#### ·实验技术·



# 工件搬运机械手平台的结构设计与分析

陈修龙,张 昊,蔡从浩

(山东科技大学 机械电子工程学院,青岛 266590)

摘要:为解决生产线上人工搬运工件劳动强度大、工作效率低等问题,设计了一款用于工件搬运的四自由度机械 手实验教学平台,实现了机械手平台的结构设计与仿真分析。对机械手进行结构设计,利用 SolidWorks 软件建立各个 零件的三维模型,并装配得到机械手平台;利用 ADAMS 软件对机械手虚拟样机进行运动学和动力学仿真,验证机械 手的运行稳定性,完成电机和减速器的选型;利用 ANSYS 软件对机械手进行有限元分析,检验关键零件大臂的强度 和刚度,得到底座的振型和频率。该研究为工件搬运四自由度机械手与此类机械手实验平台的设计制造提供了理论和 方法依据。

关键词:机械手;结构设计;运动学分析;动力学分析;有限元分析
 中图分类号:TG315
 文献标志码:A
 DOI: 10.12179/1672-4550.20210538

## Structural Design and Analysis of Workpiece Handling Manipulator Platform

#### CHEN Xiulong, ZHANG Hao, CAI Conghao

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

Abstract: In order to solve the problems of high labor intensity and low work efficiency in manual handling of workpieces on the production line, a four degree of freedom experimental teaching manipulator platform for workpiece handling is designed, and the structure design and simulation analysis of the manipulator platform are realized. The structure of the manipulator is designed, the three-dimensional models of each parts are established by using SolidWorks software, and the manipulator platform is assembled. The kinematics and dynamics of the virtual prototype of the manipulator are simulated by using ADAMS software to verify the operation stability of the manipulator and complete the selection of the motor and reducer. Using ANSYS software to carry out finite element analysis of the manipulator, check the strength and stiffness of the key part—the boom, and get the vibration mode and frequency of the base. The research provides a theoretical and methodological basis for the design and manufacture of the four degree of freedom manipulator for workpiece handling and this kind of experimental manipulator platform.

Key words: manipulator; structural design; kinematic analysis; dynamic analysis; finite element analysis

搬运机械手自身的结构与人手相似,既有人 手的灵活性,又有机器的耐用性,针对某些复 杂、危险的工作环境可以代替人工,以达到减轻 工人的劳动强度,提高工人的安全性和生产效率 的目的。目前,搬运机械手在全球各个国家使用 广泛,这些机械手被投入到自动化生产线上,比 如,自动装配流水线、食品生产线、电子产品生 产线等。搬运机械手发展至今已然成了现代机械 生产体系中相当重要的一部分,也成为国内外学 者的研究热点。

文献 [1] 提出了一种新型欠驱动机械手,对其 进行了动力学分析并通过实验验证了分析方法的 正确性。文献 [2] 设计了一种四手爪柔性夹持搬运 机器人,并对其进行了动力学仿真。文献 [3] 对机

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2022-03-29

基金项目:山东省一流本科课程建设项目(机械设计基础)(2021-642);山东省研究生教育优质课程(SDYKC19076); 山东科技大学专业学位研究生教学案例库建设项目(2020-17);山东科技大学优秀教学团队建设计划项目 (JXTD20180502)。

作者简介:陈修龙(1976-),男,博士,教授,主要从事机器人机构学理论与应用、机械动力学的研究。E-mail: cxldy99@163.com

械手运动轨迹的突变点进行了检测,并采取相应 的措施减小了突变点处速度剧烈变化的问题。文 献 [4] 基于倍矩阵和四维旋转矩阵提出 1P5R 串联 机械手的运动学求解方法,使求解更加简便。文 献 [5] 针对自动化冲压生产线,设计了一款用于油 压机上下料的机械手。文献 [6] 设计了一款用于车 轮装配的抓取机械手,并利用 ADAMS 软件对其 进行运动学与动力学仿真。文献[7]以六自由度串 联机械手为研究对象,提出一种新的运动学求解 方法。文献 [8] 对七自由度串联机械手的逆运动学 解法进行了研究。文献 [9] 提出了一种改进的运动 学优化算法,完成了 6R 工业机器人的运动学求 解。文献 [10] 针对串联机器人标定系统,提出一 种坐标系快速转换方法。文献 [11] 研究了杆件柔 性对串联机械臂末端位置误差的影响,并提出补 偿方法。文献 [12] 提出一种机器人定位精度和可 靠性的研究方法,并针对六自由度工业机械手进 行了具体分析。

针对目前国内外工件搬运大量依靠人力的现 状,本文设计了一款用于工件搬运的四自由度机 械手实验教学平台,对机械手实验平台进行了结 构设计,利用 SolidWorks 软件完成零件三维模型 的绘制并装配成机械手平台整机,利用 ADAMS 软件对机械手进行运动学仿真验证其运动稳定 性,对其进行动力学仿真完成电机和减速器选 型,利用 ANSYS 软件对机械手进行有限元分析, 包括强度和刚度分析、模态分析,本文为工件搬 运四自由度机械手平台的设计与制作提供了理论 基础和方法依据。

#### 1 机械手平台方案设计

本文设计的机械手主要由底座、转动台、大 臂、连接臂、连接台、末端执行器、辅助长杆、 辅助连接板、辅助短杆9个部分构成,机械手三 维模型如图1所示。该机械手为四自由度机械 手,所以机械手实现确定运动时所需的驱动个数 为4;该机械手的运动半径可达2400 mm,额定 负载为110 kg,安装方式设计为简单稳定的地面 安装,考虑到机械手体积和重量都偏大,驱动力 矩大,故采用占用空间小,减速比大的谐波减速 器,驱动方式选用 AC 伺服电机驱动。

根据工作要求,设计出各个关节的相对位置, J1 与 J2 竖直距离为 470 mm,水平距离为 260 mm; J2 与 J3 竖直距离为 945 mm, 水平距离为 0 mm; J3 与 J4 竖直距离为 252 mm, 水平距离为 1245 mm, 具体如表 1 所示。



图1 机械手三维模型

表1 各关节之间相对位置

关节	J1与J2	J2与J3	J3与J4
竖直距离/mm	470	945	252
水平距离/mm	260	0	1 2 4 5

## 2 机械手平台方案设计

利用 ADAMS 2016 软件对工件搬运四自由度 机械手平台进行运动学与动力学仿真分析。首先 将机械手平台三维模型导入 ADAMS 软件,随后 对导入的虚拟样机进行材料定义,将9个部件的 材料定义为结构钢 Q235,Q235 的基本参数如 表2 所示。

表 2 Q235 基本参数

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	弹性模量/Pa
Q235	7801	0.29	2.07×10 <sup>11</sup>

J1 是机械手中最重要的关节,现对该关节的 分析结果进行详细阐述。

J1 角位移如图 2 所示,在 0~1 s内,J1 保持 不动,在 1~2 s内转动 17.2°,在 2~4 s内保持不 动,在 4~5 s内反方向转动 17.2°,最后 5~6 s内保 持不动,一次循环结束。J1 角速度如图 3 所示, 在 0~1 s内,角速度保持为 0;在 1~1.5 s内,角速 度逐渐从 0 增加到 26 rad/s;在 1~5~2 s内,角速 度由 26 rad/s逐渐变为 0;在 2~3 s内,角速度稳 定为 0;在 3~6 s内,机械手反向运动,因此角速 度呈对称分布。图 4 为 J1 的角加速度,在 0~1 s 内,角加速度是 0;在 1 s时,角加速度由 0 变为 102 rad/s<sup>2</sup>;在 1 s~2 s内,角加速度逐渐从 102 rad/s<sup>2</sup>;在 2 s~3 s内,角加速度一直维持为 0; 在 3 s~6 s内,机械手反向运动,因此角加速度呈 对称分布。



图 4 J1 角加速度

J1 处所承受的负载最大,所以对该处进行动力 学分析十分重要。图 5 是对该处进行动力学分析后 得到的扭矩图,图中数据可作为电机选型的依据。 在 0~1 s 内,末端执行器质心运动轨迹为沿着 Y 轴 向上的一条直线,X 轴与 Z 轴的分位移未发生改 变,所以转动副 J1 的 X 轴方向的力矩较平稳保持 在-27 N·m;在 1 s 时,力矩突变为-62.5 N·m;在 1~2 s 内,转动副 J1 的 X 轴方向的力矩从 0 逐渐增 大到 63 N·m,在 2 s 时,突变为 37 N·m;在 2~3 s 时,从 37 N·m 降到 25.5 N·m,在 3~6 s 内,机械 手反向运动,所以力矩呈对称分布。



由上述所得运动图像及其扭矩图,可得出 J1 处最大扭矩为 63 N·m,电机驱动力矩为:

$$T = \frac{M}{i\eta} \tag{1}$$

其中: T为电动机输出扭矩; M为最大驱动力矩;

i为谐波减速器传动比;η为传动效率,取0.97。

结合式(1),再查阅各种电机型号表及谐波减 速器型号表,得到J1选用的谐波减速器型号如 表3所示,选用的电机型号如表4所示。

表 3 J1 谐波减速器类型

关节	谐波减速器型号	减速比	额定输出 扭矩/(N·m)	最大启停 扭矩/(N·m)
J1	BCS-14-80-U-I	80	7.3	23

	表 4	J1 电机类型	及参数	
关节	型号	额定 功率/W	额定扭矩/ (N·m)	最大输出 扭矩/(N·m)
J1	80ST-M01330	400	1.3	3.8

## 3 机械手平台的有限元分析

大臂的受力情况最为复杂,因此选取此零件 作为有限元分析对象。大臂的材料为 Q235A,其 屈服应力为 235 MPa,安全系数取 1.5,许用应力为 160 MPa,划分网格对象选择整个物体,网格的 尺寸定为 10 mm,划分结束后共 118763 个节点和 62552 个元素,随后给大臂添加约束和力,进行 求解计算,图 6~图 10 为应力及应变云图。

图 6 为大臂应力分布云图,应力主要集中在 大臂与转动台连接的部位,其中与谐波减速器用 螺栓连接所用的孔出现最大应力为 20.965 MPa, 其余部位的应力不大。由于大臂的许用应力为 160 MPa,而其最大应力为 20.965 MPa,不会超过 最大应力范围。



图 6 应力分布云图

图 7 为大臂沿 X 轴应变分布云图,较大的 应变主要集中在 Y 轴方向的两端,正方向最大 的应变在 0.014377 mm 处,负方向最大的应变在 -0.15664 mm 处,应变从两端向中部减小,其余部 分的应变较小,所以应变满足要求。



图 9 沿 Z 轴应变分布云图

图 8 为大臂沿 Y 轴应变分布云图,较大的应 变集中在大臂与连接臂连接处的 X 轴负方向和 X 轴正方向最远处,正向应变最大在 0.022 267 mm 处,负向应变最大在-0.022 265 mm 处,应变朝着 大臂 X 轴中部地方逐渐变小,其余部分的应变较 小,所以应变满足要求。

图 9 为大臂沿 Z 轴应变分布云图,较大的应 变集中在大臂沿 Y 轴方向的中部沿 X 轴负方向和 正方向最远处,正向应变最大在 0.022 791 mm 处, 负向应变最大在-0.022838 mm 处,应变朝着大臂 X轴中部地方逐渐变小,其余部分的应变都较小, 所以应变满足要求。

大臂总的应变分布云图如图 10 所示,较大应 变在大臂与连接臂的连接处,最大应变在大臂沿 着 Y轴正方向最远处,最大为 0.15664 mm,应力 从 Y轴正方向最远处沿较小值处逐渐变小,其余 部分应变都很小,所以应变满足要求。结合大臂 的应力分布云图和 X, Y, Z轴方向的应变和总应变 分布云图,可知大臂的强度和刚度满足要求。



图 10 总应变分布云图

随后对底座进行 6 阶模态分析,步骤如下: 将底座的三维模型导入 Workbench 18.0,底座的 材料选为"Structural Steel",由于模态分析不受 力,所以划分网格的方式选为"Automatic Method", 划分节点 48 960 个,元素 27 970 个,划分结果如 图 11 所示;随后将提取的模态阶数设置为 6,指 定频率变化的范围设置为 0 到 1×10<sup>8</sup> Hz,接着给 底座的地面添加约束,添加振型图后即可得到底 座各阶振型及频率如图 11 所示。



图 11 底座模态分析网格图

底座的第1阶振型如图12所示,振动方向主要为Y轴方向,振动幅度从底端往上逐渐增大, 其他方向的振动幅度几乎可以忽略;图13为底座 的第2阶振型,振动方向主要为X轴方向,振动 幅度由底端向上逐渐增大,Y轴也有振动,但幅度 不大,Z轴上的幅度较小可以忽略;图14为底座 的第3阶振型,在沿着X轴和Y轴的方向均有振 动,振幅从中间向X,Y轴正方向增大,Z轴上的 幅度很小可以忽略;底座的第4阶振型如图15 所示,振动方向主要沿着Z轴方向,振动幅度从 远离Z轴到靠近Z轴的方向增大,其他方向的振 动幅度较小几乎可以忽略;底座的第5阶振型如 图16所示,主要为沿着Y轴和Z轴方向的振动, X轴上的幅度很小可以忽略;底座的第6阶振型如 图17所示,主要为沿着X轴和Z轴方向的振动, Y轴上的幅度很小可以忽略。从而得到底座的各阶 振型和频率如表5所示。



图 12 底座 1 阶振型图



图 13 底座 2 阶振型图



图 14 底座 3 阶振型图



图 15 底座 4 阶振型图



图 16 底座 5 阶振型图



图 17 底座 6 阶振型图

阶数	频率/Hz	振型描述
1	957.87	沿Y轴振动
2	959.31	沿X轴和Y轴振动
3	1 382.5	沿X轴和Y轴振动
4	1632.9	沿Z轴振动
5	2136	沿Y轴和Z轴振动
6	2136.9	沿X轴和Z轴振动

### 4 结束语

结合目前我国制造业生产线上,人工搬运工

件劳动强度大、工作效率低的现状,设计了一款 用于工件搬运的四自由度机械手实验教学平台, 对机械手平台进行了结构设计,利用 SolidWorks 软件完成各个零件的三维建模并装配成机械手平 台,利用 ADAMS 软件对机械手平台进行运动学 和动力学仿真,以仿真数据为依据完成了电机和 减速器的选型,利用 ANSYS 软件对机械手进行有 限元分析,其大臂的强度和刚度均符合要求,掌 握了其底座的固有频率特征。本研究为工件搬运 四自由度机械手平台与其他类型机械手实验平台 的设计制造提供了理论方法支撑。

#### 参考文献

- [1] 乔尚岭,刘荣强,郭宏伟,等. 3-DOF索杆桁架式欠驱动 机械手运动控制[J]. 机械工程学报, 2020, 56(23): 78-88.
- [2] 姜凯,陈立平,张骞,等.蔬菜嫁接机器人柔性夹持搬运机构设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(S2): 63-71.
- [3] 赵新玉, 温欣, 段晓敏. 检测机械手轨迹突变点识别方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18): 15-21.
- [4] 张英,黄起能,魏世民,等.基于倍矩阵的1P5R串联机 械手逆运动学分析[J].北京邮电大学学报,2022,45(1):33-38.
- [5] 谭泽华,高燕,李雪锋.35MN油压机自动上下料机械 手设计及应用[J].机床与液压,2021,49(19):111-113.

- [6] 赵天闻,薛亚红,包倩倩.基于ADAMS的大型重载车 辆车轮装配机械手运动学及动力学仿真分析[J].机械 设计,2021,38(S1):27-31.
- [7] XIAO F, LI G F, JIANG D, et al. An effective and unified method to derive the inverse kinematics formulas of general six-DOF manipulator with simple geometry[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 159(2): 104265.
- [8] WIEDMEYER W, ALTOE P, AUBERLE J, et al. A real-time-capable closed-form multi-objective redundancy resolution scheme for seven-dof serial manipulators[J].
  IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 431–438.
- [9] 吉阳珍, 侯力, 罗岚, 等. 基于组合优化算法的6R机器 人逆运动学求解[J]. 中国机械工程, 2021, 32(10): 1222-1232.
- [10] 乔贵方, 孙大林, 宋光明, 等. 串联机器人标定系统的坐标系快速转换方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 1-8.
- [11] 谭月胜, 詹登辉, 张彭豪. 刚柔耦合串联机械臂末端位置误差分析与补偿[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 416-426.
- [12] HUANG P, HUANG H Z, LI Y F, et al. Positioning accuracy reliability analysis of industrial robots based on differential kinematics and saddlepoint approximation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 162: 104367.

编辑 钟晓