

锻造操作机大车行走系统液压冲击改进研究

赵梅香^{1,2,3,4}, 刘 威^{1,2,3,4}, 张康宁^{1,2,3,4}, 王金鹏⁵, 尚英军^{1,2,3,4}, 曹安宁^{1,2,3,4}

(1. 西安兰石重工机械有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 兰州兰石重工有限公司, 甘肃 兰州 730314;

3. 甘肃省金属塑性成型装备智能控制重点实验室, 甘肃 兰州 730314;

4. 甘肃省大型快锻液压设备技术创新中心, 甘肃 兰州 730314;

5. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 甘肃 兰州 730314)

摘要: 提出了一种在锻造操作机大车行走系统液压马达进出油口处设置一个联通电磁阀的改进方法, 并结合联通电磁阀补偿控制策略, 避免了因马达高压腔油压过高对马达造成的损伤, 也避免了低压腔真空对马达的破坏, 从而实现了主动控制两腔的压力冲击; 并通过 AMESim 仿真平台对该改进方法进行仿真分析及对比论证, 进一步了解了联通电磁阀的实时工作状态、马达 A/B 口的压力变化、大车行走速度和位移的工作曲线以及研究对象的控制机理。结果表明: 在马达 A/B 口设置联通电磁阀, 并采用联通电磁阀补偿控制策略后大车行走系统的定位精度更高、稳定性更高, 并且减少了液压冲击和气蚀。

关键词: 锻造操作机; 大车行走; 联通电磁阀; 液压冲击; 稳定性; 定位精度; 补偿控制策略

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.029

中图分类号: TH137

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 12-0206-06

Research on improvement of hydraulic impact on forging manipulator cart walking system

Zhao Meixiang^{1,2,3,4}, Liu Wei^{1,2,3,4}, Zhang Kangning^{1,2,3,4}, Wang Jinpeng⁵, Shang Yingjun^{1,2,3,4}, Cao An'ning^{1,2,3,4}

(1. Xi'an LS Heavy Machinery Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

2. Lanzhou LS Heavy Machinery Technology Co., Ltd., Lanzhou 730314, China;

3. Gansu Metal Plastic Forming Equipment Intelligent Control Laboratory, Lanzhou 730314, China;

4. Gansu Large Fast Forging Hydraulic Equipment Engineering Technology Research Center, Lanzhou 730314, China;

5. Lanzhou LS Energy Equipment Engineering Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730314, China)

Abstract: An improved method of setting a connecting solenoid valve at the oil inlet and outlet ports of hydraulic motor for forging manipulator cart walking system was proposed, and combined with the compensation control strategy of connecting solenoid valve, the damage to the motor caused by the high pressure in the high pressure cavity of motor was avoided, and the damage caused by the vacuum in the low pressure cavity was avoided too, so the pressure impact of the two cavities was controlled actively. The improved method was simulated and compared by AMESim simulation platform, and the real-time working state of connecting solenoid valve, the pressure change at the A/B port of motor, the working curves of walking speed and displacement for cart, and the control mechanism of the research object were further understood. The results show that, after setting a connecting solenoid valve at the A/B port of motor, and adopting the compensation control strategy of connecting solenoid valve, the positioning accuracy and stability of the cart walking system are higher, and the hydraulic impact and cavitation are reduced.

Key words: forging manipulator; cart walking; connecting solenoid valve; hydraulic impact; stability; positioning accuracy; compensation control strategy

锻造操作机与液压机之间的联动一直是制约锻压机组发展的重要因素。在自动模式下, 压机的频

次越来越高, 要满足锻造操作机与压机的联动, 就必须保证大惯性操作机的步进频次要加快, 这就要求操作机要频繁启停, 定位精准, 还要求震动冲击声音小^[1-5]。马志刚等^[6]对液压管道、行走溢流阀、泵头溢流阀、比例换向阀等元件对大车行走定位精度和启停平稳性的影响做了分析研究。然而, 随着

收稿日期: 2023-04-26; 修订日期: 2023-08-04

作者简介: 赵梅香 (1987-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: 1518983330@qq.com

压机频次的逐渐提高, 操作机的频次也要及时跟上压机的频次, 在频次提高的同时启停平稳性差、震动大的问题尤为凸显^[7-10]。

1 改进内容

出现问题的主要原因是在大车停止时刻, 关闭比例阀的瞬间, 在车体惯性的作用下马达 A/B 两腔的压力交替降低和升高, 如果低压腔补油不及时, 容易发生气穴, 产生噪声, 使得旋转编码器传回的位置信号和目标信号不断发生比较纠偏, 导致比例阀处于不断开关的一个动态状态, 使高压油不断交替进入马达两腔。以往的研究表明^[6-8], 蓄能器的位置和充气压力是影响启停平稳性的关键点, 然而这是个双刃剑, 蓄能器固然能提高启停平稳性, 但是增加了响应时间, 必须要确定优先考虑因素, 作出取舍。

为此, 寻求了另外一种途径, 即在原有马达行走回路的基础上, 在行走液压马达进油口处联通

一个电磁阀, 当大车行走时该电磁阀失电关闭, 当大车行走接近位移目标时比例阀控制信号切换为 0, 到中途时保证比例阀阀口关闭, 当大车行走位移超过位移目标值后将信号反馈给电磁阀, 该电磁阀得电打开, 将马达 A/B 腔联通, 使马达高压腔的液压油及时引入低压腔, 从而避免了因马达高压腔油压过高造成对马达的损伤, 也能避免低压腔因为马达转动而产生的真空对马达的破坏, 从而主动控制两腔的压力冲击。

该锻造操作机大车行走液压系统的原理图如图 1 所示, 行走是由液压马达 1、2、14 和 16 驱动实现的, 由于在达到设计行走速度时流量较大, 液压控制回路由两个完全相同的高频响比例换向阀 5 和 10 (后文中均简称为比例阀) 来控制 4 个液压马达, 实现大车行走的前进和后退。使用两台 180 的 DP 泵 7 和 8 来给系统供油, 溢流阀 3、4、12 和 13 用于限制马达 A/B 口的压力。电磁阀 15 和 17 分别连接马达的 A/B 口, 该电磁阀为本文的重点研究对象。

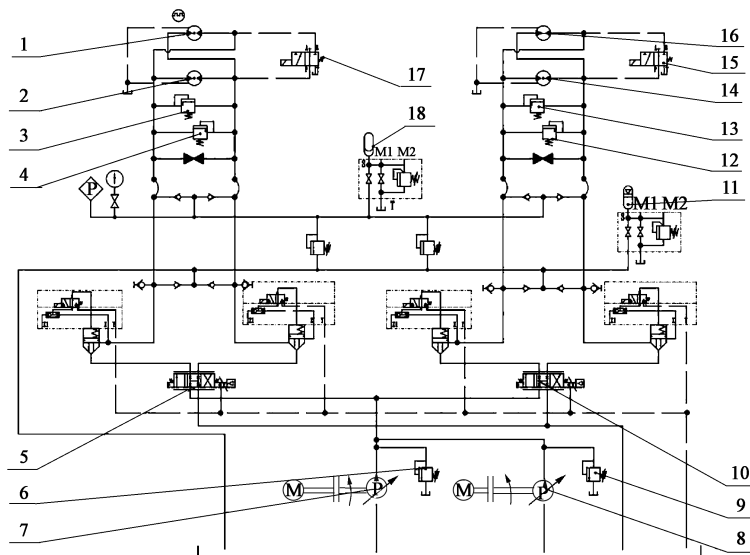


图 1 锻造操作机大车行走液压系统原理图

1、2、14、16. 液压马达 3、4、12、13. 溢流阀 5、10. 高频响比例换向阀 6、9. 泵头溢流阀 7、8. DP 泵
11. 回油管上的蓄能器 15、17. 电磁阀 18. 高压管上的蓄能器

Fig. 1 Principle diagram of cart walking hydraulic system for forging manipulator

2 电磁阀补偿控制策略

在大车行走到达位移目标值时, 由 PID 模糊控制切换为比例阀控制信号 0, 保证比例阀阀口关闭, 隔绝油路, 在位移传感器上检测出位移超出操作机步进距离值后就将信号反馈给电磁开关阀, 使电磁阀打开, 将马达 A/B 腔联通, 从而主动控制两腔的

压力冲击。

3 仿真分析

3.1 AMESim 建模及主要参数设置

本次研究利用 AMESim 仿真软件, 对以上提出的马达 A/B 口联通的电磁阀补偿控制策略进行仿真分析。图 2 为锻造操作机大车行走液压系统的

AMESim 建模, 各元件参数设置与实际保持一致, 图 2 标出各元件在软件建模中的英文名称, 表 1 为操作

机大车行走系统的主要技术参数, 由于比例阀的作用非常关键, 尽可能地使参数设置与样本一致^[11-14]。

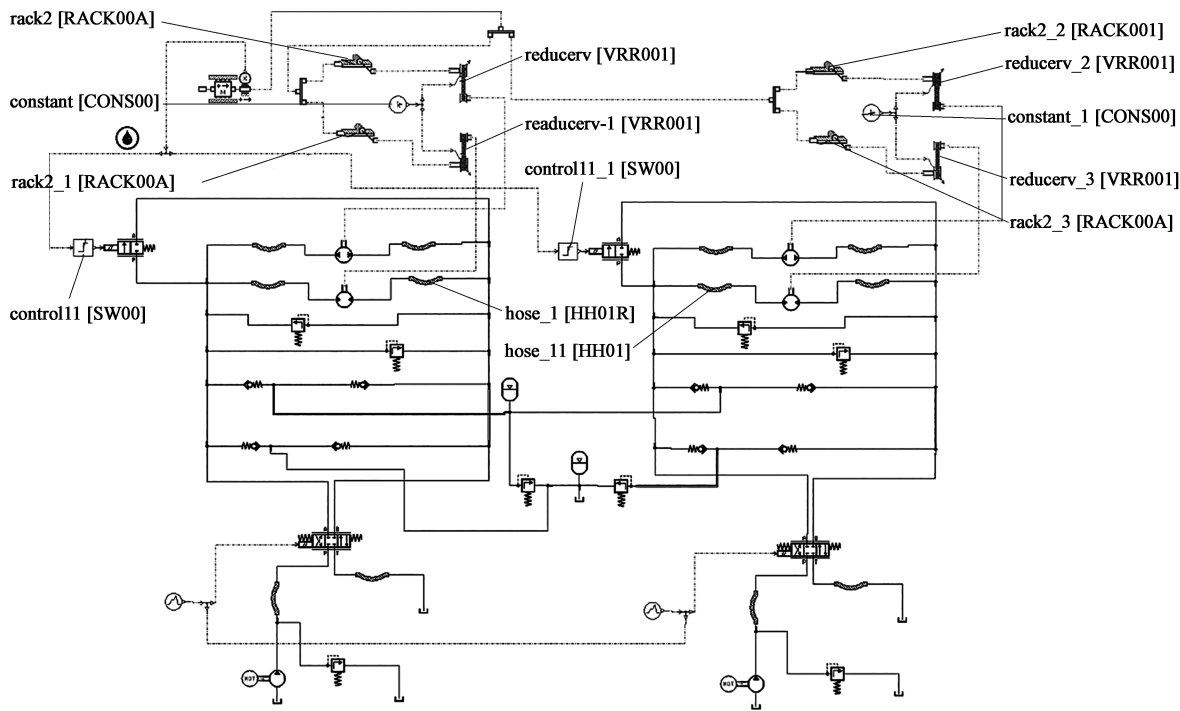


图 2 锻造操作机大车行走液压系统 AMESim 建模

Fig. 2 AMESim modeling of cart walking hydraulic system for forging manipulator

表 1 锻造操作机大车行走系统的主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of cart walking system for forging manipulator

参数	数值
整机重量 M/kg	106000
销齿轮直径 D/mm	$\Phi 630$
减速机速比	116
驱动马达排量/ $(\text{mL} \cdot \text{r}^{-1})$	45

3.2 模型真实性对比

液压回路两个供油泵同时供油, 分别通过两个比例阀来给马达供油, 马达带动减速机旋转, 增大输出扭矩, 以此来带动销齿齿轮与销轴齿条的啮合并带动大车向前运动。泵装置在液压站上, 换向阀集成在阀块上, 因此, 泵到换向阀之间的管路实际为软管连接, 换向阀与油箱之间的回油管路实际为软管连接, 阀块到马达之间实际为软管连接。液压建模均按实际传动方式和控制原理进行建模, 参数设置均按实际设计参数设置, 所有软管的直径和长度均按实际布置长度设置, 行走最大设计速度为 $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 整车重量为 106000 kg , 在实际现场测得自动行走位移 300 mm 用时 1.07 s , 控制精度在 $\pm 5 \text{ mm}$ 范围内。

由仿真曲线图 3、图 4 可以看出: 在 0.6 s 时最大速度达到 $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 在 0.87 s 时, 第 1 次到达 300 mm 的步进距离; 然后由于惯性作用, 在 300 mm 附近来回震荡, 1.48 s 后趋于平稳, 震动的时间持续 0.61 s 。仿真曲线与现场测得的结果完全符合。

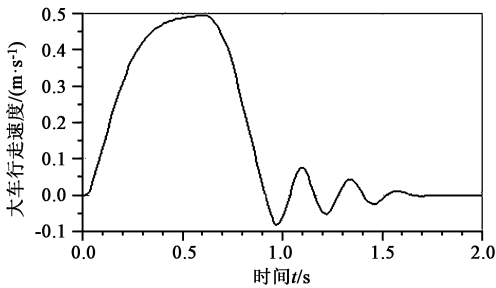


图 3 大车行走速度-时间曲线

Fig. 3 Speed-time curve of cart walking

3.3 仿真分析

图 5 为采取电磁阀补偿后的电磁阀开关信号曲线, 由图 5 可以看出: 在 0.86 s 时, 大车行走位移第 1 次达到 300 mm 的步进位移, 电磁阀接收到打开信号, 一直到 0.97 s , 位移超过 300 mm , 电磁阀处于打开状态; 在 0.98 s 时, 位移小于 300 mm , 电

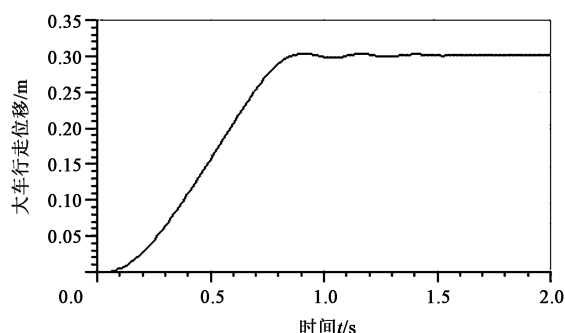


图 4 大车行走位移-时间曲线

Fig. 4 Displacement-time curve of cart walking

电磁阀接收到关闭信号,一直到 1.09 s,电磁阀处于关闭状态,说明这段时间的位移小于 300 mm;在 1.10 s 时,大车位移第 2 次达到 300 mm 的步进位移,电磁阀接收到打开信号,如此进行开-关-开-关动作后,在 1.33 s 后电磁阀一直保持打开状态,这说明大车行走位移一直在 300 mm,稳定停止,接收到的位移信号一直让电磁阀打开。

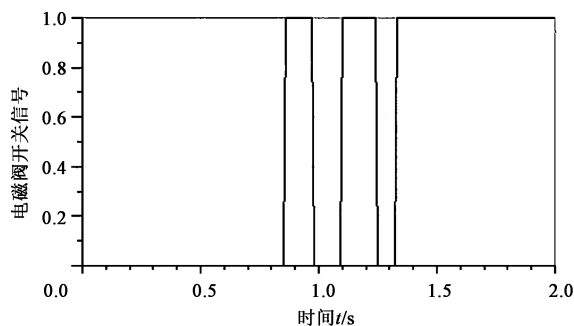


图 5 电磁阀补偿后电磁阀的开关信号曲线

Fig. 5 Switching signal curve of solenoid valve after solenoid valve compensation

图 6 为采取电磁阀补偿前后的大车行走位移变化曲线,对比曲线可以看出,采取电磁阀补偿后,位移在 0.86 s 后第 1 次达到 300 mm 的步进位移,此时电磁阀 15 和 17 接收到位移反馈的信号后开启,在 1.7 s 时稳定停在 300 mm,位置精度控制一直在 ± 5 mm 范围内。而电磁阀补偿前的位移曲线,位移在 0.86 s 时第 1 次达到 300 mm 的步进位移后,一直在 300 mm 附近晃动,位置控制精度为 ± 8 mm,震荡时间较长。两条曲线在启动加速、减速过程完全重合,仅在 0.86 s 后出现了差别,因此,采取电磁阀补偿后大车行走的定位精度更高。

图 7 为采取电磁阀补偿前后的速度变化曲线,对比曲线可以看出,采取电磁阀补偿后,在 0.61 s 时大车行走速度达到最大,为 $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,同时

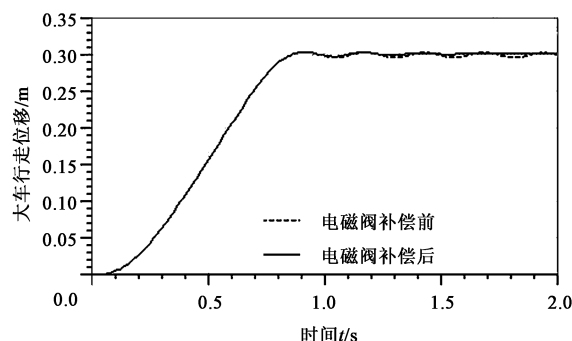


图 6 电磁阀补偿前后大车行走位移变化曲线

Fig. 6 Displacement changing curves of cart walking before and after solenoid valve compensation

也满足设计速度,在 0.86 s 时大车行走速度第 1 次降为 0,此后以一个很小的晃动速度衰减,在 1.7 s 时行走速度稳定为 0。而电磁阀补偿前的速度曲线,最终一直以 $\pm 0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度晃动,需要较长的时间才能趋于稳定,位置控制精度为 $\pm 8 \text{ mm}$,震荡时间较长。两条曲线在启动加速、减速过程完全重合,仅在 0.86 s 后出现差别,因此,采取电磁阀补偿后大车行走的稳定性更高。

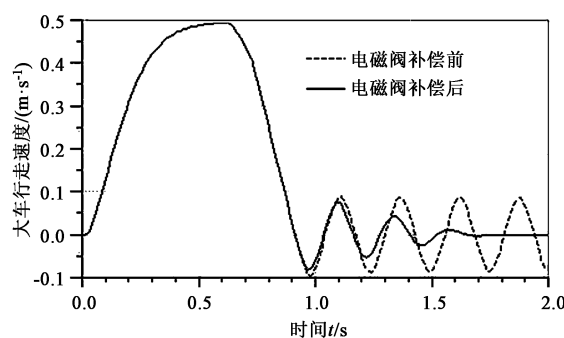


图 7 电磁阀补偿前后大车行走速度变化曲线

Fig. 7 Change curves of cart walking speed before and after solenoid valve compensation

图 8 为采取电磁阀补偿前马达 A/B 口的压力曲线,由图 8 对比分析出在 0.60 s 时快速关闭比例阀后,马达 A/B 两腔的压力在车体惯性下出现明显的液压冲击,并且交替出现,高压腔的压力达到最大时,低压腔产生真空,发生气穴现象,产生较大的震动声响。高压腔的压力峰值达到 22.3 MPa,低压腔的最低压力达到 -0.05 MPa,真空时段持续较多,气蚀较严重。

而在图 9 所示电磁阀补偿后马达 A/B 口的压力曲线中看出,虽然在比例阀口关闭后,马达 A/B 两腔的压力出现液压冲击,有交替现象,但是在不断

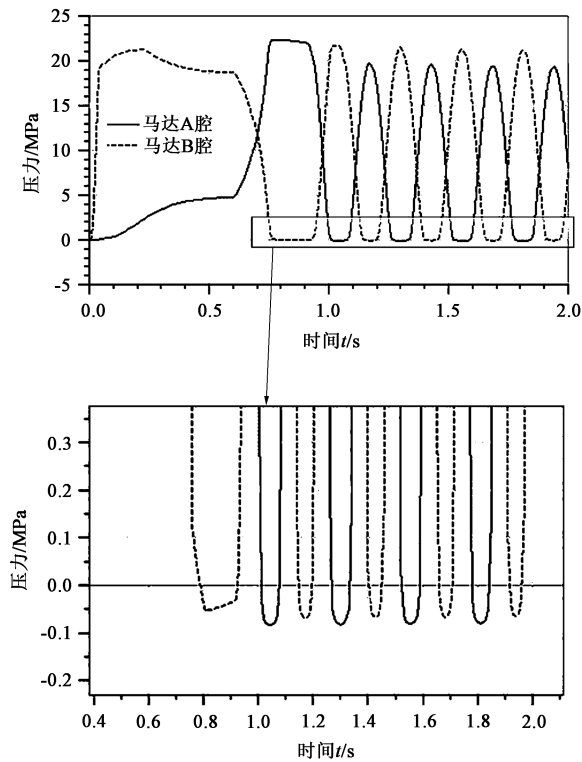


图 8 电磁阀补偿前马达 A/B 口的压力曲线

Fig. 8 Pressure curves of A/B port for motor before solenoid valve compensation

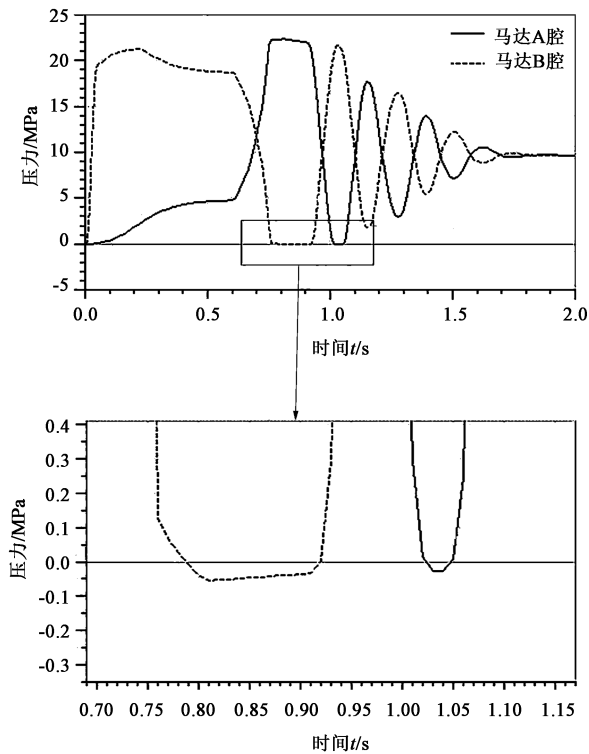


图 9 电磁阀补偿后马达 A/B 口的压力曲线

Fig. 9 Pressure curves of A/B port for motor after solenoid valve compensation

衰减, 在 1.8 s 后两腔的压力相等。虽然高压腔的压力峰值达到 22.3 MPa, 低压腔的最低压力达到 -0.05 MPa, 真空时段明显减少。因此, 采取电磁阀补偿后大车行走动作可减少液压冲击和气蚀。

4 结论

(1) 结合电磁阀补偿控制策略, 提出了一种在锻造操作机大车行走系统液压马达进出油口联通一个电磁阀的改进方法, 并对该方法进行仿真分析, 得到了电磁阀的工作状态、马达 A/B 口的压力、大车行走速度和位移的工作曲线, 进一步了解了研究对象的控制机理。

(2) 相较于未在马达 A/B 口联通电磁阀, 采取电磁阀补偿控制策略后大车行走的定位精度更高、稳定性更高, 并可以减少液压冲击和气蚀。

参考文献:

- [1] 赵勇, 林忠钦, 王皓, 等. 重型锻造操作机的操作性能分析 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (11): 69-75.
Zhao Y, Lin Z Q, Wang H, et al. Manipulation performance analysis of heavy manipulators [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (11): 69-75.
- [2] 傅新, 徐明, 王伟, 等. 锻造操作机液压系统设计与仿真 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (11): 51-54.
Fu X, Xu M, Wang W, et al. Hydraulic system design and simulation of the forging manipulator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (11): 51-54.
- [3] 李阁强, 江兵, 周斌, 等. 20 t 锻造操作机液压控制系统 [J]. 农业机械学报, 2015, 46 (1): 352-358.
Li G Q, Jiang B, Zhou B, et al. Hydraulic control system of 20 t forging manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46 (1): 352-358.
- [4] 江兵. 锻造操作机电液控制系统研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015.
Jiang B. The Research of Forging Manipulator Electro-hydraulic Control System [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2015.
- [5] 朱汉银. 锻造操作机液压系统能耗分析与节能控制研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
Zhu H Y. Energy Consumption and Energy Saving Control of Hydraulic System for Forging Manipulator [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [6] 马志刚, 杨志怀, 张晓丽, 等. 锻造操作机行走系统性能仿真分析 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (10): 203-207.
Mang Z G, Yang Z H, Zhang X L, et al. Simulation analysis on performance of walking system for forging manipulator [J]. Forging Technology, 2022, 47 (10): 203-207.

- ing & Stamping Technology, 2022, 47 (10): 203-207.
- [7] 刘晨荣, 魏海涛, 张晓丽, 等. 基于速度预测的锻造操作机大车定位控制研究 [J]. 液压与气动, 2022, 46 (10): 182-188.
- Liu C R, Wei H T, Zhang X L, et al. Crane positioning control of forging manipulator based on speed prediction [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46 (10): 182 - 188.
- [8] 郝晓蓓. 基于三角形速度规划的双锻造操作机大车行走同步控制方法 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- Hao X B. Synchronization Control on Walking Hydraulic System of Dual Forging Manipulators Based on Triangular Velocity Planning [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [9] 桑育鑫. 重载锻造操作机大车行走精度控制的研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- Sang Y X. Research on the Precision of Cart Movement Control of Heavy Load Forging Manipulator [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [10] 王昕炜, 苗荣霞. 锻造操作机大车行走机构的单神经元自适应 PID 控制 [J]. 西安工业大学学报, 2014, 34 (12): 1012-1017.
- Wang X W, Miao R X. Single neuron adaptive PID control of walking mechanism of forging manipulator cart [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2014, 34 (12): 1012-1017.
- [11] 刘杰. 基于虚拟样机的锻造操作机阀控马达系统仿真研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
- Liu J. Simulation of Forging Manipulator Valve-controlled Motor System based on Virtual Prototype [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010.
- [12] 翟富刚, 李瑞阳, 袁龙, 等. 双锻造操作机大车行走系统控制方法探析 [J]. 液压与气动, 2019, (11): 1-8.
- Zhai F G, Li R Y, Yuan L, et al. Analysis on control method of walking system of dual forging manipulators [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019, (11): 1-8.
- [13] 翟富刚. 液压锻造操作机多学科协同仿真研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
- Zhai F G. Multidisciplinary Collaborative Simulation Research on Hydraulic Forging Manipulator [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
- [14] 梁全, 谢基晨, 聂利伟. 液压系统 AMESim 计算机仿真进阶教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- Liang Q, Xie J C, Nie L W. Hydraulic System AMESim Computer Simulation Advanced Tutorial [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.

