

MD1200-YJ 码垛机器人手臂的多目标轻量化设计

Multi-objective lightweight design for big arm of MD-1200YJ palletizing robot

贺莹 高涵 马超 古丽

HE Ying GAO Han MA Chao GU Li

(天津大学仁爱学院机械工程系, 天津 301636)

(Department of Mechanical Engineering, Tianjin University Renai College, Tianjin 301636, China)

摘要:建立了 MD-1200YJ 型码垛机器人手臂的有限元模型,通过模态试验验证有限元模型的准确性;通过考虑动力学因素的静力学分析、约束模态分析、振动响应试验、频率响应分析,确定以质量最小、第一和二阶固有频率最大、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 方法建立目标函数的近似模型,并利用 NSGA-II 算法求得最优解。结果表明,前两阶固有频率提高,结构刚度和振动稳定性提高,降低振动对零部件疲劳损害影响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 11.3%,验证了该轻量化设计方法的有效性。

关键词:码垛机器人;大臂;多目标轻量化;静力学分析;模态分析;频率响应分析

Abstract: Finite element model of big arm of MD-1200YJ palletizing robot was established, the accuracy of the finite element model was verified by modal test. By static analysis taking into account dynamic factors, constrained modal analysis, vibration response test and frequency response analysis to determine to use minimal mass, maximizing the first and second natural frequency, minimizing the maximal stress, minimizing the maximal deformation and as the optimization objectives. Taking structure parameters as design variables 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. The optimal solution was obtained by using NSGA-II algorithm. The results show that, in the case of the first two natural frequencies were increased, the structural stiffness and vibration stability were improved, the influence of vibration on fatigue damage of parts was

reduced, meanwhile the maximum stress and deformation within allowable values range, the mass reduction was 11.3%. The validity of this lightweight design method was verified.

Keywords: palletizing robot; big arm; multi-objective lightweight; static analysis; modal analysis; frequency response analysis

码垛机器人已被广泛应用于现代化食品生产物流作业中^[1]。机械臂作为机器人的重要功能部件,一直是机器人领域研究的热点之一。在码垛机器人工作过程中,机械臂经常需要完成频繁起停、加减速、伸缩、旋转等复杂运动,其质量大小与分布对整个机器人系统的动态特性以及能耗有重要影响。试验拟以 MD1200-YJ 型高速重载码垛机器人的大臂零件为研究对象,对其进行多目标轻量化设计,在保证其强度、刚度和振动稳定性满足要求的情况下,使其质量最小。

文献[2-4]涉及的机器人工作速度较低、负载较轻,大多是基于静力学分析,以强度和刚度为约束条件,以质量最小为目标的优化设计。然而,对于工作在高速、重载工况下的码垛机器人而言,动载荷变得不可忽略。如果将码垛机器人连同负载看作一个多自由度振动系统,该系统会受到惯性力、关节力以及重力等动态激励力的作用。当系统所受激励力的频率接近或达到系统固有频率并持续作用时,将产生强烈的振动,影响码垛机器人的工作稳定性,甚至容易造成零部件的损坏。因此,对于高速重载码垛机器人的结构优化研究而言,仅仅基于静力学层面的分析与优化是不够的,需在动力学层面开展研究。曹志民等^[5]和田野等^[6]进行了动力学分析,但未将固有频率作为优化设计的因素;Liu 等^[7]和王春华等^[8]将第一阶固有频率作为因素参与优化设计,但对于固有频率阶次的选取依据以及结构优化前后固有频率对结构性能的变化等方面未作论述。

试验拟将静力学分析与动力学分析相结合,开展针对 MD1200-YJ 码垛机器人手臂的多目标轻量化设计研

基金项目:天津市教委科研计划项目(编号:2018KJ269)

作者简介:贺莹(1980—),男,天津大学仁爱学院副教授,博士。

E-mail: wutaidouhy@163.com

收稿日期:2020-06-19

究,基于模态分析、振动响应试验、频率响应分析确定参与优化的固有频率阶次,并对优化前后结构性能的变化进行分析与讨论,以期提出一种较为完整的多目标轻量化设计方法。

1 多目标轻量化设计

MD1200-YJ 码垛机器人为 4 自由度关节型机器人,如图 1 所示。其最大载荷 120 kg,最大回转半径 2 400 mm,腰部回转速度 $85^\circ/\text{s}$ 。文献[9]给出了详细的机构介绍,此处从略,仅指出所涉及的构件名称。大臂 4 安装在腰部支架 2 上,由大臂驱动电机 3 通过 RV 减速器使其运动,其前端与小臂 5 中部安装孔铰接。大臂是保证小臂及末端负载平稳运动且受力状态复杂的重要零件。

1.1 有限元模型的建立

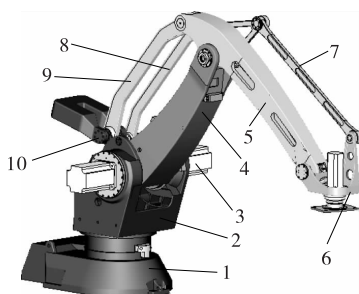
创建有限元模型前,先对大臂的三维模型进行化简,主要是去掉零件的倒角、圆角、螺纹孔等特征,其简化模型如图 2 所示,质量 73.208 kg。

材料属性:材料 ZL110,弹性模量 $6.89 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$;泊松比 0.35;抗剪模量 $3.189 \times 10^8 \text{ N/m}^2$;密度 $2\,770 \text{ kg/m}^3$;张力强度 $1.65 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

网格划分:采用四面体网格,最大单元 36.120 5 mm;最小单元 7.224 1 mm;节点总数 42 366;单元总数 23 655。得到大臂的有限元模型如图 3 所示。

1.2 模态试验

为了验证大臂有限元模型的准确性,采用模态试验



1. 机座 2. 腰部支架 3. 大臂驱动电机 4. 大臂 5. 小臂 6. 末端 7. 水平保持连杆 2 8. 水平保持连杆 1 9. 小臂驱动连杆 10. 小臂驱动臂

图 1 MD1200-YJ 码垛机器人模型

Figure 1 MD1200-YJ palletizing robot model

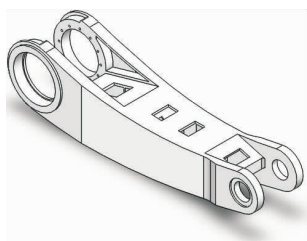


图 2 大臂的三维简化模型

Figure 2 Simplified model of big arm



图 3 大臂的有限元模型

Figure 3 Finite element model of big arm

与有限元法计算的自由模态进行对比验证。误差在允许范围内则可以认定所建立的有限元模型的准确性符合要求。

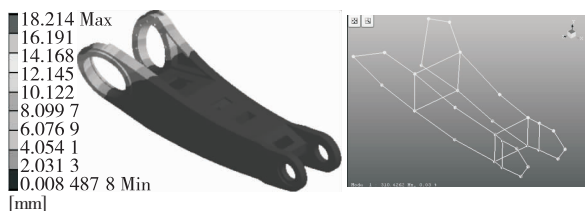
模态试验所用器材和方法与文献[1]相同,不再赘述。为了测取试件的自由模态,使试件近似处于“自由”边界条件下,采用柔度很大的弹性绳悬挂试件。

由图 4、表 1 可知,计算模态与试验模态的前三阶振型一致,且前五阶模态频率相对误差均小于 10%,表明建立的有限元模型的准确性符合要求,可用于后续的仿真计算。

1.3 静力学分析

大臂在工作过程中会受到复杂的动载荷作用,因此需对其进行动力学因素的静力学分析。

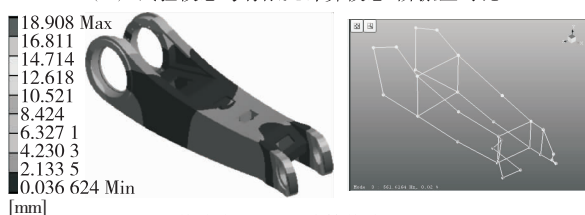
1.3.1 施加位移约束 根据大臂的安装方式施加位移约束,如图 5 所示。大臂 A 处大孔与 RV 减速器壳体通过螺钉连接,故施加全约束;B 处大孔通过轴承安装于小臂驱动部件上,故施加圆柱面约束。



(a) 试验模态与有限元计算模态 1 阶振型对比



(b) 试验模态与有限元计算模态 2 阶振型对比



(c) 试验模态与有限元计算模态 3 阶振型对比

图 4 模态验证对比

Figure 4 Modal validation comparison

表1 试验模态与计算模态的频率

Table 1 Comparison between the experiment and FEM model for the modal frequencies

模态阶数	试验模态 频率/Hz	有限元模态 频率/Hz	相对误差/ %
1	310.43	325.68	4.68
2	383.75	374.41	2.49
3	561.62	531.75	5.62
4	590.07	573.91	2.82
5	602.15	589.16	2.20

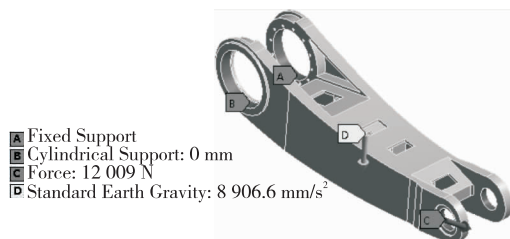


图5 定义载荷与位移边界条件

Figure 5 Defining load and displacement boundary condition

1.3.2 施加载荷 利用UG软件,在120 kg负载和5NURBS运动规律^[1,10]条件下,对码垛机器人进行运动仿真,获得大臂前端铰链孔的力—时间曲线,如图6所示。其中, F 为合力, F_x , F_y , F_z 为3个方向的分力。

由图6可知,合力 F 最大值(12 009 N)发生在0.817 s处,将此时对应的3个方向的分力施加到大臂前端铰链孔处进行动力学因素的静力学分析。

为了确定大臂前端铰链孔受力面的方位,利用运动仿真软件找出0.817 s时码垛机器人的位姿,如图7所示。因为大臂前后孔的中心连线与保持姿态连杆1平行,可以通过测量保持姿态连杆1与竖直方向(Z 向)的夹角确定此时大臂前后孔连线的方位,进而确定大臂前端铰链孔受力面的方位,如图5中的C处。

1.3.3 静力学分析求解 由图8、9可知,大臂的应力最大值为32.27 MPa,远小于材料的许用应力,位移最大值约为0.803 mm,具有轻量化设计的潜力。

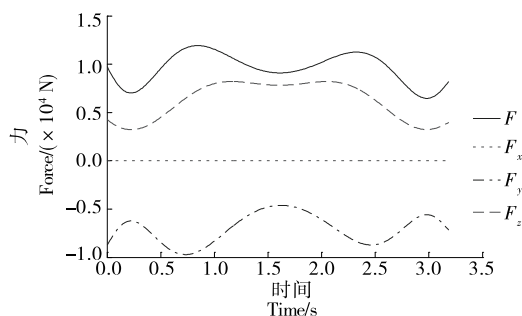


图6 大臂前端铰链孔受力

Figure 6 Force on front hinge hole of big arm

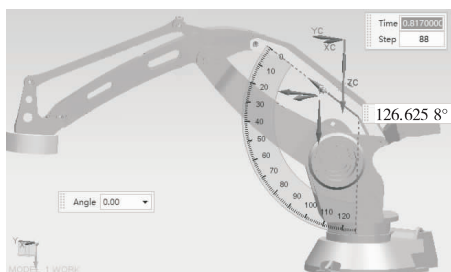


图7 大臂前端铰链孔受力面方位

Figure 7 Orientation of big arm front hinge hole force face



图8 应力云图

Figure 8 Stress nephogram



图9 位移云图

Figure 9 Displacement nephogram

1.4 模态与频率响应分析

为了确定动力学优化目标,对大臂进行模态分析、振动响应试验和频率响应分析。

1.4.1 约束模态分析 与静力学分析施加的位移约束相同。利用Block Lanczos方法提取大臂的前两阶模态振型如图10所示,其前四阶固有频率如表2所示。

1.4.2 频率响应分析 通过振动响应试验测取大臂在工作过程中受到的激励力频谱。试验器材与模态试验基本相同(不需要力锤)。因为机体的振动是通过螺钉传递到大臂上,所以测量码垛机器人运行过程中大臂4个大孔螺栓组中心处的加速度频谱作为其受到的激励信号。选取4个测试点,如图11所示。针对每个测试点测取 x , y , z 3个方向的加速度信号。数据采集参数设置:采样时间30 s,带宽1 024 Hz,分辨率0.125 Hz。以#1测试点— x 方向的加速度频谱为例,测试结果如图12所示。

按振动响应测试点的位置,将试验测得的 x , y , z 3个方向的加速度频谱施加在大臂有限元模型对应位置进行频率响应求解。由图13可知,当频率为605 Hz时,大臂零件的Node12018点处振动速度最大,为5.39 mm/s。

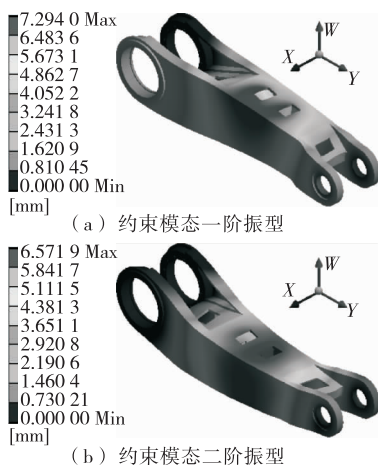


图 10 大臂前两阶约束模态振型

Figure 10 The first two constrained modes of big arm

表 2 大臂前四阶固有频率

Table 2 The first four natural frequency of big arm

阶数	频率/Hz	振型描述
1	519.23	中部沿 W 方向往复摆动
2	593.54	中部沿 X 方向往复摆动
3	833.08	中部绕 V 轴往复扭摆
4	1 059.02	内部筋板 V 方向往复摆动

由图 14 可知, 525 Hz 处还存在一个峰值 (2.85 mm/s)。这两处振动速度峰值所对应的频率恰好处于大臂的第一阶和第二阶固有频率附近。为了减小振动对机器人运动平稳性和零部件疲劳寿命的影响, 故选择第一阶和第二阶固有频率作为优化目标。

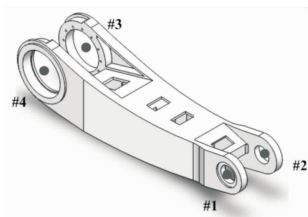


图 11 振动激励测试点位置

Figure 11 Test points location

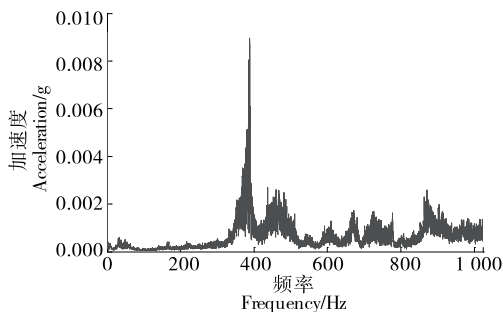


图 12 加速度频谱

Figure 12 Acceleration spectrum

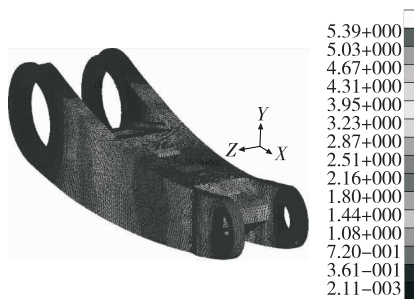


图 13 大臂初始模型 605 Hz 的振动速度云图

Figure 13 Vibration velocity nephogram of initial model of big arm at 605 Hz

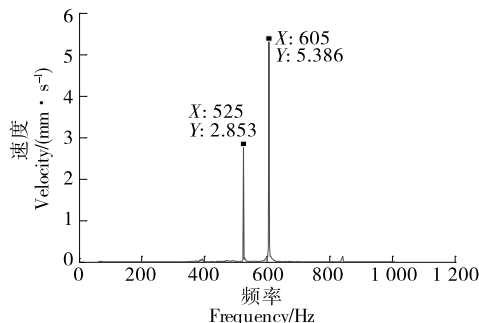


图 14 Node 12018 的振动速度曲线

Figure 14 Vibration velocity curve of node 12018

2 优化模型的建立

2.1 设计变量的选择

根据大臂的结构特点选取了 14 个结构参数 $X = (x_1, x_2, \dots, x_{14})$, 如图 15 所示, 其名称、初始值以及取值范围见表 3。结构参数均为大臂的局部参数, 互相独立, 不改变整体尺寸以及与其他零件的装配尺寸。

2.2 目标函数的建立

以大臂的质量最小、第一阶和第二阶固有频率最大、最大应力最小、最大位移最小为优化目标, 故目标函数为:

$$\begin{cases} F_m(X) = \min_{X \in D} m(X) \\ F_{f1}(X) = \max_{X \in D} f_1(X) \\ F_{f2}(X) = \max_{X \in D} f_2(X) \\ F_\sigma(X) = \min_{X \in D} \sigma(X) \\ F_\delta(X) = \min_{X \in D} \delta(X) \end{cases} \quad (1)$$

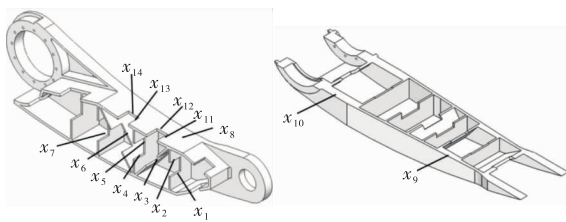


图 15 大臂设计变量指示图

Figure 15 Design variables indicator diagram of big arm

表 3 设计变量的初始值及变化范围

Table 3 Initial value and value range of design variables

设计变量	名称	初始值/mm	取值范围/mm
x_1	一号立肋板方孔长度	70	70~170
x_2	一号立肋板方孔宽度	50	50~100
x_3	一号斜肋板方孔宽度	100	100~180
x_4	二号立肋板方孔长度	80	80~120
x_5	二号斜肋板方孔长度	100	100~180
x_6	二号斜肋板方孔宽度	100	100~180
x_7	三号立肋板方孔长度	100	100~180
x_8	上下壁厚	12	6~12
x_9	一号侧壁厚度	100	100~120
x_{10}	二号侧壁厚度	116	116~152
x_{11}	上壁一号方孔长度	60	60~90
x_{12}	上壁一号方孔宽度	100	100~120
x_{13}	上壁二号方孔长度	60	60~90
x_{14}	上壁二号方孔宽度	100	100~120

根据所选设计变量的取值范围,利用 Box-Behnken 试验设计方法得到 120 组试验设计方案,并分别进行质量 m 、第一阶固有频率 f_1 、第二阶固有频率 f_2 、最大应力 $\sigma_{\max}$ 、最大位移 $\delta_{\max}$ 计算,试验设计矩阵见表 4。

利用表 4 中试验设计矩阵可得到质量、第一阶固有

表 4 试验设计矩阵

Table 4 Experiment design matrix

变量	迭代 1	迭代 2	迭代 3	...	迭代 120
x_1	70	170	170	...	75
x_2	50	50	100	...	140
x_3	100	180	100	...	100
x_4	80	120	120	...	140
x_5	100	180	180	...	140
x_6	100	180	180	...	140
x_7	100	180	180	...	9
x_8	6	12	12	...	110
x_9	100	120	120	...	134
x_{10}	116	152	152	...	75
x_{11}	60	90	90	...	110
x_{12}	100	120	120	...	75
x_{13}	60	90	90	...	110
x_{14}	100	120	120	...	170
m	63.172 0	62.455 4	62.078 7	...	62.085 5
f_1	493.295 03	505.558 51	504.571 80	...	511.757 28
f_2	545.124 33	594.639 78	597.261 06	...	580.232 06
$\sigma_{\max}$	37.603	27.103	31.121	...	31.874
$\delta_{\max}$	0.853 82	0.790 83	0.792 76	...	0.777 42

频率、第二阶固有频率、最大应力、最大位移 5 个优化目标函数的响应面模型。

2.3 约束条件

各设计变量的尺寸范围约束:

(1) 变量 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$ 为大臂上孔的尺寸,孔越大,质量越轻,因此以尺寸的初始值为最小值,以不破坏周围材料为原则选取最大值。

(2) 变量 x_8, x_9, x_{10} 为大臂上各个板结构的厚度尺寸,厚度越小,质量越轻,因此以原模型各个板的厚度为上限值,下限值按铸铝合金最小壁厚的数值^[11]选取,如表 3 所示。

2.4 确定权重系数

试验的主题是轻量化设计,故质量是主要目标。依据有限元分析结果,按照对码垛机器人结构性能的影响程度对其余各项优化目标进行排序。由频率响应分析可知,振动速度的两个峰值较大,且分别对应的频率位于第一、第二阶固有频率附近,容易影响零件的疲劳寿命和机器人运动的平稳性。其中 605 Hz 时的振动速度较大,因此第二阶和第一阶固有频率重要性分别排在第 2,第 3;由静力学分析可知,最大位移很小,但是为了降低变形量对码垛机器人定位精度的影响,最大位移应越小越好,因此其重要性排在第 4。最大应力远小于材料的许用应力,因此其重要性排最后。据此,给出质量最小、第二阶固有频率最大、第一阶固有频率最大、最大位移最小以及最大应力最小的权重系数向量:

$$\mathbf{W} = (0.4, 0.3, 0.15, 0.1, 0.05)^T。$$
 (2)

3 多目标优化求解

采用性能优越的 NSGA-II 算法^[12]进行优化计算,其参数设置见表 5。

3.1 优化结果

通过计算得到优化结构参数,再综合考虑结构工艺性等因素对计算结果进行圆整,最终得到优化结果如表 6 所示,并根据最终结构参数进行三维模型再生。对优化后的大臂零件进行相同设置和边界条件下的静力学分析、模态分析和频率响应分析,得到结构性能参数见表 7、图 16。

3.2 结果分析

由图 16、17 可知,第二阶和第一阶固有频率分别增加了 27.81, 9.82 Hz,表明大臂的整体结构刚度和振动稳定性有一定的提高。优化模型在 525, 605 Hz 时的振动

表 5 NSGA-II 算法参数设置

Table 5 NSGA-II algorithm parameter setting

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

表 6 结构参数优化结果

Table 6 Optimization results of structural parameters

mm					
设计变量	初始值	优化值	设计变量	初始值	优化值
x_1	70	170	x_8	12	12
x_2	50	100	x_9	100	120
x_3	100	180	x_{10}	116	134
x_4	80	120	x_{11}	60	90
x_5	100	180	x_{12}	100	120
x_6	100	180	x_{13}	60	90
x_7	100	180	x_{14}	100	120

表 7 目标性能参数优化结果

Table 7 Optimization results of objective parameters

性能参数	m/kg	f_2/Hz	f_1/Hz	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	$\delta_{\max}/\text{mm}$
优化前	73.208	593.54	519.23	32.270	0.803 5
优化后	64.912	621.35	529.05	31.532	0.840 2
变化量	↓ 8.296	↑ 27.81	↑ 9.82	↓ 0.738	↑ 0.036 7

速度峰值均已消失,而在 459,611 Hz 时的 Node90003 点处出现了两个新的峰值,但其峰值速度仅约为 1.696, 1.101 mm/s。其中,459 Hz 处的速度明显低于大臂的第一阶固有频率,因此其影响可以不计。611 Hz 虽然处于第二阶固有频率附近,但其峰值速度已大幅度降低,从而

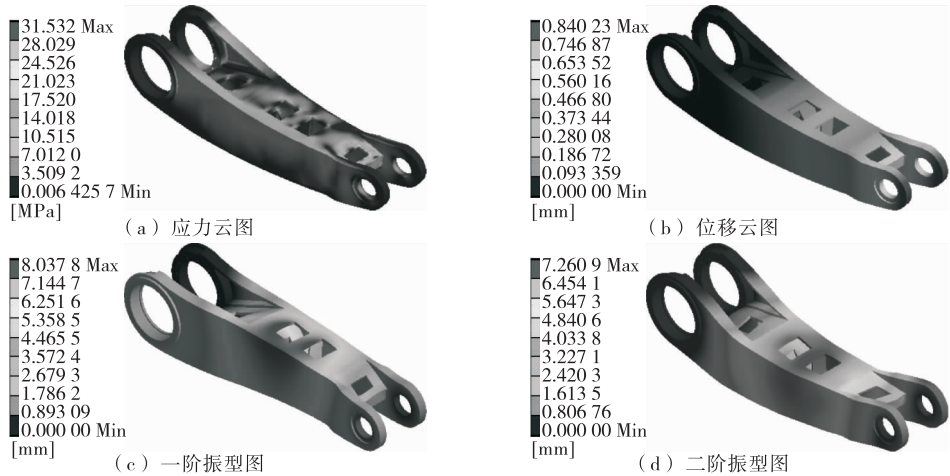


图 16 优化后的模型结构性能

Figure 16 Structure performance of optimized model

明显抑制了振动对零件疲劳寿命的影响,有利于提高机器人的运动平稳性。由静力学分析可知,最大位移增加了约 0.036 7 mm,变化不大;最大应力值减小了 0.738 MPa,仍远小于许用应力值;经多目标轻量设计,大臂的质量减轻了 11.3%,达到预期研究目的。

4 结论

通过优化设计,大臂的第一、第二阶固有频率得到了

提高,且最大应力和最大位移仍在许用范围内,质量减轻了约 11.3%,验证了优化设计方法的有效性。大臂零件质量的减小有利于降低码垛机器人肩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;通过振动响应试验结合频率响应分析方法,确定了参与优化设计的固有频率阶次,并通过分析阐明固有频率的提高对于抑制振动对零部件寿命的影响,提高结构刚度和运动稳定性均具有积极作用。后续将结合灵敏度分析方法,选取对大臂零件结构性能影响较大的结构参数作为设计变量,以提高试验设计与优化求解的运算效率。

参考文献

[1] 贺莹,梅江平,孙玉德,等. MD-1200YJ 码垛机器人腰部支架的多目标结构优化设计[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 89-95.
[2] NING Kun-peng, LI Dong-bo, HE Fei, et al. Research on the structural optimization design of ER300 palletizing robot[J]. The Open Automation and Control Systems Journal, 2015, 7: 1 405-1 414.

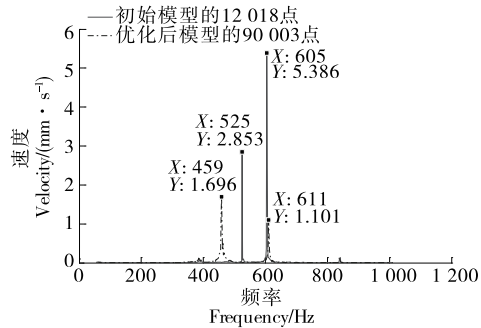


图 17 优化前后模型的频率响应对比

Figure 17 Comparison of frequency response curve for the optimized model and the initial model

(下转第 119 页)

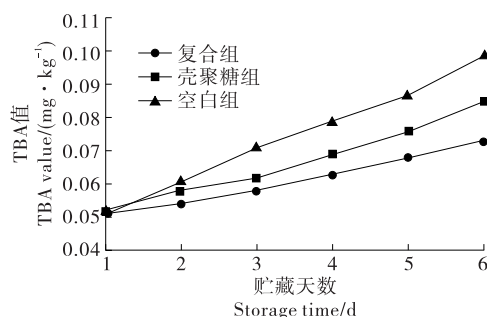


图5 虾蛄贮藏期间的TBA值

Figure 5 Changes in TBA of refrigerated mantis shrimp

26.3%,说明壳聚糖—维生素C—玉米淀粉复合涂膜可以延缓虾蛄脂肪氧化的速率,有效延长虾蛄的货架期。

3 结论

壳聚糖—维生素C—玉米淀粉复合涂膜有效延缓了虾蛄冷藏期间感官、理化品质的下降;与空白组相比,壳聚糖—维生素C—玉米淀粉复合涂膜组的货架期延长了2~3 d。后续可从复合涂膜对虾蛄腐败菌的影响方面揭示该复合涂膜产生保鲜效果的机理。

参考文献

- [1] 赵海鹏,谢晶.南美白对虾复合生物保鲜剂的优选[J].食品科学,2010,31(14):294-298.
- [2] 任西营.生物保鲜剂在带鱼制品中的应用研究[D].杭州:浙江大学,2014:5-13.
- [3] 杨光明,徐国良,李羚,等.电化学共沉积法制备金—壳聚糖纳米复合膜修饰电极及其在免疫传感器中的应用[J].云南大学学报(自然科学版),2010,32(6):695-701.
- [4] QIU Xu-jian, CHEN Sheng-jun, LIU Guang-ming, et al. Quality enhancement in the Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fillets stored at 4 °C by Chitosan coating incorporated with citric acid or licorice extract[J]. Food Chemistry, 2014, 162: 156-160.

- [5] NA S, KIM J H, JANG H J, et al. Shelf life extension of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) using chitosan and ϵ -polylysine during cold storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 115: 1 103-1 108.
- [6] OJAGH S M, REZAEI M, RAZAVI S H, et al. Effect of Chitosan coatings enriched with cinnamon oil on the quality of refrigerated rainbow trout[J]. Food Chemistry, 2010, 120: 193-198.
- [7] 王丽.可见光响应型纳米 Bi_2WO_6 - TiO_2 /淀粉复合薄膜材料的制备及其光催化性能研究[D].广州:华南农业大学,2016:1-5.
- [8] 李伟,汤红权,颜永斌,等.壳聚糖/玉米淀粉基质复合膜的制备与性能分析[J].湖北工程学院学报,2014,34(3):5-9.
- [9] 岳晓华.淀粉—壳聚糖可食性复合薄膜保鲜布林的研究[J].食品科学,2004,25(11):329-332.
- [10] 尹璐.葛根淀粉—壳聚糖复合膜的性能研究及在荸荠保鲜中的应用[D].上海:上海交通大学,2013:11-48.
- [11] 柏韵,李然,郭雪松,等.复合涂膜处理对中国对虾保鲜的影响[J].食品工业科技,2018,39(9):278-282,289.
- [12] MOSFER M, AL- DAGAL. Extension of shelf life of whole and peeled shrimp with organic acid salts and bifidobacteria[J]. Journal of Food Protection, 1999, 62(1): 51-56.
- [13] MU Hong-lei, CHEN Hang-jun, FANG Xiang-jun, et al. Effect of cinnamaldehyde on melanosis and spoilage of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92: 2 177-2 182.
- [14] SHAM S I, NISA K U, RIAZ M, et al. Shelf life of shrimp (*Penaeus merguensis*) stored at different temperatures[J]. Journal of Food Science, 1990, 55(5): 1 201-1 205.
- [15] LI Ying-chang, YANG Zhong-yan, LI Jian-rong. Shelf-life extension of Pacific white shrimp using algae extracts during refrigerated storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(1): 291-298.
- [16] 李学鹏.中国对虾冷藏过程中品质评价及新鲜度指示蛋白研究[D].杭州:浙江工商大学,2011:56.

(上接第76页)

- [3] 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.
- [4] 张邦成,谭海东,邢天羿,等.微小型救援机械手的轻量化设计[J].制造业自动化,2014,36(15):129-132.
- [5] 曹志民,熊禾根,陶永,等.搬运码垛机器人小臂动力学分析[J].制造业自动化,2013,35(11):5-7,29.
- [6] 田野,陈晓鹏,贾东永,等.仿人机器人轻型高刚性手臂设计及运动学分析[J].机器人,2011(3):332-339.
- [7] LIU Yan-jie, WU Ming-yue, WANG Gang, et al. Method for structural optimization design of wafer handling robot arms[J].

Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 1-9.

- [8] 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.
- [9] 贺莹,梅江平,方志炜,等.一种高速重载码垛机器人机座的多目标优化设计[J].机械设计,2017,34(7):1-9.
- [10] 梅江平,臧家炜,乔正宇,等.三自由度Delta并联机械手臂轨迹规划方法[J].机械工程学报,2016,52(19):9-17.
- [11] 王启义.中国机械设计大典:第2卷[M].南昌:江西科学技术出版社,2002:452-844.
- [12] 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.