



大负载四轴搬运机器人实验平台的 结构设计与分析

陈修龙, 贾振秋, 孙成浩

(山东科技大学 机械电子工程学院, 青岛 266590)

摘要: 随着高速重载机器人在汽车、冶金、物流等行业的广泛应用, 人们对搬运机器人的速度、加速度和定位精度提出了更高的要求。该文设计了一种大负载四轴搬运机器人实验平台, 首先通过 SolidWorks 进行初步结构设计, 得到搬运机器人的初始模型, 将模型导入 Adams 软件中进行运动学和动力学仿真; 然后对电机进行选型并对初始模型进行优化; 最后对关键部位进行 Ansys 有限元分析, 验证所设计机构的合理性。

关键词: 搬运机器人; 结构设计; Adams 仿真; 有限元仿真

中图分类号: TP75

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20190359](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20190359)

The Structure Design and Analysis of Experimental Platform for Large-load Four-axis Handling Robot

CHEN Xiulong, JIA Zhenqiu, SUN Chenghao

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: With the wide application of high-speed and heavy-duty robot in automotive, metallurgy, logistics and other industries, people put forward higher requirements for the speed, acceleration and positioning accuracy of the robot. This article designs an experimental platform for four-axis heavy-duty mobile robot. First, the preliminary structural design of the handling robot is obtained by SolidWorks. The model is imported into Adams software for kinematic and dynamic simulation. Then the motor is selected and the initial model is optimized. Finally, the key parts are analyzed by Ansys finite element method to verify the rationality of the designed mechanism.

Key words: handling robot; structural design; Adams simulation; finite element simulation

搬运机器人是通过模仿人类的某些工作技能, 按给定的轨迹和具体要求, 实现工件的自动抓取和搬运。为解放多余劳动力, 提高产品的生产效率, 减少生产所需成本, 缩短生产周期, 提高产品竞争力, 搬运机器人实现了较快的发展^[1-3]。

文献 [4] 分析了码垛机器人整机工作空间内的应力、应变和位移云图, 并对工作空间的静刚度分布特性进行了分析。

文献 [5] 对码垛机器人的杆长进行设计, 并且优化了最终设计结果。

文献 [6] 利用有限元分析软件, 分析了码垛机器人的各阶固有频率, 得到了优化振动特性的方法。

文献 [7] 基于 Adams 和 Ansys 软件, 建立了柔

性机器人的动力学虚拟仿真系统。

本文主要设计了一款有效载荷 800 kg 的大负载四轴搬运机器人实验平台, 首先明确搬运机器人总体结构设计方案, 完成传动结构、驱动方式等相关设计方案, 利用三维建模软件 SolidWorks 建立模型, 导入到 Adams 软件中进行动力学仿真, 并对关键部位进行 Ansys 有限元分析, 验证所设计机构的合理性。

1 大负载四轴搬运机器人实验平台的参数设计

本次设计主要对大负载四轴搬运机器人实验平台进行结构设计, 该机构由基座、腰部、大

收稿日期: 2019-09-16; 修回日期: 2020-03-19

基金项目: 山东科技大学优秀教学团队建设计划资助(JXTD20180502)。

作者简介: 陈修龙 (1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事工程教育改革的研究。

臂、小臂、连杆、末端执行器组成,其中连接底座和腰部的转动副为 J_1 , 连接腰部和大臂的转动副为 J_2 , 连接大臂和小臂的转动副为 J_3 , 连接小臂和末端执行器的转动副为 J_4 。主要技术参数如表 1 所示。

表 1 机器人实验平台参数表

参数	值
轴数	4
有效载荷/kg	800
重量/kg	2730
行程/mm	3159
限位范围/(°)	J_1 ± 185
	J_2 $+95, -48$
	J_3 $+112, -17.5$
	J_4 ± 360
最大速度/(度·秒 ⁻¹)	J_1 65
	J_2 65
	J_3 65
	J_4 115

由此可确定各运动杆件及连杆的旋转中心距,如表 2 所示。

表 2 各运动杆件旋转中心距 mm

大臂	小臂	杆1	杆2	杆3
1190	1840	1400	1250	1250

通过以上数据,建立大负载四轴搬运机器人的结构简图,如图 1 所示。

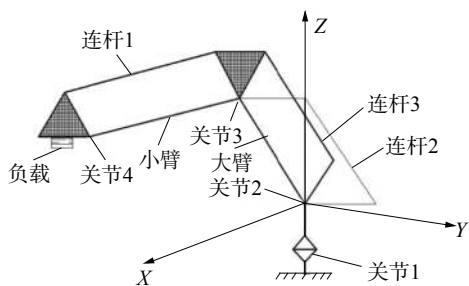


图 1 四轴搬运机器人的结构简图

通过 SolidWorks 结构设计建立的机构三维模型如图 2 所示。

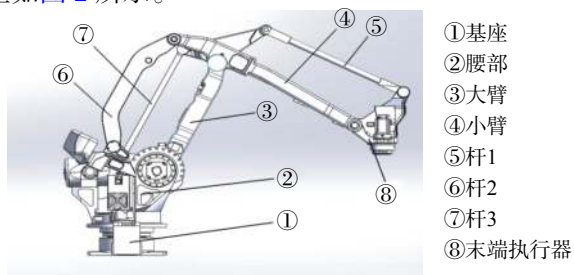


图 2 四轴搬运机器人的三维模型

2 大负载四轴搬运机器人实验平台运动学和动力学仿真

本文采用 Adams 虚拟样机仿真软件对大负载四轴搬运机器人实验平台进行运动学和动力学仿真。该软件在机械领域应用广泛,主要用于多体系统的运动学和动力学分析,有助于分析机械系统的运动性能^[8]。将 SolidWorks 中的 3D 模型导入 Adams 中,给模型添加合适的转动副约束和负载,设置驱动,给定一个门型工作轨迹^[5,9],对模型进行运动学仿真。该驱动函数使机器人在 0~2 s 内抬升物料 1.1 m, 2~4 s 腰部转动 90°, 4~6 s 下降 1.1 m 放置物料。

通过 Adams 对大负载四轴搬运机器人实验平台进行运动学和动力学仿真,得到大臂的角速度、角加速度、角位移图像,如图 3~图 5 所示;末端执行器的速度、加速度、位移图像,如图 6~图 8 所示。大臂的角速度变化范围 0°~45°,角加速度变化范围在 0~85 度/秒²,角位移为 0°~60°,末端执行器的速度变化范围 0~0.67 m/s,加速度变化范围在 0~1.5 m/s²,曲线走势平缓,因此机器人在按照给定运动轨迹运行时,不会发生振动,有比较好的运动学性能。

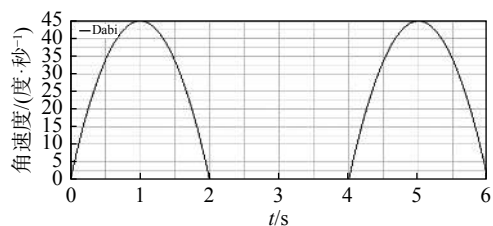


图 3 大臂的角速度

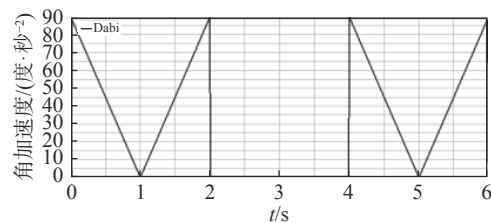


图 4 大臂的角加速度

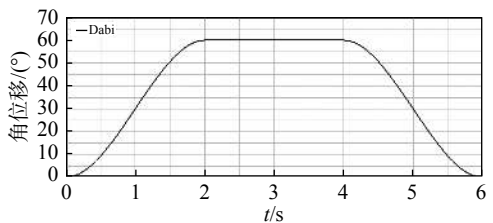


图 5 大臂的角位移

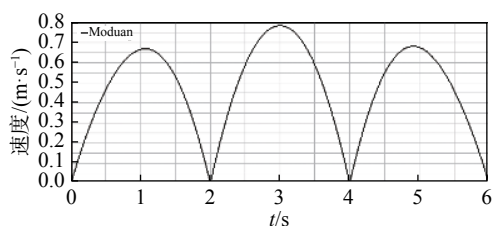


图6 末端的速度

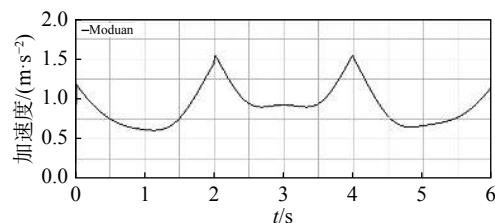


图7 末端的加速度

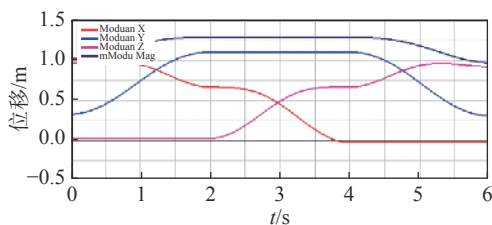


图8 末端的位移

3 大负载四轴搬运机器人实验平台驱动装置选型

电机是一个机械系统中最重要的组成部分，电机的选择要综合考虑诸多因素。

在 Adams 给定的门型轨迹中，大臂和杆 2 的扭矩图，如图 9、图 10 所示。

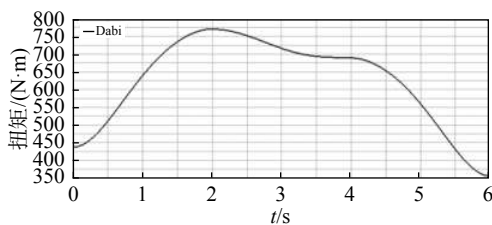


图9 大臂的扭矩

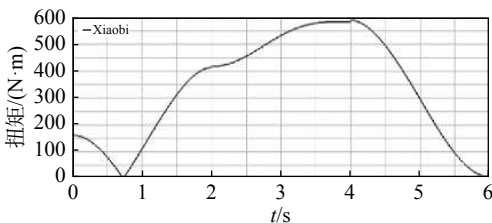


图10 杆2的扭矩图

由扭矩图可知，大臂和杆 2 的最大扭矩分别为 770 N·m、580 N·m，所以驱动力矩不小于 770 N·m 和 580 N·m，为采购和维修方便，采用同一型号的谐波减速器，减速比为 100:1，则：

$$M_q = \frac{M_d}{i\eta} \quad (1)$$

式中： M_q 为电机转矩； M_d 为杆件最大驱动转矩； i 为减速器减速比； η 为该转动副处电机输入至杆件输出的效率， $\eta = 76\%$ 。

可得到大臂的驱动电机额定转矩不小于 10.13 N·m，杆 2 处电机额定转矩不小于 7.63 N·m，对于电机的大致功率，有：

$$P = Fv \quad (2)$$

式中， P 为电机功率， F 为工作压力(包括杆件本身质量和负载产生的重力)， v 为杆件工作行程速度。根据式(2)与各杆件最大转速，可分别得到大臂和杆 2 的驱动电机的大致功率为 11 kW、8 kW。

最后通过所得最大扭矩与功率选取电动机，型号如表 3 所示。

表3 电机型号表

型号	额定功率/kW	额定电压/V	额定转矩/(N·m)	额定转速/(r·min ⁻¹)
MN2200-955CFDI1-01B000	11	220	95.5	1 500
180ST-M48015	7.5	220	48	1 500

4 大负载四轴搬运机器人实验平台有限元分析

为保证大负载四轴搬运机器人实验平台在运行过程中的刚度和稳定性，有必要对其关键部件进行应力应变分析。根据动力学仿真结果，测得腰部受力 13 000 N，将作用在腰部上的力在 X、Y 方向上进行分解，然后进行加载，并将底座支脚设置为固定约束^[10-12]。杆件材料如表 4 所示。

表4 40Cr 的材料属性

材料	密度	弹性模量	泊松比	屈服强度
40Cr	7.9 g/cm ³	206 GPa	0.28	835 MPa

通过仿真，得到腰部的应力和变形分布图，如图 11、图 12 所示。通过图像所示，腰部所受的应力为 591.17 MPa，小于屈服强度，最大变形量为 0.799 27 mm，满足工作要求。

为了确定机身结构的固有频率和振型，从而使设计的结构避免发生共振，利用 Ansys 中的模态分析模块对机身的结构进行模态分析。模态分析是一种计算结构振动特性的数值技术，是最基

本的动力学分析方法,也是响应谱分析、随机振动分析、谐响应分析的基础,将机身模型导入 Ansys 模态分析模块,添加约束和预应力后求解其自振频率变形。

大负载四轴搬运机器人实验平台的腰部在无预载荷状态下 1~6 阶振型模态分析结果如图 13 所示,频率和变形量如表 5 所示。

根据图 13 和表 5 可知,6 阶振型中,固有频率最低为 261.12 Hz,最高为 652.4 Hz;第 4 阶的最大变形量最小,为 15.253 mm,第 6 阶的最大变形量最大,为 20.618 mm。前 3 阶主要是腰部上端在 XZ 平面的振动,即上端在 XZ 平面出现偏移,将会影响旋转定位的运行精度;后 3 阶中,腰部在 Z 轴方向上出现了明显的扭转现象,对整个机构的稳定性产生重大影响,若在此模态发生共振将会使整个装置上部稳定性变差,有必要适当增加厚度来提高机构的稳定性。

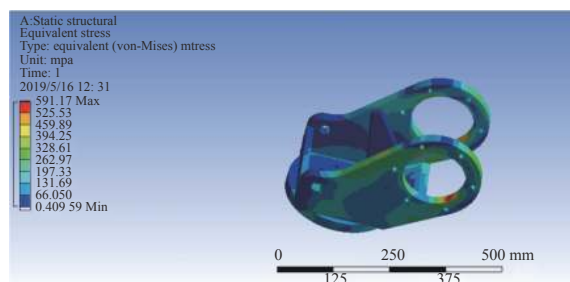


图 11 腰部应力分布图

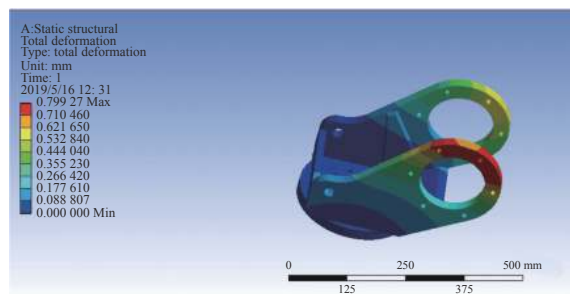
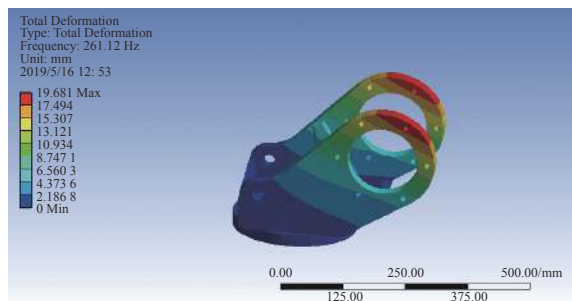
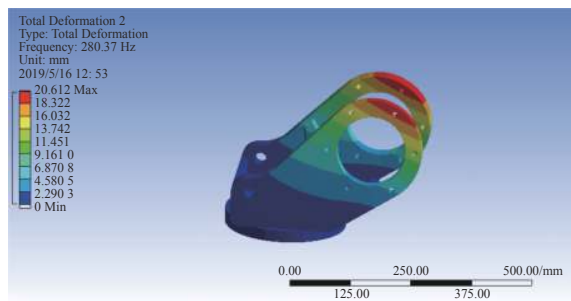


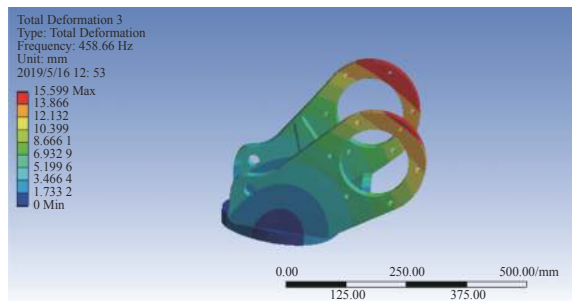
图 12 腰部变形分布图



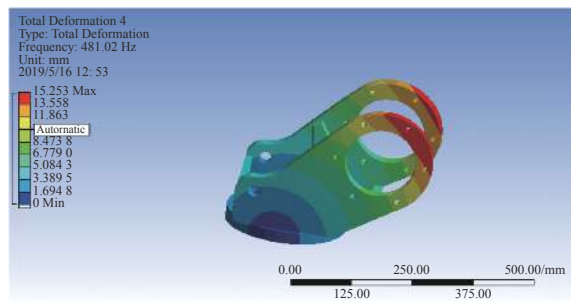
(a) 1阶



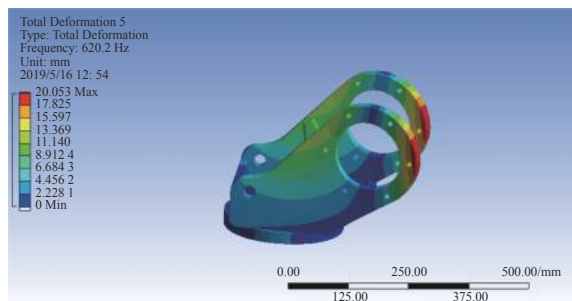
(b) 2阶



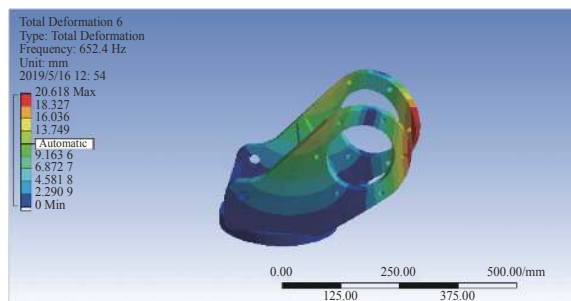
(c) 3阶



(d) 4阶



(e) 5阶



(f) 6阶

图 13 无预载荷状态下前 6 阶振型图

表 5 无预载荷状态下前 6 阶固有频率和变形量

阶数	1	2	3	4	5	6
各阶固有频率/Hz	261.12	280.37	458.66	481.02	620.2	652.4
各阶最大变形量/mm	19.681	20.612	15.599	15.253	20.053	20.618

5 结束语

本文设计了大负载四轴搬运机器人实验平台, 具有负载大、结构稳定、刚度大等优点。对机构进行结构设计及构件选型, 确定了大负载四轴搬运机器人实验平台的大致尺寸和整体比例。利用 SolidWorks 软件建立三维模型, 通过 Adams 进行仿真分析, 根据虚拟仿真结果, 进行电机选型。基于 Ansys 对主要部件进行了有限元分析, 对其结构强度进行校核, 并进行了模态分析, 保证整体运行过程中的安全性与稳定性, 为实际样机的制造奠定了基础。

参考文献

- [1] 马洪续. 机器人技术方兴未艾[J]. 国防科技, 2002(7): 6-10.
- [2] CONNOLLY C. KUKA robotics open architecture allows wireless control[J]. [Industrial Robotan International Journal](#), 2008, 35(1): 12-15.
- [3] XIE S Q, CHENG D, WONG S, et al. Three-dimensional object recognition system for enhancing the intelligence of a KUKA robot[J]. [International Journal of Advanced Manufacturing Technology](#), 2008, 38(7/8): 822-839.
- [4] 梅江平, 曹家鑫, 张新, 等. 采用SolidWorks的高速重载码垛机器人的静力学分析和结构优化[J]. [现代制造工程](#), 2012(10): 18-22.
- [5] 王琪, 曹飞, 张任, 等. 基于ADAMS的码垛机器人参数化分析[J]. [组合机床与自动化加工技术](#), 2014(7): 45-48.
- [6] 田美子, 何芳, 王殿东. 基于有限元法的码垛机器人模态分析[J]. [机床与液压](#), 2015, 43(9): 80-83.
- [7] 梁浩, 余跃庆, 张成新. 基于ADAMS及ANSYS的柔性机器人动力学仿真系统[J]. [机械科学与技术](#), 2002, 21(6): 892-895.
- [8] 高丽华, 郑亚青, MITROUCHEV P. 基于ADAMS的绳牵引并联支撑系统动力学建模[J]. [山东科技大学学报\(自然科学版\)](#), 2013, 32(6): 89-94.
- [9] MA Chenyang. Design and implementation of a handling robot based on target recognition[J]. [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering](#), 2018, 435(1): 12-20.
- [10] 王占军, 赵玉刚, 刘新玉, 等. 码垛机器人结构与模态分析[J]. [机械设计与制造](#), 2014(8): 164-166.
- [11] ZHANG Tao, SONG Yuntao, WU Huapeng, et al. Deformation modeling of remote handling EAMA robot by recurrent neural networks[J]. [Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application](#), 2019, 46(2): 300-310.
- [12] JING Cheng, LI Chen. Coordinated robust control based on extended state observer of dual-arm space robot with closed chain for transferring a target[J]. [Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers](#), 2018, 232(13): 89-98.

编辑 张俊