

# 有轨电车液压制动力控制电磁阀应用

张彦伟<sup>1</sup> 毛景禄<sup>1</sup> 王 聪<sup>1</sup> 王中祥<sup>1</sup> 郝欣欣<sup>2</sup>

(1. 中车制动系统有限公司, 266031, 青岛; 2. 青岛市能源保障中心, 266071, 青岛)

**摘 要** [目的] 有轨电车液压制动系统中的控制电磁阀主要包括比例减压阀和高速开关阀。比例减压阀因结构特性, 耐污能力差, 故障率高; 而高速开关阀技术目前仅有克诺尔公司应用, 国内厂家鲜有涉及。需对比两种控制电磁阀在液压制动力控制中的应用, 评估其结构、工作原理及闭环控制性能, 为有轨电车液压制动力控制系统设计提供参考。[方法] 介绍了比例减压阀和高速开关阀两种液压制动力控制电磁阀的结构和工作原理, 详细阐述了基于比例减压阀和高速开关阀的液压制动力控制原理。搭建有轨电车液压制动力控制试验台, 采用闭环控制算法对高速开关阀和比例减压阀分别进行 0.5 Hz 和 1.0 Hz 正弦波的压力跟随试验, 对比实际压力曲线和目标压力曲线的跟随情况。[结果及结论] 基于高速开关阀工作原理的液压制动系统, 制动力闭环控制精度高, 适用于需要制动力精准控制、自动对标的全自动运行线路; 高速开关阀制动力控制响应快, 防滑能力突出, 可减小车轮擦伤风险; 高速开关阀相比于比例减压阀具有耐污能力强的特点, 可以降低制动系统故障率。基于高速开关阀原理的液压制动系统值得在有轨电车液压制动技术领域推广运用。

**关键词** 有轨电车; 液压制动力控制电磁阀; 闭环控制性能

**中图分类号** U482.1

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.01.054

## Application of Solenoid Valves for Tram Hydraulic Braking Force Control

ZHANG Yanwei<sup>1</sup>, MAO Jinglu<sup>1</sup>, WANG Cong<sup>1</sup>, WANG Zhongxiang<sup>1</sup>, HAO Xinxin<sup>2</sup>

(1. CRRC Qingdao CRRC Brake System Co., Ltd., 266031, Qingdao, China; 2. Qingdao Energy Security Center, 266071, Qingdao, China)

**Abstract** [Objective] The control solenoid valves in the hydraulic braking system of trams mainly include proportional pressure reducing valve and high-speed switching valve. Due to the structural characteristics, the former is poor in pollution resistance and has high failure rate. While the latter is presently only used by Knorr-Bremse, and few domestic manufacturers are involved in it. It is necessary to compare the two types of control solenoid valves application in the control of hydraulic

braking force, evaluate their structures, working principles, and closed-loop control performance, so as to provide references for the design of the tram hydraulic braking force control system. [Method] The structures and working principles of the two types of solenoid valves for hydraulic braking force control, namely proportional pressure reducing valve and high-speed switching valves, are introduced. The hydraulic braking force control principle based on the two types of valves are elaborated in detail. A test bench for the tram hydraulic braking force control is set up, and pressure following tests with 0.5 Hz and 1.0 Hz sinusoidal waves are carried out on the two types of valves respectively by using closed-loop control algorithms. The following situations of the actual pressure curves and the target pressure curves are compared. [Result & Conclusion] The hydraulic braking system based on the working principle of high-speed switching valve has a high precision of closed-loop control for braking force, and is applicable to fully automatic operation lines that require precise control and automatic calibration of braking force. This valve has fast response to braking force control and outstanding anti-slip ability, conducive to reducing the risk of wheel abrasion. Compared with proportional pressure reducing valve, the high-speed switching valve features strong pollution resistance, which can lower the failure rate of the braking system. Therefore, the hydraulic braking system based on the principle of high-speed switching valve is worthy of being popularized and applied in the field of hydraulic braking technology for trams.

**Key words** tram; solenoid valve for hydraulic braking force control; closed-loop control performance

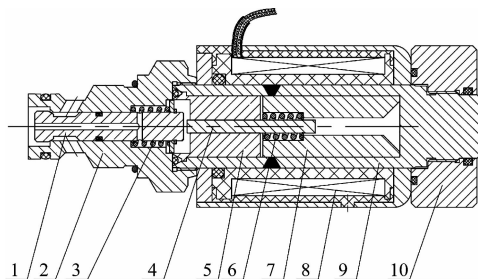
轨道交通车辆目前采用的制动方式主要有电制动、空气制动、液压制动三种<sup>[1]</sup>。液压制动系统具有安装空间小、质量轻、制动力大、响应速度快、可控性好等突出优点, 因此成为低地板有轨电车制动系统的首选<sup>[2]</sup>。自轨道交通车辆引入液压制动技术以来, 最初采用的是基于比例减压阀原理的制动力控制技术, 然而由于比例减压阀的结构特性, 一直存在耐污能力差、故障率高的缺点。高速开关

阀因其响应快的特点在空气制动中早有运用,但基于高速开关阀的液压制动力控制技术目前只有克诺尔公司少量应用,国内制动系统厂家还鲜有将高速开关阀应用于液压制动系统的控制当中。随着液压阀技术的不断发展,中车制动系统有限公司近年来进行了基于高速开关阀原理的液压制动力控制技术的研究。本文对比分析了高速开关阀和比例减压阀的结构和工作原理,以及其压力闭环控制性能,为相关设计人员提供参考。

## 1 高速开关阀与比例减压阀工作原理

### 1.1 高速开关阀结构及工作原理

高速开关阀结构(见图1),主要由阀体、阀芯、静衔铁、动衔铁、线圈组件、主弹簧及复位弹簧等零件组成。



注:1—阀芯;2—阀体;3—主弹簧;4—顶杆;5—静衔铁;6—复位弹簧;7—动衔铁;8—线圈组件;9—衔铁管组件;10—螺母。

图1 高速开关阀结构

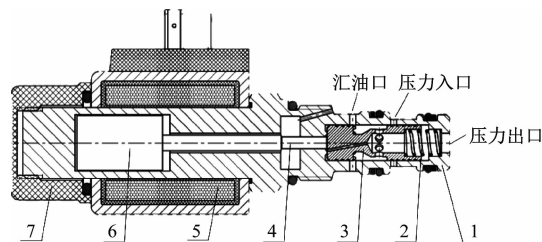
Fig. 1 Structure of high-speed switching valve

高速开关阀的工作原理如下:电磁铁断电时,阀芯1在弹簧3作用下闭合,使A口与B口断开;电磁铁通电时,动衔铁7被静衔铁6吸合,推动阀芯1打开,使A口与B口连通。高速开关阀采用PWM(脉冲宽度调制)控制。高速开关阀工作时,通过输入不同的占空比调节阀口开度进而调节进入制动系统管路的油液流量。当夹钳制动缸压力达到目标压力时,阀芯快速关闭,实现快速精准调压。

### 1.2 比例减压阀结构及工作原理

比例减压阀结构(见图2),主要由阀体、阀芯、顶杆、衔铁、比例电磁铁、复位弹簧及螺母等零件组成。

比例减压阀工作原理如下:阀芯受比例电磁铁电磁力、弹簧力、液压力的共同作用,液压力同电磁力和弹簧力作用方向相反;当液压力小于电磁力和

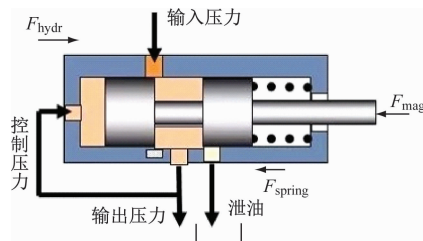


注:1—阀体;2—复位弹簧;3—阀芯;4—顶杆;5—比例电磁铁;6—衔铁;7—螺母。

图2 比例减压阀结构

Fig. 2 Structure of proportional pressure reducing valve

弹簧力,阀芯左移,输入压力与输出压力连通,输出压力增加;当液压力大于电磁力和弹簧力,阀芯右移,输出压力与泄油口连通,输出压力减小,直到液压力同电磁力和弹簧力平衡。因而,比例减压阀输出压力受比例电磁铁电磁力控制,其与比例减压阀输入电流成正比。比例减压阀工作原理示意图如图3所示。



注: $F_{hydr}$ —液压力; $F_{spring}$ —弹簧力; $F_{mag}$ —电磁力。

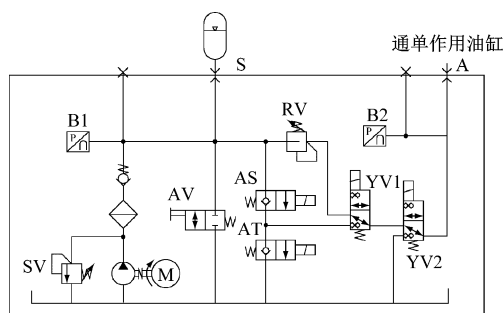
图3 比例减压阀工作原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the working principle of proportional pressure reducing valve

## 2 液压制动力控制原理

### 2.1 基于高速开关阀原理的液压制动力控制

轨道交通车辆液压制动系统中基于高速开关阀控制技术原理的典型液压控制回路,如图4所示。图4中:AS阀和AT阀为两个高速开关阀,用于常用制动液压力的控制。车辆施加常用制动时,YV1阀得电,当实际压力低于目标压力时,向AS阀输入PWM控制信号,AS阀不断开关,进入制动缸的油液增加,制动压力增大;当实际压力高于目标压力时,向AT阀输入PWM控制信号,AT阀不断开关,制动缸的油液减少,制动压力减小。车辆施加紧急制动时,YV1阀失电,蓄能器压力经减压阀RV、紧急阀YV1、缓解阀YV2到达制动缸,制动压力为RV阀预设的压力。车辆需要辅助缓解时,YV2阀得电,制动压力降为0。



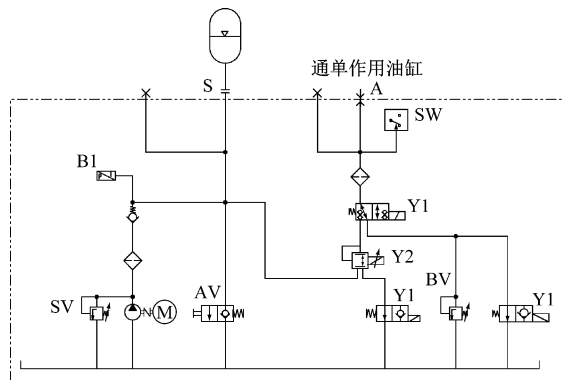
注:SV—安全阀;B1—蓄能器压力传感器;AV—泄压阀;AS—高速开关阀(充液阀);AT—高速开关阀(排液阀);RV—减压阀;YV1—紧急阀;YV2—缓解阀;B2—制动缸压力传感器;A—制动缸;S—蓄能器;M—电机;图5等同。

图 4 基于高速开关阀技术原理的典型液压控制回路

Fig. 4 Typical hydraulic control circuit based on the technical principle of high-speed switching valve

## 2.2 基于比例减压阀原理的液压制动力控制

轨道交通车辆液压制动系统中基于比例减压阀控制技术原理的典型液压回路,如图 5 所示。实际应用中,由于比例减压阀的个体差异性,基于比例减压阀的制动力仍需采用闭环控制。Y2 阀为比例减压阀,用于常用制动液压压力的控制。车辆施加常用制动时,Y1 阀失电,Y4 阀得电,当压力需增加时,输入 PWM 控制信号至比例减压阀,占空比增大使输出压力增加,占空比减小使输出压力减小。根据实际制动液压压力与目标压力的差值,不断修正比例减压阀的控制占空比,实现制动压力的闭环控制。车辆施加紧急制动时,Y5 阀得电,Y4 阀失电,制动压力为 SV2 阀预设的压力。车辆需要辅助缓解时,Y1 和 Y4 阀得电,控制 Y2 阀输出最大压



注:Y2—比例减压阀;BV—背压阀;Y1—两位两通阀;SW—压力开关。

图 5 基于比例减压阀原理的典型液压控制回路

Fig. 5 Typical hydraulic control circuit based on the technical principle of proportional pressure reducing valve

力,夹钳缓解。

## 3 试验台搭建

为进行高速开关阀和比例减压阀的制动力控制试验,搭建液压制动力控制试验台,如图 6 所示。该试验台由上位机、控制单元、液压单元和制动缸组成,其中:上位机可进行试验操作,实时监控和记录数据等;控制单元可运行控制程序,输出 PWM 控制指令至液压单元;液压单元接收控制单元的指令,输出液压压力至制动缸。该试验台可进行高速开关阀的制动力闭环控制测试和比例减压阀的制动力闭环控制测试。



图 6 液压制动力控制试验台

Fig. 6 Hydraulic brake control test bench

## 4 试验结果分析

采用闭环控制算法进行比例减压阀和高速开关阀制动力控制测试。对比例减压阀和高速开关阀进行正弦波压力跟随试验,分别输入 0.5 Hz 和 1.0 Hz 正弦波目标压力值,对比分析实际压力曲线的跟随情况,包括误差分析、相位滞后对比、响应快速性对比等。高速开关阀试验结果如图 7 和图 8 所示。比例减压阀试验结果如图 9 和图 10 所示。

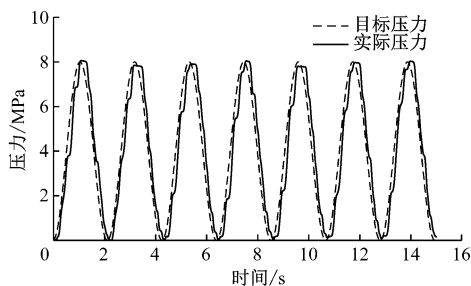


图 7 高速开关阀 0.5 Hz 正弦波闭环控制试验曲线

Fig. 7 Test curve of 0.5 Hz sinusoidal wave closed-loop control of high-speed switching valve

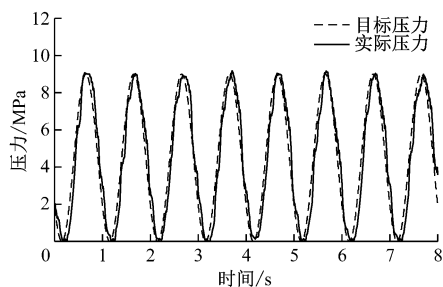


图8 高速开关阀 1.0 Hz 正弦波闭环控制试验曲线

Fig. 8 Test curve of 1.0 Hz sinusoidal wave closed-loop control of high-speed switching valve

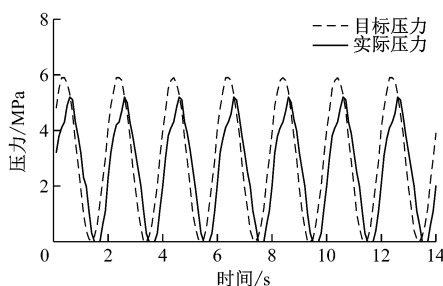


图9 比例减压阀 0.5 Hz 正弦波闭环控制试验曲线

Fig. 9 Test curve of 0.5 Hz sinusoidal wave closed-loop control of proportional pressure reducing valve

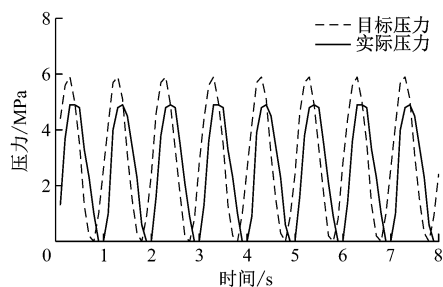


图10 比例减压阀 1.0 Hz 正弦波闭环控制试验曲线

Fig. 10 Test curve of 1.0 Hz sinusoidal wave closed-loop control of proportional pressure reducing valve

通过上述 0.5 Hz 和 1.0 Hz 的正弦波响应曲线可以看出:基于比例减压阀原理的闭环控制曲线与基于高速开关阀原理的闭环控制曲线相比,比例减

压阀压力控制输出滞后明显;且高速开关阀闭环控制曲线的实际压力最大值与目标压力最大值基本一致,而比例减压阀的实际压力最大值与目标压力最大值差值较大,比例减压阀闭环控制曲线动态误差较大。

## 5 结语

本文介绍了高速开关阀和比例减压阀的工作原理,采用正弦波压力跟随试验研究了两种制动力控制电磁阀的制动力控制性能。结果表明:基于高速开关阀原理的液压制动系统,制动力闭环控制精度高,适用于需要制动力精准控制、自动对标的全自动运行线路;高速开关阀制动力控制响应快,防滑能力突出,可减小车轮擦伤风险。另外高速开关阀相比于比例减压阀具有耐污能力强的特点,可以降低制动系统故障率。因此,基于高速开关阀原理的液压制动系统值得在有轨电车液压制动技术领域推广运用。

## 参考文献

- [1] 王立兵, 许浩翔. 城轨车辆空气制动与液压制动系统的概述[J]. 科技创新与应用, 2014, 4(18): 43.  
WANG Libing, XU Haoxiang. Overview of air braking and hydraulic braking systems for urban rail vehicles[J]. Technology Innovation and Application, 2014, 4(18): 43.
- [2] 吴萌岭. 低地板有轨电车国产制动系统及运用[J]. 现代城市轨道交通, 2014(1): 38.  
WU Mengling. Braking system made in China and its application on low-floor tram[J]. Modern Urban Transit, 2014(1): 38.

· 收稿日期:2022-04-14 修回日期:2022-05-05 出版日期:2025-01-10

Received:2022-04-14 Revised:2022-05-05 Published:2025-01-10

· 通信作者:张彦伟,工程师,yanweizhg@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com