

考虑连杆和关节柔性的工业机器人大臂 静动态性能优化

肖正明^{1,2} 段俊杰¹ 周川³ 余世科³ 伍星²

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650500; 2. 云南省先进装备智能制造技术重点实验室, 昆明 650500;
3. 中国船舶第七〇五研究所昆明分部, 昆明 650003)

摘要: 为提高工业机器人整体性能, 减小其静动态性能误差, 提出一种综合考虑工业机器人连杆和关节柔性的拓扑优化方法。将机器人动力学与拓扑优化相结合, 以变密度法 (Solid isotropic material with penalization, SIMP) 为基础, 通过线性加权法和法建立工业机器人大臂的多目标拓扑优化函数模型, 基于柔性多体动力学理论, 利用有限元软件和多体动力学软件建立含关节、连杆柔性的机器人刚柔耦合动力学仿真模型, 获得机器人在极限工况下大臂载荷谱, 最后, 利用层次分析法确定优化目标函数中各子目标的权重系数, 并对函数进行求解。优化结果显示, 优化后工业机器人大臂刚度和固有频率都得到提高, 并且质量下降 18.71%。通过虚拟样机技术重构机器人模型, 并对其整体进行分析, 结果表明, 最大负载作用下, 机器人最大变形量从 0.208 mm 降至 0.188 mm, 静态变形量误差减小 9.62%; 动态定位误差从 0.777 mm 降至 0.687 mm, 定位精度提高 11.58%。上述拓扑优化方法为提升工业机器人整体静动态性能提供了有效的理论参考。

关键词: 工业机器人; 静动态性能; 拓扑优化; 刚柔耦合动力学; 层次分析法; 定位精度

中图分类号: TH242.2; TH112 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)07-0449-10

OSID:



Optimization of Static and Dynamic Performance of Industrial Robot Forearm Considering Flexibility

XIAO Zhengming^{1,2} DUAN Junjie¹ ZHOU Chuan³ YU Shike³ WU Xing²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China
2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Advanced Equipment Intelligent Manufacturing Technology, Kunming 650500, China
3. The 705 Kunming Branch of China State Shipbuilding Corporation Limited, Kunming 650003, China)

Abstract: With the development of automation technology, industrial robots are widely used in various fields, in order to improve the overall performance of industrial robots and reduce their static and dynamic performance errors, a topology optimization method that integrally took into account the flexibilities of connecting rods and joints of industrial robots was proposed. Combining robot dynamics and topology optimization, the multi-objective topology optimization function model of industrial robot forearm was established by linear weighted sum method based on the solid isotropic material with penalization (SIMP), based on the theory of flexible multi-body dynamics, the simulation model of robot rigid-flexible coupling dynamics with joints flexibilities and connecting rods flexibilities was established by using the finite element software and multi-body dynamics software, and the load spectra of the robot forearm was obtained in the extreme working conditions. Finally, the weight coefficients of each sub-objective in the optimization objective function were determined by using hierarchical analysis and the function was solved. The optimization result showed that the stiffnesses and natural frequencies of the optimized robot forearm were improved, the robot forearm was lightened by 18.71% from 20.233 kg to 16.477 kg. The robot model was reconstructed by virtual prototype technology and its whole was analyzed, and the result showed that the maximum deformation displacement of the robot was decreased from 0.208 mm to 0.188 mm under the the maximum load, and the static deformation error was reduced by 9.62%, the dynamic localization error was decreased from 0.777 mm to 0.687 mm, and the localization accuracy was

收稿日期: 2023-10-31 修回日期: 2023-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51965025)、云南省重点研发计划——国际科技合作专项(202003AF140007)和云南省基础研究计划面上项目(202201AT070103)

作者简介: 肖正明(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事机械动力学分析与控制、机器人机构学研究, E-mail: suzem@sina.com

improved by 11.58%. The above topology optimization method provided an effective theoretical reference for improving the overall static-dynamic performance of industrial robots.

Key words: industrial robot; static and dynamic performance; topology optimization; rigid-flexible coupling dynamics; hierarchical analysis; positioning accuracy

0 引言

随着自动化技术迅速发展,工业机器人因结构紧凑、性能高效被广泛地应用于工业、农业和智能制造等行业,逐渐成为各领域的中坚力量^[1]。近年来,随着机器人技术快速发展,对机器人关键构件性能提出了更高的要求。工业机器人因自重和外载荷的作用,导致构件产生变形从而引起静态变形误差和动态误差^[2]。又因工业机器人是多连杆串联结构,其构件产生的变形会通过连杆累加并放大到末端。因此,如何对工业机器人进行结构优化以提升其性能成为了科研热点之一^[3]。针对工业机器人的结构优化,目前使用较为广泛的优化方法有:尺寸优化和形状优化^[4],还有一种为给定约束条件下寻求材料最优分布形式的拓扑优化^[5-10]。相比于对尺寸、形状优化,拓扑优化能够在不改变机器人部件尺寸的情况下,对其进行性能优化,最大限度地保证了机器人整体设计完整性。对于机器人结构拓扑优化,TARN等^[11]对Delta机器人主动臂进行优化,在保证机器人刚度和耐用性同时,优化后主动臂总质量减小48.8%。但上述结构优化都是建立在对机器人单个零部件进行静力分析得到的,在实际运动过程中,机器人有加、减速情况,静力分析不能很好地反映机器人运动过程中实际受力情况和整体性能。随着多体动力学软件和虚拟样机技术的快速发展,越来越多的学者利用虚拟样机和多体动力学软件进行联合拓扑优化^[12]。文献[13-14]以虚拟样机技术为基础,考虑机器人L臂的动态载荷变化,联合ADAMS多体动力学仿真软件,提取机器人不同工况下的载荷谱,以提高刚度和固有频率为优化目标,建立优化数学模型。郑小飞等^[15]通过对爬杆机器人进行优化,在ADAMS中设置机器人极限攀爬工况,提取其动态载荷谱,以此对夹持器与T关节进行优化,优化后机器人耗能下降7.0%。在上述优化方法中,学者们都以动载荷替换静载荷作为优化约束,但上述方法建立的多体动力学仿真模型在动力学软件中表现为理想刚体模型,然而,机器人在运行过程中受到构件柔性影响。因此,越来越多的学者^[16-19]进行结构优化时,将柔性体的影响考虑到优化模型中,对工业机器人进行拓扑优化时,文献[20-21]在ADAMS中建立机器人动力学模型时,考虑到连杆自身柔性,联合有限元软件,建立了机器人刚柔耦合动力学仿真模型。但对于串联机器

人来说,系统中的柔性不仅有连杆柔性,更多是关节柔性^[22]。梁明轩等^[23]在拓扑优化模型中,考虑了柔性关节对机器人静态性能的影响,在连杆之间以扭转弹簧的形式模拟柔性关节,并对机器人进行静力分析,以此为依据进行优化,但机器人关节柔性主要体现在其对动态特性的影响,仅进行静力学分析无法全面表达其柔性。

综上所述,目前对工业机器人拓扑优化时建立的刚柔耦合动力学模型多是考虑连杆柔性,而不涉及关节柔性。本文以QJR6-1型工业串联机器人为研究对象,以变密度法(Solid isotropic material with penalization, SIMP)为基础,通过线性加权求和法建立工业机器人大臂的多目标优化函数,通过建立包含关节、连杆柔性机器人刚柔耦合动力学模型,获得机器人大臂极限工况下动态载荷谱,并提取其作为约束条件,以科学层次分析法^[24]获得优化目标的权重系数。对机器人大臂进行拓扑优化,并分析和验证优化后机器人性能。

1 优化模型建立

在进行拓扑优化建模之前,需确定机器人优化构件。首先,对工业机器人结构进行分析,由于工业机器人是串联结构,柔性体运动产生的弹性会不断放大到机器人末端,造成末端振动和执行精度下降。而机器人手臂作为上接肘部、小臂和末端,下连底部和腰部的关键构件,其结构设计在很大程度上会影响机器人整体性能表现,并且,机器人手臂内部没有电机、减速器等其他设备,所以,在对其进行结构设计时可以不考虑其他因素,保留了机器人设计的完整性,节省了时间和设计成本。

1.1 大臂拓扑优化模型建立

以变密度法(SIMP)为基础,以降低大臂柔度和提升低阶固有频率为优化目标,以应力条件、多工况载荷和体积分数为边界约束条件,最终得到机器人手臂多目标拓扑优化函数模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{find } \mathbf{x}_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbf{R}^N \\ \min B(\mathbf{x}) = \gamma_1 \sum_{f=1}^H \left(w_f \sum_{i=1}^N \mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_i \mathbf{u}_i \right) - \gamma_2 \psi(\rho) \\ \text{s. t. } \left\{ \begin{array}{l} V(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N v_i \mathbf{x}_i \leq \beta V_0 \\ \mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{U} \\ 0 \leq x_{\min} \leq \mathbf{x}_i \leq 1 \\ \sigma \leq [\sigma] \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

式中 x_i ——优化单元变量

N ——优化单元个数

$B(x)$ ——优化目标函数

u_i ——优化单元变形量

k_i ——优化单元刚度矩阵

γ_1 ——柔度权重系数

γ_2 ——固有频率权重系数

$\psi(\rho)$ ——优化结构固有频率

H ——总工况数

w_f ——工况 f 权重系数

$V(x)$ ——优化结构面积函数

v_i ——优化单元 i 体积

V_0 ——优化区域总面积

β ——体积约束分数

F ——外载荷矢量

K ——优化结构刚度矩阵

U ——优化结构受力变形矢量

x_{\min} ——优化单元最小下限

σ ——优化后结构最大应力

$[\sigma]$ ——材料许用应力

1.2 优化目标中权重系数确定方法

为了对多目标拓扑优化模型进行求解,需要确定各子目标权重系数,利用层次分析法确定拓扑优化模型中的权重系数,层次分析法的核心是通过对于子目标两两对比得到其重要性比值,获得配对比较矩阵 A ,子目标之间重要性比值如表 1 所示。

表 1 配对比较矩阵子目标之间重要性比值

Tab.1 Ratio of importance between sub-objectives of pairwise comparison matrix

重要性程度	重要性比值 a_{ij}
i 与 j 同重要	1
i 比 j 稍重要	3
i 比 j 重要	5
i 与 j 稍不重要	1/3
i 比 j 不重要	1/5
i 比 j 很不重要	1/7

两子目标之间重要性比值 a_{ij} 为

$$a_{ij} = \frac{\omega_i}{\omega_j} \quad (2)$$

式中 ω_i ——子目标 i 的重要性

ω_j ——子目标 j 的重要性

在获得各子目标的重要性比值后,形成配对比较矩阵 A_1 ,即

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{\omega_1}{\omega_1} & \frac{\omega_1}{\omega_2} & \dots & \frac{\omega_1}{\omega_n} \\ \frac{\omega_2}{\omega_1} & \frac{\omega_2}{\omega_2} & \dots & \frac{\omega_2}{\omega_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\omega_n}{\omega_1} & \frac{\omega_n}{\omega_2} & \dots & \frac{\omega_n}{\omega_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

每个配对比较矩阵都可以导出其一致性比值 C_R ,其可以判断配对比较矩阵的一致性程度,计算式为

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad C_I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

式中 C_I ——一致性指标

R_I ——随机一致性指标

λ_{\max} ——配对比较矩阵 A 的最大特征值

n ——目标数

当 $C_R < 0.1$ 时,可以认为配对比较矩阵的不一致程度在可接受范围内,通过一致性检验。

2 机器人刚柔耦合动力学建模

2.1 柔性关节动力学描述

机器人关节变形主要由传动装置所引起,机器人关节柔性主要表现为:由于关节刚度不足,导致各个关节输入转角和输出转角在运动时会产生转角误差,并随着工业机器人多关节串联结构被放大,使机器人末端在运动时产生振动。为了表征机器人关节柔性,利用 SPONG^[25] 提出的转子-扭簧模型建立机器人柔性关节,图 1 为工业机器人结构和柔性关节示意图。

机器人连杆 i 由扭簧产生的柔性关节力矩进行驱动,柔性关节力矩 τ_i 表达式为

$$\tau_i = k_i \delta_i = k_i (\theta_{ri} - q_i) \quad (6)$$

式中 k_i ——关节扭转刚度

δ_i ——减速器与连杆之间的转角误差

θ_{ri} ——减速器 i 转角 q_i ——连杆 i 转角

2.2 柔性连杆动力学描述

对于柔性体 B_i 来说,为了描述其柔性变形,通过有限元法将柔性体离散为有限的单元节点,如柔性体 B_i 上任一节点 p 的位置坐标描述如图 2 所示。图中, C_i 为柔性体 B_i 与其他柔性体连接时产生的弹性变形, e^r 为基坐标系, e^b 为点 p 在柔性体上的动坐标系, r_{op} 为未变形时点 p 在基坐标系下向量, S_{io} 为

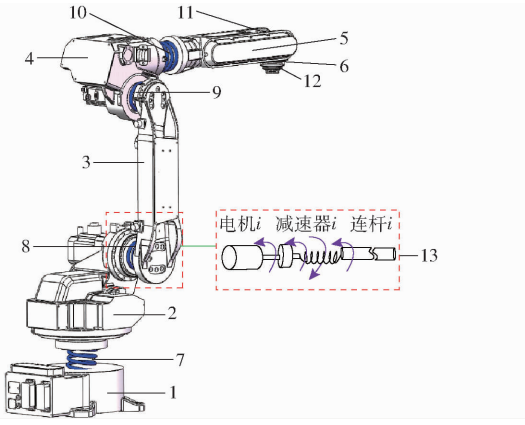
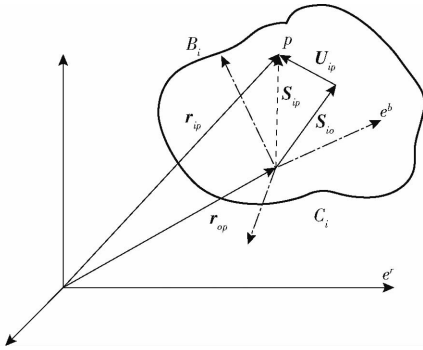


图1 机器人结构和柔性关节模型

Fig.1 Robot structure and flexible joints model

- 1.底部 2.腰部 3.大臂 4.肘部 5.小臂 6.末端法兰 7.关节1 8.关节2 9.关节3 10.关节4 11.关节5 12.关节6
13.柔性关节模型

图2 柔性体节点 p 的坐标描述Fig.2 Coordinate description of flexible body node p

点 p 在没有受到变形时动坐标系下的位置矢量, U_{ip} 为点 p 在动坐标上的相对变形矢量, S_{ip} 为点 p 在动坐标系下受到柔性体影响后的动坐标向量, 由未变形的基坐标向量 r_{op} 和动坐标系下变形坐标向量 S_{ip} 组合形成点 p 在基坐标系下的坐标向量 r_{ip} 。

通过假设模态法表征柔性连杆在动坐标系下的变形矢量, 由此得出, 柔性连杆位置坐标由 $X = (x, y, z)^T$ 表示, 姿态则通过欧拉角 $e = (\varphi, \theta, \psi)^T$ 来表征, 其中, φ 为进动角, θ 为章动角, ψ 为自转角; 模态坐标为 $\eta = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m)^T$ (m 为模态坐标数), 表示第 i 阶模态振幅在系统中的振型分量。综上, 柔性连杆广义坐标 ξ 为

$$\xi = \begin{bmatrix} X \\ e \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \varphi \\ \theta \\ \psi \\ \eta_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

柔性连杆上第 i 个节点的空间坐标矢量为

$$r_i^0 = X + A(S_i + \varphi_i \eta) \quad (8)$$

式中 A ——局部坐标系原点相对于惯量坐标系原点方向余弦的坐标矩阵

S_i ——第 i 个节点变形前在局部坐标系下的位置矢量

φ_i ——第 i 个节点移动自由度模态矩阵子块

对式(8)进行求导, 得到第 i 个节点速度为

$$\dot{r}_i = [I \quad -A(\tilde{S}_i + \varphi_i \eta) \quad B \quad A\varphi_i] \dot{\xi} \quad (9)$$

式中 I ——单位矩阵

\tilde{S}_i ——向量矩阵 S_i 所对应的对称矩阵

B ——欧拉角求一阶导后的速度转换矩阵

$\dot{\xi}$ ——柔性连杆广义坐标进行求导后得到的速度广义矩阵

综合分析, 已知某柔性连杆 i 上任意质点的速度矢量, 可得其质点动能 dT_i^m 为

$$dT_i^m = \frac{1}{2} \text{Trace}[\dot{r}_i^0 (\dot{r}_i^0)^T] dm \quad (10)$$

对式(10)积分可得柔性连杆 i 动能 T_{Fi} 为

$$T_{Fi} = \int dT_i^m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i \dot{r}_i^0 (\dot{r}_i^0)^T = \frac{1}{2} \dot{\xi}^T M_i \dot{\xi} \quad (11)$$

式中 m_i ——第 i 个节点质量

M_i ——柔性连杆 i 质量矩阵

同样地, 对于刚性连杆来说, 假设某刚性连杆 j 上任一点在基坐标系下坐标为

$${}^0 r_p = {}^0 T_j^j r_p \quad (12)$$

式中 ${}^0 r_p$ ——连杆 j 任一点在基坐标系的坐标向量

${}^j r_p$ ——连杆 j 任一点在局部坐标系中的坐标向量

${}^0 T_j$ ——连杆 j 任一点从基坐标系到局部坐标系的坐标变换矩阵

则任意一点速度平方数为

$$v^2 = \left(\frac{d^j r_p}{dt} \right)^2 =$$

$$\text{Trace} \left[\sum_{h=1}^j \sum_{k=1}^j \frac{\partial({}^0 T_j)}{\partial q_h} {}^j r_p {}^j r_p^T \frac{\partial({}^0 T_j)^T}{\partial q_k} \dot{q}_h \dot{q}_k \right] \quad (13)$$

假设在刚性连杆 j 上的任一点质量为 dm 的微元动能 dT_{Rj} 为

$$dT_{Rj} = \frac{1}{2} v^2 dm = \frac{1}{2} \text{Trace} \left[\sum_{h=1}^j \sum_{k=1}^j \frac{\partial({}^0 T_j)}{\partial q_h} {}^j r_p {}^j r_p^T \frac{\partial({}^0 T_j)^T}{\partial q_k} \dot{q}_h \dot{q}_k \right] dm = \frac{1}{2} \text{Trace} \left[\sum_{h=1}^j \sum_{k=1}^j \frac{\partial({}^0 T_j)}{\partial q_h} ({}^j r_p dm^j r_p^T)^T \frac{\partial({}^0 T_j)^T}{\partial q_k} \dot{q}_h \dot{q}_k \right] \quad (14)$$

综上,对其积分可得刚性连杆 j 动能 T_{Rj} 为

$$T_{Rj} = \text{Trace} \left[\sum_{h=1}^j \sum_{k=1}^j \frac{\partial({}^0T_j)}{\partial q_h} \left(\int {}^j r_p {}^j r_p^T dm \right) \frac{\partial({}^0T_j)^T}{\partial q_k} \dot{q}_h \dot{q}_k \right] \quad (15)$$

2.3 机器人刚柔耦合动力学建模

机器人整个刚柔耦合系统中势能分别为柔性连杆 i 和刚性连杆 j 自重产生的势能 P_{ij} 、柔性连杆 i 由于运动过程中变形引起的弹性势能 K_{li} 、关节 i 产生的关节扭转势能 P_{ki} , 动能为柔性连杆 i 和刚性连杆 j 产生的动能 T_{ij} 。计算式为

$$\begin{cases} P_{ij} = -(\mathbf{M}_i \mathbf{r}_i + \mathbf{M}_j \mathbf{r}_j) g \\ K_{li} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\xi} \mathbf{K}_i \boldsymbol{\xi}^T \\ P_{ki} = \frac{1}{2} (\boldsymbol{\theta}_{ri} - \mathbf{q}_i)^T k_i (\boldsymbol{\theta}_{ri} - \mathbf{q}_i) \\ T_{ij} = T_{Fi} + T_{Rj} \end{cases} \quad (16)$$

式中 \mathbf{M}_j ——刚性连杆 j 质量矩阵

\mathbf{K}_i ——柔性连杆 i 模态刚度矩阵

\mathbf{r}_i ——在基坐标系下柔性连杆 i 质心位置坐标

\mathbf{r}_j ——在基坐标系下刚性连杆 j 质心位置坐标

由系统中动能与势能的关系得到拉格朗日函数为

$$L = \sum_{i=1}^n (T_{Fi} - K_{li} - P_{ki} + \mathbf{M}_i \mathbf{r}_i g) + \sum_{j=1}^n (T_{Rj} + \mathbf{M}_j \mathbf{r}_j g) \quad (17)$$

对拉格朗日函数求导得到

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{Q} \quad (18)$$

式中 \mathbf{q} ——广义位置矢量

$\dot{\mathbf{q}}$ ——广义速度矢量

\mathbf{Q} —— $3n \times 1$ 的广义力矩矢量

对拉格朗日方程进行整合,可得到机器人刚柔耦合动力学方程一般表达式为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q} \quad (19)$$

式中 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ ——质量矩阵

$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ ——哥氏力以及离心力矩阵

$\mathbf{G}(\mathbf{q})$ ——重力项矩阵

$\ddot{\mathbf{q}}$ ——广义加速度矢量

3 机器人刚柔耦合动力学模型仿真

3.1 关节柔性化处理

机器人柔性关节为扭簧模型,在 ADAMS 软件中需要加入一个零质量的 dummy part 充当桥梁,通过定义力矩函数的方式间接实现关节柔性化,图 3 为机器人腰部和大臂之间柔性关节驱动及力矩设置。

矩设置。

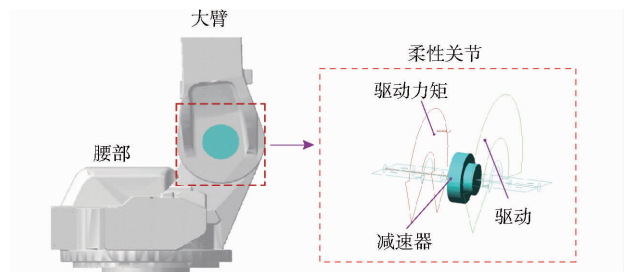


图3 机器人柔性关节驱动及力矩设置

Fig. 3 Robot flexible joint driving and torque setting

3.2 连杆柔性化处理

对机器人连杆进行分析,大臂和小臂可以视为细长连杆,其自身变形是机器人连杆柔性产生的主要部分;而机器人肘部作为连接大臂和小臂的关键连杆,受到小臂和末端自重和负载的影响,其弹性变形不可忽略;机器人末端作为直接影响机器人运动轨迹精度和定位精度的连杆,为使机器人运动更真实,末端在运动过程中产生的弹性变形也需考虑进去,图 4 为机器人刚、柔性连杆示意图。

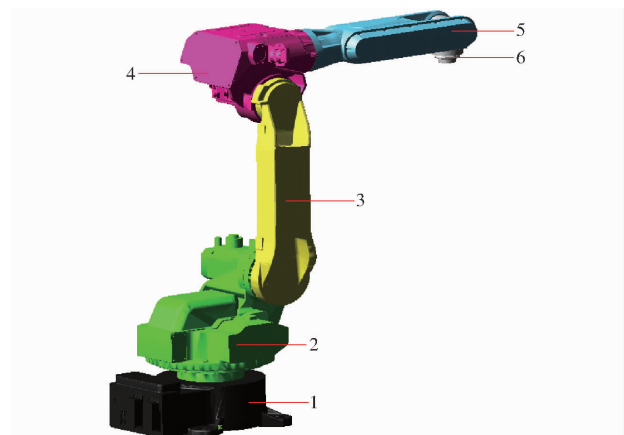


图4 机器人柔性和刚性连杆示意图

Fig. 4 Schematic of robot's flexible and rigid connecting rods

1. 底部(刚性) 2. 腰部(刚性) 3. 大臂(柔性) 4. 肘部(柔性) 5. 小臂(柔性) 6. 末端法兰(柔性)

将连杆模型导入有限元仿真软件 ABAQUS 中进行柔性化处理,生成后缀为 .mnf 的柔性体文件,将文件导入到 ADAMS 中,生成柔性连杆模型。以大臂为例,图 5 为柔性化后大臂 1~6 阶模态和所有柔性连杆装配在一起后的云图。

3.3 机器人刚柔耦合动力学仿真

在多体动力学软件 ADAMS 中建立刚柔耦合动力学仿真模型。对于细长轻质连杆而言,当主要载荷作用于轴线垂直方向时,其变形量最大,在机器人末端施加最大负载,并调节后续连杆与大臂成为一条直线。

机器人作业时关节 2 和关节 3 的连线方向有无数个,而且大臂截面较复杂,很难判断大臂变形量最

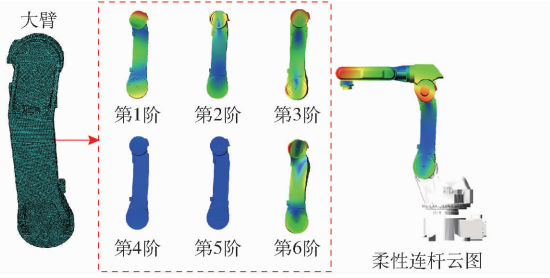


图5 大臂1~6阶模态与机器人柔性连杆云图

Fig.5 The 1st ~6th order modes of forearm and robot flexible rods cloud diagram

大时的载荷方向。但通过分析机器人各个关节旋转方向可知,大臂受力方向主要是由关节1、2组合运动方向决定。所以,为提取大臂所受极限载荷,将大臂上所受载荷分解为关节1、2旋转方向上的载荷。机器人前2个关节驱动参数如表2所示。

表2 关节运行参数

Tab.2 Joint operating parameters

关节	关节运动		最大角加速度/ (rad·s ⁻²)	角速度上限/ (rad·s ⁻¹)
	上限/rad	下限/rad		
1	2.880	-2.880	13.928	3.840
2	2.531	-1.466	17.453	3.840

设置3个工况为:①工况1:只转动关节1,在关节1限制范围内运动,加速度100%,运行速度为最大速度。②工况2:只转动关节2,在关节2限制范围内运动,加速度100%,运行速度为最大速度。③工况3:关节1、2同时旋转,关节运动范围分别为工况1、2的各关节运动限制范围,加速度100%,运行速度为最大速度。通过ADAMS进行动力学仿真模拟各工况,为保证机器人大臂能够遍历所有可能的位置,运行时间设定为3s,步长1000步,提取大臂各工况下载荷谱作为边界约束条件。

4 机器人大臂拓扑优化

4.1 优化函数中权重因子分配

对于机器人大臂优化模型来说,首先考虑柔度和固有频率这两个优化目标的权重 γ_1 、 γ_2 ,这两个目标权重可以根据其重要性给定,在大臂优化模型中,柔度重要性高于其固有频率重要性,所以,给定 $\gamma_1=0.8$ 、 $\gamma_2=0.2$ 。参考表1,对各个工况的重要程度进行对比,得到关于工况配对比较矩阵A为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

通过求解,配对比较矩阵A最大特征值 $\lambda_{\max}=3.0385$,通过式(4)可以求解得到该矩阵的一致性

比值 C_R 为0.033,小于0.1,由此可以得出矩阵一致性满足要求,对最大特征值对应的特征向量进行归一化处理,3个工况权重为 $\alpha=(0.26,0.64,0.10)$ 。同样的,对于大臂固有频率优化来说,选择低阶固有频率作为优化目标,取 $k=3$,得到其权重为: $w_1=0.67$ 、 $w_2=0.24$ 、 $w_3=0.09$ 。

4.2 大臂拓扑优化求解

在软件中设置相应权重系数,并给定相应的优化区域和非优化区域,如图6所示。

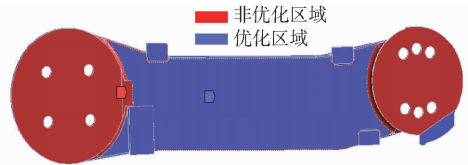
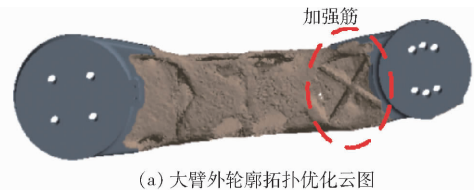


图6 优化与非优化区域

Fig.6 Optimized and non-optimized areas

在优化模型中涉及到多个工况下的载荷,利用命令流中的LSWRTIE命令将载荷写入优化软件,设置体积约束系数 β 为60%,求解器最大迭代次数为500,为防止刚度矩阵奇异,最小相对密度设定为0.001,计算精度为0.01%。图7a为机器人大臂拓扑优化云图,可以看出优化后的模型连续性较好,边界清晰,并且在优化模型中没有出现棋盘现象^[26],并在大臂上部出现加强筋,质量从20.233kg降至16.447kg,下降18.71%,图7b为机器人大臂重构后模型。



(a) 大臂外轮廓拓扑优化云图



(b) 大臂优化后重构模型

图7 大臂拓扑优化结果与模型重构

Fig.7 Forearm topology optimization result and model reconstruction

5 优化结果

5.1 静态性能对比

将优化后机器人大臂在三维建模软件中进行重构。然后,对比大臂在工况3最大载荷作用下的变形,二者变形量对比如图8所示。大臂最大变形量从0.181mm降至0.149mm,变形量降低17.68%。

机器人大臂材料为硬铝合金,密度为2770kg/m³,弹性模量为70GPa,泊松比为0.33,许用应力为

155 MPa,从图 9 可知,机器人大臂优化后最大应力为 30.434 MPa,满足约束条件和优化要求。

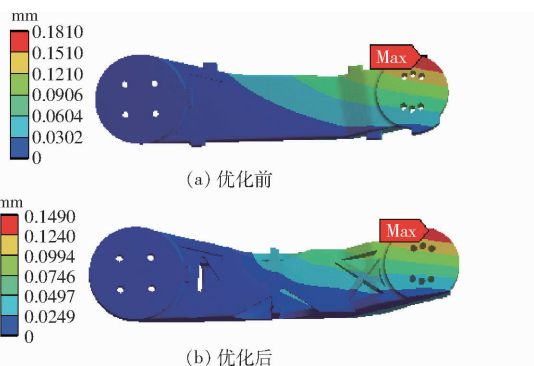


图 8 大臂最大变形量对比

Fig. 8 Comparison of maximum deformation displacement

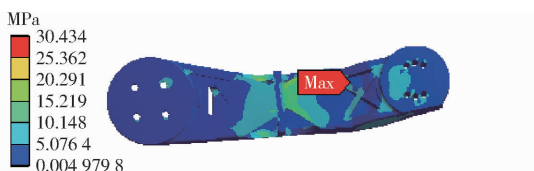


图 9 大臂优化后最大应力

Fig. 9 Maximum stress after optimization of forearm

为分析优化后大臂对机器人整体性能的影响,在虚拟样机中装配好重构后的机器人模型。依据该型工业机器人最大负载许可,在末端添加垂直向下载荷 58.8 N,为了更加接近柔性关节模型,以 Joint 连接方式取代原先的 Bond 约束,同时用 Torsional Stiffness 添加关节刚度模拟机器人柔性关节。由图 10 可得,优化后机器人最大变形量从 0.208 mm 降至 0.188 mm,静态变形误差减小 9.62%。

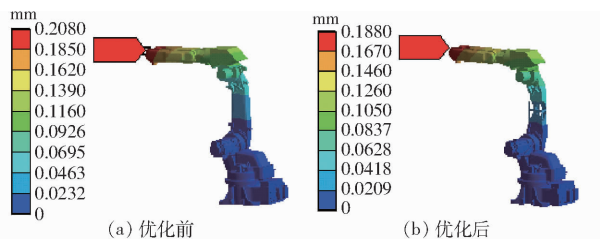


图 10 优化前后机器人最大变形量对比

Fig. 10 Comparison of maximum deformation displacement of robot before and after optimization

5.2 动态性能

5.2.1 大臂固有频率

提取大臂优化后前 3 阶固有频率,由图 11 可以看出,机器人大臂固有频率均有不同程度的提高,并且没有出现频率振荡现象。

5.2.2 末端定位精度

为分析优化后大臂对机器人动力学特性的影响,设定一段机器人末端直线运动轨迹,末端中心点从机器人基坐标系 (848.5, 0, 1051.5) mm 匀速运动到 (848.5, 0, 951.5) mm,轨迹长度为 100 mm,根据

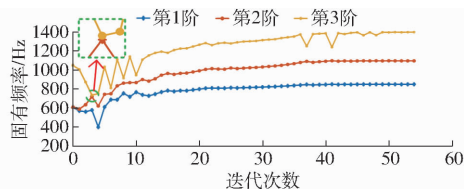


图 11 大臂固有频率优化

Fig. 11 Forearm natural frequencies optimization

国标 GB/T 12642—2013《工业机器人 性能规范及其试验方法》中轨迹特性试验速度选 10 mm/s,提取机器人末端中心点轨迹,轨迹如图 12 所示,刚性机器人末端不会产生振动,轨迹为一条直线。但是机器人在实际作业中,由于受到负载、关节和连杆柔性等复杂因素影响,会使机器人末端在作业时产生非线性振动,最终导致机器人在作业时产生轨迹误差和定位误差。

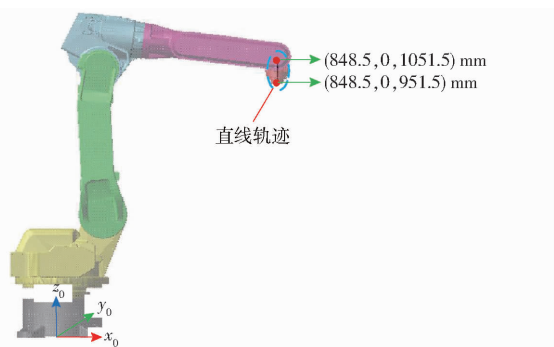


图 12 直线轨迹

Fig. 12 Linear trajectory

在 ADAMS 中对优化前机器人刚柔耦合动力学仿真模型进行装配,设置与刚体模型同样的工况,提取其末端中心点轨迹误差。在工业机器人实验平台上设置相同工况,通过上位机和激光跟踪仪采集机器人末端轨迹,图 13 为现场实验设备图。

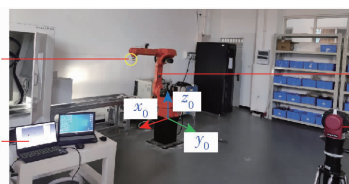


图 13 现场实验设备

Fig. 13 Experimental devices

1. 测量靶球 2. 上位机 3. QJR6-1 型机器人 4. 激光跟踪仪

将末端中心点轨迹在基坐标系下进行表达,得到 3 个方向上实际的末端中心点轨迹误差,仿真轨迹误差与实验轨迹误差对比如图 14 所示。

由图 14 可知,机器人轨迹误差在 y 轴方向上最大,实验轨迹误差和仿真轨迹误差在幅值范围和变化趋势上都比较吻合。因为实际的工业机器人是复杂的高非线性系统,所以,在误差允许范围内,刚柔耦合动力学仿真模型结果可以表征实际机器人末端

在运行过程中产生的轨迹误差。在 ADAMS 中建立机器人优化后刚柔耦合动力学仿真模型,提取其末

端轨迹误差,并与优化前轨迹误差进行对比,二者对比结果如图 15 所示。

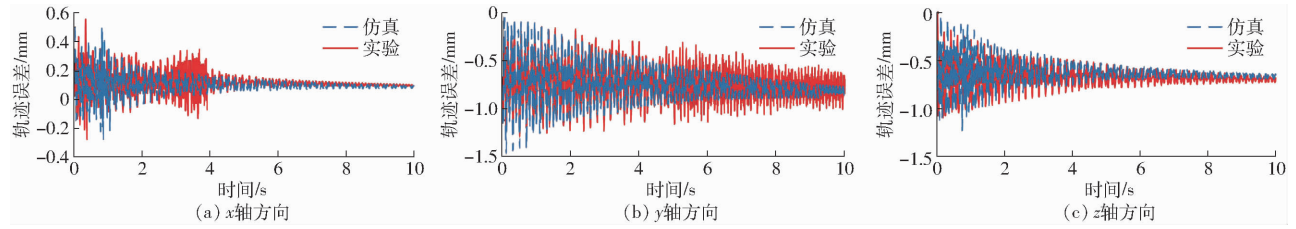


图 14 仿真与实验轨迹误差对比

Fig. 14 Comparison of simulation and experimental trajectory errors

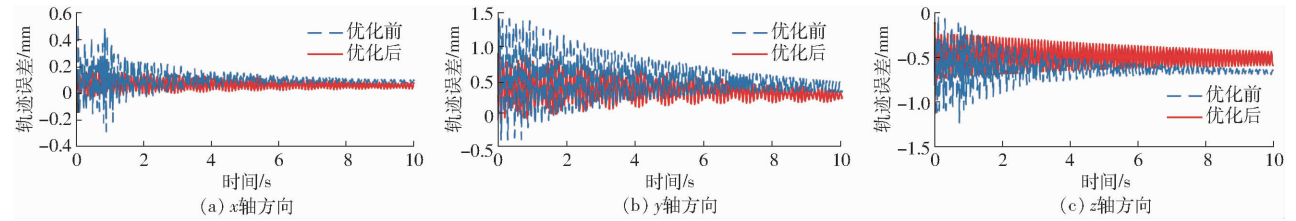


图 15 优化前后仿真轨迹误差对比

Fig. 15 Comparison of simulation trajectory errors before and after optimization

如图 15 所示,大臂优化之后,机器人末端轨迹误差在 3 个方向上都有所减小,机器人轨迹精度得到提高。以理想终点位置为圆心,以定位误差为半径,得到定位误差圆,如图 16 所示,定位误差由优化前 0.777 mm 降至优化后 0.687 mm,降低 11.58%,定位精度得到提高。

过程中关节和连杆柔性对机器人的影响,利用假设模态法对连杆柔性状态进行表征,以扭簧模型对关节柔性进行阐述;利用 ADAMS 多体动力学软件建立刚柔耦合动力学模型,并与实际工况下机器人末端轨迹误差进行对比,预测了末端振动响应,精确表征了机器人动态性能。

(2) 优化后机器人大臂低阶固有频率和刚度都得到提升,在工况 3 最大载荷作用下,大臂最大变形量从 0.181 mm 降至 0.149 mm,变形量降低 17.68%,并且优化后大臂最大应力为 30.434 MPa,满足优化约束条件,表明优化结果良好。

(3) 对优化后机器人整体进行分析,在末端最大负载 58.8 N 作用下,机器人初始静态位置最大变形量从 0.208 mm 降至 0.188 mm,静态变形误差减小 9.62%;动态定位误差从 0.777 mm 降低至优化后的 0.687 mm,降低 11.58%。机器人定位精度得到提升。

(4) 对工业机器人关键构件大臂建立多目标优化函数模型,对其进行拓扑优化设计,优化后大臂在满足轻量化的同时,保证了性能要求,并提升了机器人整机静态性能,为工业机器人本体其它构件优化提供了理论参考。

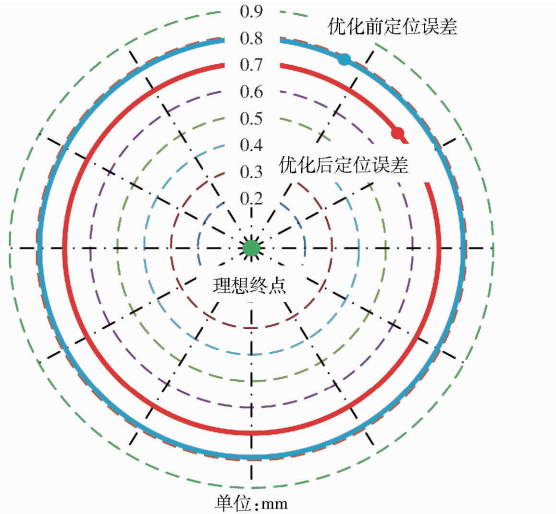


图 16 定位误差对比

Fig. 16 Positioning error comparison

6 结论

(1) 机器人大臂优化过程中,考虑了实际运行

参 考 文 献

- [1] 王天然. 机器人技术的发展[J]. 机器人, 2017, 39(4): 385-386.
WANG Tianran. Development of robotics[J]. Robotics, 2017, 39(4): 385-386. (in Chinese)
- [2] SICILIANO B, KHATIB O. Springer handbook of robotics[M]. New York: Springer Handbook of Robotics, 2008.
- [3] 杨文. 工业机器人结构设计 with 性能提升过程中的关键问题分析[J]. 内燃机与配件, 2021(10): 78-79.
YANG Wen. Analysis of key issues in the process of structural design and performance improvement of industrial robots[J].

- Internal Combustion Engines and Accessories, 2021(10): 78 - 79. (in Chinese)
- [4] 孟齐志, 谢福贵, 张赛, 等. 高速高加速并联机器人构型与尺度参数设计[J]. 机械工程学报, 2022, 58(13): 36 - 49. MENG Qizhi, XIE Fugui, ZHANG Sai, et al. Design of configuration and scale parameters for high-speed and high-acceleration parallel robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(13): 36 - 49. (in Chinese)
- [5] 谢斌, 温昌凯, 杨子涵, 等. 基于实测载荷的蔬菜田间动力机械车架结构优化[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 463 - 469. XIE Bin, WEN Changkai, YANG Zihan, et al. Structural optimization of vegetable field power machinery frame based on measured load[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 463 - 469. (in Chinese)
- [6] 王昱, 牟剑, 曾志雄, 等. 猪舍废气净化系统填料结构多目标拓扑优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 329 - 334. WANG Yu, MOU Jian, ZENG Zhixiong. Multi-objective topology optimization design and test of pig house exhaust gas purification system packing structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 329 - 334. (in Chinese)
- [7] KOBER M, KÜHHORN A, RADEMANN J R, et al. Nonlinear topology optimization of centrifugally loaded aero-engine part with newly developed optimality-criteria based algorithm[J]. Aerospace Science & Technology, 2014, 39:705 - 711.
- [8] BARBIERI S G, GIACOPINI M, MANGERUGA V, et al. A design strategy based on topology optimization techniques for an additive manufactured high performance engine piston[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11:641 - 649.
- [9] MERULLA A, GATTO A, BASSOLI E, et al. Weight reduction by topology optimization of an engine subframe mount, designed for additive manufacturing production[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 19:1014 - 1018.
- [10] WU Y H, LIU X M, WANG F. Topology optimization design of the bracket of a special vehicle based on FEA method[C]//2010 Second International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing. IEEE, 2010.
- [11] TRAN T H T, NGUYEN D S, VO N T, et al. Design of delta robot arm based on topology optimization and generative design method[C]//2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), 2020.
- [12] 张志飞, 陈仁, 徐中明, 等. 面向多目标的汽车悬架控制臂拓扑优化研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 114 - 121. ZHANG Zhifei, CHEN Ren, XU Zhongming, et al. Multi-objective oriented topology optimization study of automotive suspension control arm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 114 - 121. (in Chinese)
- [13] 胡启国, 胡艳敏. 工业机器人臂部静态多目标拓扑优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(9): 146 - 152. HU Qiguo, HU Yanmin. Static-dynamic multi-objective topology optimization of industrial robot arm[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2020, 39(9): 146 - 152. (in Chinese)
- [14] 王春华, 安达, 赵东辉. 工业机器人臂部静态多目标拓扑优化设计研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(2): 241 - 246. WANG Chunhua, AN Da, ZHAO Donghui. Research on static-dynamic multi-objective topology optimization design of industrial robot arm[J]. Mechanical Science and Technology, 2016, 35(2): 241 - 246. (in Chinese)
- [15] 郑小飞, 黄镇海, 马小龙, 等. 基于 SIMP 方法的爬杆机器人结构优化与分析[J]. 工程设计学报, 2023, 30(3): 342 - 352. ZHENG Xiaofei, HUANG Zhenhai, MA Xiaolong, et al. Structural optimization and analysis of pole-climbing robot based on SIMP method[J]. Journal of Engineering Design, 2023, 30(3): 342 - 352. (in Chinese)
- [16] 王家忠, 张建宝, 弋景刚. 刚柔耦合的草莓采摘机械手结构设计及动力学分析[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(2): 419 - 426. WANG Jiazhong, ZHANG Jianbao, YI Jinggang. Structural design and dynamic analysis of strawberry picking manipulator with rigid-flexible hybrid connection[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(2): 419 - 426. (in Chinese)
- [17] 袁铭鸿, 万安平, 童水光. 强夯机多体系统刚柔耦合动力学仿真与结构优化[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(22): 9176 - 9182. YUAN Minghong, WAN Anping, TONG Shuiguang. Structural optimization and simulation of rigid-flexible coupling dynamics in multi-body system of rammer[J]. Science, Technology and Engineering, 2020, 20(22): 9176 - 9182. (in Chinese)
- [18] 周凯红, 张学谦, 郭玉田. 基于 ADAMS 和 ANSYS 的空间四杆引纬机构优化研究[J]. 机电工程, 2021, 38(3): 383 - 387. ZHOU Kaihong, ZHANG Xueqian, GUO Yutian. Optimization study of spatial four-bar weft-guiding mechanism based on ADAMS and ANSYS[J]. Electromechanical Engineering, 2021, 38(3): 383 - 387. (in Chinese)
- [19] 葛悦, 王洪波, 龚旻, 等. 火箭卫星舱壳体分离灵敏度分析与优化设计[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 46 - 52, 72. GE Yue, WANG Hongbo, GONG Min, et al. Separation sensitivity analysis and optimization design of rocket satellite module shell[J]. Journal of Weapons and Equipment Engineering, 2020, 41(12): 46 - 52, 72. (in Chinese)
- [20] HUANG H B, ZHANG G. The topology optimization for L-shape arm of motorman-HP20 robot[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 201 - 202: 871 - 874.
- [21] 胡启国, 周松. 考虑刚柔耦合的工业机器人多目标可靠性拓扑优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(3): 623 - 631. HU Qiguo, ZHOU Song. Multi-objective reliability topology optimization for industrial robots considering rigid-flexible coupling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(3): 623 - 631. (in Chinese)
- [22] 王斌锐, 方水光, 金英连. 综合关节和杆件柔性的机械臂刚柔耦合建模与仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 211 -

215,225.

WANG Binrui, FANG Shuiguang, JIN Yinglian. Modeling and simulation of rigid-flexible coupling of robotic arm with integrated joint and rod flexibility[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 211 - 215, 225. (in Chinese)

- [23] 梁明轩, 李正刚, 唐任仲, 等. 基于柔性多体动力学的机械臂结构优化设计[J]. 中国机械工程, 2017, 28(21): 2562 - 2566.

LIANG Mingxuan, LI Zhenggang, TANG Renzhong, et al. Optimized design of robotic arm structure based on flexible multibody dynamics[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(21): 2562 - 2566. (in Chinese)

- [24] 李风, 付开进, 于向军. 基于层次分析法的大型半自磨机磨矿性能优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 392 - 398.

LI Feng, FU Kaijin, YU Xiangjun. Optimization of grinding performance of large semi-autogenous mill based on hierarchical analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 392 - 398. (in Chinese)

- [25] SPONG M W. Modeling and control of elastic joint robots[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1987, 17(2): 48 - 55.

- [26] 邢广鹏, 孙志刚, 崔向敏, 等. 多工况载荷下航空发动机支架拓扑优化设计[J]. 航空动力学报, 2020, 35(11): 2248 - 2262.

XING Guangpeng, SUN Zhigang, CUI Xiangmin, et al. Optimised design of topology for aero-engine mounts under multi-case loads[J]. Journal of Aerospace Dynamics, 2020, 35(11): 2248 - 2262. (in Chinese)

(上接第 448 页)

- [22] 赵磊, 闫照方, 栾倩倩, 等. 大空间运动 3 - RRRU 并联机器人运动学标定与误差分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 411 - 420.

ZHAO Lei, YAN Zhaofang, LUAN Qianqian, et al. Kinematic calibration and error analysis of 3 - RRRU parallel robot in large overall motion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 411 - 420. (in Chinese)

- [23] 刘伟, 刘顺, 邓朝晖, 等. 工业机器人定位误差补偿技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(17): 1 - 16.

LIU Wei, LIU Shun, DENG Zhaohui, et al. Research progress of positioning error compensation technology for industrial robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(17): 1 - 16 (in Chinese)

- [24] SHAMI T M, ELSALEH A A, ALSWAITTI M, et al. Particle swarm optimization: a comprehensive survey[J]. IEEE Access, 2022, 10: 10031 - 10061.

- [25] WANG R, HAO K, CHEN L, et al. A novel hybrid particle swarm optimization using adaptive strategy[J]. Information Sciences, 2021, 579: 231 - 250.