

DOI:10.11918/201810050

液压轮毂马达辅助驱动系统控制策略实车验证

曾小华, 崔 臣, 张轩铭, 宋大风, 李立鑫

(汽车仿真与控制国家重点实验室(吉林大学), 长春 130025)

摘要: 为充分提升重型牵引车辆通过不良路面的能力,对国内某款重型牵引车在传统结构的基础上加装了前轴液压轮毂马达辅助驱动系统,并针对该混合动力系统,开发了工程化的控制策略,实现分时全驱控制.该策略通过对两套动力系统的工作状态和驾驶意图的识别保证系统模式的平稳切换,控制液压系统适时介入与退出,在各模式下对泵排量进行合理的控制,助力模式下实现轮速良好跟随.采用该控制策略的实车试验结果表明:驾驶员操作意图识别准确,模式切换和换挡平顺性好;两系统工作协调且互不干扰,行驶安全性得以保证;各模式下变量泵排量响应合理,轮速跟随方法有效.实车试验验证了轮毂液压混合动力系统实际应用的可行性和所提策略的合理性.

关键词: 重型牵引车; 液压轮毂马达; 液压混合动力; 多轴驱动; 控制策略

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)01-0050-06

Verification of control strategy of hydraulic hub-motor auxiliary system on actual vehicle

ZENG Xiaohua, CUI Chen, ZHANG Xuanming, SONG Dafeng, LI Lixin

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control(Jilin University), Changchun 130025, China)

Abstract: To improve the pass ability of heavy-duty tractors, a hydraulic hybrid heavy-duty tractor is equipped with a hydraulic hub motor auxiliary drive system on front axle based on the traditional structure. On this basis, an engineering control strategy is developed to achieve time-sharing all-wheel-drive control. The strategy ensures the smooth switching of the system mode by identifying the working states of the two sets of power systems and the driving intention, and the controlling of hydraulic system to intervene and exit at the right time. In each mode, the pump displacement is controlled rationally, and a good wheel speed tracking in the assist mode is achieved. The actual vehicle test results of the control strategy show that the driver's operation intention is accurately identified, the mode switching and shift smoothness are good. The two systems work in harmony and do not interfere with each other, and the driving safety is guaranteed. The variable pump displacement response reasonably in each mode, and the wheel speed tracking method is effective. The actual vehicle test verifies the feasibility of the hub hydraulic hybrid system and the rationality of the strategy proposed.

Keywords: heavy-duty tractor; hydraulic hub-motor; hydraulic hybrid; multi-axis drive; control strategy

重型牵引车辆在基础设施建设中起到非常重要的作用^[1],其行驶工况复杂,传统后轴驱动牵引车在低附着路面上易出现打滑,导致驱动力不足,通过性降低.现有机械全轮驱动方案虽然能提高车辆在坏路面上的通过性^[2-3],但大大降低了传动效率和牵引效率,燃油经济性较差,而且机械式全驱系统重量大,降低了使用效益^[4].在液压辅助驱动领域,欧美、日本的学者提出用液压泵从动力源提取动力,经液压回路由液压马达辅助前轮驱动的方案^[5-8],该系统可以有效改善汽车在沙地、雪地等低附着路面

的通过性^[9].液压辅助驱动系统的相关产品也已出现在国际市场上.2009年,MAN公司推出HydroDrive静液前桥驱动系统^[10-11];雷诺公司2010年推出OptiTrack动力系统^[12];博世公司在2012年汉诺威车展中展出液力牵引辅助系统^[13].2012年,吉林大学提出了一种液压轮毂马达辅助驱动系统^[14],从仿真层面验证了系统对车辆动力性和通过性的提升,但控制策略没有考虑工程应用,相对复杂,也没有进行实车验证.

液压轮毂马达前轮辅助驱动技术在不改变原底盘的前提下,通过在前轴增加泵、阀组及马达等液压元件,使车辆具有分时全驱功能,液压系统可适时介入与退出,在不同路况下始终保持较好的动力性与通过性,同时提升系统效率^[15].该系统还具有增加成本少,液压元件体积小,容易布置等优点,具有良

收稿日期: 2018-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51675214);

国家重点研发计划

(2018YFB0105900)

作者简介: 曾小华(1977—),男,教授,博士生导师;

宋大风(1977—),女,教授,博士生导师

通信作者: 宋大风, songdf@126.com

好的市场应用前景^[16].

本文在国内某款重型牵引车上加装液压轮毂马达辅助驱动系统, 开发实用化控制策略并在实车上验证. 为实现液压轮毂马达辅助驱动系统的实际应用, 促进液压混合动力技术的发展提供实践指导.

1 系统结构及实验样车平台

加装液压辅助驱动系统的试验样车动力系统结构见图 1. 取力器一端与发动机取力口连接, 另一端通过万向传动轴连接到液压泵, 提供液驱系统所需的动力; 轮毂马达安装在前轮轮毂内, 与液压泵组件以及阀组构成闭式回路, 通过阀组控制回路的通断和工作状态. 在不同档位下, 通过调节主泵排量使液压系统与机械系统协调工作^[17].

液压系统原理如图 2 所示. 液压系统由液压泵组件、控制阀组、轮毂马达等部分组成. 系统中采用斜盘

式柱塞变量泵, 通过给定比例电磁阀 V1、V2 控制信号, 调整斜盘开度, 进而控制泵的排量^[18]; 阀组中两个控制阀 CVL、CVR 分别控制自由轮阀 FVL、FVR 的阀芯位置, 实现轮毂马达的介入与退出^[19]; 旁通阀 BPV 实现主油路旁通; 开关阀 EHV1、EHV2 用于蓄能器开关控制, EHV3、EHV4 实现开式回路与闭式回路切换.

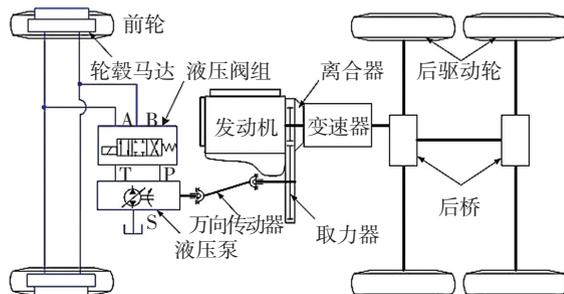


图 1 液压轮毂马达辅助驱动系统

Fig.1 Hydraulic hub-motor auxiliary system

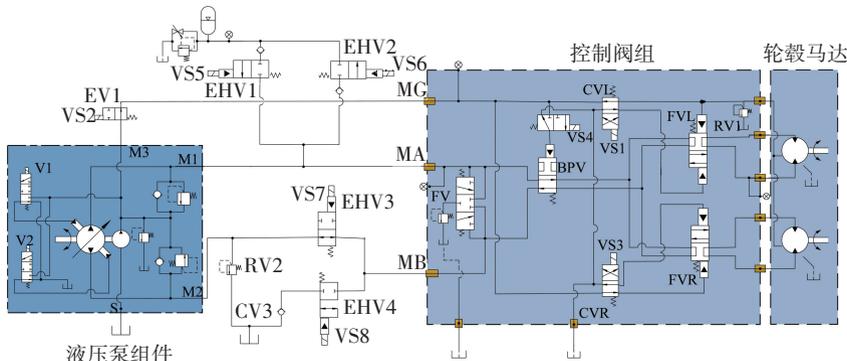


图 2 液压系统原理

Fig.2 Schematic of hydraulic system

轮毂马达的选取要求与重型车辆在坏路面上速度低、扭矩大的工况需求相适应. 本系统选取的马达为径向柱塞式轮毂马达, 不仅具有高负载力、高效率及低惯性的特点, 同时也具有极低速能力和良好的反向特性.

基于上述前轮液压辅助驱动系统结构原理设计了液压轮毂马达辅助驱动系统试验样车. 系统中液压传动控制器和车辆上的其他控制器与上位机通过 CAN 总线连接, 液压传动控制器和整车控制器作为下位机分别采集系统中液压传感器以及手刹开关、发动机转速等数据, 同时对系统输出控制指令, 并向上位机发送传感器实时数据和系统状态反馈数据等, 上位机负责系统状态的实时显示和测试数据的存储.

2 系统工作模式及控制策略

针对液压轮毂马达辅助驱动系统的特点, 将其工作模式划分为 6 种: 自由轮模式、前进蠕行模式、

后退蠕行模式、前进助力模式、后退助力模式以及旁通模式.

1) 自由轮模式. 当车辆在良好路面条件下行驶时, 整车通过后轴驱动, 液压系统不提供助力. 液压泵的排量输出为 0, 整车的运行状态与传统车辆相同.

2) 蠕行模式. 在平坦路面需要短距离平缓移动车辆时, 可通过前轮轮毂马达提供驱动力, 系统处于前进或后退蠕行模式. 此时变速器处于空挡, 切断发动机与后轴的动力传递. 液压泵的输出排量由蠕行操纵手柄的开度决定, 整车仅依靠前轮液压轮毂马达驱动行驶.

3) 助力模式. 当车辆遇到低附着路面驱动轮出现打滑时, 前轮和后轮共同输出驱动力, 此时系统处于前进或后退助力模式. 助力控制的基本思想是使前轮轮速跟随后轮轮速, 控制对象是液压泵的排量^[20]. 根据轮速跟随目标, 轮毂马达转速应与后轮转速相同, 即

$$\omega_r = N_e / (i_g \cdot i_0) = \omega_f = N_m. \quad (1)$$

式中： ω_r 、 ω_f 、 N_e 、 N_m 分别为后轮转速、前轮转速、发动机转速、轮毂马达转速，r/min； i_g 、 i_0 分别为变速器与驱动桥速比。

变量泵通过取力器与发动机相连，其转速为

$$N_p = N_e / i_{PTO} \quad (2)$$

式中 i_{PTO} 为取力器速比。

根据液压泵与轮毂马达的流量连续性原理，忽略泵和马达的容积损失，可得

$$L_p = 2L_m = 2N_m \cdot V_m \quad (3)$$

式中： L_p 、 L_m 分别为变量泵和单个轮毂马达的流量，L/min； V_m 为轮毂马达的排量，L/r。

根据式(1)~(3)可得泵的排量和斜盘开度：

$$V_p = L_p / N_p = 2N_m \cdot V_m \cdot i_{PTO} / N_e$$

$$\alpha = \frac{V_p}{V_{pmax}} = \frac{2N_e / i_g / i_0 \cdot V_m \cdot i_{PTO}}{N_e \cdot V_{pmax}} = \frac{2 \cdot V_m \cdot i_{PTO}}{i_g \cdot i_0 \cdot V_{pmax}} \quad (4)$$

式中： V_p 、 V_{pmax} 分别为变量泵排量和最大排量，L/r； α 为变量泵斜盘开度。

由式(4)可知，由于 i_0 、 i_{PTO} 、 V_m 、 V_{pmax} 均为常量，所以变量泵的斜盘开度 α 与挡位一一对应。

4) 旁通模式。当系统在前进助力模式下换挡时，应短时切断液压回路中前进油路的压力，此时系统处于旁通模式。系统各工作模式下的电磁阀工作状态如表 1 所示。

表 1 控制阀信号组合与系统工作模式对应关系

Tab.1 Correspondence between control valve signal combination and system operation mode

模式	VS1	VS3	VS4
自由轮模式	0	0	0
助力模式	1	1	0
爬行模式	1	1	1
旁通模式	1	1	1

在控制策略模型中各模式用代号来表示，如表 2 所示。

表 2 控制策略中定义的系统工作模式

Tab.2 System operating mode defined in the control strategy

代号	1	2	3	4	5	6
模式	自由轮	前进助力	后退助力	后退爬行	前进爬行	旁通

各工作模式间转换关系如图 3 所示。图 3 中各序号对应的模式切换条件分别是：

①手刹松开，整车状态正常(发动机转速怠速以上、油温低于 90℃、液压油高度符合要求)，按下助力开关，挡位不在空挡；②手刹未松开，或液压系统功能不正常，或再次按下助力开关(退出助力)，或挡位高于 6 挡，或持续制动 5 s 以上；③手刹未松

开，或液压系统功能不正常，或关闭爬行开关，或离合器分离；④手刹松开，整车状态正常，按下爬行开关，处于空挡状态；⑤有倒挡信号；⑥无倒挡信号；⑦离合器踩下或制动时间 < 5 s；⑧无制动，无离合器动作，挡位不在空挡；⑨爬行手柄信号为负；⑩爬行手柄信号为正。

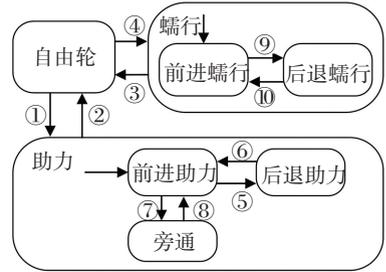


图 3 工作模式间转换关系

Fig.3 Conversion relationship between working modes

系统的模式切换需要控制算法能够准确识别驾驶员的操作意图和整车工作状态。算法中对驾驶员操作意图的识别需要在大量的实车试验中进行标定，如序号②、⑦中的制动时间即为其中的一个标定量。

控制算法的结构如图 4 所示，包括信号层、控制层和执行层。

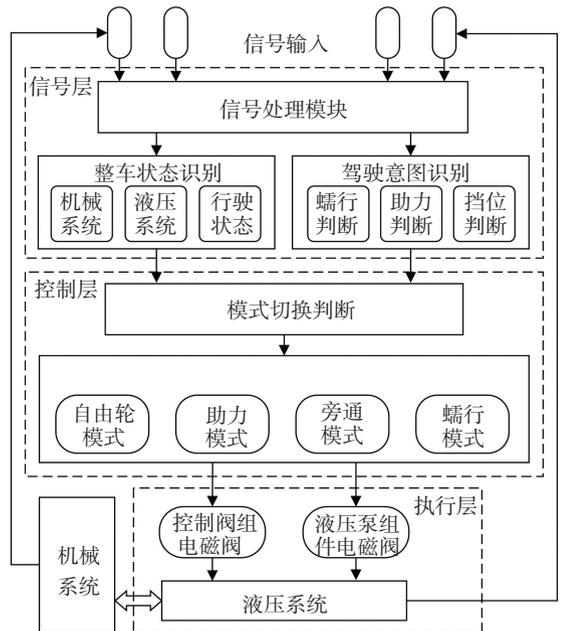


图 4 控制算法结构

Fig.4 Structure of control algorithm

信号层首先对从 CAN 线及硬线上采集到的整车和驾驶员相关信号进行分类、滤波、有效性判别等处理，然后进行整车状态和驾驶员操作意图的识别。整车状态的识别包括发动机驱动的机械系统状态、液压系统状态以及车辆行驶状态，该部分主要依靠转速、压力、车速等传感器的信号进行。驾驶员意图的识别依

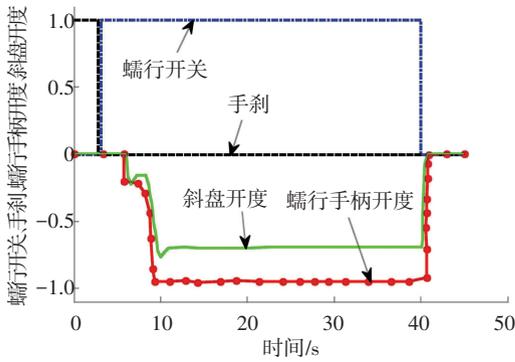


图 9 后退蠕行模式输入及响应

Fig.9 Input and response in backward creep mode

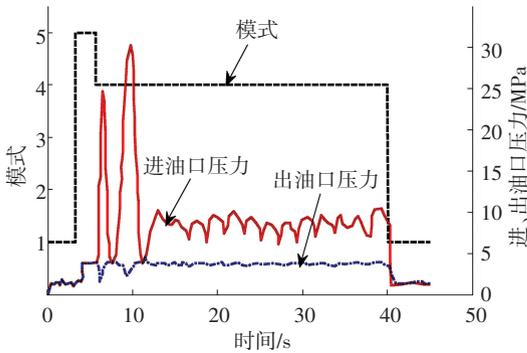


图 10 后退蠕行模式系统压力

Fig.10 System pressure in backward creep mode

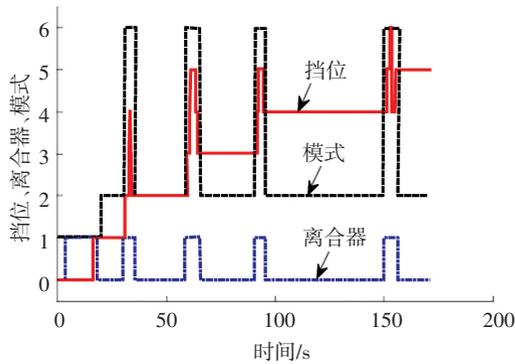


图 11 前进助力和旁通模式挡位识别

Fig.11 Gear recognition in forward assistance and bypass modes

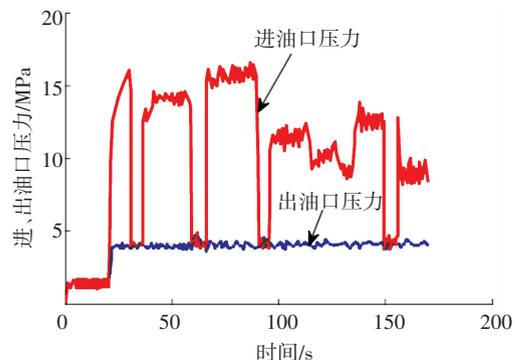


图 12 前进助力和旁通模式系统压力

Fig.12 System pressure in forward assistance and bypass modes

如图 11 所示,踩下离合器换挡过程中,系统自动进入旁通模式,液压控制单元能正确识别挡位及离合器信息,此时泵出油口泄油,进油口压力降低至与出油口压力相同,如图 12 所示.

3.4 后退助力模式

后退助力模式测试曲线如图 13 所示,系统在 10 s 左右由自由轮模式进入后退助力模式,控制策略能正常识别倒挡信号并进行模式切换. 由于倒车车速低且变化不大,后退助力模式下采用了泵排量为定值的控制方式,稳定后,斜盘开度基本不变,验证了算法的有效性.

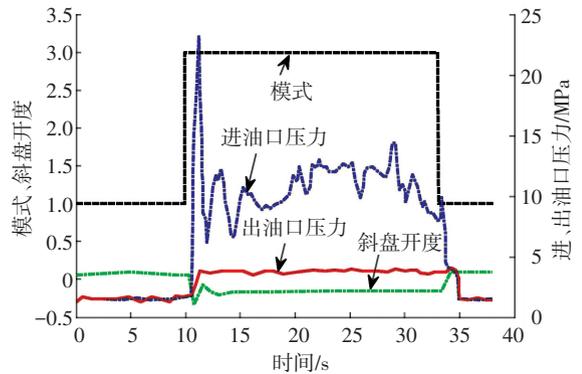


图 13 后退助力模式系统响应

Fig.13 System response in backward assistance mode

从车辆由前进蠕行进入后退蠕行模式的试验曲线(图 10),以及系统在进入后退助力时的试验曲线(图 13)可以看出,系统前进油路压力有较大超调. 两超调均出现在由前进切换至倒车的情况下,液压轮毂马达前轮辅助驱动系统动力作用方向的转换所引起的负载冲击是导致油路压力超调的主要原因. 该压力的变化并不是很大,路试过程中对车辆和驾驶感觉并没有造成较大影响,后续实验需要更进一步完善控制来优化系统输出的动态特性,使系统更加稳定地工作于复杂多变的工况.

4 结 论

1)为了提升传统后驱重型牵引车在坏路面上的通过性和动力性,在原车结构基础上增加了液压轮毂马达前轮辅助驱动系统,基于该系统开发了工程化的整车动力系统控制策略并进行了实车试验,验证了液压辅助驱动方案的可行性和所提控制策略的有效性,为液压混合动力系统的深入研究奠定了基础,为提升我国重型商用车的产品竞争力提供了重要的实践指导.

2)在原后驱结构基础上增加的前轮辅助液驱系统及相应的控制策略能够实现合理的分时四驱且干扰后驱系统,保证车辆的行驶安全性,在坏路面

上提高通过性,同时不影响好路面上的经济性行驶。

3)控制策略能够准确识别驾驶员操作意图,适时地启动或关闭液驱系统,实现液压单独驱动(爬行)、传统车(自由轮)、联合驱动(助力)等多种模式,且各模式间相互切换平稳迅速。爬行模式下,变量泵排量能够良好跟随爬行手柄开度,实现车速控制;助力模式下,系统通过识别驾驶员的换挡动作自动进入旁通模式,保证了换挡平顺性。

4)实车试验中发现的由前进变为倒车过程中油路压力冲击现象为液压混合动力汽车的工程化应用指出了优化方向。

参考文献

- [1] 杨再舜. 重型卡车市场与产品研析[J]. 汽车与配件, 2014 (4):25
YANG Zaishun. Heavy truck market and product analysis[J]. Automobile & Parts, 2014 (4):25.
- [2] 管欣, 卢萍萍, 詹军, 等. 多轴全轮驱动车辆动力传动系模型的建立与应用[J]. 汽车工程, 2011 (3): 183
GUAN Xin, LU Pingping, ZHAN Jun, et al. Modeling and application of powertrain model for multi-axle all-wheel-drive vehicle[J]. Automotive Engineering, 2011 (3): 183
- [3] 金元山. 汽车全轮驱动系统解析[J]. 汽车实用技术, 2016(8):58
JIN Yuanshan. Automobile AWD analysis[J]. Automobile Practical Technology, 2016(8): 58
- [4] 李相华. 重型牵引车液压轮毂马达系统辅助驱动与制动控制[D]. 长春:吉林大学, 2015.
LI Xianghua. Auxiliary drive and brake control of hydraulic hub-motor auxiliary system for the heavy tractor[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [5] TRIET H, KYOUNG K A. Design and control of a closed-loop hydraulic energy-regenerative system[J]. Automation in Construction, 2011(22): 444
- [6] TRIET H, KYOUNG K A. Modeling and simulation of hydrostatic transmission system with energy regeneration using hydraulic accumulator [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24 (5): 1163
- [7] MOLLA S, SILL J, AYALEW B. Hydrostatic wheel drives for vehicle stability control[C]//SAE 2010 World Congress and Exhibition. Detroit: SAE International, 2010: 187. DIO: 10.4271/2010-01-0105
- [8] TOSHIYUKI H, NORIHIRO I, KOJI I, et al. Four-wheel Drive Vehicle:US2005/0230171A1[P].2005-10-20
- [9] KIMITAKA N, HAJIME K, KEIJI K, et al. Development of a motor-assisted 4WD system for small front-wheel-drive vehicles [J]. JSAE Review ,2003,24(4):417
- [10] 张晋华. 矿用前桥静液辅助驱动系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
ZHANG Jinhua. Research on the hydrostatic auxiliary drive of front axle for mining trucks[D].Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016
- [11] 赵晓红. 液压驱动前桥技术以及卡车创新思路[J]. 汽车与配件, 2013 (8):50
ZHAO Xiaohong. Technology of hydraulic drive front axles and truck innovation[J].Automobile & Parts, 2013(8):50
- [12] 薛文祥. 4X2 轻松变成 4X4 雷诺 OptiTrack IAA 首发 [J/OL]. 汽车之家, [2010-09-25]. <http://www.360che.com/tech/100925/11426.html>
XUE Wenxiang. 4X2 easily becomes 4X4 renaul OptiTrack IAA starting [J/OL]. Car Home, [2010-09-25]. <http://www.360che.com/tech/100925/11426.html>
- [13] 卡车之家. 汉诺威车展: 博世展示卡车技术发展趋势 [EB/OL]. [2012-09-26]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_607c909d0102ea6h.html.
Truck House. Hanover motor show: Bosch shows the development trend of truck technology [EB/OL]. [2012-09-26]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_607c909d0102ea6h.html.
- [14] 李胜, 宋大风, 曾小华, 等. 重型卡车轮毂马达液压驱动系统建模与仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4):10
LI Sheng, SONG Dafeng, ZENG Xiaohua, et al. Modeling and simulation of hydraulic wheel motor propulsion system for heavy truck [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4):10
- [15] 李高志. 轮毂液驱重型车辆辅助驱动与再生制动控制算法研究[D]. 长春:吉林大学, 2016
LI Gaozhi. Auxiliary drive and regenerative brake control algorithm research of hub-motor hydraulic driving heavy vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2016
- [16] 曾小华, 李文远, 宋大风, 等. 重型商用车轮毂液驱系统的驱动特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(4):1009
ZENG Xiaohua, LI Wenyuan, SONG Dafeng, et al. Driving performance of hub-motor hydraulic driving system for heavy commercial vehicles [J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2017, 47(4): 1009. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201704001
- [17] 李文远. 轮毂液混混合动力车辆分层协调控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018
LI Wenyuan. Research on Hierarchical Coordinated Control Strategy for Hub-motor Hydraulic Hybrid Vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2018
- [18] MENG Fei, SHI Peng, KARIMI H R, et al. Optimal design of an electro-hydraulic valve for heavy-duty vehicle clutch actuator with certain constraints [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2016, s(68/69):491
- [19] TU H C, RANOW M B, WANG Meng, et al. Design, modeling, and validation of a high-speed rotary pulse-width-modulation on/off hydraulic valve[J]. Journal of dynamic systems, measurement, and control, 2012, 134(6): 061002. DOI:10.1115/1.4006621
- [20] 贺辉. 重型卡车轮毂马达液压驱动系统建模与控制策略研究 [D]. 长春:吉林大学, 2014
HE Hui. Study on modeling and control strategy of hydraulic in-wheel motor drive system for heavy truck [D]. Changchun: Jilin University, 2014

(编辑 杨波)