

锻造自动化用高负重比气动机械手夹持臂及其轻量化

徐悦鹏, 姚宏亮, 曾琦, 李敬, 田晓晓, 李嘉鹏, 焦麒安

(中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

摘要: 为解决自动化锻造生产中大量质量坯料在各环节转移困难的问题, 对机械手夹持臂的机械结构和驱动系统进行了设计, 以实现机械手夹持臂的高负重比。通过 SolidWorks 对机械手设备进行三维建模, 并完成动力源和直线导轨等机构的相关参数计算; 对夹持臂进行静力学分析和结构优化, 并通过机器人负载模拟平台对机械手的夹持性能进行验证。为满足产品经济性与生产制造的便利性, 夹持臂采取模块化设计策略, 其主体采用标准工字型钢材, 夹钳和固定端通过焊接模块固定, 并对整体结构进行了轻量化设计。结果表明: 该机械手夹持臂轻量化后的质量为 75 kg, 在选用经济效益较高的 KUKA KR210 机器人情况下, 最大负载为 70 kg, 机械手夹持臂的负重比达到 1:1.1。该夹持臂符合设计要求, 其具有的高负重比将有利于大质量部件的高质量生产。

关键词: 机械手; 夹持臂; 高负重比; 模块化结构设计; 轻量化设计

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.05.023

中图分类号: TP241.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 05-0179-09

High load ratio pneumatic manipulator gripper arm and its lightweight for forging automation

Xu Yuepeng, Yao Hongliang, Zeng Qi, Li Jing, Tian Xiaoxiao, Li Jiapeng, Jiao Qi'an

(China Academy of Machinery Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem that the heavy weight blanks are difficult to transfer in each process of automatic forging production, the mechanical structure and driving system of the gripper arm for manipulator were designed to achieve the high load ratio. Then, 3D modeling of manipulator equipment was carried out by SolidWorks, and the calculation of related parameters for power source, linear guideway and other mechanisms was realized. Furthermore, the static analysis and structural optimization on the gripper arm were carried out, and the gripping performance of manipulator was verified by the robot load simulation platform. In order to meet the economy of product and the convenience of manufacturing, the gripper arm applied the strategy of modular design, the main body was made of standard I-beam steel, the clamping and fixing ends were fixed by welding modules, and the overall structure was designed to be lightweight. The results show that the weight of the gripper arm for manipulator is 75 kg after lightweight, and when using the KUKA KR210 robot with higher economic benefits, the maximum load is 70 kg. The load ratio of the gripper arm reaches 1:1.1, which meets the design requirements. Thus, its high load ratio is beneficial to the high-quality production of heavy weight components.

Key words: manipulator; gripper arm; high load ratio; modular structure design; lightweight design

随着工业进程的发展, 机器人在自动化锻造生产线中发挥了重要的作用, 并且锻造工艺较之前也发生了变化, 锻造工件的搬运难以通过人工来完成^[1-3]。机器人搭配机械手可以很好地替代传统工件转运形式, 其抓取方便, 运行平稳、高效, 并且可以满足多种场合的使用需求。目前, 就一条自动化锻造生产线而言, 往往需要多台机械人和压力机

等进行配合工作^[4-5], 而其中的机械手夹持臂需要根据工厂实际情况和不同锻件进行设计研发, 要求具有高结构强度的同时, 也具有一定的经济性和加工的便利性。因此, 机械手夹持臂在锻造生产线中有着举足轻重的作用。

机械手夹持臂按照动力源的不同可分为气动机械手和液压机械手。液压驱动虽然可以输出较大的力, 但其本身结构重量大, 而且需要搭配液压站以及液压阀等, 造价高昂且灵活性差; 相反, 气动机械手响应快速, 灵活轻巧, 更适合需求量大的锻造生产线^[6-9]。机械手夹持臂由机械结构、驱动系统

收稿日期: 2023-10-26; 修订日期: 2024-01-22

作者简介: 徐悦鹏 (1997-), 男, 硕士, 助理工程师

E-mail: 1379043016@qq.com

和控制系统组成^[10]，主要完成对工件的夹取、平移等任务。在锻造机械手结构的研究中，文献[11]设计了一种具有多种抓取模式的抓手来抓取各种板材零件，抓手的新颖之处为：应用杠杆原理的传动机构实现了由较小输出力到较大夹取力的传递。文献[12]基于螺杆理论研究了锻造机械手的结构，并获得了几种配置。文献[13]依据螺杆机构设计出一款新型全方位弯曲夹持器，适合应用于自由度较多的机械臂，在窄小的空间里可以自由地进行操作，不足之处是具有大量传动的齿轮机构，其摩擦损耗是不可忽视的问题。本文将以气缸为驱动源，以高负重比为目标对机械臂进行结构布局 and 整体设计。

负重比作为评价机器人性能好坏的关键性能指标，体现了工业机器人设计的合理性^[14]。在现有自动化生产线中，机器人往往是通过外购等方式获得，其性能指标也相对固定。在此，将负重比概念引入到机械手中，在相等夹持力的条件下，质量更轻、结构稳定、制造便利的机械手能够适应目前广泛的需求^[15-16]。

以机械手夹持臂的高负重比设计为目标，对其

机械结构进行设计，通过 SolidWorks 对其部件进行三维建模和结构优化，并对优化结果进行静力学分析，通过观察变形等确定结构方案的可靠性和合理性，最终带入到机器人负载模拟软件中进行最终方案的验证。通过上述流程设计出一款结构简易、便于加工且具有高负重比的机械手夹持臂。

1 系统关键部件设计计算

1.1 夹持臂工作原理

本文设计的机械手夹持臂如图 1 所示，夹持臂主要部件由传动部分、安装法兰、夹持臂 3 大部分组成。其中夹持臂前端装备可替换的卡钳，以应对不同形状的工件，传动部分主要由气缸推动左夹持臂后端的法兰，用于驱动齿轮齿条带动右夹持臂的水平运动，夹持臂之间的开口张度可根据工件夹持面的大小对气缸伸出长度进行调整，具体行程可根据左端的磁感应测距仪进行观察。同时夹持臂前端的夹钳通过中间的销轴进行连接，可实现夹钳在水平范围内小幅度转动，以适应不同夹持平面的角度调整，提高夹持的稳定性。

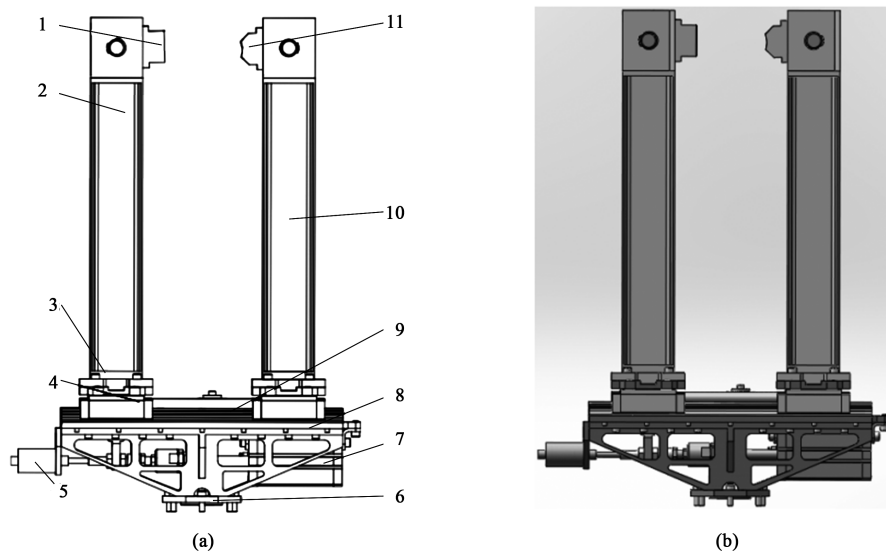


图 1 机械手结构平面图 (a) 和三维图 (b)

1. 左夹钳 2. 左夹持臂 3. 法兰 4. 直线滑轨 5. 磁感应测距仪 6. 连接法兰 7. 气缸 8. 安装背板
9. 直线导轨 10. 右夹持臂 11. 右夹钳

Fig. 1 2D (a) and 3D (b) diagrams of manipulator structure

在图 1 所示的结构中，夹持臂沿着直线导轨水平运动，在工件转运过程中，前端质量主要集中在直线滑轨、直线导轨上，气缸并不承受该部分重力，只提供水平方向的输出力，有效提高了气缸的使用寿命。夹持臂、传动机构每个模块相对独立，可替

换性较高，可以适应不同工况，并可应用在不同工序的机器人中，整体适用性较强。

1.2 夹持臂设计要求

本文设计的机械手夹持臂工作流程主要通过夹钳托举、夹取等方式对压力机处理完成后的履带板、

曲轴、辅轮、平衡肘等锻件进行搬运、转移至下一工序,最后复位执行下一次搬运任务,循环往复完成该动作。设计过程中不仅要求机械臂结构可靠、运行稳定,同时还要考虑制造的便利性,能够适应大部分自动化生产线机器人的使用要求。

对于性能方面,要求气缸行程为 125 mm, 0.4 MPa 气压下夹紧力保持在 2 kN 左右。同时,该机械臂在托举状态下最大负载能够达到 700 N,夹持中心至法兰安装平面的垂直距离为 650 mm,在满载情况下,整体结构质量最少要能够满足 KUKA KR210 机器人。因此,在保证机械臂能够实现功能并且各个零件受力合理性的条件下,对其结构进行轻量化设计,以提升机械臂的负重比。

1.3 关键部件的方案设计

1.3.1 气缸夹持力分析

根据机械臂整体使用环境和设计要求,选择 Festo 系列带活塞的气缸,同时为了减小安装体积,选择紧凑型气缸,其技术参数如表 1 所示。

表 1 气缸的参数

Table 1 Parameters of cylinder

参数	数值
行程/mm	125
活塞直径/mm	Φ80
0.6 MPa 理论力-缩回/N	2827
0.6 MPa 理论力-推出/N	3016

由表 1 可知,该气缸在 0.6 MPa 气压下的理论推力为 2827 N 到 3016 N。目前,已知生产线气源气压为 0.4 MPa,通过换算可知,该气缸理论推力为 1894 N 到 2020 N,进而提供的夹紧力为 1930 N 到 2060 N,满足设计要求。

在该机械臂中,对其传动机构进行简化,如图 2 所示。在图 2 所示结构中,由气缸提供水平方向的推力,通过中间的齿轮和两侧齿条将力传递到右侧夹持臂,因此在此过程中,有:

$$F_{q1} = \eta F_q \quad (1)$$

$$F_j = F_q \quad (2)$$

$$F_{j1} = F_{q1} \quad (3)$$

式中: F_q 为气缸输出力; F_{q1} 为通过齿轮传递至齿条的力; F_j 为左夹持臂前端水平力; F_{j1} 为右夹持臂前端水平力; η 为齿轮齿条传递效率。

夹持臂通过夹钳夹取工件过程中,工件表面受力

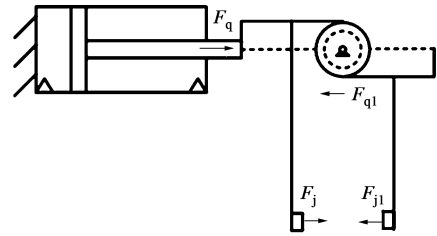


图 2 传动部分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of drive system

如图 3 所示。其中, N 为夹钳作用于工件表面的夹持力, F_l 为夹持力水平分力, F'_N 为夹持力竖直分力, F_f 为作用于工件的表面摩擦力, F'_f 为摩擦力竖直分力, F_{fl} 为摩擦力水平分力, θ 为工件斜面和竖直方向的夹角, G 为工件重力。

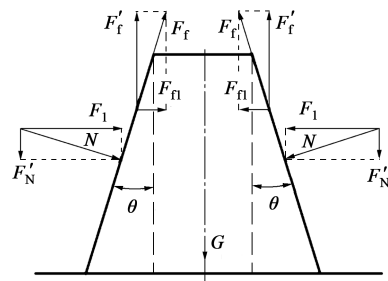


图 3 工件表面受力图

Fig. 3 Stress diagram at surface of workpiece

其中,夹钳提供给工件的夹持力 N 为^[17]:

$$N = \frac{F_{j1}}{K_1 K_2 K_3} \quad (4)$$

式中: K_1 为安全系数; K_2 为动载系数; K_3 为方位系数。

工件单侧表面受到夹钳作用产生的摩擦力为:

$$F_f = \mu N \quad (5)$$

式中: μ 为工件表面摩擦因数。

由图 3 可以看出,工件反馈给夹钳一侧的水平作用力 F'_l 主要由夹持力 N 和摩擦力 F_f 产生,方向与 F_l 相反,其大小为:

$$F'_l = N \cos \theta + F_f \sin \theta \quad (6)$$

工件表面受到的夹钳提供的竖直向上的摩擦力 F'_f 为:

$$F'_f = 2 F_f \cos \theta \quad (7)$$

在竖直方向上,夹钳所受到的合力 $F'_{f合}$ 为:

$$F'_{f合} = 2 N \sin \theta + G \quad (8)$$

该机械手夹持臂在夹取状态下能够提升工件的条件为:

$$F'_{f合} - 2 N \sin \theta \geq G \quad (9)$$

最终,可以得到机械手夹持力和工件质量的关系有:

$$N \geq \frac{G}{2\mu\cos\theta - 2\sin\theta} \quad (10)$$

本节对气缸作用于夹钳端的夹持力进行了计算,在机械手上下料时,对不同工件采用不同的搬运形式:对曲轴、平衡肘等质量较大的工件一般采用托举的形式,夹持臂受到工件反馈的作用力 F'_1 影响较小;对履带板等工件采用夹取的方式,除了受到工件自身重力 G 的作用,还需观察工件反馈的作用力 F'_1 对夹持臂的影响。

1.3.2 直线滑块寿命分析

在机械手夹持臂结构中,另外一个关键部件为直线滑块和直线导轨,承载了包括夹持臂、夹钳、工件、安装法兰等全部质量,因此,其寿命长短影响着机械手的整体性能。

因为所用的 4 个直线滑块对称分布,所以对其单个滑块进行受力分析,如图 4 所示,将单个滑块作用在导轨上的作用面等效为编号为 1~4 的模块,滑块端面主要受到夹持臂、夹钳、工件等负载。

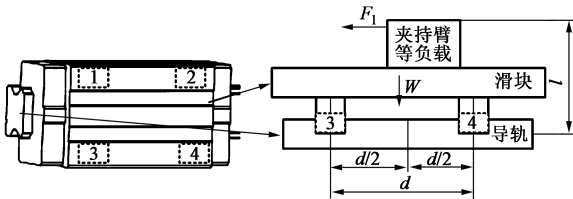


图 4 滑块受力分布图

Fig. 4 Stress distribution diagram of slider block

每个作用面承受的实际工作载荷为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 , 对载荷的计算有:

$$P_1 = P_3 = \frac{W}{4} + \frac{F_1 l}{2d} \quad (11)$$

$$P_2 = P_4 = \frac{W}{4} - \frac{F_1 l}{2d} \quad (12)$$

式中: W 为滑块中心受到的重力; l 为夹钳加持中心至滑块中心的距离; d 为滑块跨距。

滑块所受的预压力 P_c 为:

$$P_c = |P_1 - P_4| \quad (13)$$

滑块寿命 L 为:

$$L = 50 \left(\frac{f_h f_t C}{f_w P_c} \right)^3 \quad (14)$$

式中: f_h 为硬度系数; f_t 为温度系数; f_w 为负荷系

数; C 为基本动额定负荷。

将滑块寿命换算为小时:

$$L_h = \frac{L \times 10^3}{60V_e} \quad (15)$$

式中: V_e 为运行速率。

2 夹持臂结构轻量化设计

2.1 夹持臂结构方案确定

夹持臂是机械手的关键部件,是本次设计的重点,除了要完成工件的转运,还需要从制造生产的便利性和经济性等方面去考虑。为了便于制造,本文所设计的夹持臂采用模块化结构,即夹持臂主体结构和夹钳安装块、夹持臂固定块进行单独考虑,然后通过焊接的方式进行固连。同时,夹持臂主体采用标准工字型钢材进行设计,增加生产便利的同时也能保证夹持臂整体的结构强度,其夹持臂方案如图 5 所示,通过 SolidWorks 中的质量属性,测得该结构质量为 9.8 kg。

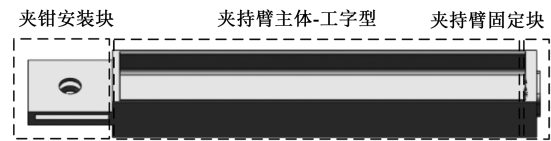


图 5 夹持臂结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of gripper arm structure

夹持臂主体结构截面图如图 6 所示,选用 10 号标准型工字钢,其结构参数如表 2 所示。

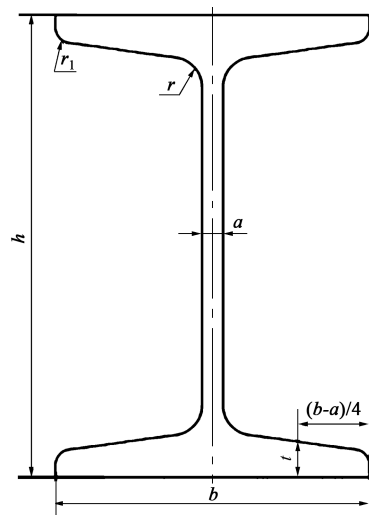


图 6 工字型截面图

Fig. 6 Section diagram of I-beam steel

机械手夹钳结构如图 7 所示,其中夹钳整体结

表 2 工字钢的截面参数 (mm)

Table 2 Section parameters of I-beam steel (mm)

参数	高度 h	宽度 b	厚度 a	高度 t	截面外半径 r_1	截面内半径 r
数值	100	68	4.5	7.6	6.5	3.3

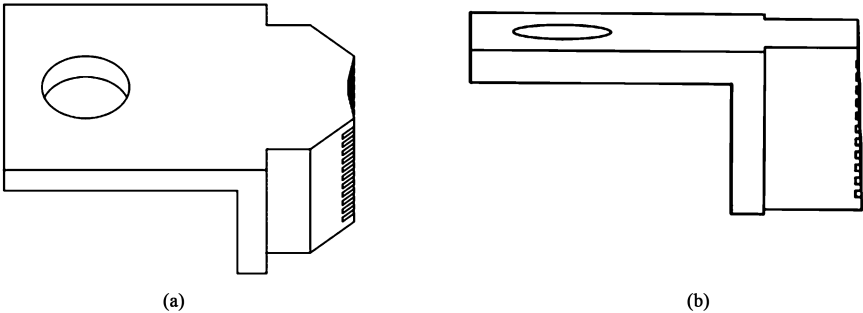


图 7 夹钳结构示意图

(a) 左夹钳 (b) 右夹钳

Fig. 7 Schematic diagrams of clamping structure

(a) Left clamping (b) Right clamping

右夹钳面带有一定的斜度, 以提高工件夹持、转运过程的稳定性。

综上完成了机械手夹持臂整体结构的设计, 虽然选用 10 号标准型工字钢作为主体结构较传统结构质量有所改善, 但为了提高机械手的负重比, 优化整体结构参数, 需要对夹持臂进行进一步的轻量化设计。

2.2 夹持臂轻量化设计

为了更好地对夹持臂进行轻量化设计, 对其进行静力学分析。首先, 将 SolidWorks 中的三维模型导入至仿真软件, 定义夹钳材料为结构钢, 选择自动化网格划分, 调整单元尺寸为 0.05 mm, 得到夹持臂整体划分节点数为 139543, 单元数为 83218。

构由安装固定板和夹持块组成, 装配完成后夹持块后断面和夹持臂有 2 mm 间隙, 夹钳在夹持过程中能够在水平方向小范围旋转, 以便适应不同的夹持表面。左右夹钳设置了不同的槽型, 增加了夹持过程中的摩擦力, 并且为应对托举、夹取的不同情况,

然后对夹持臂施加载荷及约束, 对夹持臂固定块端面施加固定约束, 对夹持臂施加的条件约束如表 3 所示。

表 3 夹持臂条件约束

Table 3 Conditional constraint of gripper arm

工况	工件重力 G/N	夹持臂两侧受力 F_1/N
①	700	—
②	400	1200

最终得到夹持臂的变形云图和应力云图, 结果如图 8 所示。

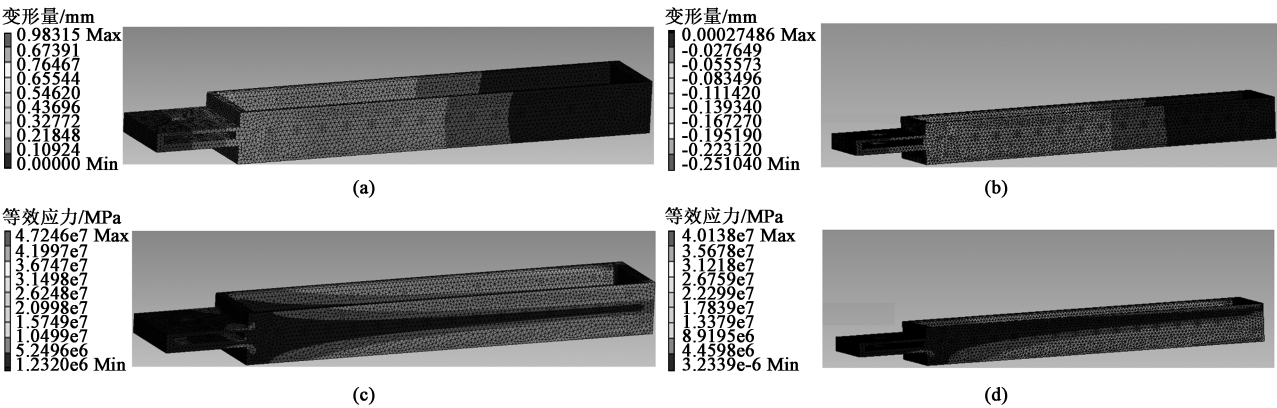


图 8 静力学分析结果

(a) 工况①变形云图 (b) 工况②变形云图 (c) 工况①等效应力云图 (d) 工况②等效应力云图

Fig. 8 Results of static analysis

(a) Deformation nephogram of condition ① (b) Deformation nephogram of condition ② (c) Equivalent stress nephogram of condition ① (d) Equivalent stress nephogram of condition ②

从图 8 可以看出：在工况①下，夹持臂托举 70 kg 工件，整体变形主要发生在夹钳安装块，平均变形量为 0.80 mm，最大变形发生在整个夹持臂的最前端，最大变形有 0.98315 mm，夹持臂等效应力最大值发生在夹持臂固定块和主体连接处的下端，最大值为 47.246 MPa；在工况②下，夹持臂夹取 40 kg 工件，因为其整体变形要小于图 8a 中的变形值，所以选取夹持臂水平方向变形进行分析，通过图 8b 发现其相对变形量为 0.25 mm，夹持臂等效应力最大值分布规律和工况①下相似，但其最大值略有减小，为 40.138 MPa，整体结构应力分布较均匀，未出现突变和应力集中的情况，靠近作用力附近应力值较小。因此，可以进一步对夹持臂结构进行优化设计。

为了更好地对夹持臂进行轻量化设计，对其进行拓扑优化分析。优化区域为夹持臂整体结构，以最小柔度为优化目标，以结构质量为相应约束，分别设置保存 30% 和 50% 质量模型，得到的结果如图 9 所示。

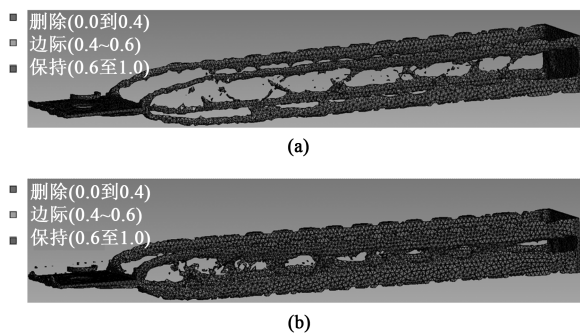


图 9 拓扑优化结果

(a) 质量保留 30% (b) 质量保留 50%

Fig. 9 Results of topology optimization

(a) Quality retention 30% (b) Quality retention 50%

通过图 9 可以看出，在上述仿真工况下，由于力的作用面主要在夹钳安装块和夹持臂固定块，工

字型钢体本身所受的变形、应力等较小，存在一定的优化空间。通过保留不同的质量可以看出，拓扑优化的主要目标为夹持臂主体的中部横梁和两端的侧面，保留工字型主体框架的同时，对其中间区域进行一定的减材减重。

根据拓扑优化结构，在 SolidWorks 中对夹持臂结构进行优化，同时考虑经济性和加工便利性，采用钻孔的方向进行减材，并对安装块变形较大的区域进行加强，轻量化后的夹持臂结构如图 10 所示。

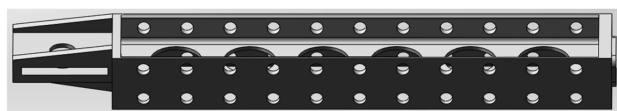


图 10 夹持臂轻量化后结构

Fig. 10 Structure of gripper arm after lightweight

通过图 10 可以看到，对夹持臂主体影响较小的区域进行钻孔减重，这种形式不仅便于加工，钻孔过程中还会减小结构整体的加工变形，并且对夹钳安装块的上下焊接筋板，减小了受力垂直方向的变形。优化后整体结构质量为 8.05 kg，质量较优化前减重 17.8%。

对优化后的模型进行静力学分析，结果如图 11 所示。从图 11 中可以发现，在工况①、②下，夹持臂变形规律未改变，等效应力分布得到优化。在工况①下，最大变形发生在最前端，为 1.4394 mm，力的作用面平均变形为 1.2 mm，并且通过对夹持臂主体的减重，改善了应力分布情况，最大等效应力为 138.26 MPa。在工况②下，夹持臂水平方向相对变形量为 0.39 mm，夹持臂整体情况满足机械手使用要求。对机械手整体结构进行减重，保留必要的部分，并对其整体布局进行优化，得到的机械手整体结构如图 12 所示，对安装背板、法兰等结构进行了

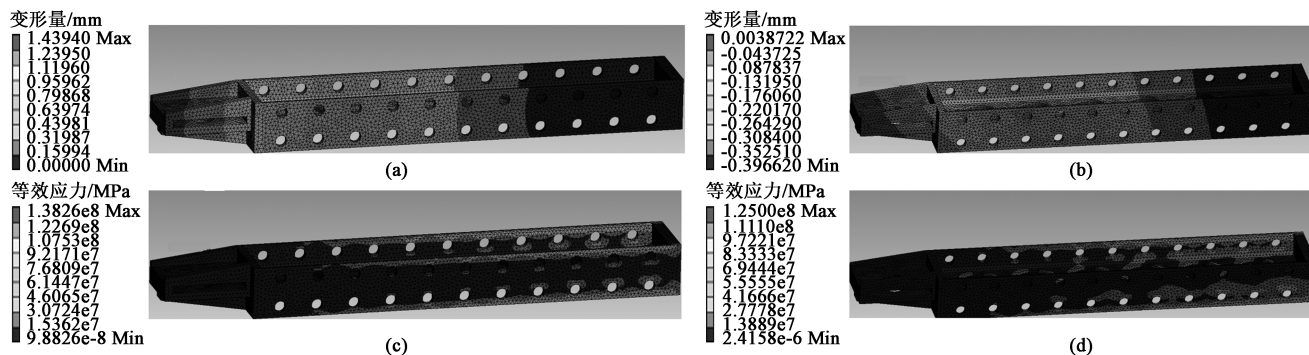


图 11 优化后静力学分析结果

(a) 工况①变形云图 (b) 工况②变形云图 (c) 工况①等效应力云图 (d) 工况②等效应力云图

Fig. 11 Optimized results of static analysis

(a) Deformation nephogram of condition ① (b) Deformation nephogram of condition ② (c) Equivalent stress nephogram of condition ① (d) Equivalent stress nephogram of condition ②

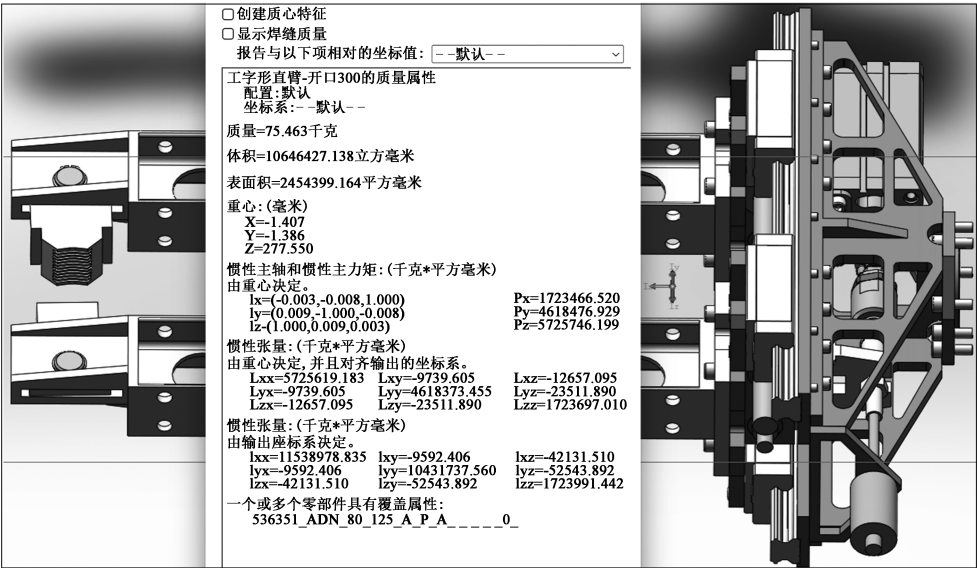


图 12 机械手结构示意图

Fig. 12 Schematic diagram of manipulator structure

轻量化设计, 装配后整体质量为 75.5 kg。

3 机器人负载模拟

通过上述分析和仿真, 确定了夹持臂和机械手的结构模型, 由此确定了机械手的质量、中心以及惯性张量等参数, 为了更好地验证机械手的工程实

际情况, 将其参数代入至 KUKALoad 模拟平台进行验证。

KUKALoad 可以在分析时输入客户的专用负载数据, 包括质量、质量重心和惯性, 用户可以查看负载图或静态和动态负载评估图, 以便检查机器人是否超载, 同时还可以查看法兰和各个轴的详细负载分析, 其界面如图 13 所示。

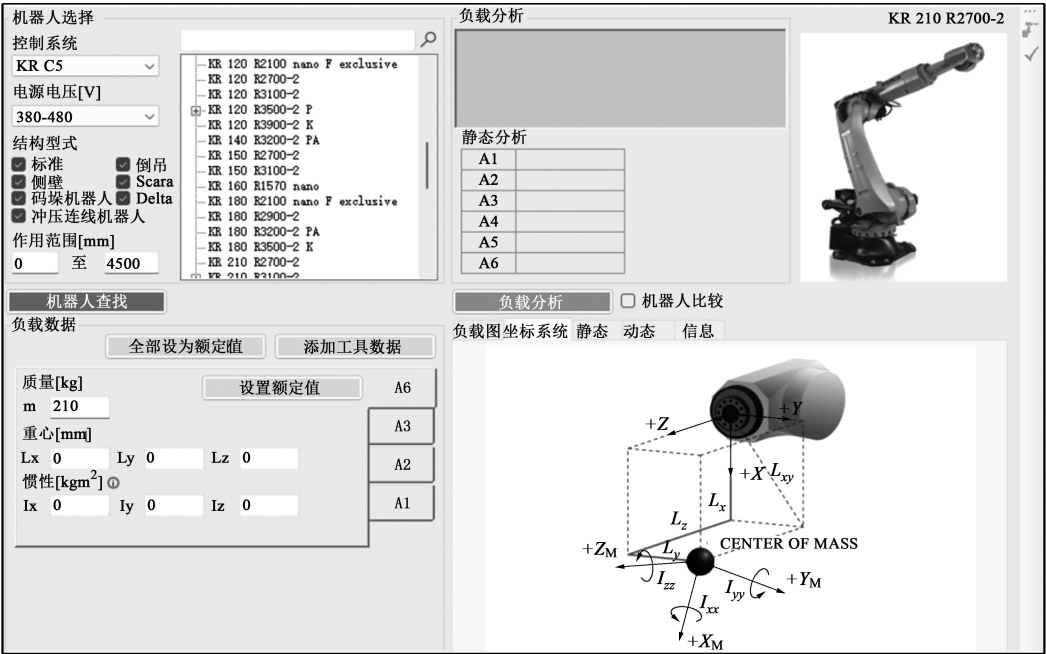


图 13 KUKALoad 模拟平台

Fig. 13 Simulation platform of KUKALoad

如图 13 所示, 选择 KR210 机器人, 并将工件加载至图 12, 调整好夹持位置后, 得到模型质量为

145.9 kg, 其中工件质量为 70.4 kg, 调整机械手安装法兰质心为 (0, 0, 0), 得到机械手整体结构重

心为 (30.95, -2.96, 560.89), 将上述参数和惯性张量共同输入到 A6 轴的相关参数中。

将图 12 中的质心坐标系输入至软件中得到的机器人模拟负载如图 14 所示。从图 14 中可以看到, 在选择 KR210 机器人情况下, 机械手的最大负载能达到 70 kg, 可以应对工件搬运过程中的最大质量, 此时机械手的负重比为 1:1.07。

机器人 A1~A6 轴的动态表现如图 15 所示。从图 15 中可以看到, 机械手在最大负载 70 kg 时, A3 轴的负荷率最小, 在 40% 左右, 承载较大的 A1 轴的负荷率在 60% 左右, 机器人可以保持相对安全的工况进行工作, 机械手安装端的 A6 轴的负荷率

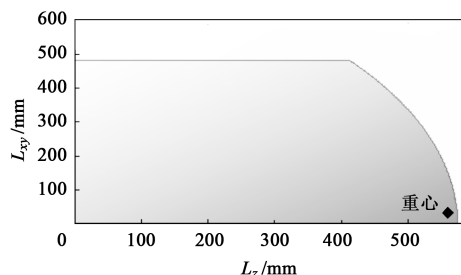


图 14 KUKALoad 负载图

Fig. 14 Load diagram of KUKALoad

接近 55%, 并且各个轴在运行过程中未出现超载的情况, 各轴均能达到最大运行速度。

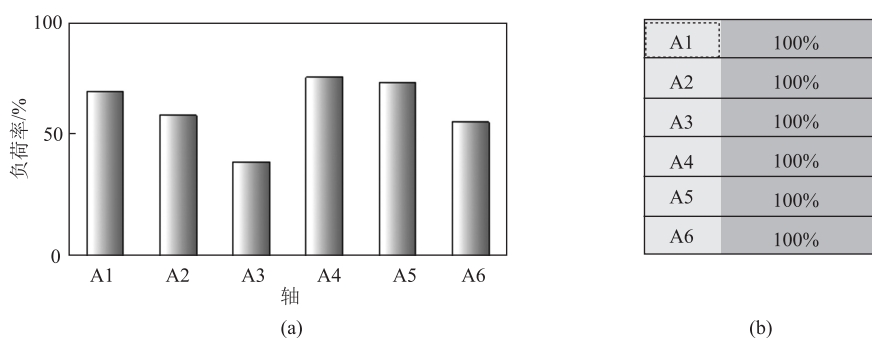


图 15 机器人各轴动态表现

(a) 各轴的负荷率 (b) 最大轴速度显示图

Fig. 15 Dynamic performance of each axis for robot

(a) Load rate of each shaft (b) Display diagram of maximum shaft velocity

综上所述, 本文所提出的机械手夹持臂通过对关键部件的轻量化设计后, 整体质量为 75.5 kg, 负重比满足 1:1.1, 并且在最大负载情况下, 机械手平均变形量为 0.7 mm, 最大变形在可允许范围内, 不影响其正常使用, 机械手夹持臂最大开口为 300 mm, 整体结构简单, 模块化设计便于生产制造, 并可以适配不同形式的卡钳结构。

4 结论

(1) 对锻造自动化用机械手进行了结构设计, 通过气缸驱动、导轨承重、齿轮传动的形式, 将机械手各部分进行模块化设计, 改善了传统机械手气缸易磨损的问题, 提高了机械手结构的可靠性。

(2) 通过参数计算、结构建模和仿真分析, 对机械手夹持臂进行了优化设计, 轻量化后夹持臂结构质量为 8.05 kg, 较优化前减重 17.8%, 并基于模块化设计基础上, 轻量化后机械手整体质量为

75.5 kg, 整体结构满足最大托举 700 N 和夹取 400 N 的使用要求。

(3) 机械手在锻造自动化产线中应用广泛, 本文设计的机械手通过机器人负载模拟平台进行验证, 轻量化后的机械手夹持臂的负重比达到 1:1.1, 夹持臂最大开口为 300 mm, 整体结构简单, 便于生产制造, 有效节约能源的同时提高了锻造自动化生产线的生产效率。

参考文献:

- [1] 史延辰, 岳海军, 韩薇, 等. 连杆自动化锻造生产线工艺设计 [J]. 锻造与冲压, 2023, (1): 70-73.
Shi Y C, Yue H J, Han W, et al. Process design of automatic forging production line for connecting rod [J]. Forging & Metal-forming, 2023, (1): 70-73.
- [2] 李磊, 直银苹. 产业智能化助力锻造产业链韧性的机理与对策 [J]. 开放导报, 2023, (2): 69-78.
Li L, Zhi Y P. The mechanism and countermeasures of industrial intelligence to help forging industry chain resilience [J]. China Opening Journal, 2023, (2): 69-78.
- [3] 金魏, 辛洪兵. 汽车前轴精锻成形自动锻锻机组搬运机器人

- 的新设计 [J]. 北京工商大学学报: 自然科学版, 2004, (5): 23-26.
- Jin W, Xin H B. New design of handling robot for auto front axle precision roll forming automatic roll forging unit [J]. Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2004, (5): 23-26.
- [4] 张南, 刘庆生, 曾琦, 等. 基于热模锻压力机曲轴锻造自动化生产线的时序设计与优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (1): 140-145.
- Zhang N, Liu Q S, Zeng Q, et al. Time sequence design and optimization on automatic production line for crankshaft forging based on hot die forging press [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (1): 140-145.
- [5] 赵兵, 杨龙成, 王传英, 等. 机器人冲压生产线节拍仿真评估研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57 (6): 15-19.
- Zhao B, Yang L C, Wang C Y, et al. Research on beat simulation evaluation of robot stamping production line [J]. China Metal-forming Equipment & Manufacturing Technology, 2022, 57 (6): 15-19.
- [6] 叶增林, 张良安, 吴守鹏, 等. 机器人液压机械臂运动性能分析与控制 [J]. 工程科学与技术, 2023, (10): 1-10.
- Ye Z L, Zhang L A, Wu S P, et al. Motion performance analysis and control of robotic hydraulic manipulator arm [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, (10): 1-10.
- [7] 杨柳松, 王富勇, 郝兵, 等. 液压重载机械臂关节结构优化研究 [J]. 矿山机械, 2023, 51 (7): 63-68.
- Yang L S, Wang F Y, Hao B, et al. Research on joint structure optimization of hydraulic heavy-duty manipulator [J]. Mining & Processing Equipment, 2023, 51 (7): 63-68.
- [8] 林华钊. 一种新型气动肌肉执行器的结构设计与控制研究 [J]. 机电工程, 2023, 40 (7): 1079-1085.
- Lin H Z. Structure design and control of a new pneumatic muscle actuator [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40 (7): 1079-1085.
- [9] 徐俊妍, 高广洋, 王海涛. 并联波纹管式气动柔性机械臂的动力学分析 [J]. 液压与气动, 2023, 47 (8): 173-181.
- Xu J Y, Gao G Y, Wang H T. Dynamic analysis of parallel bellows flexible pneumatic manipulator [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47 (8): 173-181.
- [10] 张泰源, 张继忠, 崔向贵, 等. 专用锻造机械臂轻量化设计及仿真分析 [J]. 青岛大学学报: 工程技术版, 2021, 36 (3): 6-11, 21.
- Zhang T Y, Zhang J Z, Cui X G, et al. Lightweight design and simulation analysis of special forging manipulator [J]. Journal of Qingdao University: Engineering & Technology Edition, 2021, 36 (3): 6-11, 21.
- [11] Zhao C, Wan X J, Zhou Z. Modeling and experimental design of a generalized gripper [J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 181: 105205.
- [12] 张志豪, 蒋东霖. 轮胎自动装配机械手结构设计 [J]. 长春师范大学学报, 2021, 40 (2): 187-191.
- Zhang Z H, Jiang D L. Structure design of automatic tire assembly manipulator [J]. Journal of Changchun Normal University, 2021, 40 (2): 187-191.
- [13] Zhang B Y, Liao Z X, Yang P H, et al. Robotic visible forceps manipulator with a novel linkage bending mechanism [J]. Journal of Mechanisms Robotics, 2019, 11 (1): 011012.
- [14] 庄红超. 电驱动大负重比六足机器人结构设计及其移动特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Zhuang H C. Electrically Driven Large-load-ratio Six-legged Robot Structural Design and Its Mobile Characteristics Research [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [15] 艾婷, 张永波, 饶爽, 等. 机械臂轻质高载荷比末端夹持器的设计 [J]. 机械研究与应用, 2019, 32 (1): 105-107.
- Ai T, Zhang Y B, Rao S, et al. Design of the end gripper of manipulator with light weight and high load ratio [J]. Mechanical Research & Application, 2019, 32 (1): 105-107.
- [16] 罗刚, 谢良喜, 加闯, 等. 液压机械臂的摆缸关节结构参数优化 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (13): 64-69.
- Luo G, Xie L X, Jia C, et al. Parameters optimization of RAV of joint structure on hydraulic manipulator [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47 (13): 64-69.
- [17] 李向阳, 杨桂茂, 安永辰. 夹钳式手部力分析及实验研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1985, (A6): 6-19.
- Li X Y, Yang G M, An Y C. Force analysis and experiment of gripper [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1985, (A6): 6-19.

请关注更加新颖的公众号

www.qctester.com

