

# 集成式电子液压制动系统的复合制动协调控制

余卓平<sup>1,2</sup>, 史彪飞<sup>1,2</sup>, 熊璐<sup>1,2,3</sup>, 韩伟<sup>1,2</sup>, 舒强<sup>3</sup>

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学新能源汽车工程中心, 上海 201804; 3. 上海同驭汽车科技有限公司, 上海 201806)

**摘要:** 在电动汽车复合制动过渡工况中, 针对液压制动力与电机制动力配合不好造成的冲击度问题, 提出了双闭环反馈和电机力修正的协调策略. 其中双闭环反馈策略依靠电机力来补偿液压系统的液压力跟踪误差, 电机力修正策略的作用是让电机在过渡工况下始终具有补偿能力. 结合集成式电子液压制动系统(I-EHB)进行仿真及硬件在环试验, 试验结果表明所提出的策略能大幅减小制动力切换时的冲击度, 提高车辆制动舒适性.

**关键词:** 复合制动; 集成式电子液压制动系统; 过渡工况; 冲击度

**中图分类号:** U461.1

**文献标志码:** A

## Coordinated Control of Hybrid Braking Based on Integrated-Electro-hydraulic Brake System

YU Zhuoping<sup>1,2</sup>, SHI Biaofei<sup>1,2</sup>, XIONG Lu<sup>1,2,3</sup>, HAN Wei<sup>1,2</sup>, SHU Qiang<sup>3</sup>

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. New Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Tongyu Automotive Technology Co., Ltd., Shanghai 201806, China)

**Abstract:** In the transitional conditions of hybrid braking of electric vehicle, for the impact caused by the poor cooperation between the hydraulic braking force and the motor braking force, a coordination strategy of double closed-loop feedback and motor force correction was proposed. The double closed-loop feedback strategy relies on the motor force to compensate for the tracking error of hydraulic pressure of the hydraulic brake system, the purpose of the motor force correction strategy is to guarantee the motor to have the compensation capability under all transient conditions. The simulation and hardware in-loop test are carried out based on the integrated-electro-hydraulic brake system (I-EHB). The test results show that the proposed strategy can significantly reduce the impact degree in the braking force switching conditions and

improve the vehicle braking comfort.

**Key words:** hybrid braking; integrated-electro-hydraulic brake system; transitional condition; impact degree

研究表明, 一辆常年在城市行驶的车辆大约有 30%~50% 的能量在制动过程中以热的形式耗散掉<sup>[1]</sup>. 而电驱车辆依靠其配备的复合制动系统可以大幅回收这部分能量, 改善车辆的经济性<sup>[2]</sup>. 复合制动系统一般包括电机制动力系统和液压制动力系统, 车辆的制动需求优先由电机再生制动提供, 当电机制动力不足时, 液压制动介入<sup>[3]</sup>. 然而, 受到电机高速时制动力有限以及低速时不能提供再生制动力的限制, 复合制动会出现液压制动系统介入制动、液压制动系统撤出制动以及低速时再生制动力撤出制动的三种过渡工况<sup>[4]</sup>. 由于电机的响应速度快, 液压系统的响应速度较电机慢, 导致复合制动在过渡工况下, 会产生较大的制动冲击度(即制动减速度的导数), 制动的平顺性与舒适性有所恶化<sup>[5]</sup>.

文献[6]基于制动减速度和冲击度提出了“不舒适度指数”来描述制动平顺性和舒适性. 其中不舒适度指数为 1, 表示所有的乘客都感到舒适; 不舒适度指数为 5, 表示所有的乘客都感到不舒适; 不舒适度指数为 3, 表示一般的乘客都感到舒适. 图 1 给出了部分制动减速度和冲击度范围下的不舒适度指数.

目前, 对复合制动领域的研究主要集中在提出制动力分配策略, 在保证制动稳定性前提下尽可能多地回收制动能量, 而对制动过程中车辆减速度、冲击度等状态的研究不多, 致使众多的能量回收策略无法体现实效. 因此, 对于复合制动过渡工况控制的研究有较高的实际应用需求和价值.

对制动力切换的过渡工况问题, Numasato 等<sup>[7]</sup>对液压制动系统与电机的响应特性进行校正, 解决

收稿日期: 2018-09-07

基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFB0105804); 上海汽车工业科技发展基金项目(1839); 上海市科学委员会基金(16DZ1100701)

第一作者: 余卓平(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车系统动力学与控制. E-mail: yuzhuoping@tongji.edu.cn

通信作者: 熊璐(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车系统动力学与控制. E-mail: xiong\_lu@tongji.edu.cn

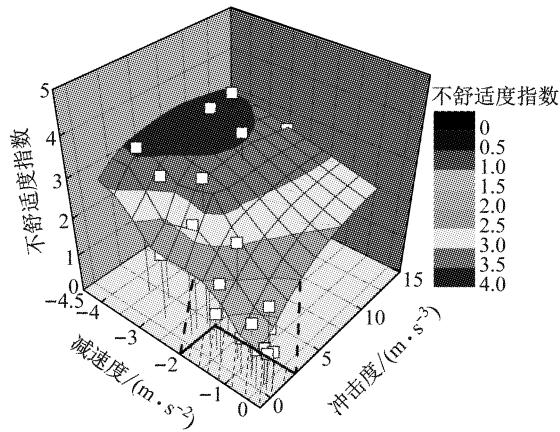


图 1 不舒适度指数  
Fig.1 Discomfort index

两者响应特性上的差异,但同时导致了系统整体的响应滞后. TERUO<sup>[8]</sup>通过搭建滤波器,让电机额外响应制动力需求的高频信号,但由于高频信号所占原信号的比例不大,导致该策略控制效果不理想. 朱智婷等<sup>[9]</sup>提出了一种包含制动力分配修正和电动力补偿模块的协调控制策略,制动减速度跟踪误差明显减小,但该策略仅停留在仿真阶段. 清华大学吕辰<sup>[10]</sup>基于所开发的具有协调式能量回馈功能的制动防抱死系统(energy-regeneration anti-lock brake system, EABS),提出了回馈制动耦合非线性主动补偿控制算法,令驱动电机对轴系弹性及齿侧间隙耦合等非线性环节进行主动补偿,仿真结果表明制动过程中冲击度减小了 67%,但没有做进一步的试验验证.

电子液压制动系统(electro-hydraulic brake system, EHB)是汽车液压制动系统的发展趋势,具有响应快速、制动力精确控制、易于实现再生制动等突出优点<sup>[11]</sup>. 本文基于文献<sup>[12]</sup>提出的集成式电子液压制动系统(integrated-electro-hydraulic brake system, I-EHB),并采用液压力控制算法<sup>[13-14]</sup>对复合制动过渡工况冲击度进行研究. 第 1 节介绍 I-EHB 系统的结构和工作原理. 第 2 节介绍复合制动总体策略. 第 3 节提出了双闭环反馈和电动力修正的协调策略. 第 4 节对液压制动系统介入制动和再生制动力撤出制动两种过渡工况进行了仿真和台架试验,证明了控制策略的有效性.

## 1 集成式电子液压制动系统

I-EHB 由制动踏板单元、液压驱动单元、制动执行单元和控制系统 4 部分组成,如图 2 所示,图中,

ECU 为电控单元,DC/AC 为逆变器,ESC 为电子稳定性控制单元,MC1、MC2 为主缸的两个腔. 其中制动踏板单元提供驾驶员的制动踏板感觉,包括制动踏板、次级主缸、踏板模拟器、踏板模拟器电磁阀(电磁阀 3)、次级主缸电磁阀(电磁阀 1);液压驱动单元为系统提供动力源,包括电机和减速传动机构等;制动执行单元与传统的制动系统结构保持一致,包括主缸、液压管路等. 解耦缸实现系统解耦,即实现正常制动时,制动踏板与制动主缸不直接相连. 正常模式下,驾驶员踩下制动踏板,次级主缸的制动液注入到踏板模拟器,产生踏板感觉,同时制动踏板推杆推动解耦缸活塞压缩解耦缸液压腔,此时电磁阀 2 处于打开状态,使得解耦缸内制动液流入储液罐,如此实现了制动踏板不再直接与制动主缸相连. 工作时,电子液压制动系统根据上层制动力分配策略计算出的目标液压力以及压力传感器反馈的实际液压力构成压力闭环,时刻控制着电机应产生相应的力矩大小,并经过减速机构作用在制动主缸上<sup>[14]</sup>,控制框图如图 3 所示.

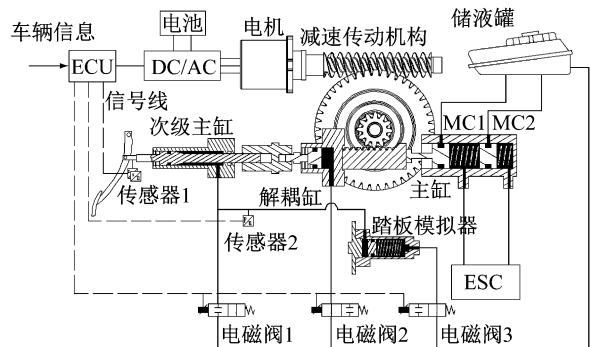


图 2 集成式电子液压制动系统(I-EHB)  
Fig.2 Integrated-electro-hydraulic brake system (I-EHB)

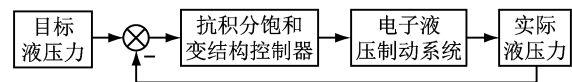


图 3 I-EHB 液压力控制框图

Fig.3 Hydraulic pressure control block diagram of I-EHB

## 2 复合制动总体策略

复合制动总体策略如图 4 所示,制动力分配策略通过车辆信息和电池信息计算出使能量回收最大化的目标电机力和目标液压力并分别作用到制动电机和电子液压制动系统,产生的电机制动力和液压制动力共同作用使车辆减速,同时电机通过再生制

动将产生的电能存入电池,实现能量回收<sup>[15]</sup>。

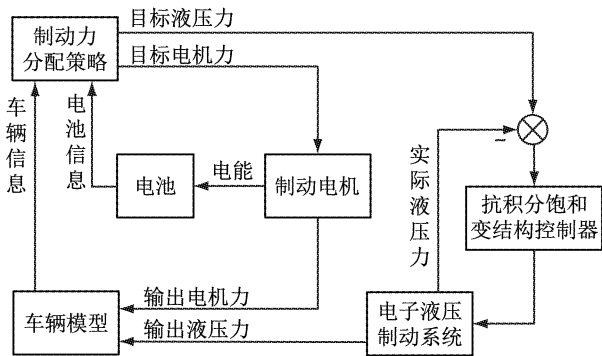


图 4 复合制动总体策略

Fig.4 General strategy of hybrid braking

### 3 双闭环反馈和电机力修正策略

#### 3.1 双闭环反馈控制策略

液压力双闭环反馈协调策略,旨在由电机再生制动力直接对目标液压力与实际制动液压力之间的偏差进行补偿,以期使总制动力在过渡工况下更接近总需求制动力,从而改善液压系统的响应速度慢与超调带来的制动冲击.从控制角度,由于 I-EHB 系统自身实行的是液压力闭环控制<sup>[16]</sup>,在此基础上再将目标液压力与实际制动液压力求差后成为电机需求制动力的一部分,由此形成了对液压力的双闭环反馈.制动液压力双闭环反馈协调策略的具体框图如图 5 所示.

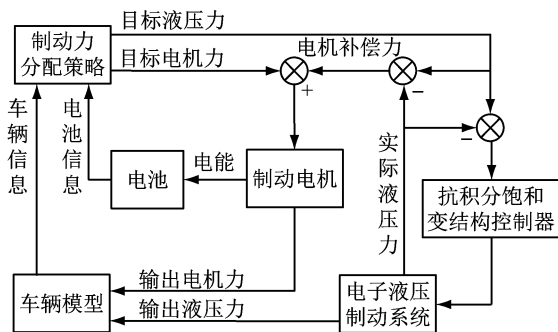


图 5 制动液压力双闭环反馈协调策略框图

Fig.5 Block diagram of the hydraulic pressure double closed-loop feedback strategy

在引入制动液压力双闭环反馈协调策略后,电机实时响应上层制动力分配策略计算出的目标电机力以及 I-EHB 的液压力跟踪误差,使总实际制动力在过渡工况下更接近总需求制动力.

#### 3.2 电机力修正策略

对于制动初始阶段,液压力介入的过渡工况,根据制动力分配策略,电机力已经达到了饱和状态,无

法对液压力进行协调补偿.为了提升电机在液压力介入工况下的补偿能力,添加电机力修正策略,如图 6 所示.

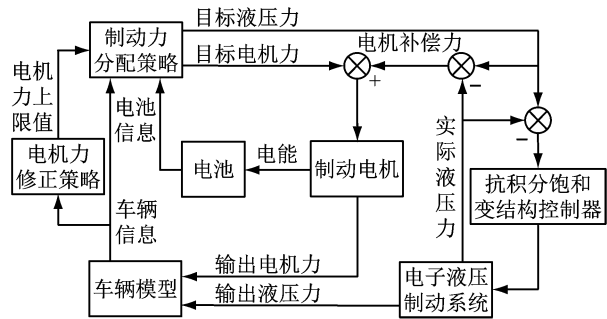


图 6 电机力修正策略框图

Fig.6 Block diagram of the motor force correction strategy

电机力修正策略作用如下:车辆检测制动需求状态,若制动需求在增加,并且量纲一制动强度小于 0.1 时,此时液压力即将介入,令制动力分配策略的电机力上限值低于最大值,从而使得液压力介入时由于滞后产生的不足制动力可以由电机协调补偿;当制动需求仍在增加,且制动强度在 0.1~0.15 时,过渡过程从开始到逐渐进入尾声,制动力分配策略中的电机力上限值逐步恢复到最大值,以回收更多能量;若制动需求维持在某一确定值,则分配策略的电机力上限值始终为最大值,策略流程图如图 7 所示.此外,在再生制动低速撤出工况下,电机力应提前一段时间退出,以给电机响应电机补偿力提供力矩空间.这样就保证了电机在各个过渡工况下始终具有补偿能力.

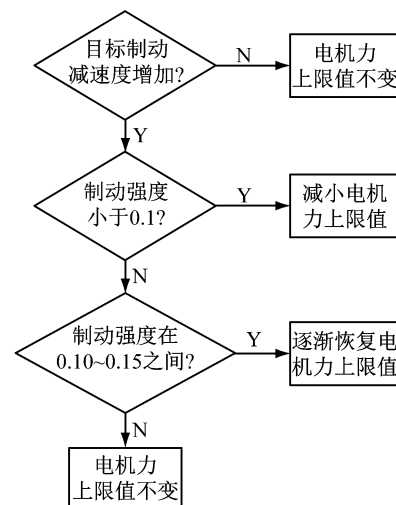


图 7 电机力修正策略流程图

Fig.7 Flow chart of the motor force correction strategy

### 4 仿真与试验

由于液压制动系统介入与液压制动系统撤出的过渡工况类似,本文仅对液压制动系统介入与再生制动力低速撤出两种复合制动过渡工况进行仿真和硬件在环试验验证。

仿真和试验所选取的某电动汽车的整车参数见表 1,驱动形式为双轮毂电机前驱,电机参数见表 2。I-EHB 响应时间为 0.2 s,最大建压能力为 200 bar (1 bar=0.1 MPa)。

表 1 整车参数

Tab.1 Vehicle parameters

整车质量/kg	轴距/m	前轴到质心距/m	后轴到质心距/m	车轮滚动半径/m	质心高度/m	迎风面积/m <sup>2</sup>	风阻系数
1 180	2.40	1.18	1.22	0.292	0.54	1.966	0.284

表 2 电机参数

Tab.2 Motor parameters

电机基速/(r·min <sup>-1</sup> )	电机最高转速/(r·min <sup>-1</sup> )	电机峰值功率/kW	电机峰值扭矩/(N·m)	电机低速临界转速/(r·min <sup>-1</sup> )	电机响应时间/s
480	1 000	7.54	150	80	0.1

仿真和试验工况为:初始车速为 40 km·h<sup>-1</sup>,路面附着系数 0.8,车辆制动强度从 0 开始逐步增长到 0.4 并保持不变,直到车速减为 0。

#### 4.1 仿真结果及分析

基于 Simulink/AMESim/CarSim 三个软件对上述工况进行联合仿真,图 8 为无过渡过程协调策略的仿真结果。在液压力建立的阶段 A,车辆的总制动力落后于需求的总制动力,实际制动减速度也落后于目标制动减速度,从而产生了制动冲击度,在 A 段处其数值上为-34.77 m·s<sup>-3</sup>。而在 B 段,制动强度维持在中等制动强度后,当车速降到极限值时,再生制动力撤出。此时由于总的制动强度需求不变,电机制动力快速退出,液压制动力的需求快速上升,导致液压制动力的响应产生了一定的超调量,使得 B 处的制动冲击度达到了 78.31 m·s<sup>-3</sup>。

添加策略后的仿真结果如图 9 所示,从图中可以明显看出,制动初始阶段,实际减速度能够很好地跟踪需求减速度,制动冲击度降低至-25.66 m·s<sup>-3</sup>,减小了 26.2%;再生制动低速撤出阶段的制动减速度也基本没有了突变。制动冲击度降低至-39.96 m·s<sup>-3</sup>,减小了 49.0%。有无策略的仿真结果对比见表 3。

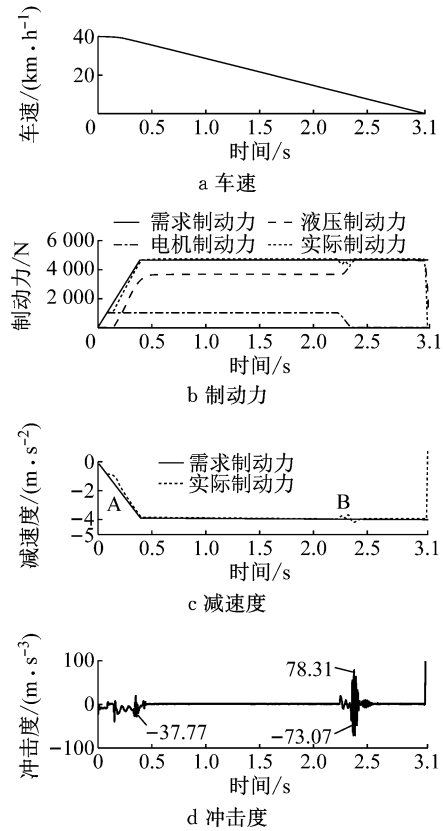


图 8 无策略仿真结果

Fig.8 Simulation result without control strategy

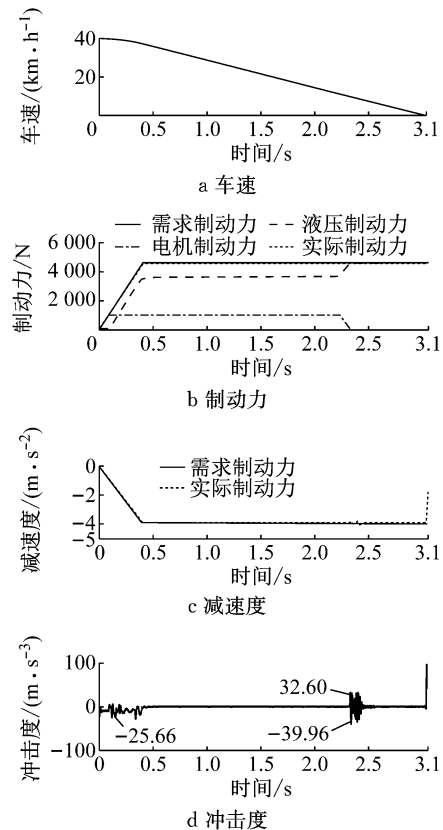


图 9 有策略仿真结果

Fig.9 Simulation result with control strategy

表 3 过渡工况冲击度仿真结果

Tab.3 Simulation results of the transitional conditions

	液压力介入时冲击度/( $m \cdot s^{-3}$ )	再生制动撤出时冲击度/( $m \cdot s^{-3}$ )
无策略	-34.77	78.31
有策略	-25.66	-39.96
冲击度减小率/%	26.2	49.0

4.2 试验结果及分析

基于图 10 的硬件在环试验平台对所提出策略进行试验验证,其中,CAN 为控制器局域网,用来传递数据;INCA 软件用于在线观测和标定。

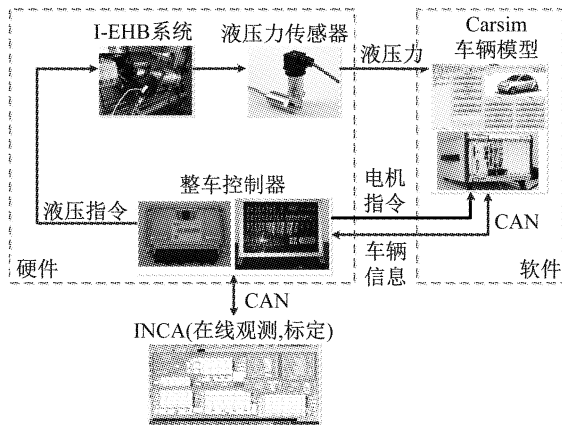


图 10 硬件在环实验平台结构图

Fig.10 Diagram of the hardware-in-loop(HIL) test platform

图 11 为无过渡过程协调策略的试验结果,可以看出,在液压开始介入时,由于液压系统响应时间较慢,导致总的制动力无法满足制动需求,产生制动失效的感觉,可能对驾驶员造成一定的恐慌,最大冲击度达  $28.26 m \cdot s^{-3}$ . 之后随着制动时间的增长,车速下降到一定时,电机制动力退出,液压制动力介入,同样由于系统的响应时间问题,液压力没能及时补充由于电机力退出产生的不足制动力,导致制动强度突然减小,冲击度高达  $-60.94 m \cdot s^{-3}$ ,这会使得驾驶员产生制动失效的错觉,影响制动感觉。

添加策略后的试验结果如图 12 所示,随着制动强度的增加,虽然实际制动强度仍略小于目标值,但两者的增长幅度相同,这样避免了制动时出现较大的冲击,同时不会让驾驶员有制动失效的错觉,能够很好保证制动感觉,此时冲击度在  $16 m \cdot s^{-3}$  左右波动,最大值为  $18.39 m \cdot s^{-3}$ ,减小了 34.9%,;再生制动低速撤出阶段,最大冲击度减小至  $16.84 m \cdot s^{-3}$ ,减小了 72.3%. 有无策略的试验结果对比见表 4.

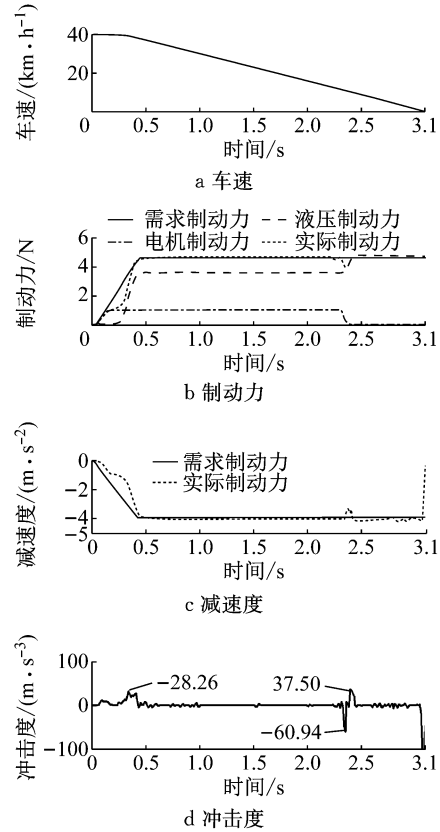


图 11 无策略试验结果

Fig.11 HIL test result without control strategy

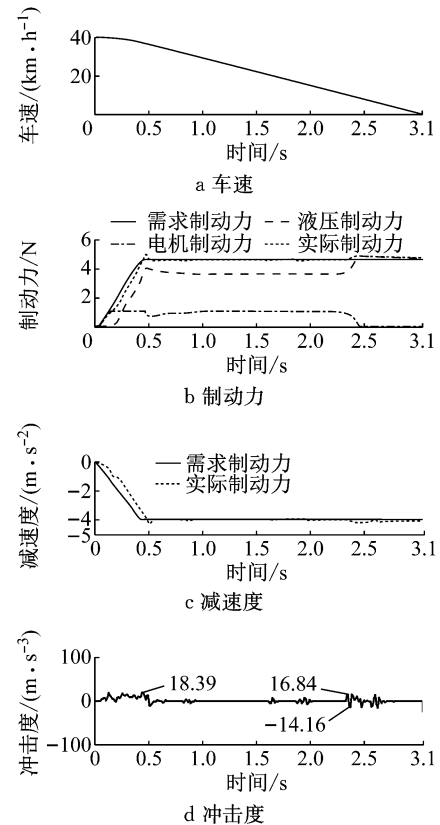


图 12 有策略试验结果

Fig.12 HIL test result with control strategy

表 4 过渡工况冲击度试验结果

Tab.4 HIL test results of the transitional conditions

	液压力介入时冲击度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-3})$	再生制动撤出时冲击度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-3})$
无策略	28.26	-60.94
有策略	18.39	16.84
冲击度减小率/%	34.9	72.3

## 5 总结

基于集成式电子液压制动系统,针对复合制动过渡工况冲击度问题,提出了双闭环反馈和电机力修正的协调策略,通过仿真和硬件在环试验,证明了所提出的策略能有效减小复合制动过渡工况冲击度,使得液压力介入时的冲击度从最初的  $28.26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-3}$  降低到  $18.39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,减小了 34.9%;再生制动低速撤出时的冲击度从最初的一  $60.94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-3}$  降低到  $16.84 \text{ m} \cdot \text{s}^{-3}$ ,减小了 72.3%,提高了车辆制动舒适性,为该策略的实际应用提供了参考依据。

### 参考文献:

- [1] GAO Y, CHEN L, EHSANI M. Investigation of the Effectiveness of regenerative braking for EV and HEV[R]. Costa Mesa; SAE, 1999.
- [2] SAKAI A, SASAKI Y, OTOMO A. Toyota braking system for hybrid vehicle with regenerative system[J]. Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan, 1998, 52(11):33.
- [3] GOTO Y. Next-generation environmentally friendly vehicles development and commercialization project (3rd stage) in Japan[R]. Baltimore; SAE, 2013.
- [4] CHIARA F, CANOVA M. A review of energy consumption, management, and recovery in automotive systems, with considerations of future trends [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2013, 227(6):914.
- [5] CROLLA D A, CAO D. The impact of hybrid and electric powertrains on vehicle dynamics, control systems and energy regeneration [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(S1):95.
- [6] MUTOH N, TAKITA K. A control method to suitably distribute electric braking force between front and rear wheels in electric vehicle systems with independently driven front and rear wheels[C/CD]// Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference 2004. 39th IAS Annual Meeting. Seattle; IEEE, 2004.
- [7] NUMASATO H, TOMIZUKA M. Settling control and performance of a dual-actuator system for hard disk drives[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 8(4):431.
- [8] TERUO O. Braking performance improvement for hybrid electric vehicle based on electric motor's quick torque response [C]// Proceedings of the 19th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition. Busan; Society of Automotive Engineers, 2002:1285-1296.
- [9] 朱智亭,余卓平,熊璐. 电动汽车复合制动系统过渡工况协调控制策略[J]. 哈尔滨理工大学学报,2014,39(9):1135. ZHU Zhiting, YU Zhuoping, XIONG Lu. Coordination control strategy for transitional condition of hybrid braking system in electric vehicle [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2014,39(9):1135.
- [10] 吕辰. 电驱动车辆回馈制动力与摩擦制动力动态耦合控制[D]. 北京:清华大学,2015. LÜ Chen. Dynamic coupling control of regenerative braking force and frictional braking force of electric drive vehicles[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [11] 余卓平,韩伟,徐松云,等. 电子液压制动系统液控制发展现状综述[J]. 机械工程学报,2017,53(14):1. YU Zhuoping, HAN Wei, XU Songyun, et al. Review on the present situation of hydraulic pressure control of electro-hydraulic braking system [J]. Journal of Mechanical Engineering of China, 2017,53(14):1.
- [12] YU Z, XU S, XIONG L, et al. An integrated-electro-hydraulic brake system for active safety[R]. Detroit; SAE, 2016.
- [13] 余卓平,韩伟,熊璐. 集成式电子液压制动系统液压力变结构控制[J]. 汽车工程,2017,39(1):52. YU Zhuoping, HAN Wei, XIONG Lu. Hydraulic force variable structure control of integrated electro-hydraulic braking system [J]. Automotive Engineering, 2017,39(1): 52.
- [14] 余卓平,韩伟,熊璐,等. 基于 Byrnes-Isidori 标准型的集成式电子液压制动系统液压力控制[J]. 机械工程学报,2016,52(22):92. YU Zhuoping, HAN Wei, XIONG Lu, et al. Hydraulic force control of integrated electro-hydraulic braking system based on byrnes-isidori standard [J]. Journal of Mechanical Engineering of China, 2016,52(22):92.
- [15] 韩伟,熊璐,李彧,等. 基于集成式电子液压制动系统的横摆稳定性控制策略研究[J]. 机械工程学报,2017,53(24):161. HAN Wei, XIONG Lu, LI Yu, et al. Study on control strategy of yaw stability based on integrated electro-hydraulic braking system[J]. Journal of Mechanical Engineering of China, 2017, 53(24):161.
- [16] 余卓平,徐松云,熊璐,等. 基于颤振补偿的集成式电子液压制动系统控制[J]. 同济大学学报(自然科学版),2015, 43(7):1063. YU Zhuoping, XU Songyun, XIONG Lu, et al. Control of integrated electro-hydraulic braking system based on flutter compensation [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015,43(7):1063.