

锻压机液压增压系统的设计

周 鹏^{1,2}

- (1. 汉江师范学院 新型功能材料制备与物性研究中心, 湖北 十堰 442000;
2. 汉江师范学院 物理与电子工程学院, 湖北 十堰 442000)

摘要: 为降低锻压过程中的能量损耗, 设计了最大输出压力为 25 MN 的锻压机液压系统, 介绍了单电机驱动的并联双泵液压站, 设计了基于双向液压缸的连续增压回路, 并进行了设计计算和仿真, 完成了基于 S7-200smart 系列 PLC 及模拟量扩展模块的控制系统设计。利用 AMESim 软件建立了并联双泵液压站、连续增压回路和锻压机液压系统模型, 并分别对其进行了仿真分析。结果表明: 当液压站输出压力升高至 4.9 MPa 时, 通过低压大流量泵卸荷来减小液压站的输出流量, 避免了电机过载和溢流损耗; 分别设定液压站的不同输出压力值, 得到液压站和液压缸上腔的压力值, 增压比的计算值均在 4 左右, 与设计增压比 $k=4$ 基本吻合, 增压效果明显, 并且在加压增压过程中最大限度地减小了溢流损耗, 提高了能源的利用率, 为高压液压系统的节能设计提供了参考。

关键词: 锻压机; 液压系统; 增压回路; 输出压力; 增压比

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.024

中图分类号: TG315

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0189-07

Design on hydraulic pressure boosting system for forging press

Zhou Peng^{1,2}

- (1. Center for Research on the Preparation and Properties of New Functional Materials, Hanjiang Normal University, Shiyan 442000, China;
2. School of Physics and Electronic Engineering, Hanjiang Normal University, Shiyan 442000, China)

Abstract: In order to reduce the energy loss during the forging process, a hydraulic system of forging press with a maximum output pressure of 25 MN was designed, and a parallel dual-pump hydraulic station driven by a single motor was introduced. Then, a continuous boosting circuit based on a two-way hydraulic cylinder was designed, the calculation and simulation were conducted, and the control system based on S7-200smart series PLC and analog expansion module was designed. Furthermore, the models of parallel dual-pump hydraulic station, continuous boosting circuit and hydraulic system of forging press were established by software AMESim, and the simulation analysis were conducted on them respectively. The results show that when the output pressure of hydraulic station increases to 4.9 MPa, the output flow of hydraulic station is reduced by unloading of the low-pressure and large-flow pump to avoid motor overload and overflow loss. Different output pressure values of hydraulic station are set respectively to obtain the pressure values of hydraulic station and the upper chamber of hydraulic cylinder. The calculated value of boost ratio is around four, which is basically consistent with the design boost ratio $k=4$, and the boost effect is obvious. The overflow loss is minimized during the pressurization and boosting process, and the energy utilization rate is improved, which provides a reference for energy-saving design of high-pressure hydraulic system.

Key words: forging press; hydraulic system; boost circuit; output pressure; boost ratio

锻造是在锻压成形设备及工(模)具的挤压力作用下, 使得处于奥氏体状态的铁碳合金坯料产生塑性变形, 以获得一定的几何形状、尺寸和组织性

能锻压件的成形工序^[1]。锻造可改善铁碳合金材料的内部组织结构、细化晶粒、消除内部缺陷、保持金属流线^[2-4]、提高力学性能, 在金属材料的加工中占主导地位。机械设备中的重要金属零件基本均为锻件。锻造的精度直接影响金属零件的后续制造工艺, 精度高的锻件可以少切削甚至不切削, 进而减少零件的冷加工(机床切削)工序, 提高制造效率, 节约制造成本, 是制造业绿色可持续发展的必由之路^[5]。大型锻压机是锻压成型的主要压力设

收稿日期: 2023-08-30; 修订日期: 2023-12-03

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目(B2022222); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2020024); 汉江师范学院教学改革研究项目(2022B17)

作者简介: 周 鹏(1981-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: 407754951@qq.com

备,是衡量一个国家制造工业水平的重要因素之一[6]。

近年来,高性能金属合金材料在锻件中的应用越来越多,锻件变形所需要的挤压力也越来越大。液压锻压机是以 PLC 为控制核心,利用液压系统传动实现对锻压件的挤压作用,具有功率密度大、无极调速范围宽、驱动力大、易于实现安全保护、自动化程度高等特点,是高性能合金材料锻件的理想锻压设备,市场需求量很大。

1 锻压机液压系统特点分析

根据工艺过程要求,锻压机需要有快速下行、加压及一次增压、二次增压、保压、泄压、返回等动作。锻压机是一个高压设备,液压缸活塞杆的移动是一个由快到慢、最后接近于静止的一个动态过程,液压缸的内径较大($\Phi 500\text{ mm}$),活塞杆快速移动时所需的流量很大(大于 $220\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$),保压时的流量需求很小(接近于 0),保压时额定压力为 64 MPa ,属于超高压设备。采用溢流阀的调速回路,由于流量变化大、节流损失大,不符合制造业绿色低碳的发展要求。超高压设备的安全等级高、密封难度大[7]、制造费用大,而增压回路可以提高系统局部压力而保持系统为中高压等级。基于双泵液压站和连续增压回路的液压系统,可以满足锻压机的工艺要求,还可以提高能源的利用率。

2 锻压机液压系统设计

锻压机采用两缸同时作用的梁柱结构,最大输出压力为 25 MN ,电机额定功率为 22 kW 。液压系统在工作中还需要满足节能、运行稳定、液压冲击小等要求。

2.1 双泵液压站

液压系统的压力和流量一般均采用溢流阀和节流阀来控制,系统中的能量损耗也主要来源于溢流损耗和节流损耗,特别是在高压系统中,溢流损耗最为突出[8-10]。双泵液压站通过一个电机驱动两个不同排量 and 压力的并联液压泵,低压大流量泵的额定流量为 $160\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,额定压力为 7 MPa ;高压小流量泵的额定流量为 $60\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,额定压力为 16 MPa ;双泵液压站的最大输出流量为 $220\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,根据液压泵电机功率计算公式(式(1)),双泵同时向系统供油时,系统的压力额定值为 4.9 MPa 。

$$P = \frac{10 \times p \times Q}{612 \times 0.8} \quad (1)$$

式中: P 为液压泵电机的计算功率, kW; p 为液压站的输出压力, MPa; Q 为液压站的输出流量, ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)。

为增加锻压机对多种材料锻件的适应性,双泵液压站输出压力采用比例溢流阀控制,通过人机界面设定系统工作压力。双泵液压站输出压力升高至 4.9 MPa 时,电磁开关阀打开,低压大流量泵卸荷,高压小流量泵单独向系统供油;系统输出压力降低至 4.9 MPa 时,电磁开关阀关闭,双泵同时供油,满足了轻载低压大流量、重载高压小流量的系统压力流量需求。同时,双泵液压系统能够优化电机和液压系统的功率匹配,减小系统的溢流损耗,降低油液温升,实现压力和流量的自动调节。双泵液压站如图 1 所示。

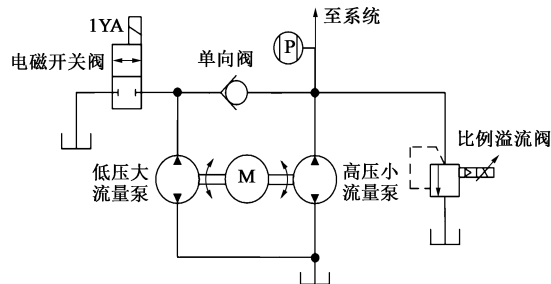


图 1 双泵液压站

Fig. 1 Double-pump hydraulic station

2.2 连续增压回路

增压缸是增压回路中常用的增压元件,利用两个油腔内活塞杆截面面积的不同实现增压。单向增压缸由于受活塞杆移动行程的限制,只能向系统提供一定量的高压油液,如图 2a 所示,其增压比 $k = \frac{A_1}{A_2}$,其中, A_1 为进油腔活塞杆截面积, A_2 为出油腔活塞杆截面积;双向增压缸有 2 个低压油腔和 2 个高压油腔[11],如图 2b 所示,活塞杆可以双向移动,低压油腔 1 进油时,高压油腔 1 向系统供油,低压油腔 2 进油时,高压油腔 2 向系统供油,通过切换行程方向实现连续增压,其增压比 $k = \frac{A_3 - A_4}{A_5}$,其中 A_3 为低压腔活塞杆截面积, A_4 为高压腔活塞杆截面积, A_5 为进油腔活塞和出油腔活塞之间连接杆的截面积。

基于双向增压缸的连续增压回路是根据增压缸的行程切换进油的低压油腔和出油的高压油腔,利用单向阀的单向流通特性实现增压,连续增压回路

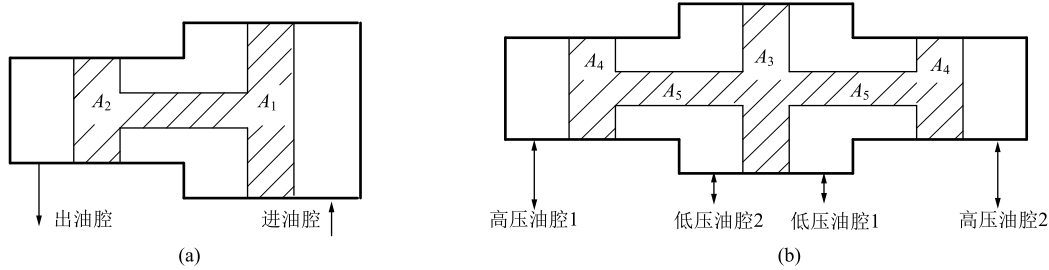


图 2 增压缸结构原理图
(a) 单向增压缸 (b) 双向增压缸
Fig. 2 Principle diagrams of boosting cylinder structure
(a) Unidirectional boosting cylinder (b) Bidirectional boosting cylinder

如图 3 所示，电磁换向阀控制双向增压缸的位移方向，低压液压油经连续增压回路后可提高液压系统局部的压力。

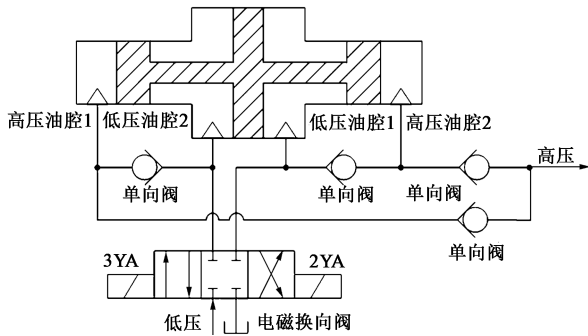


图 3 连续增压回路示意图
Fig. 3 Schematic diagram of continuous boosting circuit

双向增压缸活塞杆运行至最左边位置时，电磁阀 3YA 得电，电磁换向阀左位接入，低压液压油进入低压油腔 2 和高压油腔 1，低压油腔 1 的液压油回油箱，高压油腔 2 输出高压液压油；活塞杆运行至最右边位置时，电磁阀 2YA 得电，活塞杆再反向，实现连续增压。在此过程中无液压油通过溢流阀，溢流损耗为 0，提高了能源的利用率。

2.3 快速下行及保压泄压回路

锻压机的模锻锤在下行接触锻件前，所需的压力较小，需要有较快的运行速度，以保证锻件的始锻温度。差动连接回路将液压缸有杆腔和无杆腔连接，是增速最有效的方法之一，同时减小液压站的供油量，降低消耗，提高系统的工作效率。

系统保压时所需的高压液压流量较小，液压泵输出的大部分流量均经过溢流阀流出，增加溢流损耗。液压蓄能器是一种能量储存元件，能够提供一定压力流量的液压油，维持液压回路局部的压力，同时还可以吸收系统工作过程中的液压冲击。基于蓄能器的保压回路，在增压后的保压阶段可为液压

缸提供一定量的高压液压油，维持系统局部高压，此时液压站卸荷，液压泵电机空载运行，降低了能源的消耗。

锻压机是一种高压设备，保压结束时液压缸上腔有较高的压力，此时直接换向会产生较大的液压冲击振动，降低锻压机的使用寿命。节流阀可以释放液压缸上腔的液压能，待液压缸上腔的压力降到安全值后换向阀再换向，液压缸返回。

锻压机液压系统安装有压力变送器，实时检测液压缸上腔的压力值，控制器根据系统工作时序和压力值改变电磁阀的动作顺序，完成锻压机的工作。锻压机液压系统设计如图 4 所示。

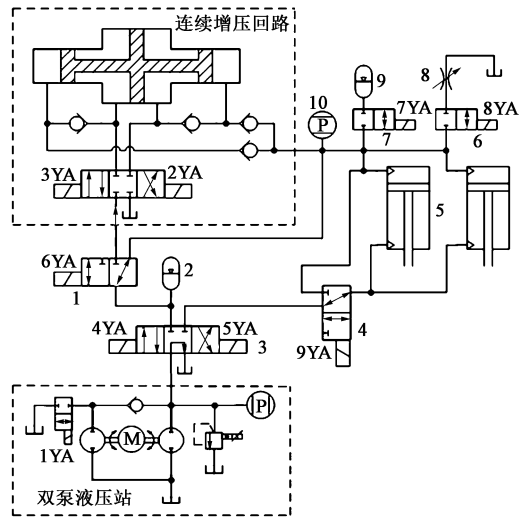


图 4 液压系统原理图
1、4. 两位三通电磁阀 2. 低压蓄能器 3. 电磁换向阀
5. 液压缸 6、7. 电磁开关阀 8. 节流阀
9. 高压蓄能器 10. 压力变送器
Fig. 4 Principle diagram of hydraulic system

2.4 液压系统的运行

(1) 初始化。初始化是锻压机上电后的准备阶段，液压站开始工作，液压缸回位。

(2) 快速下行。将准备好的锻件放入模锻工位后,按下启动按钮,电磁阀 4YA、9YA 得电,液压油经过电磁换向阀 3、两位三通电磁阀 1 进入液压缸上腔,液压缸下腔的液压油经两位三通电磁阀 4 直接返回上腔,液压站双泵供油,液压缸活塞杆伸出,驱动上模快速下行。

(3) 加压及一次增压。上模接触砧座上的锻件后开始锻压,电磁阀 9YA 断电,系统压力升高至 4.9 MPa 时,电磁阀 1YA 得电,双泵液压站中的低压大流量泵卸荷,实现一次增压。

(4) 二次增压。压力变送器检测的系统压力达到设定数值后,电磁阀 6YA、7YA 得电,连续增压回路接入系统,液压缸上腔开始增压,高压蓄能器蓄能,模锻机输出压力增加,实现二次增压。

(5) 保压。系统压力(压力变送器检测数值)达到设定数值后,电磁阀 4YA、6YA 断电,双泵液压站卸荷,电机输出功率减小,近似等于空载功率。

(6) 液压缸泄压。保压时间达到模锻件所需要的时间后,电磁阀 8YA 得电,电磁阀 7YA 断电,液压缸上腔少许高压液压油经节流阀 8 回油箱,开始泄压,上腔压力减小至安全值时,液压缸活塞杆才能返回。

(7) 液压缸返回。电磁阀 5YA 得电,液压油经电磁换向阀 3、两位三通电磁阀 4 进入液压缸下腔,液压缸上腔的液压油经两位三通电磁阀 1、电磁换向阀 3 回油箱,液压缸回位后,电磁阀 5YA、8YA 断电,液压站卸荷。

液压系统运行时,电磁阀的动作如表 1 所示,其中,“+”代表电磁阀得电。

表 1 电磁阀的动作
Table 1 Action of solenoid valve

电磁阀	4YA	5YA	6YA	7YA	8YA	9YA
快速下行	+					+
加压及一次增压	+					
二次增压	+		+	+		
保压				+		
液压缸泄压					+	
液压缸返回		+			+	

3 锻压机控制系统设计

控制系统工作的稳定性和可靠性是液压系统正常工作的保证,锻压机液压系统需要有 8 个开关量

信号控制其电磁阀的动作,3 个模拟量信号检测系统的压力和温度,锻压机还需要有各种控制按钮和工作状态指示灯。控制器采用西门子 S7-200 SMART 系列 PLC,继电器输出,CPU 型号为 SR30,扩展模块型号为 EM AR04,控制系统框图如图 5 所示。人机界面可以显示液压系统内的压力和温度,还可以根据锻件的形状及所用的材料,设定保压时间和系统压力,增强锻压机对锻件及材料的适应性。

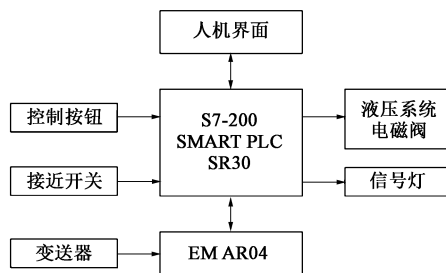


图 5 控制系统原理图

Fig. 5 Principle diagram of control system

4 锻压机液压系统稳定性分析

锻压机是一个高压重载设备,系统的压力-流量特性对锻压件的精度和力学性能、系统的效率等方面有较大的影响。基于双泵液压站和连续增压回路的锻压机液压系统是一个二级增压系统,可以有 3 个相对稳定的压力流量特性,在增压的瞬间很容易产生压力或者流量的冲击。仿真是解决液压系统问题最直接、有效的手段,通过时域分析可精确、直观地了解液压系统在每个时刻的压力流量特性。

AMESim 是一个多学科领域的复杂系统建模与仿真平台,主要应用于机械及液压系统建模、仿真和动力学分析^[12]。标准液压库 (Hydraulic, HYD)、液阻库 (Hydraulic Resistance, HR) 和液压元件设计库 (Hydraulic Component Design, HCD) 能建立各种复杂程度的液压仿真模型,一维机械库 (1D Mechanical) 和信号库 (Signal, Control) 提供电机、机械传动、信号与控制等元件模型,为液压系统的时域分析提供了便利。

4.1 双泵液压站分析

液压站的压力流量特性直接决定了液压系统的工作特性。双泵液压站是单电机驱动的双泵并联液压回路,在低压大流量泵卸荷、高压小流量泵单向系统供油时,系统输出的流量变化较大。利用一

维机械库、信号库和标准液压库建立的双泵液压站的等效模型如图 6 所示。

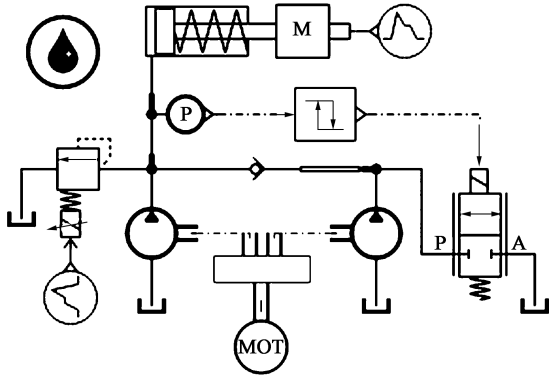


图 6 双泵液压站的等效模型
Fig. 6 Equivalent model of double-pump hydraulic station

利用斜坡信号控制比例溢流阀的压力，模拟液压站在工作过程中压力的变化。设定仿真时间为 40 s，步长为 0.01 s，双泵液压站及单泵的压力流量特性曲线如图 7 所示，从图 7 中可以看出：液压站能够根据系统输出压力的变化调节低压大流量泵的工作状态，进而改变液压站的输出流量和电机负载的功率匹配，达到节能的效果。

4.2 增压回路分析

增压回路在进行增压时，增压缸的活塞杆在液压油的作用下做连续往返运动，会造成液压系统的压力突变，产生液压振动，增压过程中压力和流量的变化情况对系统的增压效果和节能特性具有重要的现实意义。连续增压回路的等效模型如图 8 所示，设计增压比 $k=4$ 。

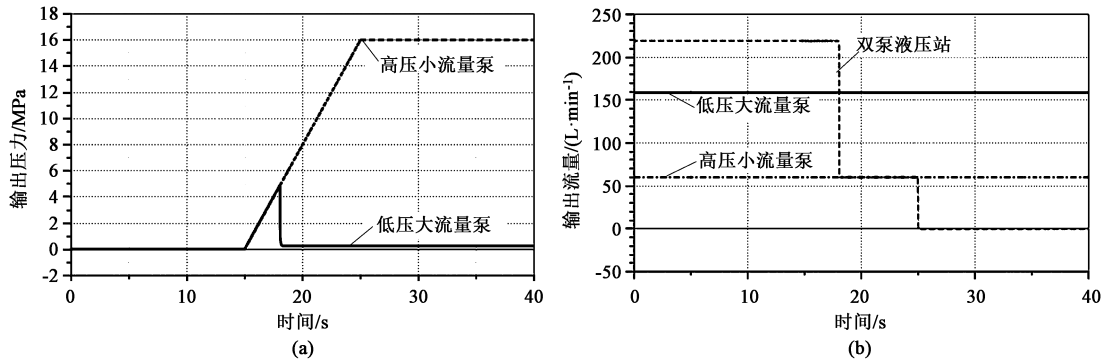


图 7 双泵液压站的压力流量特性曲线
(a) 输出压力 (b) 输出流量
Fig. 7 Pressure and flow characteristic curves of double-pump hydraulic station
(a) Output pressure (b) Output flow

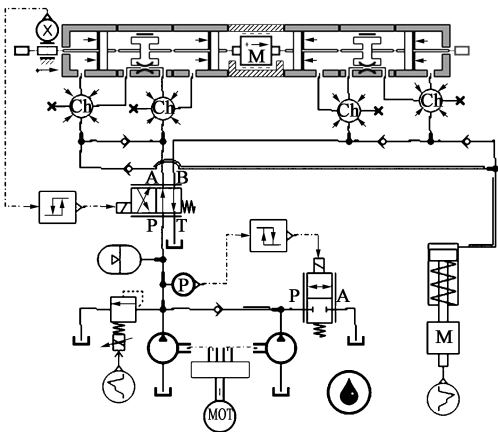


图 8 连续增压回路的等效模型
Fig. 8 Equivalent model of continuous boosting circuit

为验证增压效果，设定液压缸上所带负载的最大载荷小于理论值载荷，液压站不卸荷。仿真结果

表明，在增压缸活塞杆往复运动换向时，会造成液压站输出压力的变化，液压站输出压力呈周期性波动，但蓄能器可吸收换向冲击，减小液压站压力的波动范围。液压站的设定压力为 16 MPa 时，实际输出压力为 15.99 MPa，液压缸上腔的压力为 64.43 MPa，实际增压比 $k=4.03$ ，与设计增压比吻合（图 9）。

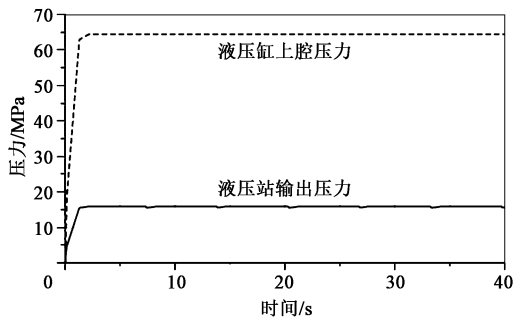


图 9 连续增压回路的压力特性曲线
Fig. 9 Pressure characteristic curves of continuous boosting circuit

4.3 液压系统分析

控制系统根据液压站的输出压力和工作时序控制液压系统的电磁阀，实现锻压机锻造工艺，为简化仿真模型，用电磁开关阀代换向阀和两位三通电磁阀，用不同时间段内载荷的变化模拟锻压机在挤压锻件过程中的负载变化，蓄能器用来吸收换向过程中产生的液压冲击。基于双泵液压站和连续增压回路建立的液压系统等效模型如图 10 所示。

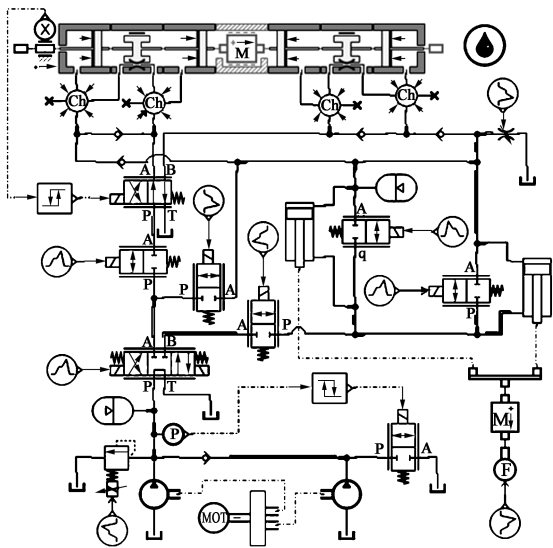


图 10 液压系统等效模型

Fig. 10 Equivalent model of hydraulic system

在仿真界面中，设置 0~15 s 为液压缸快速下行阶段，15~20 s 为加压阶段，20~25 s 为增压阶段，25 s 以后为保压阶段，设定仿真时长为 40 s，仿真步长为 0.01 s，分别设定液压站的输出压力为 8、10、12 和 16 MPa，通过时域分析得到液压站输出压力和液压缸上腔压力特性曲线，如表 2 和图 11 所示。

表 2 不同输出压力设定值下的输出压力及增压比

Table 2 Output pressure and boosting ratio at different output pressure setting values

设定压力/MPa	8	10	12	16
液压站输出压力/MPa	7.97	9.97	11.99	15.99
液压缸上腔压力/MPa	31.83	39.98	48.18	64.43
增压比	3.99	4.01	4.02	4.03

5 结语

锻压机是一种节能高效的机电液一体化设备，双泵液压站可以根据系统输出压力调节输出流量，减小溢流损失，提高能源的利用率。双泵同时供油时，系统的最大输出压力为 4.9 MPa，输出流量为 220 L·min⁻¹，低压泵卸荷时，系统的最大输出压力为 16 MPa，输出流量为 60 L·min⁻¹；连续增压回路能够提高局部回路的压力，降低系统的压力等

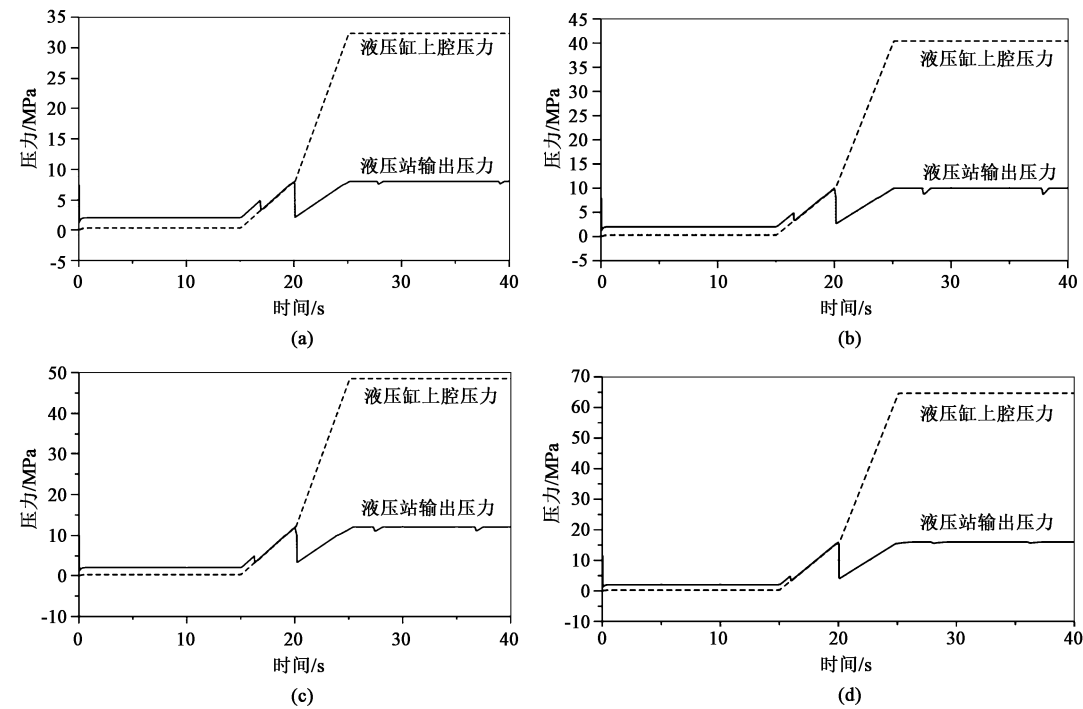


图 11 不同输出压力设定值下的系统压力特性曲线

(a) 8 MPa (b) 10 MPa (c) 12 MPa (d) 16 MPa

Fig. 11 Pressure characteristic curves of system under different output pressure setting values

级,同时也能够减小溢流损失,仿真结果也表明增压效果明显,分别设定不同的液压站输出压力,得到液压站实际输出压力和液压缸上腔压力数值,实际增压比均与设计增压比 $k=4$ 基本吻合;差动连接回路是经典的快速下行回路,可以缩短锻压机锻造前的工作行程时间,提高工作效率。基于S7-200SMART系列PLC及模拟量扩展模块的控制系统,能够实时采集液压系统的压力和温度数据,根据系统工作的时序阶段,保证系统稳定可靠的运行,为绿色低碳制造提供了一种有效的解决方法。

参考文献:

- [1] 刘艳雄,张怡俊,纪开盛,等. 锻压能耗分析及节能技术研究进展[J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (1): 1-10.
Liu Y X, Zhang Y J, Ji K S, et al. Research progress of energy consumption analysis and energy saving technology in forging and pressing [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (1): 1-10.
- [2] 胡美些,狄石磊. 坯料预热方式对AZ80镁合金轮毂组织和性能的影响[J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 39-44.
Hu M X, Di S L. Influence of billet preheating method on microstructure and properties for AZ80 magnesium alloy wheel hub [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 39-44.
- [3] 陈清,陈立辉. 挤锻复合成形Mg-4Al-2Sn镁合金的组织及性能研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50 (11): 97-99, 103.
Chen Q, Chen L H. Study on microstructure and properties of Mg-4Al-2Sn magnesium alloy formed by extrusion-forging composite forming [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (11): 97-99, 103.
- [4] 张文玉,刘先兰,邓彬,等. 轧制温度对AZ31镁合金板材组织和性能的影响[J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 158-164.
Zhang W Y, Liu X L, Deng B, et al. Influence of rolling temperature on microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 158-164.
- [5] 刘培基,刘飞,王旭,等. 绿色制造的理论与技术体系及其新框架[J]. 机械工程学报, 2021, 57 (19): 165-179.
Liu P J, Liu F, Wang X, et al. The theory and technology system of green manufacturing and their new frameworks [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57 (19): 165-179.
- [6] 黄周轩,刘赞清,张晓丽,等. 用于比例变量泵供液系统的预压阀组设计与仿真分析[J]. 锻压技术, 2023, 48 (7): 162-169.
Huang Z X, Liu Y Q, Zhang X L, et al. Design and simulation analysis on pre-charge valve group for hydraulic supply system of proportional variable pump [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (7): 162-169.
- [7] 曾永龙,赵晓斌,邓攀,等. 超高压柱塞液压缸自适应变间隙密封技术研究[J]. 机床与液压, 2022, 50 (2): 122-126.
Zeng Y L, Zhao X B, Deng P, et al. Research on adaptive variable clearance sealing technology of ultrahigh pressure plunger hydraulic cylinder [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50 (2): 122-126.
- [8] 石勇,潘炜,张跃军. 溢流阀溢流损耗能量回收系统研究[J]. 液压与气动, 2019, (12): 132-136.
Shi Y, Pan W, Zhang Y J. Energy regeneration system for pressure differential loss energy in hydraulic relief valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019, (12): 132-136.
- [9] 武艳慧,张海军,郭俊. 基于AMESim的粉末压机液压系统节能控制[J]. 机床与液压, 2022, 50 (5): 161-165.
Wu Y H, Zhang H J, Guo J. Energy saving control of metal powder press hydraulic system based on AMESim [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50 (5): 161-165.
- [10] 刘启航,万丽荣. 基于AMESim液压仿真平台的双联轴向柱塞泵液压系统分析及试验研究[J]. 机床与液压, 2022, 50 (4): 24-28.
Liu Q H, Wan L R. Hydraulic system analysis and experimental research based on AMESim hydraulic simulation platform for dual axial piston pump [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50 (4): 24-28.
- [11] 颜笑鹏,陈柏金,张连华,等. 双向增压系统应用特性研究[J]. 锻压技术, 2022, 47 (3): 191-197.
Yan X P, Chen B J, Zhang L H, et al. Research on application characteristics for bidirectional supercharging system [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (3): 191-197.
- [12] 申心雨,寇子明,杨俊,等. 基于AMESim的首绳更换装置液压系统设计与研究[J]. 机床与液压, 2023, 51 (1): 88-94.
Shen X Y, Kou Z M, Yang J, et al. Design and research on hydraulic system of head rope replacement device based on AMESim [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51 (1): 88-94.

