

混合动力工程车辆自动变速技术

赵丁选,李天宇,康怀亮,张志文,李牧菲

(吉林大学 机械科学与工程学院,长春 130022)

摘要:为提高动力性并实现节能减排,以并联式混合动力装载机为例研究工程车辆的混合动力系统自动变速控制方法。考虑作业载荷对最优挡位特性的影响,提出以“油门开度、车速、作业载荷系数”为控制参数的新型自动变速控制原理,提出了节能换挡规律、动力换挡规律和综合换挡规律。研究结果表明:在满足正常工作要求的前提下,换挡规律准确有效,挡位变换与载荷变化一致性较好,提高了车辆动力性和能量利用率。

关键词:工程机械;混合动力;自动变速;装载机;作业载荷系数;换挡规律

中图分类号:U270.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2014)02-0358-06

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201402013

Automatic shift technology of hybrid power engineering vehicle

ZHAO Ding-xuan, LI Tian-yu, KANG Huai-liang, ZHANG Zhi-wen, LI Mu-fei

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To improve the power performance and reduce energy consumption and environmental pollution, a parallel hybrid loader is taken as a sample to research the automatic shift technology of hybrid power engineering vehicles. The influence of the operating load on the optimal gear was taken into account. The throttle, speed and operating load factor were considered as the control parameters for the new automatic shift control scheme. Energy saving schedule, power shift schedule and comprehensive shift schedule were proposed. Results show under the premise of meeting the normal requirements, the proposed shift schedule is accurate and effective, the gear change and load change have good consistency. The power performance is improved and the energy consumption is reduced.

Key words: construction machinery; hybrid power; automatic shift; loader; operating load factor; shift schedule

装载机是进行基础建设的重要工程设备,由于作业环境复杂多变,其能量利用率低、能耗高、排放差^[1-6]。为提高作业效率及能量利用率,工程

车辆自动变速控制技术应运而生。目前采埃孚、卡特彼勒、Volvo、川崎、小松等公司已在部分工程车辆上应用了自动变速技术^[7-8]。研究表明,混

收稿日期:2013-05-30.

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120061110023);“863”国家高技术研究发展计划项目(2009AA044403);吉林大学“985工程”项目。

作者简介:赵丁选(1965-),男,教授,博士生导师。研究方向:工程机械混合动力技术。E-mail:zdx@jlu.edu.cn

通信作者:李天宇(1988-),男,博士研究生。研究方向:工程车辆混合动力自动变速技术。

E-mail:litianyu383@163.com

合动力技术可以有效节能减排,国内外很多工程机械厂商(如卡特彼勒、Volvo、川崎、小松、徐工、柳工等)相继推出了混合动力工程机械产品^[1-3]。为提高动力性并节能减排,近年来各种车辆相继采用了自动变速与混合动力技术,作为其交叉领域的混合动力自动变速技术成为研究热点^[5]。现有混合动力车辆均沿用了非混合动力车辆的“油门与车速”变速方法,只是采用了先进的混合动力驱动元件,对驱动元件的控制采用先进控制算法,虽然也取得了部分较好的效果,但在动力学控制理论方面没有较大的突破^[4-5]。由于路况复杂及驾驶员控制的随意性,这些方法难以弥补换挡控制方法在动力学方面的严重缺陷,因此常出现动力中断、换挡冲击和换挡延迟等现象^[3,6-7]。

本文以并联式混合动力装载机为研究对象,研究混合动力工程车辆的新型自动变速控制技术,以提高车辆的动力性、换挡平顺性和节能性。分析了混合动力车辆的作业载荷对挡位特性的影响,在此基础上提出基于“油门开度、车速、作业载荷系数”的新型自动变速控制原理,进而提出以经济性为主的节能换挡规律、以动力性为主的动力换挡规律以及兼顾经济性和动力性的综合换挡规律。

1 并联式混合动力装载机

1.1 并联式混合动力装载机结构

本文针对一种典型的并联式混合动力装载机进行自动变速研究。以某 ZL50 装载机为原型,用永磁同步电机作为电动/发电机,采用超级电容储能,图 1 为混合动力装载机系统结构。

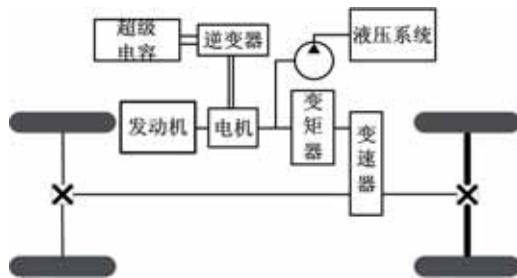


图 1 并联式混合动力装载机系统结构

Fig. 1 System structure of parallel hybrid power loader

1.2 装载机工况分析

研究适用于混合动力装载机的自动变速理论,首先要对其进行工况分析。工程车辆通常边作业边行驶,装载机作为典型的土石方工程机械,其液压系统作业的功率可达发动机输出功率的 40%~60%,而且装载机工作周期性强,负载波动

较强^[6-9]。

1.3 混合动力装载机系统的控制策略

控制策略是混合动力系统能量管理分配的核心,混合动力车辆的整车控制主要分为基于规则的能量管理策略和基于系统优化的控制策略。目前研究较多的主要有实时优化控制、逻辑门限控制、模糊逻辑规则控制、全局优化控制等^[10]。由于优化控制、智能控制算法复杂、实际应用性差,为保证工作的可靠性,实际产品样机大多采用实用的简单逻辑规则控制^[11]。本文在逻辑规则控制的基础上研究自动变速控制方法。根据装载机工况特点,以超级电容荷电状态及负载工况作为决策依据。发动机的输出转矩可以认为是油门开度(α)与转速(n_e)的函数:

$$M_e = f(\alpha, n_e) \quad (1)$$

对于不同油门开度可以通过发动机的特性曲线与燃油效率图确定最优转速作为目标转速。控制系统检测实际转速并通过 PID 算法控制电机的输出转矩,稳定发动机转速在目标转速,系统控制原理见图 2。

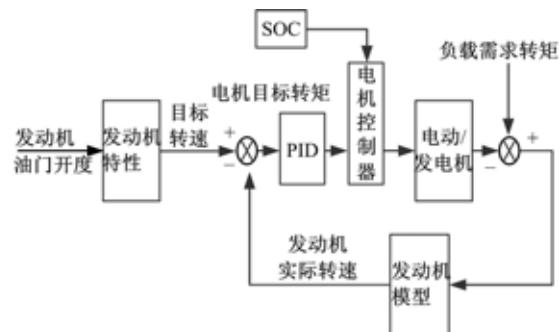


图 2 混合动力系统基本控制原理图

Fig. 2 Basic control schematics of hybrid power system

2 换挡控制参数

通过对混合动力元件的控制,可以在工作过程中维持发动机高效运转,但由于路况复杂以及驾驶员对油门踏板控制的随意性,系统的储能元件常会出现欠充和过充。因此,必须根据作业载荷情况通过挡位控制来加以弥补,研究混合动力系统中作业载荷对挡位特性的影响,根据车辆动力学提出更加合理的挡位控制方法^[6-7]。

本文采用“作业载荷系数”来描述工程车辆作业载荷的大小,其定义为:当前工况下作业载荷所消耗的动力源输出转矩与最大作业载荷下所消耗的动力源输出转矩之比,其值在 0~1 之间。这样

定义是科学合理的,其一:该系数能够直观地反映混合动力车辆功率的分配和流向;其二:该系数可以方便地测量和计算,除行走系统以外,其他需要驱动的元件主要有液压泵等。

液压系统的载荷状态可以通过液压泵出口压力得到,将出口压力换算为液压泵的驱动转矩:

$$M_i = \frac{p_i q_i}{2\pi \eta_{pm}} \quad (2)$$

式中: M_i 、 p_i 、 q_i 、 η_{pm} 分别为各液压泵的驱动转矩、出口压力、排量和机械效率。

采用各液压泵的性能参数来表示作业载荷系数,能够很好地反映当前液压系统消耗功率对换挡点的影响^[3]。装载机中主要考虑工作泵与转向泵的消耗功率,其作业载荷系数定义如下:

$$\gamma = \frac{\Delta M_{Pump}}{\Delta M_{Pump_max}} = \frac{M_{wp} i_{wp} + M_{sp} i_{sp}}{\Delta M_{Pump_max}} \quad (3)$$

式中: ΔM_{Pump} 为各液压泵驱动转矩之和; ΔM_{Pump_max} 为各液压泵最大驱动转矩; M_{wp} 、 M_{sp} 分别为工作泵、转向泵驱动转矩; i_{wp} 、 i_{sp} 分别为工作泵、转向泵与发动机输出轴连接的传动比。

发动机的油门开度反映了车辆当前输出状态。当动力源负荷一定时,车速越低,表明行驶阻力越大;车速越高,表明行驶阻力越小。工程车辆的传动系统大多采用液力变矩器,其传动效率低,对整机效率影响较大,且效率难以准确测得。本文选择油门开度、车速和作业载荷系数作为换挡控制参数。

3 换挡规律

3.1 节能换挡规律

液力变矩器的效率直接决定传动系统效率,以变矩器效率最优为目标求解节能换挡规律。换挡的原则是设定变矩器最低工作效率为某值,低于该值后相邻挡位效率曲线的交点为最佳换挡点^[3,6]。图 3 为某一作业载荷系数下不同油门开度相邻两挡的效率曲线。所有不同油门开度下相邻两挡的最佳换挡点连接起来即可得到当前作业载荷系数的换挡曲线。

3.2 动力换挡规律

动力换挡规律是在换挡时刻保持整车牵引力最大为控制目标。图 4 为某一作业载荷系数下的牵引特性曲线。图中相同油门开度下相邻两挡的牵引力曲线交点即为最佳换挡点,各油门开度下相邻两挡的最佳换挡点连接起来即可得到动力性

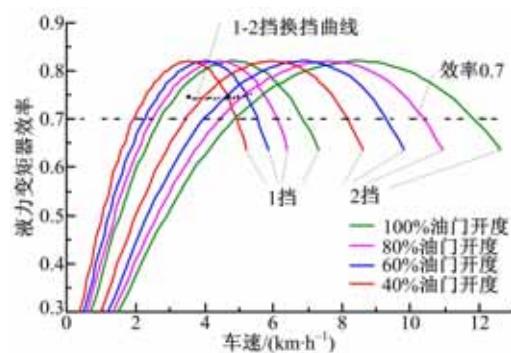


图 3 节能换挡曲线

Fig. 3 Energy-saving shift schedule curve

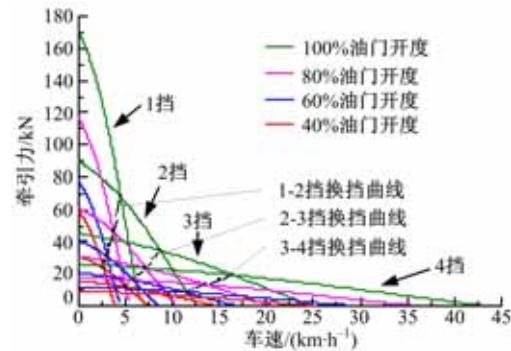


图 4 动力换挡曲线

Fig. 4 Power shift schedule curve

换挡线。

3.3 换挡规律的求解

本文提出的换挡控制参数(油门开度 α 、车速 v 和作业载荷系数 γ)和挡位 Gear 之间的关系可以描述为: $Gear = f(\alpha, v, \gamma)$ 。由于最佳换挡点的车速 v 是油门开度 α 和作业载荷系数 γ 的非线性函数,本文采用多元多项式回归方法进行求解,利用二元二次多项式回归模型来描述。

$$v = a_0 + a_1 \alpha + a_2 \gamma + a_3 \alpha \gamma + a_4 \alpha^2 + a_5 \gamma^2 \quad (4)$$

$$\begin{cases} v_{e_up} = v_e + \Delta v \\ v_{e_down} = v_e - \Delta v \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} v_{d_up} = v_d + \Delta v \\ v_{d_down} = v_d - \Delta v \end{cases} \quad (6)$$

式中: v_e 、 v_d 分别为节能换挡规律和动力换挡规律的换挡车速; v_{e_up} 、 v_{e_down} 分别为节能换挡规律的升挡和降挡车速; v_{d_up} 、 v_{d_down} 分别为动力换挡规律的升挡和降挡车速; Δv 为换挡延迟。

实际应用中为避免循环换挡,节能换挡和动力换挡的升挡与降挡都要设置合理的换挡延迟^[3]。图 5、图 6 分别为节能换挡规律和动力换挡规律全工况的挡位曲面。

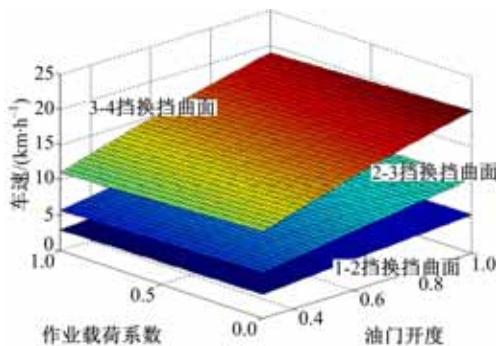


图 5 节能换挡曲面

Fig. 5 Energy-saving shift schedule surface

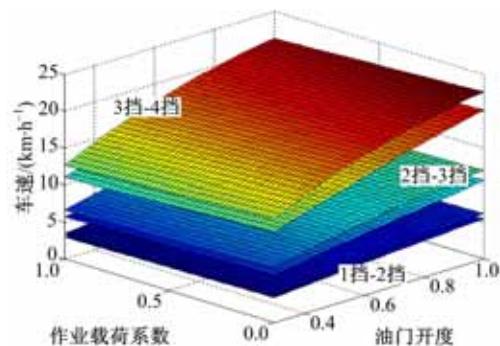


图 7 综合换挡曲面

Fig. 7 Comprehensive shift schedule surface

力换挡面。

从图 5、图 6 和图 7 的换挡曲面可以看出,在相同油门开度下,当作业载荷系数变大,在总趋势上最佳换挡点车速单调减小,挡位越高,换挡点车速下降越明显。油门开度越大,最佳换挡点车速下降得越快。因此在研究工程车辆自动变速时,必须考虑作业载荷变化的影响。

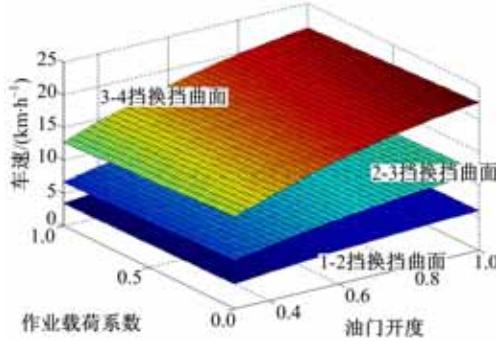


图 6 动力换挡曲面

Fig. 6 Power shift schedule surface

3.4 综合换挡规律

工程车辆实际作业中采取降挡操作通常是外部阻力较大,需降挡以增加牵引力;采取升挡操作通常是外部阻力较小,无需很大的牵引力。本文提出保证牵引力需求的同时尽可能提高整车效率、兼顾经济性和动力性的综合换挡规律:车辆降挡时,以最大牵引力为换挡目标;车辆升挡时,以液力变矩器效率最优为换挡目标。即升挡时采用节能换挡,降挡时采用动力换挡^[3]。图 7 为综合换挡曲面,每对曲面上方为节能换挡面,下方为动

4 仿真及结果分析

本文应用 Matlab/Simulink 软件进行建模仿真研究。为提高仿真精度,在对系统各元件数学建模的基础上,采用理论公式和经验公式相结合的方式来描述其性能参数^[3,12]。传统装载机和混合动力装载机参数如表 1 所示,仿真模型结构见图 8。以 ZL50 装载机实际工作载荷谱作为 Simulink 模型输入,采用后向式仿真方式进行仿真。装载机通常采用 V 型作业法,其工作循环主要由空载前进、铲掘、负载运输、卸料、空载返程等组成^[3,12]。图 9 和图 10 分别为 ZL50 装载机采用 V 型作业法实际工作 3 个周期载荷谱通过计算求得的作业载荷系数变化和负载转矩变化曲线。

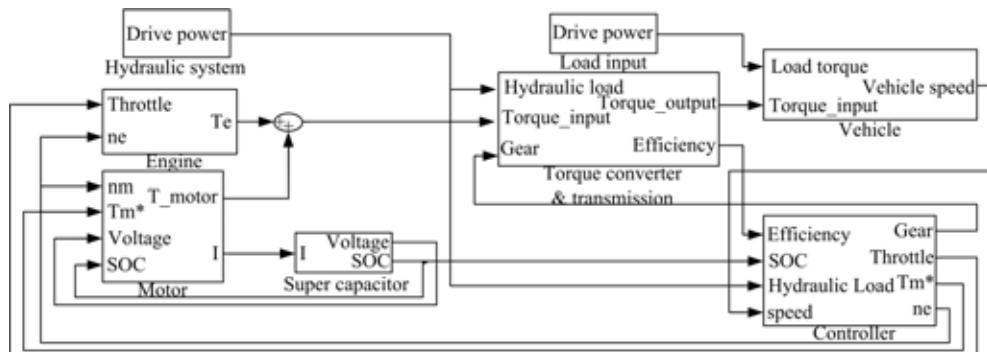


图 8 混合动力装载机仿真模型

Fig. 8 Simulation model of hybrid power loader

表 1 仿真模型主要参数

Table 1 Main parameters of simulation model

项目	ZL50 装载机	混合动力装载机
发动机	160 kW/2200 r·min ⁻¹	108 kW/2200 r·min ⁻¹
电机	无	60 kW
超级电容	无	23.6 F/432 V
液力变矩器	有效直径 340 mm	有效直径 350 mm

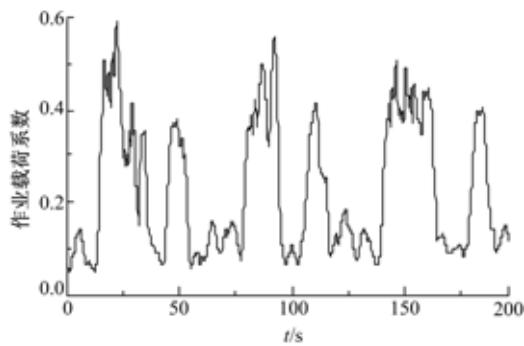


图 9 ZL50 装载机实际作业载荷系数变化曲线

Fig. 9 Operating load factor curve of ZL50 loader

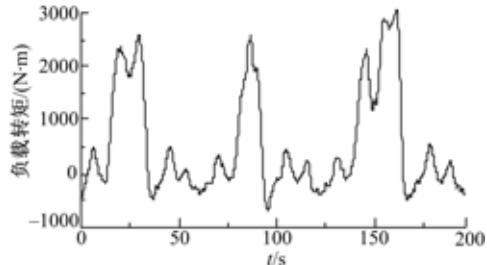


图 10 ZL50 装载机实际负载转矩变化曲线

Fig. 10 Load torque curve on drive shaft of ZL50 loader

本文以综合换挡规律为例研究换挡规律的性能及效果。图 11(a)为驾驶员控制的油门开度变化,图 11(b)为应用综合换挡规律进行的挡位变化,可见换挡规律能够根据实时测得的参数控制算法控制挡位变化。结合图 9、图 10 的系统作业载荷和负载转矩,结果表明,换挡规律的挡位变换与载荷变化一致性较好,换挡准确可靠,无频繁换挡。当外界负载变大时,降挡以保证牵引力最大,改善动力输出。当负载变小时,升挡以保证液力变矩器效率最优,提高作业效率。

图 11(c)的液力变矩器效率变化曲线表明,换挡规律保证了液力变矩器效率,其平均效率达 68.8%,提高了车辆动力系统效率。图 11(d)的超级电容 SOC 值变化表明,在满足正常工作的前提下,混合动力系统工作正常,超级电容基本工作在设定范围内。图 12 为油耗对比曲线,对比结果

表明,采用自动变速技术的混合动力装载机可以有效减少油耗,把超级电容能量变化折算为油耗,

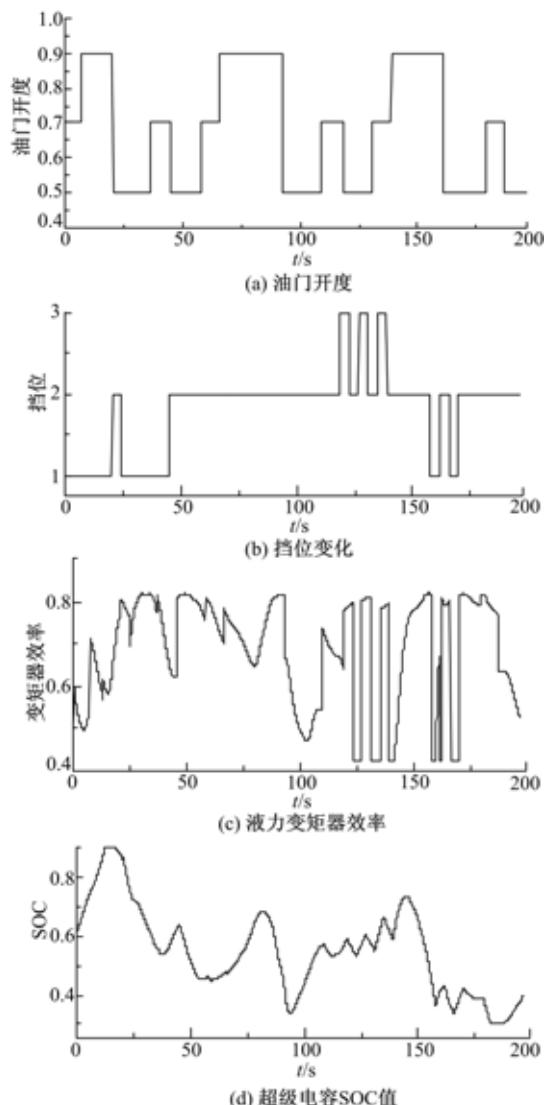


图 11 综合换挡规律仿真研究结果

Fig. 11 Simulation results of comprehensive shift schedule

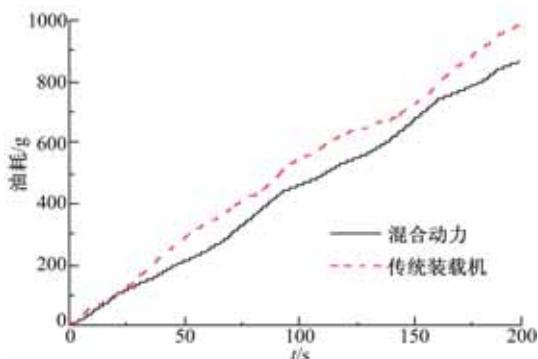


图 12 油耗对比曲线

Fig. 12 Curve of fuel consumption

混合动力自动变速装载机比传统装载机节油约12.4%,提高了能量利用率。

5 结束语

以并联式混合动力装载机为例研究了工程车辆的混合动力系统自动变速控制方法。分析了混合动力工程车辆的作业载荷系数对挡位特性的影响,提出了基于油门开度、车速和作业载荷系数的新型三参数自动变速控制原理,以及节能换挡规律、动力换挡规律和综合换挡规律。研究表明,基于三参数的综合换挡规律的挡位变换与载荷变化一致性较好,换挡准确可靠。提高了液力变矩器平均效率及动力系统整体效率。采用自动变速的混合动力装载机可以有效减少油耗,提高了能量利用率。在混合动力工程车辆上应用自动变速具有可行性和实用性。

参考文献:

- [1] Lin Tian-liang, Wang Qing-feng, Hu Bao-zan. Development of hybrid powered hydraulic construction machinery[J]. Automation in Construction, 2010, 19(1):11-19.
- [2] Sun Hui, Jing Jun-qing. Research on the system configuration and energy control strategy for parallel hydraulic hybrid loader[J]. Automation in Construction, 2010, 19(2): 213-220.
- [3] 康怀亮. 工程车辆三参数动力节能换挡规律研究[D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2012.
Kang Huai-liang. Power and energy-saving shift schedule based on 3 parameters for construction vehicle[D]. Changchun: College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, 2012.
- [4] 李天宇,赵丁选,康怀亮,等. 并联式混合动力装载机的参数匹配[J]. 吉林大学学报:工学版, 2013, 43(4):916-921.
Li Tian-yu, Zhao Ding-xuan, Kang Huai-liang, et al. Parameter matching of parallel hybrid power loaders [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(4): 916-921.
- [5] 董翔宇,陈慧岩,李春芾. 重型商用混合动力车自动变速技术综述[J]. 机械传动, 2010, 34(12):75-79.
Dong Xiang-yu, Chen Hui-yan, Li Chun-fu. A summary on the automatic transmission technology of heavy commercial hybrid electric vehicle[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(12):75-79.
- [6] Zhang Hong-yan, Zhao Ding-xuan, Tan Xin-xing. Four-parameter automatic transmission technology for construction vehicle based on Elman recursive neural network[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(1): 20-24.
- [7] 李秀兰,秦四成,杨宏韬. 基于多尺度小波神经网络的工程车辆换挡策略[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2013, 45(2):188-192.
Li Xiu-lan, Qin Si-cheng, Yang Hong-tao. Shift strategy of construction vehicle based on multi-scale wavelet neural network[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(2):188-192.
- [8] Sergio Grammatico, Andrea Balluchi, Ettore Cosoli. A series-parallel hybrid electric powertrain for industrial vehicles[C]// 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, France, 2010.
- [9] Kumar R, Ivantsynova M, Williams K. Study of energetic characteristics in power split drives for on highway trucks and wheel loaders[C]// SAE Paper, 2007-01-4193.
- [10] 于秀敏,曹珊,李君,等. 混合动力汽车控制策略的研究现状及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11):10-16.
Yu Xiu-min, Cao Shan, Li Jun, et al. Present study situation and development trend of control strategies for hybrid electric vehicle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11):10-16.
- [11] 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.
- [12] 王继新,龚大鹏,张英爽,等. 利用三参数自动换挡策略的轮式装载机传动系建模与遗传算法优化[J]. 吉林大学学报:工学版, 2011, 41(增刊1):27-33.
Wang Ji-xin, Gong Da-peng, Zhang Ying-shuang, et al. Modeling of wheel loader powertrain with three-parameters shift strategy and optimization with genetic algorithm [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(Sup. 1):27-33.