

负载口独立控制阀控非对称缸压力跃变消除方法研究

司国雷¹ 李彬杰¹ 魏晋华² 魏小玲² 魏列江²

(1. 四川航天烽火伺服控制技术有限公司, 成都 611130; 2. 兰州理工大学特种泵阀及流控系统教育部重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 针对液压同步控制系统中非对称缸换向时产生的压力跃变导致同步控制系统振荡甚至不稳定问题, 提出一种基于负载口独立控制阀控非对称缸系统的换向压力跃变消除方法。分析了传统阀、非对称阀和负载口独立控制阀控非对称缸系统产生压力跃变的机理。在 AMESim 中搭建传统阀与负载口独立控制阀控非对称缸系统模型, 在不同系统压力和给定信号下, 对比分析了两种系统液压缸位置跟随及换向时两腔压力跃变情况。搭建了负载口独立控制阀控非对称缸系统实验台, 验证了该方法的有效性。仿真与实验结果表明, 采用负载口独立控制阀控非对称缸系统通过模糊自适应控制算法可以很好地实现位置跟随; 可以完全消除非对称缸换向时的压力跃变, 减小系统抖动, 使得系统动作更加平稳; 当液压缸以方波动作时, 换向时压力冲击较正弦波动作时大。

关键词: 负载口独立控制阀; 非对称缸; 压力跃变; 非对称阀; 同步控制

中图分类号: TH37

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0437-09

OSID:



Elimination Method of Asymmetric Hydraulic Cylinder Pressure Jump Based on Dual-spool Independent Metering Valve

SI Guolei¹ LI Binjie¹ WEI Jinhua² WEI Xiaoling² WEI Liejiang²

(1. Sichuan Aerospace Fenghuo Servo Control Technology Corporation, Chengdu 611130, China

2. Key Laboratory of Advanced Pumps, Valves and Fluid Control System, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In hydraulic synchronous control system, the pressure jump generated by asymmetric cylinder during changing the direction results in the oscillation and even instability of the synchronous control system. Aiming at this problem, a method for eliminating pressure jump based on the dual-spool independent metering valve controlling asymmetric cylinder system was proposed. Firstly, the mechanisms of pressure jump generated by asymmetric cylinder were analyzed, in which the asymmetric cylinder was respectively controlled by traditional valve, asymmetric valve and dual-spool independent metering valve. Secondly, the models of traditional valve controlling asymmetric cylinder system and the dual-spool independent metering valve controlling asymmetric cylinder system were built in AMESim. Then the position following and the pressure jump in the traditional valve controlling asymmetric cylinder system and dual-spool independent metering valve controlling asymmetric cylinder system were compared and analyzed under different system pressures and different given signals. Finally, the experimental platform of the dual-spool independent metering valve controlling asymmetric cylinder system was built to verify the effectiveness of the proposed method. Simulation and experimental results showed that the asymmetric cylinder system controlled by the dual-spool independent metering valve can realize position following well through the fuzzy adaptive control algorithm. When the asymmetric cylinder changed direction, the pressure jump can be completely eliminated, reducing oscillation of the system, and made the system more stable. When the hydraulic cylinder was operated by square wave, the pressure impact was larger than that when the sine wave was operated. This method was beneficial to achieve good synchronous control effect.

Key words: dual-spool independent metering valve; asymmetric cylinder; pressure jump; asymmetric valve; synchronous control

收稿日期: 2024-04-03 修回日期: 2024-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3403003)

作者简介: 司国雷(1978—), 男, 研究员, 博士, 主要从事流体机械研究, E-mail: 32241416@qq.com

通信作者: 魏列江(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事电液比例控制技术研究, E-mail: weiliejiang@126.com

0 引言

在农业机械领域经常出现多个执行机构共同驱动一个大功率负载的现象,随着农业机械向小型化发展,对高功率液压同步系统的需求日益增多^[1-4]。液压同步控制系统要求两个或者多个执行元件以相同位移、速度或者角速度动作来驱动同一个负载^[5-9]。若液压同步控制系统工作在同步精度较低、系统存在振荡工况下,不仅会大幅度缩短液压设备使用寿命,甚至会损坏机械设备或造成负载倾覆等事故。液压同步控制系统的同步指标除了执行机构同步精度外,还包括系统动作平稳性、执行机构跟随误差等^[10-11]。以常见同步系统为例,非对称缸因其具有出力大、占用空间小、加工方便以及价格低廉等优点,常被用作电液比例同步系统的执行元件。虽对称缸往返动静态特性一致,但其行程长、密封性差和加工成本高等缺点制约了其在工程实际中的应用。对称阀因其制造工艺简单、加工成本低且可大批量生产,被大多数工程领域所应用,以实现非对称缸控制。但采用对称阀控制非对称缸时,由于非对称缸有杆腔与无杆腔面积不一致,会导致其在往返运动时产生压力跃变,从而造成系统振荡,不利于液压系统稳定工作^[12-16]。为解决上述问题,李漠等^[17]采用非对称阀控制非对称缸的控制方式。但对称阀制造工艺复杂,且需要专门设计并研制非对称阀匹配非对称缸参数,这不仅极大地增加了设计成本,而且还延长了工程周期。

传统对称阀和非对称阀因阀芯机械固联耦合,导致阀口开度相同或阀芯位移相同,不能有效调节有杆腔与无杆腔因面积不一致引起的流量需求,进而导致非对称缸在往返运动时产生压力跃变,造成系统振荡。负载口独立控制技术的提出打破了传统阀芯机械固联耦合,增加了控制自由度^[18-22],具有提高液压系统工作效率、节能效率和流量控制精度等优点^[23-25]。目前,大多数研究集中于负载口独立控制技术在各种液压系统中的应用^[26-27]。程敏等^[28]针对负载口独立控制系统在作业过程中时常因控制信号突变而造成执行器速度振荡及液压缸两腔压力波动问题,提出了线性滤波振动抑制方法。但对于负载口独立控制技术与非对称缸控制系统结合进行理论分析的研究较少。本文从理论上分析负载口独立控制技术增加的自由度,消除非对称缸换向时压力跃变,以减小系统振荡,增加系统平稳性,并采用仿真与实验验证相结合的方法,证明所提方法的有效性。

1 理论分析

采用负载口独立控制阀控非对称缸系统,可通过调整两个比例阀控制信号来匹配非对称缸面积比,从而消除非对称缸换向时压力跃变。从理论方面对比分析传统阀、非对称阀、负载口独立控制阀控制非对称缸系统产生压力跃变的机理及消除方法。

1.1 传统阀控非对称缸系统

传统阀(即对称阀)控非对称缸系统原理如图 1 所示,其中控制阀为对称比例阀。

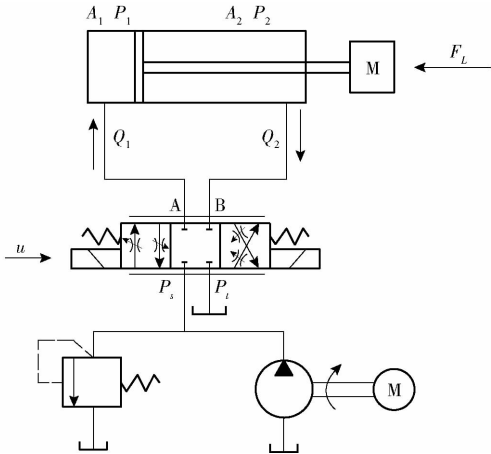


图 1 传统阀控制非对称缸系统原理图
Fig. 1 Traditional valve controlled asymmetrical cylinder system schematic

非对称缸力平衡方程为

$$A_1 P_1 - A_2 P_2 = F_L \tag{1}$$

式中 A_1 ——无杆腔有效作用面积, m^2
 P_1 ——无杆腔压力, Pa
 A_2 ——有杆腔有效作用面积, m^2
 P_2 ——有杆腔压力, Pa
 F_L ——负载力, N

比例阀出口流量为

$$\begin{cases} Q_1 = C_d x_{v1} \omega_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)} \\ Q_2 = C_d x_{v2} \omega_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} P_2} \end{cases} \quad (x_{v1} > 0) \tag{2}$$
$$\begin{cases} Q_1 = C_d x_{v1} \omega_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} P_1} \\ Q_2 = C_d x_{v2} \omega_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_2)} \end{cases} \quad (x_{v2} < 0)$$

式中 Q_1 ——通过阀口 A 流量, L/min
 Q_2 ——通过阀口 B 流量, L/min
 C_d ——阀流量系数
 ω_1 ——阀口 A 面积梯度, m
 ω_2 ——阀口 B 面积梯度, m
 x_{v1} ——无杆腔侧阀芯位移, m

x_{v2} ——有杆腔侧阀芯位移, m

ρ ——油液密度, kg/m³

P_s ——阀口 P 压力, Pa

对对称比例阀来说, $\omega_1 = \omega_2$, 且 $x_{v1} = x_{v2}$ 。令

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{A_2 v}{A_1 v} = \frac{A_2}{A_1} = n \tag{3}$$

式中 v ——负载运动速度, m/s

n ——非对称缸有杆腔与无杆腔有效作用面积之比

当液压缸活塞杆伸出时, 液压缸两腔压力为

$$P_1 = \frac{P_s n^3 + n \frac{F_L}{A_1}}{1 + n^3} \tag{4}$$

$$P_2 = \frac{P_s n^2 - n \frac{F_L}{A_1}}{1 + n^3} \tag{5}$$

当液压缸活塞杆缩回时, 液压缸两腔压力为

$$P'_1 = \frac{P_s n + n \frac{F_L}{A_1}}{1 + n^3} \tag{6}$$

$$P'_2 = \frac{P_s - n^2 \frac{F_L}{A_1}}{1 + n^3} \tag{7}$$

液压缸从伸出到缩回的过程中, 两腔压力跃变值分别为

$$\Delta P_1 = P'_1 - P_1 = \frac{P_s (n - n^3)}{1 + n^3} \tag{8}$$

$$\Delta P_2 = P'_2 - P_2 = \frac{P_s (1 - n^2)}{1 + n^3} \tag{9}$$

由式(8)、(9)可知, 非对称缸换向时压力跃变值与系统供油压力和有杆腔与无杆腔面积比有关, 且 $\Delta P_1 / \Delta P_2 = n$ 。

1.2 非对称阀控非对称缸系统

采用非对称阀控制非对称缸时, 其系统原理与图 1 相似, 不同点在于控制阀为非对称四边滑阀式比例阀, 其进出节流口面积梯度成比例, 即 $\omega_1 \neq \omega_2$, 但 $x_{v1} = x_{v2}$ 。假设非对称四边滑阀式比例阀阀口梯度比 m 为

$$m = \omega_1 / \omega_2 \tag{10}$$

由式(2)可知, 当液压缸活塞杆伸出时, 液压缸两腔压力为

$$P_1 = \frac{P_s n^3 + m^2 \frac{F_L}{A_1}}{m^3 + n^3} \tag{11}$$

$$P_2 = \frac{n^2 \left(P_s n^2 - \frac{F_L}{A_1} \right)}{m^2 + n^3} \tag{12}$$

当液压缸活塞杆缩回时, 液压缸两腔压力为

$$P'_1 = \frac{m^2 \left(P_s n + \frac{F_L}{A_1} \right)}{m^2 + n^3} \tag{13}$$

$$P'_2 = \frac{m^2 P_s - n^2 \frac{F_L}{A_1}}{m^2 + n^3} \tag{14}$$

液压缸从伸出到缩回过程中, 两腔压力跃变值为

$$\Delta P_1 = P'_1 - P_1 = \frac{P_s (nm^2 - n^3)}{m^2 + n^3} \tag{15}$$

$$\Delta P_2 = P'_2 - P_2 = \frac{P_s (m^2 - n^2)}{m^2 + n^3} \tag{16}$$

当 $m = n$ 时, 可消除液压缸换向时压力跃变。然非对称阀阀口梯度比 m 一般为 0.5, 而非对称缸面积比 n 不会是严格意义上的 0.5。因此, 采用非对称阀控制非对称缸时, 仍存在一定压力跃变。

1.3 负载口独立控制阀控制非对称缸系统

负载口独立控制阀控非对称缸系统原理如图 2 所示。液压缸无杆腔一侧由比例阀 1 控制, 液压缸有杆腔一侧由比例阀 2 控制, 此时 $\omega_1 \neq \omega_2$, 且 $x_{v1} \neq x_{v2}$ 。

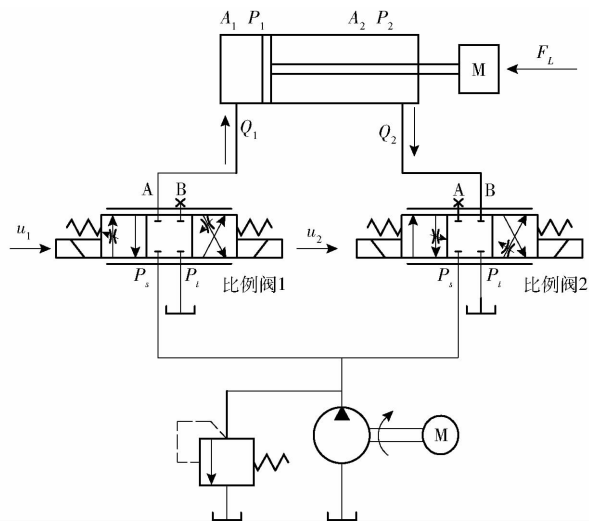


图 2 负载口独立控制阀控非对称缸系统原理图

Fig.2 Dual-spool independent metering valve controlled asymmetric cylinder system schematic

比例阀 1 和比例阀 2 阀芯位移 x_{v1} 和 x_{v2} 分别为

$$x_{v1} = k_{v1} u_1 \tag{17}$$

$$x_{v2} = k_{v2} u_2 \tag{18}$$

式中 k_{v1} 、 k_{v2} ——比例阀 1、比例阀 2 放大增益系数
 u_1 、 u_2 ——比例阀 1、比例阀 2 控制信号

当 $k_{v1} = k_{v2}$ 时, 假设

$$u_1 / u_2 = l \tag{19}$$

由式(2)可知, 当液压缸活塞杆伸出时, 液压缸两腔压力为

$$P_1 = \frac{P_s n^3 + l^2 \frac{F_L}{A_1}}{l^3 + n^3}$$

(20)

$$P_2 = \frac{n^2 \left(P_s n^2 - \frac{F_L}{A_1} \right)}{l^2 + n^3}$$

(21)

当液压缸活塞杆缩回时,液压缸两腔压力为

$$P'_1 = \frac{l^2 \left(P_s n + \frac{F_L}{A_1} \right)}{l^2 + n^3}$$

(22)

$$P'_2 = \frac{l^2 P_s - n^2 \frac{F_L}{A_1}}{l^2 + n^3}$$

(23)

液压缸在伸出到缩回过程中,两腔压力跃变值为

$$\Delta P_1 = P'_1 - P_1 = \frac{P_s (nl^2 - n^3)}{l^2 + n^3}$$

(24)

$$\Delta P_2 = P'_2 - P_2 = \frac{P_s (l^2 - n^2)}{l^2 + n^3}$$

(25)

当 $l = n$ 时,即可完全消除非对称缸换向时压力跃变。

综上,阀控非对称缸往返运动切换时产生振荡失稳的本质原因是非对称缸有杆腔与无杆腔有效作用面积不同,活塞杆运动对两腔流量需求不同。而传统非负载口独立控制阀两个阀口在一根阀芯上,为机械联动,阀芯运动产生相同的阀口开度增量,进入有杆腔和无杆腔流量相同,导致非对称缸往返切换时,两腔产生压力跃变。而负载口独立控制阀因两个阀口可独立控制,可完全根据非对称缸两腔流量需求控制阀口比例关系,故可从根本上解决阀控非对称缸往返运动切换时振荡失稳问题。

2 仿真验证

在 AMESim 软件中搭建传统阀与负载口独立控制阀控非对称缸系统模型,如图 3 所示。电机与定量泵为整个系统提供能源,溢流阀用于调定泵出口压力。图 3a 中,选用 1 个三位四通对称比例阀控制非对称缸两腔。图 3b 中,选用 2 个三位四通比例阀控制非对称缸两腔,以此构成负载口独立控制系统。通过调整比例阀控制电流,从而控制比例阀开度和出口流量,实现对非对称缸控制。

位移传感器用于实时监测非对称缸位置,质量块用于模拟系统负载,负载力用于模拟外界干扰,限幅模块用于对比例阀控制电流信号进行限幅,避免控制信号大于比例阀额定电流。采用 AMESim 与 Matlab 的联合仿真实现对负载口独立控制双缸同步

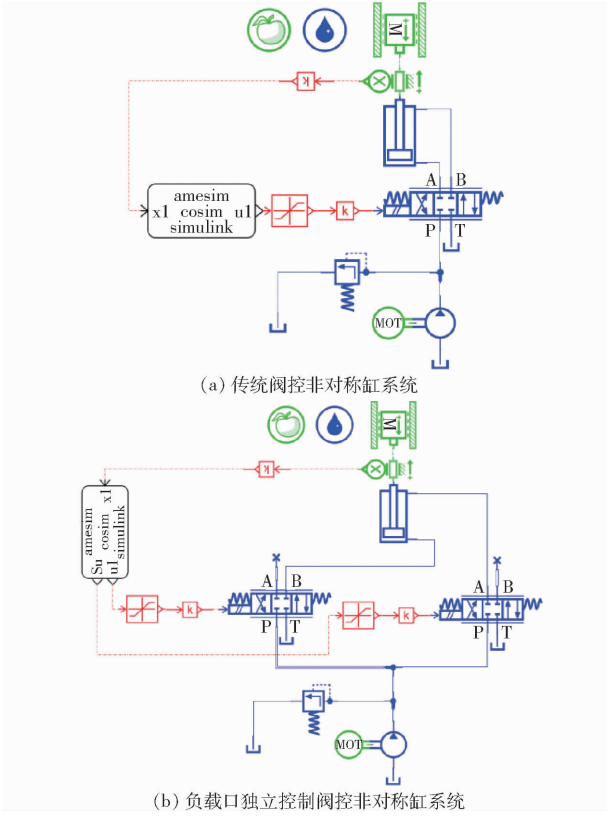


图 3 阀控非对称缸系统 AMESim 模型对比

Fig.3 AMESim model comparison of valve controlled asymmetric cylinder system

系统控制,在 Simulink 中搭建模糊自适应控制算法模型。

2.1 系统模型可行性验证

为验证系统模型可行性,选取负载口独立控制阀控非对称缸系统进行仿真,其主要参数如表 1 所示,控制算法模型在 Matlab 的 Simulink 中实现,控制框图如图 4 所示。

表 1 仿真模型主要参数设置

Tab.1 Main parameters setting of simulation model	
参数	数值
泵转速/(r·min ⁻¹)	1 000
泵排量/(mL·r ⁻¹)	100
溢流阀流量压力梯度/(L·MPa·min ⁻¹)	5 000
比例阀额定电流/A	0.7
比例阀固有频率/Hz	20
比例阀阻尼比	0.5
流量系数	0.7
液压缸有效行程/mm	650
液压缸缸径/mm	63
活塞杆直径/mm	35
有杆腔与无杆腔面积比	0.7
粘性阻尼系数/(N·s·m ⁻¹)	1 000
负载质量/kg	100
库仑摩擦力/N	20
粘性摩擦系数/(N·s·m ⁻¹)	0.1

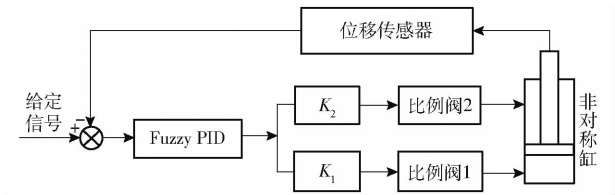


图 4 负载口独立控制阀控非对称缸系统框图

Fig. 4 Dual-spool independent metering valve controlled asymmetric cylinder system block diagram

设置系统供油压力为 6 MPa, 给定阶跃信号幅值为 10 mm, 仿真结果如图 5 所示。液压缸响应时间为 6.3 s 左右, 无超调, 可以快速达到稳态位置, 说明系统模型及控制算法设计可行。

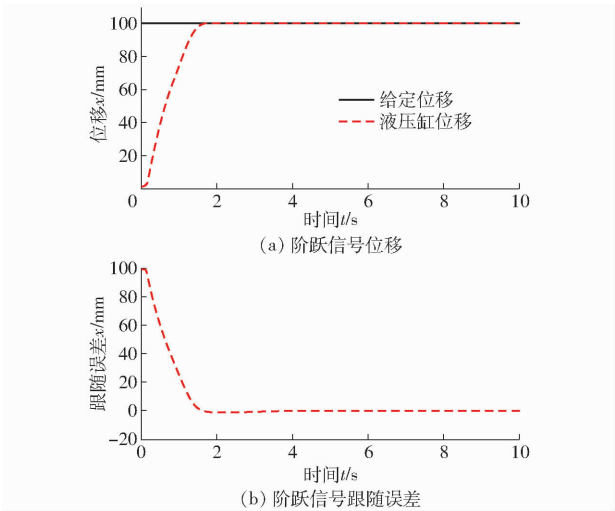


图 5 负载口独立控制阀控非对称缸系统位置跟随仿真结果

Fig. 5 Position following of dual-spool independent metering valve controlled asymmetric cylinder system

2.2 仿真结果

设系统供油压力为 6 MPa, 给定频率为 0.2 Hz、幅值 100 mm 的方波信号, 2 种系统液压缸位置跟随状况及液压缸换向时两腔压力变化曲线如图 6 所示。给定频率为 0.2 Hz、幅值 50 mm 的正弦波信号, 2 种系统液压缸位置跟随及液压缸换向时两腔压力变化曲线如图 7 所示。

从图 6、7 可知, 传统阀和采用负载口独立控制阀控非对称缸系统都能很好地实现液压缸位置跟随。在传统的阀控非对称缸系统中, 当液压缸以方波或者正弦波动作时, 无杆腔压力跃变值为 2 MPa, 有杆腔压力跃变值为 1.3 MPa。在负载口独立控制阀控非对称缸系统中, 当液压缸以方波或者正弦波动作时, 无杆腔压力保持在 2.4 MPa, 压力跃变值为 0.036 MPa; 有杆腔压力保持在 3.6 MPa, 压力跃变值为 0.053 MPa。表明采用负载口独立控制方式匹配液压缸的面积比, 可消除非对称缸换向时压力跃变。

为验证非对称缸换向时压力跃变还与油源压力有

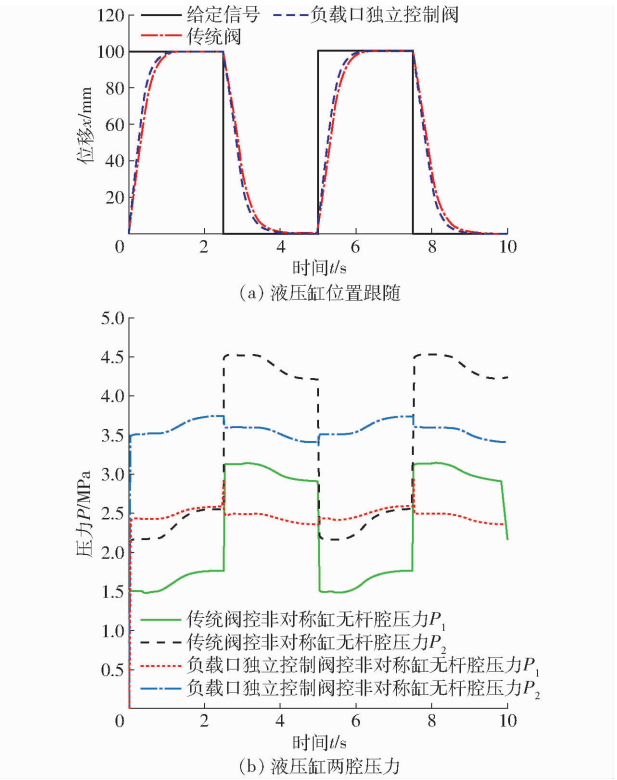


图 6 方波信号下位置跟随及两腔压力仿真对比 (6 MPa)

Fig. 6 Position following and two chamber pressure simulation comparison under square wave signal (6 MPa)

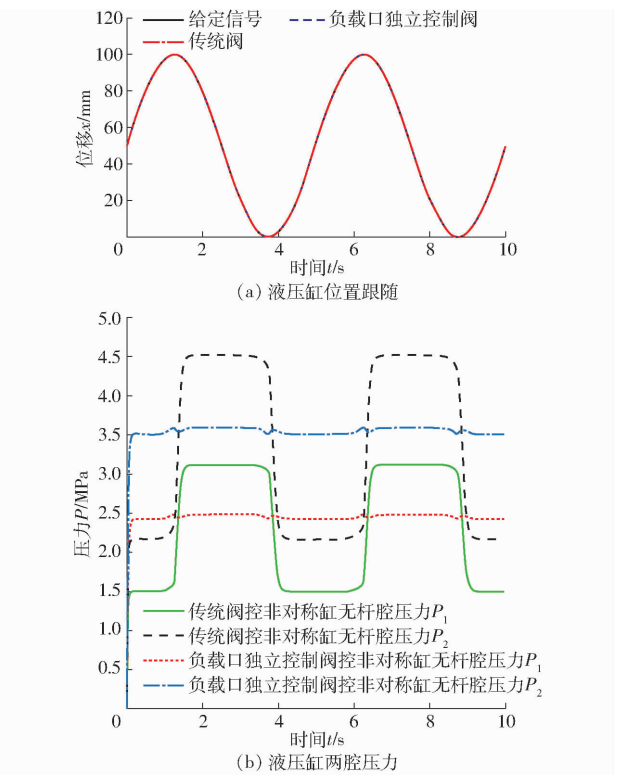


图 7 正弦信号下位置跟随及两腔压力仿真对比 (6 MPa)

Fig. 7 Position following and two chamber pressure simulation comparison under sinusoidal signal (6 MPa)

关, 将系统压力设定为 10 MPa, 其他保持参数一致, 对比分析液压缸位置跟随情况与液压缸两腔压力变化。

当供油压力为 10 MPa、给定频率为 0.2 Hz、幅

值 100 mm 的方波信号,2 种系统液压缸位置跟随及液压缸换向时两腔压力变化曲线如图 8 所示。

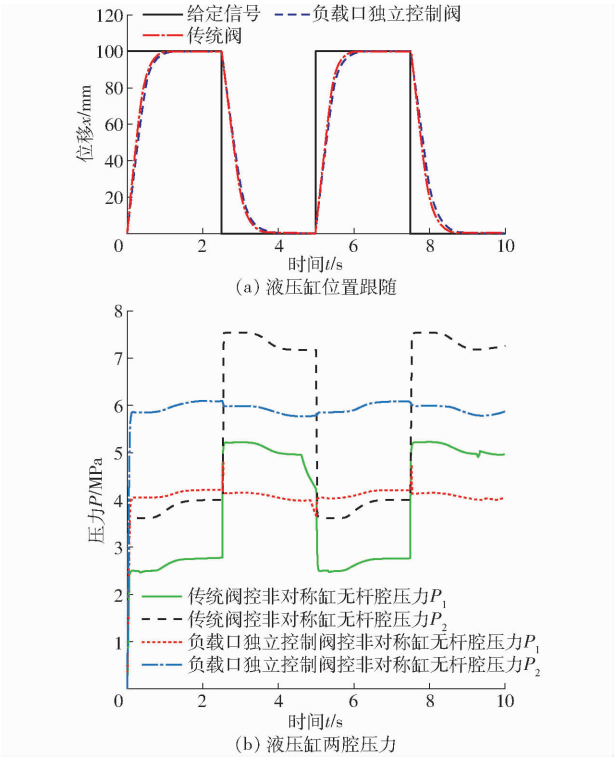


图 8 方波信号下位置跟随及两腔压力仿真对比(10 MPa)
Fig. 8 Position following and two chamber pressure simulation comparison under square wave signal (10 MPa)

当供油压力为 10 MPa、给定频率为 0.2 Hz、幅值 50 mm 的正弦波信号,2 种系统液压缸位置跟随及液压缸换向时两腔压力变化曲线如图 9 所示。

从图 8、9 可知,传统的阀控非对称缸系统和采用负载口独立控制阀控非对称缸系统都能很好地实现液压缸位置跟随。当系统油源压力为 10 MPa 时,在传统的阀控非对称缸系统中,液压缸换向时无杆腔压力跃变值为 2.7 MPa,有杆腔压力跃变值为 3.9 MPa。在负载口独立阀控非对称缸系统中,有杆腔压力保持在 4 MPa,压力跃变值为 0.02 MPa;无杆腔压力保持在 6 MPa,压力跃变值为 0.028 MPa。

因此,将负载口独立控制引入双缸同步系统中,可消除非对称缸换向时压力跃变,增加系统平稳性,降低系统噪声,有利于双缸同步控制。

3 实验验证

负载口独立控制阀控非对称缸系统实验台如图 10 所示。为实现负载口独立控制,实验台采用两个外接先导式三位四通比例阀,控制液压缸的两腔来实现负载口独立控制。采用 SIRIUSi 8xSTG + 数据采集模块实现控制器与上位机的指令发送与指令接收。该数据采集模块支持多通道模拟信号与数字信号实时同步采集,支持 CAN 总线、USB 等实现信

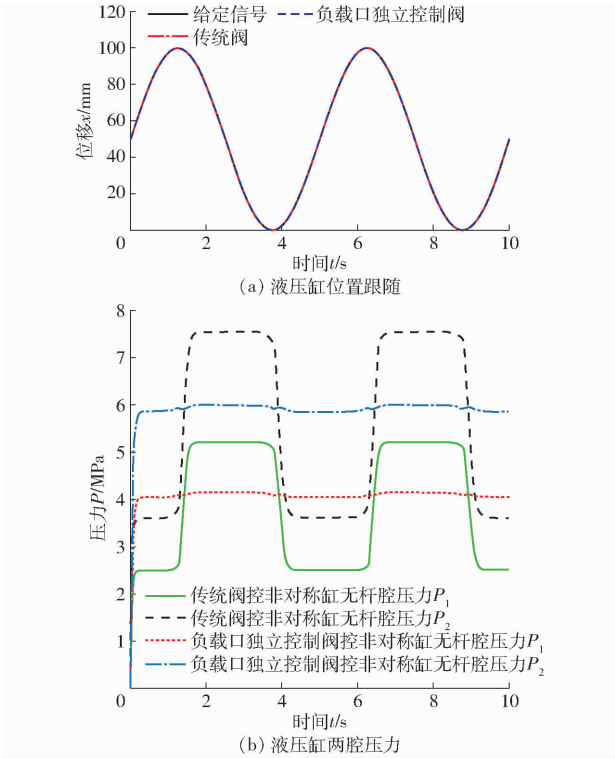


图 9 正弦信号下位置跟随及两腔压力仿真对比(10 MPa)
Fig. 9 Position following and two chamber pressure simulation comparison under sinusoidal signal (10 MPa)

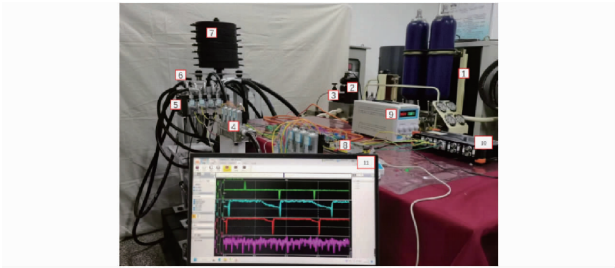


图 10 实验台
Fig. 10 Experimental apparatus
1. 泵站 2. 溢流阀 3. 减压阀 4. 先导阀 5. 主阀 6. 液压缸
7. 负载砝码 8. 控制器 9. 24 V 直流电源 10. 数据采集模块
11. 上位机

号的传输与实时同步采集。
先导阀选用日本川崎公司 4KWE5A_50 型直动式比例减压阀,其关键参数如表 2 所示。

表 2 4KWE5A_50 型比例减压阀关键参数 Tab. 2 Key parameters of proportional pressure reducing valve-4KWE5A_50	
参数	数值
最高耐压/MPa	7
出口压力/MPa	0 ~ 2.9
额定电流/A	0.7
比例阀固有频率/Hz	20
比例阀阻尼比	0.5
油温/℃	-20 ~ 90
最大流量/(L·min ⁻¹)	10

主阀选用三位四通比例阀作为实验系统的主阀,如图 11 所示。其内置 LVDT 用于监测阀芯位置,并在主阀出油口与进油口设计测压接口,其关键参数见表 3。



图 11 主阀实物图
Fig. 11 Main valve physical diagram

表 3 主阀关键参数

Tab. 3 Key parameters of main valve

参数	位置	数值
最大压力/MPa	P 口	42
	A/B 口	42
	T 口	2.5/4
额定流量/(L·min ⁻¹)	P 口	140/230
	A/B 口	100/125
主阀阀芯行程/mm		± 7
死区长度/mm		± 1.5
控制油口压力/MPa		0.5 ~ 1.5

液压缸选用单出杆非对称液压缸作为实验系统执行元件,其参数如表 4 所示。液压缸无杆腔内置磁致伸缩位移传感器,用于检测液压缸活塞杆位移。实验台中关键元件以及其他组成元件未给出参数与仿真保持一致。

表 4 液压缸关键参数

Tab. 4 Hydraulic cylinder key parameters

参数	数值
液压缸缸径/mm	63
活塞杆杆径/mm	35
液压缸行程/mm	650
工作压力/MPa	14

3.1 系统压力 6 MPa 和 10 MPa

调定系统压力为 6、10 MPa,给定频率 0.2 Hz,幅值 100 mm 的方波信号,液压缸位置跟随实验结果与液压缸两腔压力如图 12、13 所示。

3.2 结果分析

仿真及实验结果验证了方法有效性。采用负载口独立控制技术阀控缸系统通过模糊自适应控制算法可以很好地实现位置跟随。当液压缸换向时可完全消除非对称缸换向时压力跃变,减小系统抖动,使得系统动作更加平稳;当液压缸以方波动作时,换向时压力冲击比以正弦波动作时换向时大,这是由于

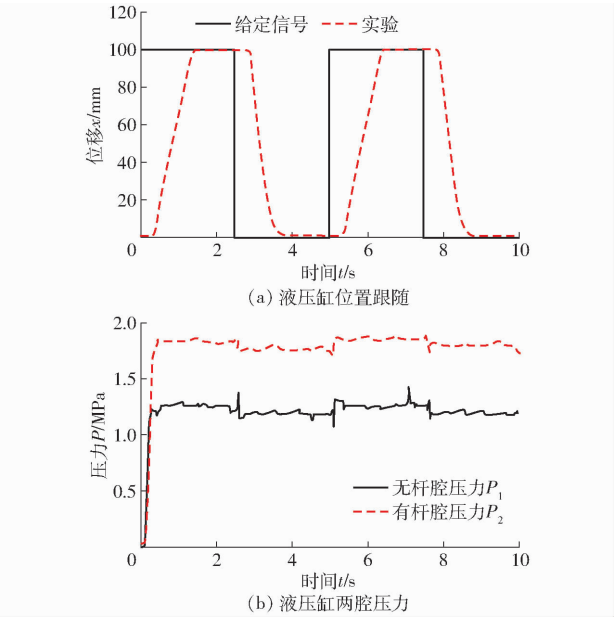


图 12 方波信号下位置跟随及两腔压力实验结果(6 MPa)
Fig. 12 Experimental results of position following and two chamber pressure under square wave signal (6 MPa)

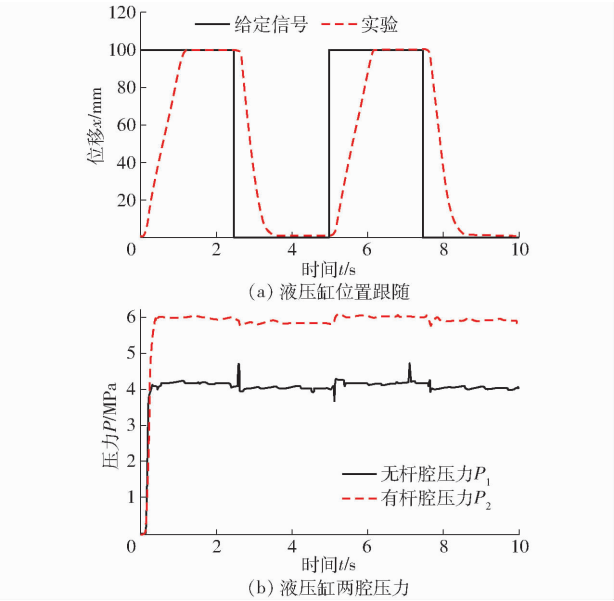


图 13 方波信号下位置跟随及两腔压力实验结果(10 MPa)
Fig. 13 Experimental results of position following and two chamber pressure under square wave signal (10 MPa)

以方波动作时液压缸需快速换向,惯性等原因也使其相较于以正弦波动作时的压力冲击较大。

4 结束语

通过理论分析、仿真分析及实验验证,证明提出的基于负载口独立控制阀控非对称缸系统的消除换向压力跃变方法具有可行性,可减小液压同步系统抖动,使得系统动作更加平稳;当液压缸以方波动作时,换向时压力冲击比以正弦波动作时换向时大,这是由于以方波动作时液压缸需快速换向,惯性等原因也使其相较于以正弦波动作时压力冲击较大。

参 考 文 献

- [1] 付永领,赵克定,刘庆和. 双电液伺服马达同步驱动的研究[J]. 航空学报, 1996, 17(2): 243–247.
FU Yongling, ZHAO Keding, LIU Qinghe. Study on dual electro-hydraulic servo motor synchronizing drive [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1996, 17(2): 243–247. (in Chinese)
- [2] 白慧芳. 基于解析模型的液压调平系统的故障诊断[D]. 太原: 中北大学, 2015.
BAI Huifang. Fault diagnosis of hydraulic leveling system based on the analytical model[D]. Taiyuan: North University of China, 2015. (in Chinese)
- [3] 李胜永. 锻造液压机双缸同步控制系统研究[J]. 液压与气动, 2020, 44(7): 99–105.
LI Shengyong. Research on the synchronous control system of two cylinders for forging hydraulic press[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, 44(7): 99–105. (in Chinese)
- [4] BAK M K, HANSEN M R. Model based design optimization of operational reliability in offshore boom cranes[J]. International Journal of Fluid Power, 2013, 14(3): 53–65.
- [5] ZHOU Y, ZHANG Q, HE W. Simulation of hydraulic continuous lifting system of offshore platform based on fuzzy PID control [C]//2016 9th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). IEEE, 2016: 91–94.
- [6] 杨文彬,胡军科,王子坡. 两级双向液压同步控制系统动态特性仿真[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(6): 1107–1113.
YANG Wenbin, HU Junke, WANG Zipu. Dynamic characteristics simulation of two-stage bidirection hydraulic synchronization control system[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2014, 48(6): 1107–1113. (in Chinese)
- [7] 兰志, 商李隐, 王书浩. 高可靠重载升降装置技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2021, 45(1): 91–98.
LAN Zhi, SHANG Liyin, WANG Shuhao. Research on high reliability and heavy load lifting device technology[J]. Missiles and Space Vehicles, 2021, 45(1): 91–98. (in Chinese)
- [8] 汪成文,焦宗夏,罗才瑾. 基于改进的速度同步控制的电液负载模拟器[J]. 航空学报, 2012, 33(9): 1717–1725.
WANG Chengwen, JIAO Zongxia, LUO Caijin. An improved velocity synchronization control on electro-hydraulic load simulator [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(9): 1717–1725. (in Chinese)
- [9] 黄华. 电液多缸位置伺服系统同步控制策略研究[D]. 镇江:江苏大学, 2022.
HUANG Hua. Synchronous control strategy of electro-hydraulic multiple cylinders position servo system[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)
- [10] 李皓楠. 巷道临时支护支架多执行机构液压同步系统设计研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2016.
LI Haonan. Design and research of hydraulic synchronous system on temporary support multi actuators in roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese)
- [11] 黄海涛. 液压缸同步回路的设计与应用[J]. 流体传动与控制, 2006, 4(5): 39–41.
HUANG Haitao. Design and application on multi-cylinder synchronizing control circuit[J]. Fluid Power Transmission & Control, 2006, 4(5): 39–41. (in Chinese)
- [12] 孙成通. 基于 MATLAB/SIMULINK 的非对称缸系统压力跃变的分析方法[J]. 机械制造与自动化, 2005, 34(4): 30–34.
SUN Chengtong. Analytical method systematic pressure jump for asymmetrical hydraulic cylinder based on MATLAB/SIMULINK[J]. Machine Building & Automation, 2005, 34(4): 30–34. (in Chinese)
- [13] 刘卫萍,熊保玉. 船舶动态模拟平台阀控非对称缸系统的建模和特性分析[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(10): 110–112.
LIU Weiping, XIONG Baoyu. Modeling and characteristic analysis of valve controlled asymmetric cylinder system for ship dynamic simulation platform[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(10): 110–112. (in Chinese)
- [14] 陈立娟,张苏南,高伟,等. 基于轴控阀的阀控非对称缸位置控制系统研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(16): 150–159.
CHEN Lijuan, ZHANG Su'nan, GAO Wei, et al. Research on valve-controlled asymmetric cylinder position control system based on shaft-controlled valve[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(16): 150–159. (in Chinese)
- [15] 郭吉昌,吴勇,杨喜晶. 基于 AMESim 的运动平台液压系统压力跃变分析[J]. 机床与液压, 2014, 42(17): 164–166, 171.
GUO Jichang, WU Yong, YANG Xijing. Pressure jump analysis on hydraulic system of motion platform based on AMESim[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(17): 164–166, 171. (in Chinese)
- [16] 吴勇,杨喜晶,刘广治,等. 伺服阀控非对称缸的压力跃变分析与仿真[J]. 液压气动与密封, 2011, 31(7): 30–33.
WU Ying, YANG Xijing, LIU Guangzhi, et al. The analysis and simulation of pressure jump on asymmetric cylinder system controlled by symmetric servo valve[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2011, 31(7): 30–33. (in Chinese)
- [17] 李漠,任好玲. 非对称阀控制非对称缸位置伺服系统理论分析与试验研究[J]. 机械制造与自动化, 2005, 34(4): 55–57.
LI Mo, REN Haoling. Theoretic analysis and experiment research of displacement servo system on asymmetry cylinder controlled by asymmetry valve[J]. Machine Building & Automation, 2005, 34(4): 55–57. (in Chinese)
- [18] 丁孺琦,徐兵,张军辉. 负载口独立控制系统压力速度复合控制的耦合特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(6): 1126–1134.
DING Ruqi, XU Bin, ZHANG Junhui. Coupling property of pressure and velocity compound control in individual metering systems[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2017, 51(6): 1126–1134. (in Chinese)

[19] 曹剑, 徐兵, 杨华勇, 等. 负载口独立控制系统静态工作点选取原则及仿真分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 11 – 15.
CAO Jian, XU Bing, YANG Huayong, et al. Operation points and simulation analysis of fluid power system based on separate control of actuator ports[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(6): 11 – 15. (in Chinese)

[20] 魏晋华. 负载口独立控制非对称缸同步系统研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
WEI Jinhua. Study of the load port independent control asymmetric hydraulic cylinder synchronization system[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023. (in Chinese)

[21] CHOI K, SEO J, NAM Y, et al. Energy-saving in excavators with application of independent metering valve[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(1): 387 – 395.

[22] 李泽龙, 岳路宏, 杨敬. 变转速负载敏感进出口独立控制系统特性研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(11): 3132 – 3144.
LI Zelong, YUE Luhong, YANG Jing. Research on characteristics of variable speed load sensitive inlet and out-let independent control system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(11): 3132 – 3144. (in Chinese)

[23] 丁孺琦, 江来, 李刚, 等. 电液负载敏感负载口独立多模式切换控制能效研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 433 – 442.
DING Ruqi, JIANG Lai, LI Gang, et al. Energy efficiency of electro-hydraulic load sensing independent metering multi-mode switching control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 433 – 442. (in Chinese)

[24] 牛明杰. 面向负载口独立液压阀电控系统开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
NIU Mingjie. Development of electronically controlled system for independent metering hydraulic valve[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)

[25] 钟麒. 面向负载口独立控制的可编程阀关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
ZHONG Qi. Research on key technologies of programmable valve for independent metering control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)

[26] 陈正, 吕立彤, 王飞, 等. 基于容腔压力规划的非模式切换负载口独立电液系统运动控制[J]. 机械工程学报, 2024, 60(2): 302 – 312.
CHEN Zheng, LÜ Litong, WANG Fei, et al. Motion control of independent metering electro-hydraulic system based on chamber pressure planning without mode switch[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(2): 302 – 312. (in Chinese)

[27] 孙伟, 刘恒, 陶建峰, 等. 基于 IndRNN – 1DLCNN 的负载口独立控制阀控缸系统故障诊断[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(10): 2028 – 2041.
SUN Wei, LIU Heng, TAO Jianfeng, et al. IndRNN – 1DLCNN based fault diagnosis of independent metering valve-controlled hydraulic cylinder system[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(10): 2028 – 2041. (in Chinese)

[28] 程敏, 侯严迪, 丁孺琦. 负载口独立控制系统非线性滤波振动抑制方法[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(4): 200 – 210.
CHENG Min, HOU Yandi, DING Ruqi. A nonlinear filtering method of vibration suppression for the independent metering control system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(4): 200 – 210. (in Chinese)