

MD-1200YJ 码垛机器人腰部支架的多目标 结构优化设计

Multi-objective structural optimization design for the waist mounting bracket of MD-1200YJ palletizing robot

贺莹^{1,2} 梅江平¹ 孙玉德^{1,3} 臧家炜¹

HE Ying^{1,2} MEI Jiang-ping¹ SUN Yu-de^{1,3} ZANG Jia-wei¹

(1. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学仁爱学院机械工程系, 天津 301636; 3. 北京翰宁智能科技有限责任公司, 北京 100070)

(1. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Tianjin University Renai College, Tianjin 301636, China; 3. Beijing Hanning ZN Tech Co., Ltd., Beijing 100070, China)

摘要:建立了 MD-1200YJ 型码垛机器人腰部支架的有限元模型,通过模态分析与模态试验验证有限元模型的准确性,并基于 5 次非均匀有理 B 样条运动规律进行考虑动力学因素的静力学分析,分析结果表明该零件具有轻量化设计的潜力;确定以质量最小、最大位移最小、最大应力最小为优化目标,以结构参数为设计变量,以第一、二阶固有频率不降低以及设计变量的边界条件为约束条件,利用 Box-Behnken 和 RSM 方法建立目标函数和约束函数的 RSM 模型,并验证了模型的准确性;利用 NSGA-II 算法求得最优解,进而得到腰部支架的优化模型;通过对优化模型进行静力学分析、模态分析,并与初始模型进行对比,在保证前两阶固有频率不降低以及最大应力和位移均在允许范围内的情况下,质量减轻了 8.2%,验证了该优化设计方法的有效性。

关键词:码垛机器人;腰部支架;多目标优化;静力学分析;模态分析

Abstract: Finite element model of waist mounting bracket of MD-1200YJ palletizing robot was established, and the accuracy of the finite element model was verified by modal analysis, the modal test, and static analysis. Taking dynamic factors into account, based on the quintic non-uniform, the rational B-splines motion law was carried out, and the analysis showed that this part had the potential of lightweight design. The mass, the maximal stress, and the maximal deformation were minimized as the optimization objectives were

determined. The structure parameters as design variables, the first and second natural frequency no reducing and boundary conditions of design variables as the constraint conditions, the approximation models of objective functions and constraint functions were established by the Box-Behnken and the RSM, and the accuracy of these models were verified. The multi-objective optimization mathematical model was established by the methods mentioned above. The optimal solution was obtained by using NSGA-II algorithm, and the optimized model of waist mounting bracket was also gained. The contrastive analysis results between optimized model and initial model showed that the mass reduction was 8.2%, as the first two natural frequencies were increased, bounding with the maximum stress and deformation within allowable values range. The validity of this optimization design method was verified.

Keywords: palletizing robot; waist mounting bracket; multi-objective optimization; static analysis; modal analysis

码垛机器人是一种用于物料搬运、码垛作业的工业机器人,因其动作灵活,效率高,柔性高等优点^[1]在现代化食品生产过程中广泛应用。码垛机器人的腰部支架是安装机械臂且承受复杂、交变、重载荷的基础零件,其动、静态特性的优劣对机器人的性能具有重要影响,因此刚度、强度和振动稳定性是腰部支架设计过程中必须考虑的重要指标^[2]。同时,在市场竞争和绿色制造理念的驱动下,减轻产品质量,降低资源与能源消耗也已成为设计者不可忽视的重要因素。因此,在保证腰部支架机械性能的条件下,研究以减轻质量为主要目标的多目标结构优化设计问题具有十分重要的意义。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:51475320)
作者简介:贺莹(1980—),男,天津大学仁爱学院副教授,硕士。
E-mail: wutaidouhy@163.com
收稿日期:2018-08-05

以往有关工业机器人结构优化方面的研究大多以机械臂为研究对象^[3-7],而针对腰部支架这类基础零件的动、静态特性的分析与优化研究很少。一些机床的床身、立柱的结构优化研究对本研究具有参考价值^[8-10]。但是由于腰部支架除了承受较大的动、静载荷之外,其自身还要在腰部电机和 RV 减速器的作用下进行频繁的启停、换向,加减速驱动等复杂运动,这与机床床身、立柱所处工况具有明显区别,因此针对码垛机器人腰部支架的分析与优化研究存在特殊性和必要性。

本研究基于有限元法、模态试验、力学分析、试验设计、响应面法结合多目标优化理论及智能优化算法,针对 MD-1200YJ 型码垛机器人的腰部支架进行多目标结构优化设计。

1 MD-1200YJ 型码垛机器人介绍

MD-1200YJ 型码垛机器人具有腰关节、肩关节、肘关节和腕关节四个驱动关节,即为 4 DOF 机器人,最大负载能力 120 kg,腰部最高回转速度 85°/s,属于高速重载码垛机器人^[11],其结构组成如图 1 所示,在局部闭链 II 和 III 的作用下,末端执行器底面始终保持水平姿态。

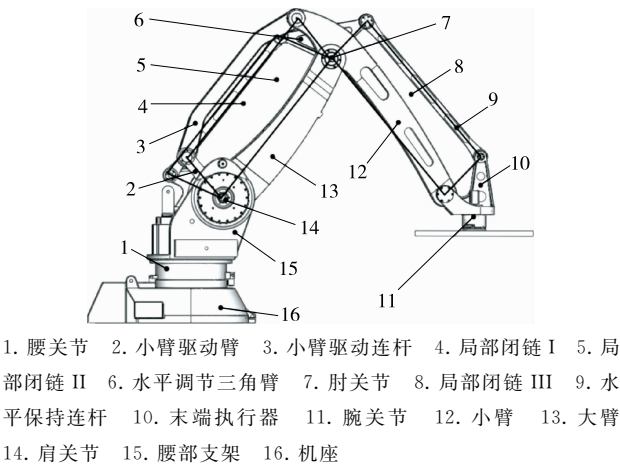


图 1 MD-1200YJ 码垛机器人模型

Figure 1 Model of MD-1200YJ palletizing robot

2 腰部支架的多目标优化设计

2.1 腰部支架有限元模型的建立

在创建有限元模型之前,先进行模型简化,去掉零件的倒角、圆角、螺纹孔等特征,简化模型如图 2 所示,质量为 297.12 kg。材料 QT500-7,其材料属性如表 1 所示^[12]。

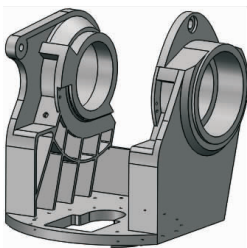


图 2 腰部支架的简化模型

Figure 2 Simplified model of waist mounting bracket

网格划分,采用四面体网格,最大单元大小为 36.705 70 mm;最小单元大小为 7.341 15 mm;节点总数为 289 705;单元总数为 179 138。有限元模型如图 3 所示。



图 3 腰部支架的有限元模型

Figure 3 Finite element model of waist mounting bracket

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

名称	单位	数值
弹性模量	Pa	1.62×10^{11}
泊松比	—	0.28
抗剪模量	Pa	6.27×10^{10}
密度	kg/m ³	7 000.00
屈服强度	Pa	3.20×10^8
张力强度	Pa	5.00×10^8

2.2 腰部支架的模态分析

码垛机器人工作时,腰部支架将受到实时变化的驱动力矩、惯性力矩、重力矩、负载力矩等复杂外力的激励作用,并且由于码垛机器人常在高速下运动,这些外力作用的频率也随之提高,为了避免共振的发生,结构优化过程中须要考虑动态特性,因此对腰部支架进行模态分析,并通过模态试验验证其准确性。

2.2.1 模态分析 根据腰部支架的装配关系在其底面的 12 个安装孔处施加全约束。利用 Block Lanczos 方法提取前三阶模态振型。

2.2.2 模态试验 试验采用单点激励、多点响应的测试方法。使用的仪器设备如表 2 所示。

表 2 试验设备

Table 2 Experimental equipment

名称	型号
振动噪声数据采集系统	LMS SC305
振动噪声测试系统	LMS TEST.LAB
力锤	B&K 8207
加速度传感器	Lance LC0152T
计算机	IBM

在腰部支架上选定 49 个拾取点和 1 个激励点,使用力锤沿激励点 +x、+y、+z 3 个方向敲击,由三向加速度传感器测量各拾取点 x、y、z 3 个方向的响应信号。试验原理与数据传输关系如图 4 所示。前三阶计算模态与试验模态结果如图 5 和表 3 所示,计算模态与试验模态振型一致,模态

频率相对误差均<15%，表明模态计算结果以及所建立的有限元模型的准确性满足要求，为后续的分析计算奠定基础。

由模态分析可以看出，第一、二阶固有频率不高，为了保证结构的振动稳定性和整体刚度，本研究以第一、二阶固有频率不降低为约束条件。

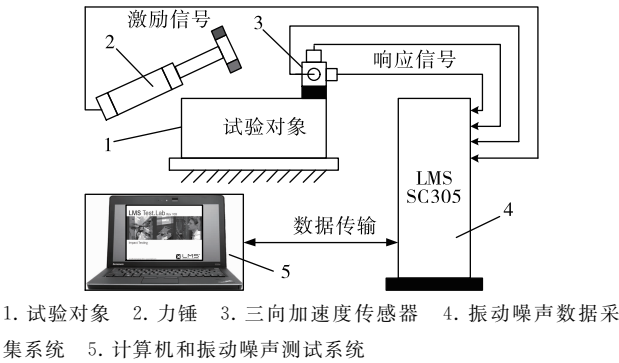


图 4 试验原理与数据传输关系图

Figure 4 Test principle and data transfer diagram

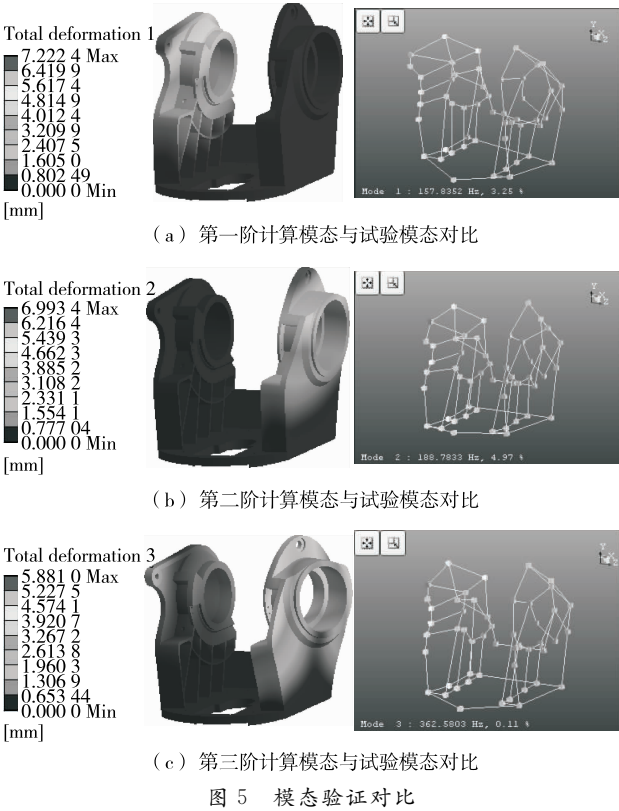


图 5 模态验证对比

Figure 5 Modal validation comparison

表 3 试验模态与计算模态频率的对比

Table 3 Comparison between the experiment and FEM model for the modal frequencies

模态阶数	试验值/ Hz	仿真值/ Hz	相对误差/ %	振型描述
1	157.84	151.93	3.73	大臂安装立板沿 z 向往复摆动
2	188.78	162.46	13.94	小臂安装立板沿 z 向往复摆动
3	362.58	359.19	0.93	大臂小臂安装立板绕 y 轴扭动

2.3 腰部支架的静力学分析

2.3.1 施加位移约束 位移约束的定义与模态分析相同。

2.3.2 施加载荷

(1) 运动规律: 机器人各个关节、铰链处受力与其运动规律密切相关。根据已有研究^[13-14], 基于 5NURBS 运动规律的关节空间轨迹规划在降低系统功耗和抑制机构残余振动方面的优势, 本研究以 5NURBS 运动规律为例, 利用 UG 软件对码垛机器人进行运动仿真, 获得腰部支架上姿态保持连杆安装孔、大臂安装孔、小臂安装孔以及弹簧缸安装孔处受到的力和力矩随时间的变化规律。文献^[13-15]给出了 5NURBS 轨迹规划方法, 鉴于篇幅所限, 只给出曲线方程不展开叙述。

NURBS 曲线方程为:

$$p(u) = \sum_{i=0}^n d_i N_{i,k}(u), \tag{1}$$

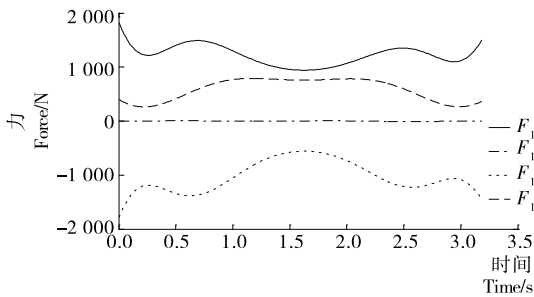
式中:

d_i ——曲线控制顶点($i=0,1,2,\dots,n$);

$N_{i,k}(u)$ —— k 次规范 B 样条基函数, k 表示 B 样条次数, i 表示 B 样条序号($i=0,1,2,\dots,n$)。

(2) 姿态保持连杆安装孔处的受力分析: 如图 6 所示, F_1 最大值(1 972.18 N)发生在起始时刻, 此时刻对应的 3 个方向的分力分别是: $F_{1x} = 0.507\text{ N}$; $F_{1y} = -439.284\text{ N}$; $F_{1z} = 1\,922.635\text{ N}$, 将此 3 个分力施加到腰部支架上姿态保持连杆安装孔处。

利用运动仿真找到 0 s 时刻码垛机器人的位姿, 通过测量保持姿态连杆与竖直方向(z 向)的夹角(108.735°)确定此时安装孔受力面的方位, 如图 7 所示。



F_1 、合力 F_{1x} 、 F_{1y} 、 F_{1z} 、 x 、 y 、 z 3 个方向的分力

图 6 腰部支架上姿态保持连杆安装孔受力

Figure 6 Force on attitude keep link mounting hole of waist mounting bracket

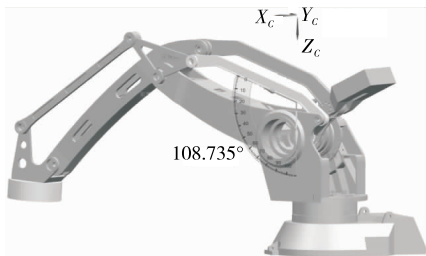


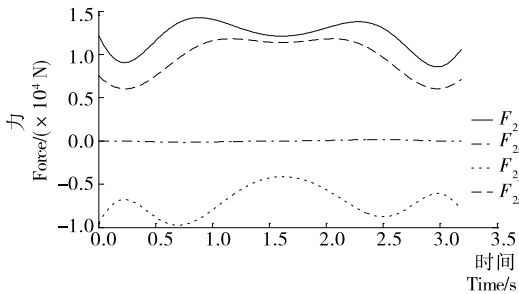
图 7 姿态保持连杆安装孔受力面的方位

Figure 7 Orientation of attitude keep link mounting hole force face

(3) 大臂安装孔、小臂安装孔处的受力分析:利用上述方法获得大臂安装孔、小臂安装孔处受力曲线和数值如图 8~11 和表 4 所示。

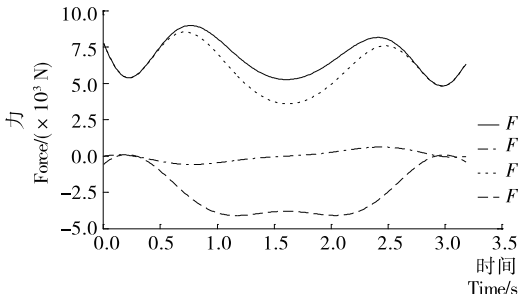
(4) 弹簧缸安装孔处的受力分析:由于肩关节负荷较大,且频繁动作,为了抑制冲击,减少能耗,安装有弹簧缸以

平衡电机的峰值力矩。本机器人弹簧初始长度 L_0 为 970 mm,弹簧缸上耳至肩关节轴线距离 d 为 230 mm,大臂长度 L_2 为 1 200 mm,弹簧刚度 K 为 36.53 N/mm,预紧力 F_p 为 2 334.57 N,大臂的最大倾角 θ 为 71.26° ,弹簧缸受力如图 12 所示,弹簧工作长度为 L_g 。



F_2 . 合力 F_{2x} 、 F_{2y} 、 F_{2z} . x 、 y 、 z 3 个方向的分力
图 8 大臂安装孔受到的力

Figure 8 Force on the big arm mounting hole



F_3 . 合力 F_{3x} 、 F_{3y} 、 F_{3z} . x 、 y 、 z 3 个方向的分力
图 10 小臂安装孔受到的力

Figure 10 Force on the forearm mounting hole

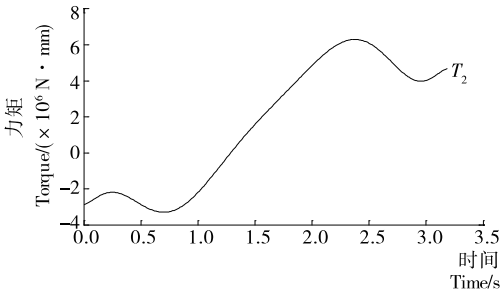


图 9 大臂安装孔受到的反作用力矩

Figure 9 Reaction torque on the big arm mounting hole

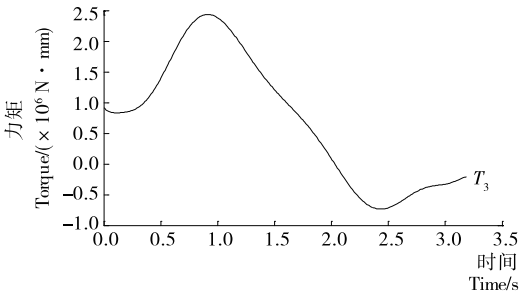


图 11 小臂安装孔受到的反作用力矩

Figure 11 Reaction torque on the forearm mounting hole

表 4 大臂与小臂安装孔处的受力情况

Table 4 Force conditions at the mounting holes of the big arm and forearm

考察对象	最大合力/N	x 向分力/N	y 向分力/N	z 向分力/N	关节反作用力矩最大值/(N·mm)	力(矩)作用面
大臂安装孔	14 298.61	-149.94	-9 243.98	10 907.63	6.3×10^6	大臂 RV 减速器安装面
小臂安装孔	9 155.34	-623.27	8 747.35	-2 629.76	2.4×10^6	小臂 RV 减速器安装面

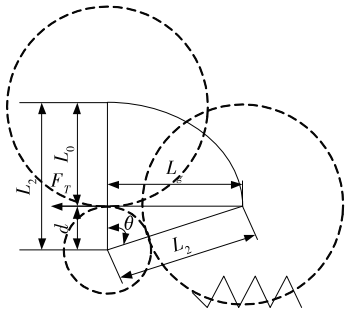


图 12 弹簧缸受力分析图

Figure 12 Force analysis of spring cylinder

$$L_2=L_0+d.$$
(4)

弹簧力 F_T :

$$F_T=F_p+K\Delta L.$$
(5)

末端处于最远端时(即 $\theta=71.26^\circ$ 时),弹簧力最大,结合已知参数可得 $F_{Tmax}=8\,909.97\text{ N}$ 。

将上述所有载荷的最大值和自身重力施加于腰部支架的相应部位,如图 13 所示。

2.3.3 静力学分析求解 经过考虑动力学因素的静力学分析求解得到大臂的应力最大值约为 58 MPa,位移最大值约为 0.456 mm,如图 14、15 所示,具有轻量化设计的潜力。

2.4 腰部支架优化设计模型的建立

2.4.1 设计变量 根据腰部支架的结构特点选取 8 个结构参数($X=x_1,x_2,\cdots,x_8$)作为设计变量,这些参数互相独立且非安装与配合尺寸,如图 16 所示,名称、初始值以及取值范围如表 5 所示。

弹簧的伸长量 ΔL :
$$\Delta L=L_g-L_0.$$
(2)

其中:

$$L_g=\sqrt{L_2^2+d^2+2dL_2\cos\theta},$$
(3)

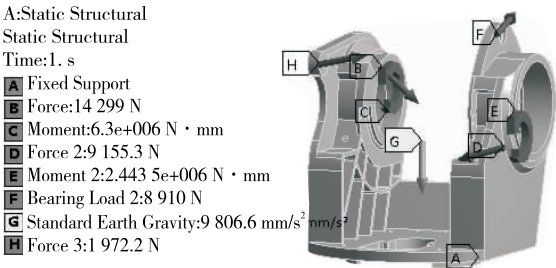


图 13 定义载荷与位移边界条件

Figure 13 Defining load and displacement boundary condition

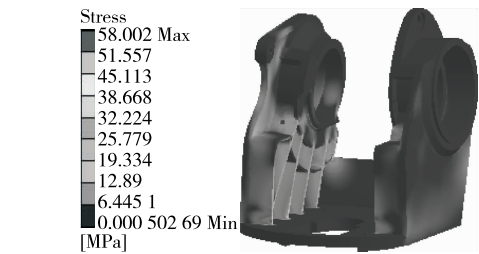


图 14 应力云图

Figure14 Stress nephogram

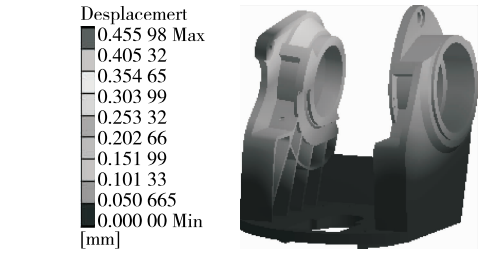


图 15 位移云图

Figure 15 Displacement nephogram

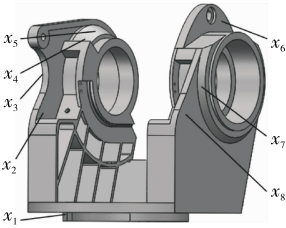


图 16 腰部支架设计变量指示图

Figure 16 Design variables indicator diagram of waist mounting bracket

表 5 设计变量的初始值及取值范围

Table 5 Initial value and value range of design variables

设计变量	名称	单位	初值	取值范围
x_1	底板定位环内径	mm	390	390~414
x_2	左侧板厚度	mm	25	13~25
x_3	大臂孔外倒角角度	(°)	45	45~65
x_4	左侧锥台高度	mm	53	13~53
x_5	左侧倾角高度	mm	32	32~45
x_6	弹簧缸凸耳厚度	mm	35	13~35
x_7	小臂孔外倒角角度	(°)	45	45~65
x_8	右侧板厚度	mm	25	13~25

2.4.2 优化目标 本试验以腰部支架的质量 m 最小为主要目标,同时要求最大应力 $\sigma_{\max}$ 和最大位移 $\delta_{\max}$ 最小,故目标函数为:

$$\begin{cases} F_m(X) = \min_{X \in D} m(X); \\ F_\sigma(X) = \min_{X \in D} \sigma(X); \\ F_\delta(X) = \min_{X \in D} \delta(X). \end{cases} \quad (6)$$

利用 Box-Behnken 设计方法结合表 5 数据得到 45 组试验设计方案,并分别进行质量 m (kg)、最大应力 $\sigma_{\max}$ (MPa)、最大位移 $\delta_{\max}$ (mm)、第一、二阶固有频率 f_1 和 f_2 (Hz) 计算,试验设计矩阵及其结果如表 6 所示。

利用表 6 中试验数据结合响应面法(RSM)可得到质量、第一、二阶固有频率、最大应力、最大位移的 RSM 模型。

表 6 试验设计矩阵

Table 6 Experiment design matrix

变量	单位	1	2	3	.....	45
x_1	mm	390	390	414	.....	402.0
x_2	mm	13	25	25	.....	19.0
x_3	(°)	45	65	65	.....	55.0
x_4	mm	13	53	53	.....	33.0
x_5	mm	32	45	45	.....	38.5
x_6	mm	13	35	13	.....	24.0
x_7	(°)	45	65	65	.....	65.0
x_8	mm	13	25	25	.....	19.0
f_1	Hz	139.14	156.71	156.79	.....	148.02
f_2	Hz	154.34	163.13	174.73	.....	159.39
m	kg	251.83	289.50	283.26	.....	269.21
$\sigma_{\max}$	MPa	85.070	62.125	62.366	.....	69.691
$\delta_{\max}$	mm	0.767 9	0.397 1	0.395 8	.....	0.518 5

为验证 RSM 模型的准确性,在设计变量的取值范围内再采用 Box-Behnken 方法选取 15 组试验方案,将有限元计算的实际结果和 RSM 模型计算的预测结果进行对比,如表 7 所示,各项误差均 $<2\%$,表明 RSM 模型的准确性满足要求,可以用其近似代替各性能参数的实际模型参与优化计算。

2.4.3 约束条件 依据模态分析结果,以初始模型的第一、二阶固有频率(即 $[f_1]=151.93$ Hz, $[f_2]=162.46$ Hz)不降低为约束条件。设优化模型的第一、二阶固有频率分别为 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$,则建立约束函数 $C_1(X)$ 和 $C_2(X)$ 的表达式为:

$$C_1(X) = f_1(X) - [f_1] \geq 0, \quad (7)$$

$$C_2(X) = f_2(X) - [f_2] \geq 0. \quad (8)$$

2.4.4 确定优化目标的权重系数 依据有限元分析结果,考察各性能指标的重要性。本研究的主要目标是腰部支架的轻量化,因此质量是主要目标。由静力学分析可知,最大位移很小,但是为了降低变形对码垛机器人的影响,最大位移应越小越好,因此其重要性排在第二位;最大应力远小于材料的许用应力,因此其重要性排在最后。据此,给出质量最

表 7 实际值和近似模型预测结果对比[†]

Table 7 Comparison between calculation results and predicted results of approximate model

序号	f_1			f_2			$\sigma_{\max}$			$\delta_{\max}$		
	实际值/Hz	预测值/Hz	误差/%	实际值/Hz	预测值/Hz	误差/%	实际值/Hz	预测值/Hz	误差/%	实际值/Hz	预测值/Hz	误差/%
1	155.51	155.58	0.045 5	163.03	162.84	0.118 7	62.130	61.402	1.171 3	0.390 4	0.391 9	0.377 4
2	151.40	152.55	0.756 6	157.42	156.15	0.811 6	61.988	62.314	0.525 8	0.385 8	0.385 2	0.141 8
3	141.62	141.45	0.123 9	173.39	173.54	0.085 9	75.099	76.274	1.564 6	0.659 0	0.663 9	0.749 9
.....												
15	149.03	149.38	0.231 2	160.52	160.09	0.267 1	68.185	69.171	1.445 4	0.489 4	0.486 6	0.570 6

[†] 质量的误差接近 0,故未在表中列出。

小、最大位移最小以及最大应力最小的权重系数分别为 0.5，0.3,0.2。

2.5 多目标优化求解

本研究采用性能优越的 NSGA-II 算法^[16]进行优化计算,其参数设置如表 8 所示。

表 8 NSGA-II 算法参数设置

Table 8 NSGA-II algorithm parameter setting

名称	参数
种群规模	40
代数	200
交叉率	0.9
交叉分布指数	10
变异分布指数	20

2.6 优化结果与分析

通过求解得到优化结构参数,再综合考虑结构工艺性等因素对计算结果进行微调,最终得到优化结果见表 9。根据最终结构参数修改三维模型,对优化后模型进行相同边界条件的静力学分析和模态分析得到计算结果如表 10 所示。经过多目标结构优化设计,腰部支架的质量减轻了 24.22 kg,最大位移增大了 0.072 mm,最大应力值增大了 5.644 MPa,但仍远小于许用应力值,第一、二阶振型依然分别是两侧立板各自单独往复摆动,而且对应的固有频率值分别提高了 0.44,6.46 Hz,达到优化设计的目的。优化后模型的静力学分析和模态分析结果如图 17~20 所示。

3 结论

通过对优化前后腰部支架模型的对比分析可以得出:在保证第一、二阶固有频率不降低,且最大应力和最大位移仍

表 9 结构参数优化结果

Table 9 Optimization results of structural parameters

来源	x_1/mm	x_2/mm	$x_3/(^{\circ})$	x_4/mm	x_5/mm	x_6/mm	$x_7/(^{\circ})$	x_8/mm
初始值	390	25	45	53	32	35	45	25
优化值	414	22	65	53	45	13	65	22

表 10 目标性能参数优化结果

Table 10 Optimization results of objective parameters

来源	m/kg	$\delta_{\max}/\text{mm}$	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	f_1/Hz	f_2/Hz
优化前	297.12	0.456	58.002	151.93	162.46
优化后	272.90	0.528	63.646	152.37	168.92
变化量	24.22 ↓	0.072 ↑	5.644 ↑	0.44 ↑	6.46 ↑

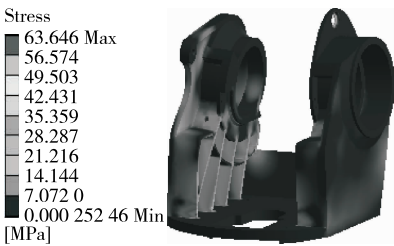


图 17 优化后模型的应力

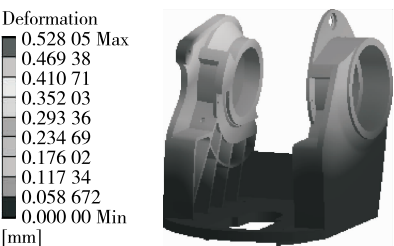


图 18 优化后模型的位移云图

Figure 17 Stress nephogram of optimized model

Figure 18 Deformation nephogram of optimized model

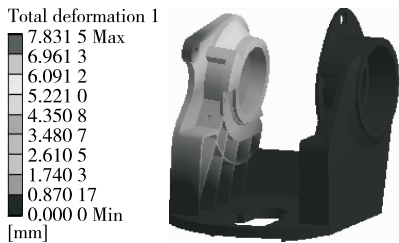


图 19 优化后模型的一阶振型图

Figure 19 The first modal shape of optimized model

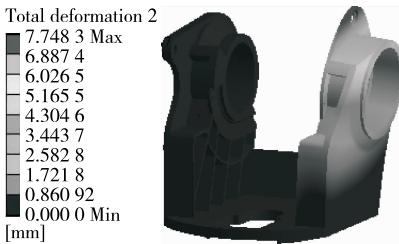


图 20 优化后模型的二阶振型图

Figure 20 The second modal shape of optimized model

在许用范围内的情况下,质量减轻了约 8.2%,实验验证了优化设计方法的有效性。腰部支架质量的减小有利于降低码垛机器人腰关节驱动元件的工作负荷,降低能耗和制造成本,提高机器人的动态性能和运动平稳性。本研究优化方法及其结果可为以后的腰部支架以及其他零部件的结构改进设计提供研究思路和理论依据。同时,由优化后模型的静力学分析结果可以看出,该零件的最大应力值仍远小于材料的许用应力值,因此下一步可以考虑基于结构的拓扑优化理论与方法,在保证最大位移不增大和第一、二阶固有频率不降低等条件下,进一步针对腰部支架零件开展结构优化研究。

参考文献

[1] 张良安,马寅东,单家正,等. 4 自由度含局部闭链式码垛机器人动力学优化设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 336-341.
[2] 王启义. 中国机械设计大典: 第三卷[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2002: 1 421-1 422.
[3] ALBERS A, OTTNAD J. Integrated structural and controller optimization in dynamic mechatronic systems[J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(4): 1-8.

(上接第 74 页)

[12] LEA L, IVANA Z, TATJANA D, et al. Characterization of cereal flours by fluorescence spectroscopy coupled with PARAFAC[J]. Food Chemistry, 2017, 229: 165-171.
[13] 陈亚斌,刘梅红,王松磊,等. 低场核磁技术结合化学计量学快速检测掺假牛奶[J]. 食品与机械, 2016, 32(7): 51-55.
[14] 夏阿林,夏霞明,吉琳琳,等. 低场核磁共振结合化学模式识别方法判别休闲豆干品[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 282-288.
[15] BERTRAM H C. Field gradient CPMG applied on postmortem muscles[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2004, 22(4): 557-563.

[4] ORAL S, IDER S K. Optimum design of high-speed flexible robotic arms with dynamic behavior constraints[J]. Computers & structures, 1997, 65(2): 255-259.
[5] SARAVANAN R, RAMABALAN S, GODWIN Raja Ebenezer N, et al. Evolutionary bi-criteria optimum design of robots based on task specifications[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(3): 386-406.
[6] YOSHIMURA Masataka, MASUI Hiroshi. Integrated optimization of planning motion and structural design for increasing product performance of articulated robots[J]. JSME International Journal, Series C, 1995, 38(2): 326-333.
[7] 郭大宝,梅涛,骆敏舟,等. 老人服务机器人机械臂的动力学分析与轻量化设计研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(10): 1 146-1 150.
[8] WANG Yong, LI Kun, CUI Bao-ping. Lightweight design of plate shears bed based on topology optimization and test methods [J]. Key Engineering Materials, 2013, 568: 143-149.
[9] DING Xiao-hong, CHEN Ye-lin, LIU Wei. Optimal design approach for eco-efficient machine tool bed [J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2010, 6(4): 351-358.
[10] 赛宗胜,何一冉,王冠雄,等. 卧式加工中心立柱有限元分析及轻量化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(2): 38-41, 46.
[11] 游玮,孔民秀. 重载工业机器人控制关键技术综述[J]. 机器人技术与应用, 2012(5): 13-19.
[12] 王启义. 中国机械设计大典: 第二卷[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2002: 452-844.
[13] 王喆,曾侠,刘松涛,等. 一种 2 自由度高速并联机械手的轨迹规划方法[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程版, 2016(7): 687-694.
[14] 梅江平,臧家炜,乔正宇,等. 三自由度 Delta 并联机械手轨迹规划方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 9-17.
[15] 李小霞,汪木兰,刘坤,等. 基于 5 次 B 样条的机械手关节空间平滑轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012, 8(8): 39-42.
[16] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[16] MOHAMMAD A, HADI P, HASSAN S, et al. A systematic study on the effect of noise and shift on multivariate figures of merit of second-order calibration algorithms [J]. Analytica Chimica Acta, 2017, 952: 18-31.
[17] 陆婉珍,袁洪福,徐广通,等. 现代近红外光谱分析技术[M]. 北京: 石油化工出版社, 1999: 148.
[18] HAGAN M T, MENHAJ M. Training multilayer networks with the Marquardt algorithm [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994, 5(6): 989-993.
[19] GUTIERREZ-OSUNA R. Pattern analysis for machine olfaction: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2002, 2(3): 189-202.