

一种线控制动系统的方案设计及仿真

陈志强,常思勤

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:基于实验室自行研制的直线执行器单元,提出了一种新的车辆线控制动系统的设计方案,系统由电磁直线执行器驱动的高压液压源以及实现增压、保压和降压功能的三位高速开关阀等构成。搭建了线控制动系统的联合仿真模型,通过 AMESim 与 Matlab/Simlink 的联合仿真和正交试验确定了系统中三位高速开关阀的响应时间与阀口大小两个关键设计参数。验证了该线控制动系统的 ABS 性能,仿真结果表明了此系统能够提供快速、稳定的制动力,仿真过程中未发生抱死情况,车轮具有良好的制动性能,进一步说明了此线控制动系统的可靠性。

关键词:线控制动系统;联合仿真;三位高速开关阀;正交试验

中图分类号:U463.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)05-0087-04

Design Scheme and simulation of Wire-control Brake System

CHEN Zhiqiang, CHANG Siqin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Based on the linear actuator unit developed by the laboratory, a new design scheme of wire-control brake system for vehicle is proposed. The co-simulation model of this system was established, and the response time and valve port size of three high-speed switching valves in the system are determined by the co-simulation and orthogonal test of AMESim and Matlab/Simlink. The ABS performance of this system is verified. The simulation results show that this system can provide fast and stable braking force, and the wheel has good braking performance during the simulation process. The reliability of this system is further verified.

Keywords: wire-control brake system; co-simulation; three high speed on-off valve; orthogonal test

0 引言

车辆制动系统是保证车辆安全行驶的重要系统之一,对于汽车安全的技术研究,各大汽车公司以及国内外学者从未停止过。当前,应用于车辆上的制动系统是技术已经相当成熟的液压制动系统。然而,随着车辆安全性能要求的逐步提高,传统的制动系统结构变得相当复杂,并且制造和维护的难度增加,这就推动了简单、全面、可靠制动系统的研究发展。线控制动是近些年来车辆制动系统研究的热点,代表着未来车辆制动系统发展的新方向,其主要包含两个方面:电子液压制动(EHB)与电子机械制动(EMB)。

对于电子液压制动系统,国内外相关企业与学者做了许多突破性的研究。通用汽车、Analogy、BOSCH 等公司在 20 世纪 90 年代就开始研发相关的 EHB 系统样件,并在实车试验中得到了理想的制动效果。经过 20 多年的发展, BOSCH 等主要厂商都陆续有成熟产品面世。国内以学术为主,也对 EHB 做了许多试验研究。文献[1]中建立了七自由度车辆仿真模型,并对所建立系统中的备用制动、常规制动与紧急制动工况下整车的制动性能进行了分析与研究。ZHAO Jian 等人提出一种基于 eboost 的主动制

动力压力控制的四闭环算法。结果表明,所提出的控制算法能保证制动液压力精确跟踪目标值,具有良好的控制性能^[2]。

对于电子机械制动系统,20 世纪 90 年代起, BOSCH、Siemens 和 Continental Teves 等著名车辆电子零配件厂商就开始了对于 EMB 的研发与设计,且做了许多系统的仿真与实车试验的工作。意大利著名制动系统公司布雷博更是研发了一套以电机为基础,通过变速箱来驱动浮动卡钳的线控制动系统,且预计在 2020 年投入批量生产^[3]。国内的吉林大学、清华大学以及同济大学等高校对于 EMB 的研究也作了许多贡献。文献[4]中对于轮毂电机驱动的电动汽车,研发了一整套新型机电制动执行机构。该机构能实现快速制动响应,最大限度地减小磨损差异,提高初始制动力。刘刚则对于 EMB 的设计方法进行研究并且试制了关键的原理样机^[5]。

本文提出了一种以电磁直线执行器驱动的、高压液压源为基础的线控制动系统方案,并且利用 AMESim 及 Matlab/Simulink 两个软件建立了系统方案的联合仿真模型,搭建了基于滑移率门限值控制的 ABS 仿真模型,以及在此基础上研究了与之匹配的三位高速开关阀参数对 ABS 性能的影响,确定了三位高速开关阀的响应时间以及阀口截面积两个重要参数。

基金项目:上海航天科技创新基金项目(SAST2018-107)

第一作者简介:陈志强(1995—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事车辆线控制动系统的研究。

1 系统方案与关键部件原理

1.1 系统方案

本文所提出的线控制动系统布置方案以及整体框架如图1所示。系统整体由踏板模拟器、主控制器、制动系统控制器、高压液源、三位高速开关阀以及蓄能器等组成。其中,主控制器的功能可以根据实际需要情况来确定,只完成车辆制动功能或者完成整车动力学控制功能,在主控制器中集成 EBD/ABS 等控制算法。另外,考虑到制动力的分配以及使系统具有一定程度的冗余性,在前后轴各分配一个高压液源。

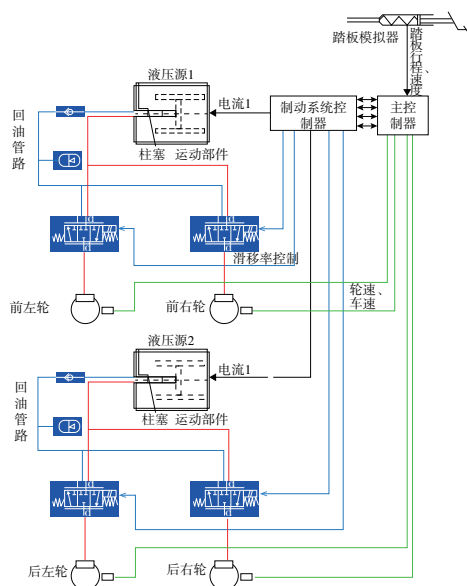


图1 线控制动系统方案

系统进入制动工作模式后的流程如下:1)驾驶员踩踏制动踏板,由踏板感觉模拟器模拟出与传统液压制动系统相同的踏板感觉并反馈给驾驶员;2)系统中主控制器收集制动踏板的行程以及踩踏速度等信息,并以此来识别出驾驶员的制动意图;3)将收集到的信息与制动系统控制器进行数据交换,并且进行计算,由制动系统控制器按照前后轮理想制动力分配曲线给前后轴两个液源提供相应大小的电流;4)在电磁力的作用下推动运动部件以及柱塞往左运动,使液源中制动液升压。最后通过三位高速开关阀来控制制动液流入制动轮缸,实现制动功能。

1.2 关键部件原理

电磁直线执行器将电能转换为电磁力并且避免使用机械转换机构。作为制动单元的动力提供单元,电磁直线执行器的性能直接决定制动单元的性能。其中,执行器所能提供的最大电磁力为 328 N,且已经试制了原理样件并进行了性能测试^[6]。

三位高速开关阀为系统中另一关键部件。两端均由电磁铁控制,以实现系统的增压、保压和减压功能。此外,制动油液经过高速开关阀的流量性能与阀口的形状、入口与出口之间的压力差、阀口的横截面积、制动液黏度以及雷诺数有关,用式(1)表示如下:

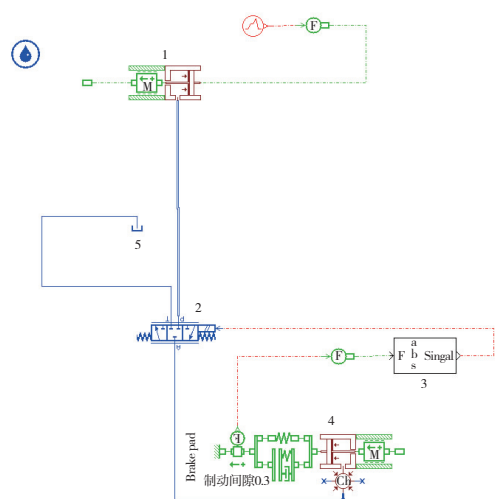
$$Q = C_q A \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}} \tanh\left\{\frac{8A}{x\eta_0\lambda_c} \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}}\right\} \quad (1)$$

其中: C_q 为最大流量系数,受阀口形状的影响; A 为阀口截面积; ρ 为油液的密度; ΔP 为进出制动油液的压差; x 为阀口湿周长度; λ_c 为制动油液流动雷诺系数; η_0 为制动油液的动力黏度。制动液流量雷诺系数选择为 1 000。本次主要模拟研究了高速开关阀响应时间以及阀口横截面积在制动时对系统的影响。

2 联合仿真模型的建立

2.1 AMESim 模型

在本次线控制动系统的研究中,三位高速开关阀是调节轮缸制动压力的重要部件,其动态响应特性在很大程度上决定 ABS 系统的控制性能。为了着重研究开关阀在车辆线控紧急制动 ABS 工作时的特性,将原理图 1 简化为图 2 所示的模型。图中 3 为开关阀控制器,是与 MATLAB/Simulink 联合仿真的接口。



1—柱塞;2—三位三通开关阀;3—控制单元;4—制动轮缸;5—油箱。

图2 系统硬件模型组成

2.2 Simulink 数学模型

Simulink 中搭建的数学模型主要由三部分组成:车辆动力学模型、轮胎模型和滑移率控制模型。

1) 车辆动力学模型

此次仿真模型采用了经典的单轮车辆模型,能够简洁明了地表现车轮的制动情况,并且不用计算车辆的迎风阻力和车轮的滚动阻力,且认为车轮的载荷是恒定值。行驶中的车轮整体受力情况如图 3 所示,由经典力学分析得出车辆动力学方程:

$$M \dot{V} = -F \quad (2)$$

$$I \dot{\omega} = FR - T_b \quad (3)$$

$$F = \mu N \quad (4)$$

式中: M 是单轮车辆的质量,kg; $\dot{V}$ 是车辆行驶时的速度,m/s; F 是车轮的纵向摩擦受力,N; I 是车轮转动惯量,kg·m²; ω 是车轮的角速度,rad/s; R 是车轮的行驶半径,

m ; T_b 是车辆制动器的制动力矩, $N \cdot m$; μ 是轮胎纵向的附着系数; N 是地面对于车轮的支持力, N 。

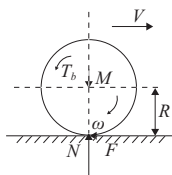


图3 车辆受力分析

由公式建立的仿真模块如图4所示。

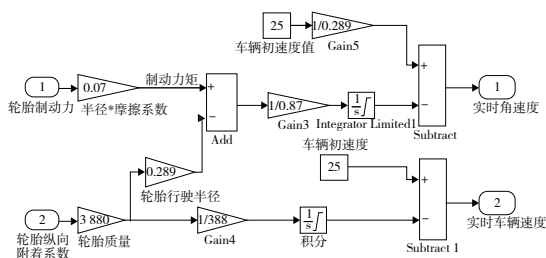


图4 车辆受力仿真模型

2) 轮胎模型

对于目前应用于车辆仿真的轮胎模型, 魔术公式与双线性轮胎模型是最常用的两种。本次采用了应用比较广泛的双线性轮胎模型。数学表达式如式(5)所示。

$$\mu = \begin{cases} \frac{\mu_H}{\lambda_T} \cdot \lambda & \lambda < \lambda_T \\ \frac{\mu_H - \mu_G}{1 - \lambda_T} \cdot \frac{\mu_H - \mu_G}{1 - \lambda_T} \cdot \lambda & \lambda > \lambda_T \end{cases} \quad (5)$$

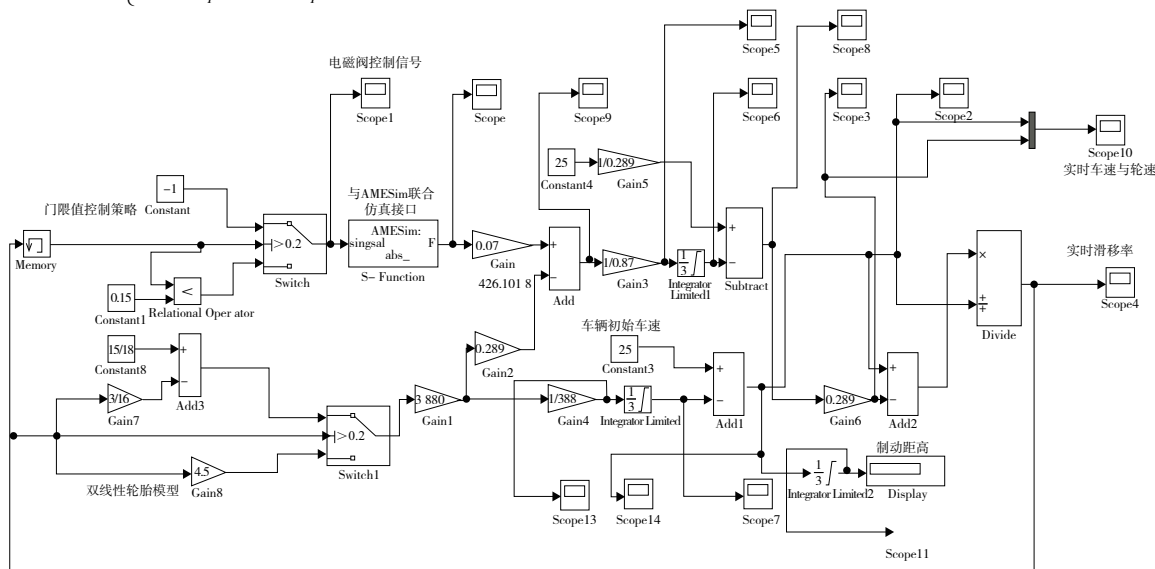


图7 基于滑移率控制系统模型

3 系统 ABS 制动过程仿真分析

针对乘用车, 制动系统的基本要求主要有: 制动性能高、平顺性好以及方向稳定性好。主要的技术参数有车辆制动时间、最大制动距离、车辆制动减速度以及滑移率等。本次

由公式在 Simulink 中搭建的仿真模块如图 5 所示。

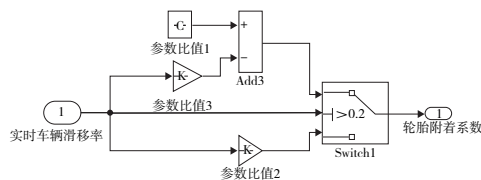


图5 轮胎模型

3) 滑移率控制模型

有许多方法可以控制汽车的滑移率, 典型控制方法有 PID 控制、逻辑门限值控制、模糊 PID 控制等。本次仿真采用的是逻辑门限控制算法, 为了实现车辆良好的制动效果, 将最佳滑移率控制在 0.15~0.20 之间(干燥混凝土路面)。在当前阶段, 逻辑门限控制是应用于车辆上很成熟的技术。

建立的仿真模块如图6所示。

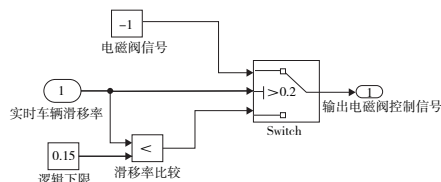


图6 滑移率控制模型

由式(2)~式(5)以及滑移率控制方法, 最终在 Simulink 中建立完整的基于滑移率控制的线控制动系统模型如图7所示。

仿真以某款大众捷达车辆为例, 1/4 质量 $M = 388 \text{ kg}$, 车轮转动惯量 $I = 0.87$, 车轮半径 $R = 0.289 \text{ m}$ 。在干混凝土路面上, 模拟仿真了不同的高速开关阀响应时间以及阀口横截面积在车辆紧急制动时的影响情况。获得车速、轮胎线速度、车辆制动距离和滑移率变动曲线并且进行比较分析, 选择最佳的电磁阀参数。系统其他重要参数如表1所示。

表 1 线控制动系统参数

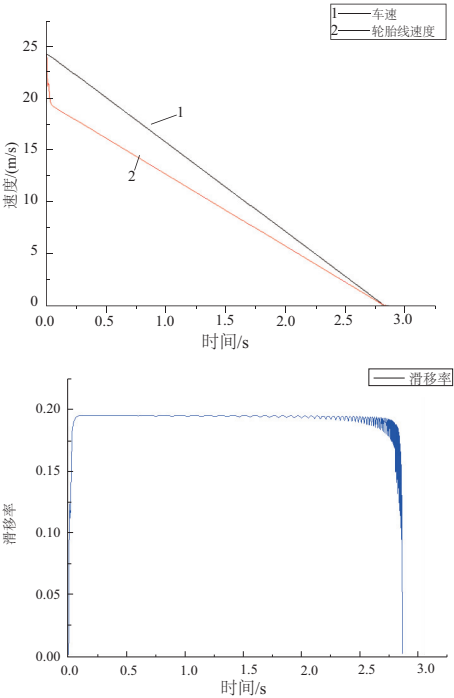
参数	值
最大电磁力/N	328
柱塞直径/mm	6
执行器外径/mm	60
运动部件总质量/g	80.8
液压腔至轮缸管路长度/m	0.5
制动硬管内径/mm	3.2
轮缸活塞直径/mm	38
浮钳制动器初始间隙/mm	0.3
有效制动半径/m	0.1

阀口截面积 A 是高速开关阀的重要性能参数,经过相关文献资料查阅得出开关阀的阀口面积一般取值为 $0.5\text{ mm}^2\sim 1.3\text{ mm}^2$,对于三位高速开关阀的验证过程,选取了几个具有代表性的值进行仿真。 A 的值依次取为 0.5 mm^2 、 1 mm^2 、 1.3 mm^2 。此外,仿真过程当中对于三位高速开关阀采用的不同响应时间为: 1.5 ms 、 1 ms 、 0.5 ms ,轮缸压力取值为: 11 MPa 、 11.5 MPa 、 12 MPa 。对于阀口截面积、响应时间以及轮缸压力在联合仿真下作了 3 因素 3 水平的正交试验,选用 $L_9(3^4)$ 正交表,结果如表 2 所示。表中 K_1 、 K_2 、 K_3 的值分别为 1、2、3 水平下的制动距离之和。

表 2 正交试验结果

试验号	试验因素				试验结果	
	阀口截面积/ mm^2	响应时间/ ms	第 3 因素	轮缸压力/ MPa	制动时间/ s	制动距离/ m
1	1(0.5)	1(1.5)	1	1(11)	3.46	43.59
2	1(0.5)	2(1.0)	2	2(11.5)	3.35	42.2
3	1(0.5)	3(0.5)	3	3(12)	3.16	39.83
4	2(1.0)	1(1.5)	2	3(12)	3.01	37.89
5	2(1.0)	2(1.0)	3	1(11)	3.20	40.24
6	2(1.0)	3(0.5)	1	2(11.5)	2.95	37.15
7	3(1.3)	1(1.5)	3	2(11.5)	3.24	40.78
8	3(1.3)	2(1.0)	1	3(12)	2.87	36.09
9	3(1.3)	3(0.5)	2	1(11)	2.91	36.69
K_1	125.62	122.26		120.52		
K_2	115.28	118.53		120.13		
K_3	113.56	113.67		113.81		
$K_1/3$	41.87	40.75		40.17		
$K_2/3$	38.43	39.51		40.04		
$K_3/3$	37.85	37.89		37.94		

通过正交表分析可以得出,阀口截面积与轮缸压力在选择范围内越大,制动距离越短,以截面积 1.3 mm^2 ,轮缸压力为 12 MPa 最好。另外,只从响应时间因素分析,响应时间越短,制动效果越好,但从整体数据分析,在阀口截面积为 1.3 mm^2 ,轮缸压力控制为 12 MPa ,响应时间为 1 ms 时,制动时间最短为 2.87 s ,制动距离也最短为 36.09 m ,制动结果最为理想,此因素下的仿真结果如图 8 所示。从图中可发现车辆的滑移率维持于理想值(0.2)附近,车辆在制动过程当中也未发生抱死拖滑现象,车轮具有良好的制动性能。综合分析结果,最终三位高速开关阀响应时间选定为 1 ms ,阀口截面积为 1.3 mm^2 。另外,与现有的制动系统相比,一方面,该系统省去了传统液压制动系统“主缸升压—传递压力—轮缸升压”的制动模式,使制动响应更加迅速,从仿真结果可以看出,制动减速度迅速达到最大值所需时间为 0.1 s 左右(一般现有制动系统需要 $0.15\sim 0.3\text{ s}$),缩短了制动器起作用的时间。在现有制动系统情况下,此款捷达汽车官方的制动距离为 40.86 m (此系统仿真结果为 36.09 m),缩短了制动距离,提高了安全性能。另一方面,此系统取消了常规制动系统中真空助力器以及部分液压管路,使系统的结构变得简洁化与模块化。



(下转第 94 页)

表1 刚性链速度、位移比较(1.84 rad/s)

方法	速度/(mm/s)	位移/mm
理论计算	65.50	327.72
实验测试	推出 61.42	307.10
	回拉 62.50	312.50
动力学仿真	65.00	325.62

当链轮角速度为 1.84 rad/s,实验结果和理论计算的速度误差为 6.23%和 4.58%;位移误差为 6.29%和 4.64%。

表 2 是链轮角速度为 2.77 rad/s 时刚性链的速度、位移比较。

表2 刚性链速度、位移比较(2.77 rad/s)

方法	速度/(mm/s)	位移/mm
理论计算	98.68	328.94
实验测试	推出 97.32	324.40
	回拉 99.75	332.50
动力学仿真	98.00	327.02

当链轮角速度为 2.77 rad/s,实验结果和理论计算的速度误差为 1.38%和 1.08%;位移误差为 1.38%和 1.08%。

实验结果与理论、仿真结果基本一致,与理论速度和理论位移的误差均在 10%以内。由此可得出结论,本文

设计的刚性链式直线推动装置设计合理,满足设计要求。

4 结语

在对现有刚性链的结构进行分析后,本文设计出了新型刚性链。从结构上看,新型刚性链的链板啮合更加紧密,脱离过程更加平稳;从动力学仿真分析来看,新型刚性链在空载和负载 1 kg 的情况下能够顺利地完上升和下降动作,说明此装置能够应用于实际;从受力分析来看,新型刚性链的主要受力部件是内链板,在进行刚性链的优化时可适当加厚内链板。最后的实验过程说明了本文设计的新型刚性链式直线推动装置是能够满足实际应用的。

参考文献:

- [1] 孟繁忠. 我国链传动行业的发展历程、技术研究现状与展望[J]. 机械传动, 2016, 40(11):1-7.
- [2] 许立新. 滚子链传动系统动力学理论与实验研究[D]. 天津:天津大学, 2010.
- [3] 陆栋栋. 重型单向齿形推弹链的设计研究[D]. 南京:南京理工大学, 2017.
- [4] 陈新宇. 发动机正时链系统动力学仿真分析[D]. 上海:上海交通大学, 2015.

收稿日期:2019-08-07

(上接第 90 页)

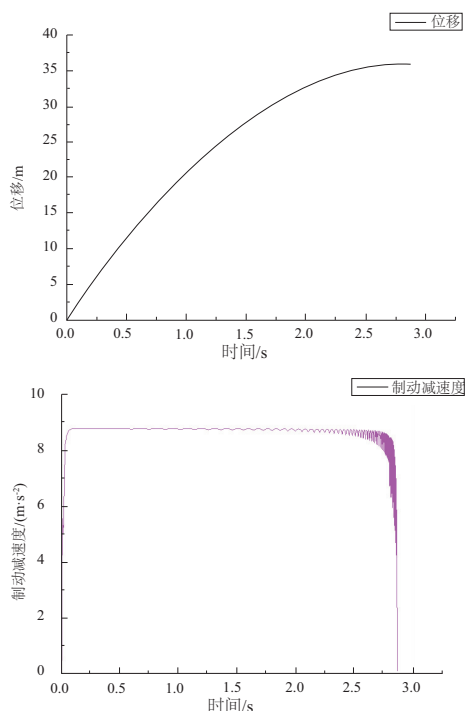


图8 截面积 1.3 mm²、响应时间 1 ms 的仿真结果图

4 结语

通过研究,总结如下:

1) 提出了一种新的线控制动系统方案,搭建了基于 AMESim 与 Simulink 的单轮线控制动系统联合仿真模型。

通过联合仿真与正交试验分析,电磁阀的响应时间并不是越短性能越好。最终,确定了三位高速开关阀的响应时间为 1 ms,阀口截面积为 1.3 mm²,为电磁阀下一步样件试制提供了设计依据。

2) 验证了该线控制动系统用于某款乘用车上防抱死制动(ABS)时,能够提供快速、稳定的制动力,提高了车辆的制动性能,并且与现有制动系统相比,缩短了制动器作用时间,制动距离缩短,提高了行车安全性能,进一步说明了此线控制动系统的可靠性。

3) 考虑到该线控制动系统以后能够使用于工程应用当中,还需解决制动系统控制器的设计问题,包括集成制动力分配算法与电子稳定控制程序等主动安全控制算法,以及对系统冗余性问题的考虑。

参考文献:

- [1] 裴双红. NEHB 系统特性分析及整车制动性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2014.
- [2] ZHAO Jian, HU Zhiqiang, ZHU Bing. Pressure control for hydraulic brake system equipped with an electro-mechanical brake booster[R]. [S.I.]: SAE Technical Paper, 2018.
- [3] PAUL Weissler. Brembo brake-by-wire will be production-ready before 2020[R]. [S.I.]: SAE International, 2016.
- [4] ZHUO Guirong, ZHANG Subin. Novel electromechanical brake actuator adopting the two way ball screw[R]. [S.I.]: SAE Technical Paper, 2015.
- [5] 刘刚,宋健. EMB 硬件在环仿真试验台[J]. 汽车工程, 2006, 28(10):929-932.
- [6] 龚小祥. 电动汽车新型线控制动系统控制技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016.

收稿日期:2019-06-17