

节能技术

双向增压系统应用特性研究

颜笑鹏¹, 陈柏金¹, 张连华², 马海军³

(1. 华中科技大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中科聚信热能锻装备研发股份有限公司, 江苏 盐城 224000;
3. 江苏华威机械制造有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要: 针对锻造液压机系统中部分执行机构需要很高的工作压力, 而其余大部分机构所需工作压力比较低的情况, 提出了一种基于双向增压器的新型液压储能系统。泵组输出的油液经过增压系统增压后, 油液压力得到显著提升, 然后与传统液压力单元一起为主工作缸供能。该系统克服了液压机加工过程中负载的时序性和周期性, 因此, 在液压系统设计过程中可以选择装机功率更低的电机-泵组单元, 从而组成更为经济合理的液压系统。通过仿真结果可知, 采用双向增压装置后系统的输出流量保持较高的稳定性与响应性, 且与传统液压机相比, 具有质量轻、体积小和结构紧凑的优点, 应用前景十分广阔。

关键词: 锻造液压机; 双向增压器; 增压回路; 节能; 液压储能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.032

中图分类号: TG315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 03-0191-07

Research on application characteristics for bidirectional supercharging system

Yan Xiaopeng¹, Chen Baijin¹, Zhang Lianhua², Ma Haijun³

(1. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Zhongke Juxin Jieneng Thermal Forging Equipment R&D Co., Ltd., Yancheng 224000, China;
3. Jiangsu Huawei Machinery Manufacturing Co., Ltd., Yancheng 224000, China)

Abstract: For the fact that some actuators in the forging hydraulic press system required high working pressure, while most of the other actuators required relatively low working pressure, a new hydraulic energy storage system based on a bidirectional supercharger was proposed. When the output oil of pump unit was pressurized by the supercharging system, the oil pressure was significantly improved, and then together with the traditional hydraulic power unit, it supplied energy to the main working cylinder. The system overcame the timing and periodicity of the load in the process of hydraulic press. Therefore, a motor-pump unit with lower installed power was selected in the hydraulic system design process to form a more economical and reasonable hydraulic system. The simulation results show that the output flow of the system keeps high stability and responsiveness after using the bidirectional supercharging device, and compared with the traditional hydraulic press, it has the advantages of light weight, small volume and compact structure, leading to broad application prospect.

Key words: forging hydraulic press; bidirectional supercharger; booster circuit; energy-saving; hydraulic energy storage

液压机是使用液压缸产生压制成形力的生产装备, 被广泛应用于自由锻造、冲压、拉拔和金属成形中, 然而他们还因高能耗和低能效而闻名^[1-4]。如图1所示, 当传递运动或动力时, 液压机系统的每个部分均会产生能量耗散。据估计, 只有9.32%的输入能量会传递给成形能量, 其中, 装机功率和

负载功率之间的不匹配是导致低能效的主要原因^[5]。锻造液压机能效低不仅会增加运行成本和装机功率, 还会导致油温过高并降低工作稳定性。液压机行业是技术密集型和资本密集型行业, 其中技术是其核心竞争优势^[6-9]。在世界能源需求上升、地球自然资源枯竭以及各国政府大力推行节能减排政策的背景下, 研究液压机的节能方法可以有效地促进液压机的技术升级, 对于实现工业制造中的节能减排目标具有重要意义^[10-11]。

锻造液压机的装机功率是以加压慢下阶段的最大压力为基础进行设计的, 此功率要比其他成形动作的功率大, 然而加压阶段的持续时间仅占总运行

收稿日期: 2021-01-26; 修订日期: 2021-04-28

作者简介: 颜笑鹏 (1994-), 男, 博士

E-mail: yanxp@bjut.edu.cn

通信作者: 陈柏金 (1965-), 男, 博士, 教授

E-mail: chenbaijin@sina.com

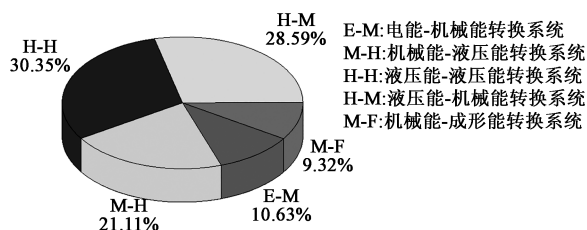


图1 液压成形装备工作周期内每个能量转换单元的能量损耗

Fig. 1 Energy loss of per energy conversion unit during working cycle for hydroforming equipment

时间的很小一部分,从而导致锻造液压机大部分时间是在低负载和无负载的情况下运行。此外,锻造液压机运动具有典型的周期性,两个相邻周期之间的间隔几乎等于一个周期的持续时间。在液压机动作循环衔接的间隙,尽管液压泵都处于卸荷状态、负载功率为零,但电动机也不会关闭,多余的能量将由卸载阀和溢流阀释放,导致系统负载功率和输出功率处于不匹配的状态,并且每个周期的输出功率明显高于负载功率。

针对上述问题,本文提出了一种基于双向增压缸的新型液压驱动系统。泵组输出的油液经过增压系统后压力和动能得到显著提升,然后与液压驱动单元一起为主工作缸供能,从而实现小功率驱动大负载以及装机功率和负载功率之间的匹配关系。

1 双向增压系统控制回路研究

1.1 双向增压器工作原理

增压器也被称为液压增压缸,主要由低压腔和高压腔两部分组成,图2为单向增压器的结构示意图。油泵输出的低压油进入大面积活塞腔,推动大面积活塞向前运动,并压缩低压腔中的液压油使之增压。根据静液压平衡原理,两侧腔室的压力比等于两个腔室活塞的面积比,可以表示为:

$$p_1 \cdot A_1 = p_2 \cdot A_2 \quad (1)$$

式中: p_1 为左侧低压腔输入压力; p_2 为右侧高压腔输出压力; A_1 为低压腔活塞面积; A_2 为高压腔活塞面积。

由式(1)可得:

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{A_1}{A_2} \quad (2)$$

令 $k = \frac{A_1}{A_2}$, 则 k 为增压器的增压比,增压比越大,输入/输出压力增益越大。

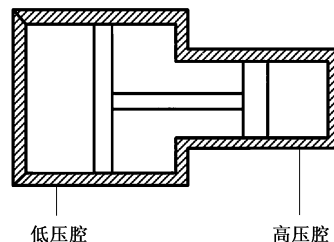


图2 单向增压缸的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of unidirectional supercharging cylinder structure

单向增压器的1个工作周期包含两个行程:排出行程和吸入行程。增压器工作在排液行程时才会实现液压油的压力增益,因此,单向增压器的压力增益过程是不连续的,可能会对液压机造成较大的压力脉动。为提高单向增压器压力增益过程的连续性,可以在大面积活塞的另一端再增加1个柱塞来搭建另一个高压腔,使增压器在吸入行程中也可以输出高压油,实现双向增压。图3为双向增压器的结构,由于它在柱塞的一次往复运动中具有两个排出行程,因此,高压油的输出不会中断,从而减少了系统内部的压力-流量脉动。

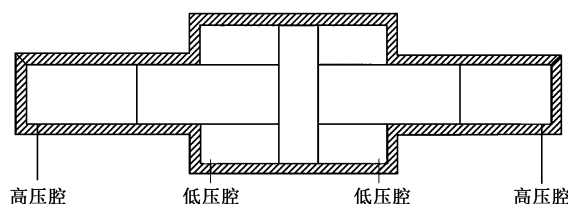


图3 双向增压缸结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bidirectional supercharging cylinder structure

以上两种增压器均是在平衡力的作用下,通过调节作用活塞的面积来改变输出压力。以某45 MN锻造液压机为例,其加压慢下阶段需要45 MN的压力,而其他阶段执行机构只需要16 MN的压力即可,这样只需在16 MN的油源上分出一支并联油路并在此油路中增设增压回路,就能减少高压泵的使用率以及系统的装机功率,此时增压回路的增压比

$$\text{设置为 } k = \frac{A_1}{A_2} = \frac{45}{16} = 2.81。$$

1.2 双向增压系统控制原理

虽然双向增压系统能在一定程度上减小压力脉动与流量脉动,但是,在换向过程中仍会产生较大的压力脉动与流量脉动。针对由于增压器换向产生的系统波动,结合液压机的负载特性,可以在增压

系统中加入高压蓄能器来减少压力脉动与流量脉动。增压节能型液压机主要由以下单元组成:液压动力单元、增压单元、液压执行单元、液压控制单元、

后处理单元,如图4所示,其中1个完整的增压单元由双向增压器、活塞式蓄能器、1套进液控制阀、1套排液控制阀和其他辅助装置组成。

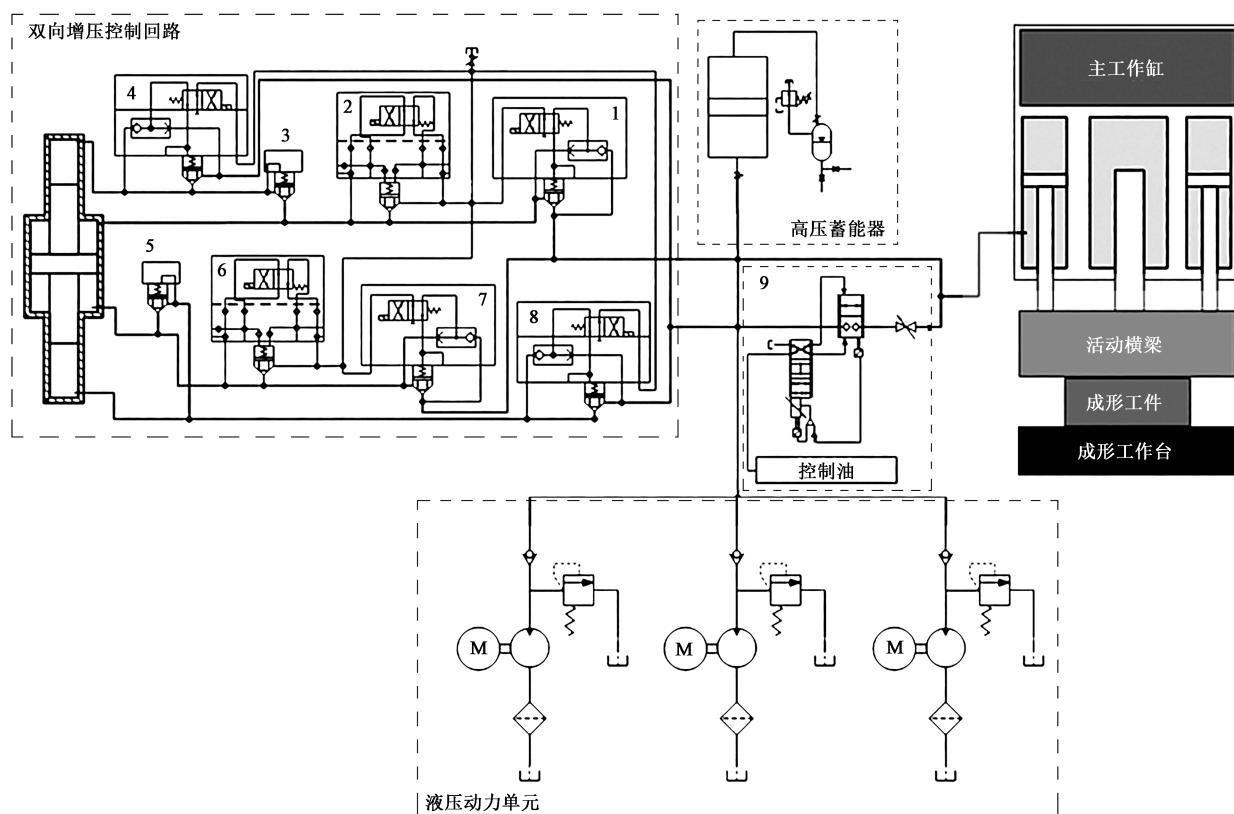


图4 双向增压系统控制原理图

1、3. 上腔进油阀 2、4. 上腔排油阀 5、7. 上腔进油阀 6、8. 上腔排油阀 9. 比例阀

Fig. 4 Control principle diagram of bidirectional supercharging system

增压器工作时, 阀1和阀3打开, 阀2和阀4关闭, 低压油自阀1和阀3进入双向增压器的上部腔室, 推动活塞向下运动, 压缩下腔中的油液, 与此同时阀6和阀8打开, 低压腔内油液从阀6回油, 高压腔内预充待增压的油液从阀8排出。通过位移传感器测量活塞的实时位置, 当柱塞下降至限定位置时, 位移传感器将信号发送到控制器, 阀1和阀3关闭, 从而完成单向增压冲程。然后, 阀5和阀7打开, 阀6和阀8关闭, 增压器开始反向增压冲程。此外, 通过调节比例阀9的开口大小来控制高压油液的速度和流量, 从而实现增压系统的高精度增压。当液压机处于空负载等待阶段时, 增压系统不会向液压机提供油液, 而是将高压油液储存在蓄压器中, 为下一个高负载加压阶段补能。

1.3 双向增压系统动态特性分析

增压器在工作时, 活塞以及柱塞杆组成的运动部件在油液压力的作用下做往复运动, 分析运动部

件的受力、速度、加速度等的变化情况对于考察增压系统的节能特性和工作特性具有重要意义。假设活塞开始从左行程终点向右行程终点运动的时刻为起始点, 忽略油温对油液粘度的影响以及缸体泄漏对系统效率的影响。

运动部件从左行程终点运动至右行程终点的受力分析如图5所示, 运动部件包括柱塞和活塞两个部分, 共受到7个水平方向的力。其中, F_1 为左侧高压腔内油液对活塞杆的推力; F_2 为左侧活塞杆向右运动过程中受到的摩擦阻力; F_3 为液压动力单元输出的低压油液进入左侧低压腔后对活塞的推力; F_4 为大活塞向右运动过程中受到的摩擦阻力; F_5 为大活塞向右运动过程中受到的阻力; F_6 为右侧活塞杆在向右运动过程中受到的摩擦阻力; F_7 为右侧高压腔内油液对活塞杆向右运动所施加的阻力。

根据牛顿第二定律可以得到增压系统的受力平衡方程为:

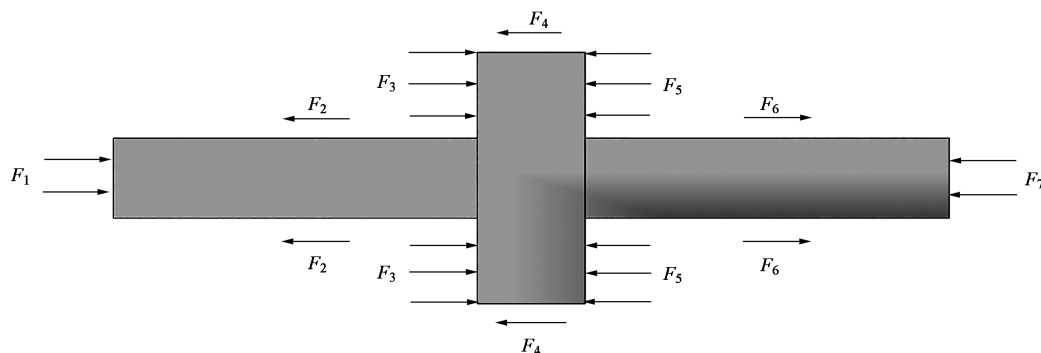


图 5 双向增压器运动部件受力分析图

Fig. 5 Force analysis diagram for moving parts of bidirectional supercharging cylinder

$$p_1 A_1 + p_3 A_2 - p_2 A_1 - p_4 A_2 - B \frac{dx}{dt} = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3)$$

式中: p_3 为右侧高压腔内的压力; p_4 为左侧高压腔内的压力; B 为液压油液粘滞阻力系数; m 为运动部件质量; x 为运动部件位移; t 为运动时间。

基于增压系统中左右两侧高压腔进油和排油插装单向阀的开闭情况, 可以将增压系统从左至右的

运动行程分为以下 3 个阶段: 阶段 1, 左侧进油单向阀和右侧排油单向阀均未打开、左侧进油单向阀打开而右侧排油单向阀未打开; 阶段 2, 左侧进油单向阀和左侧排油单向阀均打开; 阶段 3, 结合上述 3 种状态, 通过 Matlab 对式 (3) 进行求解, 可以得到双向增压系统在 1 个工作周期内的活塞速度和加速度随位移的变化关系, 如图 6~图 8 所示。

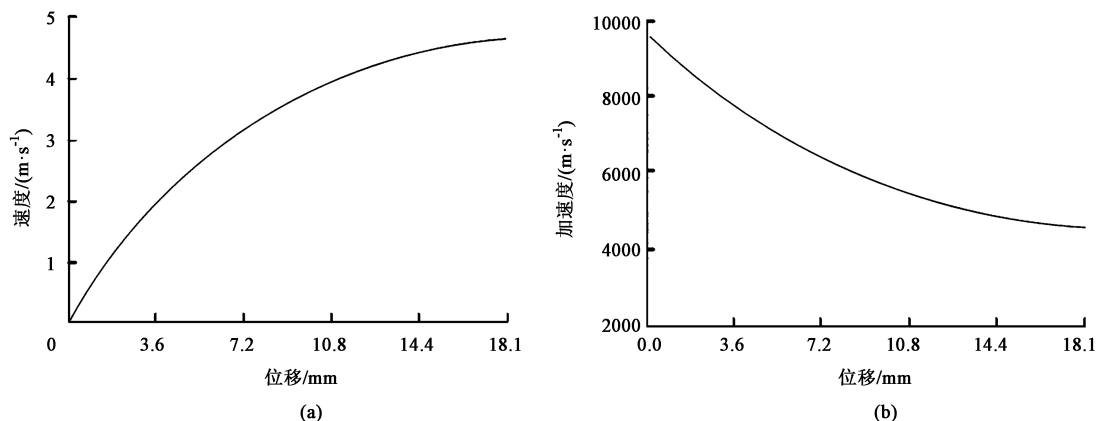


图 6 阶段 1 动力学参数随位移的变化情况

(a) 速度 (b) 加速度

Fig. 6 Changes of kinetic parameters with displacement in stage 1

(a) Velocity (b) Acceleration

通过对压力-位移变化过程分析, 可以初步得到 3 个阶段中运动部件对应的位移范围, 其中, 阶段 1 的位移范围为 0.0~18.1 mm、阶段 2 的位移范围为 18.1~68.3 mm、阶段 3 的位移范围为 68.3~750.0 mm。

2 增压控制系统加压稳定性分析

对于重型锻造液压机而言, 压力-流量稳定性

对系统的性能、效率和精度起着至关重要的作用。利用增压器实现系统压力增加是一个瞬时动作, 很容易引起压力波动和流量波动, 因此, 有必要对增压回路的增压过程进行模拟分析。

2.1 增压系统压力-流量稳定性建模

AMESim 仿真软件为用户提供了许多可选择的设计库, 可以用于模拟和分析增压系统的压力流稳定性。为了简化计算并提高仿真速度, 假设油温是固定的且油温和系统压力变化对油液体弹性模量

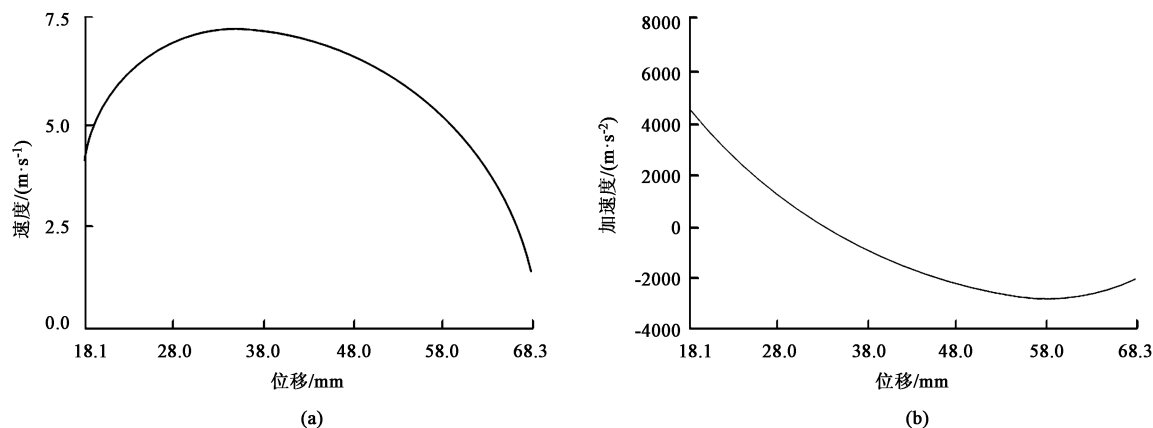


图7 阶段2动力学参数随位移的变化情况

(a) 速度 (b) 加速度

Fig. 7 Changes of kinetic parameters with displacement in stage 2

(a) Velocity (b) Acceleration

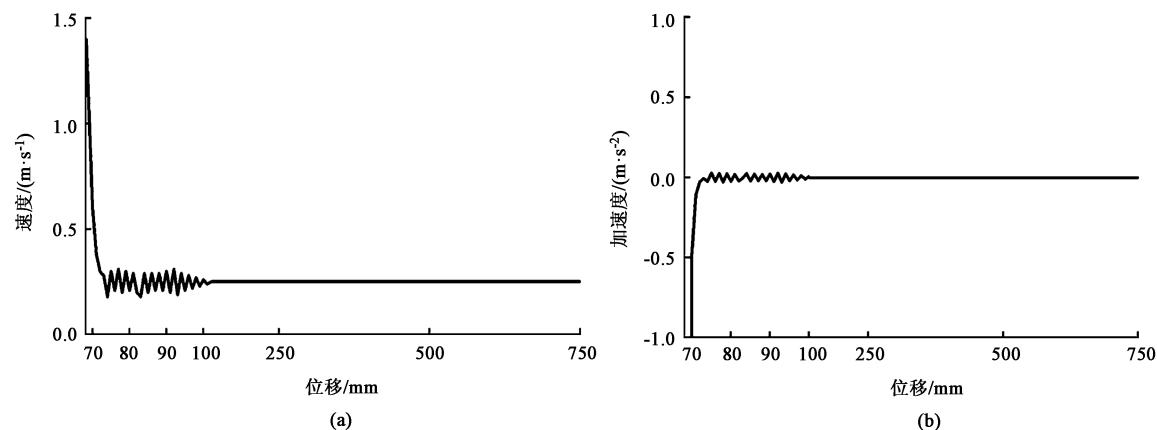


图8 阶段3动力学参数随位移的变化情况

(a) 速度 (b) 加速度

Fig. 8 Changes of kinetic parameters with displacement in stage 3

(a) Velocity (b) Acceleration

的影响可以忽略。此外, 阀门、管接头、滤油器和其他部件对液压机压力-流量稳定性的影响也可以忽略。在 AMESim 中搭建如图 9 所示的仿真模型, 表 1 为增压系统仿真参数。

2.2 仿真结果分析

通过 AMESim 仿真得到油液经过增压器前后压力变化曲线, 如图 10 所示。由仿真曲线可以看出, 油泵输出到增压器的油液在 0.2 s 内达到最大值 15 MPa, 之后围绕 15 MPa 上下波动。此时, 增压器高压腔的输出压力为 42.4 MPa, 经过计算得到增压比为 2.827, 比理论值 3 略小, 这是由于在增压过程中增压器存在泄漏和液压油压缩造成的。图 11 为增压器活塞位移曲线, 由于锻造液压机在加工过

程中会遇到不同的负载载荷, 模拟得到增压器活塞最大位移仅为 77 mm, 与增压器单行程最大位移 80 mm 相比略有余量, 这样可以保证在面临不同负载时活塞杆位移的储备量充足。

此外, 由于蓄能器的稳压作用, 压力波动明显减少, 最大压力波动率仅为 3%。液压油在高压下显示出明显的可压缩性, 压力越高, 体积压缩越大。在较高的工作压力下, 由于其自身的压缩, 流动脉动将会呈现下降的趋势, 因此, 流量脉动的峰值随着工作压力的增加而减小。当输出流量为 $750 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 在 30 MPa 时的流量脉动率仅为 2%, 显示出较好的压力-流量稳定性。图 12 为不同工作压力下的流量脉动曲线。

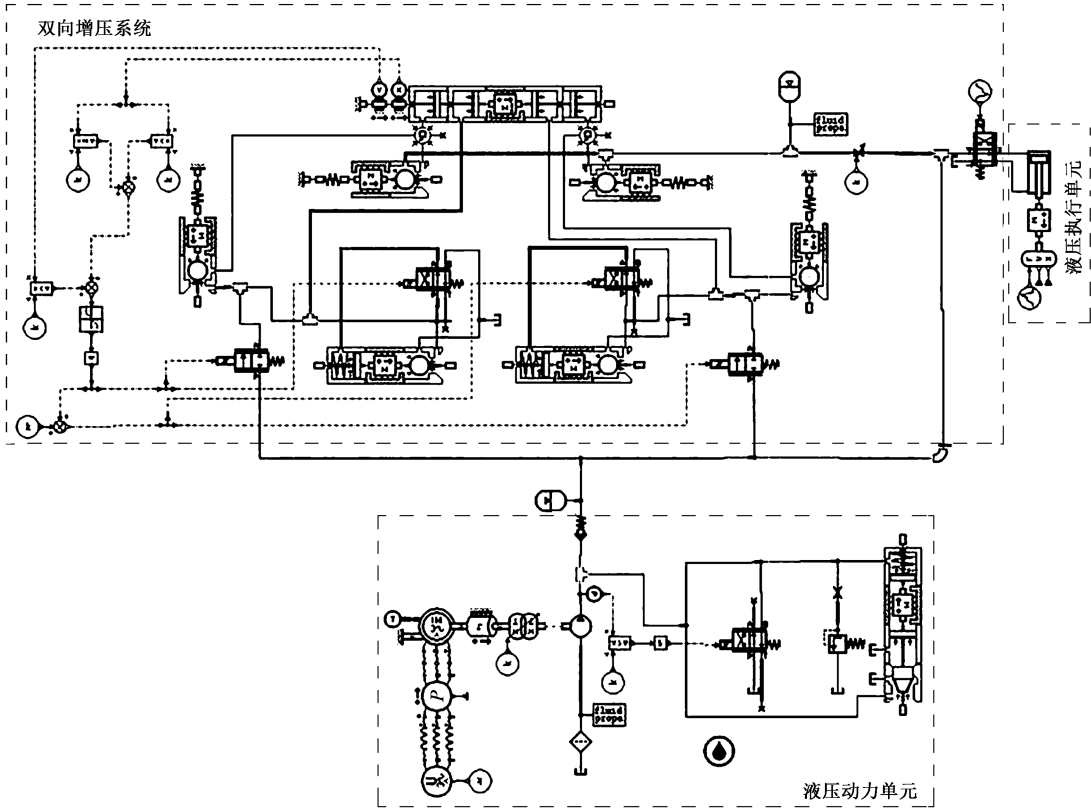


图 9 双向增压系统 AMESim 仿真模型
Fig. 9 AMESim simulation model of bidirectional supercharging

表 1 双向增压系统仿真参数
Table 1 Simulation parameters of bidirectional supercharging system

参数	数值
增压器活塞直径/mm	$\Phi 790$
增压器活塞杆直径/mm	$\Phi 470$
液压泵排量/(L · min ⁻¹)	360
柱塞质量/kg	52.3
增压器行程/mm	750
溢流阀压力/MPa	16

在锻造液压机系统中加入双向增压器，通过不断地切换换向阀，增压器就能不断地进行往复运动，增压器不论是向左或是向右运动，皆能实现高压油液输出，与单向增压器相比系统的压力脉动得到了显著降低，适用于增压行程较长和要求高压油连续不间断输出的场合。

考虑双向增压系统的投资成本，且由于小型锻造液压机本身的装机功率并不高，因此，将该系统

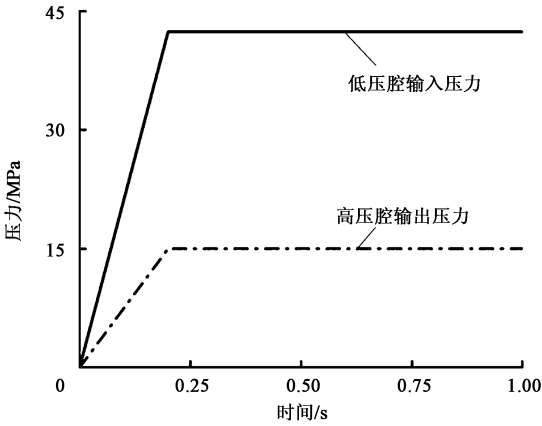


图 10 增压器高压腔与低压腔压力变化曲线
Fig. 10 Pressure change curves of high pressure chamber and low pressure chamber for supercharging cylinder

应用于小型锻造液压机未免得不偿失。然而，对于中型及以上锻造液压机而言，在主工作缸回路采用增压系统设计后，输出同等压力规格的液压机与传统液压机相比具有质量轻、体积小、结构紧凑和功率密度更高等优点，从而降低了压机的制造成本。因此，增压器行业具有广阔的应用前景，对如何科

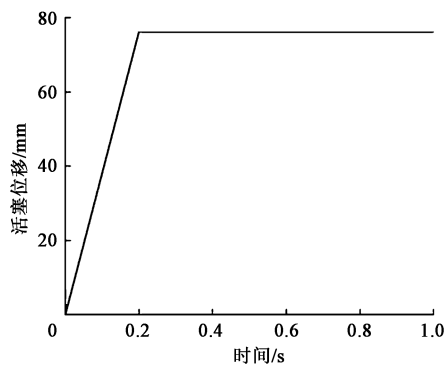


图11 增压器活塞位移曲线

Fig. 11 Displacement curve of piston for supercharging cylinder

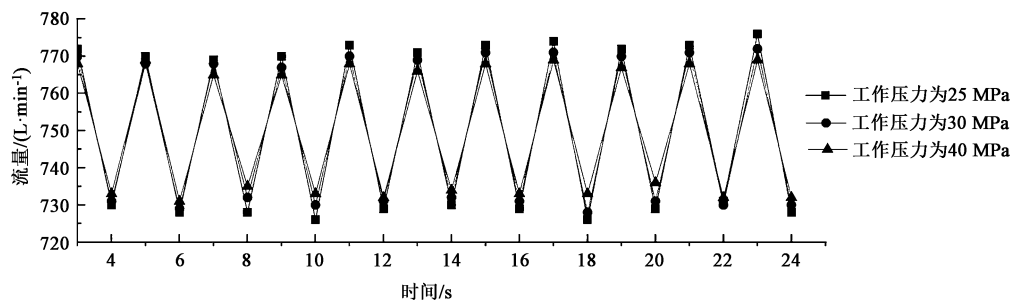


图12 不同工作压力下流量脉动曲线

Fig. 12 Flow pulsation curves under different working pressures

参考文献:

- [1] 李文, 陈柏金. 锻造液压机生产过程能耗分布规律研究 [J]. 液压与气动, 2016, (8): 112-116.
Li W, Chen B J. Energy distribution pattern of forging hydraulic press [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016, (8): 112-116.
- [2] 汪飞雪, 姚静, 胡福泰, 等. 锻造液压机振动特性机-液联合仿真 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (10): 1175-1182, 1189.
Wang F X, Yao J, Hu F T, et al. Mechanical-hydraulic co-simulation of vibration characteristics for forging hydraulic presses [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31 (10): 1175-1182, 1189.
- [3] 孔祥东, 刘杰, 翟富刚, 等. 基于AMESim的锻造操作机大车行走液压控制系统仿真研究 [J]. 机床与液压, 2010, 38 (13): 128-129, 107.
Kong X D, Liu J, Zhai F G, et al. Simulation research on driving hydraulic control system of forging manipulator based on AMESim [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38 (13): 128-129, 107.
- [4] 陈柏金, 黄树槐, 靳龙, 等. 16MN快锻液压机控制系统研究 [J]. 中国机械工程, 2008, (8): 990-993.
Chen B J, Huang S H, Jin L, et al. Development of the control system for 16MN fast forging hydraulic press [J]. China Mechanical Engineering, 2008, (8): 990-993.
- [5] 陈柏金, 黄树槐, 魏运华, 等. 锻造液压机高压卸载系统改进研究 [J]. 液压与气动, 2008, (1): 57-59.
Chen B J, Huang S H, Wei Y H, et al. Reconstruction of high pressure unloading system for the forging hydraulic press [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2008, (1): 57-59.
- [6] Yan X P, Chen B J, Zhang D W, et al. An energy-saving method to reduce the installed power of hydraulic press machines [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 538-545.
- [7] 陈铁辉, 李洪星, 赵树忠, 等. 基于AMESim的液压缸制动过程中重力势能回收系统仿真分析 [J]. 液压与气动, 2020, (8): 88-92.
Chen Y H, Li H X, Zhao S Z, et al. Simulation analysis of gravity potential energy recovery system in hydraulic cylinder braking process based on AMESim [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (8): 88-92.
- [8] 叶鹏彦, 赵秋霞, 姚平喜, 等. 汽车起重机起升机构液压系统的节能改进 [J]. 液压与气动, 2015, (9): 52-55.
Ye P Y, Zhao Q X, Yao P X, et al. Energy saving improvement of hydraulic system of car crane lifting mechanism [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015, (9): 52-55.
- [9] 曹艳, 戴丽莉, 邓睿, 等. 矿井提升机液压制动系统的建模与仿真 [J]. 液压与气动, 2019, (6): 69-74.
Cao Y, Dai L L, Deng R, et al. Modeling and simulation of hydraulic braking system of mine hoist [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019, (6): 69-74.
- [10] 朱晓基, 王强, 何晓晖, 等. 一种能量回收回路蓄能器回收效率研究 [J]. 液压与气动, 2020, (8): 155-160.
Zhu X J, Wang Q, He X H, et al. Performance of accumulator recovery efficiency in energy recovery loop [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (8): 155-160.
- [11] Yan X P, Chen B J. Analysis of a novel energy-efficient system with 3-D vertical structure for hydraulic press [J]. Energy, 2020, 218, 119518.

学合理地设计及应用增压器具有重大意义。

3 结语

在相同的负载情况下, 设备使用增压系统与传统液压系统相比具有更高的功率密度。在锻造液压机中加入双向增压器, 油泵输出的低压油液经过增压器后实现压力增加, 克服了液压机加工过程中负载的时序性和周期性, 因此, 在设计液压机时可以选择常规的中高压油泵和其他液压元器件, 实现经济节能的液压系统。