

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.04.005

# 面向智能车的新型电液制动系统设计与分析

查云飞<sup>1,2</sup>, 孟宪锋<sup>1,2</sup>, 郑 寻<sup>1,2</sup>, 侯乃仁<sup>1,2</sup>, 郭炎荣<sup>1,2</sup>

(1 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

2 福建省汽车电子与电驱动技术重点实验室, 福建 福州 350118)

**摘要:** 针对传统液压制动系统应用场景受限的问题, 面向智能车设计新型电子液压制动系统, 由车辆配备的智能驾驶系统将制动信号传递给制动系统, 制动系统由助力制动子系统和备份制动子系统组成, 两系统之间通过单向导通梭阀完成解耦。利用系统硬件在环实验, 分析电子液压制动系统的动态特性。实验结果表明: 影响电子液压制动系统建压响应性与精度的因素众多, 为使得系统可以快速响应, 应确保整车制动管路排气良好, 尽量避免使用制动软管; 同时, 不宜长时间进行高压保压工况, 避免电机及电机驱动器过热从而降低制动效能。

**关键词:** 智能车; 电子液压制动系统; 硬件在环; 动态特性; 温升特性

**中图分类号:** U469.7; U463.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-4348(2021)04-0335-07

## Design and analysis of a new electro-hydraulic-braking system for intelligent vehicles

ZHA Yunfei<sup>1,2</sup>, MENG Xianfeng<sup>1,2</sup>, ZHENG Xun<sup>1,2</sup>, HOU Nairen<sup>1,2</sup>, GUO Yanrong<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Automotive Electronics and Electric Drive Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Aiming at the limited application scenarios of the traditional hydraulic braking system, a new type of electronic hydraulic braking system was designed for the intelligent vehicle. The intelligent driving system equipped on the vehicle transmits the braking signal to the brake system, which consists of an assist braking subsystem and a backup braking subsystem. The decoupling between the two systems is accomplished via a single-guide shuttle valve. The dynamic characteristics of the electronic hydraulic braking system were analyzed by using hardware-in-the-loop-experiment. Experimental results show that there are many factors that affect the responsiveness and accuracy of the electronic hydraulic braking system, and in order to allow the system to respond quickly, it has to be ensured that the vehicle brake lines are exhausted well and the use of brake hoses is avoided as much as possible. At the same time, it is not advisable to carry out high pressure keeping conditions for long periods of time, so as to avoid overheating of motors and motor drivers, thereby reducing braking efficiency.

**Keywords:** intelligent vehicles; electronic hydraulic braking system; hardware-in-the-loop; dynamic characteristics; temperature rise characteristics

随着电子信息技术的快速发展, 智能车已成为当今国内外研究热点<sup>[1]</sup>, 其安全问题显得尤为突出。传统液压制动系统存在着应用场景受限、响应速度较慢的问题, 难以满足在紧急制动情况下日益增长的制动需求<sup>[2]</sup>。电子液压制动系统 (electro hydraulic brake, EHB) 和传统制动系统最

收稿日期: 2021-06-09  
基金项目: 福建工程学院科研基金项目 (GY-Z19010)  
第一作者简介: 查云飞 (1981—), 男, 安徽怀宁人, 副教授, 博士, 研究方向: 汽车底盘动力学及控制, 新能源汽车驱动系统设计及控制。

大的不同是使用了电子元件<sup>[3]</sup>,其反应灵敏,构成简单紧凑<sup>[4]</sup>,不仅有利于制动系统的封装和轻量化,还提高了车辆制动系统的安全性和可靠性<sup>[5]</sup>。当前,不少企业和高校都在研究开发电子液压制动系统<sup>[6]</sup>,例如:日本的日立公司推出的 e-ACT 智能电动制动系统以空心电机为动力源,同时利用一个液压腔实现驾驶员与助力动力源的耦合<sup>[7]</sup>,德国的大陆集团推出的 MK\_C1 通过控制四组电磁阀的开关使制动液流入 4 个轮缸实现制动<sup>[8]</sup>;博世公司于 2017 年推出的第二代 iBooster,利用助力电机带动机械传动机构推动制动主缸活塞完成建压,同时将多种主动、被动安全集成在一起<sup>[9]</sup>;清华大学<sup>[10]</sup>开发了一种分布式电子液压制动系统将电子液压制动系统集成在轮边,使制动力分配更加迅速;华东交通大学刘禹<sup>[11]</sup>分析了在 EHB 系统失效的情况下采用备用制动回路的制动性能。

综上所述,国内外针对 EHB 系统的研究均通过采集制动踏板位移信号来分析驾驶员的制动意图,主要针对传统车辆来进行制动功能的实现。本课题设计一种新型的电子液压制动系统,由车辆配备的智能驾驶系统将制动信号传递给制动系统,制动系统由助力制动子系统和备份制动子系统组成,两系统之间通过单向导通梭阀完成解耦。

1 新型电子液压制动系统设计

1.1 助力制动子系统实施方案

助力制动子系统是由制动电机、传导机构、制动主缸、单向导通梭阀、油压传感器等相关部件集合而成,其工作原理为:制动系统接收到智能驾驶系统发送的制动指令,电机驱动器带动制动电机工作,传导机构将电机扭矩传递到制动主缸 A 的活塞,将高压制动液作用到两个方向:一是流入制动轮缸内,制动轮缸在液压力的作用下完成制动;二是流入单向导通梭阀,将其中的钢珠压向另一端,实现系统的建压。工作原理简图如图 1 所示。

1.2 备份制动子系统实施方案

液压执行机构作为制动系统安全的基本保障具有不可替代的地位<sup>[12]</sup>,当车辆发生电机失效、信号丢失等故障时,系统可以启动备份制动模式,备份制动系统由制动踏板、制动轮缸和制动主缸 B 等相关部件组成。其工作原理为:当助力制动子系统失效后,通过踩制动踏板,将力直接传递到

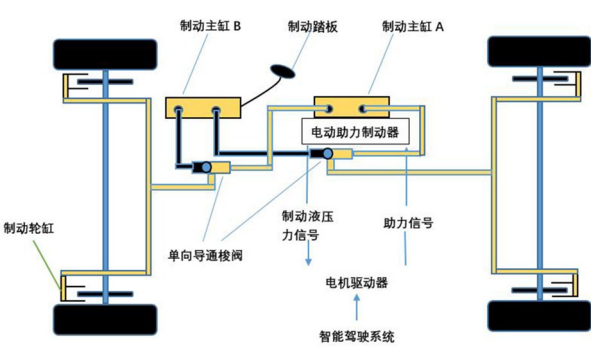


图 1 助力制动子系统工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of assist braking subsystem

制动主缸 B 的活塞,产生的高压制动液一部分到车轮轮缸完成制动,另一部分流入单向导通梭阀,高压制动液将阀内钢珠压到另一侧,保证系统能正常建压,如图 2 所示。

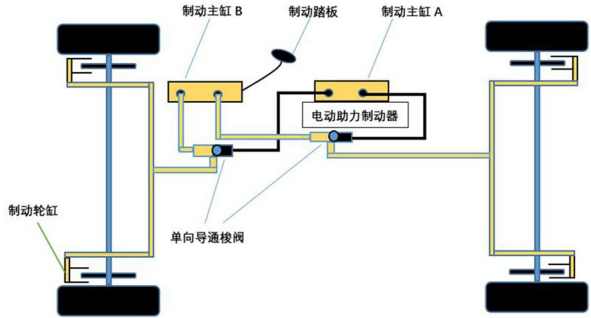


图 2 备份制动子系统工作原理图

Fig.2 Operating principle diagram of backup braking subsystem

2 关键零部件参数设计

2.1 车轮法向反力及制动力分析

制动系统的参数是参考 GB7258-2017《机动车运行安全技术条件》和 GB12676-2014《商用车车辆和挂车制动系统技术要求及试验方法》两项国家标准来设置,在参数选定之前需要进行理论分析,图 3 为车辆在制动时的受力分析情况,忽略了空气阻力、滚动阻力等对车辆制动的影响<sup>[13]</sup>。

如图 3 所示,对汽车前、后轴轮胎触地点取力矩得:

$$\begin{cases} F_{N1}L = G L_b + m \frac{du}{dt} h_a \\ F_{N2}L = G L_a - m \frac{du}{dt} h_a \end{cases} \quad (1)$$

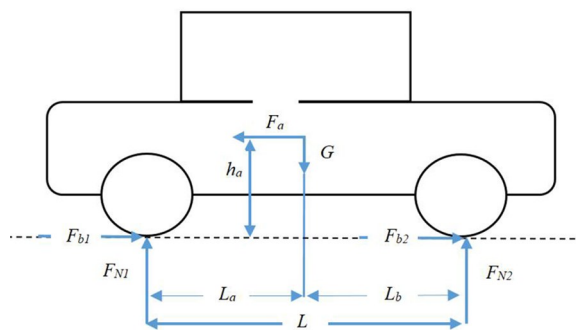


图3 车辆制动时的受力分析

Fig.3 Force analysis of vehicle braking

式中,  $F_{N1}$ 、 $F_{N2}$  为车辆制动时路面对前、后轮的法向反作用力;  $L$  为车辆轴距;  $G$  为车辆重力;  $L_a$ 、 $L_b$  为车辆质心与前后、轴的距离;  $h_a$  为车辆质心高度;  $m$  为车辆满载质量;  $\frac{du}{dt}$  为车辆的制动

减速度。令  $Z = \frac{du}{dt}/g$ , 即  $Z$  为制动强度, 则由式(1)可求得当车辆在制动时, 地面对车辆前、后轴车轮的法向反作用力, 为:

$$\begin{cases} F_{N1} = \frac{G}{L}(L_b + Z h_a) \\ F_{N2} = \frac{G}{L}(L_a - Z h_a) \end{cases} \quad (2)$$

制动强度  $Z$  为最大值时, 车辆的总制动力等于前、后轴车轮的总附着力, 为:

$$G\varphi = m \frac{du}{dt} \quad (3)$$

式中,  $\varphi$  为路面附着系数。

此时车辆前、后轮的最大制动力为:

$$\begin{cases} F_{b1\max} = \varphi \frac{G}{L}(L_b + Z h_a) \\ F_{b2\max} = \varphi \frac{G}{L}(L_a - Z h_a) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $F_{b1\max}$  为前轮最大制动力;  $F_{b2\max}$  为后轮最大制动力。

## 2.2 制动主缸活塞推力计算

通常车辆装载双侧盘式制动卡钳, 由力矩平衡方程可知其在制动盘上的最大夹紧力为:

$$F_c = \frac{f_{b\max} r}{2f r_a} \quad (5)$$

式中,  $f$  为制动卡钳摩擦衬片的摩擦系数;  $r_a$  为制动器摩擦衬片有效半径;  $r$  为车轮半径;  $f_{b\max}$  为单

个车轮最大制动力;  $F_c$  为单侧制动卡钳夹紧力。

同时, 最大夹紧力与制动轮缸压力的关系为:

$$F_c = \frac{1}{4} \pi p d^2 \quad (6)$$

式中,  $p$  为制动轮缸压力;  $d$  为轮缸直径。

当车辆制动强度最大时, 制动主缸的活塞推力为:

$$F_{\max} = \frac{1}{4} \pi p_{\max} d_c^2 \quad (7)$$

式中,  $F_{\max}$  为制动主缸最大活塞推力;  $p_{\max}$  为车辆制动强度最大时主缸压力;  $d_c$  为制动主缸直径。

## 2.3 EHB 系统相关零部件参数设计流程

由车辆制动状态下的理论分析可对制动主缸活塞推力进行计算, 为保证 EHB 系统在制动过程中产生足够大的制动力, 需要主缸活塞的推力足够大。在系统零部件参数设计上, 需要先拟定制动电机最终放大转化到主缸活塞推杆上的力不小于制动主缸的最大活塞推力。同时, 结合产品整体尺寸, 还需要选定合适的滚珠丝杆导程、减速比、电机转速等参数。如图4所示为 EHB 系统关键零部件的参数设计流程。

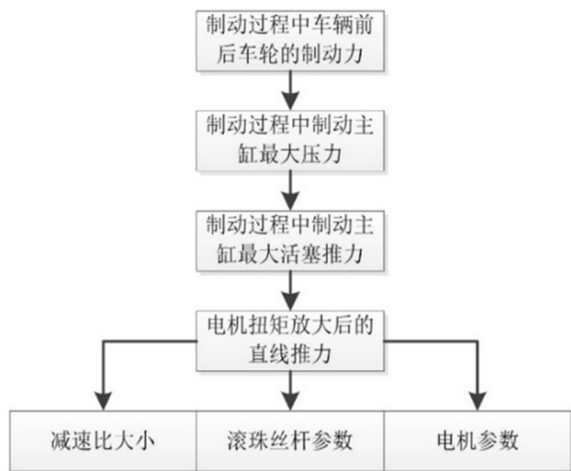


图4 EHB系统参数选定流程图

Fig.4 Flowchart of EHB system parameter selection

## 2.4 EHB 系统相关零部件参数

### 2.4.1 目标车型参数

选用智能车相关参数如表1所示。

### 2.4.2 EHB 系统关键参数

根据上述目标车型与车辆制动时的理论分析, 最终确认 EHB 系统的相关参数, 如表2所示。

表 1 智能车相关参数

Tab.1 Relevant parameters of intelligent vehicles

名称	单位	大小
整车尺寸:长×宽×高	mm	2 600×1 600×650
轴距	mm	2 000
空、满载质量	kg	500/1 000
轮胎规格		165/60 R14
空、满载质心高度	mm	524/496
空载时前、后轴荷	kg	260/240
满载时前、后轴荷	kg	470/530

表 2 EHB 系统主要零部件参数

Tab.2 Main component parameters of EHB system

名称	单位	大小
电机额定电压	V	12
电机额定功率	W	170
电机额定转矩	(N · m)	1.55
传导机构齿数比		2.91
丝杠导程	mm	20
主缸直径	mm	26.99
轮缸直径	mm	48

3 EHB 系统动态性能试验及分析

由于电子液压制动系统具有时变、非线性的特点<sup>[14]</sup>,仿真计算不能作为 EHB 系统动态特性的唯一参考,需要进行硬件在环实验进一步研究 EHB 系统的动态特性。

3.1 EHB 试验台架搭建

搭建电子液压制动系统试验台架如图 5 所示,对系统的动态特性进行测试,其工作原理为:通过上位机向电机驱动器发送制动请求指令,油压传感器实时测量制动管路内压力值,并反馈给电机驱动器,利用 PID 控制算法来实现对 EHB 系统油压闭环控制。

3.2 EHB 的 PV 特性对系统建压影响

电子液压制动系统建压所需的制动液体积是随着压力的增高而增多的,利用试验台架分别在低压 1 MPa 矩形波与高压 5 MPa 矩形波的工况下进行对比实验,分析请求压力值与试验台架反

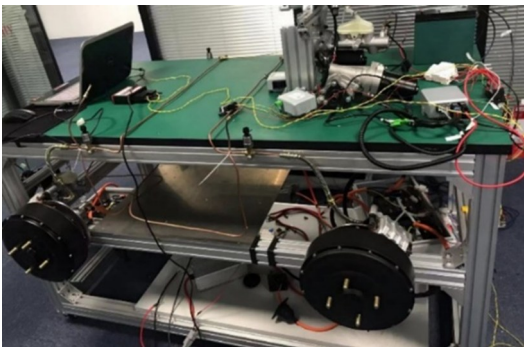
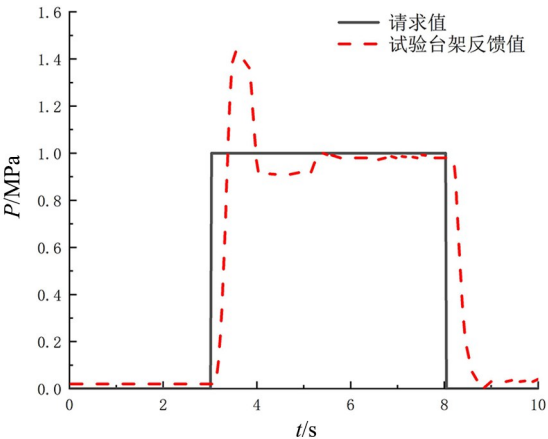
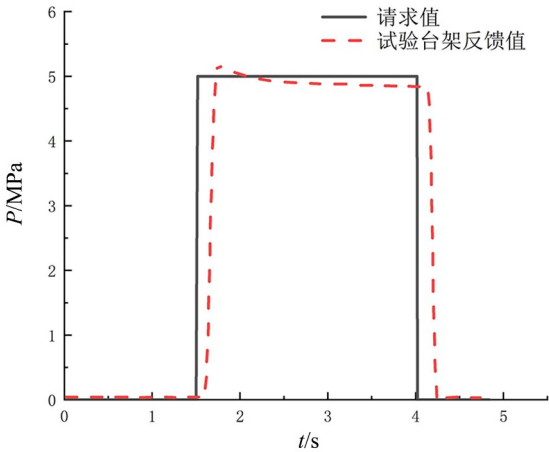


图 5 EHB 系统试验台架  
Fig.5 EHB system test bench

馈值来研究系统建压情况与制动液体积的关系,实验结果如图 6 所示。



(a) 低压请求反馈曲线



(b) 高压请求反馈曲线

图 6 压力反馈曲线  
Fig.6 Pressure feedback curve

由图 6 可知,在制动力请求值较小时,系统压力产生了较大超调量;当制动力请求值较大时,此



时的 EHB 系统压力比较稳定。

造成上述结果的主要原因为:EHB 系统在制动过程中,需要更多制动液消除摩擦片与刹车盘之间的间隙和制动软管形变等因素的影响。制动主缸内一部分制动液进入制动轮缸,另一部分制动液用来消除间隙和制动软管变形,在制动压力请求值较小时,主缸活塞推杆的位移较小,主缸内部流出制动液体积较少,制动管路内部实际压力不能迅速到达期望压力值。此时,电机驱动器通过放大电流增大电机输出扭矩,造成系统建压超调。当压力请求值较高时,主缸活塞推杆位移较大,从主缸内部流出制动液体较多,制动管路内部达到期望压力迅速,电机驱动器输出电流稳定,不会突然放大电流,控制较精准。

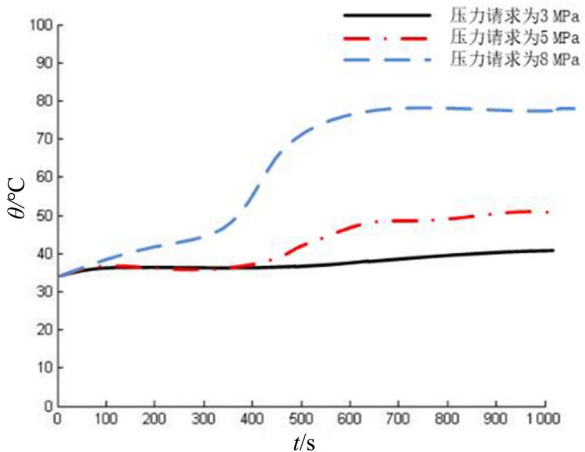
3.3 系统高压保压工况分析

当电子液压制动系统处于长时间保持高压状态时,类似于临时驻车工况,此时电机处于堵转的状态,输入的电功率在电机驱动模块和电机上全部转化为热能。为了探究 EHB 系统长时间保持高压工况下的动态特性,利用所搭建的试验台架,在环境温度为 35 ℃ 的条件下,测试 EHB 系统的温升特性,实验结果如图 7 所示。随着制动压力请求值的不断增大,电机与电机驱动器温度升高的越快,最终稳定在一定值。但电机温度上升时间较快,主要由于 EHB 系统在长时间保持较高压力的过程中,电机驱动器持续输出电流值驱动电机输出扭矩,电机中的关键元件温度迅速上升导致性能衰退,电机驱动器放大电流,增大电机输出扭矩,才能维持制动主缸活塞推杆的推力,从而导致温度上升。

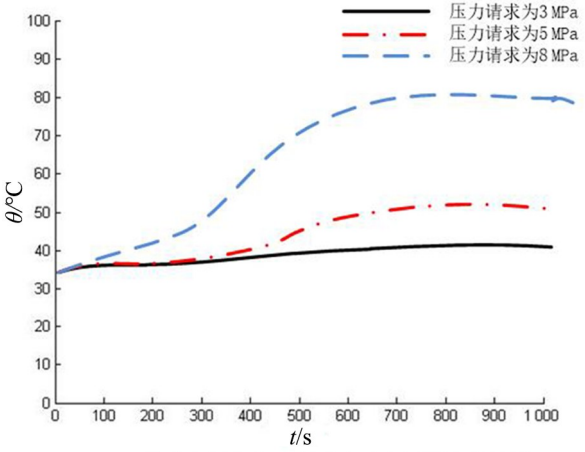
电机与电机驱动器随温度升高而降低性能<sup>[15]</sup>,为研究系统温升特性对系统建压的影响,利用试验台架进行系统长时间保持高压实验,实验结果如图 8 所示。

由图 8 可知,系统达到目标压力一段时间后,出现波动。造成 EHB 系统压力出现波动的原因是:当 EHB 系统长时间保持高压时,制动电机温度逐渐升高导致助力性能会逐渐降低,造成输出扭矩下降,同时系统进行油压闭环控制,电机驱动器通过放大电流来增大电机输出扭矩,反馈实际压力曲线出现往复波动的情况。

综上所述,EHB 系统适合作为行车制动系统,并不适合作为驻车制动,当 EHB 系统长时间



(a) 不同压力请求下的电机温升特性



(b) 不同压力请求下的电机驱动器温升特性

图 7 EHB 系统温升特性曲线

Fig.7 Temperature rise characteristic curve of EHB system

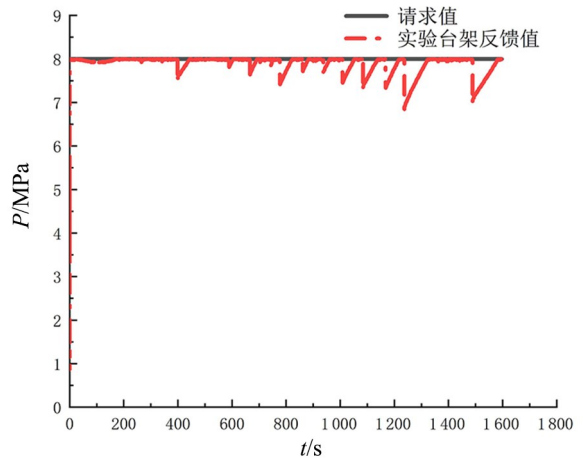


图 8 高压力保压曲线

Fig.8 Pressure holding curve of high pressure force

保持高压时,制动性能会发生衰退现象。因此,搭配电子液压制动系统的车辆,需配备机械式驻车制动系统来保障安全。

3.4 液压管路硬度对系统建压影响分析

当 EHB 系统接入整车制动管路后,车辆在行驶过程中左右摆动车轮,制动系统液压管路需利用软、硬管相结合的方式连接。在 EHB 系统建压时,会因为制动软管的存在,产生膨胀量,从而影响 EHB 系统建压的响应性和精度。

为了研究制动管路的硬度对系统建压的影响,将试验台架中总长度为 2 m 的制动管路全部更换为硬管或软管,分别测试 EHB 系统在 5 MPa 矩形波的制动压力请求下的建压情况,实验结果如图 9 所示。

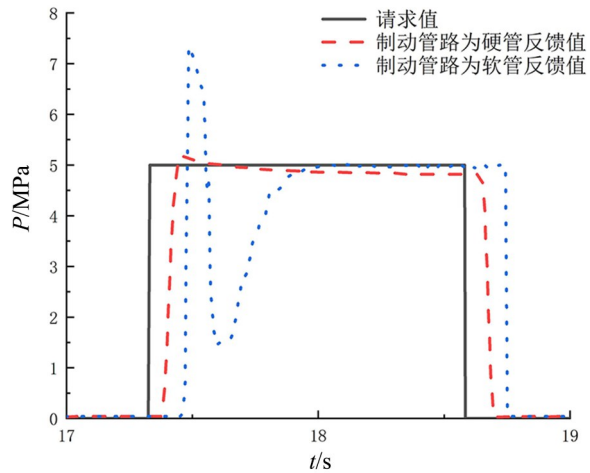


图 9 软、硬管建压对比

Fig.9 Comparison of construction pressures between soft and hard pipes

由图 9 压力对比结果可知,当 EHB 系统制动管路为硬管时,系统迅速响应,液压力超调量较小,当压力请求为 0 MPa 时,也可以迅速响应减压至 0 MPa。当 EHB 系统制动管路均利用软管连接时,系统响应压力的时间较长,严重影响车辆行驶安全性,且当制动请求压力值为 0 MPa 时,EHB 系统减压至 0 MPa 的速度较慢。这是因为在 EHB 系统工作时,制动软管会首先膨胀,造成管路内部建压速度缓慢。同时 EHB 系统利用油压进行闭环控制,当反馈压力达不到请求压力时,电机驱动器输出电流持续增大,造成 EHB 系统建压严重超调。制动液在制动硬管中的传播速度大于制动软管,且形变量较制动软管很小,因此响应

迅速。整车制动管路的选取对 EHB 系统建压的响应性与控制精度会产生很大影响,但是由于车轮的摆动,制动轮缸卡钳端不得利用软管进行制动液的传输,但应该尽量减少制动软管在整车制动管路中的比重。

3.5 EHB 系统排气程度对建压影响分析

EHB 系统通过制动液来传递液压力,当制动管路内部存在空气时,会对 EHB 系统的工作情况产生影响。本实验利用试验台架测试排气程度对 EHB 系统建压的影响程度,利用上位机向 EHB 系统发送峰值为 5 MPa 的矩形波,测试主缸内空气含量为 2%、5%、10%时的系统建压情况,实验结果如图 10 所示。

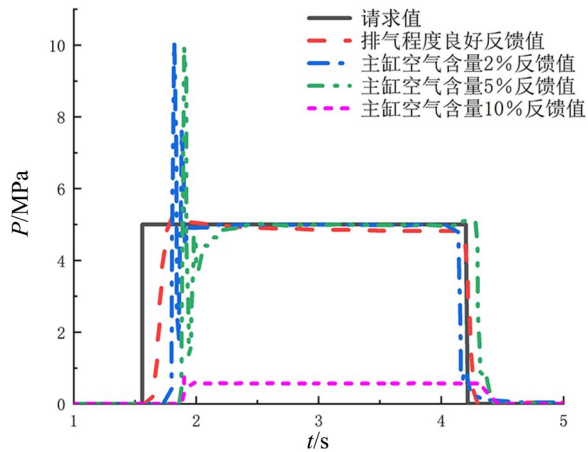


图 10 排气程度对 EHB 系统建压影响对比图

Fig.10 Comparison diagram of the influence of exhaust degree on EHB system build pressure

由图 10 可知,随着主缸内部空气含量的增加,EHB 系统响应速度逐渐减慢,当空气含量为 2%~5%时,系统超调量增大,建压出现较大波动,但最终能稳定在请求压力值。当空气含量达到 10%时,EHB 系统不能完成期望建压。造成上述现象的原因是:在 EHB 系统工作时,制动管路内存在一定量的空气,随着制动液的流量方向,会将空气推向制动轮缸活塞内,致使 EHB 系统响应性减慢,造成制动力超调。当制动管路中存在大量空气时,制动轮缸端活塞开度明显下降,摩擦衬片不能夹紧刹车片,导致摩擦力矩不足。

因此,制动管路中存在空气,严重影响 EHB 系统的建压响应性与控制精度,应将制动管路中的空气排净。

## 4 结论

本课题面向智能驾驶车辆,对传统 EHB 系统进行优化设计,使其结构更加紧凑,并通过搭建试验台架进行 EHB 系统的硬件在环试验,研究 EHB

系统的动态特性。影响 EHB 系统响应性和精确性的因素众多,为使得 EHB 系统可以快速响应,应确保整车制动管路排气良好,尽量避免使用制动软管。同时,不宜长时间进行高压保压工况,易使得电机及电机驱动器过热,制动效能降低。

## 参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2017[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6):69-107.
- [2] 金智林, 郭立书, 施瑞康, 等. 汽车电控液压制动系统动态性能分析及试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12):127-132.
- [3] ZHANG L, YU L Y, WANG Z Z, et al. All-wheel braking force allocation during a braking-in-turn maneuver for vehicles with the brake-by-wire system considering braking efficiency and stability[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6):4752-4767.
- [4] 余卓平, 韩伟, 徐松云, 等. 电子液压制动系统液压力控制发展现状综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(14):1-15.
- [5] HAN W, XIONG L, YU Z P. Braking pressure control in electro-hydraulic brake system based on pressure estimation with nonlinearities and uncertainties[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 131:703-727.
- [6] YU Z, ZHANG Y, XIONG L, et al. Research of motor control based on integrated-electro-hydraulic braking system[C]. SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2016:2016-01-1886.
- [7] OHTANI Y, INNAMI T, OBATA T, et al. Development of an electrically-driven intelligent brake unit[C]. SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2011:2011-01-0572.
- [8] FEIGEL H J. Integrated brake system without compromises in functionality[J]. ATZ Worldwide, 2012, 114(7/8):46-50.
- [9] DUVAL-DESTIN M, KROPF T, ABADIE V, et al. Impacts of an electric powertrain on the braking system[J]. Auto Technology, 2011, 113(9):16-21.
- [10] 王治中. 分布式电液制动系统的设计与控制[D]. 北京:清华大学, 2014.
- [11] 刘禹. 基于 EHB 系统的电动汽车电液复合制动控制策略研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2020.
- [12] 郭瑞玲, 郭晓亮, 梁荣亮, 等. 基于实车的 EHB 系统性能评价方法研究[J]. 中国汽车, 2021, 31(3):15-19.
- [13] 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社, 2009:108-109.
- [14] 余卓平, 徐松云, 熊璐, 等. 集成式电子液压制动系统鲁棒性液压力控制[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16):22-28.
- [15] 舒强, 卫玮, 潘光亮, 等. 电子液压制动系统临时驻车策略研究与设计[J]. 机电一体化, 2017, 23(6):52-58.

(责任编辑:方素华)