

DOI: 10.3901/JME.2017.20.176

液气复合驱动液压挖掘机动臂运行特性及能效*

夏连鹏 权 龙 张晓刚 熊晓燕 王永进

(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: 液压挖掘机作业中, 大质量动臂举升储存的势能经液压阀口节流转化为热能耗散, 不仅浪费能源, 还使液压油温度升高, 需附加冷却系统降温, 增加了机器的成本和复杂性。为解决上述问题, 在原有负载敏感驱动回路的基础上, 提出基于三腔液压缸的工作装置自重液气平衡势能回收利用方法, 三腔液压缸中一个油腔与液压蓄能器直接连通, 存储利用工作装置的势能。研究中, 首先根据前期的仿真结果, 建立了基于三腔液压缸的液压挖掘机测试样机, 通过试验, 分析对比了分别采用两腔液压缸和三腔液压缸驱动动臂的运行特性与能效特性, 测试结果表明, 增加液气储能容腔后, 提高了系统运行的平稳性, 动臂运行过程中的能耗降低 48.5%, 峰值功率降低 64.7%, 节能效果显著。新的方法也同样适用于各类液压缸驱动的重载举升装置。

关键词: 三腔液压缸; 液气储能; 势能回收

中图分类号: TH137

Operating Characteristics and Energy Efficiency of Hydraulic-gas Combined Driving Hydraulic Excavator Boom

XIA Lianpeng QUAN Long ZHANG Xiaogang XIONG Xiaoyan WANG Yongjin

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

Abstract: In the hydraulic excavator operation process, potential energy of large mass stored in lifting phase is converted into heat energy and dissipated, which not only wastes energy, but also increases the temperature of the hydraulic oil. Additional cooling equipment is required to reduce the temperature so the cost and complexity of the machine is increased. In order to solve the above problems, the potential energy recovery method of hydraulic-gas self-weight balancing using three-chamber hydraulic cylinder is proposed on the basis of the load sensing driving circuit. A chamber of the three-chamber cylinder is directly connected with a hydraulic accumulator in order to store and reuse the potential energy of the boom. Based on the simulation results, a prototype of hydraulic excavator based on three-chamber hydraulic cylinder is established. The operating characteristics and energy efficiency characteristics of the boom driven by two-chamber hydraulic cylinder and the three-chamber hydraulic cylinder are studied experimentally. The test results show that the stability of the system is improved after adding a hydraulic-gas storage chamber and 48.57% of the energy consumption could be reduced as well as 64.76% of the peak power could be reduced. The energy saving effect is remarkable. The new method can also be used in various types of heavy lifting devices driven by hydraulic cylinders.

Key words: three-chamber hydraulic cylinder; hydraulic-gas energy storage; potential energy recovery

0 前言

挖掘机工作过程中, 动臂频繁地举升下降, 动臂下降时, 其具有的势能经过阀口节流作用转化为热量而浪费掉, 造成极大的能量损失。如果能够回

收利用这部分损失掉的能量, 不仅能够降低挖掘机的使用成本, 也有利于节约能源, 保护环境。

为了回收再利用液压挖掘机工作过程中浪费掉的动臂势能, 国内外开展了多方面的研究, 回收利用动臂势能的方法可归结为以下 5 种类型。第一种方法是采用蓄能器直接回收利用, 通过控制阀将动臂下降时的油液引入液压蓄能器, 将动臂势能转化为液压能, 回收的能量可以用于驱动冷却系统或其他辅助装置, AMRHEIN 采用该方法控制 15 t 液

* 国家自然科学基金(U1510206, 51675364)和山西省研究生教育创新(2017BY045)资助项目。20170124 收到初稿, 20170525 收到修改稿

压挖掘机的动臂,降低燃油消耗 3 L/h^[1],赵丁选等^[2]采用将蓄能器油液引入液压泵入口的方法再生利用存储的动臂势能,降低能耗 14.8%。方法二是采用电气回收方式,通过液压马达-发电机将动臂下降时的势能转化为电能,存储在超级电容或电池中,ANDERSEN 等^[3]将该技术应用于叉车获得了 40%左右的能量回收效率。王庆丰课题组^[4-5]对这种回收方式回收挖掘机动臂势能做了深入研究,通过在回收回路中增加蓄能器,使势能回收与发电分时进行,降低了发电机的装机功率,将势能回收率由 17%提高到 41%,LIN 等^[6]对该回收方式的控制策略进行了进一步研究,获得了较好的控制特性,WANG 等^[7]采用控制主控阀压差的方法,改善了动臂运行的平稳性,同时提高了能量回收率,电气回收方式主要用于混合动力挖掘机中。第三种方法是采用闭式泵控液压缸回路,采用蓄能器或超级电容回收势能,德国利勃海尔公司、我国吉林大学的赵丁选教授和美国普渡大学的研究工作,采用蓄能器储能^[8-10],韩国釜山大学的研究工作采用电池储能^[11],都取得了较好的势能回收效果。景健等^[12]使用非对称闭式泵配合蓄能器回收挖掘机斗杆势能,能效提高 28.5%。第四种方法是在原有控制回路的基础上,增加液压变压器和蓄能器回收工作机构势能,或直接利用。国内西南交通大学的张树忠博士、国外瑞典林雪平大学的 PETTERSSON 对此项技术做了研究,取得回收效率 50%左右的效果^[13-14],SHEN 等^[15-16]对采用液压变压器控制挖掘机整机的方案进行了研究,与现有方法相比可减少燃油消耗 32%。第五种方法是采用液气储能原理直接平衡工作装置的重量,LIANG^[17]对采用一个工作液压缸和两个储能平衡缸驱动木材装载机动臂的工作特性和节能特性作了研究,降低能耗 20.5%,陈欠根等^[18]对采用该方法控制挖掘机动臂的特性做了仿真研究,在保持原有操作性不变的前提下,可降低系统能耗 33%。权龙等^[19]申请了应用该原理控制挖掘机的专利。赵鹏宇等^[20]对采用该方法结合泵控回路控制挖掘机整机的能效特性进行了仿真研究,LODEWYKS 等^[21]对该回路原理的能量流传递过程及能效特性做了理论分析。

通过对现有势能回收方法的分析可知,液气储能直接平衡动臂重力的势能回收利用方法,能量传递链短,转换效率高,但是现有实际应用方案都是在双液压缸驱动动臂回路中增设一个液气储能缸平衡动臂自重,需要改变动臂原有结构,主要适用于大型机器;对于采用单液压缸驱动动臂的小型机器,

受空间限制难以布置额外的液气平衡缸,因此,提出采用三腔液压缸配合蓄能器构成动臂液气储能与驱动一体化的回路原理,对动臂势能直接回收和高效再利用。该方法既适用于单液压缸驱动的小型机,也适用于双液压缸驱动的大型机器,最大优点是无须改变原有挖掘机动臂结构,而且势能与液压能直接转换,再生利用效率高。

首先根据前期的仿真结果,建立了基于三腔液压缸的液压挖掘机测试样机,通过试验,分析对比了分别采用两腔液压缸和三腔液压缸驱动动臂的运行特性与能效特性。

1 系统工作原理分析

图 1 所示为包含测试系统的挖掘机动臂驱动系统原理图,其中驱动回路为负载敏感系统,当采用常规单出杆双作用液压缸时,为测试样机原有负载敏感系统;当采用三腔液压缸时,为液气储能复合驱动系统。三腔液压缸活塞杆中空,与固定在缸体上的固定柱塞形成柱塞腔,为 A 腔,原有杆腔为 B 腔,原无杆腔为 C 腔,其中 A 腔和 B 腔与负载敏感驱动回路连接,驱动液压缸伸出与缩回,C 腔与液压蓄能器连通,构成液气平衡储能回路,直接回收和再利用动臂势能。

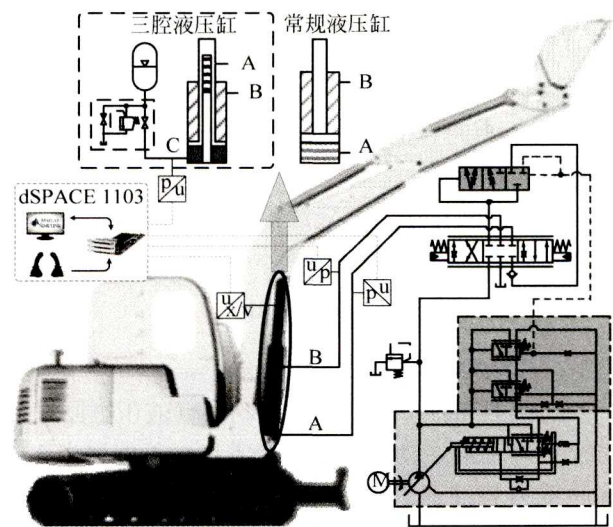


图1 负载敏感和液气复合驱动液压挖掘机动臂原理及试验测试系统

为了进一步说明工作和节能原理,通过工作过程中数学方程进行描述。

动态过程液压缸力平衡方程为

$$A_a p_a - A_b p_b + A_c p_c = m\dot{v} + Bv + F_f + F_L \quad (1)$$

式中, A_a 、 A_b 、 A_c 分别为液压缸 A、B、C 腔的面积,

p_a 、 p_b 、 p_c 分别为液压缸 A、B、C 腔的压力, m 为液压缸活塞杆质量, v 为液压缸速度, B 为阻尼系数, F_f 和 F_L 分别为液压缸摩擦力和负载力。其中 A 腔和 C 腔作用力共同驱动活塞杆伸出, B 腔作用力驱动活塞杆缩回。在忽略管路压力损失的情况下, 可以认为三腔液压缸 C 腔压力与蓄能器中油液压力相等, 而蓄能器油液压力取决于气体的压缩状态。蓄能器中的气体遵循气体状态方程如式(2)所示, 由于循环时间短, 将其视为绝热过程, $n=1.4$ 。

$$p_0 V_0^n = p_1 V_1^n = \text{Const} \quad (2)$$

式中, p_0 和 p_1 分别为蓄能器初始状态和任意状态时的压力, V_0 和 V_1 为对应的气体体积, n 为气体多变指数。

由此可推导出液压缸 C 腔压力表达式

$$p_c = p_0 \left(\frac{V_0}{V_0 - \Delta V} \right)^n \quad (3)$$

式中, ΔV 为充入蓄能器油液的体积。

在动臂下降过程中, A 腔油液经控制阀流回油箱, 阀口节流损失的能量如式(4)所示, 这部分能量主要来源于动臂举升时获得的重力势能。传统液压缸只有 A 和 B 两腔, 在式(1)中缺少 $A_c p_c$ 项, 因此, 动臂具有的重力势能在阀口上转换为热耗散掉, 而三腔液压缸由于有 C 腔基本平衡动臂重力, 式(1)中 $A_a p_a$ 项减小, 在阀口上损失的能量减少。

$$E_w = \int p_a q_a dt = \int p_a A_a v dt \quad (4)$$

式中, E_w 为阀口上损失的能量, q_a 为液压缸 A 腔流量。

C 腔油液在动臂下降过程中进入蓄能器, 储存在蓄能器中的能量如式(5)所示

$$E_s = \int p_c A_c v dt \quad (5)$$

式中, E_s 为储存在蓄能器中的能量。

动臂下降时, 驱动回路驱动动臂液压缸回缩, 同时 C 腔油液在动臂重力作用下进入蓄能器中, 动臂的重力势能通过油液介质转移并储存在蓄能器中; 动臂上升时, 驱动回路驱动液压缸伸出, C 腔容积增大, 储存在蓄能器中的能量释放出来, 转化为工作装置的势能。由此可知, 动臂的势能被回收并再利用, 从而达到节能的目的。

2 试验研究

2.1 试验测试样机

图 2 所示为构建的 6 t 液压挖掘机试验测试样

机照片, 试验测试原理如图 1 所示。该试验样机采用负载敏感液压系统控制各执行器。使用 atos 压力传感器测试液压缸各腔压力; 位移传感器为 MTS 磁致伸缩传感器, 可同时测试液压缸的位移和速度; 在液压泵排油口安装了 Parker 流量计, 可测试液压泵输出油液压力和流量。使用 dSPACE 1103 实时采集手柄控制信号以及各传感器信号。

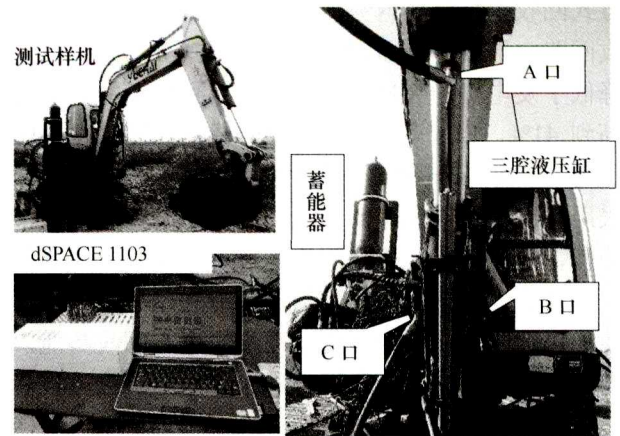


图 2 液压挖掘机试验测试样机

原系统使用的常规液压缸两腔面积分别为: A 腔面积 $7\ 850\ \text{mm}^2$, B 腔面积 $4\ 003.5\ \text{mm}^2$; 三腔液压缸的尺寸根据安装空间要求、强度、密封元件尺寸和仿真优化确定, 各腔面积分别为: A 腔面积 $1\ 962\ \text{mm}^2$, B 腔面积 $3\ 141\ \text{mm}^2$, C 腔面积 $7\ 536\ \text{mm}^2$ 。液压蓄能器容积 20 L, 充气压力 6 MPa, 初始压力根据前期的仿真优化, 被设置为 8 MPa。

先后采用常规液压缸的原系统和三腔液压缸液气储能复合驱动的新系统驱动动臂进行了空载和带载试验。

2.2 空载运行特性

2.2.1 常规液压缸驱动动臂

采用常规液压缸的原系统动臂液压缸位移和速度特性如图 3 所示, 在动臂开始上升阶段, 速度有较为明显的波动, 且持续振荡多次。为了更清晰地分析其动态工作过程及能耗特性, 将取其中一个周期进行详细分析, 为了与后面势能回收的试验相

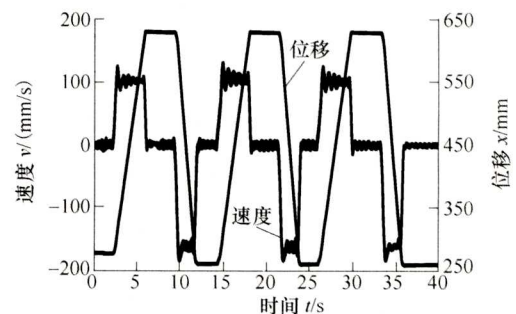


图 3 常规液压缸位移和速度特性曲线

对应，周期选取为动臂下降-动臂上升(图中 20~30 s)，能耗数据仅取动臂上升和下降动作过程，动臂静止时数据不计。

图4所示为单个工作周期内，常规液压缸运行时各腔压力曲线。当动臂开始下降时，B腔压力在短时间内存在明显上升现象，A腔压力有相应的下降，两腔合力驱动动臂加速下降。在动臂匀速下降阶段，B腔维持较低压力，A腔压力维持在7 MPa左右以平衡动臂重力。动臂下降结束时铲斗与地面接触，导致A、B腔压力急剧变化。动臂上升时，A腔压力存在明显的大幅波动，造成液压缸速度明显波动。动臂上升过程结束时液压缸伸出至极限位置，A腔压力上升到安全阀设定值。

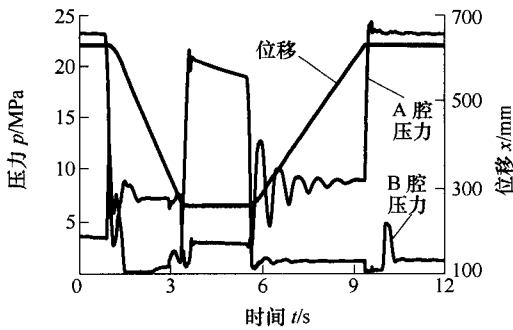


图4 常规液压缸各腔压力特性曲线

图5所示为液压泵输出功率和能量曲线。液压泵的功率和能量是根据流量计采集到的压力和流量数据，由式(6)、(7)计算得到。在动臂下降阶段，液压泵输出功率有短暂升高，驱动动臂加速，随后维持较小的值，不考虑动臂停止时接触地面造成的冲击，该阶段功率峰值为6.0 kW，液压泵共输出能量7.82 kJ。在动臂上升阶段，输出功率在11 kW左右波动，不考虑停止时到达极限位置造成的冲击，该阶段功率峰值为13.08 kW，液压泵共输出能量39.13 kJ。

$$P_p = p_p q_p \quad (6)$$

$$E_p = \int P_p dt \quad (7)$$

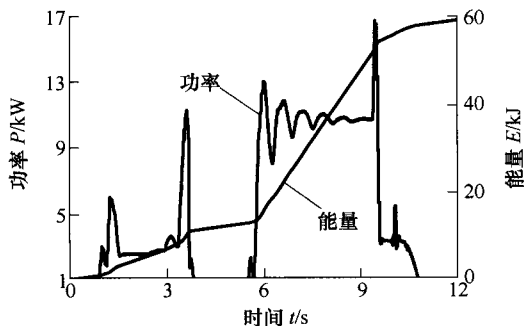


图5 常规液压缸液压泵输出功率和能量特性

2.2.2 三腔液压缸驱动动臂

图6所示为采用三腔液压缸驱动动臂液压缸位移和速度曲线，与常规液压缸相比，三腔液压缸在运行过程中速度没有明显的欠阻尼振荡，运行平稳，这主要是因为与C腔连通的蓄能器为其提供了阻尼，使其更加稳定。以下将取其中一个周期进行详细分析。

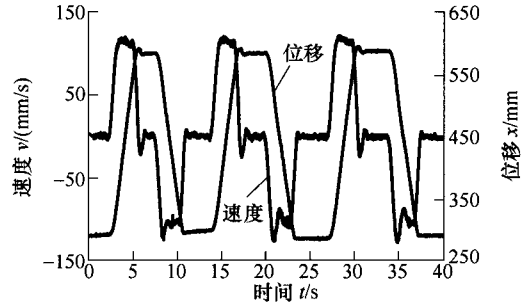


图6 三腔液压缸位移和速度特性曲线

图7所示为三腔液压缸各腔压力曲线。三腔液压缸的C腔与蓄能器连通，其压力由蓄能器充液状态所决定，蓄能器初始压力为8 MPa。随着动臂下降，C腔油液进入蓄能器，蓄能器压力随油液体积增加而上升，下降结束时，升至10.7 MPa，动臂势能转化为液压能，并储存在蓄能器中。动臂重量基本由C腔和蓄能器平衡，因此A腔压力处于较低水平。B腔压力在动臂下降阶段加速时有短时上升，在匀速下降阶段，由于C腔压力不断升高，B腔压力随之升高，驱动动臂下降。在动臂上升阶段，蓄能器中油液进入液压缸C腔，C腔压力逐渐降低，提供的驱动力不足以完全驱动动臂上升，A腔压力逐渐上升，弥补C腔压力的不足。B腔压力始终处于较低水平。

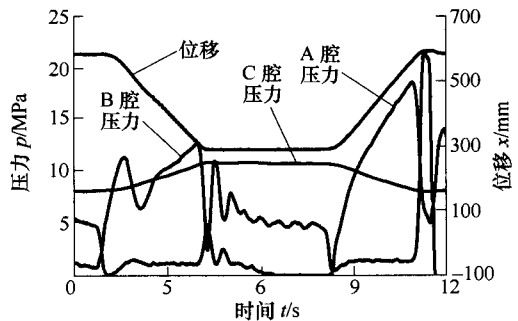


图7 三腔液压缸各腔压力特性曲线

图8所示为该工作周期中，蓄能器的功率和能量特性曲线，其中功率和能量分别由式(8)、(5)计算得到。在动臂下降阶段，蓄能器充液，回收动臂势能，功率约8 kW，回收的能量为20.96 kJ。在动臂上升阶段，蓄能器将回收的势能释放出来，对外做

工, 辅助举升动臂, 输出功率为 8 kW 左右, 输出能量 20.85 kJ。

$$P_s = p_c A_c v \quad (8)$$

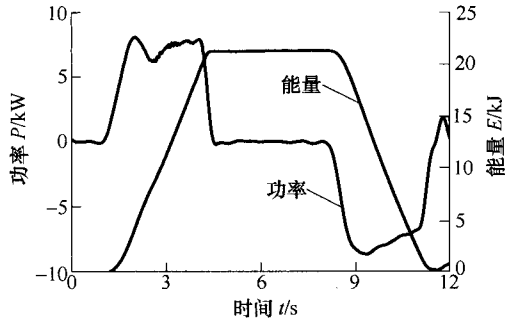


图 8 蓄能器充放液功率和能量

图 9 所示为液压泵输出的功率和能量特性曲线。在动臂下降阶段, 由于 B 腔具有较高压力, 因此液压泵需要输出能量驱动动臂下降, 该阶段输出能量 9.9 kJ; 在动臂上升阶段, 虽然 A 腔压力较高, 但其面积小, 因此流量小, 液压泵输出功率并不大。随着蓄能器压力降低, A 腔压力升高, 输出功率也逐渐上升, 该阶段输出功率峰值为 4.61 kW, 输出能量 8.81 kJ。

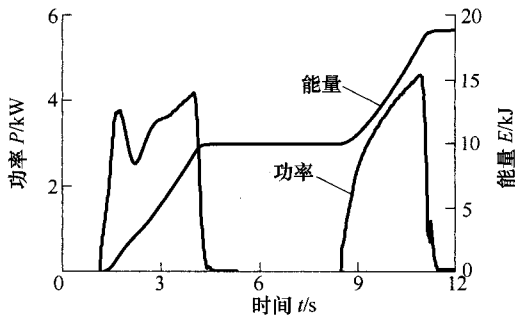


图 9 三腔液压缸液压泵输出功率和能量

2.3 空载能耗特性对比

表 1 所示为两系统分别在动臂下降和上升阶段的能耗。受试验场地限制, 两组试验液压缸位移不同, 导致能量数据不具有直接可比性。但结合图 4 和图 5 可知, 原系统的能耗与液压缸位移成近似正比关系, 因此可以根据位移比例将原系统的能量数据进行折算后与新系统数据进行统一比较。表中括号内数值为根据式(9)折算后的结果

$$E' = \frac{x_2}{x_1} E_0 \quad (9)$$

式中, x_1 和 x_2 分别为原系统和新系统的液压缸位移, E_0 和 E' 分别为转换前后的能量数据。

在动臂下降阶段, 原系统液压泵输出能量折算值为 6.26 kJ, 新系统输出能量 9.9 kJ, 多输出的能

量主要是因为蓄能器的存在, 需要额外的能量来驱动动臂下降, 因此蓄能器的能量来自两部分, 一部分是动臂势能, 另一部分是液压泵输出能量, 共回收能量 20.96 kJ。由于下降时, 两系统液压缸速度不同, 因此对其峰值功率不予对比。

表 1 能耗特性对比

	动臂下降		动臂上升	
	原系统	新系统	原系统	新系统
液压缸位移/mm	-370	-296	370	305
蓄能器能量/kJ	—	20.96	—	20.85
液压泵能量/kJ	7.82 (6.26)	9.9	39.13 (32.26)	8.81
峰值功率/kW	—	—	13.08	4.61

在动臂上升阶段, 原系统液压泵输出能量折算值为 32.26 kJ, 新系统液压泵输出能量仅为 8.81 kJ, 蓄能器输出能量 20.85 kJ, 两动力源共输出能量 29.66 kJ, 略小于原系统, 原因是三腔液压缸的 A 腔面积仅为原液压缸 A 腔面积的 25%, 在同样速度条件下, A 腔的流量大幅减少, 节流损失也相应减少。蓄能器输出能量占总输出能量的 70.3%。液压泵输出的峰值功率由 13.08 kW 降低至 4.61 kW, 降低了 64.76%。

在动臂的一个工作周期内, 原系统的液压泵共输出能量 38.52 kJ, 新系统的液压泵共输出能量 18.71 kJ, 能耗降低 48.57%。

2.4 带载运行特性

2.4.1 常规液压缸驱动动臂

图 10 和 11 所示为常规液压缸驱动带载动臂的速度位移曲线和液压缸各腔压力曲线, 由图 10 中速度曲线和图 11 中 A 腔压力曲线可以看出, 较空载工况, 上升时速度和压力波动次数减少, 在 6.5 s 左右, 铲斗完成卸料, 负载减小, 液压缸 A 腔压力降低。在动臂下降时, 速度和压力存在多次波动。

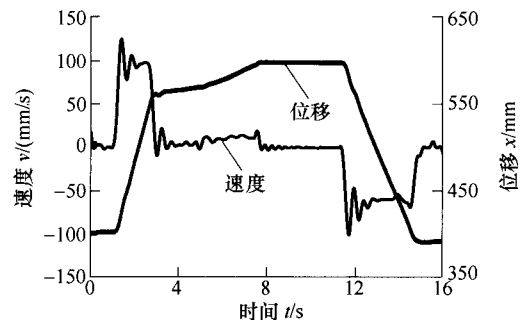


图 10 常规液压缸带载速度位移特性曲线

如图 12 所示为常规液压缸驱动带载动臂时液压泵输出功率和能量曲线, 动臂举升时, 液压泵输

出功率存在短暂波动，峰值为 12.1 kW，上升过程液压泵输出能量 16.36 kJ。

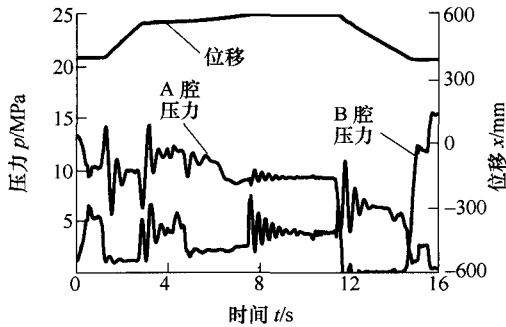


图 11 常规液压缸各腔压力曲线

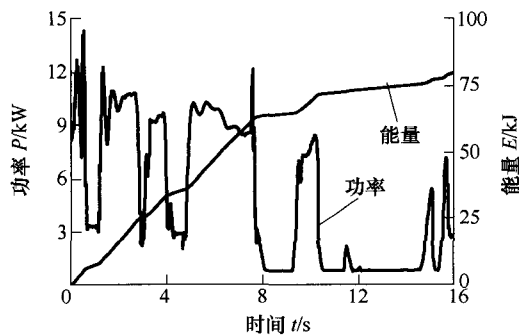


图 12 常规液压缸液压泵输出功率和能量

2.4.2 三腔液压缸驱动动臂

如图 13、14 所示为三腔液压缸驱动带载动臂工作的液压缸位移速度特性和各腔压力曲线。由于工作装置呈挖掘姿态，动臂举升行程较小，并未达到其最大速度。在动臂上升阶段，C 腔压力逐渐降低，A 腔压力相应逐渐升高，液压泵输出功率也随之增大。在动臂静止期间，铲斗和斗杆完成卸料动作，在斗杆向外伸出期间，负载作用力臂增大，导致动臂液压缸负载力增加，A 腔压力升高。斗杆液压缸在缩回开始和结束时，由惯性作用引起动臂液压缸各腔压力以及速度的波动，在卸料过程中，A 腔压力随负载减小而逐渐降低。在动臂下降开始时，B 腔压力短暂升高，驱动动臂加速，加速完成后，B 腔压力降低，但随着 C 腔压力逐渐升高，B 腔压

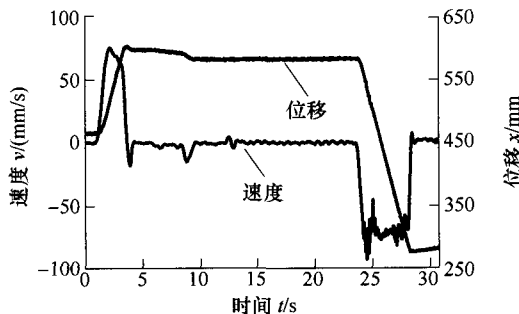


图 13 三腔液压缸带载位移速度特性

力需相应升高以驱动动臂按设定速度下降。在动臂动作过程中，动臂液压缸的速度和各腔压力没有明显的波动。

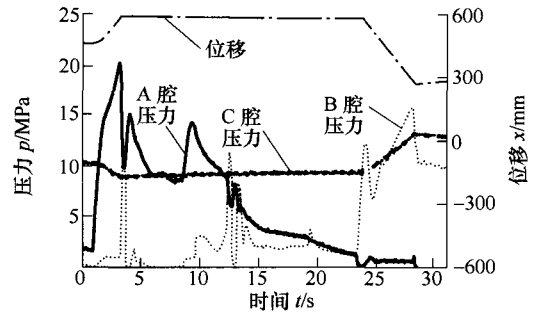


图 14 三腔液压缸带载各腔压力曲线

如图 15、16 所示为带载运行过程中，蓄能器充放液功率、能量和液压泵输出功率、能量。动臂下降过程与空载过程类似。在动臂带载举升过程中蓄能器释放能量 9.6 kJ，液压泵输出能量 5.68 kJ，两者共输出能量 15.28 kJ，在该过程中，蓄能器承担了 62.8% 的能量输出，较空载工况，蓄能器承担比例有所下降。

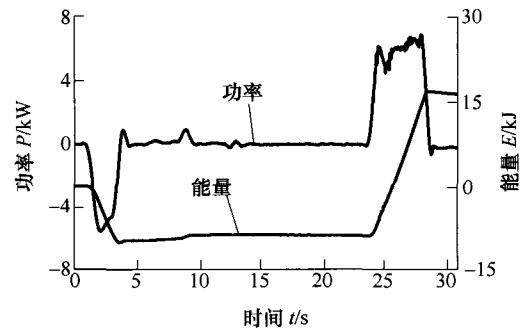


图 15 蓄能器功率和能量曲线

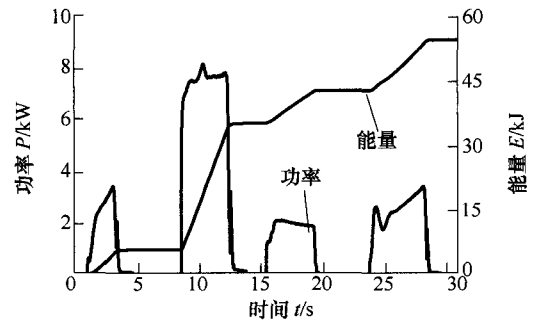


图 16 三腔液压缸带载输出功率和能量

由于采用常规液压缸和三腔液压缸的带载工况负载重量不同，因此不对带载工况两系统的能耗特性进行对比。

3 结论

(1) 在液压挖掘机负载敏感系统的基础上，采

用三腔液压缸和蓄能器,构成液气储能系统平衡动臂的自重,可直接回收利用动臂举升的势能,显著降低能耗和装机功率,一个工作周期内液压泵输出能量较原系统降低 48.57%,在动臂上升阶段,液压泵输出功率峰值较原系统降低 64.76%。

(2) 采用新的液气储能平衡驱动系统,提高了系统运行平稳性,运行中速度波动峰值和次数明显减少。

(3) 采用三腔液压缸,在动臂举升过程中,由于工作油腔面积减小,同等速度情况下需要的流量减小,进一步减少了节流损失。

参 考 文 献

- [1] AMRHEIN J, NEUMANN U. PRB - regeneration of potential energy while boom-down[C]// 8th International Fluid Power Conference. March 26-28, 2012 Dresden, Germany: 2012: 26-28.
- [2] 赵丁选, 陈明东, 戴群亮, 等. 油液混合动力液压挖掘机动臂势能回收系统[J]. 吉林大学学报, 2011, 41(13): 150-154.
ZHAO Dingxuan, CHEN Mingdong, DAI Qunliang, et al. System of arm potential energy recovery in hybrid hydraulic excavators[J]. Journal of Jilin University, 2011, 41(13): 150-154.
- [3] ANDERSEN T, PEDERSEN H, HANSEN M. Regeneration of potential energy in hydraulic forklift trucks[C]// The Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control. Hang Zhou, China: 2005: 302-306.
- [4] LIN T, WANG Q, HU B, et al. Research on the energy regeneration systems for hybrid hydraulic excavators[J]. Automation in Construction, 2010, 19(8): 1016-1026.
- [5] LIN T, WANG Q. Hydraulic accumulator motor generator energy regeneration system for a hybrid hydraulic excavator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(6): 1121-1129.
- [6] LIN T, HUANG W, REN H, et al. New compound energy regeneration system and control strategy for hybrid hydraulic excavators[J]. Automation in Construction, 2016, 68: 11-20.
- [7] WANG T, WANG Q. Efficiency analysis and evaluation of energy-saving pressure compensated circuit for hybrid hydraulic excavator[J]. Automation in Construction, 2014, 47: 62-68.
- [8] HIPALGAONKAR R, ZIMMERMAN J, IVANTYSNOVA M. Fuel savings of a mini-excavator through a hydraulic hybrid displacement controlled system[C]//Proceedings of 8th IFK International Conference on Fluid Power, March 26-28, 2012, Dresden, Germany: 2012: 139-154.
- [9] BOEHM D, HOLLÄNDER C, LANDMAN T. Hybrid-Antriebe bei Raubenbaggern-Konzepte und Lösungen[J]. Hybridantriebe für Arbeitsmaschinen, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, 2011, 7: 117-124.
BOEHM D, HOLLANDER C, LANDMAN T. Hybrid drives for robber excavator concepts and solutions[J]. Hybrid Drives for Work Machines, Karlsruhe Vehicle System Technology, 2011, 7: 117-124.
- [10] KANG R, JIAO Z, WANG S, et al. Design and simulation of electro-hydrostatic actuator with a built-in power regulator[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(6): 700-706.
- [11] YOON J, TRUONG D Q, AHN K K. A generation step for an electric excavator with a control strategy and verifications of energy consumption [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(5): 755-766.
- [12] 景健, 权龙, 黄家海, 等. 非对称泵直驱液压挖掘机斗杆特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 188-196.
JING Jian, QUAN Long, HUANG Jiahai, et al. Research on the characteristics of asymmetric pump directed controlled Arm cylinder of excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 188-196.
- [13] 张树忠. 基于液压力能量回收的挖掘机动臂节能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
ZHANG Shuzhong. Study on boom energy saving for hydraulic excavator based on hydraulic energy recovery [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [14] PETTERSSON K, HEYBROEK K, KLINTEMYR A, et al. Analysis and control of a complementary energy recuperation system[C]//8th International Fluid Power Conference, March 26-28, 2012: Dresden, Germany: 2012: 529-540.
- [15] SHEN W, JIANG J, SU X, et al. Energy-saving analysis of hydraulic hybrid excavator based on common pressure rail [J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 1-12.
- [16] SHEN W, JIANG J, SU X, et al. Control strategy analysis of the hydraulic hybrid excavator[J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(2): 541-561.

- [17] LIANG X. On improving energy utilization in hydraulic booms[D]. Tampere: Tampere University of Technology, 2002.
- [18] 陈欠根, 李百儒, 张大庆, 等. 新型液压挖掘机动臂势能回收再利用系统研究[J]. 广西大学学报, 2013, 38(2): 292-299.
CHEN Qiangen, LI Bairu, ZHANG Daqing, et al. Research on potential energy recycling system of a new hydraulic excavator boom[J]. Journal of Guangxi University, 2013, 38(2): 292-299.
- [19] 权龙, 夏连鹏, 郝惠敏, 等. 一种工程作业装备工作装置的控制回路: 中国, 201511003769.X[P]. 2016-05-25.
QUAN Long, XIA Lianpeng, HAO Huimin, et al. A control circuit for working equipment of engineering equipment: China 201511003769.X[P]. 2016-05-25.
- [20] 赵鹏宇, 陈英龙, 周华, 等. 油液混合动力挖掘机势能回收及能量管理策略[J]. 浙江大学学报, 2016, 50(5): 893-901.
ZHAO Pengyu, CHEN Yinglong, ZHOU Hua, et al. Potential energy recovery and energy management strategy of hydraulic hybrid excavator[J]. Journal of Zhejiang University, 2016, 50(5): 893-901.
- [21] LODEWYKS J, ZURBRÜGG P. Decentralized energy-saving hydraulic concepts for mobile working machines[C]// 10th International Fluid Power Conference. March 8-10, Dresden, Germany: 2016: 79-90.
-
- 作者简介: 夏连鹏, 男, 1990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: xialianpeng0120@link.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