

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205400

线控制动电磁阀响应特性仿真及测试方法研究*

季恩泽¹ 郭 斌¹ 胡晓峰¹ 张俊鑫² 赵 静²

(1. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 杭州沃镭智能科技股份有限公司 杭州 310018)

摘 要:根据电磁阀工作原理和结构特征,剖析其性能响应特性,并基于 AMESim 软件构建其仿真模型,对其增压、泄压性能进行仿真分析。其次结合理论仿真数据及测试需求,制定其性能测试方法,并采用虚拟仪器技术,研发了一套电磁阀测试系统,实现自动测试电磁阀响应特性功能。针对开关型电磁阀及线性电磁阀开展了增压、泄压性能试验测试,测得开关阀增压速率为 835 bar/s,泄压速率为 914 bar/s;并通过测试验证了改变控制电流能调节线性阀阀口开度。仿真和测试结果曲线均符合预期,验证了所设计的电磁阀性能测试系统的可行性与可靠性。

关键词:电磁阀;测试系统;AMESim 仿真;响应特性

中图分类号: TH7;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on response characteristics simulation and test
method of solenoid valve in brake by wire system

Ji Enze¹ Guo Bin¹ Hu Xiaofeng¹ Zhang Junxin² Zhao Jing²

(1. College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. Hangzhou Wolei Intelligent Technology Co., Ltd., Hangzhou 310018, China)

Abstract: According to the working principle and structural characteristics of solenoid valve, this paper analyzes performance response characteristics of solenoid valve, builds simulation model in AMESim, simulates and analyzes pressurization and pressure relief characteristics of the solenoid valve. Combined with theoretical simulation data and test requirements, formulates performance test methods, develops a set of solenoid valve test system with virtual instrument technology, which realizes the function of automatically testing the response characteristics of solenoid valve. Measured the pressurization and pressure relief characteristics of on-off valve and linear valve, the pressurization rate of on-off valve is 835 bar/s and the pressure relief rate is 914 bar/s. Through relevant tests, it is verified that changing the control current can adjust the opening of linear valve. The simulation and test results are in line with expectations, which verifies the feasibility and reliability of the solenoid valve performance test system.

Keywords: solenoid valve; test system; AMESim simulation; response characteristic

0 引 言

随着智能网联汽车、智能驾驶的不断深入,线控技术在智能汽车中的作用也越来越重要。线控制动是智能驾驶线控底盘的关键技术^[1-2],摒弃了传统的机械真空式制动模式,利用传感器、电磁阀组、电机模组等核心模块及控制算法来感知驾驶者制动意图,自适应调节制动液压,

实现响应更快速、控制更准确。集成式线控液压制动系统(integrated electro-hydraulic braking, IEHB)是智能汽车主动安全系统最新研究方向^[2]。IEHB 以 one-box 的形式将电子控制单元(electronic control unit, ECU)、液压控制单元(hydraulic control unit, HCU)、以及相关核心模块集成到一个阀体上,使制动系统集成度更高,功能更齐全。线控制动技术在未来汽车的应用是大势所趋,但核心技术被国外市场垄断,国内相关研究起步较晚,涉及到的电

收稿日期: 2022-04-18 Received Date: 2022-04-18

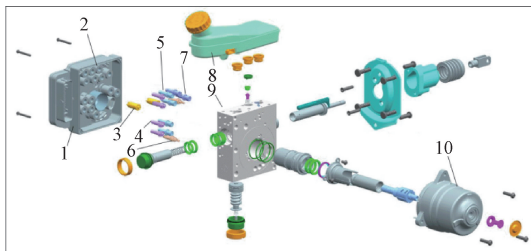
* 基金项目:国家自然科学基金(52075511)、浙江省科技计划项目省级重点研发计划(2021C01136)、浙江省公益性技术应用研究计划(LGG21E050019)、杭州市重大科技创新项目(2022AIZD0112)资助

电磁阀、电机模组等大多精密度较高,如电磁阀,能通过阀的开关动作对轮缸压力进行控制,是影响制动系统响应速度的关键,而国内研发的电磁阀与尖端水准还存在一定距离。

电磁阀作为线控制动系统的核心部件,国内相关研究主要侧重于理论研究和仿真分析^[3-4],且研究对象多为整体制动系统或者防抱死系统(ABS)^[5-6],对于近几年提出的集成式制动系统电磁阀研究较少,体现在具体性能测试方法、装置及标准规范研究滞后,无法满足性能测试的多样性与可靠性要求。因此迫切需要从电磁阀工作原理出发,剖析影响电磁阀性能的因素,明确性能测试方法,制定合理的测试方法及规范流程,研制出一套适用于检测 IEHB 电磁阀响应特性的测试装置。

1 电磁阀工作原理

根据压力调节控制原理,制动系统电磁阀主要分为开关阀和线性阀两类;根据阀结构,可分为常开型和常闭型两类。IEHB 结构如图 1 所示,系统内使用的阀主要有增压阀、主缸隔离阀、减压阀、电机隔离阀,其中增压阀为常开型线性阀、主缸隔离阀为常开型开关阀,减压阀为常闭型线性阀、电机隔离阀为常闭型开关阀。



1—ECU;2—线圈;3—压力传感器;4—增压阀;
5—减压阀;6—电机隔离阀;7—主缸隔离阀;
8—油壶;9—HCU 阀体;10—电机模组

图 1 IEHB 结构图

Fig. 1 Structural diagram of IEHB

1.1 开关阀

开关阀利用阀芯快速的开启和关闭动作来改变液体的流向和平均流量,实现制动轮缸压力控制^[7]。采用高频 PWM 控制,通过调整占空比实现压力的动态控制^[8]。以常闭型开关阀为例,常闭阀由阀芯、动铁、静铁、回位弹簧、隔磁管、阀座和滤网组成。外部线圈不通电时,在弹簧预紧力和液体作用下阀芯与阀座闭合,常闭阀关闭;外部线圈通电时,阀体内部产生电磁场,动铁受到电磁力并带动阀芯克服弹簧预紧力、摩擦力和液体作用力,使阀芯与阀座分离,常闭阀打开,制动液从常闭阀前端流入进液口,从出液口流出至后端油壶。常闭阀上电下电状态

如图 2 所示,图 2(a) 中粗箭头为制动液流动方向,图 2(a) 左侧细箭头为阀芯开启时受力方向,建立的常闭阀阀芯运动微分方程如式(1)所示^[9-10]。

$$\begin{cases} M_c a_c = F_{mc} - F_{pc} - F_{fc} - F_{kc} - F_{vc} \\ F_{mc} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 A_m} \\ F_{pc} = \Delta p \cdot A_v \\ F_{fc} = f_c \cdot x_c \\ F_{kc} = K_c(x_c + x_0) \\ F_{vc} = \tau_c \cdot v_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: M_c 为常闭阀阀芯的总质量; a_c 为常闭阀阀芯运动的加速度; F_{mc} 为阀芯所受的电磁力, Φ 为主气隙磁通量, μ_0 为真空磁导率, A_m 为主气隙截面积; F_{pc} 为阀芯所受的液体作用力, Δp 为阀芯两端压力差, A_v 为阀节流口面积; F_{fc} 为阀芯运动所受的摩擦力, f_c 为阀芯运动摩擦系数, x_c 为阀芯位移; F_{kc} 为阀芯所受的弹簧力, K_c 为弹簧刚度, x_0 为弹簧预紧量; F_{vc} 为制动液作用的粘性阻力, τ_c 为阻尼系数, v_c 为阀芯运动速度。

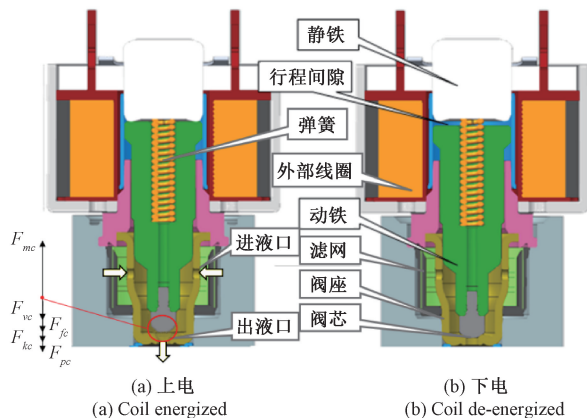


图 2 常闭阀状态示意图

Fig. 2 Schematic diagram of normally closed valve status

1.2 线性阀

线性阀的结构比开关阀更加精密,控制方式与开关阀存在着本质区别^[10]。线性阀通过调控电磁力,改变阀口处节流面积,使阀芯悬停在一定位置,从而调节压力变化速率及输出压力,控制轮缸液压力。以常开型线性阀为例,外部线圈不通电时,常开阀阀口打开,制动液从常开阀前端流入进液口,从出液口流出至后端负载;当外部线圈上电时,动铁受到电磁力从而推动顶杆使阀芯向阀座靠近;当线圈电流足够大时,阀芯与阀座闭合,制动液不再流通,故可通过控制线圈输入电流来调控输出液压力。常开阀上电下电状态如图 3 所示,图 3(b) 中粗箭头表示制动液流动方向,图 3(a) 左侧细箭头为阀芯关闭时受力方向,常开阀和常闭阀所受的力种类一致,但部分力

的方向不同。

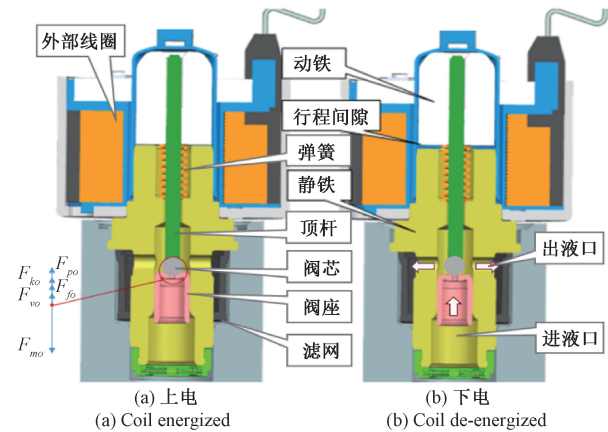


图 3 常开阀状态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of normally open valve status

2 电磁阀仿真试验

根据电磁阀物理结构和工作原理,在仿真软件 AMESim 中建立电磁阀仿真模型,依照阀的相关数据设置模型的各项基本参数并进行仿真。

2.1 仿真模型

根据常开型电磁阀结构组成及工作特性,建立其数值仿真模型^[11],模型如图 4 所示。从左到右依次是控制信号、线圈、质量块、阀体、液压源和弹簧。控制信号控制线圈的输入电压,从而调控电磁力;质量块是常开阀开关动作时运动部分的质量,包括阀芯和动铁;阀体选用锥角球阀,通过球阀的动作控制液体在两口间的通断;液滴 P 代表液压仿真,用于设置液体特性并充当液压源连接常开阀的进液口,模拟电机的液压输入。

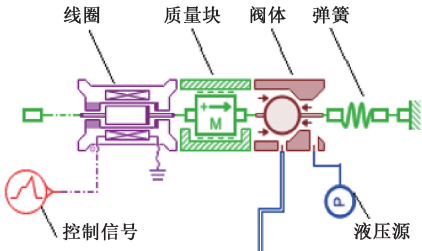


图 4 常开阀仿真模型

Fig. 4 Simulation model of normally open valve

图 5 为根据常闭型电磁阀结构和工作原理建立的常闭阀模型。常闭阀模型使用的元件与常开阀大体一致,不过阀芯的运动方向不同,阀体的进液口和出液口也不相同,且常闭阀的出液口与油壶相连。

制动系统的工作需要多种阀的相互配合,一个常开

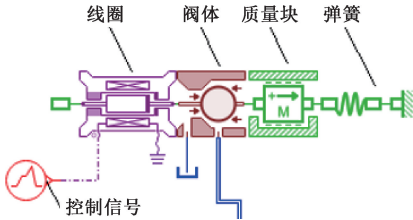


图 5 常闭阀仿真模型

Fig. 5 Simulation model of normally closed valve

阀、常闭阀和负载可组成简单的测试回路,图 6 为单制动回路仿真模型。根据电磁阀的常开常闭结构给线圈输入特定的电压可实现对制动系统增压阶段、保压阶段、泄压阶段的仿真。

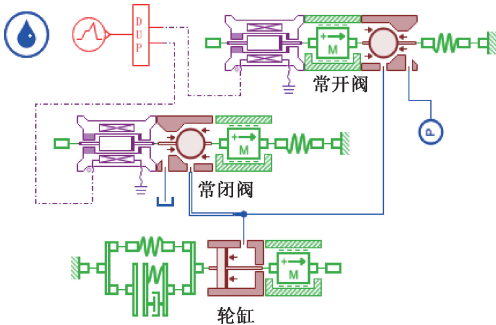


图 6 单制动回路仿真模型

Fig. 6 Simulation model of single brake circuit

2.2 参数设置

根据电磁阀核心组件实测数据,设置模型参数如表 1 所示。仿真中使用的制动液密度为 850 kg/m^3 ,制动液弹性模量为 $1\ 700\text{ MPa}$ 。由于摩擦阻力和粘性阻力较小,相比弹簧力、液压力和电磁力可忽略不计。此外,仿真中线圈温度恒定,不考虑电流热效应,基于上述假设建立电磁阀仿真模型。

表 1 仿真系统关键参数及数据

Table 1 Key parameter data of simulation system

	常开阀	常闭阀
节流孔直径/mm	0.9	0.9
阀座开度/(°)	46	46
球径/mm	1.4	1.4
运动质量/g	4	6
最大气隙/mm	0.25	0.25
弹簧刚度/(N·m ⁻¹)	790	770
弹簧预紧量/mm	1.59	1.45
线圈匝数/匝	300	300
线圈电阻/Ω	12.5	12.5

2.3 仿真结果及分析

对单制动回路模型进行增压泄压特性仿真试验,将

增压阀前端液压源 P_0 设为 120 bar; 增压阀线圈在增压阶段下电, 其他阶段上电; 减压阀线圈在泄压阶段上电, 其他阶段保持下电; 仿真时间 2 s, 采样时间设为 0.001 s。计算负载液压从 10% P_0 升至 90% P_0 的平均升压速率以及从 90% P_0 降至 10% P_0 的平均泄压速率^[12]。单制动回路液压仿真曲线与线圈输入电压的关系如图 7 所示, 图中实线为轮缸液压的变化曲线, 增压阶段常开阀后端液压从 12~108 bar 的平均升压速率为 990 bar/s; 泄压阶段常闭阀前端液压从 108~12 bar 的平均泄压速率为 1 032 bar/s。

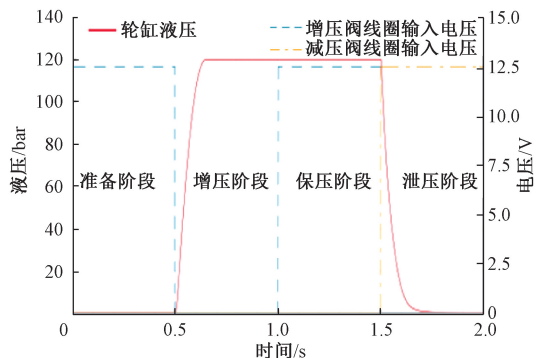


图 7 单制动回路液压仿真曲线

Fig. 7 Hydraulic simulation curve of single brake circuit

调整模型节流孔直径及运动质量等参数, 同时将控制信号改为脉冲下电信号, 仿真常开型线性阀在不同脉冲下电时间控制下的增压特性。仿真结果如图 8 所示, 从左到右分别为 3/6/9 ms 脉冲下电+50 ms 时间间隔控制下的轮缸压力曲线。从图中可看出, 前 3 s 增压过程大体符合线性, 且下电时间越长, 轮缸液压增长越快, 3 s 时达到的液压也越大。

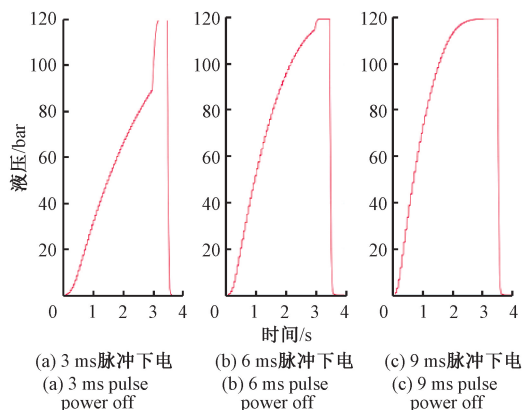


图 8 线性阀增压特性仿真结果

Fig. 8 Simulation results of pressurization characteristics of linear valve

3 电磁阀性能测试系统设计

3.1 测试方法

结合电磁阀工作响应及仿真结果, 制定性能测试方法及测试流程, 研发测试系统, 测试及分析电磁阀增压、泄压等响应特性^[13]。

1) 线性阀增压特性测试方法

线性阀输出液压可根据阀口开度改变, 而阀口开度又受线圈电流控制, 为探究线性阀输出液压与线圈电流之间的关系, 对常开型线性阀在不同电流控制下的增压特性进行测试^[14]。测试前先为测试管路排气注油, 测试时先设定并建立压力, 通过管路电磁阀的动作使制动液在规定的管路中流动, 分别测量电磁阀线圈在 3/6/9 ms 脉冲下电+50 ms 脉冲间隔控制下线性阀前后两端压力的变化, 并实时记录时间与压力曲线, 读取平均升压速率作为评价指标。

2) 增压阀增压测试方法

IEHB 中电机模组所建立的液压通过增压阀传递至制动轮缸, 增压阀阀口全开时的工作效率将影响轮缸液压建立的快慢, 需对增压阀在阀口全开时的增压性能进行测试。增压测试前排气注油, 由于增压阀为常开阀, 测试时先给增压阀线圈上电, 关闭增压阀, 待增压阀前端压力加载至设定压力后给线圈断电, 使增压阀后端压力上升到入口压力, 同时测量阀后端压力上升速率作为评价指标。

3) 减压阀泄压测试方法

减压阀用于松开踏板后制动轮缸内压力的释放, 并使制动液流回制动油壶中, 通过阀口全开时的释放压力效率来评价减压阀是否合格。减压测试前同样需要给管路排气注油, 减压阀为常闭阀, 测试时可直接加载液压, 待前端压力加载至设定压力且稳定后切断液压源, 同时给减压阀线圈通电, 释放减压阀前端压力, 测量泄压时的平均泄压速率作为减压阀泄压性能评价指标。

3.2 测试系统研发

依据电磁阀测试思路 and 具体测试方法需求, 搭建电磁阀测试系统^[15-16], 测试系统核心模块结构如图 9 所示, 测试系统主要由台架工装、测试管路、加载机构、控制线圈、数据采集与控制以及上位机软件等模块组成。

1) 硬件系统核心模块设计

硬件系统主要由测试管路、加载机构、控制线圈以及数据收发等模块组成^[17-19]。测试管路模块主要分为真空管路、气管路和液压管路。真空管路用于测试前将液压管路与产品内部抽至真空, 保证管路与产品内无空气, 提升注油效率; 液压管路用于测量电磁阀各状态下前后

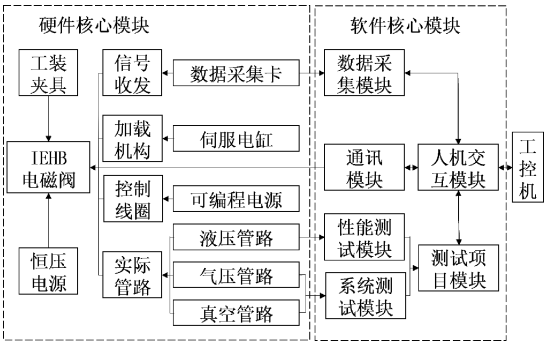


图 9 电磁阀测试系统模块图

Fig. 9 Module diagram of solenoid valve test system

端的真实液压;气压管路用于电磁阀的低压测试和产品测试完毕后通气排油。电磁阀液压管路图如图 10 所示,管路中接有侧向阀和二位三通阀,分别用于控制主缸进油、负载钢瓶的开关、油壶排气、电磁阀前后端管路的通断以及构建电磁阀测试双回路,方便切换制动液从电磁阀侧口进或下口进。

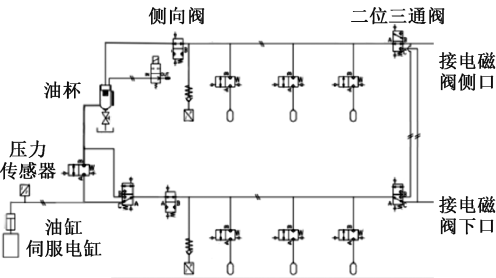


图 10 液压管路图

Fig. 10 Hydraulic pipeline diagram

数据采集与控制模块主要由工控机、数据采集卡、传感器和测试管路中的控制阀组成。根据测试需求及实际布局,测试系统需对电磁阀前后端液压、电缸位移、线圈电压电流、真空负压等模拟量信号进行采集;通过电气比例阀实现管路压力精确控制,用于管路查漏和排气注油;并对侧向阀和二位三通阀等控制阀进行输出控制。

液压加载机构由伺服电缸、油缸、压力传感器等组成,为电磁阀测试提供压力源。电磁阀线圈由专门设计驱动板控制,上位机测试软件通过标准通信协议实现对电磁阀动作逻辑控制。

2) 软件系统核心模块设计

根据测试需求,软件模块需实现对加载机构的控制、通过数据采集卡进行信号输入输出以及对测试结果进行处理等功能。结合需求和现有技术条件,以 LabVIEW 为开发平台,进行系统软件设计^[20-21]。按测试系统功能需求编写主程序、参数设置、数据采集、电缸控制、性能测试、数据处理等模块程序等,利用状态机技术,根据自定

义选择检测项目、配置参数,完成流程化检测。图 11 为软件总体架构图。

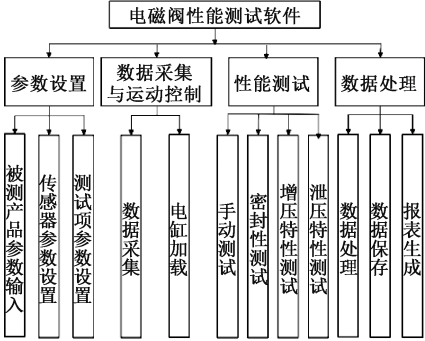


图 11 软件架构图

Fig. 11 Software architecture diagram

4 测试结果及数据分析

在测试之前,通过真空注油以及加压排气保证产品及管路内部无气体残余。完成排气的动作后,对电磁阀进行线性阀增压测试、减压阀连续泄压测试、静态泄漏测试。

4.1 线性阀增压测试

对常开型线性阀进行增压测试,按照线性阀增压测试流程进行测试,测试结果如图 12 所示,图中曲线从左到右分别是按照 3 ms 脉冲下电+50 ms 脉冲间隔、6 ms 脉冲下电+50 ms 脉冲间隔、9 ms 脉冲下电+50 ms 脉冲间隔控制电磁阀动作得到的曲线。图 12 中线性阀后端液压变化曲线走势和仿真结果图 8 基本吻合,验证了测试与仿真的一致性。且从两图中都可看出脉冲下电时间越长,线性阀阀芯开度越大,电磁阀后端增压越快。测得 3 次不同脉冲控制下后端的平均升压速率为 21、39、89 bar/s,说明可通过控制线性阀线圈脉冲下电时间调控阀口开度以及压力增益。

4.2 增压阀增压测试

对增压阀中的常开型开关阀进行增压测试。设置目标加载压力 120 bar,记录阀后端压力变化情况并计算压力上升速率,测试结果如图 13 所示。图 13 中可看出电缸在 1 s 时开始工作,将阀前端压力加载到 120 bar;线圈前 2.4 s 上电,增压阀关闭,后端压力为 0;之后线圈下电,增压阀打开,后端压力逐渐上升至目标液压并保持一段时间,测得增压速率;完成测试后泄压至 0。测得从 12~108 bar 的增压速率为 835 bar/s,仿真得到的增压速率为 990 bar/s,不过仿真经过优化,而实际测试时仍存在摩擦及粘性阻力,测得值小于仿真值符合理论与预期。

4.3 减压阀泄压测试

为测试减压阀连续泄压能力,设置加载压力

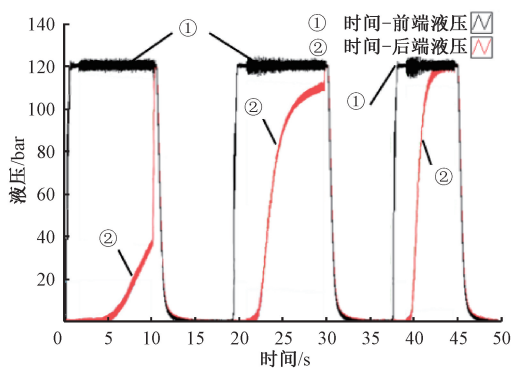


图 12 线性阀增压测试结果

Fig. 12 Pressurization test results of linear valve

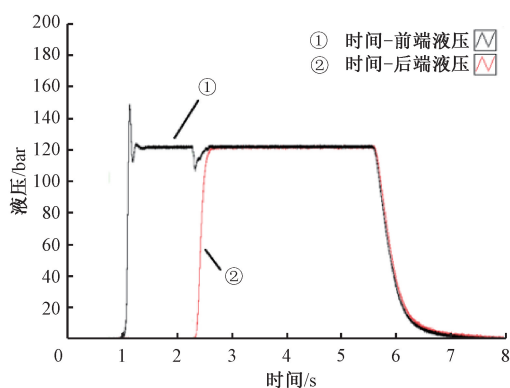


图 13 增压阀增压测试结果

Fig. 13 Pressurization test results of pressure increasing valve

120 bar, 卸载压力 12 bar。测试结果如图 14 所示, 图中液压为减压阀前端液压, 测得从 108 bar 泄压至 12 bar 的平均泄压速率为 914 bar/s。仿真中平均泄压速率为 1 032 bar/s, 与实际测试结果相近。

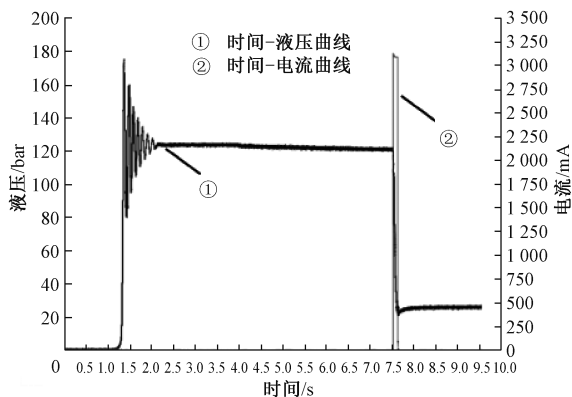


图 14 减压阀泄压测试结果

Fig. 14 Pressure relief test results of pressure reducing valve

5 结 论

针对国内 IEHB 电磁阀性能测试方法、装置研究滞后的问题, 结合 AMESim 软件建立的制动系统电磁阀模型, 研发了电磁阀性能测试系统, 通过对比仿真和测试结果, 验证了测试系统的可行性与可靠性。具体工作内容如下:

1) 根据电磁阀工作原理和结构特征, 基于 AMESim 软件构建电磁阀仿真模型, 对电磁阀增压、泄压特性进行仿真;

2) 设计了制动系统电磁阀的测试方法, 结合测试需求搭建电磁阀响应特性测试系统并对电磁阀增压泄压特性进行了测试;

3) 仿真与测试结果得到的曲线走势一致, 且测得的特征值符合预期结果, 验证了测试方法的可行性和测试结果的可靠性。

参考文献

- [1] 周明岳, 武振江, 冯天骥. 线控制动技术现状及趋势综述[J]. 中国汽车, 2020(7): 51-57.
ZHOU M Y, WU ZH J, FENG T J. Overview of the status and tendency of vehicle brake-by-wire technology [J]. China Auto, 2020(7): 51-57.
- [2] 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.
YU ZH P, HAN W, XU S Y, et al. Review on hydraulic pressure control of electro-hydraulic brake system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(14): 1-15.
- [3] 李静, 丁明慧, 黄建凌, 等. 开关电磁阀非线性流量可控性评价与优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(2): 325-335.
LI J, DING M H, HUANG J L, et al. Evaluation and optimization of the nonlinear flow controllability of on-off solenoid valve [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(2): 325-335.
- [4] 李冰林, 王刚刚, 万茂松. 汽车 EHB 系统动态特性的仿真分析[J]. 现代制造工程, 2016(4): 74-79.
LI B L, WANG G G, WAN M S. Dynamic characteristics simulation and analysis of vehicle EHB system [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(4): 74-79.
- [5] 张庆渴, 王洪亮, 王显会, 等. 汽车气压式驻车制动系统电磁阀优化设计研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(4): 172-175, 181.
ZHANG Q K, WANG H L, WANG X H, et al.

- Optimization of solenoid valve of pneumatic electronic parking brake system[J]. Computer Simulation, 2017, 34(4):172-175,181.
- [6] 范翔. 车用 ABS 电磁阀测试系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- FANG X. Research on ABS solenoid valve testing system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [7] ZHAO X, LI L, SONG J, et al. Linear control of switching valve in vehicle hydraulic control unit based on sensorless solenoid position estimation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (7): 4073-4085.
- [8] PIPAN M, HERAKOVIC N. Volume flow characterization of PWM-controlled fast-switching pneumatic valves [J]. Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2016, 62(9): 543-550.
- [9] 张荣林. 面向智能汽车的线控制动系统主动制动控制与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- ZHANG R L. Active braking control and application of brake-by-wire system for intelligent vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [10] 丁明慧. 乘用车线控液压制动系统执行器动态特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- DING M H. Research on actuator dynamic characteristics of hydraulic brake-by-wire system for passenger car [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [11] 方洋, 肖峻, 蔡未末, 等. 基于 AMESim 的高速开关阀动态特性仿真研究[J]. 液压与气动, 2019(7): 81-87.
- FANG Y, XIAO J, CAI W M, et al. Simulation research on dynamic characteristics of high speed on-off valve based on AMESim [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019(7): 81-87.
- [12] 陆艺, 郭斌, 潘小旺, 等. 直动型气动电磁阀综合性能测试系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 795-800.
- LU Y, GUO B, PAN X W, et al. Study on integrative performance test system for direct-driven pneumatic solenoid valve [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 795-800.
- [13] 胡晓峰, 闫富菊, 郭斌, 等. 高速机车防滑阀动特性仿真及测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 250-259.
- HU X F, YAN F J, GUO B, et al. Dynamic characteristics simulation and test method for the high speed locomotive anti-skid valve [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 250-259.
- [14] 石蕾. ESC 中性电磁阀的动态特性研究及参数优化[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- SHI L. Research on the dynamic characteristics and optimize parameters of ESC linear solenoid valve [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.
- [15] 郭北涛, 柳洪义, 曹阳, 等. 基于虚拟仪器技术的电磁阀综合特性测控系统[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 293-298.
- GUO B T, LIU H Y, CAO Y, et al. Measurement and control system for comprehensive performance of solenoid valve based on virtual instrument technique valve [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 293-298.
- [16] 陆艺, 卢洁, 袁月峰, 等. 商用车 EBS 比例继动阀性能测试系统设计[J]. 中国测试, 2018, 44(2): 134-139.
- LU Y, LU J, YUAN Y F, et al. Design of performance test system for EBS proportional relay valve of commercial vehicle [J]. China Measurement & Test, 2018, 44(2): 134-139.
- [17] 竺春祥, 姚碧辉, 邓立唯, 等. 电机测试中动态加载及综合测试系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5): 202-210.
- ZHU CH X, YAO B H, DENG L W, et al. Research of motor dynamic loading and comprehensive test system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5): 202-210.
- [18] 马天和, 吴萌岭, 田春. 城轨列车减速度反馈制动力闭环控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 197-205.
- MA T H, WU M L, TIAN CH. Deceleration-feedback braking force closed-loop control method for urban rail train [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 197-205.
- [19] 樊瑞瑞, 任勇峰, 贾兴中. 一种电磁阀电流信号调理电路的设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(20): 145-149.
- FAN R R, REN Y F, JIA X ZH. Design of solenoid valve current signal adjustment circuit [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(20): 145-149.
- [20] 张浩, 许靖锋, 吴彬. 基于 LabVIEW 串口通信的多通道风速风向测试系统[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(7): 137-140.
- ZHANG H, XU J F, WU B. Multi channel wind speed and direction test system based on LabVIEW serial communication [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(7): 137-140.
- [21] 王生龙, 景博, 焦晓璇, 等. 测试性设计策略优化与建模的可视化研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 109-115.
- WANG SH L, JING B, JIAO X X, et al. Visual research on strategy optimization and modeling of testability design[J].

Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,
2019, 33(12):109-115.

作者简介



季恩泽, 2020 年于中国计量大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为汽车零部件智能检测技术研究及装备研制。

E-mail: 943166438@qq.com

Ji Enze received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 2020. Now he is a M. Sc. candidate in China Jiliang University. His research interests include intelligent inspection and equipment development of auto parts.



郭斌(通信作者), 2000 年于山东大学获得学士学位。2003 年于中国计量科学研究院获得硕士学位, 现为中国计量大学副教授, 主要研究方向为汽车零部件检测、智能制造与机器人及视觉应用技术。

E-mail: guobin905@cjl. edu. cn

Guo Bin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from ShanDong University in 2000, M. Sc. from National Institute of Metrology, China in 2003. Now he is an associate professor in China Jiliang University. His main research interests include auto parts detection, intelligent manufacturing and robot, and visual application technology.