

文章编号:1671-6833(2014)02-0120-04

液压挖掘机可回收能量分布研究

张树忠, 江吉彬, 练国富

(福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350108)

摘 要: 基于挖掘机液压系统效率较低现状,以某 20 t 双泵双回路液压挖掘机为样机,搭建液压系统可回收能量分布实验平台,在 Matlab 中建立液压系统和执行机构模型,通过典型挖掘循环下的仿真和实验,得出各个元件(动臂、斗杆、铲斗油缸以及回转马达)的可回收能量分布情况。结果显示可回收能量占液压系统总输入能量的 21.1%,其中动臂势能和回转制动能分别占总可回收能量的 72% 和 23.8%,是可回收能量的主要组成部分,表明对动臂势能和回转制动能进行能量回收是降低系统能耗的有效途径。

关键词: 液压挖掘机;可回收能量;分布;实验;动臂势能;回转制动能

中图分类号: TH137.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.028

0 引言

传统液压挖掘的总效率为 20% 左右,其中液压系统效率仅为 30% 左右,是液压挖掘机效率低下的主要原因之一^[1]。对于液压挖掘机液压系统效率低下的研究主要集中在以下 3 个方面^[2-3]: ①提高液压工作元件性能;②改进液压系统;③改善发动机—液压系统—执行元件的功率匹配。虽然上述措施能达到一定的节能效果,但在工作过程中,液压挖掘机转台的回转、工作装置各机构上下摆动比较频繁,且各个运动部件的惯性都比较大,下放或减速制动时会释放出大量的能量^[4]。从节能降耗上考虑,有必要充分利用这部分相当可观的能量,为此主要通过基于混合动力单元的能量回收技术来解决^[5-8]。

笔者以双泵双回路的 20 t 液压挖掘机为样机,围绕其液压系统的节能,搭建液压系统可回收能量分布实验平台,分别建立液压系统和执行机构模型,开展仿真和实验研究,得出挖掘机典型工况下系统各执行元件的可回收能量分布,在此基础上挖掘液压系统的节能潜力。

1 双泵双回路液压系统结构原理

该 20 t 液压挖掘机配备了双泵双回路液压系

统,各执行元件的驱动动力源为 2 台主变量液压泵。主变量泵 1 用来驱动斗杆、动臂油缸和回转马达,主变量泵 2 用来驱动动臂、斗杆和铲斗油缸。另合流阀用来使左右行走马达进口压力和流量一致,以保持直线行走。

液压挖掘机的结构包括上车转台、动臂、斗杆、铲斗以及行走机构,其中上车回转和行走是液压马达驱动的,斗杆、动臂和铲斗则由油缸驱动。在典型工况中,一般在某固定处进行挖掘工作,因此不对行走机构的液压回路作研究。

2 可回收能量分布实验研究

开展 20 t 液压挖掘机典型挖掘实验,获得各个执行元件的压力、流量、速度特性,对实验结果加以分析;将实验所获得的各执行元件位移特性作为仿真模型的输入,比较仿真与实验所得到的可回收能量分布。

2.1 实验目的

20 t 液压挖掘机的可回收能量分布实验研究,在于测试各执行元件的压力、流量、速度等,通过实验验证开展能量回收的必要性。基于现有设备和测试条件,在一个典型挖掘循环下主要采集以下数据

(1) 主变量泵 1 和 2 的输出压力、流量;

收稿日期:2013-12-27;修订日期:2014-01-29

基金项目:福建省科技重大专项资助项目(2008HZ0002-1)

作者简介:张树忠(1980-),男,福建周宁人,福建工程学院讲师,博士,研究方向为机电液智能控制,E-mail: zszgo@163.com.

- (2) 铲斗、斗杆和动臂油缸的速度、进出口压力;
- (3) 回转马达的转速、进出口压力;
- (4) 主阀的先导控制压力。

2.2 实验方案

根据实验目的,在系统中设置位移、压力、流量以及转速传感器。

启动挖掘机后先预热使液压油达到 40 ℃ 以上,此时液压油达到较佳工作性能。推动控制手柄产生先导控制压力,以控制各执行元件阀组的开口度,完成一个典型挖掘循环,同时利用数据采集器和各传感器获取数据。

2.3 实验设备和仪器

实验设备和仪器主要有:20 t 型挖掘机 1 台,数据采集器 1 个,转速传感器 1 个,压力传感器若干个,流量传感器 2 个,计算机 1 台等。

2.4 实验结果分析

1) 实验过程分析

图 1 为通过传感器测得的各执行机构(动臂、斗杆、铲斗以及上车回转)位移。整个典型挖掘循环耗时约 16.8 s,包括 4 个阶段:挖掘、满举升回转、卸载以及空斗返回。

(1) 挖掘:通常用斗杆或铲斗油缸进行挖掘,或者两者复合进行挖掘;实验中动臂油缸活塞伸长 0.24 m,斗杆油缸则为 0.94 m,此过程为斗杆和动臂的复合动作;而后铲斗油缸活塞伸出 0.69 m 进行挖掘装载。

(2) 满斗举升回转:挖掘结束后,动臂油缸活塞伸出 0.52 m 将动臂顶起;上车转台回转 94.3° 至卸载点,此时为回转和动臂的复合动作。

(3) 卸载:回转至卸载点时,上车转台制动,铲斗油缸活塞缩回 0.74 m 放铲卸载。

(4) 空斗返回:卸载结束后,上车转台反向转动 87.1° 归位,动臂和斗杆油缸活塞分别缩回 0.76 m 和 0.94 m,动臂和斗杆油缸复合动作把空铲斗放到新的挖掘点,此时为动臂、斗杆以及回转三者的复合动作。

根据油缸有无杆腔的面积和实验所得到的压力数据可计算其输出力,得到各油缸的力特性曲线;速度特性则通过速度传感器测得,其中动臂油缸的力和速度特性如图 2。

由图 2 中动臂油缸的力和速度曲线,可知 12.9 ~ 16.7 s 动臂下降(速度为负表示油缸缩回,速度为正表示油缸伸出,活塞输出力与位移方向相同时为正),且油缸输出力和速度方向相反,因

此,此过程为负值负载向系统回馈能量。

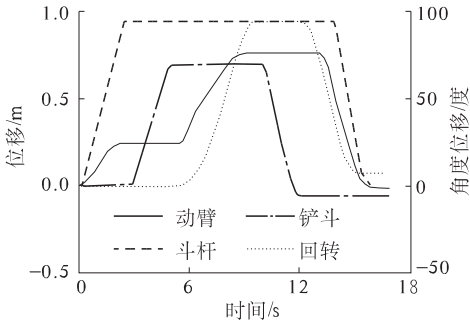


图 1 各执行元件的位移特性

Fig. 1 Displacement characteristics of actuators

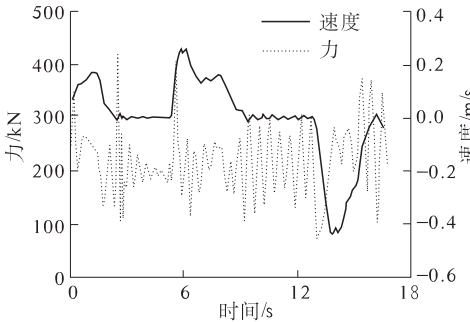


图 2 动臂的油缸的力和速度

Fig. 2 Force and speed of boom cylinder

图 3 为回转马达进出口压力特性,由图 3 可知 7.81 ~ 9.61 s 第一次转台回转制动,13.92 ~ 15.30 s 是第二次制动,均给系统带来了较大压力冲击,此时大量动能被转化为热能消耗掉,造成液压系统温升。

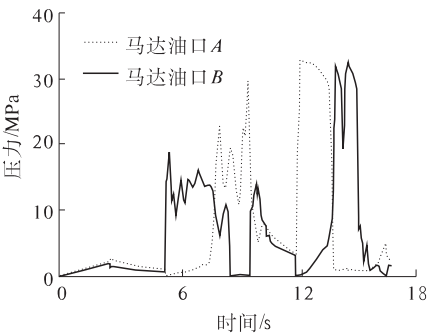


图 3 回转马达的进出口压力

Fig. 3 Pressure of swing motor

2) 实验结果分析

双主泵输出的功率 P_{pi} 和总能量 E_{pi} 分别为

$$P_{pi} = p_{pi} Q_{pi}, \tag{1}$$

$$E_p = \sum_{i=1}^2 \int_0^t p_{pi} Q_{pi} dt, \tag{2}$$

式中: p_{pi} 为主泵的输出压力, Pa; Q_{pi} 为主泵的输出流量, m^3/s ; i 为下标 $i = 1, 2$, 分别表示泵 1 和泵 2。

2; t 为典型工作循环周期, s.

铲斗、斗杆和动臂下放时,各油缸向系统回馈的功率和势能如下

$$P_j = F_{Lj} \dot{x}_j, \tag{3}$$

$$E_j = \int_{t_1}^{t_2} F_{Lj} \dot{x}_j dt, \tag{4}$$

式中: t_1, t_2 分别为各油缸向系统回馈能量的开始和结束的时间, s; F_L 为各油缸的输出力, N; x_i 为各油缸的输出位移, m; j 为下标 $j = 1, 2$, 分别表示动臂、斗杆和铲斗油缸.

回转制动时,回转马达向系统回馈的制动功率 P_{sw} 和制动能 E_{sw} 大小如下

$$P_{sw} = T \dot{\varphi}, \tag{5}$$

$$E_{sw} = \int_{t_3}^{t_4} T \dot{\varphi} dt, \tag{6}$$

式中: t_3, t_4 为回转马达向系统回馈能量的开始和结束的时间, s; T 为回转马达的输出力矩, N · m; φ 为回转角位移, rad.

图 4 为双主变量泵的输出功率特性,由图 4 可计算出在该典型挖掘循环中液压泵输出的总能量约为 1 172 kJ.

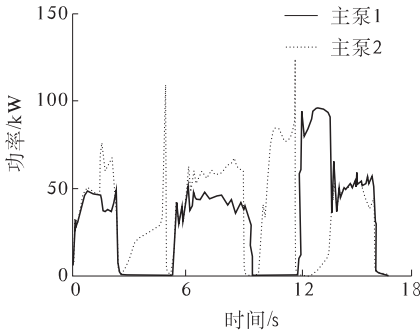


图 4 双主泵的输出功率

Fig. 4 Power of main pumps

由式(3)可计算出斗杆和动臂下放时向系统回馈的功率特性,如图 5 所示。在一个典型挖掘循环中,动臂油缸活塞缩回 0.76 m,动臂向系统回馈的势能约为 176 kJ. 同理,斗杆油缸活塞伸出下放的回馈势能约为 10.4 kJ;另两次回转制动回馈的能量分别为 22.36 kJ 和 36.54 kJ,共 58.9 kJ.

实验结果表明(见表 1),在典型挖掘循环中,动臂下放回馈的可回收能量约占总可回收能量的 72%,为双泵输出总能量的 15.2%;回转制动所产生的可回收能量约占总可回收能量的 23.8%,为双泵输出总能量的 5.03%;动臂和回转的可回收能量之和高达双泵输出总能量的 20.23%,可

知有必要对这部分能量进行回收利用;此外,斗杆和铲斗仅占 0.89%,即各执行元件可回收能量占液压系统总输入能量的 21.1%.

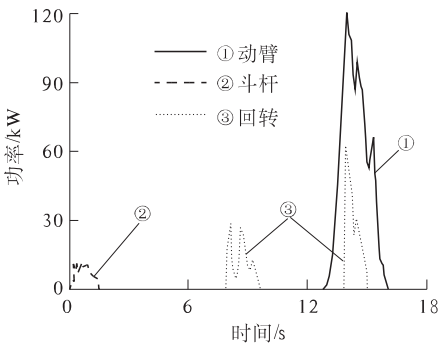


图 5 各执行元件的可回收功率分布

Fig. 5 Recoverable power distribution of actuators

表 1 各执行元件的可回收能量分布

Tab. 1 Recoverable energy distribution of actuators

执行元件	可回收能量/kJ	与总能量之比/%	所占比例/%
动臂油缸	178.00	15.20	72.00
斗杆油缸	10.40	0.89	4.20
铲斗油缸	0	0	0
回转马达	58.90	5.03	23.80

3 建模仿真

为准确计算液压挖掘机各执行元件的可回收能量分布,在 MATLAB 中分别建立液压系统模型和执行机构学模型,进行仿真研究.

执行机构模型如图 6 所示. 包括动臂、斗杆、铲斗的工作装置,应用逆向动力学进行求解,以回转马达和工作装置各油缸的动作为输入,分别反求各执行元件的力矩或作用力,并将其作为液压系统模型的输入,见图 7.

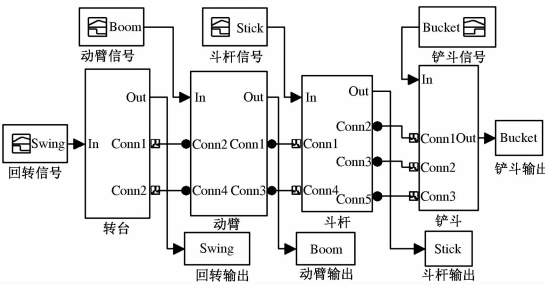


图 6 执行机构模型

Fig. 6 Mechanical model

将典型挖掘实验所得到的各执行元件位移(见图 1)作为仿真模型的输入,以使实验和仿真具有较好的可比性. 通过数字仿真和计算,得出其

各执行元件的可回收能量分布如图 8 所示. 由图 8 可知动臂下放时所包含的可回收能量最大.

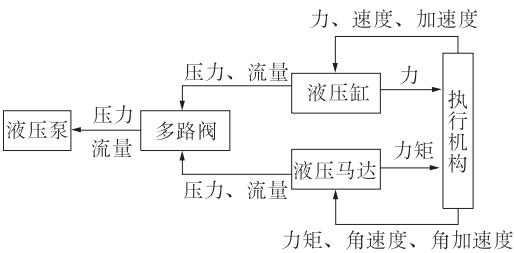


图 7 仿真流程图
Fig.7 Simulation flowchart

根据式(4)和(6)对功率求积分,得出各执行元件可回收能量大小,如图 8 所示. 动臂下放的回收能量约为 158.29 kJ, 占有可回收能量总数的 72.5%; 两次回转制动的可回收能量约为 52.25 kJ, 占总回收能量的 23.78%.

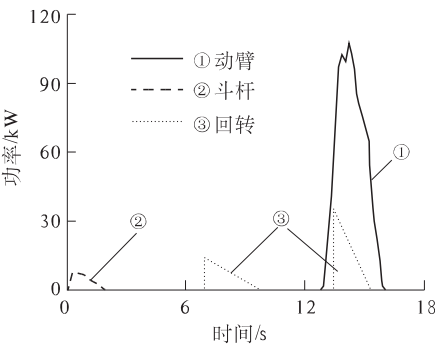


图 8 各执行元件可回收能量分布
Fig.8 Recoverable energy distribution of actuators

仿真结果见表 2, 由表 1、2 可知两者的可回收能量大小略有差异, 但可回收能量的分布比例基本吻合, 验证了仿真和实验的正确性.

表 2 各执行元件的可回收能量分布表
Tab.2 Recoverable energy distribution of actuators

执行元件	可回收能量分布/	可回收能量大小/
	%	kJ
动臂油缸	72.05	158.29
斗杆油缸	4.01	8.81
铲斗油缸	0.15	0.33
回转马达	23.78	52.25

根据上述分析, 通过以下措施可提高液压系统效率: 对转台制动能和动臂下放势能进行能量回收, 如采用闭式系统配合蓄能器、液压变压器配合液压蓄能器、液压马达—发电机配合超级电容

或机械(飞轮)能储存系统实现能量回收和再利用.

4 结论

(1) 以某 20 t 液压挖掘机为样机, 搭建液压系统可回收能量分布实验平台, 建立液压系统和执行机构模型, 开展典型挖掘循环下的实验和仿真, 结果表明各执行元件可回收能量占液压系统总输入能量的 21.1%, 其中动臂、回转的可回收能量分别占总输出的 72% 和 23.8%, 而斗杆和铲斗仅为 0.89%.

(2) 对液压挖掘机转台制动能和动臂下放势能进行能量回收, 如用闭式系统配合蓄能器、液压变压器配合液压蓄能器、液压马达—发电机配合超级电容实现能量回收和再利用, 可降低液压系统能耗约 20%.

参考文献:

[1] KAGOSHIMA M, KOMIYAMA M, NANJO T, et al. Development of new hybrid excavator [J]. Kobelco Technology Review, 2007, 21(11): 39-49.

[2] 朱靖, 孙新学, 苏曙, 等. 工程机械液压技术发展综述[J]. 河北建筑工程学院学报, 2001, 19(1): 56-60.

[3] 张彦廷. 基于混合动力与能量回收的液压挖掘机节能研究[D]. 浙江大学杭州机械与能源工程学院, 2006.

[4] 张树忠. 基于液压式能量回收的挖掘机动臂节能研究[D]. 西南交通大学机械工程学院, 2011.

[5] 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.

[6] TH H, KK A. Design and control of a closed-loop hydraulic energy-regenerative system[J]. Automation in Construction, 2012, 22(10): 444-458.

[7] LIN Tian-liang, WANG Qing-feng, HU Bao-zan, et al. Research on the energy regeneration systems for hybrid hydraulic excavators[J]. Automation in Construction, 2010, 19(8): 1016-1026.

[8] WANG Tao, WANG Qing-feng, LIN Tian-liang. Improvement of boom control performance for hybrid hydraulic excavator with potential energy recovery[J]. Automation in Construction, 2013, 30(6): 161-169.

(下转第 128 页)