

## 基于自动变速的混合动力装载机控制策略

张志文, 赵丁选, 李天宇, 张 民

(吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

**摘 要:** 为了提高装载机能源的利用率与变矩传动效率,通过分析某5 t装载机的工况特点,提出了基于自动变速的并联式混合动力方案;采用模糊逻辑控制策略,通过在线估计系统需求转矩与车速,以需求转矩、超级电容 SOC 值、车速、油门开度及液力变矩器效率作为输入,输出发动机与电动机的工作点及系统挡位。结果表明:发动机效率提高,超级电容 SOC 值稳定,挡位变化合理有效,混合动力比传统装载机节油约 9.56%,混合动力自动变速比传统装载机节油约 11.82%,改善了燃油经济性。

**关 键 词:** 装载机;自动变速;混合动力;模糊逻辑;燃油经济性

中图分类号: TH 243

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)04-0532-05

## Control Strategy Based on Automatic Transmission for Hybrid Loader

ZHANG Zhi-wen, ZHAO Ding-xuan, LI Tian-yu, ZHANG Min

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China. Corresponding author: ZHANG Zhi-wen, E-mail: zhzhw666@163.com)

**Abstract:** According to the analysis on the working condition characteristics of a 5 tons loader, a parallel hybrid solution based on automatic transmission was proposed for improvement of energy efficiency and torque transmission. The torque and speed online was estimated by fuzzy logic control strategy. We set torque requirement, SOC value of the super capacitor, vehicle speed, accelerator-pedal position and efficiency of hydraulic torque converter as inputs, and the operating point of the engine and the motor and gear of the system as outputs. The results showed that the engine efficiency is improved, the SOC value of the super capacitor is stable, and the gear change is rational and efficient. The hybrid loader saves about 9.56% fuel than that of the conventional one. Meanwhile, the hybrid loader of automatic transmission saves about 11.82% fuel than that of the conventional one, therefore this strategy can improve the fuel economy.

**Key words:** loader; automatic transmission; hybrid; fuzzy logic; fuel economy

装载机是现代化建设的重要工程装备。作业循环中频繁启停使驾驶员不断大幅度地加、减油门,频繁加减挡位。联合工况作业时对峰值功率需求很大,在选择发动机功率时不可避免地存在“大马拉小车”的情况<sup>[1]</sup>,在重载工况中,液力变矩器的效率很低,因此传统装载机能耗高、排放差、发动机寿命短、能量利用率低,对驾驶员要求高<sup>[2-3]</sup>。

在节能、低碳、环保的倡导下,国内外不断涌

现出装载机的新成果和新产品。2008年沃尔沃展出同轴并联混合动力装载机 L220F Hybrid;2010年卡特彼勒、采埃孚和力士乐分别展出了无液力变矩器的无级变速传动结构方案;约翰·迪尔开始销售两款基于电力传动技术的串联式油-电混合动力装载机;小松 WA600-6 轮式装载机实现装载机的自动变速<sup>[4]</sup>。国内混合动力装载机的研究处于起步阶段,2010年在 Bauman China 柳工展出了国内首台混合动力 CLG862-HYBRID 型装

收稿日期: 2013-12-25

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120061110023); 国家高技术研究发展计划项目(2009AA044403); 吉林大学“985工程”资助项目。

作者简介: 张志文(1984-),男,山西山阴人,吉林大学博士研究生;赵丁选(1965-),男,河南濮阳人,吉林大学教授,博士生导师。

装载机,徐工展出了液压混合动力 ZL50GS 型装载机<sup>[3]</sup>. 可以发现:装载机节能减排的研究除了通过混合动力方案提高发动机能源利用率外,还应该提高装载机变矩传动效率. 本文以某 5t 装载机为原型,提出并联式混合动力方案来提高能源利用率,采用自动变速原理提高系统传动效率,降低了驾驶员的劳动强度<sup>[1,4]</sup>.

通过分析装载机的工况特点,在满足正常工作的基础上制定合理的控制策略,提出了模糊逻辑控制策略,研究装载机的混合动力技术与自动变速技术. 通过 Matlab/Simulink 软件对系统节能效果和性能进行仿真研究.

## 1 并联式油-电混合动力装载机

### 1.1 系统结构

选用永磁同步电机作为电动/发电机,超级电容作为储能元件,图1为系统结构. 整车系统的能量一部分通过液力变矩器、变速箱及驱动桥驱动车辆行驶,另一部分传递给液压系统驱动工作装置作业和控制车辆转向等<sup>[3,5]</sup>.

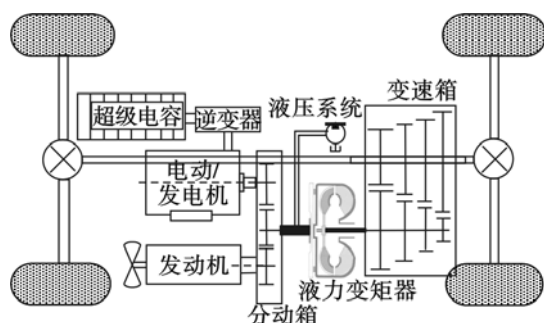


图1 并联混合动力装载机结构

Fig. 1 Parallel hybrid power loader structure

### 1.2 装载机工况分析

以某 5t 装载机(发动机额定功率 160 kW)为原型. 图2为在典型工况下,系统3个工作周期实际需求功率载荷谱曲线,图3是液力变矩器效率曲线.

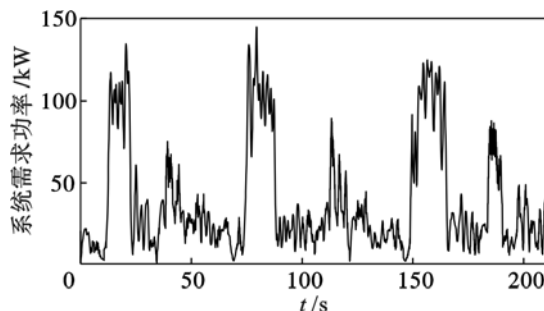


图2 系统需求功率曲线

Fig. 2 System demanded power curve

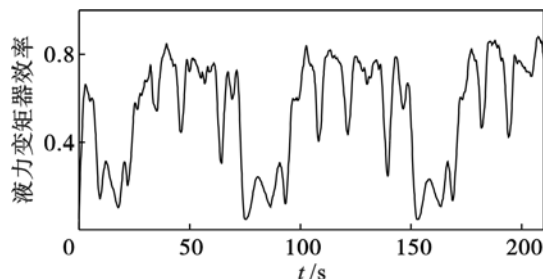


图3 液力变矩器效率曲线

Fig. 3 Fluid torque converter's efficiency curve

通过载荷谱分析可知:装载机工作具有较强的周期性和波动性. 采用混合动力技术,加入电动/发电机平衡能量,在轻载工作时,将发动机多余的能量回收,在重载工作时,将回收能量释放,降低了发动机的波动性同时提高了能源利用率. 工作过程中液力变矩器效率变化频繁,因此通过自动变速原理切换挡位能够有效提高液力变矩器的效率,提高整车系统效率和燃油经济性,达到节能减排的目的.

## 2 系统建模

混合动力装载机主要对发动机、电动机、液压系统、变矩器和超级电容等进行建模. 为提高模型精度,采用理论公式和经验公式相结合的方式建模,通过数学模型描述系统各元件性能参数特性<sup>[6-7]</sup>.

### 2.1 发动机模型

发动机模型分为动态模型和均值模型,本文主要研究发动机工作点的变化及燃油效率变化,结合原车装配,研究发动机的调速方程,根据输出转矩与转速查询燃油效率表求得当前油耗率<sup>[3,7]</sup>.

$$T_e = -2.6769n_e + 6585.2\alpha.$$

式中:  $T_e$  为发动机输出转矩;  $n_e$  为发动机输出转速,  $n_e = \alpha(n_h - n_l) + n_l$ ,  $n_h$  为发动机最高调速转速,  $n_l$  为发动机的怠速转速,  $\alpha$  为油门开度<sup>[3]</sup>.

### 2.2 发电机/电动机模型

永磁同步电机由电磁转矩方程建模很复杂,本文只建立电机力矩平衡方程:

$$T_m - T_l = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m.$$

式中:  $T_m$  与  $T_l$  分别为电磁转矩和负载转矩;  $J$  为转子负载惯量;  $\omega_m$  为电机机械角速度;  $B$  为黏滞摩擦系数.

### 2.3 液压系统模型

液压系统包括工作泵、转向泵和变速泵,采用反

向推导仿真研究,将液压泵载荷谱数据折算成液压系统载荷.将液压泵出口压力折算为驱动转矩<sup>[3]</sup>:

$$T_b = \frac{pq}{2\pi\eta_m} i_p.$$

式中:  $T_b$ ,  $p$ ,  $q$ ,  $\eta_m$ ,  $i_p$  分别为液压泵的转矩、压力、排量、机械效率及转速比.

## 2.4 液力变矩器模型

用液力变矩器的无因次特性描述其原始特性:

$$\lambda_b = f_1(i),$$

$$K = f_2(i),$$

$$\eta = f_3(i).$$

式中:  $\lambda_b$  为液力变矩器泵轮转矩系数;  $K$  为变矩系数;  $\eta$  为效率;  $i$  为转速比.

## 2.5 超级电容模型

超级电容荷电状态 SOC 值定义如下:

$$SOC = \frac{U - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}}.$$

式中:  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  为超级电容工作电压极值;  $U$  为当前电压. 超级电容 SOC 值反映了在允许的工作电压范围内超级电容储存电量的程度<sup>[7-8]</sup>.

# 3 混合动力与自动换挡联合控制策略

## 3.1 自动变速换挡规律

液力变矩器的效率决定传动系统效率的大小. 以液力变矩器的效率最优为控制目标, 寻找最优换挡点. 图 4 为某一作业载荷系数下不同油门开度时相邻 3 个挡位(1 挡、2 挡和 3 挡)液力变矩器的效率曲线. 由图可见: 在定油门开度下, 交点为换挡点, 如点 A 的左侧系统以 2 挡工作, 点 A 右侧系统以 3 挡工作, 点 A 为最佳换挡点; 通过换挡工作点发现, 同挡位时, 随着油门开度的增大, 换挡点所对应的车速变大<sup>[3]</sup>.

## 3.2 模糊逻辑控制策略

控制策略是能量管理与分配的核心, 本文的控制策略目标是: 满足正常工作的前提下, 使动力源与负载更好地匹配, 保证系统元件高效工作, 提高整机效率和燃油经济性. 工作过程中由于负载频繁变化, 需要驾驶员频繁踩踏油门与加减挡, 系统产生很大冲击与振动, 发动机工作点时刻发生变化, 因此无法准确地通过推导计算出系统的工作状态. 模糊逻辑控制策略是基于规则的即时控制, 不需要精确的数学模型, 具有很强的鲁棒性, 能够解决非线性复杂问题, 适用于混合动力装载机<sup>[6-9]</sup>.

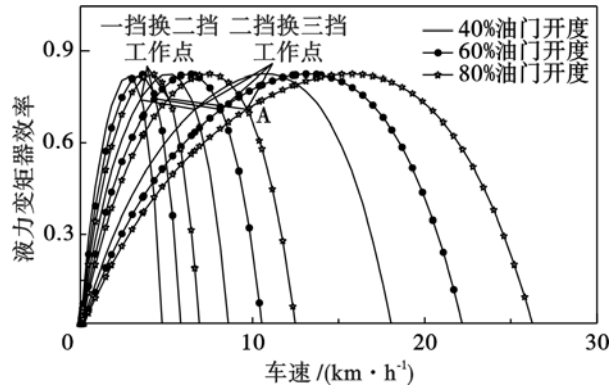


图 4 最优换挡点曲线

Fig. 4 Optimal shifting point curves

## 3.3 混合动力与自动换挡联合控制

装载机由驾驶员控制油门与挡位, 发动机工作点与换挡点与驾驶员熟练水平有关. 采用模糊逻辑控制, 实现车辆自动控制且提高系统传动效率.

混合动力系统根据负载、超级电容 SOC、液力变矩器效率和发动机工作点等信息决定系统的工作模式. 图 5 为系统控制流程图. 通过准确地感知系统需求转矩, 将需求转矩  $T_{rq}$  与 SOC 作为模糊逻辑控制器的输入变量, 运用模糊逻辑控制进行优化得到发动机的最优工作点与电机的工作点, 将液力变矩器效率、发动机油门开度与车速作为输入, 输出控制挡位.

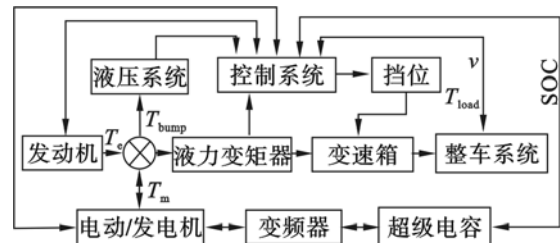


图 5 混合动力系统控制流程图

Fig. 5 Control flow chart of hybrid power system

需求转矩  $T_{rq}$  还需要根据发动机当前油门开度下最优转矩  $T_{opt}$  和最大转矩  $T_{\max}$  作分段处理. 经过模糊逻辑控制器后输出参数为一系数  $K$ , 将其分段清晰后得到发动机输出转矩  $T_e$ . 与电机的输出转矩  $T_m$ ; 将车速  $v$ 、变矩器效率  $\eta$  及油门开度  $\alpha$  做分段处理, 作为模糊逻辑输入, 寻找最佳换挡速度与换挡效率点, 最终输出挡位. 输入  $T_{rq}$  的论域为  $[0, 2]$ , 0 表示转矩为零, 1 表示最优转矩, 2 表示转矩为最大值  $T_{\max}$ ; SOC 的论域为  $[0.4, 0.8]$ , 代表超级电容工作是上下限;  $v$  的论域为  $[0, 12]$ , 表示速度  $0 \sim 12$  km/h 的变化;  $\eta$  的论域为  $[0, 1]$ , 表示效率值;  $\alpha$  的论域为  $[0, 1]$ , 代表油门开度的变化范围; gear 的论域为  $[0, 3]$ , 对应 1 到 3 挡的

变化.

$$K = \begin{cases} \frac{T_{rq}}{T_{opt}}, & T_{rq} \leq T_{opt}; \\ 1 + \frac{T_{rq} - T_{opt}}{T_{max} - T_{opt}}, & T_{rq} > T_{opt}. \end{cases}$$

建立各参数的隶属函数,制定模糊规则集,规则库由若干 If - Then 规则构成,图 6 为部分输入和输出隶属度函数,表 1 为模糊逻辑规则库<sup>[6,8-9]</sup>.

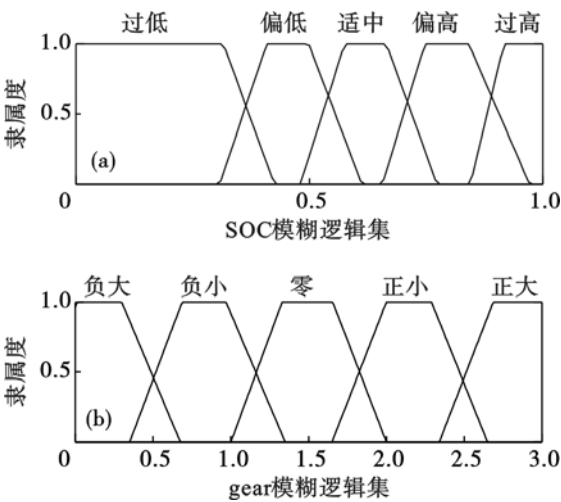


图 6 输入输出变量隶属度函数  
Fig. 6 Membership functions of input and output variable  
(a)—输入 SOC 隶属度函数;  
(b)—输出 gear 隶属度函数.

表 1 模糊逻辑规则库 Table 1 Fuzzy logic rule base					
输出	输入				
	负大	负小	零	正小	正大
过低	零	零	正大	正大	正大
偏低	零	零	正小	正大	正大
适中	负小	零	零	正小	正大
偏高	负大	负小	零	零	正小
过高	负大	负大	零	零	零

4 仿真研究

选取典型的 3 个工作周期,应用 MATLAB Simulink 软件,将实际载荷谱加载到模型中,在考虑初始条件和边界条件下建立传统装载机、混合动力装载机及混合动力自动变速系统的仿真模型,运用模糊逻辑控制发动机的工作点,控制变速箱自动换挡<sup>[8,10]</sup>. 研究系统工况特点、SOC 值变化规律、液力变矩器传动效率曲线、系统燃油经济性等.

根据载荷谱数据计算得到系统需求最大功率,考虑各元件的效率及设计余量,模型结构如图 7 所示. 模型中发动机功率为 140 kW (原机 160 kW),电机功率为 60 kW,超级电容容量为 17.6 F. 系统仿真结果曲线如图 8 所示.

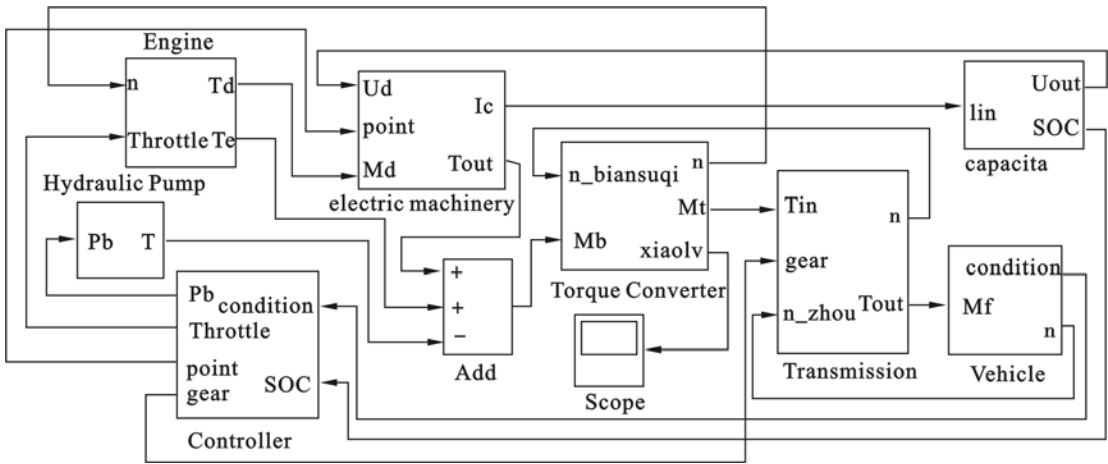
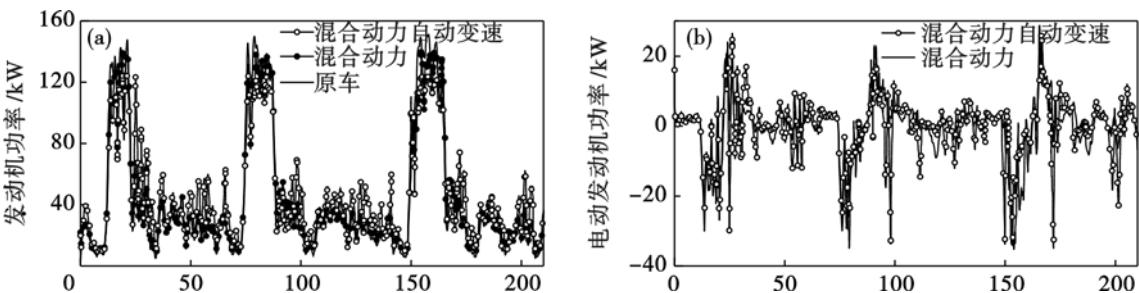


图 7 混合动力装载机仿真模型  
Fig. 7 Simulation model of hybrid power loader



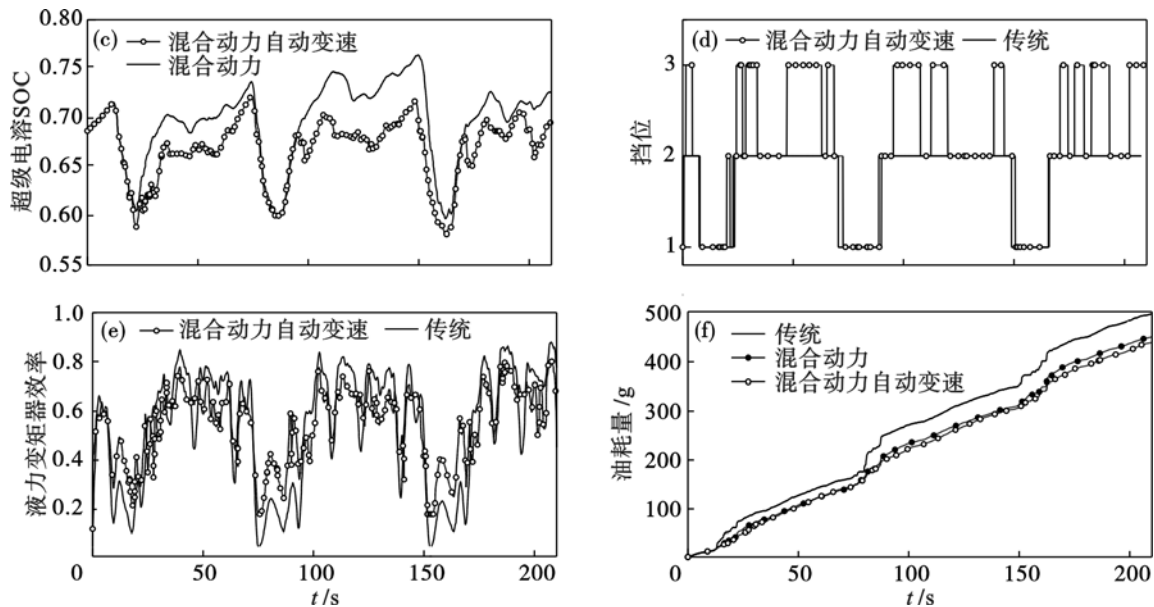


图 8 系统仿真曲线

Fig. 8 System simulation curves

混合动力系统将发动机输出功率“削峰填谷”;电机工作在额定功率范围内,充电与放电功率动态平衡;超级电容 SOC 值变化稳定;挡位变化及时、有效,同时有效提高了液力变矩器效率;混合动力比传统装载机节油约 9.56%,混合动力自动变速比传统装载机节油约 11.82%,改善了燃油经济性。

## 5 结 论

1) 提出装载机并联混合动力与自动变速相结合的方案,混合动力技术提高了发动机的能源利用率,自动变速提高了系统的传动效率,实现装载机节能减排的目的。

2) 超级电容 SOC 值变化稳定;挡位变化及时、合理,有效地提高了系统传动效率;混合动力比传统装载机节油约 9.56%,混合动力自动变速比传统装载机节油约 11.82%,改善了燃油经济性,达到了节能效果。

### 参考文献:

- [1] 徐晓美,唐倩倩,王哲. 混合动力装载机的研究现状及发展趋势[J]. 中国工程机械学报,2012,43(2):53-56.  
(Xu Xiao-mei, Tang Qian-qian, Wang Zhe. Research status of hybrid power loader and its development trend[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2012, 43(2): 53-56.)
- [2] Lin T L, Wang Q F, Hu B Z. Development of hybrid powered hydraulic construction machinery[J]. *Automation in*

*Construction*, 2010, 19(1): 11-19.

- [3] 康怀亮. 工程车辆三参数动力节能换挡规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
(Kang Huai-liang. Power and energy-saving shift schedule based on 3 parameters for construction vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2012.)
- [4] Sun H, Jing J Q. Research on the system configuration and energy control strategy for parallel hydraulic hybrid loader [J]. *Automation in Construction*, 2010, 19(2): 213-220.
- [5] Reno F. Hybrid power systems for construction machinery: aspects of system design and operability of wheel loaders [C]//ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Lake Buena Vista, 2010: 611-620.
- [6] Sergio G, Andrea B, Ettore C. A series-parallel hybrid electric powertrain for industrial vehicles [C]// IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Lille, 2010: 1-6.
- [7] Zou N W, Dai Q L, Jia Y H, et al. Modeling and simulation research of coaxial parallel hybrid loader [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 29(32): 1634-1639.
- [8] Zhang X, Mi C C, Yin C L. Active-charging based powertrain control in series hybrid electric vehicles for efficiency improvement and battery lifetime extension [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 245: 292-300.
- [9] 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): 480-483, 528.  
(Xiao Qing, Wang Qing-feng, Zhang Yan-ting, et al. Study on modeling and control strategy of hybrid system in hydraulic excavator [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2007, 41(3): 480-483, 528.)
- [10] Antti L. Evaluation of energy storage system requirements for hybrid mining loaders [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(8): 3387-3393.