

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.05.007

# 基于 ANSYS Workbench 的机械手关键部件优化

郑洲洲, 张 森, 张 岩

(青岛科技大学机电工程学院, 山东 青岛 266061)

**摘 要:**为保证机械手在夹持工件过程中的安全性和稳定性,课题组基于 ANSYS Workbench 对球形工件夹持机械手的关键部件进行了优化。课题组对机械爪进行了静力学分析,确定了机械爪最优厚度尺寸,验证了其强度、刚度及可靠性;对传动轴进行了模态分析,求解出了传动轴的6阶固有频率和振型,以防止共振对零件造成损伤。结果表明:模拟研究准确评估了夹持过程零件易受损伤的部位,揭示了振动的内在规律,为机械手的设计制造提供了参照。

**关 键 词:**机械手;静力学分析;模态分析;ANSYS Workbench

中图分类号:TP241.3;TH113 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)05-0039-05

## Structural Optimization of Key Parts of Manipulator Based on ANSYS Workbench

ZHENG Zhouzhou, ZHANG Sen, ZHANG Yan

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China)

**Abstract:** To ensure the safety and stability of the manipulator in the process of clamping the workpiece, the key parts of the sheprical workpiece clamping manipulator was optimized based on ANSYS Workbench. The mechanical jaw was statically analyzed to determine the optimal thickness of the mechanical claw and verify its strength, stiffness and reliability. Modal analysis of the drive shaft was carried out, the sixth-order natural frequency and vibration mode of the transmission shaft were solved to prevent the damage of the part caused by resonance. The results show that the vulnerable parts of the clamping process are accurately evaluated by simulation study, which reveals the law of the inherent vibration and provides a reference for the design and manufacture of the manipulator.

**Keywords:** manipulator; static analysis; modal analysis; ANSYS Workbench

随着智能制造的发展,工业机器人的广泛运用极大地提高了劳动生产效率。工业机械手可按编写的程序对工件进行抓取、运输等操作,可以替代人在有毒有害等特殊情况下从事繁重的体力劳动<sup>[1]</sup>。传统的机械手设计需要进行样件抓取工件测试,在测试过程中判断易损伤部位,因此试验周期长,投入大<sup>[2]</sup>。随着计算机辅助设计(CAD)<sup>[3]</sup>、计算机辅助制造(CAM)<sup>[4-6]</sup>和计算机辅助分析(CAE)的快速发展,通过在计算机上模拟工业机械手的抓取过程,对机械手结构进行分析已经成为了一种有效改进途径。课题组

利用三维建模软件UG设计建立了机械手模型,将机械手的关键部位导入ANSYS Workbench分析软件,对其进行了静力学分析和模态分析,以期为机械手的设计制造提供参考。

### 1 机械手几何模型

#### 1.1 机械手的基本结构

该工业机械手主要用来夹持直径 $D = 100 \sim 150$  mm的球形工件,机械手纵向最大长度 $L = 400$  mm,该机械手由4个抓取爪实现对工件的抓取。利用UG软件建立机械手的整体结构如图1所示。

收稿日期:2020-02-22;修回日期:2020-05-15

基金项目:国家自然科学基金(61472196);山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC0607);山东省自然科学基金(ZR2019MEE066)。

第一作者简介:郑洲洲(1996),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事过程装备无损检测研究。通信作者:张岩(1980),男,山东菏泽人,工学博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向无损检测。E-mail:zy@qust.edu.cn

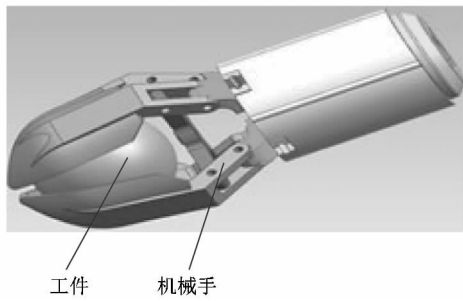


图1 机械手整体结构

Figure 1 Overall structure of manipulator

### 1.2 关键部件模型

该机械手主要由驱动机构、传动机构和抓取机构3部分组成。对机械手进行结构分析时若全部零件都考虑,会出现因模型过于复杂,将占用过大的计算空间而无法进行有限元计算的情况;在机械手夹持的过程中,一些非关键部件对机械手的稳定性和可靠性并不产生影响,因此课题组选择对机械手的关键零部件进行分析,文中选择对夹持机械爪和传动轴进行分析。机械爪和传动轴的结构简图如图2~3所示。

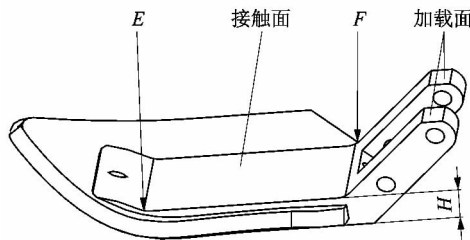


图2 机械爪结构

Figure 2 Mechanical claw structure

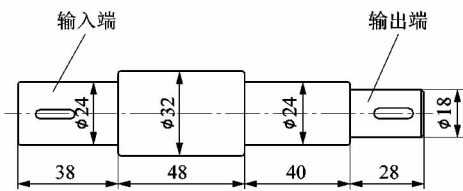


图3 传动轴结构示意图

Figure 3 Transmission shaft structure

## 2 机械手有限元模型

### 2.1 有限元理论

有限元求解是通过将连续体分割为数目有限的单元,各单元间通过节点相互连接,用离散化的单元替代原来的连续体,节点间引入等效节点力代替单元外力<sup>[7]</sup>。通过单元性质,单元内各点的位移函数为  $u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)$ 。由插值公式,单元位移函数可表示为:

$$\{f\} = [N] \{\delta\}^e; \tag{1}$$

$$\delta^e = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ u_2 \ v_2 \ w_2]^T. \tag{2}$$

式中:  $\{f\}$  为单元内任意一点的位移列阵,  $[N]$  为单元形函数矩阵,  $\{\delta\}^e$  为单元节点位移列阵。

将式(2)代入应变-位移表达式:

$$\{\epsilon\} = [B] \{\delta\}^e. \tag{3}$$

式中:  $\{\epsilon\}$  为单元内任意一点应变列阵,  $[B]$  为单元的应变矩阵。

将式(3)代入应力-应变表达式:

$$\{\sigma\} = [D][B] \{\delta\}^e. \tag{4}$$

式中:  $\{\sigma\}$  为单元内任意一点的应力列阵,  $[D]$  为单元的弹性矩阵。

通过分析连续体在受力情况下,连续体内各个单元的位移函数,根据式(3)和式(4)推导出应力-位移和应力-应变的关系,从而分析连续体应力、应变和位移关系的一种表达。

### 2.2 有限元模型的建立

#### 2.2.1 定义材料属性

用 ANSYS Workbench 对机械手进行分析,首先定义材料的属性,该机械手主要用于对球状工件夹持运输工作,根据工件的属性和机械爪工作环境,选用 Q235 作为机械爪的材料;传动轴用于传递力矩,需要承受外载荷,对轴的强度、刚度和韧性提出了较高要求,选用 45# 钢作为传动轴材料。相关材料属性如表 1 所示。

表1 材料属性

Table 1 Material properties

零件名称	材料类型	弹性模量/GPa	材料密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	屈服强度/MPa
传动轴	45	210	7 850	355
机械爪	Q235	200	7 850	235

#### 2.2.2 网格划分

网格划分的质量会影响到求解的速度和精度,网格划分过少求解精度过低,网格划分过多求解时间过长,因此课题组对传动轴和抓取爪采用自适应网格划分的方法。自适应网络划分能根据模型的几何形状、力学特性和物理性质等自动调节网络大小。对于齿轮与齿轮接触易破坏的部位人工加密了网格以便更好观测应力、应变和变形效果。机械爪夹持模型和传动轴划分网格效果如图 4~5 所示。

## 3 关键部件分析

### 3.1 抓取爪静力学分析

机械爪作为机械手在夹持过程中的执行部件,起

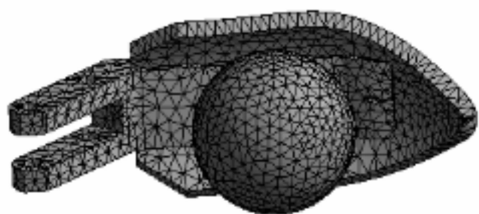


图4 机械爪网格划分

Figure 4 Mechanical claw meshing



图5 传动轴网格划分

Figure 5 Transmission shaft meshing

着准确夹持工件的作用。为了减轻机械手的质量,通常夹持机械爪设计得较薄。本研究中机械手爪厚度  $H = 15 \text{ mm}$ ,模拟分析机械爪夹持工件过程中的受力情况,分析机械爪的应力、应变和位移。课题组以机械爪为分析对象,机械爪4爪的几何形状、外载荷和约束沿中心轴线两两对称,机械爪内各点所受位移、应力及应变都沿该轴对称,故可简化为分析1个爪。机械爪所受的外载荷是由电机通过齿轮系传递到机械爪,根据实际的工作情况,查阅机械设计手册<sup>[8]</sup>,取机械爪所受推力  $F_i = 375 \text{ N}$ 。模拟机械爪夹持过程,对球形工件添加固定约束,机械爪在夹持过程中,拨叉对机械爪施加推力以驱动机械爪闭合,拨叉与机械爪接触面为图2所示的加载面,在此施加载荷,施加载荷大小为  $F_i$ 。对添加约束和加载之后的模型进行求解,得到相应的位移、应变和应力如图6~8所示。

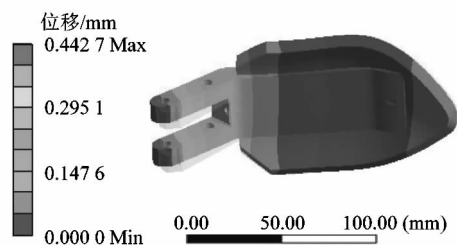


图6 位移图

Figure 6 Displacement map

图8所示,最大应力出现在工件与机械爪的接触点,此时机械爪夹紧工件,最大应力为  $231.76 \text{ MPa}$ ,此时最大应力小于 Q235 材料的屈服强度  $235 \text{ MPa}$ ,满足安全条件。但最大应力与材料的屈服强度较为接近,

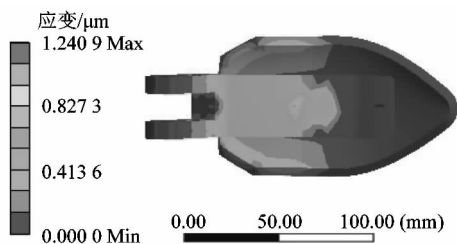


图7 应变图

Figure 7 Strain diagram

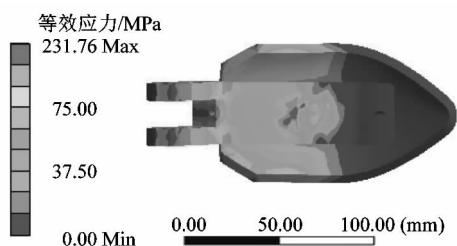


图8 应力图

Figure 8 Stress diagram

长期处于该抓取环境,零件表面易造成疲劳损伤。课题组改变机械手爪的爪厚  $H$ ,得到最大应力与爪厚  $H$  的关系,如图9所示。

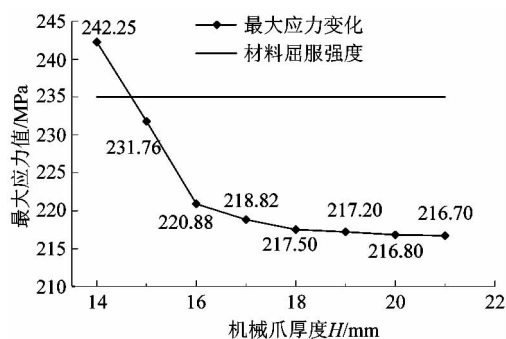


图9 最大应力变化

Figure 9 Maximum stress change

随着机械爪壁厚逐渐增加,机械爪面的最大应力逐渐减小,当壁厚增加到  $H = 16 \text{ mm}$  时,机械爪面的最大应力逐渐趋于稳定。考虑壁厚  $H = 16, 17$  和  $18 \text{ mm}$  时,对图2所示的接触区面对角线上添加路径  $EF$ ,  $EF$  路径上的应力变化如图10所示。在球形工件与机械爪接触点附近区域应力值发生突变,随着壁厚增加,应力突变现象越显著,综上,机械手壁厚  $H = 16 \text{ mm}$  能较好的避免应力突变,降低最大应力值。

从图6所示的位移云图上看,最大位移出现在机械爪爪端,此时最大变形量为  $0.4 \text{ mm}$ ,和材料自身相比可以忽略不计,不会对零件的夹持产生影响<sup>[9]</sup>。

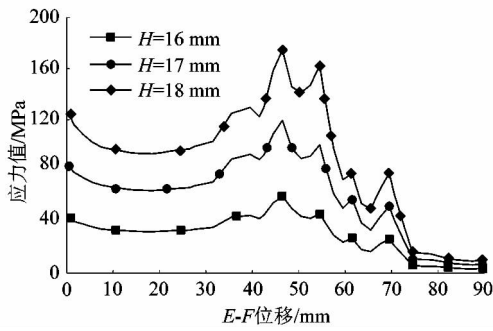


图 10 EF 路径应力分布

Figure 10 Stress distribution of EF path

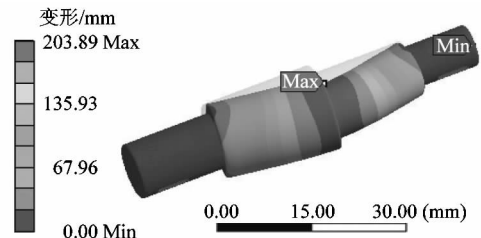
### 3.2 传动轴模态分析

传动轴是机械手的关键部件之一,作为机械手传递动力的桥梁,其稳定性受振动影响较为严重。传动轴由振动而造成的弯曲疲劳破坏颇为常见,静力学分析计算已经不能满足设计要求<sup>[10]</sup>。为防止由于振动对零件造成的破坏,课题组基于 ANSYS Workbench 对传动轴进行了模态分析。基于 2.2.2 小节的网格划分,对传动轴施加载荷和约束条件,查阅机械设计手册,选择与传动轴输入端相连接的步进电机型号为 SST45D003X,电机的输出扭矩为 3 000 N·mm,故将图 3 的输入端施加 3 000 N·mm 的转矩,将图 3 的输出端固定。通过模态分析传动轴前 6 阶的固有频率和振型方向,分析结果如表 2 所示,对应 6 阶频率的振型如图 11 所示。

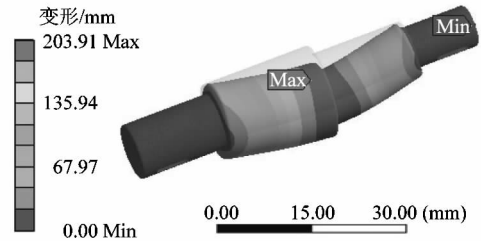
表 2 固有频率和相应的振型方向

Table 2 Natural frequencies and corresponding mode directions

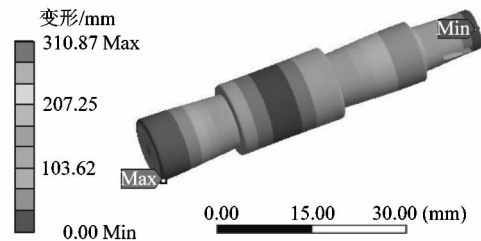
阶数	固有频率/Hz	振型方向
1	810.74	沿传动轴周向轻微振动
2	841.48	沿 X 轴正方向弯曲振动
3	5 523.60	沿 Y 轴正方向弯曲振动
4	7 669.60	沿 Z 轴方向振动
5	7 694.90	在 XZ 平面内扭转振动
6	12 800.00	在 YZ 平面内扭转振动



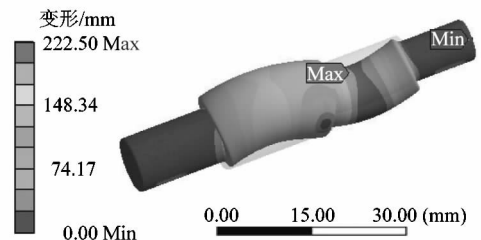
(b) 2阶振型



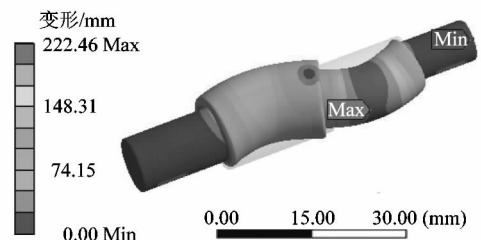
(c) 3阶振型



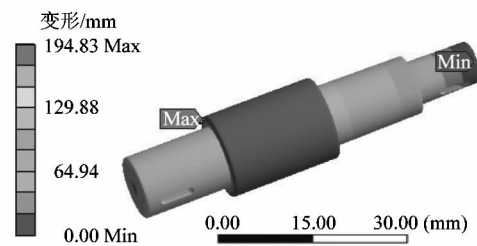
(d) 4阶振型



(e) 5阶振型



(f) 6阶振型



(a) 1阶振型

图 11 6 阶固有频率对应振型

Figure 11 Sixth-order natural frequency corresponds to mode

从图 11 中 6 阶固有频率对应振型可知,固有频率越大,传动轴振动效果越明显。从 2 阶、3 阶的单方向振动逐渐过渡到 5 阶、6 阶 2 个方向的扭转振动,振幅

(下转第 48 页)