

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2017.12.012

# 液压挖掘机动臂势能复合式再生系统的研究

贺福强<sup>1</sup>, 杜希亮<sup>1</sup>, 周金松<sup>1</sup>, 姚学练<sup>1</sup>, 韩 雄<sup>2</sup>

(1. 贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州詹阳动力重工有限公司, 贵州 贵阳 550006)

**摘 要:** 为提高液压挖掘机的能量利用率, 提出了一种新型复合式动臂势能回收方法。把动臂下落时的回油腔通过回转马达连接到1个蓄能器上, 动臂下落时的势能一部分转化为蓄能器的液压能, 在动臂提升时蓄能器的液压能转化为动臂的势能; 一部分通过发电机转化为电能, 储存在超级电容中。蓄能器的压力用来辅助驱动回转泵的转动, 这样就可以减少回转马达功率的输入, 通过调整马达的排量来控制动臂提升和下落的速度, 利用2个液控单向阀来实现系统的保压。这种方法没有节流和溢流损失, 回收效率高。通过仿真验证了方法的可行性, 实现了动臂势能的回收, 为动臂势能回收的实际应用提供了参考。

**关键词:** 势能回收; 节能回路; 液压蓄能器; 挖掘机动臂

中图分类号: TH137 文献标志码: B 文章编号: 1000-4858(2017)12-0070-06

## Compound Regeneration System of Boom Potential Energy for Hydraulic Excavator

HE Fu-qiang<sup>1</sup>, DU Xi-liang<sup>1</sup>, ZHOU Jin-song<sup>1</sup>, YAO Xue-lian<sup>1</sup>, HAN Xiong<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025;

2. Guizhou Jonyang Kinetics Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550006)

**Abstract:** In order to improve the energy utilization rate of hydraulic excavator, we propose a new method for recovering the boom potential energy by directly connecting the return chambers of boom cylinder to an accumulator through the rotary motor. When the boom is dropping, part of the potential energy is converted into the hydraulic energy of accumulator. When the boom is lifting, the hydraulic energy of accumulator is converted into the potential energy of boom, and the other part is converted into electricity, stored in the super capacitor. The hydraulic energy of accumulator is used to support the torque of hydraulic motor so that the input power of rotary motor is reduced. By adjusting the motor displacement, we control the lifting and the dropping speeds of the boom, and make the system achieve the holding pressure through two hydraulic check valves. This method has high recovery efficiency due to without throttling and overflow losses. The feasibility of this method is verified by the simulation, which provides a reference for the practical application of boom energy recovery.

**Key words:** potential energy recover, energy saving circle, hydraulic accumulator, excavator boom

### 引言

能量回收研究是工程机械领域的热点问题之一。在液压挖掘机典型装车工况中, 动臂的可回收能量约占整机总可回收能的40%以上, 是进行能量回收研究的首选对象<sup>[1]</sup>。由于挖掘机在作业过程中动臂提升和下落频繁, 在没有势能回收装置的系统中动臂的势能通过节流调速等转化为热能, 不仅浪费能量还会使液压油的品

质变差, 因此对动臂势能的回收具有重大意义<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2017-08-16

基金项目: 贵州省科技厅重大科技专项(黔科合重大专项字[2016]3014); 创新基地项目(贵大研 CXJD[2015]003)

作者简介: 贺福强(1975—), 男, 贵州遵义人, 副教授, 博士, 主要研究方向为机电装备数字化与虚拟制造技术、特色装备技术、智能制造技术等。

目前国内外对动臂势能回收技术有了一定的研究。张树忠等<sup>[3]</sup>提出的基于变压器的势能回收系统;任好玲等<sup>[4]</sup>提出基于平衡油缸的势能回收系统;夏连鹏等<sup>[5]</sup>提出一种基于蓄能器液压泵进油辅助供油势能回收系统;文献[6]提出一种电气式势能回收系统。美国卡特彼勒 BRUUN L<sup>[7-8]</sup>提出了一种基于马达控制闭式回路的液压式能量回收系统;利勃海尔公司提出的闭式回路控制势能回收回路<sup>[9]</sup>;林添良等<sup>[10-11]</sup>提出的一种复合式势能回收回路。

基于以上分析,本研究提出一种新型动臂势能复合式回收方法,结构和控制更简单且没有节流和溢流损失。

### 1 动臂势能回收系统工作原理

#### 1.1 工作原理

为了回收挖掘机动臂下落时的重力势能,提出了一种电液复合式动臂势能回收系统,图1为回收系统的原理图。

(1) 动臂下降时,换向阀4处于上位,油箱中的液压油经过换向阀4进入有杆腔,动臂在自重的作用下下降,无杆腔的压力油经过液压泵/马达进入蓄能器,同时液压泵/马达通过离合器和变速器带动发电机发电,然后将能量储存在超级电容器中。当需要动臂进行辅助挖掘时,换向阀4处于下位,主泵向动臂的有杆腔供油,动臂克服阻力继续下降。当不需要动臂进行辅助挖掘时,利用斗杆油缸、铲斗油缸力进行挖掘,

换向阀4处于下位,多路阀3处于右位,动臂有杆腔为闭回路,动臂油缸不会因为挖掘阻力而自动上升;

(2) 动臂上升时,换向阀4处于上位,蓄能器中的液压油经过液压马达/泵进入动臂的无杆腔,无杆腔中的液压油经过换向阀4流入油箱。

在复合挖掘时有时需要动臂辅助进行挖掘,这时就需要主泵1经过电磁换向阀3、4向动臂的有杆腔供油,提供足够的压力来完成动臂辅助挖掘作业。在一般情况下动臂油缸不用主泵供油。

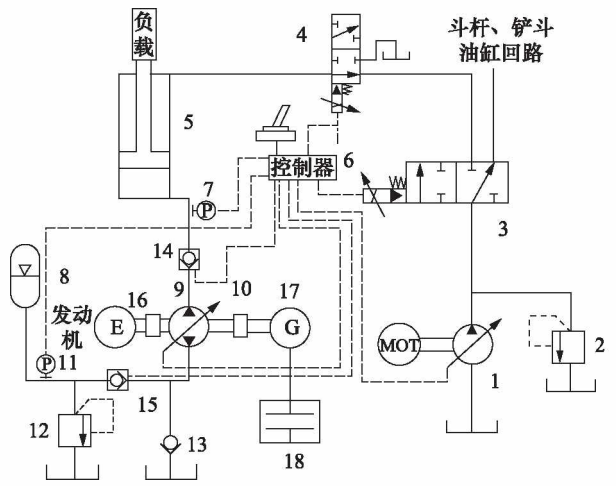
此种动臂回收系统适用于大中小型的液压挖掘机,特点是可以充分回收动臂的势能,在动臂下降的过程中没有溢流损失和节流损失,控制原理简单,通过调节双向变量马达/泵的排量或电机转速就可以控制动臂的运动速度。

#### 1.2 控制策略

控制策略的目标就是保证动臂的操控性能,动臂的运动速度和传统的挖掘机动臂运动的速度应该相近,控制方式也最好相似,这有利于减轻驾驶员的疲劳强度,提高工作效率。

此势能回收回路的控制方式简单,与普通的挖掘机动臂控制方法相似,通过远程先导阀就可以实现,不需要复杂的控制器,动臂下降和上升的速度可以通过调整变量马达/泵的排量来实现。

随着动臂的下降,蓄能器的压力会逐渐升高,在动臂开始下落的初始阶段,蓄能器的压力较低,动臂的运动速度会非常快,为了调节动臂下落的速度,将发电机接入,会使动臂的运动速度得到调节,动臂的势能转化为电能储存在超级电容,如图2所示。



1. 主泵 2. 溢流阀 3,4. 电磁换向阀 5. 动臂液压缸  
6. 控制器 7,11. 压力传感器 8. 蓄能器 9. 双向变量泵/马达  
10. 离合器和变速器 12. 安全阀 13. 单向阀 14,15. 液控单向阀  
16. 离合器 17. 发电/电动机 18. 超级电容

图1 动臂势能回收系统原理图

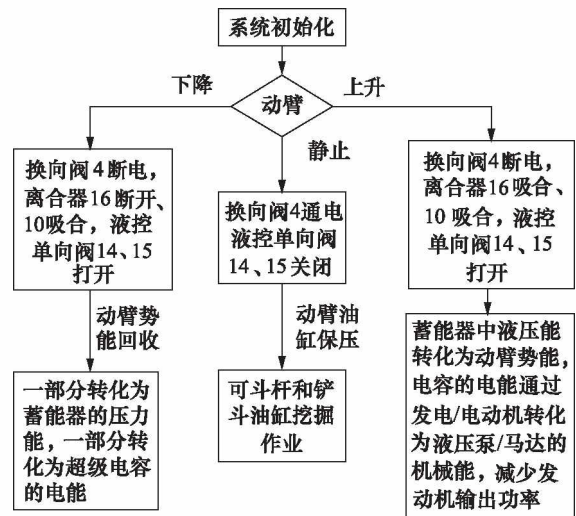


图2 系统控制流程图

## 2 关键元件理论分析

### 2.1 液压泵/马达

根据能量守恒定律得:

$$\Delta p q_t = 2\pi T_1 n \quad (1)$$

式中,  $\Delta p$  为进出油口压力差;  $q_t$  为理论流量;  $T_1$  为理论转矩;  $n$  为转速。

考虑到机械效率可以推出输入转矩为:

$$T = \frac{V\Delta p\eta_m}{2\pi} \quad (2)$$

式中,  $V$  为排量;  $\Delta p$  为进出油口压力差;  $\eta_m$  为机械效率。

通过式(1)可以看出液压泵进出油口的压力差  $\Delta p$  和泵的排量决定了液压泵的输入扭矩,在输出压力不变的情况下,增大液压泵进油口的压力就可以减小液压泵的输入扭矩,达到节能的目的。

### 2.2 蓄能器

气囊式蓄能器与其他类型的蓄能器相比具有反应灵敏、密封性好、没有油气混合等优点,所以选取气囊式蓄能器来存储动臂势能。

根据波义耳定律可知:

$$p_0 V_0^n = p_1 V_1^n = p_2 V_2^n = \text{const} \quad (3)$$

式中,  $p_0$ 、 $p_1$ 、 $p_2$  分别为预冲气压力、最高压力和最低压力;  $V_0$ 、 $V_1$ 、 $V_2$  分别为对应压力下气体容积。

由于动臂下落时间比较短,一般为 3~4 s,所以蓄能器参数按绝热过程计算,  $n$  取 1.4,可得蓄能器的总容积为<sup>[12-13]</sup>:

$$V_0 = \frac{\Delta V}{p_0^{1/4} \left[ (1/p_2)^{1/4} - (1/p_1)^{1/4} \right]} \quad (4)$$

式中,  $V_0$  为蓄能器的容量;  $\Delta V$  为蓄能器容积变化量;  $p_0$  为蓄能器的充气压力;  $p_1$  为蓄能器冲液的最高压力;  $p_2$  为蓄能器工作最低压力。

蓄能器的最高压力可以由安全阀来设定,蓄能器的最低压力可以由动臂上升到最高位置时向蓄能器充液压油的压力来设定。

## 3 模型的建立与分析

以某应急救援排障车的挖掘作业装置为研究对象,以其参数为依据,建立机构模型和液压系统模型,如图 3 所示。

其中动臂、斗杆、铲斗的总质量为 837.581 kg,动臂油缸、斗杆油缸、铲斗油缸总质量为 250.526 kg。

根据表 1 中的参数可以计算出动臂油缸无杆腔的最大容积为:

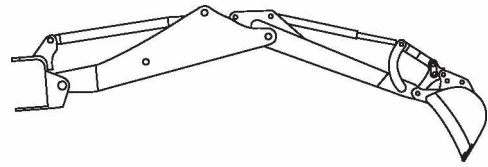


图3 挖掘工作装置模型

表1 动臂油缸参数

| 名称   | 缸径/mm | 杆径/mm | 行程/mm | 重量/kg   |
|------|-------|-------|-------|---------|
| 动臂油缸 | 110   | 56    | 982   | 119.316 |

$$V = \pi r^2 l = 9.332 \text{ L}$$

有杆腔最大容积为:

$$V = \pi(r_1^2 - r_2^2)l = 6.074 \text{ L}$$

在选择蓄能器的参数时作为参考。

图 4 为铲斗油缸和斗杆油缸锁定的状态下,动臂油缸的受力图,由力矩平衡原理可得:

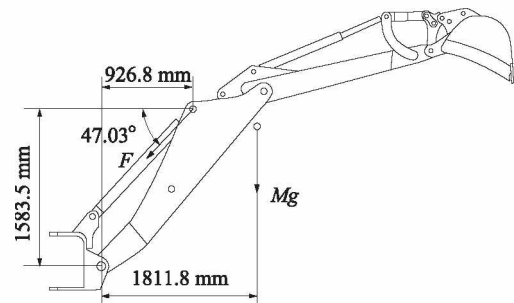


图4 起始位置动臂油缸受力图

$$F \cos 47.03 \times 1.5835 - F \sin 47.03 \times 0.9268 - Mg \times 1.8118 = 0$$

得,  $F = 49139.860 \text{ N}$

在应急救援排障车挖掘工作装置中,动臂油缸安装在动臂的上方,在动臂下落时回收的是有杆腔的压力油,有杆腔容积  $V = 6.074 \text{ L}$ ,油缸的压力  $p = F/A = 6.980 \text{ MPa}$ 。

图 5 为铲斗油缸和斗杆油缸锁定的状态下,动臂油缸的受力图,由力矩平衡原理可得:

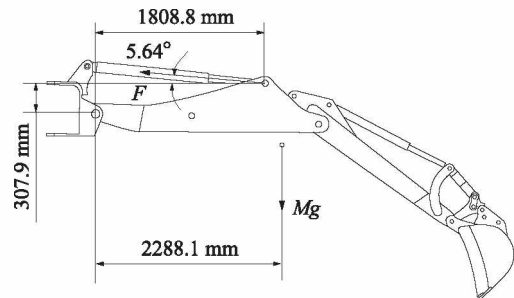


图5 终止位置动臂油缸受力图

$$F \cos 5.64 \times 0.3079 + F \sin 5.64 \times 1.8088 - Mg \times 2.2881 = 0$$

得,  $F = 51421.523 \text{ N}$

油缸的压力  $p = F/A = 7.304 \text{ MPa}$

将工作装置的模型导入到 ADAMS 中进行动力学仿真,求动臂油缸在运动过程中的受力,如图 6 所示。

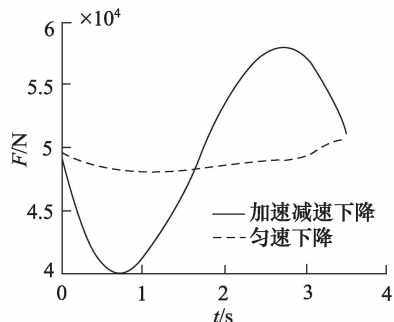


图 6 动臂下落时油缸受力

从仿真的结果来看,当匀速下落时,开始和结束时刻动臂油缸的受力和计算的结果相等,图中虚线为工作装置先加速后减速下落臂油缸的受力图,最小值为 40043.71 N,最大值为 58020.19 N,对应油缸中液压油压力分别为 5.688 MPa、8.241 MPa。

由功的计算公式得:

1) 匀速下落时

$$W = FS = \int F(t) V dt \quad (5)$$

式中,  $F(t)$  为图 5 中动臂油缸的受力, N;  $V$  为动臂油缸速度, m/s;  $t$  为时间, s。

2) 加速减速下落时

$$W = FS = \int F(t) 0.5at^2 dt \quad (6)$$

式中,  $a$  为动臂油缸加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

由式(5)、式(6)可以计算得到可回收的能量如图 7 所示。

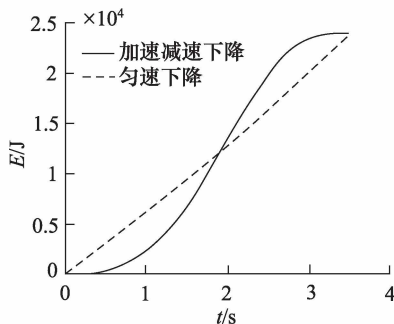


图 7 动臂可回收能量

在匀速下落的过程中最大可回收的能量为

23.88 kJ,在加速减速下落过程中最大可回收的能量为 23.96 kJ,可以看出动臂油缸的运动过程如何,总的可回收的能量是相同的。上面的计算为一个工作循环中动臂可回收的能量,对于大中型液压挖掘机回收的能量更多,每一个工作循环可能有几百千焦。

从以上分析可以看出动臂势能回收的能量是很可观的,应该重视动臂势能回收技术的研究与应用。

#### 4 仿真分析

以典型工况-挖掘装载工况的动臂运动进行仿真。为了提高蓄能器的储能密度,蓄能器的最高工作压力  $p_1$  和最低工作压力  $p_2$  满足<sup>[4]</sup>:  $p_2/p_1 = 0.308$ 。为了延长蓄能器的使用寿命,蓄能器的充气压力  $p_0$  可以按照  $0.25p_1 < p_0 < 0.9p_2$  来确定<sup>[14]</sup>,  $p_0 > 0.25 \times 8.24 = 2.1 \text{ MPa}$ ,根据系统最高压力,最低压力,蓄能器的特性等考虑,选取蓄能器的参数为:  $p_0 = 2.5 \text{ MPa}$ ,  $p_1 = 8.5 \text{ MPa}$ ,  $p_2 = 2.6 \text{ MPa}$ 。

由式(4)计算得蓄能器的容积为:  $V_0 = 10.9 \text{ L}$

选取时蓄能器容积应大于 10.9 L,初选  $V_0 = 12 \text{ L}$

##### 4.1 动臂下降势能回收

从图 8、图 9 可以看出 0~2 s 时间内动臂油缸运动的速度逐渐增加,在 2 s 时刻由于变量马达/泵排量的变化,动臂的运动速度开始改变为逐渐减少。仿真的结果证实动臂下降的速度可由改变液压泵/马达的排量来控制,操纵性能好与动臂实际作业时的速度变化相似。

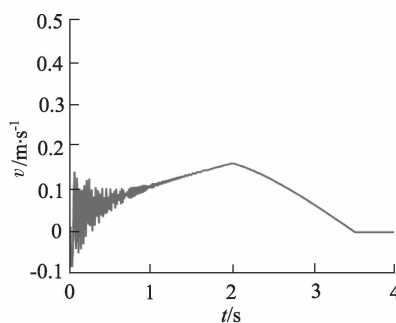


图 8 动臂油缸运动速度曲线

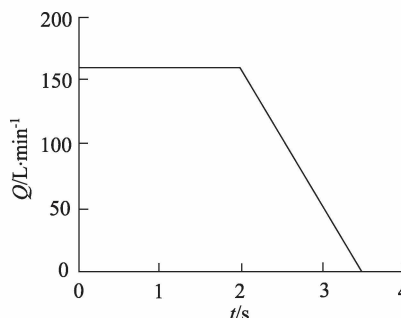


图 9 动臂下落时马达/泵排量变化曲线

图10为动臂下降时蓄能器压力和体积的变化曲线,压力变化从蓄能器预冲压力从2.5 MPa上升到3.5 MPa,变化并没有达到最高压力,是因为在选取蓄能器时考虑动臂油缸运动的极限位置,而仿真时是对挖掘典型工况进行仿真,油缸运动行程较极限行程小。

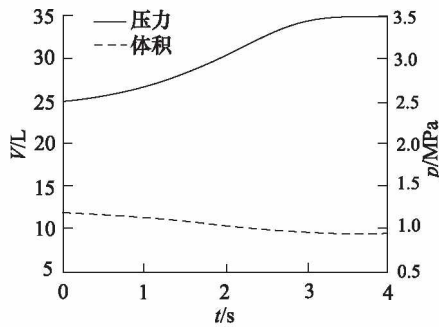


图10 蓄能器压力和体积变化曲线

从图11可以看出蓄能器在动臂下降完成时总的回收能量为7.26 kJ,切线的斜率为势能回收变化的速率,随着蓄能器压力的升高,回收的能量速率加快。

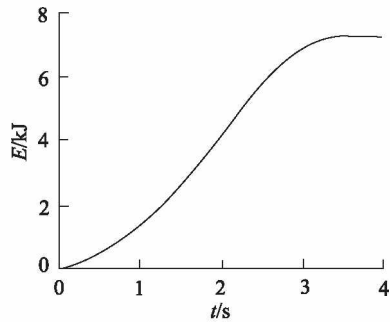


图11 蓄能器回收能量变化曲线

图12为电容充电的电流变化,充电电压维持在269.99 V。随着动臂的下降,蓄能器的冲液压力逐渐升高,会使液压马达/泵的进出油口压力差减小,其扭矩也会减少,超级电容的充电电流会逐渐减少。

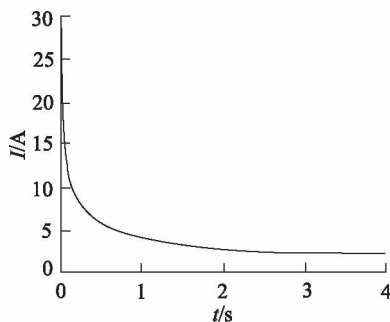


图12 超级电容充电电流变化曲线

由功的计算公式可得:

$$W = U \cdot I \cdot t = \int U(t) \cdot I(t) dt \quad (7)$$

通过积分运算就可以求得超级电容回收的能量。

从图13可以看出,超级电容总的回收能量为4.08 kJ,由于电流的逐渐减小,回收速率减小。

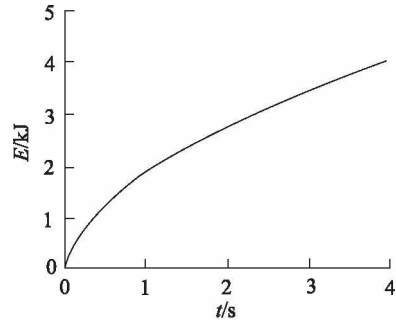


图13 超级电容回收能量变化曲线

能量回收效率 =  $\frac{\text{蓄能器回收能量} + \text{超级电容回收能量}}{\text{总的可回收能量}}$

计算得,能量的回收效率为47.33%。单工作周期内最终的回收能量为11.34 kJ,如果一台普通5 t挖掘机进行一个工作日(8 h)的挖掘,则可以回收21772.8 kJ的能量,相当于发动机燃烧3 L左右柴油获得的能量,从长远来看具有相当可观的经济价值。

#### 4.2 动臂上升势能重新利用

从图14可以看出在动臂匀速提升时,新回路(势能回收回路)液压马达所需的扭矩比液压马达直接从油箱吸油(无势能回收原系统回路)时要小,由于蓄能器有预冲压力,动臂在最高位置即 $t = 7$  s时实线对应泵的扭矩要小于虚线对应泵的扭矩。以上说明动臂势能回收回路中,马达消耗的能量少,动臂势能回收的效果明显。

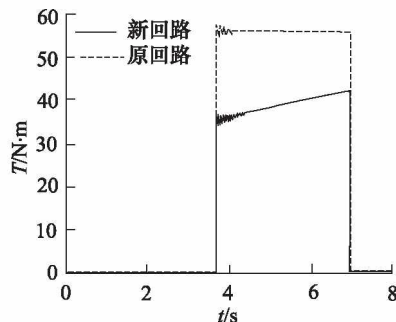


图14 动臂匀速提升时泵的扭矩

## 5 结论

提出了一种新的挖掘机动臂电液复合式势能回收系统,该系统操控简单,没有节流和溢流损失。对某

急救援排障车挖掘工作装置建立了动力学模型,通过计算和仿真得到动臂油缸在不同运动状态下受力变化,并对动臂可回收势能进行了分析,根据计算和仿真结果选取了蓄能器的适合参数。在 AMESim 软件中对回路进行仿真,对比了动臂在匀速提升的过程中动臂势能回收回路和没有动臂势能回收回路及回转马达所需扭矩的变化,并计算了回路的动臂势能回收效率为 47.33%,使系统更加节能,为实际应用提供了参考。

#### 参考文献:

- [1] 章程. 小型液压挖掘机动臂势能回收系统研究[D]. 长沙:中南大学,2014.  
ZHANG Cheng. Research on Boom Potential Energy Recovery System of Small-sized Excavator [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [2] LIN Tianliang, CHEN Qiang, REN Haoling. Review of Boom Potential Energy Regeneration Technology for Hydraulic Construction Machinery [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, (79): 358 - 371.
- [3] 张树忠, 邓斌, 柯坚. 基于液压变压器的挖掘机动臂势能再生系统[J]. 中国机械工程, 2010, 21(10): 1162 - 1166.  
ZHANG Shuzhong, DENG Bin, KE Jian. Research on Energy Regeneration System of Hydraulic Excavator's Boom Based on Hydraulic Transformer [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(10): 1162 - 1166.
- [4] 任好玲, 林添良. 基于平衡油缸的动臂势能回收系统设计及试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 153 - 158.  
REN Haoling, LIN Tianliang. Parameters Design and Experiment of Boom Potential Energy Recovery System Based on Balance Cylinder [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 153 - 158.
- [5] 夏连鹏, 葛磊, 黄家海, 等. 基于蓄能器的动臂势能回收系统仿真研究[J]. 液压与气动, 2015, (6): 52 - 55.  
XIA Lianpeng, GE Lei, HUANG Jiahai, et al. Potential Energy Recycling System Based on Accumulator for Hydraulic Excavator Boom [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015, (6): 52 - 55.
- [6] 林潇, 管成, 裴磊, 等. 混合动力液压挖掘机动臂势能回收系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 96 - 101.  
LIN Xiao, GUAN Cheng, PEI Lei, et al. System of Boom Potential Energy Recovery in Hybrid Hydraulic Excavators [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 96 - 101.
- [7] BRUUN L. Svenskutvecklat Energisparsystem Caterpillars Grävmaskiner [J]. Scandinavia, 2002.
- [8] RYDBERG K E. Energy Efficient Hydraulic Systems and Regenerative Capabilities [C]. Proceedings of the 9th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Linköping, 2005: 2 - 5.
- [9] BOEHM D, HOLLANDER C, LANDMANN T. Hybrid Drives in Crawler Excavators: Concepts and Solutions [C]. Proceedings of the Third Symposium on Hybrid Drive Systems for Mobile Machinery, February, Karlsruhe, Germany. German, 2011: 117 - 124.
- [10] LIN Tianliang, HUANG Weiping, REN Haoling, et al. New Compound Energy Regeneration System and Control Strategy for Hybrid Hydraulic Excavators [J]. Automation in Construction, 2016, (68): 11 - 20.
- [11] 周宏兵, 李铁辉, 张大庆, 等. 新型混合动力挖掘机动臂势能回收系统研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(7): 398 - 402.  
ZHOU Hongbing, LI Tieshui, ZHANG Daqing, et al. Research on New System of Boom Potential Energy Recovery in Hybrid Hydraulic Excavators [J]. Computer Simulation, 2012, 29(7): 398 - 402.
- [12] 马登成, 杨士敏, 陈箬, 等. 蓄能器对工程机械液压系统影响的仿真与试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 183 - 190.  
MA Dengcheng, YANG Shimin, CHEN Zheng, et al. Simulation and Experiment on the Influence of Accumulator on Hydraulic System of Construction Machinery [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 183 - 190.
- [13] 梁全, 谢基晨, 聂利卫. 液压系统 AMESim 计算机仿真进阶教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.  
LIANG Quan, XIE Jichen, NIE Liwei. Hydraulic Systems AMESim Computer Simulation Advanced Tutorial [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [14] 李新德, 董学勤. 谈谈蓄能器的充气[J]. 液压气动与密封, 2012, (11): 55 - 57.  
LI Xinde, DONG Xueqin. Talk About Accumulator Inflation [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012, (11): 55 - 57.