

并联混合动力挖掘机系统建模及控制策略仿真

刘刚¹, 宋德朝², 陈海明², 陈明¹

(1. 同济大学 中德工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学 机械工程学院, 上海 201804)

摘要: 分析了以超级电容和 ISG (integrated starter generator) 电机组成辅助动力源、电机驱动回转为特征的并联混合动力挖掘机系统; 提出了发动机双模式转矩均衡控制策略, 以负载工况与超级电容 SOC (state of charge, 荷电状态) 为决策依据, 实现发动机工作点的自适应调节. 在特定工作点下, 以转矩均衡控制策略替代传统的转速感应控制, 系统转速更加稳定. ISG 电机可以均衡发动机转矩, 使其工作于高效率区. 另外, 利用回转驱动电机实现回转势能的再生利用. 建立并联混合动力挖掘机系统的 Simulink 仿真模型. 结果表明, 该控制策略适用于挖掘机并联混合动力系统, 具有显著的节能性.

关键词: 混合动力; 液压挖掘机; 控制策略; 超级电容; 能量再生

中图分类号: U 415.51

文献标识码: A

Modeling and Control Strategy of Parallel Hybrid System in Hydraulic Excavator

LIU Gang¹, SONG Dechao², CHEN Haiming², CHEN Ming¹

(1. Sino-German College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: An analysis was made for a parallel hybrid excavator system with ultra capacitor and ISG (Integrated Starter Generator) as auxiliary electrical power source and characterized by motor-driven slewing mechanism. A dual-mode engine torque balancing control strategy was proposed, and the load condition and the SOC (state of charge) of ultra capacitor were employed as decision-making basis to adapt the engine operating point. At a specific point, the torque balancing control strategy was adopted instead of the traditional speed sensing control, thus the system could be more stable. ISG motor can balance the engine torque to make it work in high efficiency area. In addition, the slewing

mechanism-driven motor can recycle Potential energy. A simulink simulation model of the parallel hybrid excavator system was set up. Results show that the control strategy is suitable for parallel hybrid power system excavator with significant energy saving.

Key words: hybrid; hydraulic excavator; control strategy; ultra capacitor; energy regeneration

传统的液压挖掘机, 以发动机为动力源, 通过液压泵将机械能转化为液压能驱动执行机构. 为了满足重载工况, 依据最大需求功率配置发动机, 因此, 发动机输出功率不能有效利用. 另外, 在功率匹配方面, “发动机-泵”环节通常设定发动机为多档功率模式, 采用转速感应控制, 实现发动机与泵的局部功率匹配, 控制量为液压泵的排量; “泵-负载”环节常采用负载传感控制或负流量控制实现局部功率匹配, 控制量也是液压泵的排量. 因此, 现有液压挖掘机两个环节的局部功率匹配是不协调的, 不可能实现全局功率匹配^[1].

近年来, 为了消除上述缺陷, 混合动力系统开始受到工程机械领域的重视, 成为节能和环保研究的一个热点. 2004年5月, 日本小松研制出了世界上第一台混合动力液压挖掘机的试验机型, 日立建机、神户制钢等也纷纷开展了混合动力系统的应用研究^[2].

笔者分析了一种并联混合动力液压挖掘机系统, 充分利用超级电容功率密度大、循环寿命长、充放电速度快的特点, 并根据液压挖掘机的负载工况及超级电容“荷电状态”(state of charge, SOC)的变动情况, 制定以提高发动机燃油经济性为总目标的控制策略. 通过 ISG (integrated starter generator) 电

收稿日期: 2009-04-10

基金项目: 江苏省科技成果转化专项基金资助项目(BA2009115)

作者简介: 刘刚(1979—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为工程机械及其关键技术、汽车回收利用. E-mail: liugang791001@126.com
宋德朝(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为工程机械及其关键技术. E-mail: songdechao@tongji.edu.cn

机的“削峰填谷”作用,主动均衡发动机负载,摆脱了“发动机—泵”环节功率匹配时对液压泵排量调节的依赖,进而,在混合动力系统中实现全局功率匹配.另外,以 ISG 电机驱动回转替代液压马达,对回转制动能量进行回收^[3].

1 并联混合动力挖掘机的系统结构

完整的并联混合动力系统包括混合动力源、能量回收两类子系统.

并联式混合动力液压挖掘机的混合动力源结构如图 1 所示.它采用了发动机与电机并联驱动液压泵的结构形式,ISG 电机与发动机共同输出能量,或将多余的能量转化为电能存储在超级电容中.ISG 电机可工作于电动或发电状态来平衡发动机的扭矩盈亏,使发动机工作在合理的扭矩工作点^[4].与串联混合动力结构相比,发动机的机械能直接输出给液压泵,减少了能量转换环节,并且,发动机和电机的装机功率低,可以获得更好的节能效果.

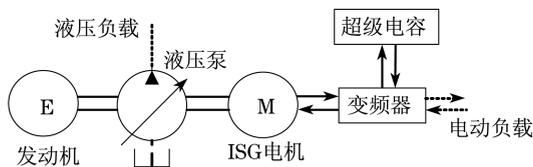


图 1 并联式混合动力挖掘机的混合动力源结构
Fig.1 Power source configuration of parallel hybrid excavator

关于能量回收子系统的方案,文献^[5]提出了液压马达能量回收的方式,在液压系统的回油管路上增加变量泵与发电机回收能量.考虑到系统成本、空

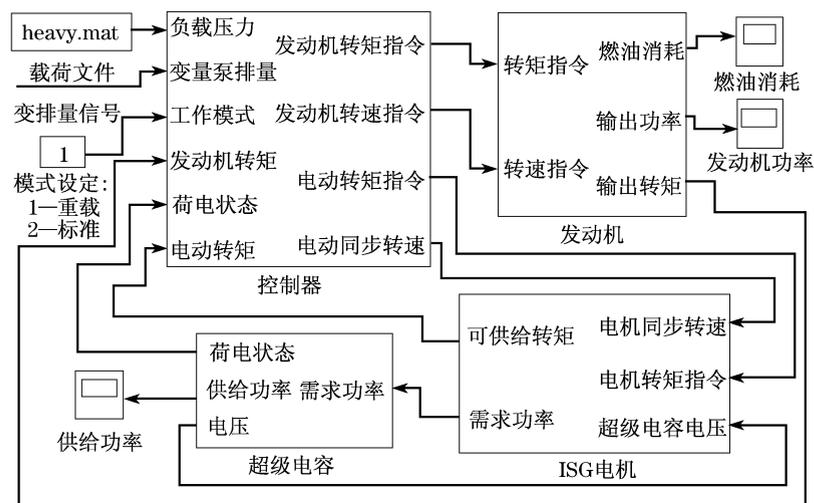


图 3 并联式混合动力液压挖掘机动力系统模型
Fig.3 Power system model of hybrid excavator

间布置等因素,这里仅考虑采用发电(电动)机驱动回转的方案.

传统液压挖掘机回转机构由液压马达驱动,回转时间约占整个挖掘机工作循环时间的 50%~70%,能量消耗占 25%~40%,发热量约占系统总发热量的 35%~40%^[6].引入混合动力技术后,以发电(电动)机替代液压马达,通过减速机构直接驱动转台回转,实现挖掘机回转制动能量再生.图 2 为混合动力挖掘机电机驱动回转系统结构示意图,由回转台、变速器、ISG 电机、超级电容四部分组成.



图 2 混合动力挖掘机回转系统
Fig.2 Hybrid excavator slewing system

2 并联混合动力系统建模

以某小型挖掘机为例.该挖掘机采用反铲工作装置,标准斗容量为 0.5 m³,整机质量为 12 t.在建立该挖掘机 Simulink 仿真模型的过程中,借鉴了汽车混合动力仿真软件 Advisor 中相应的柴油发动机、电机和超级电容的模块,并对其中的部分参数进行必要修正^[7].

根据图 1 所示动力系统的结构,考察仅有液压负载(挖掘、平地)时的情形,建立并联式混合动力液压挖掘机模型框图(图 3).控制器根据操作信号和检测信号,按照控制策略分配发动机、电机的转矩,以共同驱动液压系统工作,实现动力输出的功率匹配.

在根据图2所示的回转系统建模时,仅需在图3的模型上简化,保留超级电容、ISG电机的模块,以挖掘机转台的角速度和转矩为输入,经过减速器的比例调整,获得电机的同步转速和转矩指令.此处略去回转系统的模型.

将对应于发动机的转速、转矩关系的调速特性曲线转换为数值模型^[8].在仿真时,应用插值原理获取理论的转矩、转速值.类似地,建立发动机万有特性以及ISG电机的效率曲线的数值模型.

超级电容模型^[9]采用经典的RC模型,由于其存电量与电压呈线性关系,设超级电容的端电压在开路时为 V_{oc} ,充满电时为 V_{max} ,放完电时为 V_{min} ,超级电容SOC值的计算式为

$$C = (V_{oc} - V_{min}) / (V_{max} - V_{min}) \quad (1)$$

发动机实际输出功率 P_e 为液压泵吸收功率 P_p 与超级电容输出功率 P_c 之差,即

$$P_e = P_p - P_c \quad (2)$$

根据约定,超级电容输出功率为“正”时处于放电状态,输出功率为“负”时处于充电状态.

3 动力系统控制策略仿真研究

3.1 工况分析

3.1.1 液压泵出口压力

液压挖掘机在工作过程中,液压系统的压力呈现强烈的周期性振荡特点,并且在轻载状态下,液压泵出口压力峰值普遍较低,而重载时泵输出压力峰值普遍较高.这就为工况的自动识别提供了依据.

由于挖掘机工作时的负载压力基本上都是突变的,因此,泵出口压力不能直接用于工况估计^[10].在混合动力液压挖掘机控制方法研究中,采用模拟电路中比较常用的RC滤波器,将其数字化后用于泵输出压力的处理,其输出值作为工况判断的依据.描述RC低通滤波器的微分方程式为:

$$RC \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t) \quad (3)$$

式中: $y(t)$ 为滤波器输出; $x(t)$ 为滤波器输入; R, C 分别为滤波器中的电阻值、电容值.将式(3)离散化后,可得到其差分方程表达式

$$y(n+1) = (1 - 1/RC)y(n) + x(n)/RC \quad (4)$$

由于挖掘机通常采用双泵形式,每一只泵都能100%地吸收发动机功率,因此,在处理泵输出压力时取2个泵压力值中较大的1个.如下式所示:

$$x(n) = \max[p_1(n), p_2(n)] \quad (5)$$

式中: $x(n)$ 为滤波器输入; $p_1(n), p_2(n)$ 分别为泵1、泵2的输出压力.

图4为经过RC滤波后得到的液压泵输出压力的记录,取 $1/RC = 0.005$.从图中可以看出,不同的工况,泵出口压力的滤波值存在较大的差异.利用这种差别,可以识别挖掘机工况.

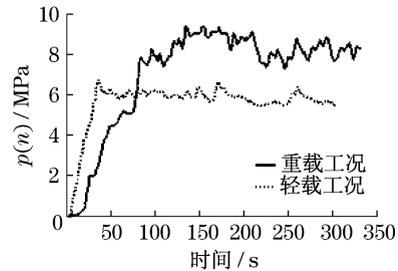


图4 在不同负载工况下液压泵出口压力滤波结果
Fig.4 Filter result of pump pressure in different load conditions

3.1.2 液压泵排量

液压挖掘机一般采用斜盘式轴向柱塞变量泵,通过对斜盘倾角的控制,排量可实现无级调节.泵排量信号具有随机性、周期性,因此,通过Simulink输入信号模块“repeating sequence”(重复序列)、“sine wave”(正弦波)组合成该信号,研究不失一般性.变量泵排量变化范围 $15 \sim 30 \text{ mL} \cdot \text{r}^{-1}$,如图5.

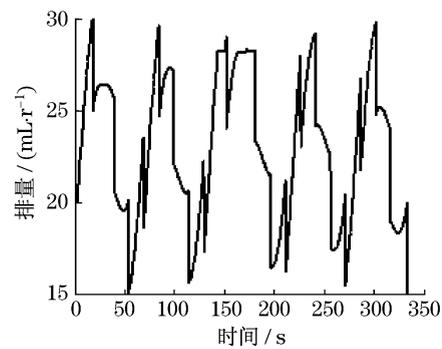


图5 变量泵排量信号
Fig.5 Displacement signal of variable pump

3.2 控制策略

根据3.1所述液压挖掘机工况的特点,建议一种双模式转矩均衡控制策略.将负载工况识别和SOC限值方法整合在一起,共同决策工作点的设定与切换,其中,超级电容SOC限值控制具有优先权.负载工况识别对工作点切换的目的,是使发动机输出负载所需的平均功率;而SOC限值调节的目的,是保持超级电容的荷电状态,确保“削峰填谷”功能的

实施.在总体上,既降低发动机的储备功率,又能控制发动机工作于高效区.

3.2.1 工况识别

热机状态下,操作工作装置开始动作,液压泵出口的负载压力逐渐上升(如图5),并达到正常波动范围,同时,检测变量泵的排量、系统转速,进而计算出液压泵的吸收转矩、吸收功率.

在识别工况时,依据的是液压泵吸收功率,其计算式为

$$P_p = pQ = pqn_e/60 \quad (6)$$

式中, P_p 为液压泵吸收功率,kW; p 为液压泵的出口压力,MPa; q 为泵的排量, $\text{mL} \cdot \text{r}^{-1}$; n_e 为发动机转速, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$.

在进行转矩均衡控制时,需要获取液压泵吸收转矩的信号,由式(6)可以得到液压泵的吸收转矩

$$T_p = pq \quad (7)$$

3.2.2 发动机工作点确定

将发动机设为重载、标准双工作模式,使挖掘机操作人员更加容易选择.在每个模式下,预设了2个高效工作点(共4个),分别对应该模式下的功率上、下限.设定的工作点位于各油门开度下的最佳燃油效率区域内.综合发动机各预设工作点的功率,以及辅助电机储备功率,设定负载需求功率的阈值,据

此切换工作点.特别地,在作业过程中,当所选定的工作模式不能适应负载需求时,控制系统可自动完成模式切换.

对于超级电容,必须设定其SOC值 C 的高、低极限,分别为0.9和0.6,以防止过充、过放电对电容寿命的影响.在靠近SOC极限值的点分别设定 C 值控制门槛,分别为0.8和0.7.如果达到门槛值,则发动机工作点切换,分别对应油门开度0.6和1.0,起到提前调整、稳定SOC的作用;只有当SOC值处于控制门槛设定的范围内时,才由负载需求功率的门槛值决定工作点切换.因此,SOC对于工作点调节具有优先权.

3.2.3 发动机转矩均衡控制

在工作点确定后,传统的定工作点控制方式是转速感应控制.本研究采用转矩均衡控制策略,如图6.以发动机转矩偏差对电机磁场同步转速指令进行PI(比例积分)调节,使电机的输出转矩适应负载转矩的振荡,达到“削峰填谷”的效果.转矩均衡控制的过程类似于传统的转速感应控制,但是,与转速感应控制相比,转矩均衡控制策略获得的系统转速更加平稳,这样可以减小由于ISG电机转子的转速变化引起的附加惯性转矩,有利于ISG电机的调节,提高了系统的动态稳定性.

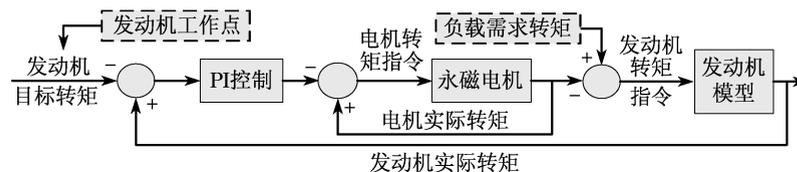


图6 发动机转矩均衡控制框图

Fig.6 Block diagram of engine torque balancing control

3.3 动力系统仿真

在挖掘与场地平整两种工况下,分别选择重载模式与标准模式进行仿真.给定超级电容模组的电压195 V, C 的初值为0.7.ISG电机选用永磁同步电机,额定功率15 kW,峰值功率可以达到45 kW,最小电压150 V.

将有,无混合动力的系统燃油消耗进行仿真对比.并联混合动力系统中的柴油机各工况参数性能见表1.考虑到可比性,在无混合动力的系统中也应用该柴油机,但是,由于该系统没有辅助电机供给储备功率,因此,将重载模式对应的油门开度提升为0.9和1.0.

表1 柴油机各工况参数性能表(混合动力)

Tab.1 Performance parameters of diesel engine (hybrid)

工况	油门开度	功率/kW	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	转矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)
怠速	0.45	13.5	1 000	—
标准模式	0.60	22.5	1 320	163
	0.70	27.0	1 540	167
重载模式	0.80	31.5	1 760	170
	0.90	38.3	1 980	185
全功率	1.00	45.0	2 200	195

图7a,b分别为重载和标准工作模式下的转矩均衡控制特性曲线.从图中可以看到,ISG电机实时地跟随液压泵吸收转矩的波动,起到了良好的转矩均衡作用.发动机输出转矩的波动幅度很小,有利于发动机稳定工作在高效率区内.

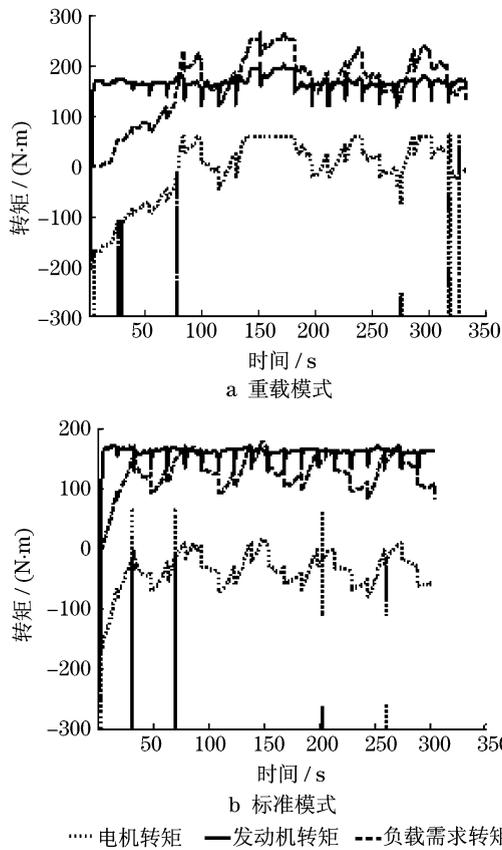


图 7 转矩均衡控制曲线
Fig.7 Torque balancing control curve

图 8 为并联混合动力液压挖掘机系统在重载、标准两种模式下的超级电容的 SOC 值变化曲线. 在重载模式下, 超级电容的充放电过程比较快, 达到门槛值 0.8 时, 发动机工作点向设定的低档位切换. 这一动作可以从图 9 的系统转速曲线看出, 当发动机在低档位工作一段时间后, 超级电容的 SOC 值开始缓慢下降. 在标准模式下, 发动机工作点没有变动, SOC 值则缓慢增加. 这是因为仿真中所输入的负载需求功率较低, 如果遇到负载突然增加的情况, 那么, 控制策略将使发动机工作点相应调整, 并且可以直接转换到重载模式.

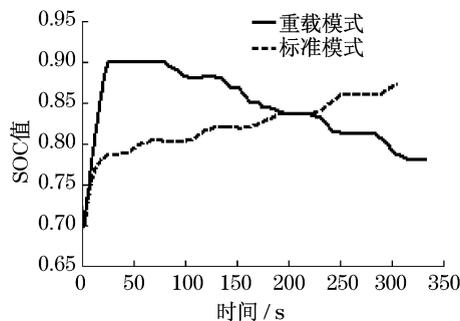


图 8 超级电容 SOC 值的变化曲线
Fig.8 SOC of ultra capacitor

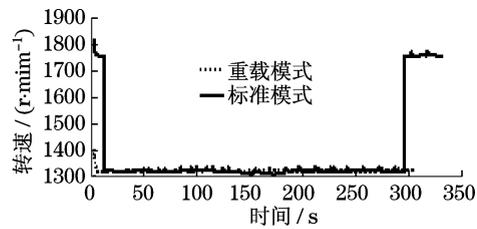


图 9 并联混合动力挖掘机系统转速调节
Fig.9 Speed regulation of hybrid excavator

图 10a, b 分别为重载模式和标准模式下的油耗对比. 仿真 300 s 的结果显示, 在重载模式下, 有、无混合动力的系统油耗分别为 404.4 g 和 592.5 g; 在标准模式下, 有、无混合动力系统油耗分别为 371.8 g 和 384.4 g. 可见, 重载模式下, 并联混合动力系统省油更明显. 当然, 考虑在图 9 中的标准模式下超级电容的 SOC 值一直增加, 显然, 有一部分系统能量储存在超级电容内, 因此, 该模式下的节能性也很可观.

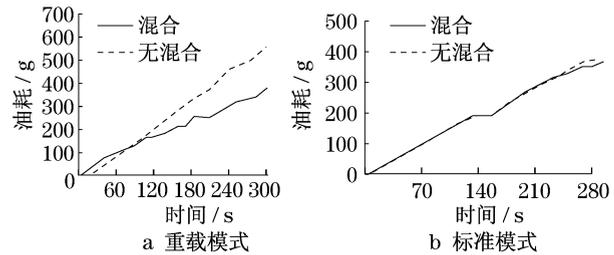


图 10 油耗对比
Fig.10 Fuel consumption comparison

4 电机驱动回转能量回收仿真

在不考虑坡度及风力影响时, 启动阶段的回转阻力矩仅由惯性阻力矩和摩擦阻力矩组成. 由于摩擦阻力矩很小, 一般不超过启动力矩的 5%, 可忽略其影响, 并假定转台在整个启动过程中启动力不变. 根据文献[11]提供的经验公式, 计算出某型 12 t 挖掘机的回转机构仿真主要参数, 见表 2.

表 2 回转机构主要参数

Tab.2 Main parameters of slewing mechanism

工况	启动角加速度/ (rad · s ⁻²)	制动角减速度/ (rad · s ⁻²)	最佳转速/ (r · min ⁻¹)	转动惯量/ (kg · m ⁻²)
满斗	0.36	0.54	7.90	8 617.74
空斗	0.64	0.96	10.53	4 847.48

假设挖掘机回转机构回转角为 90°, 回转机构只有启动加速及制动减速阶段. 对挖掘机回转的一个工作循环过程进行仿真, 即满斗加速→满斗制动→

空斗返回加速→空斗制动。

图11所示为回转机构在回转制动过程中的做功情况比较。相比无再生制动时,回转机构制动再生系统可以节省的能量达到45%左右,可以大大减少挖掘机在回转过程中所消耗的能量,减少温室气体的排放。因此,具有良好的使用经济性与社会效益。

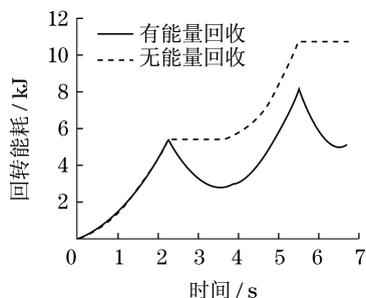


图11 回转过程能耗比较

Fig. 11 Comparison of rotation energy consumption

5 结论

本文分析了一种并联式混合动力液压挖掘机系统,针对液压挖掘机工况的周期性强、波动大等特点,提出了双模式转矩均衡策略。根据负载功率需求和超级电容荷电状态,共同决策多工作点的切换。该系统通过发电(电动)机的转矩均衡作用,使发动机稳定工作于效率较高的状态。仿真结果表明,本控制策略在挖掘与平地两种典型工况下,都能很好地提高发动机的燃油经济性;尤其重载挖掘工况,节能效果更明显。超级电容荷电值的波动在设定的范围内,有利于动力系统的稳定工作。

在并联混合动力挖掘机系统中,建立电机驱动回转仿真模型,在一个回转周期内,考察回转制动再生系统的节能效果。仿真结果表明,与普通回转机构相比,具有再生制动系统的并联混合动力挖掘机,在回转过程中可以节能45%。这对提高挖掘机的使用经济性具有重大意义。

参考文献:

[1] 彭天好,杨华勇,傅新. 液压挖掘机全局功率匹配与协调控制[J]. 机械工程学报,2001,37(11):50.
PENG Tianhao, YANG Huayong, FU Xin. Hydraulic excavator overall power match harmony control[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(11): 50.

[2] 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]. 杭州:浙江大学机械工程学系,2006.

ZHANG Yanting. Research on energy-saving of hydraulic excavator based on hybrid and energy recovery[D]. Hangzhou: Zhejiang University. Department of Mechanical Engineering, 2006.

- [3] 王庆丰,张彦廷,肖清. 混合动力工程机械节能效果评价及液压系统节能的仿真研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12):135.
WANG Qingfeng, ZHANG Yanting, XIAO Qing. Evaluation for energy saving effect and simulation research on energy saving of hydraulic system in hybrid construction machinery [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 135.
- [4] 刘钊,张超. 新型油电混合动力传动装置运行模式应用分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2008,36(9):1250.
LIU Zhao, ZHANG Chao. Application analysis of run mode of a new type of oil-electric hybrid power transmission unit [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(9):1250.
- [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.
ZHANG Yanting, WANG Qingfeng, XIAO Qing. Simulation and experimental research on energy regeneration with hydraulic motor for hybrid drive excavator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 218.
- [6] 李建启,张传福,汪铁荪. 液压挖掘机回转节能装置[J]. 工程机械,1991(2):8.
LI Jianqi, ZHANG Chuanfu, WANG Tiesun. Hydraulic excavator energy-saving slewing device [J]. Construction Machinery, 1991(2): 8.
- [7] 费望龙. 混合动力液压挖掘机控制策略设计与参数优化研究[D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2008.
FEI Wanglong. Research on control strategy design and parameter optimization of hybrid excavator [D]. Changsha: College of Mechanical and Electrical Engineering of CSU, 2008.
- [8] 肖清,王庆丰,张彦廷,等. 液压挖掘机混合动力系统建模及控制策略研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2007,41(3):480.
XIAO Qing, WANG Qingfeng, ZHANG Yanting, et al. Study on modeling and control strategy of hybrid system in hydraulic excavator [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(3): 480.
- [9] 肖清,王庆丰,张彦廷. 液压挖掘机电容蓄能式并联混合动力系统结构及控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(5):625.
XIAO Qing, WANG Qingfeng, ZHANG Yanting. Research on structure and control strategy of parallel hybrid system applied to hydraulic excavator using capacitor as accumulator [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(5): 625.
- [10] 高峰,高宇,冯培恩. 挖掘机载荷自适应节能控制策略[J]. 同济大学学报:自然科学版,2001,29(9):1036.
GAO Feng, GAO Yu, FENG Peien. Method of load matching control of hydraulic excavator's energy saving [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29(9): 1036.
- [11] 曹善华. 单斗液压挖掘机[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,1986.
CAO Shanhua. Single bucket hydraulic excavator [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Industry Press, 1986.