

## 基于 SolidWorks 的近恒力夹持装置结构设计

王小亮<sup>1</sup>, 刘艳妍<sup>1</sup>, 杨晓波<sup>1</sup>, 何琪功<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 分析了目前夹持装置的夹持需求, 重点介绍了近恒力夹持装置的基本原理和结构特点, 分析了机构中存在的问题和需要解决的难点, 提出了一种基于 SolidWorks 中智能尺寸约束的近恒力输出夹持机构设计方法, 通过在该软件中设置相应的夹持机构的结构尺寸与几何约束条件, 使得机构的每个部分的尺寸都可以自动计算和调整, 并介绍了设计过程中的核心技术与操作方法, 实现了对近恒力夹持机构的结构设计。为了验证该装置的性能和实用性, 通过实例对夹持装置钳口输出夹持力进行了分析和评估, 结果表明, 对该机构提出的设计方法简易快捷, 具有一定的实用价值。

**关键词:** 锻造操作机; 夹持装置; 近恒力输出; 传力比; 夹持力

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.05.021

**中图分类号:** TG315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 05-0166-05

## Structure design on approximate constant force clamping device based on SolidWorks

Wang Xiaoliang<sup>1</sup>, Liu Yanyan<sup>1</sup>, Yang Xiaobo<sup>1</sup>, He Qigong<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiao Tong University, Lanzhou 730070, China;

2. Lanzhou LS Energy Equipment Engineering Research Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The current clamping requirements of clamping device were analyzed, and the basic principle and structural characteristics of approximate constant force clamping device were emphasized. Then, the problems existing in the mechanism and the difficulties to be solved were analyzed, and a design method of approximate constant force clamping mechanism based on intelligent size constraints in SolidWorks was proposed. Furthermore, by setting the corresponding structure sizes and geometric constraints of clamping mechanism in SolidWorks, the size of each part of the mechanism was automatically calculated and adjusted, and the key technologies and working methods in the design process were introduced to realize the structural design of the approximate constant force clamping mechanism. In order to verify the performance and practicability of the device, the output clamping force of jaw for the clamping device was analyzed and evaluated by examples. The results show that the design method proposed is simple and fast, providing certain practical value.

**Key words:** forging manipulator; clamping device; approximate constant force output; transmission ratio; clamping force

大型铸锻件作为我国重大装备制造业的核心要素, 在国家经济和国防事业的发展中发挥着关键作用<sup>[1]</sup>。锻造操作机作为快锻液压机组中锻造工艺环节重要的辅助设备, 本质上是一种能够在恶劣工况下正常运行的特种机器人, 其研发水平是评估技术创新和先进制造业水平的重要尺度之一<sup>[2]</sup>。典型锻

造操作机因吊挂系统的差异分为 DDS 型平行连杆式和 SMS 型摆杆式锻造操作机, 但操作机夹持装置的结构及原理均相同。夹持装置如图 2 所示, 其主要功能为夹紧锻件与旋转锻件, 可以配合锻造操作机吊挂系统完成锻件的进给、升降与平移。夹持装置作为锻造操作机的执行元件, 是设计锻压辅助设备的核心与难点, 也是特种机器人研究重点关注的对象<sup>[3]</sup>。由于轴类锻件为锻造工艺的主要产品, 在此模型基础上设计的操作机夹持装置对于夹持轴类锻件能够达到预期目标, 对于饼类锻件则只能发挥约 50% 的夹持性能。伴随着制造业趋工业化方向发展, 饼类锻件在锻件需求的占比日渐增长, 夹持装置应在对轴类锻件稳定夹持的基础上, 充分发挥夹持饼类锻件的能力。

**收稿日期:** 2023-09-21; **修订日期:** 2023-12-19

**基金项目:** 甘肃省科技专员专项 (22CX8GA063); 高性能复杂制造国家重点实验室资助项目 (Kfkt2002-02); 甘肃省科技计划资助 (23JRRA859); 国家自然科学基金资助项目 (52305369)

**作者简介:** 王小亮 (1998-), 男, 硕士研究生

**E-mail:** 1224685257@qq.com

**通信作者:** 刘艳妍 (1964-), 女, 学士, 教授

**E-mail:** liuyy@mail.lzjtu.cn

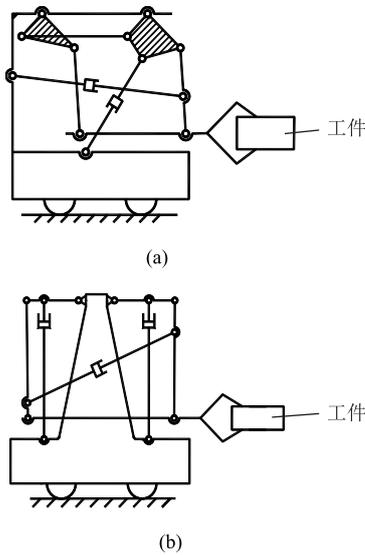


图 1 锻造操作机结构简图

(a) DDS 型锻造操作机 (b) SMS 型锻造操作机

Fig.1 Schematic diagrams of forging manipulator structure

(a) DDS type forging manipulator (b) SMS type forging manipulator

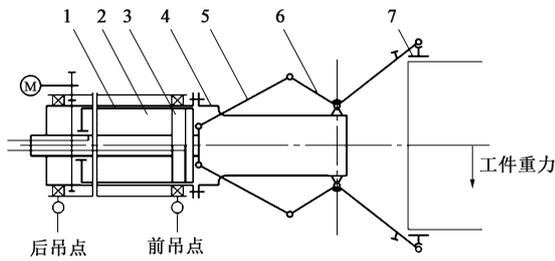


图 2 夹持装置结构图

1. 钳杆 2. 缸体 3. 活塞 4. 钳壳 5. 连杆 6. 钳臂 7. 钳口

Fig.2 Structure diagram of clamping device

目前，夹持装置的研究成果重点集中在钳口对工件的夹持力和夹持稳定性方面。文献 [4] 通过对工业搬运机器人的分析，利用 ADAMS 虚拟样机技术，使搬运机构与仿真结果完成了有机结合，提高了设计质量与效率；文献 [5] 针对工业夹持器的特点，对不同驱动条件下夹持器与工件的接触条件与接触点刚度之间的交互关系进行分析，得出夹持力极限值与工件质量之间的关系，为夹持器的参数设计提供了理论依据；文献 [6] 针对夹持机构因夹持不同尺寸的大型工件而存在夹持力波动的问题，以近恒力输出夹持力和夹持力输出最大为目标分别建立了优化数学模型，提出了利用循环程序与 Matlab 软件相结合的优化方法；文献 [7] 以 150 kN 操作机为研究对象，考虑传动角和结构设计等约束条件，通过遗传算法对夹持机构进行优化设计，实现了夹持机构更优的力传递效率；文献 [8]

结合装出料机的应用工况，对无轨式装出料机钳杆部件中钳臂的受力状态进行分析并根据计算结果对钳臂结构进行改进，通过有限元计算验证其思路的可行性；文献 [9] 通过分析操作机夹持机构的典型工况，以钳口处于两个极限位置时输出夹持力相同为前提，结合夹持机构的关键结构参数，利用解析几何法建立了机构的平面坐标系，并根据机构自身结构特点确定夹持机构的方程。

通过对上述文献的研究可以看出，针对操作机夹持装置的机构研究存在不足。为充分发挥锻造操作机夹持装置的夹持能力，在夹持机构结构特点的基础上，通过分析夹持机构的工作原理，完善近恒力输出夹持机构的设计思路，利用 SolidWorks 软件的功能设计一种能够输出夹持力近似恒定的夹持机构设计方法。

### 1 近恒力输出的夹持机构分析

以夹紧油缸输出力恒定为前提，对钳口夹持不同类型的锻件时输出的夹持力进行分析，结果表明：在允许夹持锻件直径的范围内，当轴类锻件质量和夹持力矩均不变时，锻件被夹持端的直径越大，钳口输出夹持力越小，即钳口输出夹持力与锻件直径成反比；对于饼环类锻件来说，因本身直径较大，当钳口销轴到中心线距离  $H$  最大时，夹持机构输出的夹持力也不能太小<sup>[10]</sup>。因此，在确定夹紧油缸的前提下，若能实现夹持装置输出夹持力近似恒定，则可以满足轴类锻件的夹持需求，也能满足夹持机构对饼环类锻件的夹持稳定性。

锻造操作机夹持装置的夹持机构如图 3 所示，夹紧缸通过铰接方式在点  $A$  与连杆  $AB$  相接，夹紧缸输出水平推力  $F_c$ ，沿连杆  $AB$  方向分力  $F_1$  传递至钳臂  $BOE$ ，再由钳臂  $BOE$  绕钳壳支点  $O$  转动传递至钳口，钳口下压将锻件夹紧形成垂直方向夹持力  $F_j$ 。其中， $OD$  为连杆延长线至钳臂支点的垂直距离； $OF$  为钳臂支点到钳口销轴的水平距离； $OB$  为连杆销轴中心到钳臂支点的距离，也称为钳臂短臂； $OE$  为钳臂与钳口连接销轴中心到钳臂支点的距离，也称为钳臂长臂； $OC$  为钳臂支点至连杆延长线的垂直距离； $H$  为钳口销轴至中心线的距离； $\beta$  为连杆  $AB$  与水平线夹角。

钳口输出夹持力  $F_j$  与夹紧缸输出力  $F_c$  之间的比值称为传力比  $i$ ，即：

$$i = \frac{F_j}{F_c} \quad (1)$$

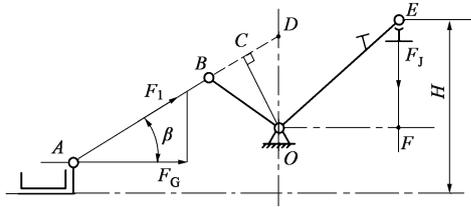


图 3 夹持机构传力比分析

Fig. 3 Analysis on force transmission ratio of clamping mechanism

根据图 2 对夹持机构进行受力分析,  $O$  点的力矩平衡方程为:

$$F_1 \times OC = \frac{F_J}{2} \times OF \quad (2)$$

而:

$$\frac{F_C}{2} = F_1 \cos \beta \quad (3)$$

所以, 传力比为:

$$i = \frac{F_J}{F_C} = \frac{OC}{OF} \times \frac{1}{\cos \beta} = \frac{OD}{OF} \quad (4)$$

如图 4 所示, 在允许夹持锻件直径的范围内, 钳口销轴至中心线的距离  $H$  由被夹持锻件直径  $D$  决定, 存在最大销轴中心距  $H_{\max}$  和最小销轴中心距  $H_{\min}$  两个极限位置<sup>[11]</sup>。当钳口销轴中心距  $H$  变化时, 随着  $H$  的减小, 传力比  $i$  增大, 反之传力比  $i$  减小, 说明夹持机构的传力比  $i$  是在不断变化的。为满足夹持装置的夹持需求, 一般情况下夹紧油缸输出的夹紧力  $F_C$  恒定, 若想保证钳口输出夹持力  $F_J$  恒定, 需保证传力比  $i$  恒定。因此, 在操作机允许夹持锻件直径范围内, 如果能使夹持机构处于两极限位置即  $H_{\max}$  和  $H_{\min}$  时的传力比  $i$  相同, 就能保证夹持机构输出夹持力近似恒定。图 4 中,  $S_1$  为钳壳与连杆销轴孔距水平线高度,  $S_2$  为钳臂支点距水平线高度;  $H_{\max}$  和  $H_{\min}$  分别为钳口销轴孔距中心线的最大、最小距离;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为连杆与中心线夹角;  $\alpha$  为钳臂长短臂夹角;  $\varphi$  为钳臂短臂与垂直中心线夹角;  $\theta$  为钳臂转动角度;  $L$  为夹紧缸销轴至钳臂支点的水平距离;  $L_1$  为连杆长度;  $L_2$  为钳臂短臂长度;  $L_3$  为钳臂长臂长度;  $L_4$ 、 $L_5$  为连杆延长线与垂直中心线的交点至钳臂支点的垂直距离;  $L_6$  为夹持钳口销轴中心距最大时, 钳臂长臂  $L_3$  的水平投影。

根据恒力输出夹持机构极限位置时传力比相等这一条件对近恒力夹持机构进行结构分析。通过分析各杆长度关系, 利用解析法联立方程组, 求解得出连杆长度  $L_1$ , 钳臂短臂长度  $L_2$  和钳臂长短臂夹角

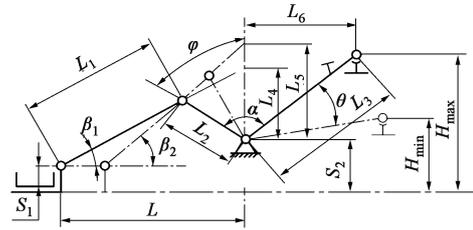


图 4 夹持机构结构简图

Fig. 4 Schematic diagram of clamping mechanism structure

$\alpha$ , 并通过实例验证其思路的可行性<sup>[12]</sup>。但是, 解析法求解夹持机构的未知参数需利用 Matlab 软件来辅助计算, 这种方法繁琐且周期较长, 无法突出夹持机构结构参数之间的几何关系。而在确定相关参数的基础上, 利用 SolidWorks 软件的部分功能进行几何画图方法也能设计出近恒力夹持机构, 且几何法比较简单直观, 适合实际设计应用。

## 2 几何法确定近恒力夹持机构

SolidWorks 软件是世界上第 1 个基于 Windows 开发的三维 CAD 系统, 由于技术创新符合 CAD 技术的发展潮流和趋势而被诸多行业所推广。在 SolidWorks 软件的“草图绘制”界面中输入已知参数并对机构间各杆长度进行几何条件约束, 使得机构的每个部分的尺寸均可以自动计算和调整, 利用“智能尺寸”功能定义待求解的关键参数, 此时草图界面的状态为完全定义, 整个夹持机构的结构参数均可以通过测量方式获取。

针对 300 kN 锻造操作机夹持装置, 根据文献 [12] 中夹持机构关键参数的确定方法计算钳臂长臂  $L_3$ 、钳壳与连杆销轴孔距水平线高度  $S_1$ 、钳臂支点距水平线高度  $S_2$ , 钳口销轴孔距中心线的极限距离  $H_{\max}$  和  $H_{\min}$ , 如表 1 所示。

表 1 夹持机构关键设计参数 (mm)

Table 1 Key design parameters for clamping mechanism (mm)

参数	$L_3$	$S_1$	$S_2$	$H_{\max}$	$H_{\min}$
数值	910	180	350	887	556

首先, 以高度  $S_2 = 350$  mm 的钳臂支点  $O$  为原点, 画出两条长度为  $L_3$  的线段, 分别使线段端点  $E$ 、 $E'$  距中心水平线的高度为  $H_{\max}$  和  $H_{\min}$ , 此时  $OE$  和  $OE'$  分别代表钳臂长臂  $L_3$  在极限位置时的姿态, 据此作图, 可通过智能尺寸测量出钳臂长臂  $L_3$  在极限位置转过的角度  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\theta = 23.08^\circ$ , 如图 5 所示。

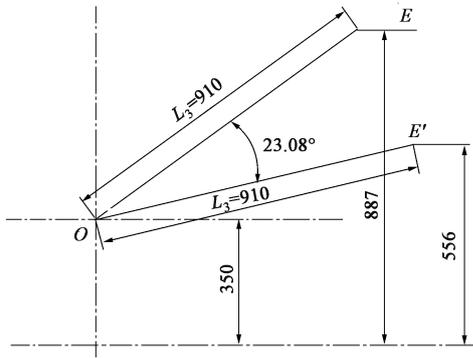


图 5 智能尺寸求解转动角度  $\Delta\theta$

Fig. 5 Intelligent size to solve rotation angle  $\Delta\theta$

以恒力夹持机构在极限位置  $H_{\max}$  和  $H_{\min}$  时传力比相同，取传力比  $i=0.7$ ，可根据传力比分别计算出极限位置时连杆延长线到钳臂支点的垂直距离  $L_4$  和  $L_5$ <sup>[13]</sup>，并分别交中心线为  $C$  点和  $D$  点，如图 6 所示：

$$L_4 = i\sqrt{L_3^2 - (H_{\max} - S_2)^2} = 514 \text{ mm} \quad (5)$$

$$L_5 = i\sqrt{L_3^2 - (H_{\min} - S_2)^2} = 620 \text{ mm} \quad (6)$$

在高度  $S_1=180 \text{ mm}$  的水平线上任取两点  $A$  点和  $A'$  点，使其分别连于  $C$  点和  $D$  点，结合夹持机构夹紧锻件的运动趋势，需保证  $A'$  点在  $A$  点右侧。从钳臂支点  $O$  点出发，任意做两条直线并与  $AC$  和  $A'D$  分别相交于  $B$  点和  $B'$  点，将  $BC$  和  $B'D$  线段改为虚线，即连杆的延长线， $AB$  与  $AC$ 、 $A'B'$  与  $B'D$  约束为共线关系。此时草图还未完全定义，需要对连杆与短臂施加约束条件，见图 6。

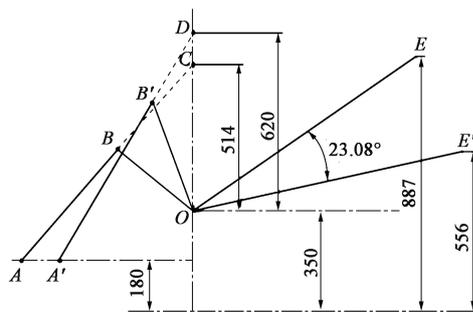


图 6 绘制连杆与钳臂短臂

Fig. 6 Drawing connecting rod and short arm of clamp arm

约束连杆与中心线夹角  $\beta_1=30^\circ$ ，利用几何约束连杆  $AC$  和  $A'D$  的长度相等，限制钳臂短臂  $OB$  和  $OB'$  长度相等，最后利用智能尺寸限制钳臂的短臂旋转角度为  $\Delta\theta=23.08^\circ$ 、连杆  $AB$  与水平线夹角  $\beta_1=30^\circ$ 。此时整个夹持机构已完全定义，说明处于极限位置的两个夹持机构已完全约束。利用智能尺寸功能即可测量出连杆  $AB$  长度  $L_1$ ，钳臂短臂  $OB$  长

度  $L_2$ ，以及钳臂长短臂夹角  $\alpha$ 。夹持机构约束关系如图 7 所示。

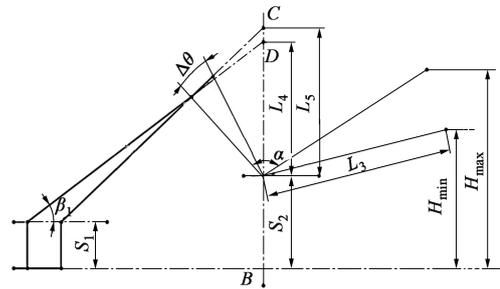


图 7 夹持机构约束关系

Fig. 7 Constraint relationship of clamping mechanism

根据文中设计方法，利用 SolidWorks 软件，根据已知参数和几何关系建立模型，其中草图上实线部分代表已知尺寸，细线部分为确定几何关系后计算出的尺寸，即为求解的尺寸，如图 8 所示。

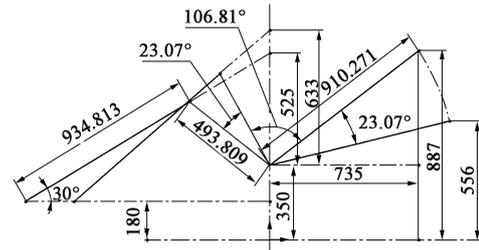


图 8 SolidWorks 界面中测量关键参数

Fig. 8 Measuring key parameters in SolidWorks interface

将求解的近恒力夹持机构取圆整，并与现有 300 kN 锻造操作机夹持机构的结构参数进行对比，根据表 2 得知，由几何法求解的近恒力夹持机构结构参数与原机构有几点不同，近恒力夹持机构的连杆变长，钳臂的短臂和长臂均变短，近恒力夹持机构结构上更为紧凑。

表 2 夹持机构的结构参数对比

Table 2 Comparison of structural parameters for clamping mechanism

参数	300 kN 原机构	300 kN 近恒力夹持结构
$L_1/\text{mm}$	780	922
$L_2/\text{mm}$	654	484
$L_3/\text{mm}$	990	910
$S_1/\text{mm}$	125	180
$S_2/\text{mm}$	320	350
$H_{\max}/\text{mm}$	887	887
$H_{\min}/\text{mm}$	556	556
$\alpha/(\text{°})$	129	107

如图 9 所示，将根据研究思路设计的近恒力夹持机构与原机构进行对比分析。在夹持不同体积的

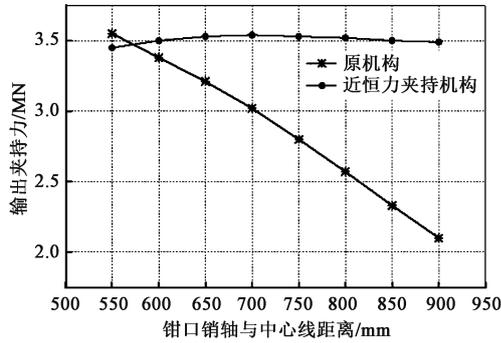


图 9 钳口输出夹持力曲线

Fig. 9 Output clamping force curve of jaw

工件时,原机构随着工件直径的增大,钳口输出的夹持力逐渐减小;近恒力夹持机构的钳口输出夹持力大小基本恒定,验证了研究成果可行性。

### 3 结论

(1) 针对工况明确了夹持机构输出夹持力大小恒定的必要性,总结出实现近恒力输出的夹持机构关键在于其传力比大小基本不变,并以此为依据设计近恒力输出夹持机构。

(2) 通过计算确定近恒力夹持机构的关键参数,利用 SolidWorks 软件中智能尺寸的标注功能和约束对夹持机构之间的几何关系进行约束,提出基于 SolidWorks 的近恒力夹持机构的设计思路。

(3) 根据近恒力夹持机构的设计思路,运用理论计算出 300 kN 操作机的近恒力夹持机构并与原夹持机构进行对比,通过实例验证了研究方法的可行性。

#### 参考文献:

[1] 万胜狄,王运赣,沈元彬. 锻造机械化与自动化 [M]. 北京:机械工业出版社,1983.  
Wan S D, Wang Y G, Shen Y B. Forging Mechanization and Automation [M]. Beijing: China Machine Press, 1983.

[2] 王田苗,陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (9): 1-13.  
Wang T M, Tao Y. Research status and industrialization development strategy of chinese industrial robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (9): 1-13.

[3] 高峰,郭为忠. 中国机器人的发展战略思考 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (7): 1-5.  
Gao F, Guo W Z. Thinking of the development strategy of robots in China [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (7): 1-5.

[4] 王建军. 搬运机械手仿真设计和制作 [J]. 机械设计与制造, 2012, (9): 146-148.  
Wang J J. Simulation design and manufacture of handing manipulator [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012, (9): 146-148.

[5] 毛金城,杨文玉. 重载工业夹持器约束建模与承载能力分析 [J]. 华中科技大学学报: 自然科版, 2011, 39 (12): 1-5.  
Mao J C, Yang W Y. Constraint modeling and loading capacity analysis of heavy-duty industrial grippers [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39 (12): 1-5.

[6] 王艾伦,刘云. 大尺度重型构件夹持机构近恒力优化设计 [J]. 机械设计, 2008, 25 (5): 39-42.  
Wang A L, Liu Y. Approximate constant force optimization design on clamping mechanism of macro scaled heavy component parts [J]. Journal of Machine Design, 2008, 25 (5): 39-42.

[7] 袁航,张青,张勇,等. 锻造操作机夹持机构优化设计 [J]. 机械设计与研究, 2014, 30 (4): 6-10.  
Yuan H, Zhang Q, Zhang Y, et al. Optimization design of the forging manipulator's gripper [J]. Machine Design and Research, 2014, 30 (4): 6-10.

[8] 刘旭明,姜峰,杨福年. 全液压无轨装出料机钳臂的优化设计 [J]. 机械研究与应用, 2016, 29 (4): 79-80.  
Liu X M, Jiang F, Yang F N. Optimal design for clamp arm of trackless charging and discharging machine [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29 (4): 79-80.

[9] 王凯,杨晋,何琪功. 锻造操作机夹持机构的设计 [J]. 机械研究与应用, 2019, 32 (2): 53-56, 60.  
Wang K, Yang J, He Q G. Design for the clamping mechanism of forging manipulator [J]. Mechanical Research & Application, 2019, 32 (2): 53-56, 60.

[10] 杨晋,朱学亮,张起樑,等. 近恒力输出的锻造操作机夹持装置研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (22): 50-56.  
Yang J, Zhu X L, Zhang Q L, et al. Clamping device study of the approximate constant force output forging manipulator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (22): 50-56.

[11] 陈康,郑茂琦,马春翔,等. 基于遗传算法对锻造操作机夹持机构的优化 [J]. 机械设计与研究, 2014, 30 (1): 8-12.  
Chen K, Zheng M Q, Ma C X. Optimization design of forging manipulator clamp based on genetic algorithm [J]. Machine Design and Research, 2014, 30 (1): 8-12.

[12] 阮潇,朱为国,张驰. 锻造操作机夹持机构的优化分析 [J]. 装备制造技术, 2018, (3): 5-8, 18.  
Ruan X, Zhu W G, Zhang C. Optimization analysis of clamping mechanism of forging manipulator [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018, (3): 5-8, 18.

[13] 朱学亮. 锻造操作机夹持机构的实验研究 [D]. 兰州:兰州交通大学, 2017.  
Zhu X L. The Experiment Research on Clamping Structure of Forging Manipulator [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.