

DOI: 10.3969/j. issn. 1001-3881. 2018. 10. 014

基于电液协调式液压挖掘机复合动作工况下能量回收系统研究

姚明星, 吴文海, 秦剑, 孙磊

(西南交通大学机械工程学院, 四川成都 610031)

摘要:为实现液压挖掘机动臂与转台复合动作时的能量回收, 提出一种基于蓄能器-液压马达-发电机的液压挖掘机电液协调式能量回收系统。在标准工况下的单个工作周期内对系统模型进行仿真分析, 研究关键参数对系统节能效果的影响。结果表明: 在参数合理匹配的情况下, 此系统回转制动能量回收率为 61.08%, 动臂下降能量回收率为 27.23%, 综合能量回收率达到了 44.79%, 综合能量再利用率达到了 47.37%, 节能效果良好; 在合理的范围内, 选择初始容积小的蓄能器和排量小的回收马达能提高系统的能量回收率。

关键词: 液压挖掘机; 动臂; 转台; 复合动作; 节能; 蓄能器

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3881 (2018) 10-054-6

Study on Energy Recovery System for Electro-hydraulic Coordinated Hydraulic Excavator Compound Action

YAO Mingxing, WU Wenhai, QIN Jian, SUN Lei

(College of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: In order to realize the energy recovery of the compound action of the boom and turntable of the hydraulic excavator, an energy compound recovery system of hydraulic excavator boom and turntable based on accumulator-hydraulic motor-generator was proposed. The system model was simulated and analyzed in a single working cycle under standard operating conditions. The influence of key parameters on the energy saving effect of the system was studied. The results show that under the condition of reasonable parameter matching, the energy recovery rate of the rotary brake is 61.08%, the energy recovery rate of the boom drop is 27.23%, the comprehensive energy recovery rate is 44.79%, and the comprehensive energy reuse rate reaches 47.37%, so a good energy saving effect is achieved. Within a reasonable range, the choice of a small initial volume of the accumulator and a small displacement of the recovery motor can improve the energy recovery rate of the system.

Keywords: Hydraulic excavator; Boom; Turntable; Compound action; Energy saving; Accumulator

在工程机械领域, 液压挖掘机占有重要地位, 广泛用于各类建设工程^[1-2]。但其高能耗、高排放、低效率的缺点, 对能源及环境造成不利影响。如何使其更加节能环保是目前的研究热点之一^[3]。近年来通过科研人员的大量研究已经大大提高了液压挖掘机的效率, 如将转台制动能量回收进蓄能器再释放于回转启动以降低能耗; 将工作装置可回收能量转换为电能存储在蓄电池中, 进而辅助发动机工作以提高效率^[4-7]。但由于蓄能器和蓄电池本身的缺点, 能量回收率难以进一步提高。根据两者的优缺点具有互补性的特点, 将两种回收方式结合优势明显, 但此类研究不多。研究对象方面, 对于挖掘机动作中可回收能量占比较高的动臂下降和回转制动, 大部分节能研究只针对其中之一进行, 也有一部分将两者一起研究, 但能量回收过程却是相互独立的^[8-9]。鲜见有对动臂和转台复合动作时的能量回收进行研究。

液压挖掘机在标准工况下的单个工作周期动作如

图 1 所示。

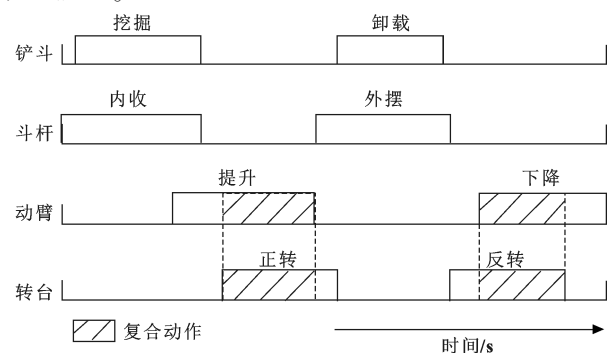


图 1 挖掘机单个工作周期动作分解示意图

假设一个工作周期中转台分为正转和反转, 每个工作周期大约为 20 s。可以看出, 动臂提升和转台正转以及动臂下降和转台反转过程中都存在两者的复合动作, 如图 1 中阴影部分所示。在一个工作周期中, 动臂下降和转台正、反转阶段都存在可回收能量。而

收稿日期: 2017-01-03

作者简介: 姚明星 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事液压挖掘机节能系统的研究工作。E-mail: wwh@swjtu.cn。

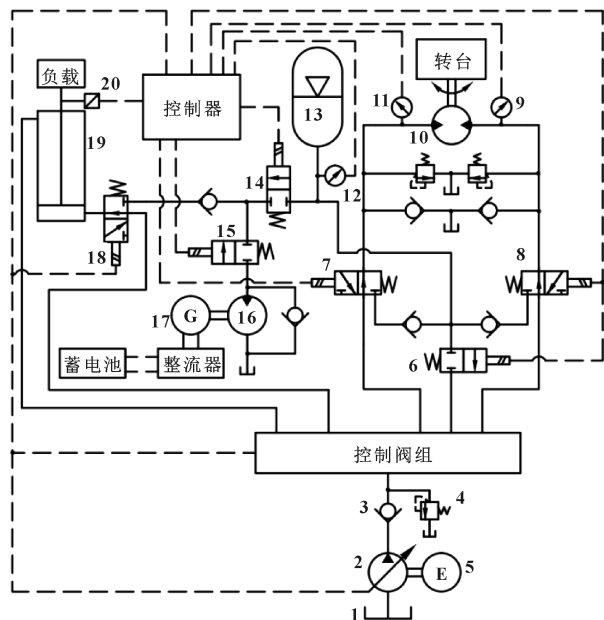
在动臂下降和转台反转的复合动作过程中，存在着可回收能量阶段的重合，即同时可对动臂下降和转台制动的能量进行回收。目前对这部分能量回收方式的研究较少。

在已有研究的基础上，针对以上不足，作者提出了一种基于蓄能器-液压马达-发电机的液压挖掘机电液协调式能量回收系统，实现了动臂下降与回转制动复合动作时的能量回收。阐述了系统组成及工作原理，建立模型并进行仿真分析，最后研究了关键参数对系统节能效果的影响。

1 系统组成及工作原理

1.1 电液协调式能量回收系统组成

文中提出的基于蓄能器-液压马达-发电机的液压挖掘机电液协调式能量回收系统的原理如图 2 所示。



1—油箱 2—液压泵 3—单向阀 4—溢流阀 5—发动机
6、14、15—二位二通电磁换向阀
7、8、18—二位三通电磁换向阀 9、11、12—压力传感器
10—回转马达 13—蓄能器 16—回收马达 17—发电机
19—动臂液压缸 20—位移传感器

图 2 电液协调式能量回收系统原理图

1.2 电液协调式能量回收系统工作原理

从图 1 可以看出：在一个工作周期中，动臂下降一次，转台制动两次，且动臂下降是先于转台反转制动发生的。研究的是动臂和转台复合动作时的能量回收，故不考虑铲斗和斗杆动作的影响。在满斗提升回转阶段和空斗下降转回阶段，会发生动臂和转台的复

合动作，结合图 2 所示的系统原理图，下面就这两个阶段的系统工作原理分别予以说明。

(1) 满斗提升回转阶段。该阶段在内收挖掘装斗之后，动臂首先提升，随后转台开始正转，蓄能器 13 释放油液单独驱动转台正转。当控制器通过压力传感器 12 检测到蓄能器 13 出口压力降至一定值时，二位二通电磁换向阀 6 关闭，蓄能器 13 不再继续释放油液，而由发动机继续驱动转台回转。动臂提升至一定高度后停止继续升高，控制器通过压力传感器 9 和压力传感器 11 检测到的数值判断转台要制动，从而控制使得二位三通电磁换向阀 8 得电换向，使得制动时压力油液通过二位三通电磁换向阀 8 和单向阀进入蓄能器 13，从而实现转台正转制动能量的回收。

(2) 空斗下降转回阶段。该阶段在卸载完毕之后，转台首先反转，蓄能器 13 先将当前周期中的满斗提升回转阶段回收的压力油液释放出来单独驱动转台反转。随后动臂开始下降，控制器通过位移传感器 20 检测到动臂液压缸 19 开始下降，控制二位二通电磁换向阀 6 关闭，蓄能器 13 不再继续释放能量。同时二位三通电磁换向阀 18 得电换向，二位二通电磁换向阀 14 得电打开，动臂液压缸 19 无杆腔的油液在负载重力和有杆腔压力的共同作用下，进入蓄能器 13。当控制器通过压力传感器 12 检测到蓄能器 13 入口压力升高到一定值时，二位二通电磁换向阀 14 关闭，二位二通电磁换向阀 15 得电打开，同时控制阀组切断动臂液压缸 19 有杆腔的压力油液。之后动臂液压缸 19 无杆腔的油液仅在负载重力的作用下，驱动回收马达 16 转动，从而带动发电机 17 发电，将剩余的动臂势能转化为电能存储在蓄电池里。随后控制器通过压力传感器 9 和压力传感器 11 检测到的数值判断转台要制动，从而控制二位三通电磁换向阀 7 得电换向，制动时压力油液通过二位三通电磁换向阀 7 和单向阀进入蓄能器 13，从而实现转台反转制动能量的回收。

2 系统模型建立与参数设置

2.1 仿真模型建立

根据图 2 的系统原理图，在 AMESim 中建立电液协调式能量回收系统的仿真模型，如图 3 所示。

根据图 3 可知，文中提出的电液协调式能量回收系统由 3 个模块组成：动臂下降势能回收模块、转台制动能量回收模块和能量存储与释放模块。

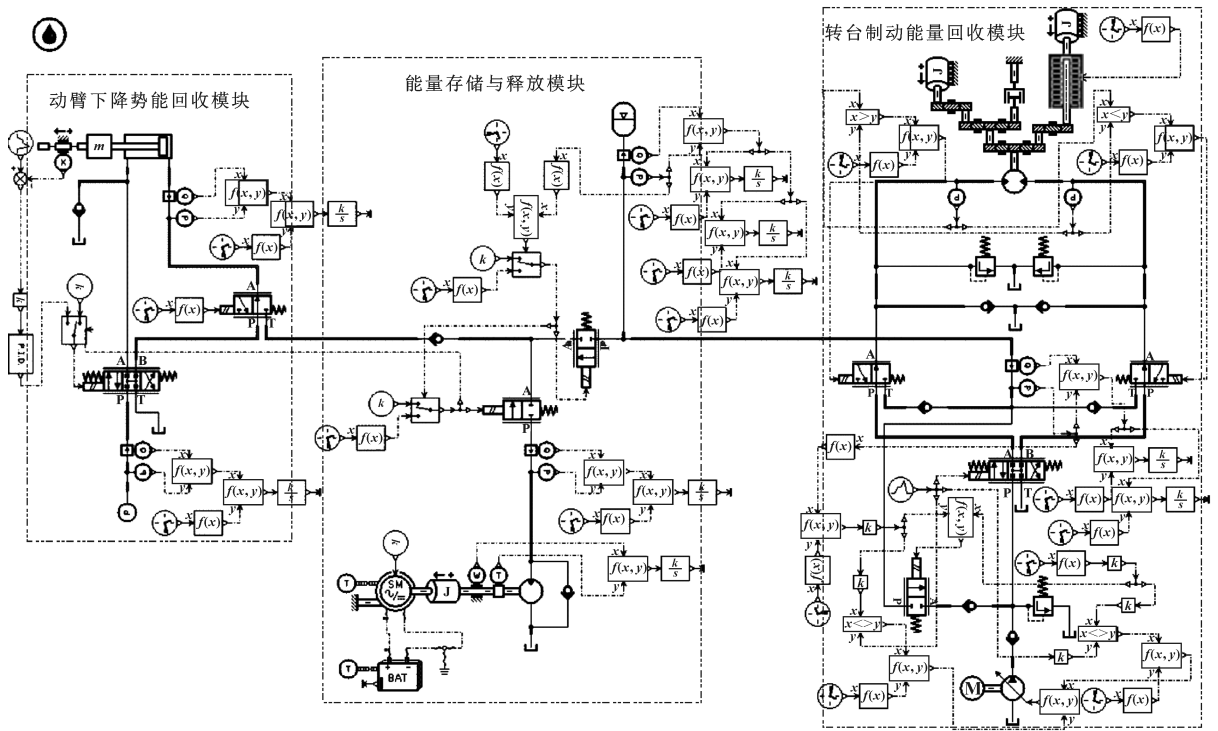


图 3 电液协调式能量回收系统仿真模型

为了便于研究，在搭建仿真模型时对原理图进行简化，动臂液压缸和回转马达分别由单独的动力源驱动，利用两个三位四通电磁换向阀控制动臂的升降和转台的正反转，这样就可以实现对各模块的精确控制，使动臂与转台的运动轨迹符合标准工况下单个周期内的动作过程。

2.2 仿真参数设置

系统仿真模型建立之后，需要对模型中各元件参数进行设置。文中以某型号 7 t 级液压挖掘机为实例进行仿真分析，挖掘机的基本参数如下：整机质量 7 000 kg，额定功率 42.9 kW，标准斗容 0.28 m³，系统压力 26.5 MPa，先导压力 3.5 MPa，回转速度 11 r/min，仿真模型中各元件的基本参数参照实例中液压挖掘机的实际参数设定。仿真模型中主要元件的参数设置如表 1 所示。

文中所选取的 7 t 级液压挖掘机为反铲型，对于反铲挖掘机，其上部回转机构的转动惯量是按照下列经验公式估算的^[10]：

$$J_0 = 590G^{5/3} \quad (1)$$

$$J_1 = 960G^{5/3} \quad (2)$$

式中： G 为整机质量，t； J_0 为空斗回转时的转动惯量，kg·m²； J_1 为满斗回转时的转动惯量，kg·m²。

表 1 系统仿真模型主要元件基本参数

元件	参数	数值
蓄能器	容积/L	4
	充气压力/MPa	5
回收马达	马达排量/(mL·r ⁻¹)	80
	额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
发电机	输出电流最小转速/(r·min ⁻¹)	1 000
	马达排量/(mL·r ⁻¹)	45
回转马达	额定转速/(r·min ⁻¹)	1 700
	机械效率	0.9
减速机总成	容积效率	0.97
	总减速比	121
动臂液压缸	满斗转动惯量/(kg·m ²)	24 590.53
	空斗转动惯量/(kg·m ²)	15 112.93
转台制动能量回收模块	活塞直径/mm	115
	杆直径/mm	65
	液压缸行程/mm	760
	两端死区体积/cm ³	50
蓄电池	黏滞摩擦系数/(N·s·m ⁻¹)	100 000
	负载重力/kN	68.6
蓄电池	额定容量/(A·h)	5
	初始电荷状态/%	60

此系统中蓄能器主要回收来自回转制动时的油液。传统液压挖掘机回转制动过程中回转马达输出的最大油液体积计算公式为：

$$V = \int Q dt \quad (3)$$

式中： Q 为回转制动过程中回转马达流量； t 为制动时间。

通过仿真结合式 (3) 计算得到 $V = 0.5235 \text{ L}$ ，则蓄能器的有效容积不能小于回转马达制动时输出的最大油液体积 V 。由于蓄能器的有效容积约占蓄能器总容积的 10%~25%，则蓄能器的总容积为：

$$V_0 = \frac{V}{10\% \sim 25\%} = (2.094 \sim 5.2) \text{ L} \quad (4)$$

在该范围内实际可选的蓄能器容积有 2.5、4 L。考虑到蓄能器还要回收少量动臂液压缸油液，这里选择容积为 4 L 的蓄能器。

根据实例中挖掘机的参数，转台液压系统的最大压力为 23 MPa，故蓄能器最大工作压力 p_2 为 23 MPa，根据公式^[11]：

$$p_0 = 0.308p_2 \quad (5)$$

计算可得蓄能器充气压力 p_0 为 7.084 MPa，考虑到蓄能器也要回收一部分动臂势能，充气压力不能高于动臂下降时无杆腔压力，故这里暂时取蓄能器充气压力为 5 MPa。

实例挖掘机实际工作中，动臂下降时间大约为 3 s，仿真中依据此条件选取合理的回收马达排量使动臂下降时间在 3 s 左右，这里选择回收马达排量为 80 mL/r。由于回收马达驱动电动/发电机转动发电，故依据常见的电动机额定转速，选取回收马达额定转速为 1 500 r/min。

3 系统仿真分析

仿真中，系统模型的控制按照图 1 所示的动作过程进行，液压挖掘机单个工作周期时长设为 20 s，对单个工作周期进行仿真。下面对模型中各模块在一个周期内的仿真动作分别予以说明，如表 2 所示。

电液协调式能量回收系统模型的仿真过程综合了各个模块的仿真动作，从仿真结果来看，此系统可以实现动臂与转台的正常作业。下面着重从能量回收方面对仿真结果予以说明。

在一个完整的工作周期内，假设蓄能器回收或释放能量过程中内部气体压力变化量为 p ，气体体积从 V_1 变化到 V_2 ，则其回收或释放的能量 E_1 可以通过式 (6) 计算得到：

$$E_1 = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (6)$$

表 2 各模块周期内仿真动作

模块类型	时间点/s	动作
	0	满斗提升
动臂下降势	3	悬停（卸料）
能回收模块	12	空斗下降，能量回收
	15	悬停（挖掘）
	0	不工作
转台制动动	1	满斗正转，蓄能器能量释放
能回收模块	5	制动，能量回收
	10	空斗反转，蓄能器能量释放
	14	制动，能量回收
	0	不工作
能量存储	1	蓄能器释放能量驱动正转
与释放模块	5	蓄能器回收制动动能
	10	蓄能器释放能量驱动反转
	12	蓄能器、蓄电池回收动臂下降势能
	14	蓄能器回收制动动能

根据仿真得到的蓄能器气体压力/体积的变化结合公式 (6) 可以算出蓄能器回收与释放的能量。并不是所有释放的能量都能被有效利用，根据能量释放时转台的转矩和转速，求得再利用的能量。动臂在整个下降过程中输出的能量根据无杆腔的压力和流量求得。转台回转制动能量的计算公式为：

$$E_2 = 0.5J\omega^2 \quad (7)$$

式中： J 为转动惯量； ω 为转台角速度。

能量再利用率定义为再利用能量与释放能量之比，例如正转启动的能量再利用率为再利用能量与蓄能器释放能量之比。根据仿真结果计算能量回收率和能量再利用率，结果如表 3、表 4 所示。

表 3 周期内能量回收结果

动作	蓄能器回收能量/kJ	蓄电池回收能量/kJ	转台制动动能/kJ	动臂下降能量/kJ	能量回收率/%
正转制动	9.687	—	16.315	—	59.37
动臂下降	3.253	3.236	—	23.831	13.65 13.58
反转制动	6.296	—	10.027	—	62.79
总计	22.472	—	50.173	—	44.79

注：动臂下降时，蓄能器的能量回收率为 13.65%；蓄电池的能量回收率为 13.58%。

从表 3 可以看出：此系统在满斗正转制动时能量

回收率达到了 59.37%，空斗反转制动时能量回收率达到了 62.79%，动臂下降时综合能量回收率达到了 27.23%，总的回收能量占总的可回收能量的比例达到了 44.79%，能量回收效果良好。

表 4 周期内能量再利用结果

动作	蓄能器释放能量/kJ	蓄能器回收再利用能量/kJ	能量再利用率/%
正转启动	6.467	3.68	56.9
反转启动	12.788	5.442	42.56
总计	19.255	9.122	47.37

从表 4 可以看出：此系统在满斗正转启动时能量再利用率达到了 56.9%，空斗反转启动时能量再利用率达到了 42.56%，总的再利用能量占总的释放能量的比例达到了 47.37%，能量再利用效果良好。

4 关键参数对系统节能效果的影响

为了进一步提高电液协调式能量回收系统的节能效果，对影响系统能量回收元件的关键参数进行了研究。通过改变蓄能器的初始容积和回收马达的排量，得到它们对系统能量回收率的影响，以期取得更好的系统节能效果。

4.1 蓄能器初始容积对系统节能效果的影响

在系统其他参数不变的情况下，选择蓄能器的初始容积分别为 2.5、4、6.3 和 10 L，对系统进行仿真分析，得到在一个完整工作周期中系统回收能量如表 5 所示。

表 5 不同初始容积下系统回收能量

蓄能器初始容积/L	蓄能器回收能量/kJ			蓄能器回收能量/kJ	总计/kJ
	正转制动	动臂下降	反转制动		
2.5	9.053	4.473	6.267	3.086	22.879
4	9.687	3.253	6.296	3.236	22.472
6.3	10.202	1.732	6.225	3.375	21.534
10	10.47	0.282	6.108	3.493	20.353

从表 5 可知：随着初始容积增大，系统回收的能量减少，但影响不大。受初始容积影响变化幅度最大的是动臂下降时蓄能器回收的能量。由于这部分回收能量中包含动力源输出的能量，所以不追求使其尽可能大。此外，由于所选挖掘机为小吨位，空间布局较为紧凑，在满足回收平稳高效的同时，应尽量选择初始容积小的蓄能器。

4.2 回收马达排量对系统节能效果的影响

在系统其他参数不变的情况下，选择回收马达的排量分别为 70、80、90 和 100 mL/r，对系统进行仿真分析，得到不同排量下蓄电池 SOC 变化如图 4 所示。

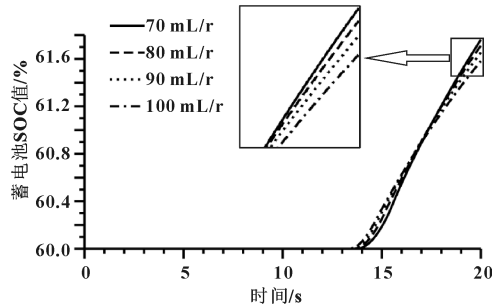


图 4 不同排量下蓄电池 SOC 变化曲线

从图 4 可以看出：随着回收马达排量的增大，蓄电池回收的能量值在降低，但降幅不明显。这主要是由于马达转速也随排量的增大而下降，使得发电机转速下降，从而蓄电池回收的能量减少。在周末 (t=20 s)，不同排量下蓄电池的 SOC 值分别达到了 61.76% (70 mL/r)、61.71% (80 mL/r)、61.65% (90 mL/r)、61.58% (100 mL/r)。

由于回收马达的参数变化主要影响蓄电池的能量回收，所以随着排量的增加蓄电池回收能量减少，系统回收的能量也逐渐减少，因此小排量的回收马达能提高能量回收率。但另一方面排量过小又会使动臂下降缓慢，控制性能降低。所以回收马达排量的选择要在一个合理的范围内，兼顾控制性能和能量回收率。

5 结论

(1) 提出一种基于蓄能器-液压马达-发电机的液压挖掘机电液协调式能量回收系统，实现了动臂下降与回转制动复合动作时的能量回收。在标准工况下的单个工作周期内对系统模型进行仿真，结果表明：在参数合理匹配的情况下，此系统回转制动能量回收率为 61.08%，动臂下降能量回收率为 27.23%，综合能量回收率达到了 44.79%，综合能量再利用率达到了 47.37%，节能效果良好。

(2) 对影响系统能量回收的元件的关键参数进行了研究，结果表明：在合理的范围内，选择初始容积小的蓄能器和排量小的回收马达能提高系统的能量回收率。

参考文献：

[1] 杨敬,权龙,杨阳.小型液压挖掘机回转过程能量消耗与节能研究[J].中国公路学报,2011,24(5):120-126.
 YANG J, QUAN L, YANG Y. Research on Energy Consumption and Conservation of Light Type Hydraulic Excavator in Swing Process [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 120-126.

[2] 李曙,龚进,龚俊,等.挖掘机回转电液能量回收系统仿真与试验[J].合肥工业大学学报自然科学版,2015(5):581-586.
 LI S, GONG J, GONG J, et al. Simulation and Experimental

- Research on Electro-hydraulic Energy Recovery System of Excavator Rotation[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2015(5): 581-586.
- [3] 杜磊, 杨福源, 徐梁飞, 等. 并联式混合动力挖掘机系统设计及其耦合控制策略[J]. 机械工程学报, 2014, 18(18): 118-126.
DU L, YANG F Y, XU L F, et al. Design and Coupling Control Strategy for Parallel Hybrid Excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 18(18): 118-126.
- [4] 李赛白. 液压挖掘机回转制动能量回收系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [5] 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(工学版), 2011(S1): 150-154.
ZHAO D X, CHEN M D, DAI Q L, et al. System of Arm Potential Energy Recovery in Hybrid Hydraulic Excavators[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011(S1): 150-154.
- [6] 叶月影, 林添良, 付胜杰, 等. 基于电动机和蓄能器的挖掘机动臂节能驱动系统研究[J]. 液与气动, 2015(6): 41-46.
YE Y Y, LIN T L, FU S J, et al. Boom Energy-saving System Based on Electric Motor and Hydraulic Accumulator for Excavators[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015(6): 41-46.
- [7] LI W, CAO B, ZHU Z, et al. A Novel Energy Recovery System for Parallel Hybrid Hydraulic Excavator[J]. The Scientific World Journal, 2014(27): 1-14.
- [8] 吴超. 液压挖掘机能量回收系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [9] 肖扬. 油液混合动力挖掘机流量耦合式及扭矩耦合式动力系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [10] 李元钊, 王述彦. 液压挖掘机工作装置转动惯量的计算[J]. 工程机械, 1995(12): 5-8.
LI Y Z, WANG S Y. Calculation of the Moment of Inertia of the Working Device on Hydraulic Excavator[J]. Construction Machinery and Equipment, 1995(12): 5-8.
- [11] 付亚超. 液压挖掘机回转装置节能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [12] 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.
- [13] 朱建新, 李赛白, 刘昌盛, 等. 挖掘机回转动能回收系统仿真[J]. 机械设计与研究, 2011, 27(6): 84-87.
ZHU J X, LI S B, LIU C S, et al. Research of Slew Platform Energy Recovery System in Excavator[J]. Machine Design and Research, 2011, 27(6): 84-87.
- [14] 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 X, GUAN C, PEI L, et al. Research on the System of Arm Potential Energy Recovery in Hybrid Hydraulic Excavators[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 96-101.

(上接第 50 页)

参考文献:

- [1] 耿晓明, 谭亮, 龚邦明. 钢轨除锈装置及其液压系统设计[J]. 机械, 2012, 39(10): 65-67.
GENG X M, TAN L, GONG B M. The Design of Hydraulic System for Device for Rail Derusting[J]. Machinery, 2012, 39(10): 65-67.
- [2] 何礼冬. 钢轨除锈机整体方案与液压系统设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [3] 党战国. 钢轨除锈机的研制[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [4] 李群英, 龚邦明. 钢轨除锈机的研制[J]. 机械制造与自动化, 2008, 37(5): 88-90, 98.
LI Q Y, GONG B M. The Research of Removing Rust Machine Tool for Rail[J]. Machine Building & Automation, 2008, 37(5): 88-90, 98.
- [5] 万文涛. 砂布千页轮钢板打磨技术研究[J]. 机电工程技术, 2010, 39(12): 94-96.
WAN W T. Study on Steel Plate Burnish Technique Based on Flap Wheel[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2010, 39(12): 94-96.
- [6] 高巧英, 白明海, 贺亚斌, 等. 研磨页轮深孔抛光装置的研制和应用[J]. 山西机械, 1998(3): 22-25.
GAO Q Y, BAI M H, HE Y B, et al. Development and Application of Grinding Wheel Device in Deep Hole Polishing[J]. Shanxi Machinery, 1998(3): 22-25.
- [7] 胡垒, 孔令叶, 阎秋生, 等. 基于砂带千页轮的模具抛光加工过程研究[J]. 机电工程技术, 2010, 39(11): 109-112.
- [8] 尹建玲, 李广生. 页轮抛光技术及其应用[J]. 工具技术, 2000, 34(1): 22-24.
YIN J L, LI G S. The Technology and Application of Flap Wheel Polishing[J]. Tool Engineering, 2000, 34(1): 22-24.
- [9] 朱金强. 研磨页轮抛光技术的推广及应用[J]. 时代农机, 2013, 40(5): 92-93.
ZHU J Q. Grinding Wheel Polishing Technology Promotion and Application Page[J]. Times Agricultural Machinery, 2013, 40(5): 92-93.
- [10] 霍文国, 徐九华, 傅玉灿. 砂带干式磨削 Ti-6Al-4V 钛合金的磨削力[J]. 机械工程材料, 2008, 32(12): 19-21, 24.
HUO W G, XU J H, FU Y C. Grinding Force of Ti-6Al-4V Titanium Alloy during Dry Belt Grinding[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(12): 19-21, 24.
- [11] 王先逵. 机械加工工艺手册—磨削加工[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008:(5-5)—(5-7).