

# 油液混合动力车驱动/制动系统及其控制策略分析

徐磊,何晓晖,王强

(陆军工程大学 野战工程学院机电教研中心, 南京 210007)

**摘要:** 为了提高整车的能量回收效率和车辆机动能力, 针对电子控制的以内燃机为动力源液压驱动的混合动力车辆, 分析了其驱动/制动系统的布置方式及其研发思路, 论述了驱动/制动工况协调控制、液压四轮转向控制、防滑控制和能量控制等四项核心技术, 最后介绍了油液混合动力车辆的驱动/制动系统的发展趋势。

**关键词:** 驱动/制动系统; 油液; 混合动力; 控制策略

**本文引用格式:** 徐磊, 何晓晖, 王强. 油液混合动力车驱动/制动系统及其控制策略分析[J]. 兵器装备工程学报, 2018(2): 56-60.

**Citation format:** XU Lei, HE Xiaohui, WANG Qiang. Analysis of Hydraulic Hybrid Vehicle Driving/Braking System and Its Control Strategy[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018(2): 56-60.

**中图分类号:** TH137.37

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-2304(2018)02-0056-05

## Analysis of Hydraulic Hybrid Vehicle Driving/Braking System and Its Control Strategy

XU Lei, HE Xiaohui, WANG Qiang

(College of Field Engineering, PLA Army Engineering University, Nanjing 210007 China)

**Abstract:** To improve the efficiency of energy recovery and mobility of vehicles, the arrangement mode and research and development ideas of driving and braking system were analyzed aiming at electronically controlled hybrid power vehicles driven by hydraulic pressure whose dynamics source is internal combustion engine. It demonstrates four core technology including the driving and braking condition coordination control, hydraulic four-wheel steering control, anti-slip control and energy control. The research actuality and development trend of the research are introduced.

**Key words:** electronic control and hydrostatic drive; hybrid power; driving and braking system; control strategies

车辆在制动过程中, 大量能量转化为热能而损失, 发热的同时导致车辆零部件的寿命缩短<sup>[1]</sup>。近年来混合动力车辆的研发使得车辆的制动能量得到回收再利用<sup>[2]</sup>, 节约能源的同时保护了环境。油液混合动力车辆<sup>[3]</sup>是以内燃机为动力源, 电子单元控制的液压驱动的混合动力车辆。其驱动/制动系统主要由机械动力装置和液压力装置组成, 二者布置方式的不同会影响到车辆的能量回收效率、操控性和机动

性等性能。

本文主要分析驱动/制动系统中动力装置不同的布置方式对于整车性能的影响, 阐述不同系统的发展现状与其设计开发思路, 论述核心控制技术, 分析在不同应用场合下不同的控制策略各自的优势和不足之处, 最后介绍了该领域的发展趋势。

**收稿日期:** 2017-09-07; **修回日期:** 2017-10-10

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51175511)

**作者简介:** 徐磊(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事液压传动方面的科研工作。

**通讯作者:** 王强(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事液压传动方面的科研工作, E-mail: wangqiangjs@sohu.com。

## 1 油液混合动力车辆驱动/制动系统

在油液混合动力车辆驱动/制动系统中,根据机械动力装置和液动力装置二者之间布置方式的不同可以分为串联式、并联式和混联式三种方式<sup>[4]</sup>,每种方式分别有不同的工作原理和应用场合。由于油液混合动力车辆驱动/制动系统主要由液压元件组成,对车辆底盘的机械结构影响很大,因而系统设计开发涉及整车结构,对于整车的研发至关重要。

### 1.1 串联式系统

采用液压驱动的混合动力车辆,整车的能量在发动机与双向变量液压马达之间双向传递。车辆制动时双向变量马达以液压泵的形式工作,将车辆的制动能回收储存在蓄能器中,在需要的时候释放出来。如图1所示。由于原先的车辆机械制动/驱动系统可以被液压系统所替代,使其在提高底盘离地间隙的前提下增强车辆的机动性能,因此在复杂道路环境下其有很大的应用前景。串联式系统的结构形式较为简单,但是回收效率不高。串联式系统可以实现对车辆速度精确的无极调节<sup>[5]</sup>,配合整车的控制策略,能使整车始终工作在最佳燃油区域,达到高效节能的目的<sup>[6]</sup>。

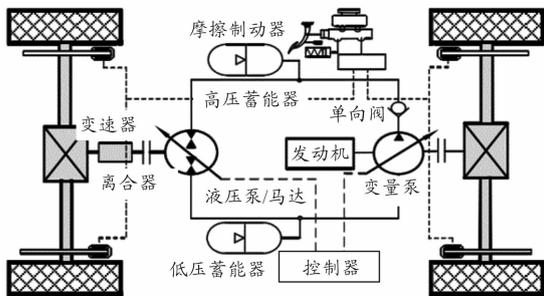


图1 串联式系统结构原理图

### 1.2 并联式系统

如图2所示,内燃机作为并联式液压驱动混合动力车辆的主要动力源<sup>[7]</sup>,液压制动回收模块作为辅助能量源<sup>[8]</sup>。与串联式系统相比,采用并联式液压驱动的混合动力车辆虽然在节能和机动性上不如串联式的液压驱动混合动力车辆,但是,这种驱动形式的布置可以使得车辆的能量利用率高<sup>[9]</sup>。

由于它还可以单独由内燃机驱动车辆行驶,行驶过程中平稳安全,因此,这种系统更适合在城市公交类似的经常需要启停的车辆中。

### 1.3 混联式系统

如图3所示,混联式液压驱动混合动力系统<sup>[10]</sup>由串联式和并联式发展而来,它兼有串联式和并联式的优点,使得内燃机与蓄能器之间的能量和功率匹配得到优化,是实现液压驱动混合动力车辆的经济型和动力性的最佳结构<sup>[11]</sup>。但是,这种系统的结构较为复杂<sup>[12]</sup>,设计、开发难度较大,成本高<sup>[13]</sup>,目前国内外的研究大多停留在计算机仿真阶段,随着

技术的逐步成熟将来会有很大的应用前景。

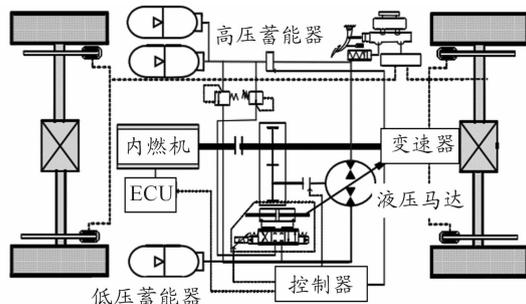


图2 并联式系统结构原理图

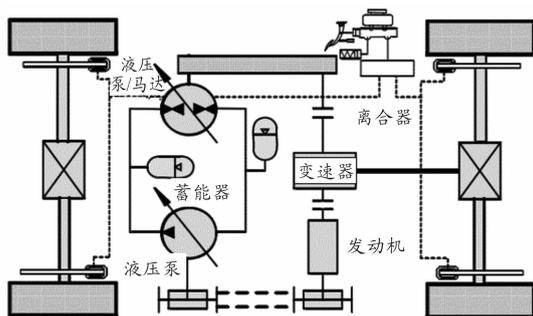


图3 混联式系统结构原理图

根据动力元件不同的布置方式,其特点可以总结如表1所示。

表1 不同油液混合动力车辆系统比较

项目	串联式	并联式	混联式
结构	简单	较复杂	复杂
系统布置	较复杂	简单	复杂
可靠性	较高	高	低
控制策略	较成熟	成熟	不成熟
能量转化率	低	高	较低
成本	较高	低	高

## 2 控制策略

油液混合动力车辆驱动/制动系统控制策略的研究是整车控制系统的重要组成部分,控制策略涉及到整车的方方面面。本文主要分析串联式油液混合动力车辆的控制策略,涉及驱动/制动工况协调控制、液压四轮转向控制、防滑控制和能量控制等核心控制技术。目前串联式的油液混合动力车辆的驱动/制动系统的控制策略研究较为单一,缺乏系统完善研究。

### 2.1 驱动/制动工况协调控制策略

驱动/制动工况控制<sup>[14]</sup>是指对油液混合动力车辆的液压马达排量进行控制,从而应对负载的变化,实现对车辆在

制动工况的协调控制。南京理工大学常思勤<sup>[15]</sup>对于新型油液混合动力车辆的驱动/控制工况在常规 PID 基础上加入了模糊控制规则,开发了带修正因子规则的自适应模糊控制器,如图 4 所示。针对城市客车,采用了国标(GB/T18386—2001)规定的标准<sup>[16]</sup>,市区循环工况分别运用修正因子的自适应模糊控制器和模糊 PID 控制器进行计算机仿真对比,结果表明,采用带修正因子的自适应模糊控制器的系统具有系统输出响应快、动态稳定性高、超调量小和精度高等优点,而且还具有较强的抵抗系统内部参数变化和外界扰动的能力。车辆在实际行驶过程中,根据驾驶员踩下油门踏板或者刹车踏板的角度变化,通过一定的参数转化,使之成为能控制液压马达排量的参数,从而在一定程度上满足驾驶员的驾驶意图<sup>[17]</sup>。但是这种单纯的以踏板的角度变化作为控制输入,很难把握驾驶员的真正意图,同时控制精度不高。

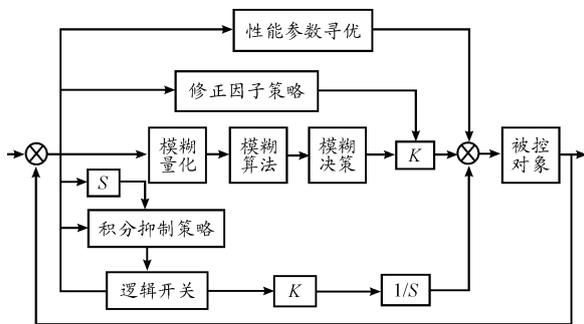


图4 带修正因子的自适应模糊控制器

为更好地满足驾驶员意图,哈尔滨工业大学伊永亮<sup>[18]</sup>提出了采用滑膜变结构控制技术。分别对不同挡位、不同系统起始压力和起步工况下车辆速度的跟踪进行了计算机仿真研究。针对系统内部参数的变化和外界环境因素的变化,采用组合趋近律的方式,对整个驱动/制动系统设计了离散滑膜控制器。在 Simulink 的环境下建模并进行动态仿真,仿真结果表明,基于组合趋近律的离散滑膜控制器同模糊 PID 控制器相比,有着更强的抵抗系统内部参数变化和外界环境因素变化的能力,这种控制器能满足驱动/制动系统所需的控制性能。目前,国内许多大学研究机构对于油液车辆驱动/制动工况控制策略的研究大多将传统 PID 控制与现代控制技术相结合,从而大幅增加控制系统的稳定性、响应速度和控制精度。目前,最大的困难就是解决此类车辆的驾驶体验与常规车辆的差别,使其容易被消费者所接受。

## 2.2 液压四轮转向控制策略

油液混合动力车辆的液压系统采用串联式,在该系统中的液压双向变量马达可以在四个象限工作,因此与传统车辆传动形式不同的是可以实现车辆的并行传动,从而充分提高车轮的地面附着力,而且在提高其制动和稳定性能的同时提高车辆的越野性能。由于马达的转速可以无极变速,使得车辆速度能够实现精细的调节,同时也易于操控,但是采用这种结构的车辆在四轮转向驱动协调控制方面存在难度<sup>[19]</sup>。

目前为止,国内外应用最广、最成熟的四轮转向技术为德尔福 Quadrateer 四轮转向技术(Four Wheel Steering)以及全轮精准转向技术(Precision All Wheel Steer)<sup>[20]</sup>。尽管四轮转向技术目前已经应用在一些车辆上,但由于控制的复杂性导致还不能完美地应用到串联式的油液混合动力车中,同时也不能很好地满足车辆在弯道处行驶高速性和稳定性的要求<sup>[21]</sup>。吉林大学的王庆年等<sup>[22]</sup>进行了四轮独立驱动车辆各轮的转矩协调控制动力学理论分析。并且运用 BP 神经网络与 PID 控制相结合的方法对车辆各轮的转矩进行了协调控制研究,其控制模型如图 5 所示。该控制策略基本达到了控制目的,缺点是控制精度有待提升。

日本 Ando N 等<sup>[23]</sup>提出了一种车辆纵横向动力学分配的方法,这种方法以车辆能够准确循迹为目标,以最小二乘法为理论基础,同时对车辆的横向力控制以及横摆力矩的补偿进行了分析,最终在整体上降低车辆的循迹错误概率,使得车辆在行驶过程中的稳定性得到了一定保证。类似的,伊朗 Hakima A 等<sup>[24]</sup>设计了基于车轮驱动转矩的滑膜控制器,通过仿真表明了滑膜控制策略可以平衡各轮间的转矩,也使得车辆可以具有理想的循迹能力。

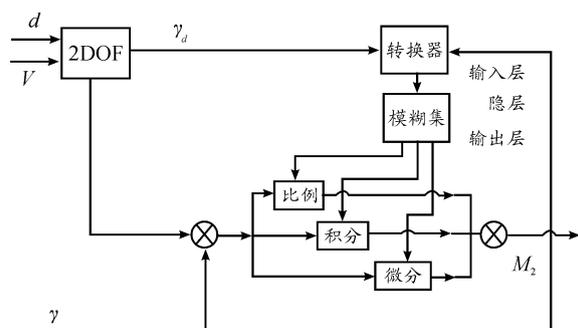


图5 基于神经网络的PID控制

## 2.3 防滑控制策略

南京理工大学韩文<sup>[11]</sup>运用模糊控制对于新型油液混合动力车辆在驱动工况的防滑转系统和制动工况的防抱死系统在 Simulink 的环境下建立了仿真模型并进行动态仿真,结果表明,采用模糊控制的防滑系统可以防止在车辆运行过程中出现轮胎抱死和滑转现象。清华大学张利鹏<sup>[25]</sup>针对分布式驱动电动汽车转矩运用自适应驱动防滑控制展开了研究,提出一种通过利用驱动电动机的转速和转矩的负反馈来实现驱动防滑的控制(直接转速转矩控制)法,并将其与采用最佳滑转率的比例积分控制和动态等转矩驱动控制相结合,开发分布式驱动电动汽车电动机转矩自适应驱动防滑控制器(如图 6 所示),对车辆在模拟路面上的驱动性能进行仿真,并且将实车在道路上进行了试验验证。仿真和试验同时表明,所开发控制器在使低附着系数路面上驱动轮的滑转率接近最佳值的同时,保障了分布式驱动电动汽车的横向稳定性,实现了对于电机转矩的平滑控制,同时一定程度上降低了对传动系统造成的冲击。

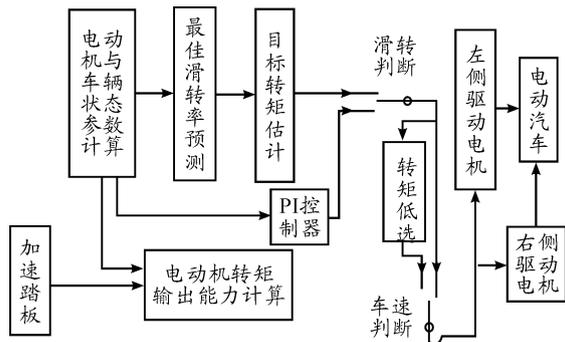


图6 电动机转矩自适应驱动防滑控制器

天津大学刘志新等<sup>[26]</sup>也是以车辆的滑转率为调节对象,将 ASR 算法应用到基于模糊 PID 控制的驱动防滑控制的控制器中。以发动机油门的阀口大小为控制对象,开发了模糊 PID 控制器,并对于该控制器的参数进行分析计算,最后在均一低附着路面以及分离路面的模拟环境下,运用 Simulink 仿真软件进行了建模和动态仿真。对比仿真结果,表明运用了 ASR 算法的模糊 PID 控制,其性能较模糊 PID 控制有着更加优越的控制性能。湖南大学余晃晶等<sup>[27]</sup>针对汽车防滑控制系统的可调度进行研究,利用 AADL 为控制系统进行建模,通过 OSATE 对该系统在实时任务系统中的调度线程、计算时间和处理器性能之间的关系进行了分析。

以上对于防滑策略的研究都是将现有控制策略与先进的算法相结合,借鉴非混合动力车辆的控制流程,通过建立模型在计算机中进行仿真,达到预期目的,但是缺少实车实验对仿真结果的验证。

#### 2.4 能量管理策略

由于串联式油液混合动力车辆驱动/制动系统中各子系统<sup>[28]</sup>(内燃机、液压泵和蓄能器)之间互相协调共同驱动车辆,各自的最佳效率区存在不同,因此要使得车辆时刻工作在最佳燃油区,需要对每一工况下的能量控制进行研究。Rajagopalan<sup>[29]</sup>提出的能量管理预测控制策略采用了两个控制器(主控制器和预测控制器)。主控制器采用瞬时能量管理控制策略,而预测控制器采用模糊能量管理控制规则,将输出控制量传给主控制器修正发动机最优目标转矩。通过仿真分析,在相同工况下采用该能量管理策略的车辆与未采用预测控制的车辆相比较,提高燃油经济性 9% 左右,降低氮氧化物排放约 30%。重庆大学杨阳<sup>[30]</sup>也采用了模糊控制器对混合动力汽车再生制动压力协调进行了控制研究,包含模糊控制的双控制器实现了对能量进行了全局和瞬时的控制,有效地提高了燃油经济性,但是模糊控制器先验知识规则的确定还有一定难度。

为了克服模糊逻辑以及模糊 PID 需要先验知识的固有缺陷,合肥工业大学钱立军<sup>[31]</sup>为精确计算驾驶员请求转矩(驾驶员的驾驶意图所对应的转矩),提出利用径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络拟合转矩识别系数。上海交通大学林添良<sup>[32]</sup>以参数匹配方法,考虑到动力部件的瞬态特性,建立各动力部件及传动系统的动力学模型,制

定了基于规则的控制策略并描述了各驱动模式的成立条件及其动力学方程<sup>[33]</sup>。为减少程序运行时间,Zhang 等人建立了串联式液压混合动力车辆的模型<sup>[34]</sup>,提出修正动态规划算法对控制策略进行全局优化,并且搭建硬件试验台架,对控制策略进行了试验,试验结果表明,基于规则和修正动态规划的控制策略均能实现良好的控制效果。引入转矩识别后,车速误差明显减小,燃油经济性提高了 4.54%,达到 14.04%。采用了神经网络拟合和动态规划算法,使得车辆对于能量控制精度和燃油经济性进一步提高。

### 3 结论

从关于驱动/制动系统的分析可以总结出油液混合动力车辆的驱动/制动系统的发展趋势主要集中在以下几点:

- 1) 在不改变传统驾驶员操作习惯下,使之尽可能的平稳运行,达到良好的控制效果。
- 2) 利用液压能量易回收和存储的优点,通过回收制动能量,在需要的时候再释放到系统中去,从而节约能源,目前研究在于如何提高节约能源问题。
- 3) 驱动/制动系统在实际运用到具体车辆时,针对不同的应用场合有不同的系统布置方式。在城市公交、大型工程机械中大多运用并联的系统布置方式,保证系统压力的同时达到一定的能量回收率,而在军用越野型 SUV 中,出于对于车辆机动性和操控性的要求,使串联型系统更加适用。

当前相关控制策略研究趋势主要集中在以下几点:

- 1) 在驱动/制动工况控制中,运用现代控制技术和传统 PID 相结合的研究方法,对整车的工况进行仿真分析,使整车能在各工况下平稳运行,目前研究集中在运用优越的控制策略使整车能在各工况下更加平稳运行,以及提高控制精度。
- 2) 对于液压四轮转向控制和防滑控制策略,目前,关于这方面的控制技术在很多车辆上已有应用,并且已经相对成熟,目前的研究集中在高度特殊车辆的系统中,且行驶环境较为理想,需要有更加适合串联式油液混合动力车辆的液压四轮转向控制技术,来应对复杂恶劣的行驶环境。
- 3) 能量控制策略是整车控制技术的核心所在,优越的能量管理策略可以使得整车的能源利用率大幅提升。目前的研究对于并联的系统已经相对成熟,但对于采用串联型液压混合动力的车辆,完全由液压系统驱动的车辆在能量回收效率上必须有更加适合的能量控制策略。

### 参考文献:

- [1] 闫丽娟,孙辉,刘伟,等.行走工程机械液压混合动力技术[J].吉林大学学报(工学版),2014,44(2):364-368.
- [2] SALMASI F R. Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,

- 2007,56(5):2393-2404.
- [3] 王程,易纲,常绿,等.油液车辆加速策略研究[J].农业工程学报,2012,28(14):65-70.
- [4] MILLER J M. Propulsion system for hybrid vehicles [M]. [S. I.]: IET Digital Library, 2010.
- [5] 伍迪,姚进,李华.基于AMESim的串联型液压混合动力传动系统建模与仿真[J].机床与液压,2016,44(8):45-48.
- [6] DU Z, KAI L C, LI P Y, et al. Fuel economy comparisons of series, parallel and HMT hydraulic hybrid architectures [C]//American Control Conference. IEEE, 2013: 5954-5959.
- [7] SALMAN M, SCHOUTEN N J, KHEIR N A. Control strategies for parallel hybrid vehicles [C]//American Control Conference, 2000. Proceedings of the. IEEE, 2000: 524-528.
- [8] RASK E M, DUOBA, LOHSE-BUSCH H. Recent hybrid electric vehicle trends and technologies [C]//Vehicle Power and Propulsion Conference IEEE, 2011: 1-6.
- [9] 张丹丹, 张学炜, 张伟. 基于AMESim的并联式液压混合动力车能量回收系统研究[J]. 液压与气动, 2014, 11: 100-104.
- [10] 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): 218-223.
- [11] 董晗, 刘昕晖, 王昕, 等. 并联式液压混合动力系统中蓄能器各主要参数对系统性能的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015(2): 420-428.
- [12] 罗念宁, 赵立军, 姜继海. 一种混联式液压混合动力系统及控制策略[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(9): 134-139.
- [13] 朱茂桃, 沈登峰, 梁艳春, 等. 混联式混合动力变速器液压系统控制策略设计[J]. 工程设计学报, 2014, 21(5): 469-475.
- [14] 柳玉龙. 新型车辆液压行驶驱动控制系统的研究[J]. 液压与气动, 2013(6): 32-33.
- [15] 韩文. 新型油液车关键技术的研究—驱动/制动系统的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [16] 国家标准, 2001. 电动汽车能量消耗率和行驶里程试验方法(GB/T18386—2001) [S].
- [17] 高建平, 赵金宝, 杨松, 等. 基于驾驶意图的插电式混合动力公交车控制策略[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 107-114.
- [18] 伊永亮. 静液传动混合动力车辆驱动与制动系统的控制性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [19] 范晓冬, 魏新华. 四轮转向液压底盘自动驾驶系统设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(5): 253-258.
- [20] 刘战芳. 四轮转向汽车技术研究[J]. 城市车辆, 2007: 27-29.
- [21] 张伯俊. 四轮转向汽车横向动力学特性及控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2006: 15-17.
- [22] 宋攀. 全线控四轮独立转向/驱动/制动电动汽车动力学集成控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [23] ANDO N, FUJIMOTO H. Yaw-rate control for electric-vehicle with active front/rear steering and driving/braking force distribution of rear wheels [C]//Advanced Motion Control, 2010. AMC'10. 11th IEEE International Workshop on. IEEE, 2010: 726-731.
- [24] HAKIMA A., AMELI S. Designing a fuzzy logic controller to adjust the angle of tires in four wheel steering vehicles [C]//Control Automation Robotics and Vision, 2010. ICARCV'10. 11th IEEE International Conference on IEEE, 2010: 2208-2213.
- [25] 张利鹏, 李亮, 祁炳楠, 等. 分布式驱动电动汽车转矩自适应驱动防滑控制[J]. 机械工程学报, 2013, 49(14): 106-115.
- [26] 刘志新, 张大卫, 李幼德. 基于滑转率的四轮驱动汽车防滑模糊控制仿真[J]. 农业机械学报, 2005, 36(12): 21-24.
- [27] 余晃晶, 李仁发, 黄丽达. 基于AADL的汽车防滑控制系统可调度性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(3): 43-47.
- [28] 周鹏, 杨秀晶, 刘明勋. 串联式液压混合动力车辆能量管理策略的设计与分析[J]. 机床与液压, 2014, 42(23): 110-115.
- [29] MUKHITDINOV A., RUZIMOV S K., ESHIKABILOV S L. Optimal control strategies for CVT of the HEV during a regenerative process [C]//2006 IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles, December 8-20, Pune, India, 2006: 1-12.
- [30] 杨阳, 邹佳航, 杨洋, 等. 混合动力汽车再生制动压力协调控制系统[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22): 127-135.
- [31] 钱立军, 邱利宏, 辛付龙, 等. 插电式四驱混合动力汽车能量管理控制策略及其优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 68-74.
- [32] 林添良, 刘强. 液压混合动力挖掘机动力系统的参数匹配方法[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(5): 728-733.
- [33] SUN H, JING J. Research on the system configuration and energy control strategy for parallel hydraulic hybrid loader [J]. Automation in Construction, 2010, 19(2): 213-220.
- [34] ZHANG C, LIU X, XIE F, et al. Control system modeling and simulation of parallel hydraulic hybrid heavy vehicle [C]//International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer. IEEE, 2011: 743-746.