

装备与成套技术

锻造操作机行走系统性能仿真分析

马志刚^{1,2}, 杨志怀^{1,2}, 张晓丽^{1,2}, 王生金^{1,2}, 王宏亮^{1,2}, 魏海涛^{1,2}

(1. 兰州兰石集团有限公司 能源装备研究院, 甘肃 兰州 730314; 2. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 甘肃 兰州 730314)

摘要: 锻造操作机的行走定位精度和启停稳定性一直以来是大型锻造设备中的重要参数。通过搭建 5 t 锻造操作机行走动力学和液压系统的仿真模型, 利用 AMESim-ADAMS 联合仿真的方式, 采用更为准确的负载来研究操作机行走系统的主要液压元件对行走定位精度和启停稳定性的影响。联合仿真结果表明, 液压管道、行走溢流阀、泵头溢流阀、比例换向阀等元件均能对锻造操作机的行走定位精度和启停稳定性产生一定的影响, 为了提高行走定位精度及启停稳定性, 应综合考虑液压系统中各元件的影响, 对液压元件进行合理匹配。此研究可为锻造操作机行走系统的后续研发设计及优化改进提供理论依据。

关键词: 锻造操作机; 行走系统; 联合仿真; 行走定位精度; 启停稳定性

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.028

中图分类号: TH137

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 10-0203-05

Simulation analysis on performance of walking system for forging manipulator

Ma Zhigang^{1,2}, Yang Zhihui^{1,2}, Zhang Xiaoli^{1,2}, Wang Shengjin^{1,2}, Wang Hongliang^{1,2}, Wei Haitao^{1,2}

(1. Energy Equipment Engineering Research Institute, Lanzhou Ls Group Co., Ltd., Lanzhou 730314, China;

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

Abstract: The travel positioning accuracy and start-stop stability of forging manipulator are always important parameters in large forging equipment. Therefore, by building the simulation model of walking dynamics and hydraulic system for 5 t forging manipulator, using the AMESim-ADAMS co-simulation method, the influences of main hydraulic components of manipulator walking system on the travel positioning accuracy and start-stop stability were studied by more accurate load. The co-simulation results show that hydraulic pipeline, travel relief valve, pump head relief valve and proportional directional valve all have certain influences on the travel positioning accuracy and start-stop stability of forging manipulator. In order to improve the travel positioning accuracy and start-stop stability, the influence of each component in the hydraulic system should be considered comprehensively, and the hydraulic components should be matched reasonably. Thus, it can provide a theoretical basis for the subsequent development, design and optimization of the walking system for forging manipulator.

Key words: forging manipulator; walking system; co-simulation; travel positioning accuracy; start-stop stability

锻造操作机在锻压行业广泛应用, 是大型锻件塑性成形过程中必不可少的设备, 其性能决定了锻压效率及锻压产品的品质, 而行走性能是锻造操作机的主要性能指标。目前, 国外设备的性能均高于国内, 但所使用的液压元器件基本一致, 导致国内设备性能较低的主要原因还在于对系统的理解不够深入。锻造操作机的整机重量大、液压系统流量大, 为了提高锻造效率和锻造精度, 要求锻造操作机的行走系统既要实现快速平稳启停, 又要满足定位精度。为了提高行走性能, 优化控制策略是主要的手段, 但理解液压系统的特性及液压元件对性能的影响

是提出良好控制策略的基础。

目前, 对锻造操作机的性能研究主要集中在控制策略上, 如翟富刚等^[1]、陈柏金等^[2]提出了基于位置速度复合状态差值校正的同步控制方法, 对于液压系统特性的研究相对较少。本文利用 AMESim-ADAMS 联合仿真的方式, 采用更为准确的负载来研究 5 t 锻造操作机行走系统主要液压元件对行走定位精度和启停稳定性的影响。结果表明, 液压管道、行走溢流阀、泵头溢流阀、比例换向阀等均能影响行走定位精度和启停稳定性, 研究结论为锻造操作机的后续研发设计及改进提供了参考。

1 5 t 锻造操作机行走系统介绍

1.1 液压系统

如图 1 所示, 5 t 锻造操作机的行走由液压马达

收稿日期: 2021-10-11; 修订日期: 2022-01-10

作者简介: 马志刚 (1989-), 男, 学士, 工程师

E-mail: ma_zhigang@126.com

1 和 2 驱动,通过控制液压马达来实现锻造操作机的行走启停及速度控制。定量柱塞泵 6 由电机驱动,为系统提供稳定的高压油;泵头溢流阀 5 用来保持液压泵出口的压力恒定,并将液压泵多余的油液溢流回油箱;液压油通过比例换向阀 4 驱动液压马达 1 和 2,控制液压马达 1 和 2 的旋转方向和速度,比例换向阀 4 的开口越大,马达的旋转速度越高;当液压马达 C、D 口的压力高于行走溢流阀 3 设定的压力时,高压油将从行走溢流阀 3 溢流,限制液压马达 1、2 的最高压力^[3]。

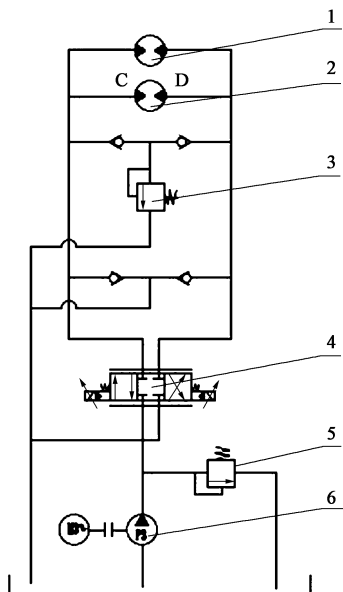


图 1 行走系统的液压原理图

1、2. 液压马达 3. 行走溢流阀 4. 比例换向阀
5. 泵头溢流阀 6. 定量柱塞泵

Fig. 1 Hydraulic principle diagram of walking system

1.2 机械机构

如图 2 所示,从动轮 1 和 4 安装在轨道上,起支撑锻造操作机的作用,驱动齿轮 3 由液压马达

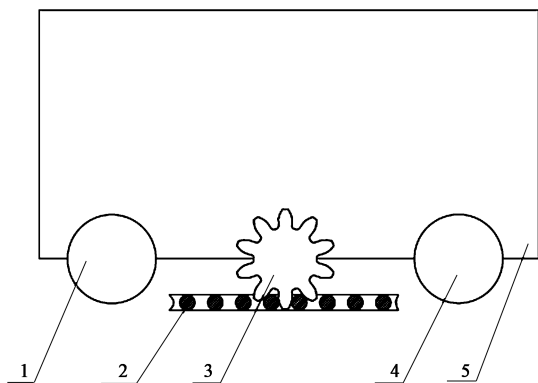


图 2 行走系统的机械机构原理图

1、4. 从动轮 2. 齿条 3. 驱动齿轮 5. 车体

Fig. 2 Mechanism principle diagram of walking system

驱动,两者之间装有减速机,驱动齿轮 3 的另一侧与固定在地面的齿条 2 连接,实现驱动锻造操作机的功能。

2 锻造操作机行走系统联合仿真

2.1 机械机构模型

使用 Solidworks 进行锻造操作机三维模型建模,并转化为 ADAMS 仿真模型,如图 3 所示,对仿真模型进行详细建模,如在齿轮与齿条间添加齿轮连接副、在车体与轨道间添加平动副,并将动摩擦因数及静摩擦因数均设置为 0.1,保证模型具有正确的装配关系。

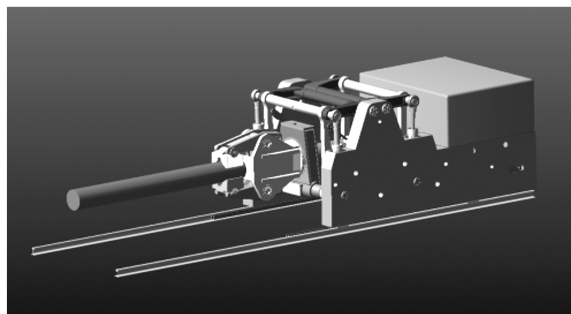


图 3 ADAMS 仿真模型

Fig. 3 ADAMS simulation model

2.2 液压系统模型

在 AMESim 中建立液压系统模型^[4-11],设置各个液压元件参数与元件实际参数保持一致,液压泵的排量为 $45.6 \text{ mL} \cdot \text{r}^{-1}$,比例换向阀的流量为 $85 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,压降为 1.4 MPa ,两个液压马达的排量均为 $45.6 \text{ mL} \cdot \text{r}^{-1}$,负载处连接联合仿真数据接口模型,如图 4 所示。

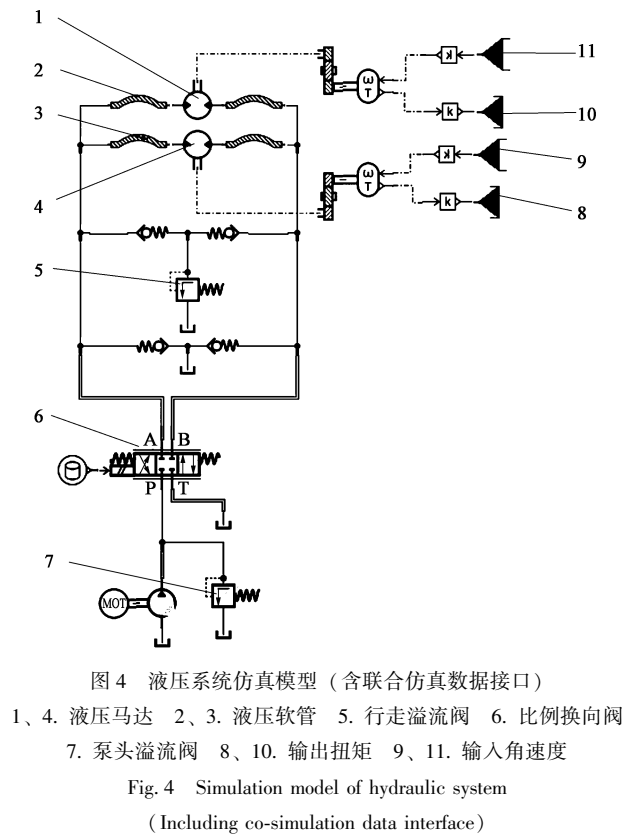
2.3 联合仿真数据交互

使用 CosiMate 专业联合仿真软件进行联合仿真,如图 5 所示。设置 ADAMS 和 AMESim 的交互数据:在 ADAMS 中,选择驱动齿轮的转速作为输出 (Output),输入 (Input) 为驱动齿轮的扭矩;在 AMESim 中,选择液压马达后减速机的扭矩为输出 (Output),输入 (Input) 为角速度^[12]。接口设置见表 1。

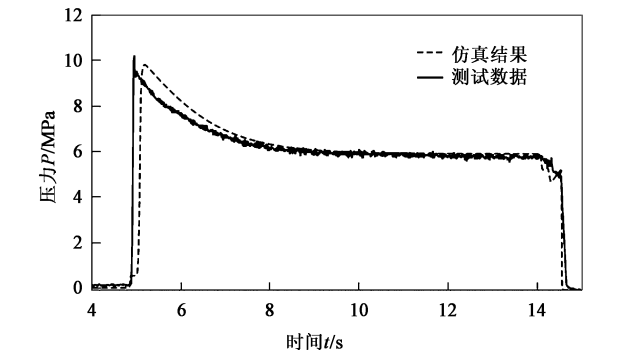
利用 AMESim-ADAMS 联合仿真的方式,采用更为准确的负载研究锻造操作机行走系统的性能,使系统的物理特性与实际更接近,可得出更为准确的系统特性曲线。

2.4 联合仿真模型验证

运行联合仿真模型,对比液压马达进口压力。



开，液压马达压力瞬间升高，锻造操作机开始加速启动，随着速度的稳定，最终压力也趋于稳定，在 15 s 时比例阀关闭，液压马达压力由 6 MPa 降至 0。仿真结果与测试曲线的吻合度高，说明联合仿真数据交互合理，保证了联合仿真模型和耦合计算的正确性，基于此进行锻造操作机行走系统性能的分析研究。



3 仿真分析

3.1 溢流阀对行走系统的影响

通过设定不同的泵头溢流阀 7（图 4）的开启压力，利用联合仿真模型，对泵头溢流阀对行走系统的影响进行分析。图 7 为泵头溢流阀设定压力分别为 4.5、6.5 和 8.5 MPa 时液压马达的进口压力曲线。

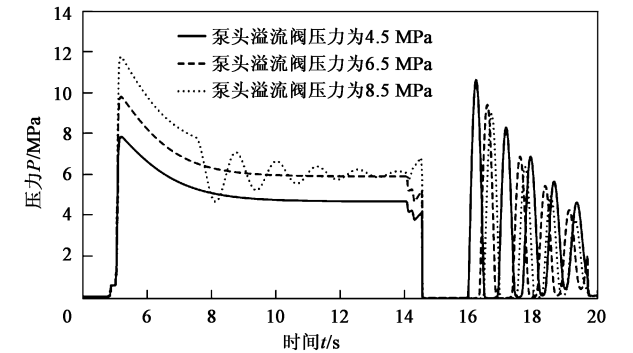


图 6 为液压马达进口压力联合仿真结果与测试数据的对比曲线。从图 6 可以看出，比例阀在 5 s 时打

从仿真结果可以看出：在 5 s 比例换向阀开启时，泵头溢流阀压力设置越高，行走启动压力越高，泵头溢流阀压力设置高于 8.5 MPa 时，在压力趋于稳定前出现振荡；在 14.6 s 比例换向阀关闭后，液压马达进口出现压力振荡现象，且泵头溢流阀压力越低，振幅越大。从以上结果可以看出，泵头溢流阀压力的设定应根据系统选取最佳值，不能为了追

表 1 数据交互接口设置

Table 1 Interface setting of data interaction

序号	变量	AMESim	ADAMS
		变量类型	变量类型
1	左驱动轮角速度/ $((^{\circ}) \cdot s^{-1})$	Input	Output
2	左驱动轮扭矩/ $(N \cdot m)$	Output	Input
3	右驱动轮角速度/ $((^{\circ}) \cdot s^{-1})$	Input	Output
4	右驱动轮扭矩/ $(N \cdot m)$	Output	Input

求启动速度而设置越大越好,也不能为了追求启动平稳性而设置越小越好。

通过设定不同的行走溢流阀 5 (图 4) 的开启压力,利用联合仿真模型,对行走溢流阀对行走系统的影响进行分析。图 8 为行走溢流阀设定压力分别为 12、15 和 18 MPa 时液压马达的进口压力曲线。

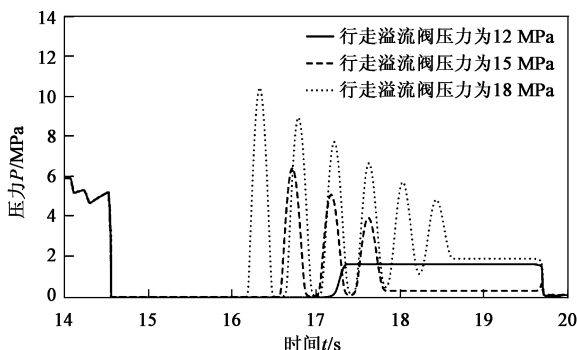


图 8 行走溢流阀压力对液压马达进口压力的影响

Fig. 8 Influence of pressure for walking relief valve on hydraulic motor inlet pressure

从图 8 可以看出,在 14.6 s 比例换向阀关闭后,液压马达进口压力归零,锻造操作机开始制动。行走溢流阀压力为 18 MPa 时,在 16.2 s 时液压马达进口再次出现压力振荡,振幅较大;行走溢流阀压力为 15 MPa 时,在 16.6 s 时液压马达进口再次出现压力振荡,振幅较小;行走溢流阀压力为 12 MPa 时,在 17.2 s 时液压马达进口再次出现压力回弹,但未发生压力振荡。因此,随着行走溢流阀的压力降低,行走制动冲击振动降低,调低行走溢流阀的压力有利于减小锻造操作机的制动冲击振动。

从图 9 可以看出,在 14.6 s 比例换向阀关闭后,此时 3 个行走溢流阀压力下的位移均为 5.577 m,在 17 s 位移稳定后,行走溢流阀压力为 12、15 和 18 MPa 时,对应的位移分别为 5.742、5.695 和 5.668 m。由此可见,行走溢流阀压力越低,会导致比例换向阀关闭

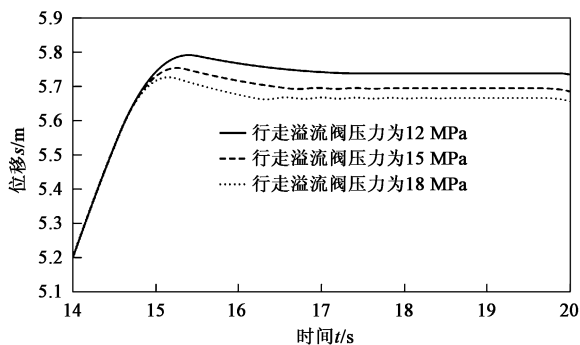


图 9 行走溢流阀压力对位移的影响

Fig. 9 Influence of pressure for walking relief valve on displacement

后冲出的距离越大,造成锻造操作机行走的控制精度越低,为提高锻造操作机行走的位移精度,应设置越高的行走溢流阀压力越有效。

3.2 管道对行走系统的影响

通过设定不同的液压软管 2 和 3 (图 4) 的长度,利用联合仿真模型,对管道对行走系统的影响进行分析。图 10 为液压软管 2 和 3 的长度分别为 1、3 和 5 m 时液压马达的进口压力曲线。

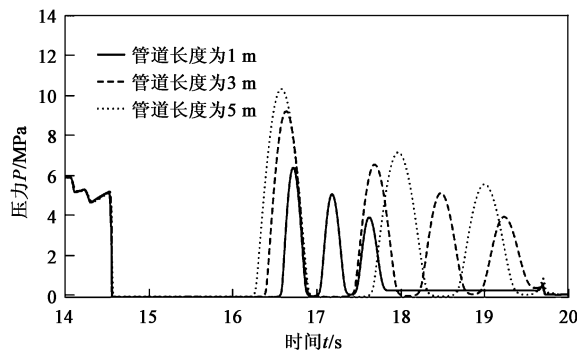


图 10 管道长度对液压马达进口压力的影响

Fig. 10 Influence of pipe length on hydraulic motor inlet pressure

从仿真结果可以看出,在 14.5 s 比例换向阀关闭后,液压马达进口压力出现振荡,其中管道长度为 5 m 时振荡最为严重,即管道越长,振荡越严重。这是由于受液压软管的弹性变形及液压油的可压缩性影响,使得液压系统具有一定的弹性,在行走停止时,行走动能转换为势能,低压管道突变为高压,使得锻造操作机停止时产生振荡。因此,较短的管道、刚性更强的管道(钢管)有利于减小振荡,提高锻造操作机停车的平稳性和准确度。

3.3 比例换向阀对行走系统的影响

将比例换向阀关闭时的控制信号设置为两个阶段,阀全开信号为 12 V,因此,设置第 1 阶段为 12~4 V,第 2 阶段为 4~2.4 V (0~2.4 V 为阀的死区)。关阀总时间为 1 s,分别设置第 1 阶段和第 2 阶段的关阀时间为:0.1 和 0.9 s,0.3 和 0.7 s,0.5 和 0.5 s,如图 11 所示。通过联合仿真,得到不同控制信号时的液压马达回油口压力如图 12 所示。

分析液压马达回油口压力振荡曲线可知,第 2 阶段的关阀时间为 0.9 s 时压力振荡最小、收敛最快。因此,在设置比例换向阀分段关闭时,第 1 阶段的时间应设置较小,第 2 阶段的时间应设置较大,更有利于提高锻造操作机的行走定位精度和启停稳定性。

4 结语

通过建立锻造操作机行走系统的机械机构和液

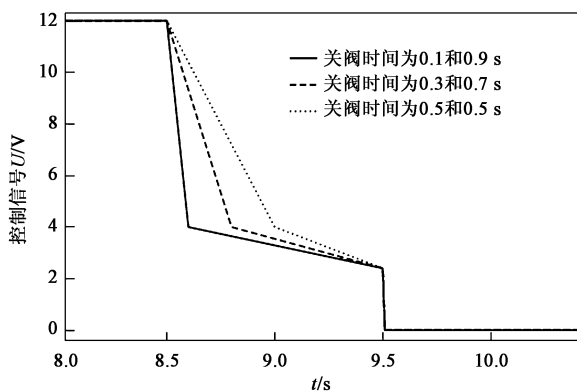


图11 比例换向阀控制信号

Fig. 11 Control signal of proportional directional valve

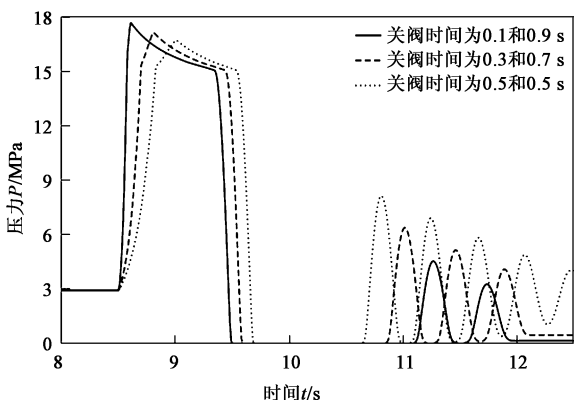


图12 比例换向阀控制信号对液压马达回油口压力的影响

Fig. 12 Influence of proportional directional valve control signal on oil return port pressure of hydraulic motor

压系统联合仿真模型, 使用 CosiMate 专业联合仿真软件进行联合仿真, 分析了行走液压系统关键液压元件对行走定位精度和启停稳定性的影响, 并进一步对液压元件如何影响行走定位精度和启停稳定性提出了建议。

锻造操作机行走系统的行走稳定性受液压管道、行走溢流阀、泵头溢流阀、比例换向阀的综合影响, 为提高行走位移的精度及稳定性, 应从液压系统各个元件进行综合考虑, 泵头溢流阀及行走溢流阀应选取最佳中间值, 尽可能减少管道长度及使用钢管代替软管, 比例换向阀应合理分段关闭, 选取最佳的液压元件参数值。

参考文献:

- [1] 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索 [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.
- [2] 陈柏金, 徐明昊, 张红颖. 液压锻造操作机大车行走机构的位置控制系统 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39 (8): 6-9.

Chen B J, Xu M H, Zhang H Y. Position control system for hydraulic forging manipulator cart movement mechanism [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2011, 39 (8): 6-9.

- [3] 李向阳, 田富, 闫周, 等. 100T 锻造操作机行走驱动液压系统设计 [J]. 机床与液压, 2018, 46 (16): 48-51.
Li X Y, Tian F, Yan Z, et al. Design of hydraulic system of 100T forging manipulator driving parts [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46 (16): 48-51.
- [4] 付永领, 祁晓野. LMS Imagine. Lab AMESim 系统建模和仿真参考手册 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
Fu Y L, Qi X Y. Reference Manual of LMS Imagine. Lab AMESim System Modeling and Simulation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2011.
- [5] 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.
- [6] 张伟, 李淳潮, 李志远, 等. 基于 AMESim 的电/气比例压力阀仿真与试验 [J]. 液压与气动, 2020, (3): 65-70.
Zhang W, Li C C, Li Z Y, et al. Simulation and test for electro-pneumatic proportional pressure valve based on AMESim [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (3): 65-70.
- [7] 穆天驰, 张东民, 周伟民. 基于 AMESim 的同步柔性冲压装置控制系统仿真分析 [J]. 液压与气动, 2021, (2): 134-138.
Mu T C, Zhang D M, Zhou W M. Simulation analysis of control system of synchronous flexible stamping device based on AMESim [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, (2): 134-138.
- [8] 桑勇, 邵利来, 段富海. 基于 AMESim 液压系统管路动态特性的研究 [J]. 液压气动与密封, 2018, 38 (2): 16-21.
Sang Y, Shao L L, Duan F H. The research on pipeline dynamic characteristics of hydraulic system based on AMESim [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2018, 38 (2): 16-21.
- [9] 陈雨洋, 李靖祥, 杨昌群, 等. 基于 AMESim 的轴流先导式水击卸压阀动态特性分析 [J]. 液压与气动, 2020, (11): 8-14.
Chen Y Y, Li J X, Yang C Q, et al. Analysis of Dynamic characteristics of axial pilot-operated surge relief valve based on AMESim [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (11): 8-14.
- [10] 唐海斌, 吴广丰, 刘军. 基于 AMESim 的换轨车液压系统振动仿真 [J]. 液压与气动, 2020, (10): 162-166.
Tang H B, Wu G F, Liu J, et al. Simulation on hydraulic system vibration of track relaying cars [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (10): 162-166.
- [11] 王凯, 李洪文, 陈建国, 等. 基于 AMESim 与 ADAMS 的超静定液压支架液压系统联合仿真 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (5): 171-174.
Wang K, Li H W, Chen J G, et al. Co-simulation hyper-static hydraulic support system based on AMESim and ADAMS [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48 (5): 171-174.
- [12] 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.