

文章编号:1672-9331(2020)04-0106-08

# 1.7 t 小型液压挖掘机臂架势能再生系统研究

贺湘宇,胡薜礼,肖广鑫,谭丽莎

(长沙理工大学 汽车与机械工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:** 液压挖掘机完成一个工作循环,需要依靠液压传动系统驱动臂架做频繁的往复运动。为了更好地解决臂架在下降过程中的能量损失问题,以 1.7 t 小型液压挖掘机为研究对象,提出了两种臂架势能再生系统模式。首先,分析和探讨了这两种臂架势能再生系统模式是否可行;其次,设计了这两种臂架势能再生系统模式及其液压回路原理图;最后,基于 1.7 t 小型液压挖掘机的实际工况数据,利用 AMESim 仿真平台对这两种臂架势能再生系统模式的工作性能和节能效率进行了深入的分析。研究表明:在相同的工况下,这两种液压挖掘机臂架势能再生系统模式的节能效率分别为 22.1% 和 23.7%。

**关键词:** 液压挖掘机;工程机械;液压传动系统;蓄能器;增压缸;势能回收;仿真模型

**中图分类号:** U469.6      **文献标志码:** A

## Research on boom potential energy regeneration system of 1.7 t small hydraulic excavator

HE Xiang-yu, HU Bi-li, XIAO Guang-xin, TAN Li-sha

(School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of  
Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Hydraulic excavator needs to rely on the hydraulic transmission system driving the boom to make frequent to-and-fro motion to complete a work cycle. In order to better solve the problem of energy loss in the falling process of the boom, a 1.7 t small hydraulic excavator was taken as the research object, and two modes of the boom potential energy regeneration systems were proposed. Firstly, the feasibility of the two modes of the boom potential energy regeneration systems was analyzed and discussed. Secondly, the schematic diagrams of the two modes of the boom potential energy regeneration systems and their hydraulic circuits were designed. Finally, based on actual working condition data of 1.7 t hydraulic excavator, AMESim simulation platform was used to deeply analyze the working performances and energy saving efficiencies of the two modes of the boom potential regeneration systems. The result of the research indicates that under the same working condition, the energy saving efficiencies of the two modes of the potential energy regeneration systems of the hydraulic excavator booms are 22.1% and 23.7%, respectively.

**Key words:** hydraulic excavator; construction machinery; hydraulic transmission system; accumulator; booster cylinder; potential energy recovery; simulation model

液压挖掘机在施工过程中具有较强的规律性,完成一个工作循环,臂架都会进行一次上升和一次下降<sup>[1]</sup>。为了更好地控制液压挖掘机臂架的下降速度,通常会在液压回路上安装一个节流阀<sup>[2]</sup>,但这样就浪费了由挖掘机臂架重力势能转化的热能,同时还会引起液压系统发热,最终会缩短液压元器件的使用寿命<sup>[3-4]</sup>。为了更好地解决这些问题,学者们将能量回收技术运用到液压挖掘机上以回收臂架的重力势能<sup>[5]</sup>。

虽然学者们在液压挖掘机臂架势能再生系统的节能研究方面取得了较多的成果,但这些研究成果主要针对大中型挖掘机,而对 6 t 以下的小型液压挖掘机的节能研究相对比较匮乏<sup>[6-7]</sup>。小型液压挖掘机节能研究的难点,主要体现在以下几个方面:

1) 在小型液压挖掘机上安装油电混合动力系统会导致成本增加,而且小型液压挖掘机也没有足够的空间安装该系统。

2) 在臂架下落时,臂架的重力势能不足以在臂架油缸无杆腔中产生较高的再生压力,这就降低了蓄能器的再生效率。

## 1 方案分析

综上所述,小型液压挖掘机臂架势能再生系统仍有一些研究难点需要解决,如安装空间有限、制造成本增加以及较低的再生压力降低了液压蓄能器的液压能效等<sup>[8-9]</sup>。本研究对这些问题进行了对比分析,试图找出这些问题的解决方案,并最终提出了两种以蓄能器作为储能元件的臂架势能再生系统。

### 1.1 采用蓄能器的臂架势能再生系统

与小型液压挖掘机相比,大型液压挖掘机体积大,空间充裕,更适合安装油电混合动力系统。考虑到空间和成本因素,小型液压挖掘机选用蓄能器作为储能元件回收臂架重力势能更加合适<sup>[10-11]</sup>。图 1(a)显示了臂架势能再生系统的能量回收原理,图中绿色箭头表示液压挖掘机臂架下降和能量的流动方向。其工作原理为:液压泵输出高压油流入臂架油缸,有杆腔推动臂架向下运动,根据绿色箭头指向可知,臂架油缸无杆腔的高压油流入蓄能器中,完成臂架重力势能的回收<sup>[12]</sup>。

与电气回收方式相比,蓄能器势能回收方式具有以下优点:① 能量转换环节相对较少,回收效率较高;② 成本较低,能够减少整机的制造成本<sup>[13-14]</sup>。图 1(b)显示了臂架势能再生系统的能量释放原理,图中红色箭头表示液压挖掘机臂架上升和能量的流动方向。其工作原理为:蓄能器配合液压泵将储存在蓄能器里的液压油引入到液压泵入口,并驱动臂架向上运动,这样可以减小液压泵进出口的压力差,而液压泵的实际输出功率由进出口的油液压力差及油液流量的大小共同决定。在流量恒定时,油液压力差越小,液压泵的能耗越低。因此,该方案不需要大幅改变原有的液压系统,同时又能达到较好的节能效果。

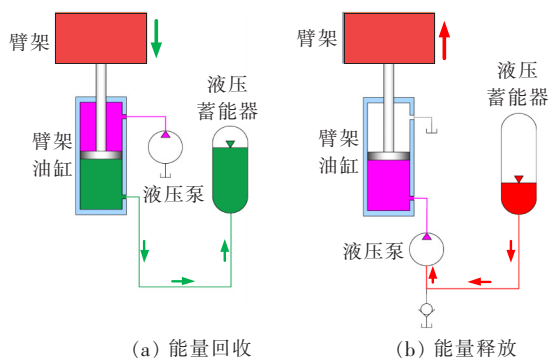


图 1 采用蓄能器的臂架势能再生系统

Fig. 1 Boom potential energy regeneration system with an accumulator

### 1.2 采用蓄能器—液压缸的臂架势能再生系统

根据蓄能器的储能特点,其储存的液压油的压力越高,能量密度就越大,体积就越小,这样就可以更加方便地将其安装到小型液压挖掘机上<sup>[15]</sup>。由于小型液压挖掘机臂架的质量较轻,导致在臂架下落时液压回路的压力较低,不利于臂架重力势能的回收。因此,可在臂架油缸无杆腔与蓄能器之间安装一个增压缸,增加液压回路的压力,从而增大蓄能器的能量密度。图 2(a)为增设了一个增压缸的臂架势能再生系统的能量回收原理图,其工作原理为:臂架由于自重从而推动臂架油缸中的活塞杆向下运动,臂架液压缸无杆腔的液压油流入增压缸大腔,同时增压缸小腔的高压油流入蓄能器中,完成臂架重力势能的回收。图 2(b)为增设了一个增压缸的臂架势能再生系统的能量释放原理图,其工作原理为:发动机驱动液压泵输出高压油流入臂架液压缸无杆腔,同时蓄

能器作为辅助动力源向液压泵入口供油,二者共同配合推动臂架向上运动,由于进出口的压力差与传统液压挖掘机相比明显减小,因此降低了泵的总耗能。

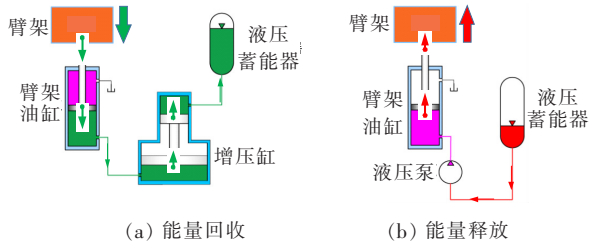


图 2 采用增压缸—蓄能器的臂架势能回收系统  
Fig. 2 Boom potential energy regeneration system with an accumulator and a booster cylinder

2 方案设计

针对小型液压挖掘机臂架势能再生系统存在的问题,本研究提出的设计方案为:采用加工成本低、功率密度高的蓄能器作为储能元件,回收挖掘机臂架的重力势能。根据此方案设计的挖掘机臂架,既要具有传统液压挖掘机臂架的基本功能,也要尽可能地不改变原有挖掘机臂架结构,同时在不影响操作性的情况下具有较好的节能性。

在上述研究和分析的基础上,提出了模式 I 和模式 II 两种臂架势能回收方案。

2.1 模式 I

臂架势能再生系统模式 I 主要依靠蓄能器储存回收的能量,释放能量则需要液压泵的共同配合,以提高能量释放效率。图 3 显示了模式 I 的能量流。图中红色箭头表示蓄能器能量的释放过程,绿色箭头表示臂架势能的回收过程,PDV 为主阀,TV 为节流阀,DV1,DV2,DV3 为普通阀门,ICE 为发动机。图 3(a)显示的是臂架下降时的能量流;图 3(b)显示的是臂架上升时的能量流。

2.1.1 臂架下降

PDV 移动到左位,DV1 处于开启状态,DV2 和 DV3 均处于关闭状态。发动机带动液压泵产生高压油,经过 PDV 流入臂架油缸有杆腔,从而推动臂架向下运动,臂架油缸无杆腔里的液压油流经 TV 和 DV1 进入蓄能器中。这样就完成了挖掘机臂架重力势能的回收。

2.1.2 臂架上升

PDV 移动到右位,DV1 处于关闭状态,DV2 和 DV3 均处于开启状态。储存在蓄能器里的高压油经过 DV2 流至液压泵入口,配合液压泵一起向臂架油缸无杆腔供油,从而推动臂架向上运动。这样就完成了臂架重力势能的再次利用。

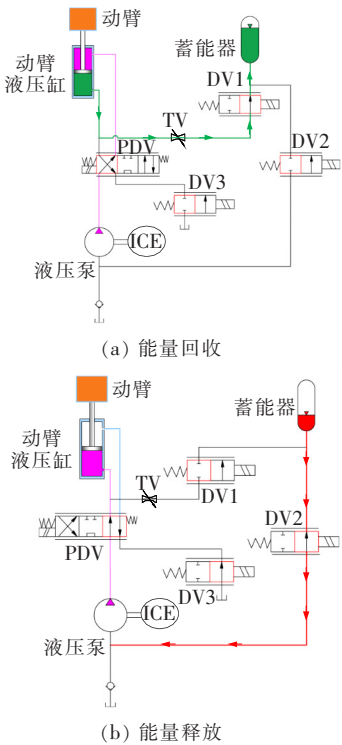


图 3 模式 I 能量流  
Fig. 3 Energy flow of mode I

2.2 模式 II

考虑到小型液压挖掘机臂架质量较轻,在下降过程中不能在臂架液压缸无杆腔中产生较高的回油压力,从而影响蓄能器的回收效率。为了提高液压系统的再生效率,在臂架势能再生系统模式 I 的基础上,在臂架液压系统中增加一个增压缸,即成为臂架势能再生系统模式 II,其工作过程与臂架势能再生系统模式 I 相同。图 4 显示了模式 II 的能量流,图中箭头和字母的含义与图 3 相同。图 4(a)显示的是臂架下降时的能量流;图 4(b)显示的是臂架上升时的能量流。

2.2.1 臂架下降

PDV 移动到左位,DV1 和 DV4 处于开启状态,DV2 和 DV3 处于关闭状态。发动机驱动液压泵转动并输出高压油,经过 PDV 流入臂架液压缸有杆腔,从而推动臂架向下运动,臂架油缸无杆腔

的液压油经过 TV 和 DV1 流入增压缸增压,增压后的高压油经过 DV4 流入蓄能器中。这样就完成了臂架重力势能的回收。

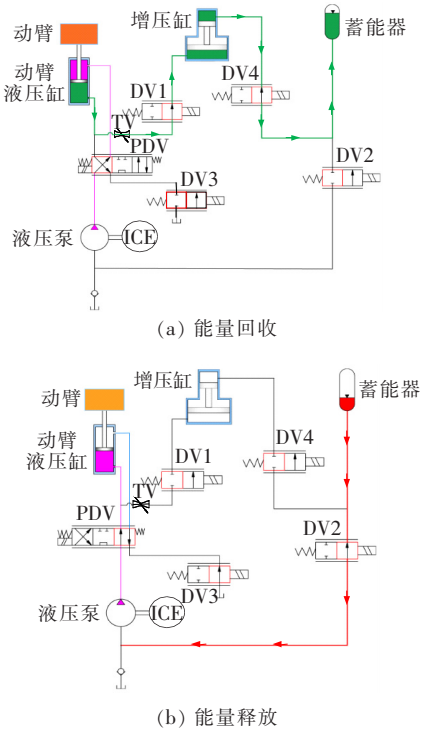


图 4 模式 II 能量流

Fig. 4 Energy flow of mode II

2.2.2 臂架上升

PDV 处于右位,DV1 和 DV4 处于关闭状态,DV2 和 DV3 处于开启状态,发动机带动液压泵转动并输出压力油,经过 PDV 流入臂架油缸无杆腔。为了减小液压泵的实际输出功率,储存在蓄能器里的高压油经过 DV2 流至液压泵入口,和液压泵共同推动臂架向上运动。这样就完成了臂架重力势能的再次利用。

3 仿真建模

3.1 仿真模型的建立

根据前面提出的两种臂架势能再生系统模式的设计方案,在 AMESim 平台上建立仿真模型。为了便于区分,将传统液压挖掘机臂架的仿真模型称为模式 0,前面提出的两种液压挖掘机臂架势能再生系统的仿真模型分别称为模式 I 和模式 II。图 5 为模式 0 的仿真模型,图 6 为模式 I 的仿真模型,图 7 为模式 II 的仿真模型。

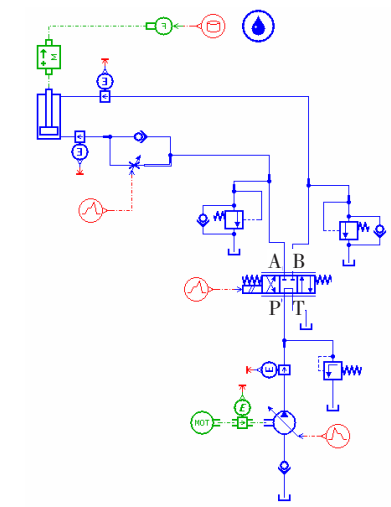


图 5 模式 0 的仿真模型

Fig. 5 Simulation model of mode 0

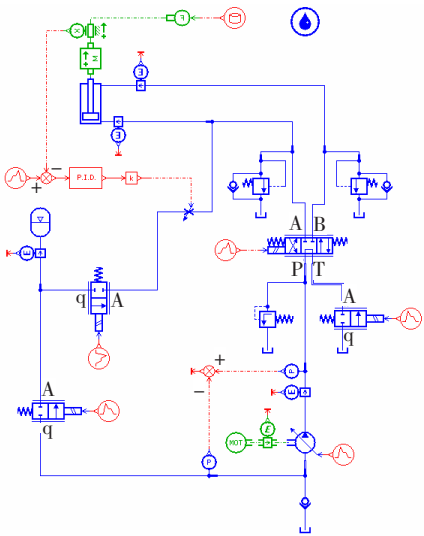


图 6 模式 I 的仿真模型

Fig. 6 Simulation model of mode I

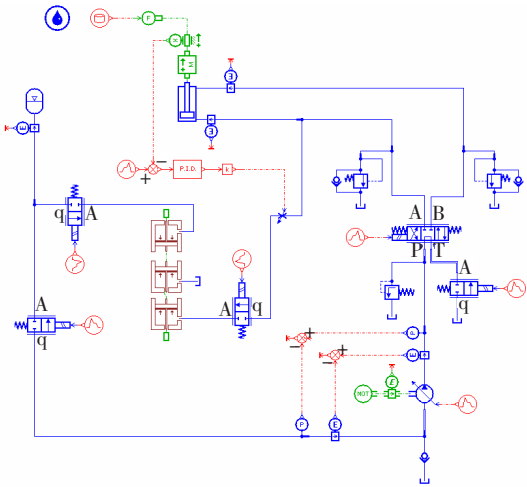


图 7 模式 II 的仿真模型

Fig. 7 Simulation model of mode II



3.2 仿真模型参数设置

为了方便对比分析模式 I、模式 II 与模式 0 的仿真结果,除了蓄能器的参数需要重新设置外,其他液压元器件的参数与山河智能 SWE17-ED 型小型液压挖掘机的实际参数保持一致。各液压元器件及系统的参数设置如下:

- ① 液压缸:油缸内径 55 mm,活塞杆直径 30 mm,活塞杆运动最大位移 0.45 m,活塞杆初始位置 0.45 m,臂架油缸活塞杆最低位置 0.22 m。
- ② 液压泵:排量 9 mL/r,容积效率 0.92,机械效率 0.95。
- ③ 增压缸:大腔面积 1 668 mm<sup>2</sup>,小腔面积 1 178 mm<sup>2</sup>,增压比 1.4。
- ④ 蓄能器:初始充气压力 3 MPa,容积 3 L。
- ⑤ 发动机转速:2 000 r/min。
- ⑥ 主阀:固有频率 80 Hz,阻尼 0.8,阀口最大流量 20 L/min。
- ⑦ 溢流阀:主回路溢流阀最高压力 24 MPa。
- ⑧ 活塞杆上的负载力根据 SWE17-ED 型小型液压挖掘机试验采集的相关数据设定。

4 试验验证与数据分析

以 SWE17-ED 型小型液压挖掘机为试验对象,根据挖掘机臂架液压系统原理,在 AMESim 平台上建立仿真模型。通过对比分析试验平台数据与仿真结果,验证仿真模型的可靠性。

4.1 数据采集系统

利用安装在 SWE17-ED 型小型液压挖掘机上的传感器采集相关数据。采用三个压力传感器分别采集挖掘机臂架油缸无杆腔压力、臂架油缸有杆腔压力、液压泵出口压力。采用倾角传感器测量挖掘机臂架与参考面之间的夹角。与此同时,还采集了发动机的额定速度信号。由控制器获得传感器采集的数据,并将这些数据发送到 CANBus(控制器区域网络总线),最后通过协议转换器和工业路由器将传感器数据发送到数据采集平台。

4.2 试验验证

本研究使用测量系统获得传感器数据来研究液压挖掘机臂架势能再生系统的性能,以液压挖

掘机臂架空载试验为研究样本,测试周期约 20 s。为保证研究的规范性,做如下设定:

1) 测试周期的时间设定:臂架在最高位置约停止 3.1 s,从最高位置降到最低位置约需 3.9 s,在最低位置约停止 7.5 s,从最低位置上升到最高位置约需 2.9 s,在最高位置约停止 2.6 s。测试周期见图 8。

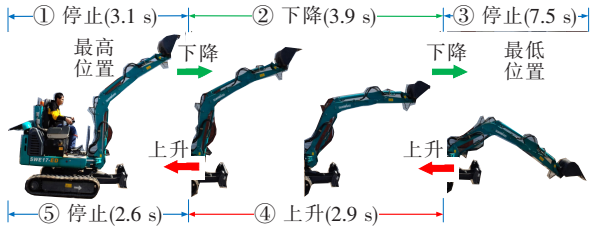


图 8 测试周期

Fig. 8 Test period

2) 臂架油缸活塞杆位置设定:臂架油缸活塞杆最大行程位置约在 0.45 m 处,臂架油缸活塞杆下降位置约在 0.22 m 处。

为了消除挖掘机臂架在下降和上升过程中的振动影响,在每个试验周期中设置了约 7.5 s 的时间间隔。同时,考虑到传感器数据传输和控制信号之间存在时间延迟,调整测试周期的时间,确保与挖掘机动臂势能回收系统仿真模型有效匹配。

本研究以传统液压挖掘机为研究对象,对其臂架重力势能的回收展开研究。通过模式 0 获取液压挖掘机臂架液压缸无杆腔压力,并与试验采集的数据进行对比分析。在模式 0 的情况下,臂架无杆腔的压力随时间的变化过程与试验平台获得的压力数据几乎完全一致(见图 9),臂架油缸有杆腔压力的对比曲线,如图 10 所示。由于臂架系统依靠自重下落,因此在仿真模型中臂架油缸有杆腔的压力基本保持为 0。虽然试验平台采集的

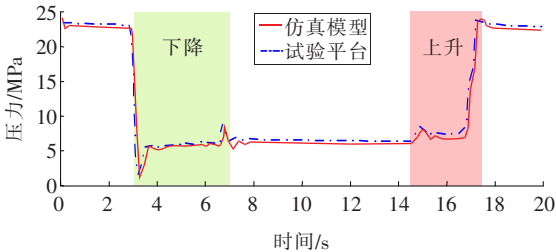


图 9 臂架油缸无杆腔压力对比

Fig. 9 Pressure comparison for rod-less chamber of boom cylinder

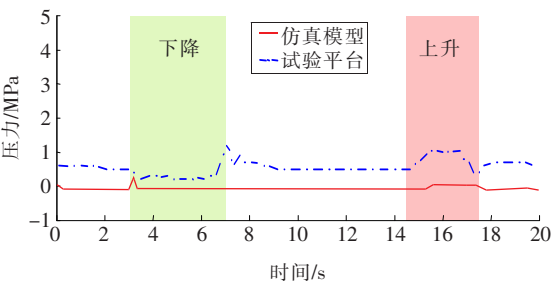


图 10 臂架油缸有杆腔压力对比

Fig. 10 Pressure comparison for rod chamber of boom cylinder

臂架油缸有杆腔压力有一定的波动,但变化较小,且其变化趋势基本与模式 0 的压力变化趋势保持一致。通过以上的对比分析,可以发现该仿真模型具有良好的仿真效果。

4.3 臂架运动特性分析

对模式 0、模式 I、模式 II 进行仿真模拟,并分析挖掘机臂架的运动特性。图 11 为挖掘机臂架油缸活塞杆的位移变化曲线。由图 11 可知:三种模式的位移曲线基本重合,挖掘机臂架的下降过程耗时均为 3 s 左右,说明液压挖掘机臂架势能再生系统模式 I 和模式 II 的臂架位移跟随效果较好。图 12 为臂架油缸活塞杆的速度变化曲线。由图 12 可知:对于模式 0,在臂架下降过程中虽然臂架油缸活塞杆的速度有小幅波动,但基本保持了匀速运动;对于模式 I 和模式 II,臂架油缸活塞杆的速度曲线与模式 0 的重合度较高。因此,臂架势能再生系统模式 I 和模式 II 具有较好的运动特性。

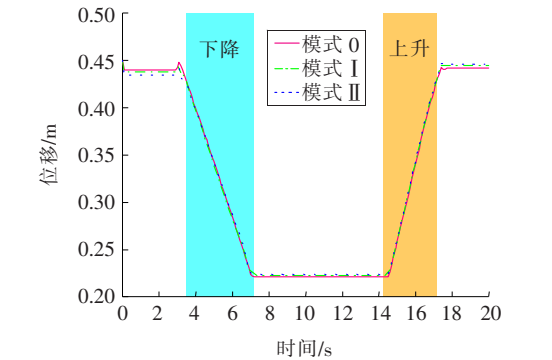


图 11 臂架油缸活塞杆位移变化曲线

Fig. 11 Displacement curve of piston rod of boom cylinder

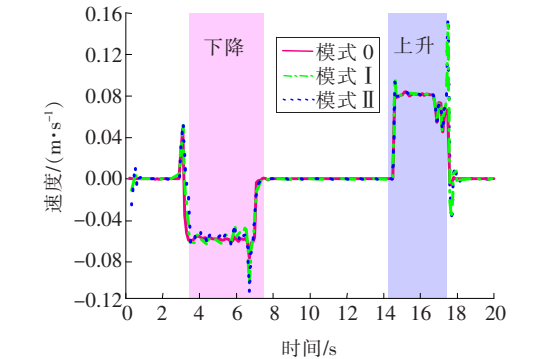


图 12 臂架油缸活塞杆速度变化曲线

Fig. 12 Velocity curve of piston rod of boom cylinder

4.4 能效分析

液压传动系统的能量全部来源于液压泵,而液压挖掘机臂架势能再生系统主要通过降低泵的能耗,从而达到节能的目的。图 13 为液压泵功率变化曲线,图 14 为液压泵总能耗和节能效率对比图。分析图 13 可知,挖掘机臂架在下降过程中,主要依靠臂架自重来推动液压缸活塞杆向下运动,液压泵由于没有任何负载,因此输出的实际功率基本保持为 0;当液压挖掘机臂架上升时,蓄能器配合液压泵释放出储存的能量,将储存的液压

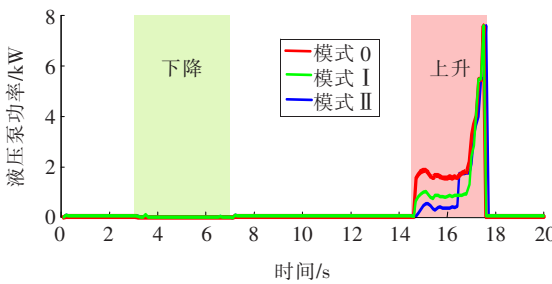


图 13 液压泵功率变化曲线

Fig. 13 Power curve of hydraulic pump

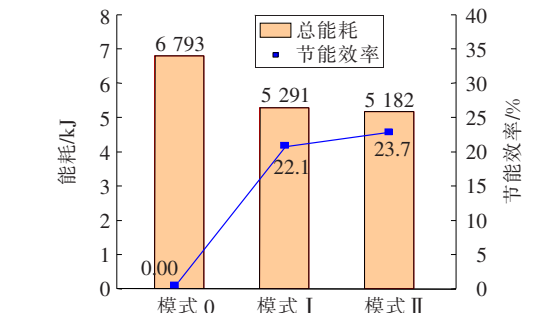


图 14 液压泵总能耗和节能效率对比

Fig. 14 Comparison of total energy consumption and energy saving efficiency of hydraulic pump

油引入到液压泵入口,此时模式Ⅰ和模式Ⅱ中液压泵进出口的压力差必定低于模式0。因此,模式Ⅰ和模式Ⅱ中液压泵的输出功率明显低于模式0。

## 5 结论

本研究以山河智能SWE17-ED型小型液压挖掘机为研究对象,提出了两种以蓄能器为储能元件的液压挖掘机臂架势能再生系统。根据臂架液压系统原理,使用AMESim仿真平台建立了模式0、模式Ⅰ和模式Ⅱ仿真模型。以模式0作为参照模式,对模式Ⅰ和模式Ⅱ的运动特性和能效进行了对比分析,得到如下结论:

1) 对于采用蓄能器回收能量的模式Ⅰ:蓄能器可以直接回收臂架在下降时的重力势能。在一个典型工作周期内,液压泵总节能效率为22.1%。

2) 对于采用蓄能器—增压缸回收能量模式Ⅱ:挖掘机臂架在下降过程中,臂架油缸无杆腔的液压油经过增压器增压后流入蓄能器,完成臂架重力势能的回收。在一个典型的工作周期内,挖掘机液压泵总节能效率为23.7%。

3) 模式Ⅰ和模式Ⅱ均采用PID控制策略来调节臂架的下降速度,仿真结果表明:挖掘机臂架具有良好的运动特性。

本研究提出的臂架势能再生系统的创新性主要体现在:①提出了两种能量回收效率较高的臂架势能再生系统;②解决了在臂架势能回收过程中液压回路相互干扰引发失稳的问题;③对臂架势能再生系统的节能效率进行了深入分析。

本研究主要对1.7 t小型液压挖掘机臂架势能再生系统展开了研究,并验证了其具有良好的节能效率。与小吨位的液压挖掘机相比,大中吨位的液压挖掘机工况更加复杂。因此,下一步的研究工作将针对大中吨位液压挖掘机臂架势能再生系统展开,使本研究的成果能够在更多型号的工程机械上推广应用。

## 〔参考文献〕

[1] He X, Jiang Y. Review of hybrid electric systems for construction machinery[J]. Automation in Construction, 2018, 92: 286-296.

[2] Lin T, Chen Q, Ren H, et al. Review of boom poten-

tial energy regeneration technology for hydraulic construction machinery[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2017, 79: 358-371.

- [3] 张树忠. 基于液压式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 Shu-zhong. Energy saving research of excavating motor arm based on hydraulic energy recovery [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [4] 谭贤文. 油液混合动力挖掘机能量回收系统设计及控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- TAN Xian-wen. Research on energy recovery system design and control strategy of oil-hydraulic hybrid excavator[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [5] 张克军, 陈剑. 电动叉车势能回收系统研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(21): 2 869-2 874.
- ZHANG Ke-jun, CHEN Jian. Research on potential energy recovery system of electric forklift truck[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(21): 2 869-2 874.
- [6] 李泽鹏, 权龙, 葛磊, 等. 液电混合驱动液压挖掘机动臂特性及能效研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 213-219.
- LI Ze-peng, QUAN Long, GE Lei, et al. Study on the characteristics and energy efficiency of hydraulic excavating mobile arm driven by hydro-electric hybrid[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(20): 213-219.
- [7] 周智勇. 液压挖掘机动臂流量再生节能系统研究[J]. 机电工程, 2019, 36(9): 959-963.
- ZHOU Zhi-yong. Research on energy saving system of hydraulic excavating mobile arm flow regeneration[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2019, 36(9): 959-963.
- [8] 王经聪. 蓄能式挖掘机多油缸动臂势能回收利用方案设计[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(9): 55-57, 60.
- WANG Jing-cong. Design of potential energy recovery and utilization scheme for multi-cylinder dynamic arm of energy storage excavator [J]. Hydraulics Pneumatics and Seals, 2019, 39(9): 55-57, 60.
- [9] 单玉爽. 电动叉车势能回收和再利用系统研究[D]. 杭州:浙江大学, 2019.
- SHAN Yu-shuang. Research on potential energy recovery and reuse system of electric forklift truck[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [10] 陈明东. 挖掘机动臂势能回收系统蓄能器压力设计

- 及试验[J]. 机床与液压,2018,46(11):119-122.
- CHEN Ming-dong. Pressure design and test of accumulator in potential energy recovery system of excavating mobile arm [J]. Machine Tool and Hydraulics,2018,46(11):119-122.
- [11] 齐秀丽,王汉文. 液压挖掘机动臂液压系统的节能研究[J]. 机床与液压,2017,45(3):185-188.
- QI Xiu-li, WANG Han-wen. Research on energy saving of hydraulic system of hydraulic excavator manipulator [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2017,45(3):185-188.
- [12] 熊艳梅,冯倩. 液压挖掘机动臂下降势能回收技术探究[J]. 现代制造技术与装备,2017(6):137,139.
- XIONG Yan-mei, FENG Qing. Research on recovery technology of descending potential energy of hydraulic excavating mobile arm[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017 (6): 137,139.
- [13] 陈明东,赵丁选. 液压挖掘机可回收潜能研究[J]. 机床与液压,2016,44(9):65-68,34.
- CHEN Ming-dong, ZHAO Ding-xuan. Research on recoverable potential of hydraulic excavator[J]. Machine Tool and Hydraulics,2016,44(9):65-68,34.
- [14] 娄帅. 混合动力液压挖掘机动臂液压系统的势能回收研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2018.
- LOU Shuai. Research on potential energy recovery of hydraulic system of hybrid hydraulic excavator manipulator[D]. Qinghuangdao: Yanshan University,2018.
- [15] 权龙,夏连鹏,赵斌,等. 液压驱动机械臂势能回收利用研究工作进展[J]. 机械工程学报,2018,54(20):4-13.
- QUAN Long, XIA Lian-peng, ZHAO Bin, et al. Research progress of potential energy recovery and utilization of hydraulically driven manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering,2018,54(20):4-13.
- 
- (上接第 105 页)
- [9] Ziani L, Chaker A. Ambient pressure effect on non-premixed turbulent combustion of  $\text{CH}_4$ - $\text{H}_2$  mixture [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016,41(27):11 842-11 847.
- [10] Kim W, Park T. Effects of noncircular air holes on reacting flow characteristics in a micro combustor with a seven-hole baffle[J]. Applied Thermal Engineering,2016,100:378-391.
- [11] Li J, Li Q, Wang Y, et al. Fundamental flame characteristics of premixed  $\text{H}_2$ -air combustion in a planar porous micro-combustor [J]. Chemical Engineering Journal,2016,283:1 187-1 196.
- [12] Li J, Wang Y, Chen J, et al. Experimental study on standing wave regimes of premixed  $\text{H}_2$ -air combustor in planar micro combustors partially filled with porous medium[J]. Fuel,2016,167:98-105.
- [13] Peng Q G, E J Q, Chen J W, et al. Investigation on the effects of wall thickness and porous media on the thermal performance of a non-premixed hydrogen fueled cylindrical micro combustor[J]. Energy Conversion and Management,2018,155:276-286.
- [14] 刘宏升,王松祥,刘林,等. 电预热多孔介质燃烧器内柴油燃烧的试验研究[J]. 上海交通大学学报,2019,53(10):1 204-1 209.
- LIU Hong-sheng, WANG Song-xiang, LIU Lin, et al. Experimental study on combustion of diesel oil in an electric preheating porous medium burner[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(10):1 204-1 209.
- [15] 户英杰,王志强,程星星,等. 燃烧处理挥发性有机污染物的研究进展[J]. 化工进展,2018,37(1):319-329.
- HU Ying-jie, WANG Zhi-qiang, CHENG Xing-xing, et al. Recent progress in the removal of volatile organic compounds by combustion[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37 (1): 319-329.
- [16] Li J, Li Q Q, Wang Y T, et al. Fundamental flame characteristics of premixed  $\text{H}_2$ -air combustion in a planar porous micro combustor[J]. Chemical Engineering Journal,2016,283:1 187-1 196.