

DOI: 10.3901/JME.2016.12.173

# 泵阀复合进出口独立控制液压挖掘机特性研究\*

董致新 黄伟男 葛磊 权龙 黄家海 杨敬

(太原理工大学新型传感器与智能控制教育部和山西省重点实验室 太原 030024)

**摘要:** 传统四边联动阀控制液压执行器可控性差、在超越负载工况能耗大。为改进这些不足,提出动臂、斗杆液压缸和回转液压马达采用泵阀复合、流量压力匹配进出口独立控制、铲斗液压缸与行走液压马达采用原有四边联动阀的液压挖掘机整机方案。建立液压挖掘机机械结构多刚体动力学与电液系统联合的数字样机,利用该样机分别对采用负载敏感系统和新回路系统控制的动臂、斗杆和回转马达三个执行机构动静态性能和能耗特性进行研究。进一步构建基于上述原理的试验测试样机,试验结果表明所建立数字样机具有较高的准确性;采用流量匹配进出口独立控制方法可以显著降低阀口工作压差,提高能量利用效率,减小执行机构压力冲击,提高整机运行平稳性。

**关键词:** 流量匹配; 进出口独立控制; 压力流量复合; 泵阀复合

**中图分类号:** TH137

## Research on the Performance of Hydraulic Excavator with Pump and Valve Combined Separate Meter In and Meter Out Circuits

DONG Zhixin HUANG Weinan GE Lei QUAN Long HUANG Jiahai YANG Jing

(Key Lab of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

**Abstract:** Conventional hydraulic actuator is controlled by mechanically connected orifices valve. This controllability of this method is poor and the energy consumption is huge especially under the over-running condition. So a novel system configuration is presented, in which boom cylinder, stick cylinder and swing motor are controlled with separate meter in and meter out technology, bucket cylinder and travel motors are controlled with conventional valves. A virtual prototype is established, which consists of the hydraulic excavator mechanical structure with multi-body dynamics and electro-hydraulic system. The dynamic, static performances as well as the energy consumption characteristics of the boom, arm and swing actuators are investigated under the condition of load sensing hydraulic system and the proposed system. After that, the physical prototype based on the proposed configuration system is established and its performance is tested. The experimental results show that the accuracy of the virtual prototype is validated, the proposed configuration system can significantly decreases the pressure losses through the valve and improve the energy efficiency of the machine; the pressure shocks within hydraulic actuators is decreased as well, thus the stationarity of the whole machine is improved accordingly.

**Key words:** flow matching; separate meter in and meter out; pressure and flow combined control; pump and valve hybrid control

## 0 前言

挖掘机液压系统多采用多路阀进行控制, 阀的进出油口联动, 同一时刻只能控制液压执行器一个腔的压力或流量, 可控性差, 进出口同时节流, 压力损失大, 造成能耗大、发热严重, 在动臂下放、

回转制动及斗杆工作在超越负载工况时, 情况更为严重<sup>[1-3]</sup>。针对四边联动节流控制存在的问题, 国外提出的解决方案是采用进出口独立控制的方法, 分别控制液压执行器两腔的压力和流量。20 世纪 80 年代末, 德国亚琛工业大学的 BACKÉ<sup>[4]</sup>和瑞典林雪平大学 ANDERSSON<sup>[5]</sup>就提出采用四个插装阀和四个流量反馈的先导比例节流阀按照进出口独立控制原理控制液压缸的运动。丹麦奥尔堡大学的 NIELSEN<sup>[6]</sup>对采用进出口独立控制回路控制起重机

\*国家自然科学基金(51575374)和山西省科技攻关(20140321008-02)资助项目。20150528 收到初稿, 20160318 收到修改稿

吊臂液压缸的特性做了研究,提出了进口节流、出口压力控制的控制策略。美国佐治亚理工学院的 SHENOUDA<sup>[7]</sup>对采用四个比例插装阀进出口独立控制挖掘机、伸缩式装载机动臂的特性做了研究,重点研究了不同工作模式下系统的能量效率和动臂势能再生的控制策略。瑞典林雪平大学的 ERIKSSON<sup>[8]</sup>设计了一种可双向工作的比例流量阀用于进出口独立控制,并用于控制轮式装载机的工作机构,双向流量控制阀进一步增加了能量调控的自由度。美国普渡大学的 YAO 等<sup>[9-10]</sup>对分别采用五个和六个比例节流阀控制液压缸的控制策略、能量效率和控制精度做了深入研究。德国力士乐公司和亚琛工业大学的研究人员对采用两个三位阀和一个两位阀,具有流量再生功能的进出口独立控制液压缸系统进行了研究,提出的回路原理可以同时控制液压缸的位置和压力<sup>[11]</sup>。德国德累斯顿工业大学的 SITTE 等<sup>[12]</sup>分析对比了分别采用两位、三位比例阀、开关阀以及它们组合对液压缸进出口独立控制的系统方案,并采用多输入多输出的状态方程对系统动态稳定性和响应特性做了分析。韩国首尔国立大学研究员仿真研究了液压挖掘机进出口独立控制系统能耗特性,通过附加流量再生功能,取得了好的节能效果<sup>[13]</sup>。

国内浙江大学王庆丰<sup>[14]</sup>较早对进出口独立控制的液压马达系统做了研究,采用双比例方向阀,有效地减小了大惯性负载启动及制动过程的液压冲击。太原理工大学权龙等<sup>[15]</sup>对采用双液压泵按进出口独立控制方式控制差动液压缸的特性做了研究,提高了系统的能量效率,进一步提出可用于多执行器的泵阀复合流量匹配回路控制方案<sup>[16]</sup>。浙江大学的曹剑等<sup>[17]</sup>对负载口独立控制系统静态工作点选取原则进行了仿真分析;刘英杰<sup>[18]</sup>对采用比例溢流阀调控进口压力的进出口独立控制系统动静态特性做了研究。燕山大学曹彦楠<sup>[19]</sup>对用于进出口独立控制的高响应节能控制阀做了研究,在保证高响应性能的前提下,采用进出口独立控制和差动再生回路实现节能。

国内外的研究充分表明较传统四边联动的控制方式,进出口独立控制系统具有更好的能量效率和可控性。但是现有工作主要是针对单执行器控制回路及相应控制策略进行研究,研究中很少涉及泵和阀的压力流量匹配关系,也未见有采用这一原理的整机研究工作,为此,提出泵阀复合流量匹配的进出口独立控制挖掘机方案,并研发了原理样机,考虑到整机的作业特点,只在动臂液压缸、斗杆液压缸和回转马达中采用进出口独立控制。

为了充分了解采用进出口独立控制后液压控

掘机的运行特性及能量效率,论文中对采用抗流量饱和和负载敏感系统的同规格机型,在相同作业情况下的特性做了分析对比。

## 1 挖掘机液压系统工作原理

液压挖掘机常用的控制回路有负载敏感系统、正流量控制系统和负流量控制系统等,本研究对比机型所采用的是抗流量饱和的负载敏感系统(Load independent flow distribution system, LUDV 系统)。

### 1.1 LUDV 系统原理

图 1 所示为采用 LUDV 系统的挖掘机回路原理,系统由负载敏感泵、负载补偿多路阀及各自的执行机构组成,其中,多路阀的每一联由主阀芯和压力补偿器组成,压力补偿器兼具常规负载敏感阀中梭阀的选择功能,负载敏感腔的压力直接取自主油路,这也是 LUDV 系统不同于其他负载敏感系统的一个特点。

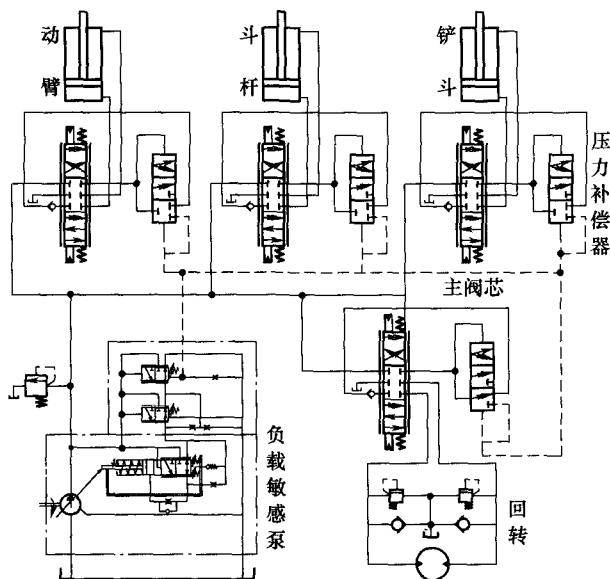


图 1 LUDV 系统液压挖掘机工作原理

压力补偿阀位于多路换向阀的节流口之后,经补偿阀从主油路检测出的最大负载压力作用在所有压力补偿阀的阀芯上,与各自压力补偿阀进油口的压力平衡,同时最大的负载压力引入到负载敏感泵的控制油口,控制泵出口压力始终高于最大负载压力一个恒定值,这样作用在所有多路阀节流口的压差就保持恒定,一旦系统设定的流量大于泵所能提供的最大流量,仍能维持多路阀各节流口的压差恒定,提供各执行器的流量按相同比例减小,从而不改变各液压执行器速度的比例关系。

### 1.2 流量匹配进出口独立控制系统

图 2 所示为本研究提出的进出口独立控制液压挖掘机工作装置控制原理。

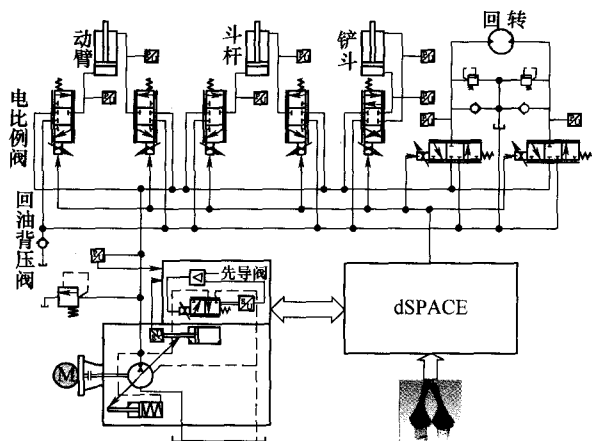


图2 进出口独立控制液压挖掘机工作原理

系统中动臂液压缸、斗杆液压缸和回转液压马达均采用两个三位三通比例方向阀按进出口独立方式进行控制，液压泵采用压力和流量连续可调的电子比例变量柱塞泵，各执行机构两腔及泵出口都装有压力传感器用于检测压力，各液压缸均装有位移传感器用于检测其位移和速度，液压马达上装有测

量其转速和转角的传感器，发动机上装有转速传感器用于检测其转速变化。整机工作过程采用由德国dSPACE公司生产的硬件在环计算机控制系统ds1103进行管理。

## 2 整机机电液联合仿真模型

为了能在实际样机改装之前，充分了解和认识采用新回路原理后挖掘机的工作特性，首先根据液压挖掘机机械结构和液压元件的物理结构，采用多学科仿真软件SimulationX，构建图3所示，能反映液压挖掘机真实工作状况的机电液联合仿真模型进行仿真研究。该模型能实时计算出作用在各执行器上的等效质量与转动惯量，克服单纯按液压系统仿真，转动惯量和等效质量采用常数与实际不符，准确性差的不足。该模型也能将作用在铲斗上的载荷实时分配到各液压缸上，实现液压系统模型与机械结构模型的无缝连接和实时驱动。

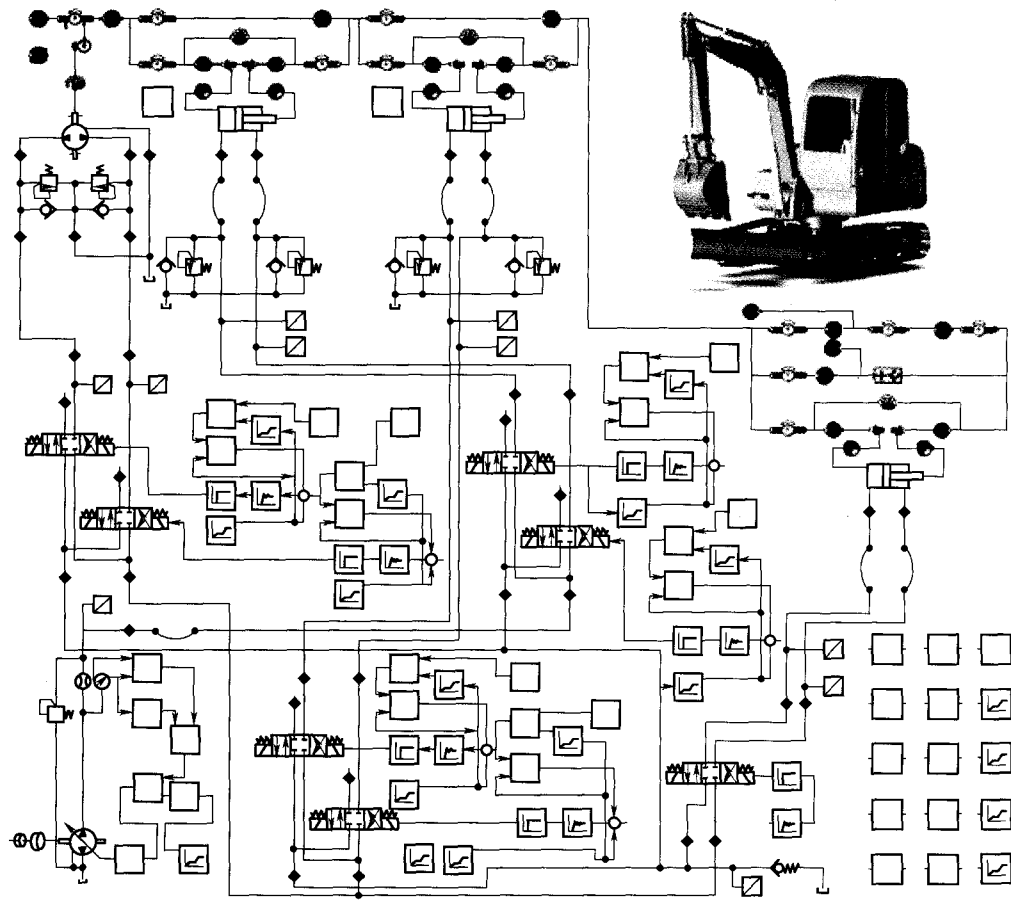


图3 进出口独立控制系统液压挖掘机机电液联合仿真模型

图4所示为采用上述模型仿真挖掘机挖掘-动臂举升-上车回转-铲斗卸料-动臂下放及回转复位作业过程，图4a~4f分别为起始状态、挖掘完成、动臂提升、上车回转、铲斗卸料、返回起始状态的部

分截图。

研究中，通过静态力对比对机械结构模型的准确性进行了验证，用实际测试的压力响应曲线验证整机模型的准确性。

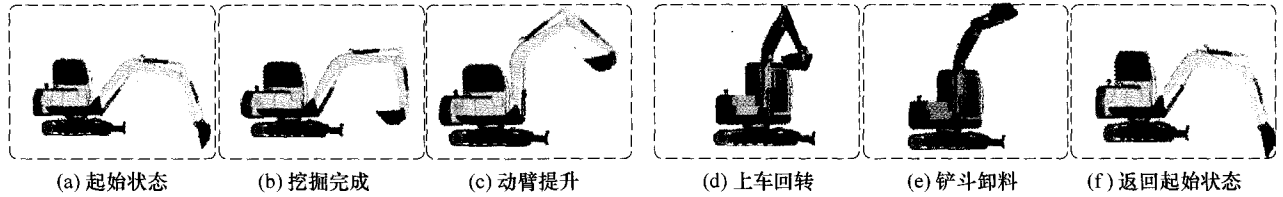


图 4 整机循环动作仿真

图 5 所示为工作装置静态时液压缸压力仿真试验曲线，试验和仿真的悬停状态各液压缸位置取相同值，动臂、斗杆和铲斗压力的试验和仿真值差分别为 0.05 MPa、0.03 MPa、0.01 MPa，可知模型的准确性很高。

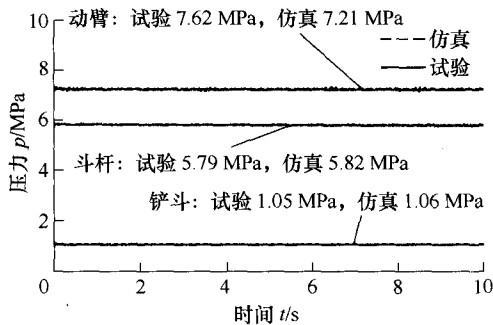
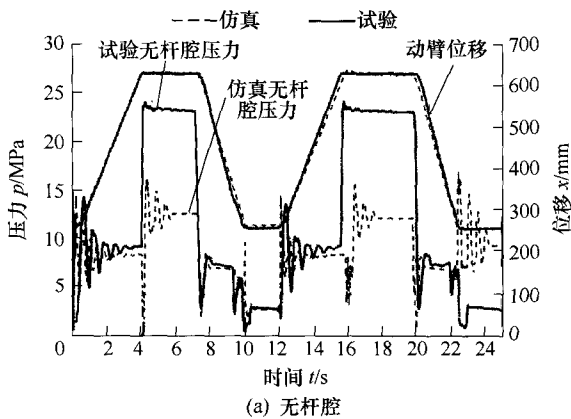
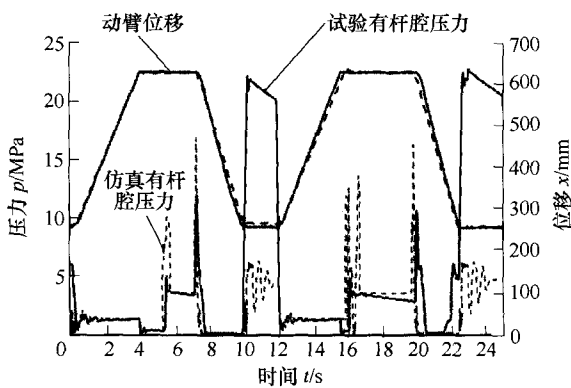


图 5 工作装置静态液压缸压力仿真试验曲线

图 6 所示为采用 LUDV 系统的原始挖掘机，动臂举升与下降循环两次，动臂液压缸位移及两腔压力的试验与仿真曲线，该曲线主要用于验证模型中



(a) 无杆腔



(b) 有杆腔

图 6 动臂液压系统仿真试验对比

多体动力学部分的准确性。由图 6 中曲线可知，仿真计算结果与试验测试结果非常接近，表明仿真模型具有较高的准确性。

### 3 控制系统设计

如图 7 所示为本试验研究中整机控制系统框图。试验时，试验人员操作手柄，手柄通过 CAN 总线将控制信号  $v_{set}$  传递给 dSPACE 控制器，同时 dSPACE 采集各传感器的信号，对手柄信号和传感器信号进行分析计算，按照泵阀流量匹配的控制策略，系统所需的流量控制值同时输出到液压泵和控制阀组，复合动作时液压泵输出系统所需的总流量，并通过控制阀组进行分配，实现各执行机构的动作。

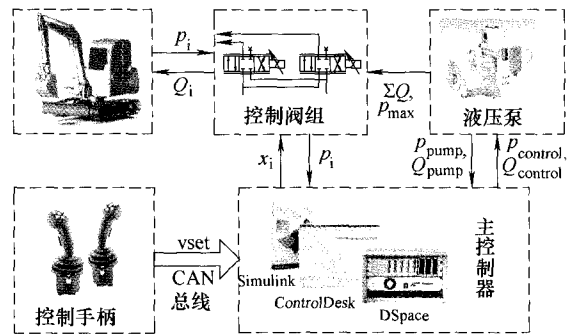


图 7 整机控制系统

- $p_i$ ——各压力传感器信号  $Q_i$ ——各执行机构所分配的流量
- $x_i$ ——各控制阀位移控制信号  $\Sigma Q$ ——液压泵输出的总流量
- $p_{pump}$ ——液压泵压力传感器信号  $Q_{pump}$ ——液压泵流量传感器信号
- $p_{control}$ ——液压泵压力控制信号  $Q_{control}$ ——液压泵流量控制信号

为了实现发动机与液压系统功率匹配，避免发动机处于超载工况，通过实时检测泵出口压力、泵摆角和发动机转速实现液压系统的恒功率调节。为了达到较好的控制特性，根据各执行器负载情况和运行特征，制定各自的控制策略，下面分别论述。

#### 3.1 动臂单动控制策略

动臂上升过程，液压缸无杆腔进油有杆腔回油，为降低控制阀的压差，控制策略为液压缸无杆腔进油控制阀全开，有杆腔回油阀全开以减小背压，通过改变液压泵的流量直接控制动臂的举升速度。动臂下降过程，液压缸有杆腔进油无杆腔回油，无杆腔需要约 7 MPa 的压力平衡动臂重量，并且在动

臂下降过程中该压力变化较小, 因此, 对无杆腔回油阀采用节流控制, 由于有回油背压单向阀的作用, 节流后的无杆腔回油阀出口流量一部分通过回油路直接进入动臂液压缸有杆腔, 实现流量再生, 一部分经回油背压单向阀排回油箱。流量再生过程中, 主泵不提供油液, 只保持最小压力和流量。

### 3.2 斗杆单动控制策略

斗杆液压缸的工作范围包括超越伸出、阻抗伸出、超越缩回、阻抗缩回四个象限。斗杆在垂直于水平面位置时, 作用在斗杆液压缸上的负载力方向发生变化, 切换点之前处于超越负载工况, 切换点之后处于阻抗负载工况。超越负载工况, 采用进油阀全开, 液压泵控制进油腔压力为不发生吸空的最低压力, 回油阀采用压差反馈流量控制方式, 控制液压缸速度; 阻抗负载工况, 采用进油阀全开, 液压泵通过流量匹配控制液压缸速度, 回油阀阀口全开以减小背压产生的能量损失。为了达到最佳的节能效果, 需要合理选择上述两种控制方式的切换位置及判断方式, 切换点选择不恰当, 会导致斗杆在接近切换点位置时, 动作逐渐停顿, 再突然启动, 引起运动冲击, 因此, 控制策略的作用是保证动作平稳的前提下, 尽可能多地利用斗杆和铲斗的重力势能。通过仿真对比, 选取斗杆液压缸回油腔压力作为切换判断依据, 当超越负载的作用逐渐减弱, 回油腔压力降低到一定值时, 切换控制策略, 切换点通过试验选取, 选取原则为空载运行时斗杆液压缸工作速度没有明显的波动。

### 3.3 回转单动控制策略

液压挖掘机回转系统为大惯量系统, 传统的系统在启动时进油腔压力较高, 往往达到溢流阀设定压力, 因此, 启动时采用进油腔进油阀全开, 液压泵通过压力控制限制进油腔压力, 消除溢流损失, 回油腔回油阀全开以降低背压产生的能量损失。制动过程, 回转马达进油腔回油阀全开接通油箱, 防止进油口吸空, 回转马达回油腔回油阀快速关闭, 以建立制动压力, 在制动压力下降后, 回油腔回油阀再开启一个很小的节流口与油箱连通泄压, 防止回油腔制动压力引起的回摆, 制动过程控制的难点在于要在限制压力上升的前提下减少回转制动的的时间。

### 3.4 复合动作控制策略

通过各执行机构进出口的压力传感器获得各执行机构的工作压力, 液压泵的压力控制值与最大负载的压力相适应, 排量控制值与手柄的输出信号对应排量值相适应, 在流量饱和时功率限制模块自动越权进入工作状态。最高负载执行器的进油阀全

开, 其余低负载侧进油阀进行压差校正的压力补偿控制<sup>[20]</sup>, 计算压差同最高负载侧的工作压力相适应, 可使各个执行器都可按进出油口独立控制的原理进行控制, 并可系统的节流损失降到最低。

## 4 试验研究

以实验室现有的 6 t 液压挖掘机作为试验对象, 对采用 LUDV 系统的液压挖掘机的各工作过程进行试验, 图 8 所示为试验现场, 并对其进行整机改造构建进出口独立控制系统试验平台。

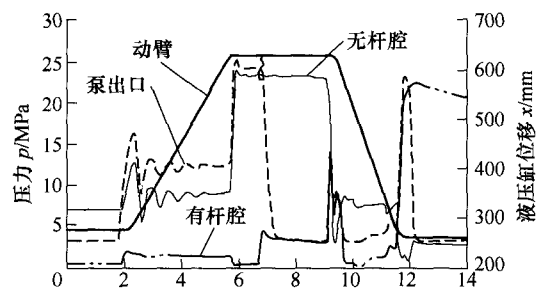


图 8 试验测试系统

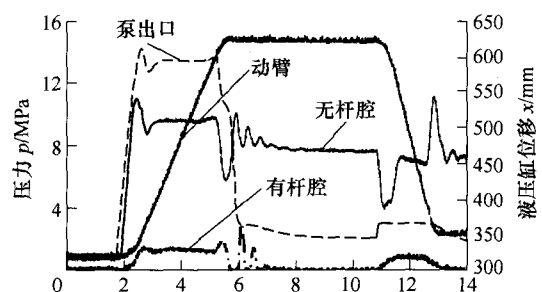
### 4.1 动臂运行试验结果

为了增加试验中动臂液压缸的行程, 试验工况是斗杆和铲斗液压缸均收回到最短行程位置, 铲斗空载, 动臂按最大速度运行。

图 9 所示为试验测试动臂升降过程液压缸位移、两腔压力和泵出口压力曲线, 由图 9a 的 LUDV 控制系统曲线, 在动臂提升过程中, 泵出口压力和动臂液压缸无杆腔压力存在欠阻尼振荡, 最大波动



(a) LUDV 系统



(b) 新型控制系统

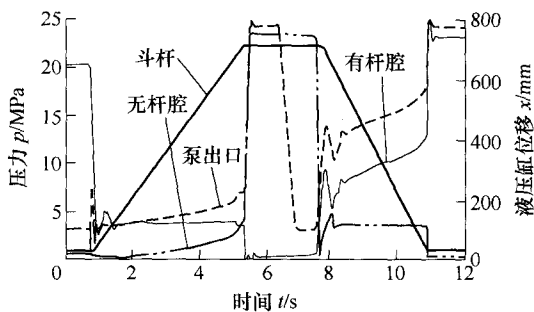
图 9 动臂工作特性对比

幅值都达到 6.9 MPa, 并且持续振荡多次。图 9b 进出口独立控制曲线, 在动臂提升过程中, 泵出口压力和动臂液压缸无杆腔压力只存在一次波动, 幅值约为 1.7 MPa, 相对 LUDV 系统, 运行平稳性获得显著改善。对泵出口压力和流量相乘, 并积分可获得动臂升降一个周期液压泵输出的能量, 若不考虑动臂停止不动时泵输出能量, LUDV 系统液压泵输出能量为 37.6 kJ; 进出口独立控制系统液压泵输出能量为 32.4 kJ, 较 LUDV 系统减少能耗 15%。

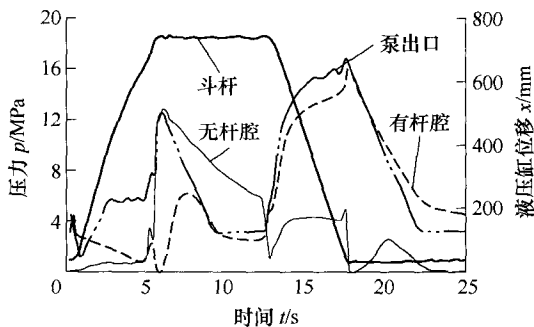
#### 4.2 斗杆运行试验结果

为了试验包含完整的斗杆动作范围, 动臂液压缸行程选取 620 mm, 铲斗空载且收回于最短行程位置, 斗杆按最大速度运行。

图 10 所示为斗杆收放过程试验测试液压缸位移、两腔压力和泵出口压力曲线, 由图 10a 中 LUDV 控制系统曲线可知, 斗杆内收过程中, 泵出口压力最大波动值为 2.5 MPa。图 10b 为进出口独立控制曲线, 斗杆内收过程中, 泵出口压力和斗杆液压缸无杆腔压力没有明显波动, 随斗杆内收角度的增加无杆腔压力缓慢上升, 直到超过有杆腔压力, 斗杆液压缸从超越伸出工况切换到阻抗伸出工况的变换过程平稳, 速度变化小, 无杆腔压力升高 2 MPa 左右。内收过程中有杆腔和无杆腔的工作压力都低于 LUDV 系统。由于系统采用的液压泵不能摆到负向摆角, 动作停止后系统进油口的压力只能靠泄漏缓慢卸载, 直到降低到怠速工况时液压泵压力设定值, 此过程中液压泵的排量为零, 几乎不产生能耗。对



(a) LUDV 系统斗杆工作特性



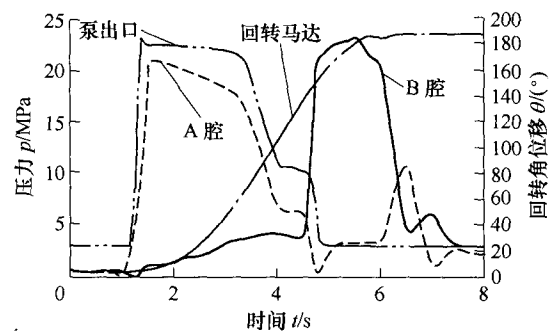
(b) 新型控制系统斗杆工作特性

图 10 斗杆工作特性对比

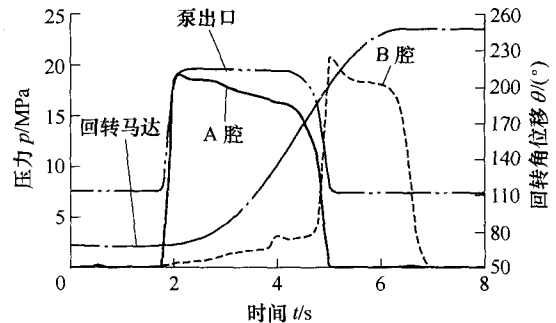
一个动作周期泵输出能量进行计算, LUDV 系统输出为 10.8 kJ; 进出口独立控制系统输出能量为 10.2 kJ, 较 LUDV 系统减少能耗 5.6%。

#### 4.3 回转运行试验结果

图 11 所示为大半径回转 90° 试验测试的回转马达转角、两腔压力和泵出口压力曲线, 由图 11a LUDV 控制系统曲线, 在制动过程中, 回转马达 A 腔压力存在欠阻尼振荡, 最大波动幅值为 10.49 MPa, 并且持续 2 至 3 次。由图 11b 进出口独立控制曲线, 在制动过程中, A 腔压力不存在波动, 相对 LUDV 系统, 运行平稳性获得显著改善, 且 LUDV 系统制动时的回摆现象消除。



(a) LUDV 系统回转工作特性



(b) 新型控制系统回转工作特性

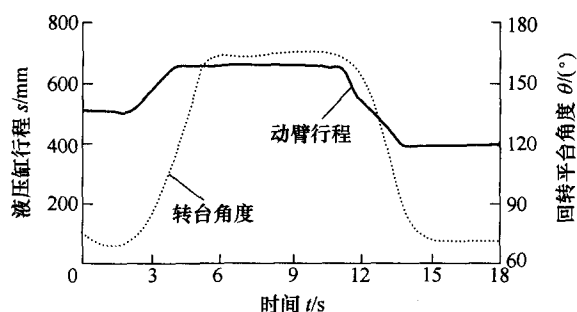
图 11 回转工作特性对比

#### 4.4 整机运行特性

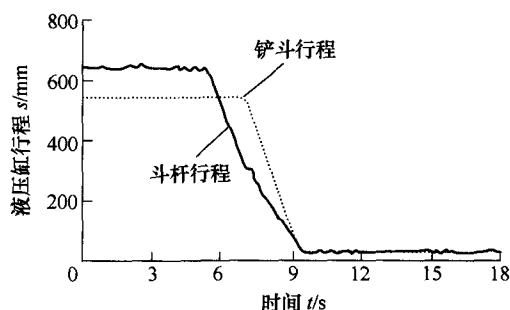
由于挖掘机动作对场地和操作要求很高, 试验重复性差, 因此选取循环动作中三个连续的复合动作进行数据采集, 试验空载进行, 起始点为图 4b 所示挖掘完成位置, 终止点为图 4f 的返回阶段斗杆和铲斗未动作前。

图 12 所示为试验测试进出口独立控制系统, 一个工作循环中的 3 个典型复合动作段, 各执行机构位移和液压泵流量曲线。由图中位移曲线, 在 1.6~3.8 s 时间段, 动臂提升和回转复合动作; 在 6.5~9.2 s 时间段, 铲斗缩回和斗杆缩回复合动作; 在 11.2~14.5 s 时间段, 动臂下降和回转复合动作。测试结果表明, 进出口独立控制系统的复合控制策略使各执行器动作不受负载影响, 同时保证其运动

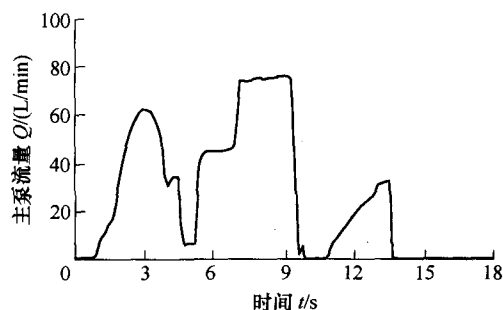
的独立性。如图 12a 所示, 在动臂提升和回转复合动作中, 动臂行程和回转角度斜率没有大的变化, 说明其速度稳定, 相互之间独立运行。在动臂下降和回转复合动作中, 动臂采用了流量再生, 所以主泵提供的流量完全给回转使用, 泵和回转阀的工作模式同回转单动作时一样。如图 12b 中斗杆液压缸位移曲线所示, 5 s 时斗杆从单动作工况向斗杆铲斗复合动作工况切换, 切换平稳且切换后运动速度恒定。如图 12c 中液压泵流量曲线所示, 输出流量完全同执行机构工作所需流量适应, 在没有动作时输出流量减小到零, 没有常规系统中存在的液压泵输出流量最小值, 表明流量匹配控制策略有效。



(a) 动臂行程、回转角度



(b) 斗杆行程、铲斗行程



(c) 主泵输出流量

图 12 进出口独立控制系统各执行机构位移及泵流量曲线

## 5 结论

(1) 采用泵阀复合流量匹配控制进出口独立控制系统, 较传统 LUDV 系统, 液压挖掘机动臂工作时的压力波动从 6.9 MPa 降低到 1.7 MPa, 显著改

善动臂运行的平稳性, 同时动臂一个工作循环的能耗降低 15%。

(2) 采用进出口独立控制, 斗杆工作时无明显的压力波动, 采用回油腔压力作为判断依据的切换控制策略, 能够保证斗杆液压缸在收回和外摆过程中运行速度不受负载方向变化影响, 切换过程速度平稳, 无明显压力波动, 同时可降低能耗 5.6%。

(3) 采用进出口独立控制, 回转工作制动时无明显压力波动, 并可消除回摆现象。

(4) 采用压差校正的复合动作流量控制策略, 可消除负载变化对各执行器运动的影响, 同时保证其运动的独立性, 复合动作工作模式切换平稳, 流量匹配控制策略有效。

## 参考文献

- [1] ZIMMERMAN J D, PELOSI M, WILLIAMSON C A, et al. Energy consumption of an LS excavator hydraulic system[C]//ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Seattle, Washington, USA, November 11-15, 2007: 117-126.
- [2] 杨敬. 具有可停缸动力系统的液压挖掘机功率匹配及节能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.  
YANG Jing. Study on power matching and energy saving of hydraulic excavator with cylinder deactivation power system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.
- [3] 张彦廷, 王庆丰, 肖清. 混合动力液压挖掘机液压马达能量回收的仿真及试验[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 218-223.  
ZHANG Yanting, WANG Qingfeng, XIAO Qing. Simulation and experimental research on energy regeneration with hydraulic motor for hybrid drive excavator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 218-223.
- [4] BACKÉ W. Design systematics and performance of cartridge valve controls[C]//International Conference on Fluid Power, Tampere, Finland, 1987, 3: 1-48.
- [5] ANDERSSON B. Hydraulic valve means[P]. US Patent: 4662601. 1987-05-05.
- [6] NIELSEN B K. Controller development for a separate meter-in separate meter-out fluid power valve for mobile applications[D]. Aalborg: Aalborg University, 2005.
- [7] SHENOUDA A. Quasi-static hydraulic control systems and energy savings potential using independent metering four-valve assembly configuration[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2006.

- [8] ERIKSSON B. Mobile fluid power systems design: with a focus on energy efficiency[D]. Linköping: Linköping University, 2010.
- [9] YAO B, CHRIS D. Energy-saving adaptive robust motion control of single-rod hydraulic cylinders with programmable valves[C]//Proceedings of the American Control Conference, Anchorage, AK, May 8-10, 2002: 4819-4824.
- [10] YAO B, LIU S. Energy-saving control of hydraulic systems with novel programmable valves[C]//Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shanghai, China, 2002: 81-91.
- [11] MEYER C, WEILER D, MURRENHOFF H. Optimal nominal pressurization generation: A novel idea for a discrete logic control using an independent metering valve configuration[C]//Proceedings of the ASME 2011 Dynamic Systems and Control Conference, Arlington, VA, USA, October 31 - November 2, 2011: 1-4.
- [12] SITTE A, WEBER J. Structural design of independent metering control systems[C]//The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Linköping, Sweden, June 3-5, 2013: 261-270.
- [13] 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.
- [14] 王庆丰. 大惯性负载电液进出口节流独立调节系统研究[J]. 中国机械工程, 1999, 10(8): 853-855.  
WANG Qingfeng. Research on electro-hydraulic meter-in and meter-out independent regulation system[J]. China Mechanical Engineering, 1999, 10(8): 853-855.
- [15] 权龙, 廉自生. 应用进出油口独立控制原理改善泵控差动缸系统效率[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 123-127.  
QUAN Long, LIAN Zisheng. Improving the efficiency of pump controlled differential cylinder system with inlet and outlet separately controlled principle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(3): 123-127.
- [16] 权龙, 冯克温, 陈青. 泵阀复合流量匹配进出油口独立控制电液系统: 中国, ZL200710062517.3[P]. 2008-01-23.  
QUAN Long, FENG Kewen, CHEN Qing. Independent control electro-hydraulic system of oil inlet and outlet with pump valve composite flux matched: China, ZL200710062517.3[P]. 2008-01-23.
- [17] 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. Principles for choosing static operation points and simulation analysis of fluid power system based on separate control of actuator ports[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(6): 11-15.
- [18] 刘英杰. 负载口独立电液比例方向阀控制系统关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.  
LIU Yingjie. Research on key techniques of independent metering directional valve control system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [19] 曹彦楠. 集成式高响应节能控制阀的节能特性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.  
CAO Yannan. Research on the energy performance of integrated high response energy control valve[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
- [20] QUAN L, MA J, WANG Y. Research on the performance of new type of proportional pressure and flow control valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16(3): 281-284.

作者简介: 董致新, 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为工程机械液压系统节能控制。

E-mail: dongzhixin@tyut.edu.cn

权龙(通信作者), 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电液伺服及比例控制技术。

E-mail: quanlong@tyut.edu.cn