

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2020.12.007

纯电驱液压挖掘机复合动作电液能量回收再利用系统研究

李洁^{1,2}, 程珩^{1,2}, 权龙^{1,2}, 郝云晓^{1,2}, 关澈^{1,2}

(1. 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, 山西 太原 030024;
2. 太原理工大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为了改善纯电驱液压挖掘机工作过程中大量能量浪费的情况, 提出一种基于超级电容和蓄能器的挖掘机复合动作能量回收与再利用系统。首先对该系统的主要元件进行参数匹配和泄漏分析, 然后基于 SimulationX 平台建立某 6 t 纯电驱液压挖掘机能量回收再利用系统仿真模型, 对标准工况下的一个循环周期进行运行及能耗特性的仿真研究。结果表明, 该系统比原纯电驱液压挖掘机系统实现了 29% 的节能, 达到了良好的节能效果。

关键词: 电驱挖掘机; 转台; 动臂; 能量回收再利用

中图分类号: TH137 文献标志码: B 文章编号: 1000-4858(2020)12-0044-07

Research on the Electro-hydraulic Energy Recovery and Reuse System in Compound Operation of Pure Electro-hydraulic Excavator

LI Jie^{1,2}, CHENG Hang^{1,2}, QUAN Long^{1,2}, HAO Yun-xiao^{1,2}, GUAN Che^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024;
2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024)

Abstract: In order to improve the large amount of energy waste in the working process of pure electric drive hydraulic excavator, a composite action energy recovery and reuse system of excavator based on supercapacitor and accumulator was proposed. In this paper, parameter matching and leakage analysis are carried out for the main components of the system, and based on SimulationX platform, a simulation model of the energy recovery and reuse system of a 6 t pure electric drive hydraulic excavator is established, and its operation and energy consumption characteristics are simulated and studied in a cycle under standard working conditions. The results show that the system achieves 29% energy saving compared with the original pure electric drive hydraulic excavator system, and achieves good energy saving effect.

Key words: electric drive excavator, boom, turntable, energy recycling

引言

传统液压挖掘机的能量利用率较低, 从发动机输出的能量仅有 20% 左右被负载利用^[1], 且发动机在工作时排放出的污染性气体与固体颗粒对施工地区的空气质量以及附近居民的生活质量造成影响。近年来, 电驱液压挖掘机因其无污染、噪声小、能量利用率高、可靠性高等优势^[2-3], 受到了越来越多的

关注。

在液压挖掘机的工作过程中, 动臂和回转动作耗

收稿日期: 2020-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(51675364)

作者简介: 李洁(1997—), 女, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要研究方向为电液控制技术。

能较高,可回收能量较多^[4],但目前市场上的纯电驱挖掘机大多缺少能量回收环节或只实现了动臂或回转单动作的回收,没有考虑复合动作情况下的能量回收,导致其使用过程中能量利用率较低。

目前,根据回收方式可将挖掘机的能量回收系统分为电气式和液压式。液压式能量回收系统的主要储能元件是蓄能器,其具有功率密度大,装机成本低的特点^[5],能够在极短时间内实现制动能的储存和释放。付春雨等^[6]提出一种以蓄能器作为储能元件的新型动臂势能回收液压系统,实验结果表明:动臂势能回收率为22.6%;林添良等^[7-8]提出了一种基于液压蓄能器的两级空转速度控制系统,降低了空转速度控制关闭时的能耗,进一步提高了制动器的控制性能。电气式能量回收系统的主要储能元件是超级电容和蓄电池,超级电容具有安装空间小、储能密度高的特点,并提出一种使用超级电容的电驱液压挖掘机的节能型转台驱动系统;HYEON-SEOP Y等^[9]研究了使用超级电容器的环保型电动挖掘机的能源管理问题,结果表明,采用超级电容的挖掘机电池效率得到了提高。电气式回收的缺点是能量转换环节多,传递链长,效率低;而液压式回收能量转换路径短,油液压力低,再利用困难,如何实现两种方式的有效结合将成为今后研究的重点;BO LONG等^[10]提出了一种改进的电动汽车多功能能量回收系统,改进了传统蓄能器蓄电池组测试系统存在的能量损耗和谐波问题;陈正雄^[11]提出了一种大惯量回转机构制动能量电液回收利用系统,使用液压蓄能器与超级电容储能,通过控制发电机扭矩匹配蓄能器的压力,实现回转系统制动能量回收效率最大化的同时,保证回转机构的制动平稳。

本研究针对纯电驱液压挖掘机动臂与转台的工作特点,将采用液压马达-电机作为回转系统和动臂的回收单元,DC/DC与超级电容和蓄能器作为储能单元进行挖掘机复合动作情况下的能量回收的方法研究。

1 挖掘机复合动作过程分析

挖掘机的工作过程具有周期性^[12],在标准工况下挖掘机的典型工作循环如图1所示。

一个工作循环中转台分别正反转各一次,动臂提升和下降各一次,每个工作周期约为20 s^[13]。在挖掘机的工作过程中,动臂的下降过程和转台的整个工作过程均可实现能量回收。

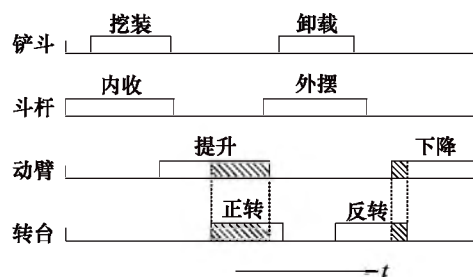


图1 标准工况下挖掘机的典型工作循环

2 系统结构与原理

2.1 能量回收系统结构设计

纯电驱液压挖掘机动臂与转台复合动作能量回收系统结构原理图如图2所示。

2.2 能量回收系统工作原理

该系统采用蓄能器和超级电容储能系统共同作为储能元件进行能量回收。下面分别对回转和动臂系统的工作原理进行说明。

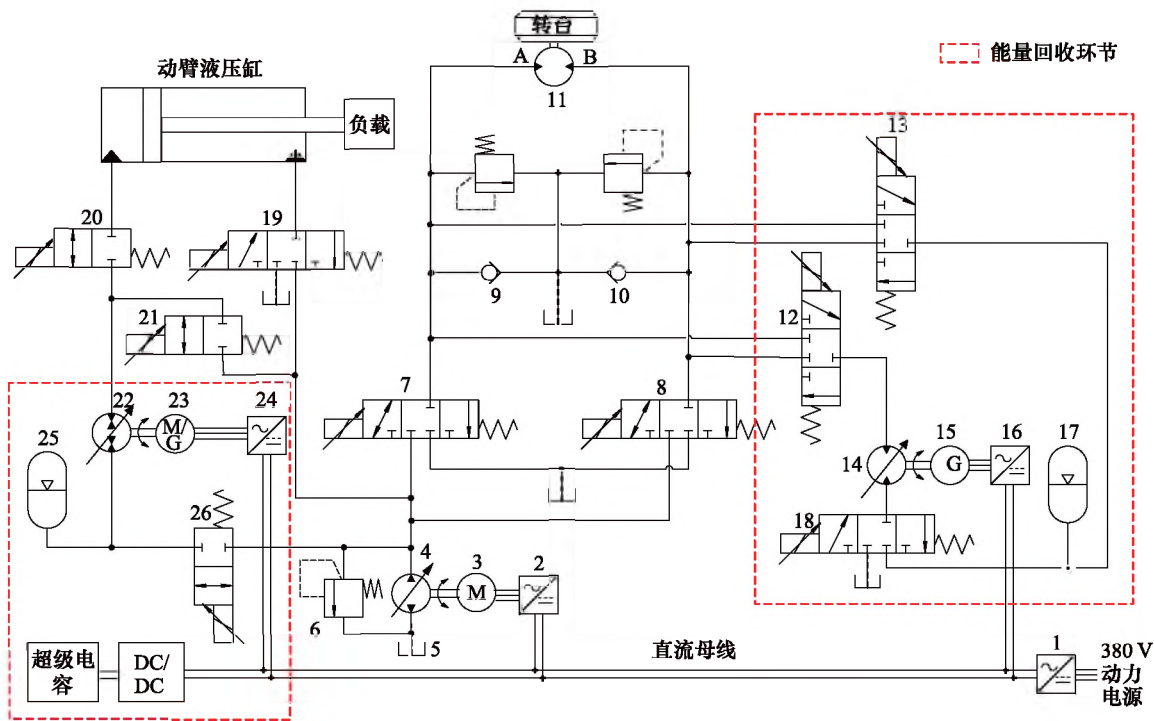
1) 回转制动动能能量回收再利用系统工作原理

以马达正转为例,当回转系统开始加速时阀7工作于左位,主液压泵输出高压油至回转马达A口驱动转台回转。在回转加速与匀速阶段,阀12下位接通,通过调节恒压马达14的压力回收回转马达回油口B的背压,在此阶段阀18左位接通,恒压泵/马达出口接油箱,电机处于发电状态,超级电容回收能量。考虑到蓄能器17压力较大,若其压力大于一定值,阀13上位接通,蓄能器内高压油释放至回转马达A口,辅助液压泵驱动回转机构。回转减速制动阶段,主泵排量为0,回转马达B口流量最大,为使上车平稳制动,阀12下位接通。当回转马达出口压力大于蓄能器压力时阀18右位接通,恒压马达与蓄能器17连接,在此过程中蓄能器回收大部分制动能量,电机15补偿蓄能器的非线性特性,从而降低电气回收单元的装机能量,降低成本。

2) 动臂势能回收再利用系统工作原理

动臂上升时,阀20处于左位,阀19处于右位,超级电容放电,蓄能器释能,由电机23和泵22提供高压油驱动动臂上升。在此过程中阀21处于左位,主泵向动臂无杆腔补充因泄漏损失的液压油。

动臂下降时,阀19处于左位,阀20处于右位,液压缸无杆腔的高压油驱动回收泵/马达22和电机23发电,超级电容充电,同时出口处的高压油充入蓄能器转换成势能存储,主泵4为有杆腔补油防止吸空。通过控制电机23的转速控制动臂的下降速度。



1. 整流器 2、16. 逆变器 3. 主电机 4. 主泵 5. 油箱 6. 溢流阀 7、8、12、13、18、19. 三位三通电磁换向阀 9、10. 单向阀 11. 回转马达
14. 回收马达 15、23. 电机 17、25. 蓄能器 20、21、26. 二位二通电磁换向阀 22. 回收泵/马达 24. 整流/逆变器

图2 纯电驱液压挖掘机复合动作能量回收利用系统结构原理图

3 系统元件参数匹配

本研究以某型号6 t纯电驱液压挖掘机作为研究对象进行分析,其基本参数如表1所示。

表1 6 t电驱挖掘机基本参数

项目	数值
活塞杆直径/mm	55
无杆腔直径/mm	100
行程/mm	720
回转速度/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	3 ~ 10
最小回转半径/mm	2644
回转马达减速比	140
回转马达排量/mL	27.4
回转马达额定转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	1500

3.1 能量回收系统设计

对于能量回收系统中的马达、电机、蓄能器等元件的型号参数可按照原挖掘机系统的各部分可回收能量进行估算。永磁同步伺服电机具有效率高、功率因数高、温升低等优点^[14],本研究以其作为回收电机对能

量进行回收。表2为初步选定能量回收系统的参数。

表2 能量回收系统参数

元件	项目	数值
回转回收电机	额定扭矩/ $N \cdot m$	53
	额定转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	1500
回转回收马达	排量/mL	45
	额定转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	1200
回转蓄能器	容积/L	4
	充气压力/MPa	18
动臂回收电机	额定扭矩/ $N \cdot m$	24
	额定转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	1500
动臂回收马达	排量/mL	45
	额定转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	1500
动臂蓄能器	容积/L	45
	充气压力/MPa	4

3.2 超级电容储能系统设计

超级电容储能系统由超级电容器和DC/DC变换

器组成。挖掘机回收能量的过程具有变化剧烈且快速的特点,超级电容器具有功率密度高、充放电效率高、循环寿命长等优势^[15],使用超级电容进行储能可以满足挖掘机的能量回收需求。DC/DC 变换器可以实现精确的电流与电压控制,能够满足电机系统较小的电压工作范围的要求。通过对可回收能量的预估,超级电容最高充电电压定为 350 V,最低放电电压为 250 V,容量为 5 F。超级电容的 SOC 值较高时充电,易造成充电过量而影响使用寿命,而 SOC 值低于下限时,内阻会增大许多,此时不宜进行充电。因此本研究选取超级电容 SOC 值的下限为 0.64,上限为 0.8^[16]。

DC/DC 变流器为非隔离半桥型双向 DC/DC 变流器,其结构拓扑如图 3 所示。其控制环节采用电压外环和电流内环的双闭环控制方法。通过对超级电容储能系统充放电功率的预估,DC/DC 变流器功率定为 10 kW。

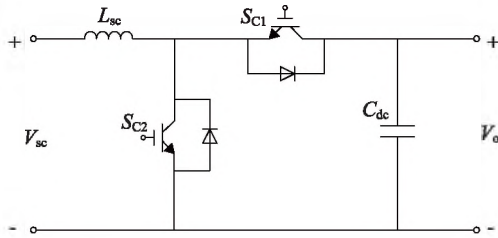


图3 非隔离半桥型双向 DC/DC 变流器

4 泄漏及效率分析

由于动臂上升时回收泵/马达提供了主要油液,而在工作过程中存在一定程度的泄漏,这部分泄漏的油液将由主泵补充。为了研究动臂一个工作循环中回收泵/马达泄漏的油液量,本研究建立了斜轴泵/马达流量的数学模型和损耗模型,通过计算获得动臂回收泵/马达泄漏的油液体积。

4.1 斜轴泵/马达流量分析

柱塞泵/马达旋转 1 周,柱塞底部的密闭容积在缸体的摆动作用下进行吸油和排油。泵/马达的输出流量压力与柱塞的瞬时流量有关,柱塞的瞬时流量为:

$$Q_i = \frac{\pi d^2}{4} v_i = \omega \frac{\pi d^2}{4} R \cdot \tan\alpha \cdot \sin\varphi_i \quad (1)$$

式中, d —— 柱塞直径

v_i —— 柱塞 i 的轴向速度

ω —— 缸体转动角速度

R —— 柱塞轴线在缸体中的分布圆半径

α —— 斜盘平面相对于缸体横截面的夹角

φ_i —— 柱塞 i 的转角

泵/马达的瞬时理论流量为排油腔的柱塞的瞬时理论流量之和:

$$Q_{sh} = \sum_{i=1}^m Q_i = \omega \frac{\pi d^2}{4} R \cdot \tan\alpha \sum_{i=1}^m \sin\varphi_i \quad (2)$$

式中, m 为处于排油腔的柱塞数。

一般柱塞数为奇数,泵/马达输出流量脉动较小,所以假设柱塞泵为奇数,对式(2)整理后可以得出柱塞泵/马达的理论流量 Q_{sh} 和实际流量 Q 分别为:

$$Q_{sh} = \frac{\pi d^2}{2} Z n R \cdot \tan\alpha \quad (3)$$

$$Q = \frac{\pi d^2}{2} Z n R \cdot \tan\alpha \cdot \eta_{MV} \quad (4)$$

4.2 回收泵/马达损耗分析

由以上分析可知,回收泵/马达的实际流量 Q 受马达的效率影响。定量泵/马达的效率主要与系统压力和转速有关,其效率的计算公式为:

容积效率:

$$\eta_{MV} = \frac{1}{1 + C_S \frac{\Delta p_M}{\mu n_M}} \quad (5)$$

机械效率:

$$\eta_{Mm} = 1 - C_V \frac{\mu n_M}{\Delta p_M} - C_f \quad (6)$$

总效率:

$$\eta_M = \eta_{MV} \cdot \eta_{Mm} = \frac{1 - C_V \frac{\mu n_M}{\Delta p_M} - C_f}{1 + C_S \frac{\Delta p_M}{\mu n_M}} \quad (7)$$

式中, Δp_M —— 泵/马达系统压力

η_M —— 泵/马达转速

C_S —— 层流泄漏系数

C_V —— 层流阻力系数

C_f —— 机械阻力系数

μ —— 液压油动力黏度

本研究中液压系统液压油型号为 HLP46。挖掘机的液压油温一般为 60 ~ 80 °C,液压油的运动黏度 ν 取 13 mm²/s,密度 ρ 为 0.876 kg/m³。计算可得动力黏度 $\mu = \nu \cdot \rho = 11.388 \times 10^{-6}$ kg/m · s。

由式(4)和式(5)计算可得动臂上升和下降所形成的一个工作循环中,动臂工作系统中的油液剩余量为循环开始时的 85%,为了保证挖掘机工作的连续性,主泵将在动臂上升阶段提供所需油液的 15%。

5 仿真分析

根据图2的原理以及以上参数设计、泄漏分析和效率分析,在仿真软件 SimulationX 中对 6 t 纯电驱液压挖掘机的液压、机械及控制部分进行建模和联合仿真,模型按照图1所示的动臂和回转复合动作过程进行控制,单个工作周期设为 20 s,对单个工作周期进行仿真。图4所示为周期内各模块的给定动作信号。

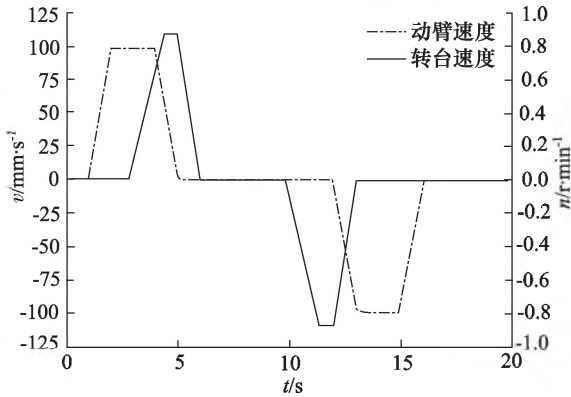


图4 复合动作给定信号

5.1 动臂运行特性分析

在一个完整的工作周期内,本系统动臂液压缸的速度-位移与给定信号的速度-位移对比曲线如图5所示。从图5中可以看出动臂匀速运动时液压缸的速度波动为 3.7%;位移与给定信号产生了 1.4% 的误差。总体来看,本系统能够根据指定信号完成相应的提升和下降的动作,使动臂正常作业。

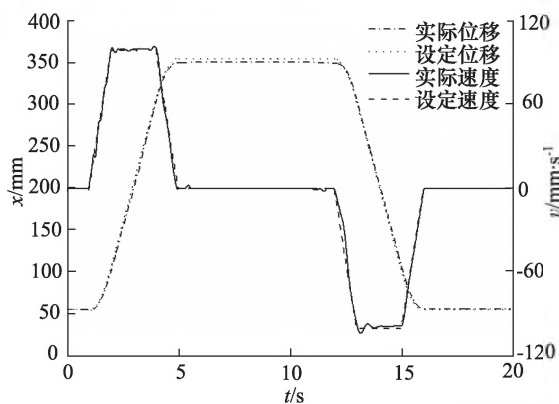


图5 动臂液压缸速度-位移曲线

图6所示为动臂运行过程中,系统各元件的功率曲线。在动臂上升阶段,回收电机驱动恒压泵/马达向液压缸无杆腔提供能量。在动臂加速阶段,电机存在峰值功率约为 3.5 kW;随着蓄能器压力的降低,发电机功率逐渐增加,最大功率为 4.2 kW。在此过程中,

蓄能器释放高压油,蓄能器供能功率约为 3 kW,随着运行距离的增加,蓄能器功率逐渐降低。蓄能器油液压力由 4.5 MPa 降低为 4.18 MPa,油液体积由 8.4 L 减少为 6.4 L。

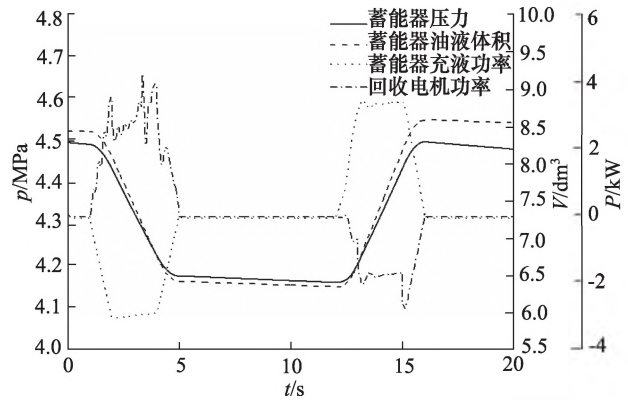


图6 动臂回收单元特性曲线

在动臂下降阶段,蓄能器和超级电容共同回收动臂重力势能。工作装置的重力势能主要由蓄能器回收,发电机功率约为 1.8 kW,蓄能器充液功率约为 3.5 kW,明显大于发电机功率。蓄能器油液压力由 4.16 MPa 升高为 4.5 MPa,油液体积由 6.4 L 升高为 8.6 L。由图可知在一个工作循环结束时,蓄能器基本可以返回初始状态。

5.2 转台运行特性分析

图7所示为一个工作周期内,回转机构旋转 90° 的运行曲线。正转加速阶段,回转马达 A 口和液压泵出口压力逐渐增加。回转加速初始阶段,回转马达转速滞后回转指令较大;回转匀速阶段,由于旋转角度较小,匀速时间短,回转马达转速出现较大超调,回转机构的最大转速为 1.1 r/min;回转制动阶段,上车回转机构出现了小于 0.5% 的反转现象。

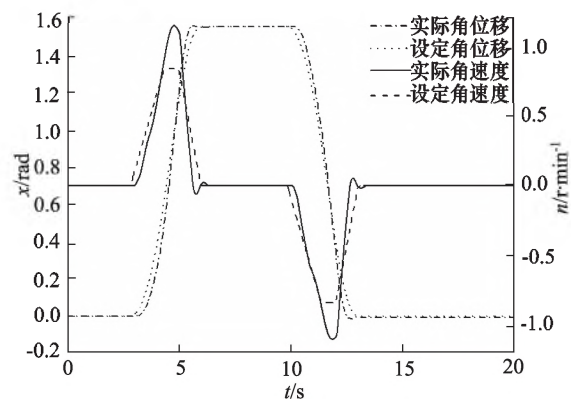


图7 回转转台角速度-角位移曲线

图8所示为回转系统回收单元特性曲线。加速阶段时,蓄能器释放高压油,由于蓄能器与回转马达进油口压力存在压差,因此蓄能器功率存在一瞬间的峰值约为15 kW。随着回转角度的增加蓄能器压力逐渐降低,直至油液压力下降到18 MPa时蓄能器停止供能。回转加速时回收电机功率随回转速度的增加而增加,最大功率约为3.1 kW。回转制动过程中,高压油经过回收马达冲入蓄能器,蓄能器油液压力逐渐上升至19 MPa,峰值功率约为10 kW。

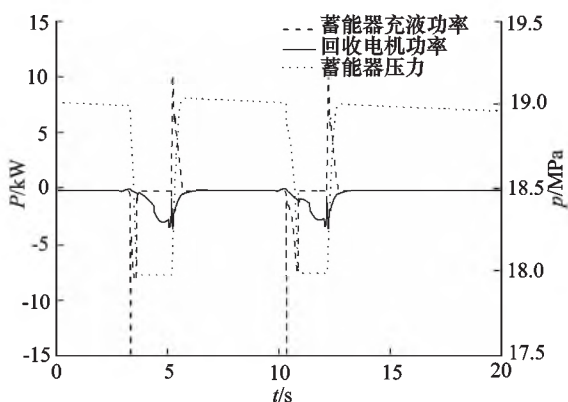


图8 回转回收单元特性曲线

5.3 运行能耗对比

当一个循环周期内能量的回收与再利用达到平衡,则循环结束时两个蓄能器的油液体积和压力以及超级电容SOC值与开始时相同。对该系统在动臂和回转工作的一个标准工况下的能耗特性进行仿真研究,并与没有能量回收单元和储能系统的原纯电驱液压挖掘机进行比较。图9为仿真得出的两个系统的能耗对比图。可以看出一个循环周期原系统耗能约48 kJ,电液回收与再利用系统耗能约33.7 kJ,节能约29%。

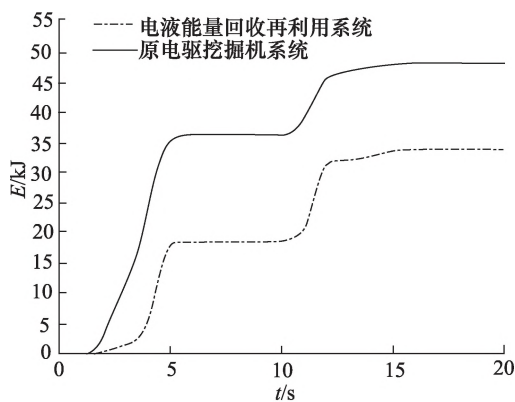


图9 能耗对比

表3为能量回收系统的能量转化效率。由表3可以看出,纯电驱挖掘机采用电液能量回收再利用系统后,一个周期内,挖掘机动臂和回转部分总可回收能量为24.36 kJ,能量回收系统共回收能量18.3 kJ,能量回收效率约为75.1%,再利用效率约为78.1%。

表3 能量回收系统的能量转化效率

参数	数值
可回收的重力势能/kJ	17.3
可回收的回转制动动能/kJ	7.06
总可回收能量/kJ	24.36
超级电容回收能量/kJ	3.3
蓄能器回收能量/kJ	15
总回收能量/kJ	18.3
能量回收效率/%	75.1
能量再利用效率/%	78.1

6 结论

本研究提出一种基于超级电容和蓄能器的6 t纯电驱液压挖掘机的回转和动臂的复合能量回收与再利用系统,有效解决了挖掘机工作过程中大量能量浪费的问题。对挖掘机回收系统的主要元件进行参数匹配,并对回收泵/马达进行了泄漏分析,使蓄能器的充放液在一个循环周期内达到平衡。基于SimulationX平台建立系统的仿真模型,对其进行动臂与回转复合工况下的仿真分析。结果表明,系统能够根据给定信号完成相应的动作,储能元件能够平稳地实现能量的回收与释放。所提方案较原纯电驱液压挖掘机系统可实现29%的节能,能量回收率和再利用率分别可达75.1%和78.1%,具有较好的节能效果。

参考文献:

[1] 吴文海. 并联式混合动力液压挖掘机能量回收与动力匹配技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
WU Wenhai. Study on Energy-saving and Power Matching of Parallel-hybrid Hydraulic Excavator [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[2] 关澈,程珩,权龙,等. 纯电驱液压挖掘机电气式动臂势能回收再利用系统研究[J]. 液压与气动,2020,(1):21-26.
GUAN Che, CHENG Hang, QUAN Long, et al. Electric Energy Recycling System of Electric Drive Hydraulic Excavator Boom [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,

- 2020,(1):21-26.
- [3] 刘学成. 纯电驱液压挖掘机储能系统及控制策略研究[D]. 太原:太原理工大学,2019.
LIU Xuecheng. Research on Energy Storage System and Control Strategy of Pure Electric Drive Hydraulic Excavator [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [4] 吴文海,姚明星,孙磊,等. 基于电液协调式挖掘机复合动作能量回收研究[J]. 液压与气动,2017,(9):98-104.
WU Wenhai, YAO Mingxing, SUN Lei, et al. Electro-hydraulic Coordinated Energy Recovery Reach of Compound Action Excavator [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017,(9):98-104.
- [5] 姚明星,吴文海,秦剑,等. 蓄能器对挖掘机回转系统能量回收效率的影响[J]. 液压与气动,2016,(6):50-56.
YAO Mingxing, WU Wenhai, QIN Jian, et al. Influence of Accumulator on Energy Recovery Efficiency of Excavator Slewing System [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016,(6):50-56.
- [6] 付春雨,邹广德. 液压挖掘机工作机构的动臂势能回收[J]. 济南大学学报:自然科学版,2018,32(4):297-304.
FU Chunyu, ZOU Guangde. Boom Potential Energy Recovery of Hydraulic Excavator Working Mechanism [J]. Journal of University of Jinan: Science and Technology, 2018,32(4):297-304.
- [7] LIN Tianliang, WANG Lang, HUANG Weiping, et al. Performance Analysis of an Automatic Idle Speed Control System with a Hydraulic Accumulator for Pure Electric Construction Machinery [J]. Automation in Construction, 2017,(84):184-194.
- [8] 林添良,叶月影,付胜杰,等. 基于电气式能量回收的液压挖掘机转台节能驱动系统[J]. 中国公路学报,2014,27(8):120-126.
LIN Tianliang, YE Yueying, FU Shengjie, et al. Energy-saving System of Swing for Hydraulic Excavators Based on Electric Energy Recovery Technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014,27(8):120-126.
- [9] HYEON-SEOP Y, SUKWON C. Optimal Energy Management of the Electric Excavator Using Super Capacitor [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2019 (prepublish).
- [10] LONG Bo, RYU J, LIM S, et al. Design and Control of a Multi-functional Energy Recovery Power Accumulator Battery Pack Testing System for Electric Vehicles [J]. Energies, 2014,7(3):1376-1392.
- [11] 陈正雄. 大惯量回转机构制动能量电液回收利用系统研究[D]. 太原:太原理工大学,2019.
CHEN Zhengxiong. Research of Electro-hydraulic Recovery and Utilization System for Braking Energy of Large-inertia Rotary Mechanism [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [12] 钟立群. 混合动力挖掘机回转驱动系统协调控制策略的研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.
ZHONG Liqun. A Coordinated Control Strategy for Slewing Drive System in Hybrid Excavator [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [13] 姚明星,吴文海,秦剑,等. 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[J]. 机床与液压,2018,46(10):54-59.
YAO Mingxing, WU Wenhai, QIN Jian, et al. Study on Energy Recovery System for Electro-hydraulic Coordinated Hydraulic Excavator Compound Action [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018,46(10):54-59.
- [14] 沈建新,缪冬敏. 变速永磁同步发电机系统及控制策略[J]. 电工技术学报,2013,28(3):1-8.
SHEN Jianxin, Miao Dongmin. Variable Speed Permanent Magnet Synchronous Generator Systems and Control Strategies [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013,28(3):1-8.
- [15] 郭浩,王辉,吴轩,等. 混合动力挖掘机机电回转系统储能容量的优化配置[J]. 中国机械工程,2016,27(12):1572-1578.
GUO Hao, WANG Hui, WU Xuan, et al. Optimal Configuration of the Storage Capacity in Hybrid Excavator Motoring System [J]. China Mechanical Engineering, 2016,27(12):1572-1578.
- [16] 刘刚,宋德朝,陈海明,等. 并联混合动力挖掘机系统建模及控制策略仿真[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(7):1079-1084.
LIU Gang, SONG Dechao, CHEN Haiming, et al. Modeling and Control Strategy of Parallel Hybrid System in Hydraulic Excavator [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010,38(7):1079-1084.

引用本文:

李洁,程珩,权龙,等. 纯电驱液压挖掘机复合动作电液能量回收再利用系统研究[J]. 液压与气动,2020,(12):44-50.

LI Jie, CHENG Hang, QUAN Long, et al. Research on the Electro-hydraulic Energy Recovery and Reuse System in Compound Operation of Pure Electro-hydraulic Excavator [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020,(12):44-50.