

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.003

# 非对称泵控变载伺服系统设计及负载工况分析

沈超<sup>1</sup>, 李威<sup>2</sup>

(1. 湖南三一工业职业技术学院 工程机械学院, 湖南 长沙 450064;

2. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**变载伺服系统在压力机等高负载领域得到广泛应用。为提高变载伺服系统的不平衡流量控制精度,引入非对称柱塞泵控制,给出非对称泵的泵控变载伺服系统设计。该系统非对称泵与液压缸进回油流量始终匹配,实现对执行机构速度或位置控制。基于 AMESim 平台展开仿真分析。研究表明:空载时非对称泵控制伺服系统能够对差动气缸工作状态机进行调节,具有快速的响应能力和较好的动力学特性。负载时系统具有优异动态控制性能,液压泵具有优良的动态性能,串联式柱塞泵能够实现差动液压缸的闭式泵控。非对称柱塞泵平衡了液压缸的不平衡流量,具有良好的发展前景。

**关键词:**非对称泵控;变载伺服系统;特性分析;AMESim 平台

**中图分类号:**TH137 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)03-0012-04

## Design and Load Working Condition Analysis of Asymmetric Pump-controlled Variable Servo System

SHEN Chao<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>

(1. College of Engineering Machinery, Hunan Sany Polytechnic College, Changsha 450064, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:**The variable load servo system is widely used in high load fields such as press machine. In order to improve the control precision of unbalanced flow of variable load servo system, this paper introduces asymmetric ram pump control and presents the design of pump-controlled variable load servo system of asymmetric pump. In this system, the asymmetric pump and the oil flow of the hydraulic cylinder are always matched, to ensure that the speed or position of the actuator is controlled. The simulation analysis is carried out based on AMESim platform. The results show that the asymmetric pump control servo system can adjust the working state machine of differential cylinder under no-load conditions, and has fast response ability and better dynamic characteristics. Under load condition, the system has excellent dynamic control performance, the hydraulic pump has excellent dynamic performance, and the series ram pump can materialize closed pump control of the differential hydraulic cylinder. The asymmetric ram pump balances the unbalanced flow of the hydraulic cylinder and has a good development prospect.

**Keywords:**asymmetric pump control; variable load servo system; characteristic analysis; AMESim software

### 0 引言

当前,伺服控制系统在低速与大转矩的驱动模式下,以其独特的优势被广泛用于重载机构、压力机等装备中<sup>[1]</sup>。随着科技的不断发展,新的生产需求也越来越多,各种设备也呈现越来越大型化的趋势,装机功率也越来越大,能耗也持续提高<sup>[2]</sup>。在封闭式液压泵的构造中,利用不同的液压泵控制系统流量,将较大液压出力和交流伺服电动机柔性控制方式进行结合,使其可靠性得到

极大提升<sup>[3]</sup>。

近年来,有许多学者对新型体积调节型电动液压伺服系统开展了多方面研究,由此实现了液压泵的完全封闭控制<sup>[4]</sup>。该装置利用伺服马达来调节配量泵速度及位移。符鹏等<sup>[5]</sup>建立电液伺服控制轴向柱塞泵系统的仿真模型,获得不同干扰下电液伺服控制变量泵系统的输出特性,利用 PID 及模糊 PID 对伺服控制变量柱塞泵进行抗干扰控制。王忠伟等<sup>[6]</sup>提出自适应反步法控制策略,完成直驱式泵控非对称缸位置系统控制,采用

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51775543)

**第一作者简介:**沈超(1987—),男,湖南益阳人,副教授,硕士,研究方向为机械及液压系统设计,448552686@qq.com。

**通信作者简介:**李威(1985—),男,湖南长沙人,副教授,硕士,研究方向为工程机械液压,故障诊断等,414159903@qq.com。

参数自适应律对系统的不确定性参数实时估计,呈现出良好动态逼近过程。牛善帅等<sup>[7]</sup>提出基于未知死区补偿的自适应鲁棒控制方法,利用反步法设计自适应鲁棒控制器反馈未知干扰抑制,所设计控制器可以实现渐近跟踪。李泽龙<sup>[8]</sup>提出基于模糊控制伺服泵控电液负载敏感系统,设计模糊 PID 压力控制器以提升系统控制精度,所建控制伺服泵控负载敏感,控制系统的压力控制效果好。

从泵控载荷伺服控制的角度分析,上述方法都有助于提高系统能量效率,但都面临着很大的局限性。传统的阀-泵控制结构难以准确补偿油缸运动时的非平衡流动,导致系统总体成本大幅提高,且控制结构也更加复杂<sup>[9-10]</sup>。本文采用不对称泵控制技术,构建了相应的不对称泵控负载伺服控制机构,并基于 AMESim 模型对负载状态开展模拟测试。

## 1 非对称泵控变载伺服系统设计

从图 1 中可以看到不对称泵控伺服控制系统的工作原理,通过串联式可变容积活塞泵并利用调节泵排量的方式来控制油缸方向和转速。活塞泵则利用油口 A、油口 B 过流面积来实现对不平衡流进行补偿的功能,将油口 A、油口 B、油口 T 3 个接口分别连接到油缸无杆室与储能器。但是,由于油液受到压力的影响,应在泵控制系统内加装一种低流量单向阀,并为其配备一台补充油泵<sup>[11]</sup>。当液压杆进行伸出动作时,抽油泵经过油口 B 和油口 T 一起抽吸,然后经油口 A 抽油,把油传送到无杆室。当液压杆进入回缩状态时,泵经油口 A 将无杆空腔内的润滑油抽走。

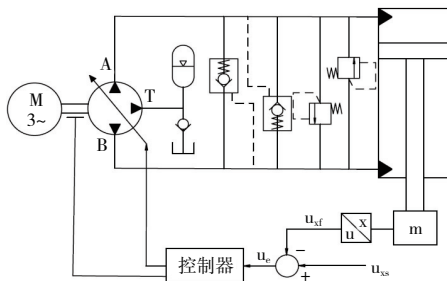


图 1 非对称泵控变载伺服系统

如果将油缸的速度设定成式(1),则泵位移能够按照定子偏心度进行调整,从而达到调整执行器位置或者转速的目的。

$$v = \frac{nV}{A_B} = \frac{n \frac{\pi}{4} d^2 \times 2eZ\delta}{A_B} \quad (1)$$

式中: $\delta$ 为无杆与带杆空腔面积比值; $A_B$ 为带杆空腔面积; $v$ 为液压缸活塞运动速度,m/s; $n$ 为变量柱塞泵的主轴转速,r/min; $V$ 为变量泵单转排量(每转输出油液体积,ml/r; $d$ 为柱塞泵内部柱塞直径; $e$ 为变量泵定子偏心距(控制泵排量的核心,偏心越大排量越大); $Z$ 为柱塞泵柱塞总个数。

当不对称泵工作时,位于排油区域与吸收区域的柱塞手受到压力也有显著区别,随后,油压作用于定子并最终转移到控制柱塞上,导致操作过程需要达到很大驱动力<sup>[12]</sup>。动力源除了要产生很大推力外,还需要对可变机构进行精确控制。为了实现可变机构的传动和精确调节,可以选用较小液压伺服系统。图 2 显示了对不对称泵可变调节的作用机制<sup>[13]</sup>。

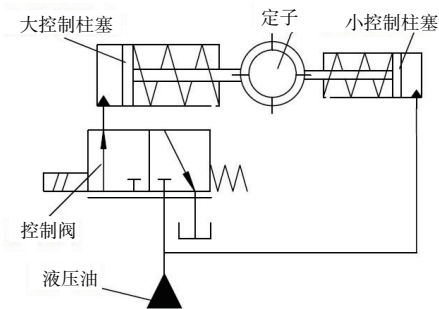


图 2 伺服系统控制示意图

建立如下的活塞瞬间流量表达式

$$Q_i = AV_i = \omega e A \left( \sin \varphi_i + \frac{e}{2(R+L)} \sin(2\varphi_i) \right) \quad (2)$$

式中; $i$ 为柱塞产生的转角; $A$ 为柱塞横截面积; $V_i$ 为柱塞瞬时速度; $\omega$ 为转子角速度; $L$ 为连杆长度; $R$ 为定子半径。

泵柱塞数  $Z$ , 设定夹角  $2\beta = 2\pi/Z$ 。排油柱塞转角  $\varphi_1$ , 满足  $0 \leq \varphi_1 \leq 2\pi/Z$  要求时,符合下述条件

$$Q_i = \omega e A \left\{ \sum_1^m \sin(\varphi_1 + 2(i-1)\beta) + \frac{e}{2(R+L)} \sin 2(\varphi_1 + 2(i-1)\beta) \right\} \quad (3)$$

通过算式推导可得

$$\sum_1^m \sin(\varphi_1 + 2(i-1)\beta) = \sin(\varphi_1 + 2(m-1)\beta) \frac{\sin(m\beta)}{\sin\beta} \quad (4)$$

建立流量脉动算式如下

$$\delta_Q = 2(Q_{\max} - Q_{\min}) / (Q_{\max} + Q_{\min}) \quad (5)$$

对于三配流窗口径向柱塞泵,  $Z=9, e=6, R=72, L=24, \beta=\pi/Z=\pi/9$ , 存在如下关系:  $\delta_Q=0.019=1.9\%$

泵出口 B 的排量很大程度上依赖于润滑油可压缩性和分配窗 B 角大小。不同角度下的排油区柱塞数量也具有很大差异, 形成不同的流动脉动特征<sup>[14]</sup>。

## 2 仿真结果分析

### 2.1 仿真模型搭建

根据图 1 可知, 利用 AMESim 软件构建得到图 3 的串联变排量径向柱塞泵不对称液压缸模型, 并对其进行仿真测试。补油回路的流量为 5 L/min, 泵油孔 A 排量为 53 mL/min, 并且设定压力 2 MPa。表 1 给出了各个液压元件参数设定值。

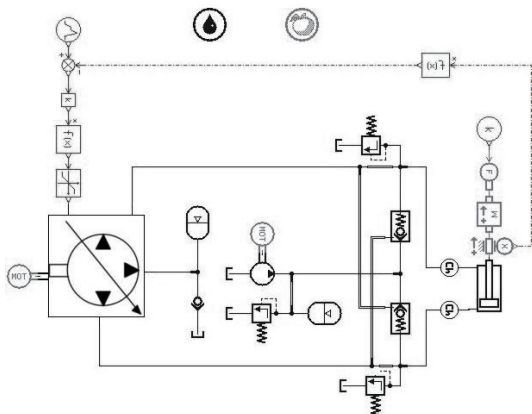


图 3 非对称泵控变载伺服系统模型

表 1 模型主要元件参数

参数	数值
液压缸行程/mm	700
活塞杆直径/mm	70
活塞直径/mm	120
蓄能器体积/L	10
泵 A 口排量/(mL/r)	52
容腔/mL	1.25
电机转速/(r/min)	1 500

### 2.2 空载工况下

在建立的液压回路中, 将外部载荷设定为 0 N, 此时液压缸仍处于空载状态, 图 4 是计算得到的泵控数据。根据本试验结果证明了不对称

泵控制伺服系统能够在 1 个泵运行工况下对差动油缸工作状态机进行调节, 具有快速响应能力和较好的动力学特性。

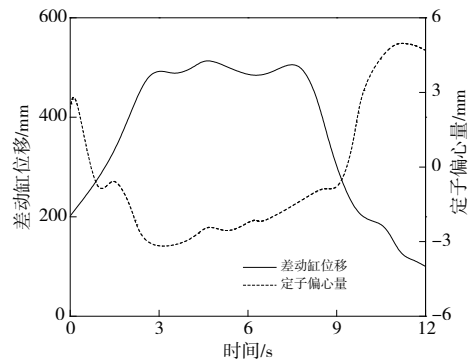


图 4 空载下差动缸位移和定子偏心量动态曲线

### 2.3 负载工况下

油缸工作期间, 根据油缸负载作用方向及转速的差异, 可将其工作状态分为阻力回缩和外伸两种形式<sup>[15]</sup>。

为准确获取伺服工作特性, 对各方向上设定了  $F_L=50$  kN 的作用载荷, 之后进行数值模拟分析。图 5 为本实验采用的直接泵控液缸流量、压力与介质排量。油缸工作时间 12 s。其中, 0~1 s, 5~7 s, 11~12 s 之间的油缸位移保持不变, 并且都处在静止阶段。进入 1~5 s 的时间段内, 油缸外移, 并以 125 mm/s 的最大速度移动到 700 mm 位置。5~11 s 内, 油缸向后移动, 并由 700 mm 移动到 200 mm。

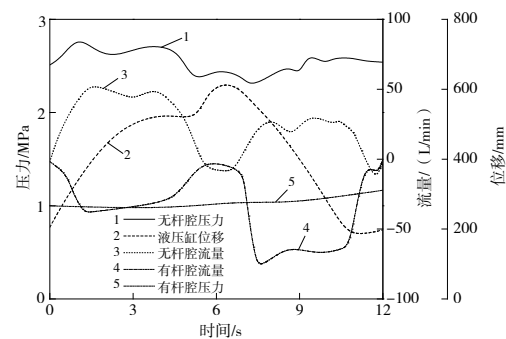


图 5 空载下液缸参数动态变化

利用无杆腔来实现非对称泵控制系统驱动功能, 杆腔一直都保持补充油压, 压力值为 20 bar, 整个过程没有明显改变。有(无)杆腔都利用液缸进行带动, 无杆腔始终维持 2 MPa 的固定供油压力, 基本不会变化。

图 6 给出了出油端油口 A、油口 B、油口 T 油液流量, 图 7 是相对于泵定子偏心率的微分气缸

位移响应结果。根据图 6 和图 7 可知,在 0~1 s 内,油缸停留在 200 mm 的恒定值,并且油口 A、油口 B、油口 T 的出油口都保持 0 流量。1~5 s 内的油缸由 200 mm 增大至 700 mm,定子偏心率 -5 mm,1 s 后定子偏心率降至 -4.5 mm,油口 A 排量 60 L/min,油口 B 和油口 T 排量都在 -30 L/min 附近。在 5~7 s 阶段内,油缸处在 700 mm 的位置。7~11 s 间,定子偏心率 5 mm,1 s 后维持在 4.5 mm,油口 A 保持 -60 L/min 的固定流量,油口 B、油口 T 对应油液流出量 30 L/min。在 11 s~12 s 的范围内,油缸位置始终不变,定子发生偏心的程度与油口 A、油口 B、油口 T 出油口的流量也逐渐趋于 0。经过模拟试验,证明该系统具有优异动态控制性能,可以在实际工况下得到广泛应用。

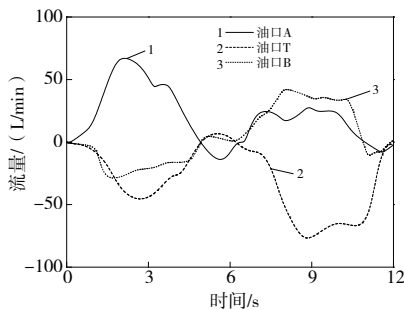


图 6 空载下非对称泵出油口流量特性

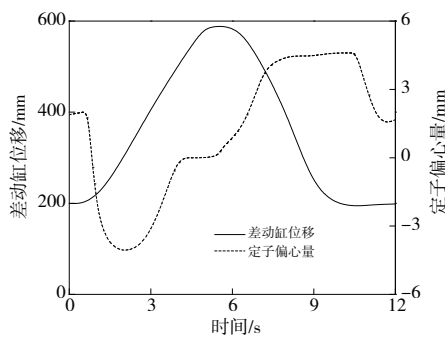


图 7 空载下差动缸位移和定子偏心量动态曲线

### 3 结语

本文开展基于 AMESim 的非对称泵控变载伺服系统特性分析,结论如下:

1) 空载时,非对称泵控制伺服系统能够对差动气缸工作状态进行调节,具有快速的响应能力和较好的动力学特性。

2) 负载时,系统具有优异动态控制性能,液压

泵具有优良的动态性能,串联式柱塞泵能够实现差动液压缸的闭式泵控,可全面推广应用。

### 参考文献:

- [1] 鲍明喜,倪向东,赵新,等. 液压机械无级变速器换挡动态特性研究[J]. 机械设计与制造,2022(2):37-41.
- [2] 高有山,成杰,黄家海,等. 变排量非对称轴向柱塞泵特性仿真分析及试验[J]. 机械工程学报,2018,54(14):215-224.
- [3] 王博,罗玉梅,董慧锋,等. 结合粒子群优化的滑模控制算法在泵控电液制动器的应用[J]. 机械设计与研究,2022,38(4):145-148.
- [4] 汪院林,袁锐波,宋勃. 电液比例位置控制系统在阳极立模浇铸中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(12):121-129.
- [5] 符鹏,王剑强,王大龙,等. 电液伺服控制柱塞泵转速干扰及控制策略研究[J]. 控制工程,2024,31(5):891-900.
- [6] 王忠伟,梁全,张嘉容,等. 基于自适应反步法的直驱式泵控液压系统控制策略[J]. 机电工程,2024,41(8):1376-1385.
- [7] 牛善帅,王军政,赵江波,等. 泵控电液伺服系统基于未知死区补偿的自适应鲁棒控制[J]. 机械工程学报,2024,60(18):327-337.
- [8] 李泽龙. 基于模糊控制的伺服泵控电液负载敏感系统研究[J]. 机电工程,2023,40(7):999-1007.
- [9] 杨泰春,陶建峰,覃程锦,等. 采用支持向量机的非对称阀控液压缸模型预测控制[J]. 西安交通大学学报,2020,54(1):93-100,107.
- [10] 花同宾,李祥阳,陶佳欣,等. 双向非对称轴向柱塞泵流量特性仿真研究[J]. 机械设计与制造,2023(6):31-36.
- [11] 王海燕,袁荷伟,李峰,等. 非对称泵控液压系统控制方案及其回路特性仿真分析[J]. 锻压技术,2022,47(2):162-166.
- [12] 吴秋梅,刘会明,李强,等. 变速泵控闭式转向系统复控策略设计及动态特性[J]. 锻压技术,2022,47(3):159-163.
- [13] 睢雪亮,夏景攀. 压力机用泵控变载输出回路系统动态特性分析[J]. 机械管理开发,2024,39(6):27-28,31.
- [14] 牛茂升,朱强,芦洪钟,等. 隔板起始位置对大型双蜗壳双吸泵径向力和压力脉动的影响[J]. 农业工程学报,2021,37(12):20-27.
- [15] 陈万强,曹允莲,倪向东,等. 采棉机液压功率分流无级变速箱传动特性研究[J]. 中国农机化学报,2020,41(10):118-124.

收稿日期:2024-08-12