

文章编号:2095-0411(2018)01-0061-09

轮胎上下料机械手的设计及其动力学特性分析

杨 森¹, 沈惠平¹, 强恒存¹, 邓嘉鸣¹, 刘金石², 张有斌²

(1.常州大学 机械工程学院,江苏 常州 213164;2.金石机器人(常州)有限公司,江苏 常州 213164)

摘要:为了提高桁架机器人传送轮胎的效率和通用性,提出了一种可以抓取内径为 304.8mm 和内径为 609.6mm 的 2 种规格轮胎的机械手。通过分析轮胎的结构、放置形式以及上下料轮胎数量,运用 Solidworks 构建了轮胎上下料机械手的虚拟样机。并结合 ANSYS 仿真软件和实验,验证了机械手的动力学特性。结果表明,该机械手可以抓取 7 个内径为 304.8mm 的轮胎和 4 个内径为 609.6mm 的轮胎,并能准确完成轮胎上下料过程。

关键词:轮胎;机械手;模块化设计;虚拟样机;动力学特性

中图分类号:TP 241

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.01.010

Design and Dynamic Analysis of Gripper for Loading and Unloading Tyres

YANG Sen¹, SHEN Huiping¹, QIANG Hengcun¹, DENG Jiaming¹, LIU Jinshi², ZHANG Youbin²

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. StonRobot Changzhou Co. Ltd., Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and generality of truss robot delivering tyres, a gripper is proposed to grab two sizes of tyres, whose internal diameter are 304.8mm and 609.6mm. Through the analysis of the structure of the tyre, the form of placement and the number of the loading and unloading tyres, the virtual prototype of the gripper is designed by the software of Solidworks. The dynamic characteristics of the gripper are confirmed by the software of ANSYS and the experiments. The result shows that the gripper can grab 7 tyres whose internal diameter is 304.8mm and 4 tyres whose internal diameter is 609.6mm, and it can complete the process of loading and unloading tyres accurately.

Key words: tyres; gripper; modular design; virtual prototype; dynamic characteristics

工业机器人实现了机器人技术与加工制造技术的有效结合,其中,机器人机械手(简称:手爪)是一

收稿日期:2017-04-12。

基金项目:江苏省科技成果转化专项资金项(BA2015098)。

作者简介:杨森(1991—),男,江苏盐城人,硕士生。通信联系人:沈惠平(1965—),E-mail:749909853@qq.com

个重要的关键部件。工业机器人抓取对象不同,其机械手的结构形式亦不相同。

刘宇斐^[1]根据壳体零件的结构特点,设计了抓取壳体零件的机器人手;刘勇^[2]基于 Solidworks 设计了面向大尺寸料袋的码垛手;顾寄南^[3]设计了一种用于数控机床换刀的机器人手;汪新中^[4]设计了一种适用于平面关节型装配机器人的拧螺钉机械手;吴雪晖^[5]针对汽车钣金零部件生产线的下料任务,提出了一种结合磁力吸附和真空吸附的结构,并在此基础上,利用模块化设计原理设计了一套工业机械手。Chen F^[6]面向自动化装配过程,模仿人手抓取过程设计了一款夹持手,实现工件位置的变更和重定位,提高了装配效率。Ozawa R^[7]设计了一款包含主动件和从动件的三指手,并提出了该手的控制方法。Ramaiah P S^[8]设计了一款基于单片机的四指手,通过单片机、传感器和无线反馈系统,实现机械手的抓放。

本文设计了一款面向轮胎上下料的机械手,该机械手可以抓取 7 个内径为 304.8mm 的轮胎,也可以抓取 4 个内径为 609.6mm 的轮胎,既提高了桁架机器人传送轮胎的效率,也提高了轮胎机械手的通用性。

1 上下料轮胎方案设计

制造轮胎的过程中,装卸轮胎包括上料、下料 2 个动作,上料即通过机械手将轮胎由指定工位传送到物料台上,下料即通过机械手将轮胎由物料台传送到指定工位上。因此,上下料轮胎即为机械手抓取、传送以及放置轮胎 3 个过程。

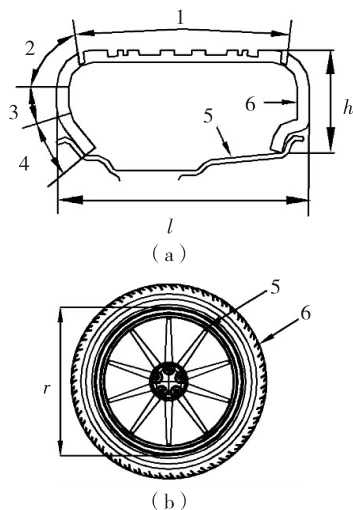
1.1 轮胎结构及上下料轮胎放置形式

本次抓取的轮胎结构如图 1 所示。轮胎胎层内侧为中空式,轮胎横断面不完全封闭,轮胎整体呈圆环状规则分布。

轮毂与轮胎配合横断面如图 1(a)所示,其中, l 、 h 分别表示轮胎的胎面宽度、断面高度。抓取的轮胎有内径 r 为 304.8mm 和 609.6mm 2 种规格,具体参数表示为:144/70R12,350/80R24。其中,数字 144,350 分别表示轮胎的胎面宽度,数字 70,80 表示轮胎的扁平比(%), R 表示轮胎的类型为子午线轮胎,轮毂与轮胎配合形式如图 1(b)所示。

轮胎内部为空芯结构,整体呈圆环状。因此,上下料轮胎的过程中,机械手抓取轮胎部位为胎圈的内部,通过手爪对轮胎胎圈内部的支撑作用,实现对轮胎的抓放。

同时,为了提高轮胎的抓取效率,设计的机械手须一款可同时抓放多个轮胎。将同一规格的多个轮胎进行叠放式放置,设内径为 304.8mm 轮胎叠放的高度为 H_1 ,内径为 609.6mm 轮胎叠放的高度为 H_2 (如图 2 所示),通过手爪对底端轮胎的抓放,即可实现对多个轮胎的同时抓放。



1—胎冠;2—胎肩;3—胎侧;4—胎圈;5—轮胎;6—轮毂

图 1 轮毂与轮胎配合图

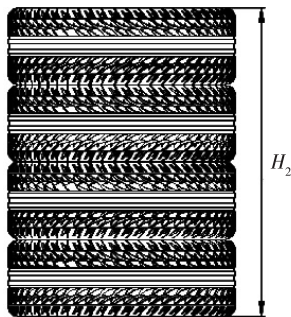


图 2 内径为 609.6mm 轮胎的轮胎放置形式

1.2 上下料轮胎数量设计

内径为 304.8mm 和内径为 609.6mm 轮胎的胎面宽度分别为 $l_1=144\text{mm}$, $l_2=350\text{mm}$ 。由于机械手要抓取 2 种不同尺寸的轮胎,因此,为了提高手爪的通用性和稳定性,需要对放置轮胎的数量进行限定。设抓取内径为 304.8mm 轮胎的高度为 H_1 ,数量为 a_1 , $H_1=144a_1$;抓取内径为 609.6mm 轮胎的高度为 H_2 ,数量为 a_2 , $H_2=350a_2$ 。由于是同一手爪抓取,则 H_1 与 H_2 近似相等,则 a_1 可取 7,10,20,30..., a_2 可取 4,8,12...。为保证在工作过程中手爪的稳定性,当轮胎数量过多时会降低手爪的刚度,因此,轮胎数量取较小值,即 $a_1=7$, $a_2=4$ 。此时, $H_1=1\ 008$, $H_2=1\ 400\text{mm}$ 。

2 轮胎手爪的结构与尺寸设计

2.1 轮胎手爪的结构设计

2.1.1 轮胎手爪机构设计

根据前述的轮胎放置形式、抓取原理等分析,作者设计的轮胎手爪机构,如图 3 所示。图 3(a)所示为手爪机构的俯视图,手爪机构沿 A-A 截面的剖视图如图 3(b)所示。

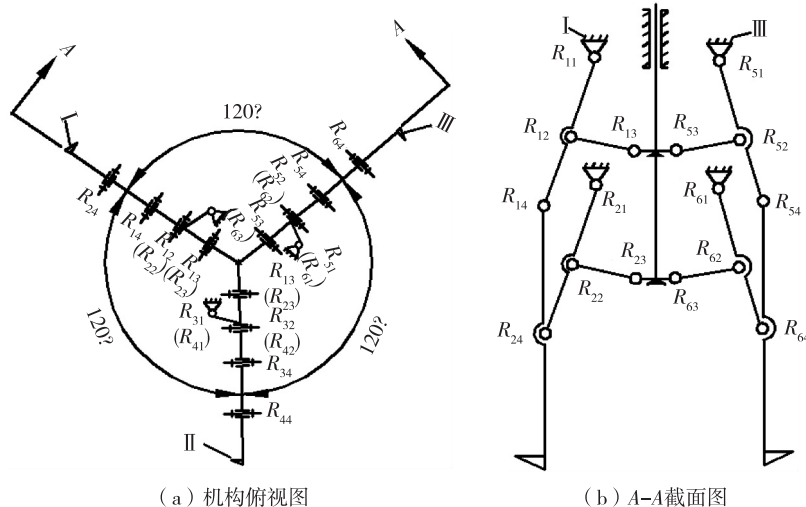


图 3 上下料轮胎手爪机构图

2.1.2 上下料轮胎方案分析

该轮胎手爪由 3 条结构相同、对称布置的支链 I, II, III 组成。为清晰起见,选用支链 I, III 组成的平面机构(如图 3(a)所示)来描述手爪抓放轮胎的原理与过程,如图 4 所示,并以内径为 609.6mm 的轮胎为抓取对象(抓取轮胎的数量为 4),其中 C 为放置轮胎的物料台。

如图 4 所示,该手爪抓取轮胎的过程分为 3 个工序。其中,工序 1 为手爪整体下移;工序 2 为手爪 2 条支链 I, III 同时张开;工序 3 为手爪带动轮胎整体上移,最终实现轮胎的抓取。电机通过

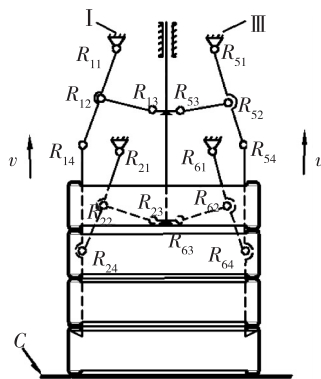


图 4 手爪抓取轮胎的工作原理

与手爪传动机构 1 相连,将回转运动转变为直线运动,通过手爪传动机构 1 的上、下移动,控制手爪 3 条支链 I, II, III 同时张开、闭合运动,从而实现手爪对轮胎的抓取与放置。

上述为手爪抓取轮胎的过程,当手爪完成对轮胎的抓取之后,手爪按照预定轨迹,将轮胎传送到指定位置上。手爪放置轮胎的过程与抓取轮胎的过程相反。

2.2 轮胎手爪的尺寸设计

现以确定支链 I 的结构尺寸为例,确定其他 2 条支链 II, III 的结构尺寸。

2.2.1 手爪抓取元件的尺寸

支链 I 为 $\{(R_{11} \parallel R_{12} \parallel R_{13} \parallel R_{14}) - (R_{21} \parallel R_{22} \parallel R_{23} \parallel R_{24}) - \}$, 在支链 I 中,转动副 R_{14} 与钩板之间的杆件以及钩板构成了手爪的抓取元件。因此,确定钩板的尺寸以及转动副 R_{14} 与钩板之间的距离,即可确定手爪抓取元件的尺寸。

钩板的尺寸取决于钩板实际支撑轮胎部位的尺寸,如图 5 所示。

设钩板的长度为 l' , 轮胎内侧的横断面高度为 h' (如图 5 所示), $l' \leq h'$ 。内径为 304.8 mm 轮胎和内径为 609.6 mm 轮胎的断面高度分别为 $h_1' = 86 \text{ mm}$, $h_2' = 90 \text{ mm}$, $h_1' < h_2'$, 由于该手爪须能够抓取这 2 种规格的轮胎,为了防止钩板尺寸过短导致轮胎滑落,同时,也为了防止钩板尺寸过长对轮胎表面产生损害,则 $h_2'/2 < l' < h_1'$, 即 $45 < l' < 86$, 且 l' 取整数方便加工,为此,拟定钩板的长度 $l' = 60 \text{ mm}$ 。

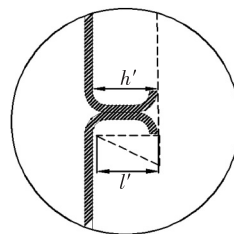


图 5 手爪抓取轮胎的接触部位

在支链 I 中,设转动副 R_{14} 与钩板之间的距离为 $l_{R_{14}}$ 。内径为 304.8 mm 和内径为 609.6 mm 轮胎的放置高度分别为 1 008 mm, 1 400 mm。该手爪要能够抓取这 2 种规格的轮胎,则 $l_{R_{14}} \geq 1 400 \text{ mm}$ 。为此,设计转动副 R_{14} 与钩板之间的距离为 1 500 mm。

2.2.2 手爪连接元件的设计

在支链 I 中,支路 $\{(R_{11} \parallel R_{12} \parallel R_{13} \parallel R_{14}) - \}$ 与支路 $\{(R_{21} \parallel R_{22} \parallel R_{23} \parallel R_{24}) - \}$ 为手爪的连接元件。抓取元件通过连接元件与传动机构相连,构成了手爪的抓取回路。

轮胎内径为 r , 则当手爪成功抓取轮胎时,

$$l_{R_{12}R_{13}} + l_{R_{12}R_{14}} \sin \theta_1 = r/2 \quad (1)$$

$$l_{R_{22}R_{23}} + l_{R_{22}R_{24}} \sin \theta_2 = r/2 \quad (2)$$

式中: $l_{R_{12}R_{13}} = l_{R_{22}R_{23}}$, $l_{R_{11}R_{12}} = l_{R_{12}R_{14}} = l_{R_{21}R_{22}} = l_{R_{22}R_{24}}$ 。 $l_{R_{1i}R_{1j}}$ 和 $l_{R_{2i}R_{2j}}$ ($i, j = 1, 2, 3, 4$) 分别为转动副 R_{1i} 与转动副 R_{1j} 、转动副 R_{2i} 与转动副 R_{2j} 之间的杆长, θ_1, θ_2 分别为杆件 $l_{R_{12}R_{13}}$ 及 $l_{R_{22}R_{23}}$ 与竖直方向的夹角。

为了保证手爪能完成抓放轮胎的过程,需满足

$$\begin{cases} l_{R_{12}R_{13}} + l_{R_{12}R_{14}} \sin \theta_1 \leq \frac{r}{2} \\ l_{R_{22}R_{23}} + l_{R_{22}R_{24}} \sin \theta_2 \leq \frac{r}{2} \end{cases}$$

2 种规格的轮胎内径分别为 304.8, 609.6 mm, 将较小值取整代入式(1)、式(2), 得

$$\begin{cases} l_{R_{12}R_{13}} + l_{R_{12}R_{14}} \sin \theta_1 \leq 153 \\ l_{R_{22}R_{23}} + l_{R_{22}R_{24}} \sin \theta_2 \leq 153 \end{cases} \quad (3)$$

当手爪成功抓取轮胎时, $\theta_1 = \theta_2 = \pi/3$, 于是有: $l_{R_{11}R_{12}} = 170\text{mm}$, $l_{R_{12}R_{13}} = 156\text{mm}$, 满足式(3)。综上所述可知, 支链 I 其余杆长分别为 $l_{R_{22}R_{23}} = 156\text{mm}$, $l_{R_{12}R_{14}} = l_{R_{21}R_{22}} = l_{R_{22}R_{24}} = 170\text{mm}$ 。

2.3 传动机构设计

手爪传动机构采用滚珠丝杠传动, 它具有传动效率高、定位精度高、传动可逆性、使用寿命长和同步性能好等优点。驱动电机与滚珠丝杠相连, 连接元件与螺母连接, 实现往返直线运动, 并将动力传递给传动机构, 再传递至机械手爪, 实现手爪的工作运动。

2.3.1 传动元件设计

手爪抓取轮胎后的过程为匀速运动, 速度为 0.5m/s 。结合手爪实际工作情况, 查阅相关资料^[9], 选用滚珠丝杠的参数为: 公称直径 20mm , 导程 20mm , 长度 1550mm , 螺母质量 3.78kg 。

2.3.2 驱动元件设计

由于轮胎手爪对运动位置的控制及重复定位精度等的要求较高, 电机须具有反馈功能, 同时, 应具有较大的启动力矩、较好的扭矩特性、较宽的调速范围、较高的可靠性和稳定性, 并且可以实现频繁的换向, 因此, 选择交流伺服电机作为轮胎手爪的驱动电机。

当手爪运动到抓料工位时, 手爪静止。紧接着, 伺服电机驱动手爪, 抓取轮胎。手爪抓取轮胎的过程为匀速运动, 速度为 0.5m/s , 手爪由静止加速到 0.5m/s 所用时间为 1s , 因此, 该加速过程的加速度为 0.5m/s^2 。手爪质量为 24.88kg , 则手爪抓取内径为 304.8mm 的轮胎和内径为 609.6mm 的轮胎驱动元件的总负载约为 580N , 810N 。

设手爪抓放轮胎的过程为匀速运动, 且速度 0.5m/s , 可知, 驱动手爪运动的电机转速^[10]为 $1\ 500\text{r/min}$ 。

当手爪抓取内径为 609.6mm 轮胎时, 驱动元件负载最大, 为 81kg 。因此换算到电机上的转动惯量^[10]为 $8.21 \times 10^{-4}\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 滚珠丝杠的转动惯量^[10]为 $1.89 \times 10^{-4}\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 则总的转动惯量为 $1.01 \times 10^{-3}\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

由转动惯量和转矩换算公式^[10], 手爪驱动电机的最大启动转矩为 $0.16\text{N} \cdot \text{m}$, 手爪的负载转矩为 $2.8\text{N} \cdot \text{m}$, 则手爪的转矩为 $4.44\text{N} \cdot \text{m}$, 其中经查阅手册^[10], 手爪的安全系数为 1.5 。最终求得手爪电机的负载功率为 1kW 。

由此确定, 轮胎手爪的驱动电机选用三菱品牌的带制动器的伺服电机 HG-SR152(B)G1 型。

该电机的额定转速为 $2\ 000\text{r/min}$, 额定功率为 1.5kW , 额定转矩为 $7.2\text{N} \cdot \text{m}$, 转动惯量为 $2.14 \times 10^{-3}\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 符合设计要求。

2.4 轮胎手爪虚拟样机设计

基于以上分析, 用 Solidworks 设计的轮胎抓取手虚拟样机如图 6 所示。

3 手爪动态特性分析

3.1 手爪钩板受力分析

手爪主要依靠支链末端钩板对轮胎胎圈内部的支撑作用, 来实现对轮胎的抓取。因此, 手爪的受力部位为支链末端的钩板。由于手爪的 3 条支链沿空间呈 120° 均匀分布, 3 条支链末端的钩板同时抓取轮



图 6 轮胎手爪虚拟样机

胎,所以 3 条支链受力情况相同。

支链 I,III 构成的手爪机构末端的钩板受力如图 7 所示。由于 3 条支链的受力情况相同,所以选取支链 I 的受力情况,来分析手爪在抓取轮胎过程中的整体受力情况。

设手爪在抓取轮胎时,手爪支链末端承受的载荷为 G ,则支链 I 末端钩板所承受载荷大小为 $G/3$ 。内径为 304.8mm 的轮胎质量为 4.5kg,抓取数量为 7;内径为 609.6mm 的轮胎质量为 13kg,抓取数量为 4。则手爪在抓取内径为 304.8mm 的轮胎时,3 条支链末端钩板所承受载荷大小约为 110N;抓取内径为 609.6mm 的轮胎时,3 条支链末端钩板所承受载荷大小约为 180N。

3.2 手爪静力学分析

考虑手爪受载最大情况,对其进行静力校核。手爪在抓取内径为 609.6mm 的轮胎时受载最大,对手爪 3 条支链末端钩板施加 180N 的载荷。

基于 ANSYS 对手爪进行静力学分析,由于手爪整体模型中的倒圆角、孔等特征对最终分析结果影响不大,因此,为了提高计算效率将该类特征删除,并将手爪的驱动电机等模型也忽略,最终简化模型如图 7 所示。

将手爪 Solidworks 模型导入 ANSYS 中,设置手爪材料为 Q235,屈服强度为 235MPa,密度为 7 850 kg/m³,弹性模量为 200GPa,泊松比为 0.269。进行网格划分,施加载荷和约束,最终轮胎手爪的应变分布、应力变化云图如图 9、图 10 所示。

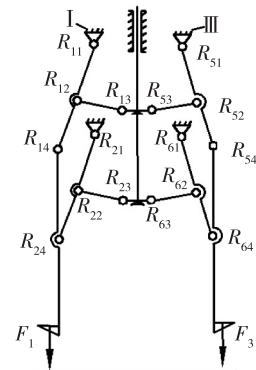


图 7 手爪钩板受力分析

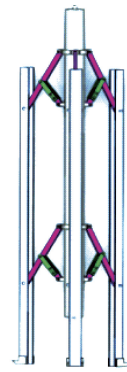


图 8 轮胎手爪有限元模型

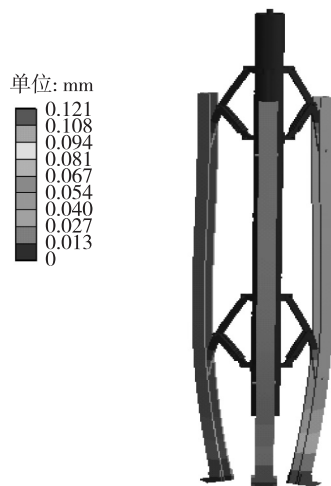


图 9 轮胎手爪应变分布云图



图 10 轮胎手爪应力变化云图

抓取过程中,单个手指末端支撑部位的最大变形量为 0.121mm,对手爪的传送精度影响较小,可以忽略。整个轮胎手爪的最大应变为 20.320MPa,发生在手爪的连接部位,远小于材料的屈服强度,因

此,满足设计要求。

3.3 手爪模态分析

3.3.1 模态分析基本理论

研究结构的动态特性,可通过对结构进行模态分析来实现^[11]。

将轮胎手爪视为无阻尼自由振动系统,系统的固有频率及模态均与外部激励无关,其振动方程可以表示为^[12]

$$MX + KX = 0$$

式中: M 为系统的质量矩阵, K 为系统的刚度矩阵; \ddot{X} , X 分别加速度、位移向量。

解方程可得到轮胎手爪系统各阶模态的固有频率和对应的模态的向量。

3.3.2 手爪模态分析

基于以上理论分析,应用 ANSYS WORKBENCH 的 modal 分析模块,对轮胎手爪进行模态分析,得到手爪前 6 阶模态,分析结果如表 1、图 11 所示。其中,频率的单位为 Hz。

表 1 手爪前 6 阶频率及振型

阶次	频率/Hz	振型描述
1	30.613	滚珠丝杠沿轴向弯曲变形
2	30.626	
3	33.135	手爪的 3 条支链发生弯曲变形
4	33.981	
5	34.352	
6	47.580	

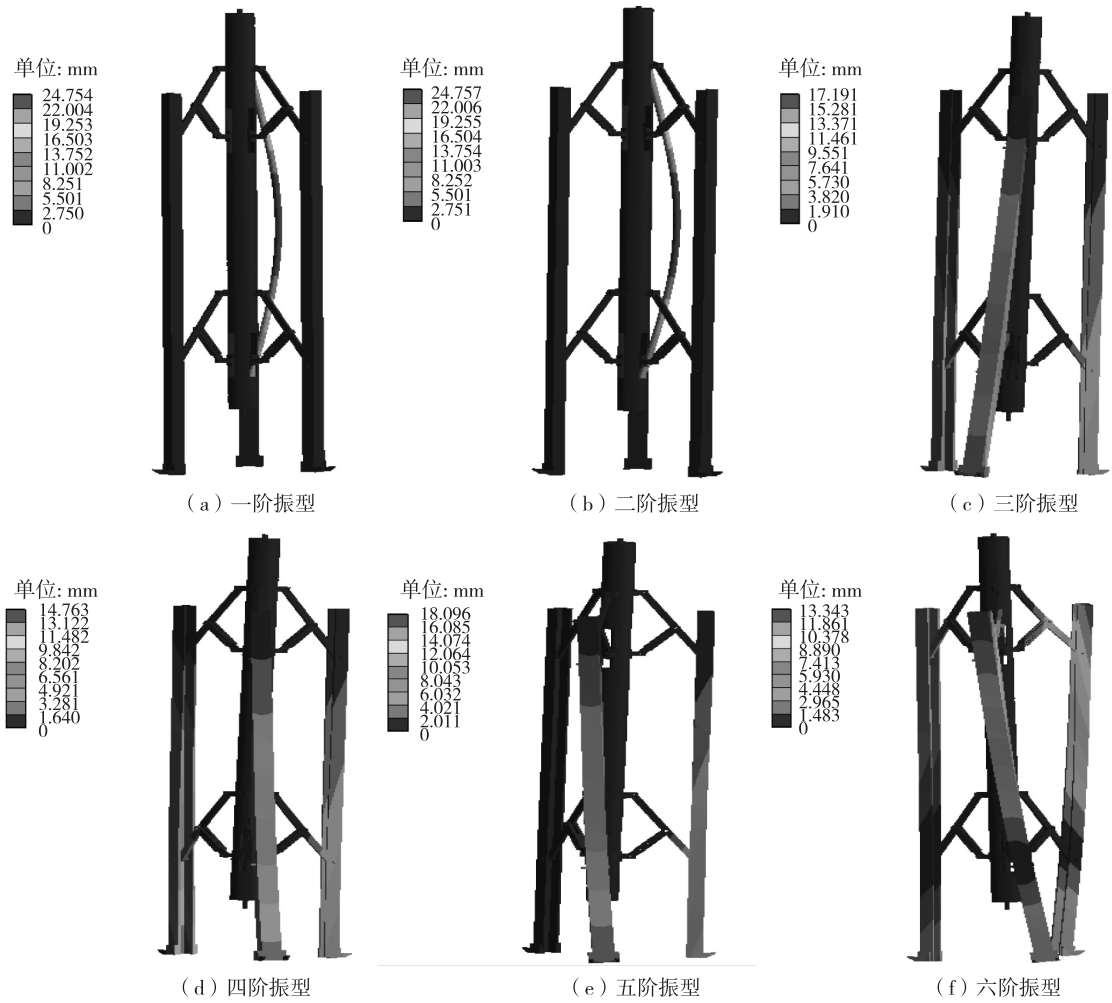


图 11 手爪前 6 阶振型

表 1 描述了手爪前 6 阶频率及其振型,图 11 为基于 ANSYS 仿真软件分析得出手爪前 6 阶振型图。

通过图 11 可知,轮胎手爪的第 1 阶、第 2 阶变形为滚珠丝杠沿轴向发生弯曲变形;第 3 阶、第 4 阶、第 5 阶以及第 6 阶变形为轮胎手爪的 3 条支链发生弯曲变形。轮胎手爪的前 6 阶模态分析的最低频率为 30.613Hz、最高频率为 47.580Hz。

手爪工作过程中,受到的外部激励主要为手爪电机。根据所选用的手爪电机型号可知,电机的激振频率为

$$f = 2n\pi/60 \approx 210 \text{ Hz}$$

手爪电机的激振频率远大于手爪的前 6 阶频率,因此,所设计的手爪结构尺寸合理,结构稳定性较高,能满足实际工作要求。

综上分析可知,轮胎机械手爪的结构强度和刚度均能满足实际工作要求,可用于实际生产。

4 轮胎手爪样机及其实验

为了验证以上轮胎手爪的设计原理,已研制出样机(如图 12 所示),并进行了轮胎抓取实验(如图 13 所示)。抓取内径为 304.8mm 的轮胎,且抓取数量为 7 个。手爪完成了轮胎抓取、上下料过程。

制造的样机可同时抓取多个轮胎,且至少可以抓取 2 种规格的轮胎,具有一定的通用性。



图 12 手爪样机



图 13 轮胎抓取实验

5 结 论

1)设计了一种轮胎机械手,它可以抓取 7 个内径为 304.8mm 的轮胎和 4 个内径为 609.6mm 的轮胎。

2)通过模块化设计确定了手爪抓取元件、连接元件的尺寸,完成了手爪驱动电机选型。

3)对手爪进行了 ANSYS 分析,并制作了样机,理论和实验表明,该轮胎手爪具有足够的强度和刚度,且抓放轮胎过程稳定、可靠,可应用于实际生产。

参考文献:

- [1]刘宇斐,周清华. 数控机床上下料用工业机器人的手爪设计[J]. 现代制造, 2014(12):121-122.
- [2]刘勇,陆宗学,卞绍顺. 工业机器人码垛手爪的结构设计[J]. 机电工程技术, 2014(2):44-45.
- [3]顾寄南,师二产,胡典传. 换刀机器人手爪的设计与仿真[J]. 制造业自动化, 2011, 33(7):109-110.

- [4]汪新中. 平面关节型装配机器人拧螺钉手爪的研究[J]. 机电工程, 2008, 25(6):18-20.
- [5]吴雪晖, 袁建军, 张伟军. 汽车钣金零部件下料机械手爪设计[J]. 机电一体化, 2016(1):47-50.
- [6]CHEN F, CARBONARI L, CANALI C, et al. Design of a novel dexterous robotic gripper for in-hand twisting and positioning within assembly automation[J]. Assembly Automation, 2015, 35(3):37-45.
- [7]OZAWA R, HASHIRII K, YOSHIMURA Y, et al. Design and control of a three-fingered tendon-driven robotic hand with active and passive tendons[J]. Autonomous Robots, 2014, 36(1):67-78.
- [8]RAMAIAH P S, RAO M V, SATYANARAYANA G V. A microcontroller based four fingered robotic hand[J]. International Journal of Artificial Intelligence & Applications, 2011, 2(2):13-29.
- [9]周希章, 周全. 常用电动机的选择和应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007:105-130.
- [10]郑文玮, 吴克坚. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996:153-158.
- [11]杨义, 李志远, 马庆丰. 基于动态特性的车架再设计[J]. 机械设计与制造, 2010(7):24-26.
- [12]周云郊. 基于刚度与模态分析的客车结构轻量化研究[J]. 机械设计与制造, 2010(7):117-119.

(责任编辑:李艳)

【上接第 54 页】

- [9]类延达, 邹全亮, 郭宝春, 等. 胶乳-悬浮液共沉法制备天然橡胶/埃洛石纳米管复合材料的结构与性能[J]. 广东橡胶, 2010(1):1-7.
- [10]邱权芳, 彭政, 罗勇悦, 等. “胶乳共混法”制备天然橡胶/二氧化硅纳米复合材料及其性能[J]. 广东化工, 2009, 36(4):7-9.
- [11]WANG M J, WOLFF S, DONNET J B. Filler-elastomer interactions part i: silica surface energies and interaction with ModelCompounds[J]. Rubber Chem Technology, 1991, 64 (5): 559-576.
- [12]WANG M J, WOLFF S, DONNET J B. Filler-elastomer interactions part III: carbon black surface energies and interaction with elastomer analogs[J]. Rubber Chem Technology, 1991, 64 (5): 714-736.
- [13]许海燕, 吴驰飞. 天然橡胶原位接枝炭黑的分散性研究[J]. 高分子学报, 2009(9):886-890.

(责任编辑:李艳)