得到 η_w 分布谱图, 如图 8 所示。首先, 输入机器人几何参数 $r_p=1\ 030\ \text{mm}$,

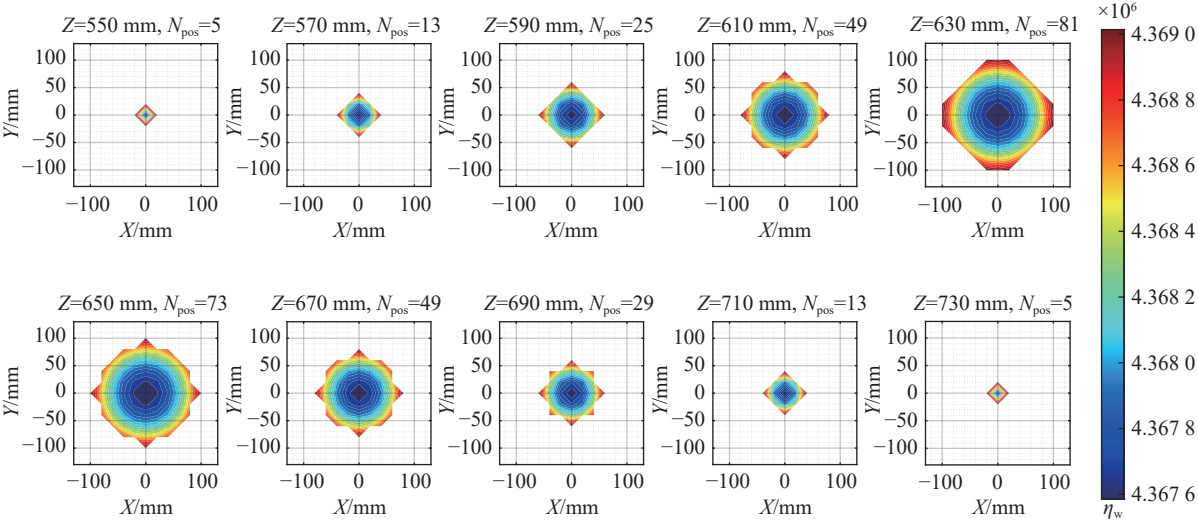


图 8 不同高度截面 η_w 指标图

Fig. 8 Chart of indicator η_w for cross-sections at different heights

θ , $R=2\,475\text{ mm}$ 及动平台位置 (X,Y) 取值范围均为 $[-120,120]\text{ mm}$, 采样间隔为 5 mm , Z 的取值范围为 $[550,730]\text{ mm}$, Z 的采样范围为 20 mm , 驱动杆长约束为 $[750,1000]\text{ mm}$ 。对于采样到的每一个位置 (X,Y,Z) , 进行位置逆解计算, 求得 8 条驱动杆在当下位置下的实际长度并检查这 8 个杆长是否全部落在 $[750,1000]\text{ mm}$ 之间, 如果全部杆长均满足此约束, 则将该位置标记为“有效采样点”, 如果有任意一条驱动杆杆长不满足此约束, 则对应的位置被放弃。对于每一个通过约束检查的有效点, 基于式 (12) 计算 $\mathbf{J}_v$ 及 $\mathbf{J}_v^T$, 基于式 (15) 和式 (17) 构造 $\mathbf{W}_x$ 、 $\mathbf{W}_q$ 得到 $\mathbf{H}$, 最后根据式 (23) 计算得出 η_w 。

如图 8 所示, 彩色填充区域为不同 Z 高度下机构可达工作空间内性能指标的分布区域, 而彩色区域内部的点是并联机构动平台能正常到达、支链无超行程、无干涉的有效位置所对应的 η_w 值。 N_{pos} 为有效采样点数, 不同颜色对应不同 η_w 数值大小, 从而反映了同一截面内不同 XY 位置处的机构静力学各向同性性能。蓝色端 η_w 数值小, 红色端 η_w 数值大。从图 8 中可以看出, 在 $Z=630\text{ mm}$ 截面上, η_w 数值最小, 反映此区域内的静力学各向同性性能最好。

5 铆孔作业仿真

借助 MATLAB 软件对并联机构加工阶段动平台的位置进行可视化处理, 如图 9 所示, 清晰呈现

了机器人加工过程中动平台的实时运动姿态。设定 8-UPS 并联机器人的已知参数为: 动平台外接圆半径 $r_p=1\,030\text{ mm}$, 定平台外接圆半径 $R=2\,475\text{ mm}$, 驱动杆伸缩最小行程 $l_{\min}=1\,700\text{ mm}$, 最大行程 $l_{\max}=2\,800\text{ mm}$, 铆枪枪尖悬伸长度 $L_{\text{gun}}=400\text{ mm}$, 铆枪外形尺寸长为 $2\,000\text{ mm}$, 宽为 675 mm 。如图 9(a) 所示, 八边形实线代表动平台, 曲面模型为飞机壁板, 6 个待铆接孔的三维坐标分别为 $[-400,500,1\,040]$ 、 $[0,500,1\,040]$ 、 $[400,500,1\,040]$ 、 $[400,500,640]$ 、 $[0,500,640]$ 、 $[-400,500,640]$ 。

此时机器人加工过程中动平台中心点在 X 、 Y 、 Z 方向的位移变化与姿态 α 、 β 、 γ 变化如图 10 和图 11 所示。

如图 12(a) 所示, 8-UPS 并联机器人执行铆孔加工任务, 由初始位置向首个加工点位平移, 8 根支链同步伸长, 杆长由初始高度快速抬升并达到首个峰值区间, 每个点位执行“铆枪 Y 方向进给伸出一铆孔— Y 向缩回复位”循环, 动平台完成全部铆孔工序, 驱动杆伸缩幅值内敛, 机构运动平稳。与此同时, 驱动杆速度如图 12(b) 所示, 曲线波动幅值小, 铆孔作业时机构位置稳定性优异, 不会因驱动杆大幅窜动影响铆孔加工精度。

6 机构静力学有限元强度与刚度分析

为评估 8-UPS 步行并联铆孔机器人在机翼铆孔作业下的结构强度与刚度性能, 基于三维实体

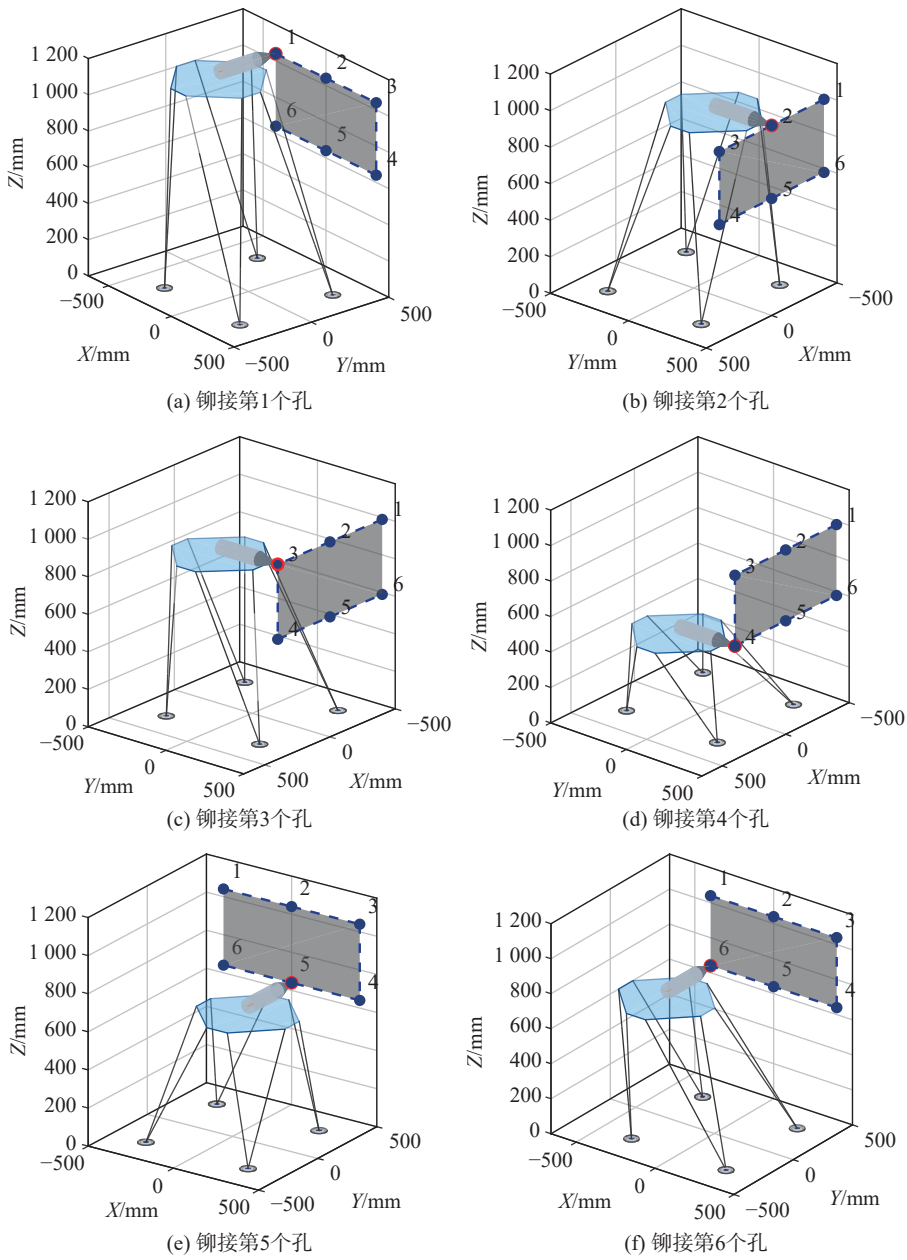


图 9 铆接机翼上不同孔时动平台位置变化示意图

Fig. 9 Schematic diagrams of the position changes of the moving platform when riveting different holes on the wing

模型开展静力学有限元仿真分析。结构材料选用航空装备常用 7075-T6 铝合金^[20]，根据 GB/T 3190—2020《变形铝及铝合金化学成分》规定，该材料屈服强度不低于 480 MPa^[21]，针对航空精密铆孔装备连续稳态作业工况^[22]，依据《机械设计手册》通用标准，取结构安全系数 1.5，计算得到材料许用应力 $[\sigma] = 320 \text{ MPa}$ 。

图 13 为机器人铆接第 4 个孔时的强度(应力)和刚度(变形)仿真结果。在有限元分析中，材料参数为：杨氏模量 71.7 GPa，泊松比 0.33；边界条件：支撑基座底部全固定约束(模拟锁紧销完全锁

死基座，无滑移)；施加载荷：最恶劣工况下，铆枪法兰中心施加 1 000 N 轴向铆接工艺载荷；网格设置：动平台、支链关键受力区域网格加密，基座粗化网格平衡计算效率。从图 13(a)可得，在铆孔作业中，整机最大等效应力为 42.39 MPa，远低于 320 MPa 许用应力，结构强度储备充足，可长期承受循环铆接载荷，无塑性变形风险；由图 13(b)可知，机构最大变形量为 0.937 5 mm，变形主要集中于铆枪悬臂端，支链、基座变形极小，整机刚度高，铆孔定位形变量级满足航空精度加工要求。

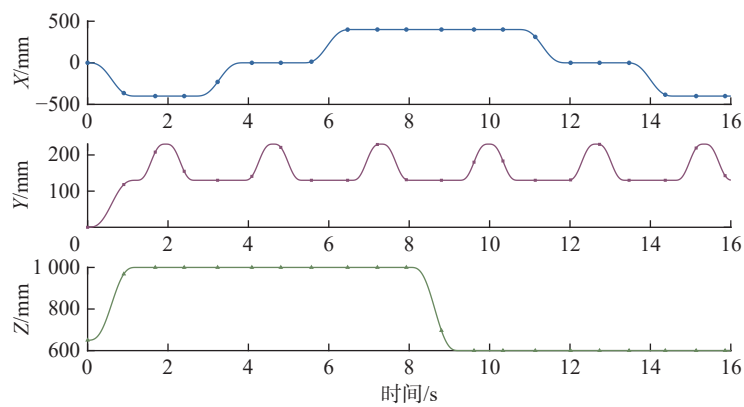


图 10 铆接机翼上不同孔时动平台中心点在 X、Y、Z 方向位移

Fig. 10 Displacement of the moving platform's center point in the X, Y, Z directions when riveting different holes on the wing

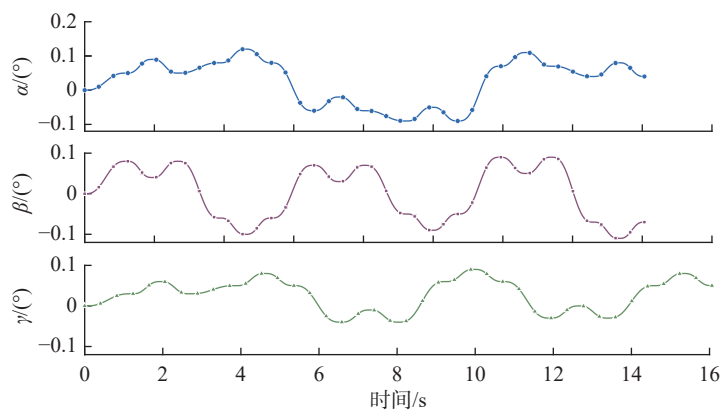


图 11 铆接机翼上不同孔时动平台姿态 α 、 β 、 γ 变化

Fig. 11 α , β , γ attitude changes of moving platform when riveting different airfoil holes

7 结 论

a. 本文完成了 8-UPS 步行式铆孔作业机器人机构的位置、速度建模，推导出机构位置逆解与雅可比矩阵，明确了机器人铆孔作业时的动平台位置与各驱动杆长度、伸缩速度的映射关系，为机器人轨迹规划与运动控制提供了理论支撑。

b. 机翼铆孔作业仿真结果表明，机器人各驱动杆杆长、速度及动平台位置变化均连续平稳，满足机构行程与运动约束，能够精准完成机翼铆接作业，运动稳定性与铆孔作业精度良好。

c. 引入修正条件数指标并结合 *Zonotope* 理论开展静力学分析，仿真证实该机构工作空间中心区域力各向同性最优，向边界延伸后性能逐步衰减，在竖直方向不同高度截面中静力学指标呈中心对称分布，其中在 $Z = 630\text{ mm}$ 高度处综合工作空间与静力性能最佳，整机承载、静力稳定性强，适合于大型构件高精度铆接工况。

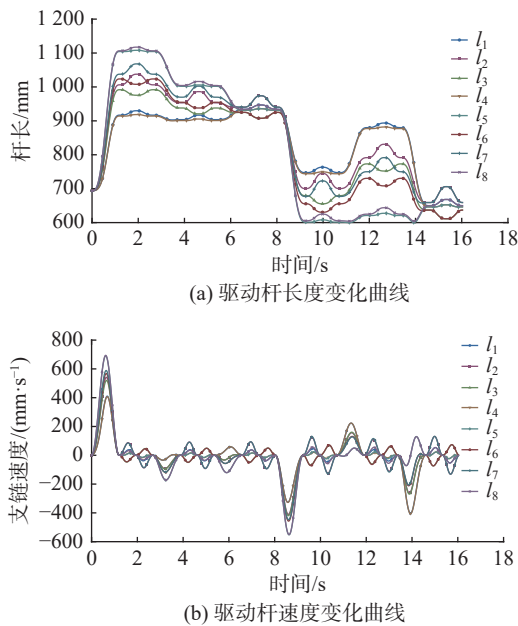


图 12 铆接机翼上不同孔时驱动杆长度与速度变化

Fig. 12 Changes in drive rod length and speed when riveting different holes on an airfoil

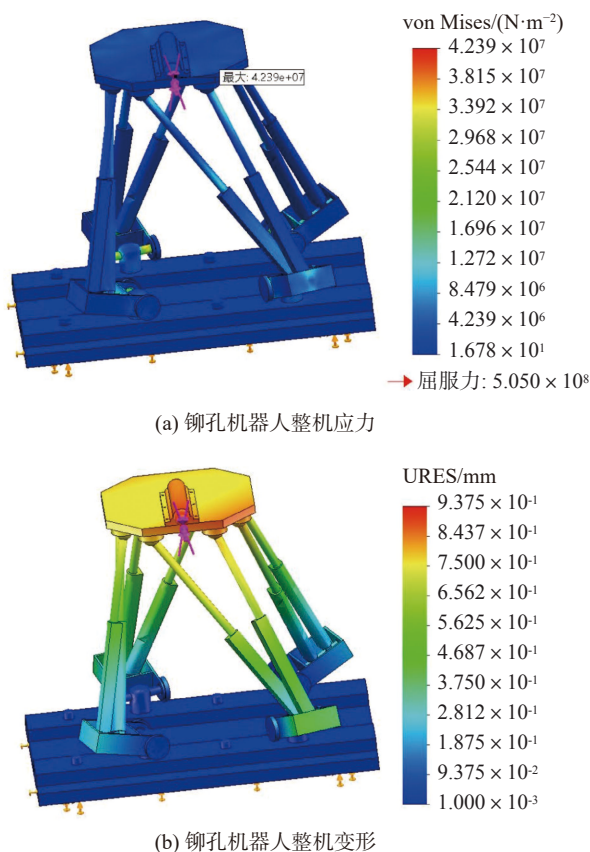


图 13 机器人进行机翼铆接时强度和刚度仿真

Fig. 13 Strength and stiffness simulation of robot-performed wing riveting

d. 进行了机翼铆接过程中, 铆枪承受最大载荷这一最恶劣工况下的整机强度和刚度有限元仿真。仿真结果验证该步行式并联铆孔机器人具备高结构刚度、高承载强度, 可长期稳定承受铆接循环载荷, 适配航空高精度铆孔加工对结构形变控制的严苛要求。

参考文献:

- [1] 王卓群, 谢福贵, 解增辉, 等. 机器人化装备测量-加工一体化技术现状及展望 [J]. *机器人*, 2024, 46(1): 118–128.
- [2] Liu J M, Tian Y, Gao F. A novel six-legged walking machine tool for *in-situ* operations[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2020, 15(3): 351–364.
- [3] Omran M, Elmoushi E, Abdelwahab S A. Design and simulation of mobile CNC machine; based tripod Stewart platform[J]. *Port-Said Engineering Research Journal*, 2021, 25(1): 114–127.
- [4] 王洪波, 齐政彦, 胡正伟, 等. 并联腿机构在四足/两足可重组步行机器人中的应用 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(8): 24–30.
- [5] 王晓磊, 金振林, 李晓丹, 等. 串并混联四足仿生机器人动力学建模与分析 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(4):

401–412.

- [6] 张金柱, 金振林, 陈广广. 六足步行机器人腿部机构运动学分析 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 45–52.
- [7] 张成军, 李艳文. 一种基于 3-RPC 并联机构的新型步行机器人 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(15): 25–30.
- [8] 何雨镒, 谢福贵, 解增辉, 等. 一种五轴并联加工单元的参数与刚度优化设计 [J]. *机械工程学报*, 2024, 60(13): 308–315.
- [9] Xie F G, Liu X J, Zhou Y H. Optimization of a redundantly actuated parallel kinematic mechanism for a 5-degree-of-freedom hybrid machine tool[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2014, 228(12): 1630–1641.
- [10] 刘晓飞, 陈冉, 万波, 等. 多余驱动并联机构 2RPU+2UPR+RPR 的动力学建模与控制策略研究 [J]. *机械工程学报*, 2024, 60(11): 237–249.
- [11] 初永志. 一种冗余驱动六自由度并联机器人设计及实验研究 [D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2025.
- [12] 赫利涛. 可重构大伸展混联机构构型设计与性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
- [13] 刘文彩, 许勇, 陈佳丽, 等. 6-SPU 并联机器人的轨迹规划与仿真 [J]. *机械传动*, 2019, 43(6): 75–82.
- [14] 梁净, 许勇, 吕叶萍. 基于 6-SPU 并联机构的铆孔机器人静力学分析 [J]. *轻工学报*, 2019, 34(4): 96–101.
- [15] 李瑞琴, 亢书华, 张启升, 等. 冗余驱动并联机构的性能特征及应用研究进展 [J]. *中北大学学报 (自然科学版)*, 2021, 42(5): 385–394, 407.
- [16] 艾青林, 黄伟锋, 张洪涛, 等. 并联机器人刚度与静力学研究现状与进展 [J]. *力学进展*, 2012, 42(5): 583–592.
- [17] Bouchard S, Gosselin C, Moore B. On the ability of a cable-driven robot to generate a prescribed set of wrenches[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2010, 2(1): 011010.
- [18] Krut S, Company O, Pierrot F. Force performance indexes for parallel mechanisms with actuation redundancy, especially for parallel wire-driven manipulators[C]// *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Sendai: IEEE, 2004: 3936–3941.
- [19] Chiacchio P. A new dynamic manipulability ellipsoid for redundant manipulators[J]. *Robotica*, 2000, 18(4): 381–387.
- [20] 黄耀光, 陆文怡, 阮尚载, 等. 7075-T6 铝合金和低碳钢搅拌摩擦焊界面微结构特征 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2026, 46(6): 933–938.
- [21] GB/T 3190–2020, 变形铝及铝合金化学成分 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [22] 吕晓敏, 杨帅, 董鹏, 等. 叠层钣金结构铆接变形过程仿真及分析 [J]. *中国机械*, 2023(12): 2–6, 12.

(编辑: 何代华)