

# 基于 EP2002 制动系统的地铁列车制动仿真控制系统

章文川 郎诚廉

(同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海)

**摘要** [目的]为解决 EP2002 阀内部高度集成,无法实现内部故障注入的问题,设计了一套能够正确反映 EP2002 制动系统作用机制的地铁车辆制动仿真控制系统,用于地铁列车制动系统的故障仿真与人员培训。[方法]介绍了 EP2002 阀系统的气路结构与作用机制,从电路部分和气路部分分别阐述了基于 EP2002 的地铁列车制动仿真控制系统总体方案。基于 AMESim 仿真软件,分别对 EP2002 制动系统与地铁列车制动仿真控制系统进行了常用制动与紧急制动下的气路仿真试验,从而验证二者制动特性的一致性。[结果及结论]基于 EP2002 的地铁列车制动仿真控制系统总体方案使用基本气路元件构建出具有同等特性的 EP2002 阀等效单元气路。对气路中较为复杂部分,基于容腔充放气的数学模型采用时间步长仿真法使用软件虚拟仿真对其进行等效。使用基于 STM32F107 单片机的控制单元实现对气路部分的监测与控制,同时负责各个 EP2002 阀等效单元之间的通信。地铁列车制动仿真控制系统采用与 EP2002 制动系统相同的组网结构,多个 EP2002 阀等效单元通过 CAN 总线与车辆总线组网构建起基于 EP2002 制动系统的制动仿真控制系统,以较为低廉的成本实现了对整列车制动系统的仿真。AMESim 模型仿真结果显示:地铁列车制动仿真控制系统能够以较快的响应速度与较高的控制精度,将制动缸压力控制在目标值,其制动外特性与 EP2002 制动系统完全一致。

**关键词** 城市轨道交通; 制动仿真控制系统; EP2002 制动系统; AMESim

**中图分类号** G484: U270.35

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.01.047

## Metro Train Braking Simulation Control System Based on EP2002 Braking System

ZHANG Wenchuan, LANG Chenglian

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] To address the issue of the highly integrated internal structure of the EP2002 valve system, which hinders internal fault injection, a metro train braking simulation control system that accurately reflects the functioning mechanism of the EP2002 braking system is designed. The system is intended for fault simulation and personnel training in metro train braking systems. [Method] The air circuit structure and

operating mechanism of the EP2002 valve system are introduced, and the overall scheme of the metro train braking simulation control system based on EP2002 is elaborated separately for the electrical and pneumatic components. Using AMESim simulation software, common and emergency braking experiments are conducted to simulate the air circuit of the EP2002 braking system and the metro train braking simulation control system respectively, and the consistency of their braking characteristics is verified. [Result & Conclusion] The overall scheme of the metro train braking simulation control system based on EP2002 utilizes basic air circuit components to construct an equivalent unit circuit with properties identical to the EP2002 valve. For the more complex parts of the air circuit, a mathematical model based on chamber air filling and venting is employed using time-stepping simulation in the software for equivalence. The control unit based on the STM32F107 microcontroller is used for monitoring and controlling the pneumatic section, as well as managing communication between various equivalent EP2002 valve units. The metro train braking simulation control system adopts networking structure similar to EP2002 braking system, with multiple equivalent EP2002 valve units interconnected through a CAN bus and vehicle bus to establish a braking simulation control system based on the EP2002 braking system, achieving cost-effective simulation of the entire train braking system. AMESim model simulation results indicate that the metro train braking simulation control system can maintain brake cylinder pressure at the target value with faster response speed and higher control precision, exhibiting external braking characteristics completely consistent with the EP2002 braking system.

**Key words** urban rail transit; braking simulation control system; EP2002 braking system; AMESim

列车操作培训,尤其涉及故障的培训,大多通过仿真系统实现。制动系统的仿真系统,不仅能够模拟列车常规情况下的各种功能操作,不受行车现场地点和时间的限制,而且还能模拟电气和气路等故障,复现其发生现象。于制动系统而言,仿真系

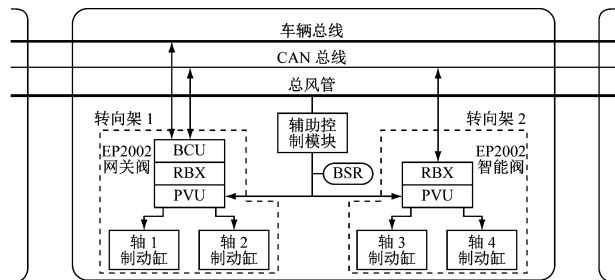
统对降低其复杂性、提高其可靠性等改进性能的研究也有一定的意义。在实际轨道交通车辆中,由于 EP2002 制动系统具有集成度高、响应快、控制精度高等优点,被广泛应用。但同时也存在着维修困难、无法注入内部故障等问题,对此,本文以 EP2002 制动系统为基础,建立地铁车辆制动仿真控制系统(以下简称“EP2002 制动仿真系统”)。

## 1 EP2002 制动系统

EP2002 制动系统是德国 KNORR-BREMSE 公司推出的一款架控式制动系统,由供风系统、制动控制系统、制动执行机构及空气悬挂等部分构成。EP2002 制动系统由供风系统供应压缩空气,接收来自空气悬挂的负荷信号,通过制动控制系统将输出到制动执行机构的气压控制在对应当前负荷工况的目标气压,进而向列车施加目标制动力。其中 EP2002 阀是整个制动系统的控制核心。

EP2002 阀包括智能阀、网关阀与 RIO(远程输入/输出)阀。三者都具有 RBX(本地制动控制单元)与 PVU(气动阀单元),能够实现对本地转向架的制动缸压力控制;网关阀还另装有 BCU(制动控制单元),能够进行制动力计算与分配;另外网关阀与 RIO 阀还具有模拟输入、可编程数字输入、可编程继电器输出等接口<sup>[1-2]</sup>。

EP2002 制动系统将全车分为多个 CAN(控制器局域网)总线段进行控制,每个 CAN 总线段中装有一个或多个网关阀、若干个智能阀与若干个 RIO 阀。图 1 为典型的 EP2002 制动系统组网结构<sup>[3]</sup>。



注:BSR—制动储风缸。

图 1 典型的 EP2002 制动系统组网结构

Fig. 1 Typical EP2002 braking system networking structure

所有 EP2002 阀的 PVU 气路都是一致的,主要由主调节器、副调节器、先导阀与主阀等元件构成。EP2002 阀 PVU 气路结构如图 2 所示。

副调节器将来自制动储风缸的压力调制在最

大负荷下紧急制动所需的制动缸压力值;负荷调节单元将此压力进一步调制到当前负荷工况下紧急制动所需制动缸压力,并以此压力作为主调节器的参考输入进行流量放大;先导阀(PV1—PV7)在 RBX 给出的电信号控制下动作,控制后端气路(CP1—CP7)的气压,进而控制主阀(V1—V8)的动作,从而控制 BCP(输送到制动缸的气压)大小。

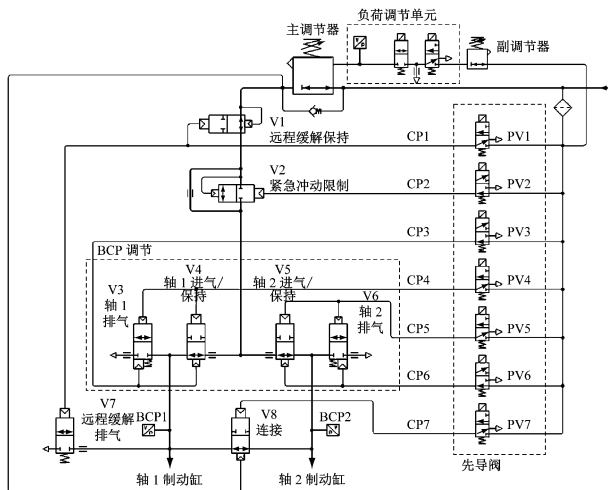


图 2 EP2002 阀 PVU 气路结构

Fig. 2 PVU air circuit structure of EP2002 valve

## 2 EP2002 制动仿真控制系统的总体方案

在 EP2002 制动系统中,各转向架上的 EP2002 阀通过 CAN 总线及车辆总线进行组网,实现对整列车的制动控制。EP2002 制动仿真控制系统要以 EP2002 阀等效单元为核心,对应原系统中的 EP2002 阀。

EP2002 阀等效单元由气路单元与控制单元两部分构成。气路单元对应原 EP2002 阀的 PVU 部分,使用基本气路元件构建起与原系统相同的气路结构,以还原实际系统的气路特性,并解决原系统高度集成无法注入故障的问题。控制单元采用基于 STM32F107 单片机的嵌入式控制系统。

对于气路中如先导阀与负荷调节单元这样复杂或难以实现部分,基于其数学模型在控制单元中以软件模拟的形式等效实现。因此 EP2002 制动仿真控制系统采用实际气路与虚拟计算联合仿真的方式来模拟原系统的作用机制,其中虚拟计算部分在 STM32F107 单片机中实现。

### 2.1 控制单元设计方案

控制单元的功能在于采集气路单元中气压传

传感器输出的信号,并对气路单元中的阀体进行控制,以实现原 EP2002 阀中 RBX 的功能。控制单元要能实现 CAN 总线及车辆总线通信,以及原系统 BCU 的制动计算与分配功能。此外,还要保持 EP2002 阀等效单元的外部接口与原 EP2002 阀一致,使得多个 EP2002 阀等效单元能够像原系统一样组网,实现对整个车辆制动系统的仿真。EP2002 制动仿真控制系统组网结构如图 3 所示。

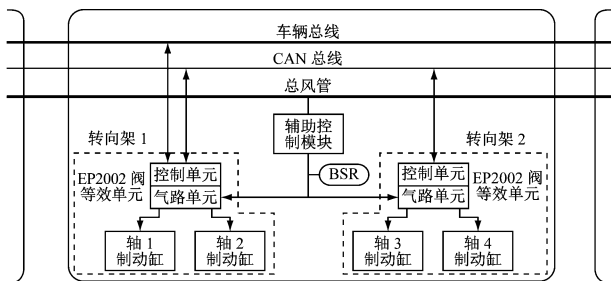


图 3 EP2002 制动仿真控制系统组网结构

Fig. 3 Networking structure of braking simulation control system based on EP2002

## 2.2 气路单元设计方案

### 2.2.1 先导阀的等效

实际 EP2002 阀采用两位三通电磁阀作为先导阀间接控制主阀动作的控制方法,需要高度集成化的加工工艺。对此,EP2002 制动仿真控制系统先导阀需要简化气路以减小仿真平台的体积,此外,由于无法购得两端受压面积不相等的双气控型气控阀,需要对气路进行等效。先导阀等效示意图如图 4 所示。

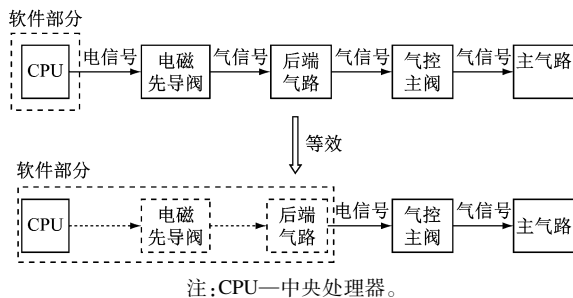


图 4 先导阀等效示意图

Fig. 4 Equivalent diagram of pilot valve

实际上,先导阀动作所造成的后端气路充放气过程可以视为定容开口系的充放气问题。假设工质气体为理想气体,充放气过程为绝热过程,不考虑气体重力,并假设容腔内气压、温度均匀分布,则可以结合阀口流量方程、热力学第一定律和热力学状态方程,将先导阀与控制气路部分放在控制单元

的程序中进行模拟<sup>[4-5]</sup>。首先,根据先导阀的通断状态实时计算其后端气路中的气压;然后,由该气路中的气压计算出主阀阀芯所受合力方向,以判断主阀如何动作;最后,直接由控制单元发出电信号控制作为主阀的先导式电磁阀动作。

由于先导阀只是主气路动作的中间环节,采用先导阀等效气路对制动性能几乎没有影响。这样在制动性能不受影响的情况下,既简化了气路,又保证了作用机制的完整性。

### 2.2.2 负荷调节单元的等效

实际 EP2002 阀的 PVU 气路通过使用主副调节器与负荷调节单元,将输送至 BCP 调节部分的气压控制在对应当前负荷工况的紧急制动气压。

由于中继阀较为特殊,且实际的负荷称重环节较为复杂,故 EP2002 制动仿真控制系统使用原理相近的比例阀来实现负荷称重环节对气压调制。

比例阀受电信号控制,直接输出与电信号成比例的气压信号;高速开关阀型比例阀同样由两个高速开关的电磁阀控制先导腔压力,进而推动阀芯动作,与原系统作用机制相近,且具有良好的流量特性与控制精度,能够满足 EP2002 制动仿真控制系统的需求<sup>[6-7]</sup>。

使用同原系统流量特性和响应速度相近的先导式电磁阀与比例阀进行等效,得到 EP2002 阀等效单元等效气路,如图 5 所示。

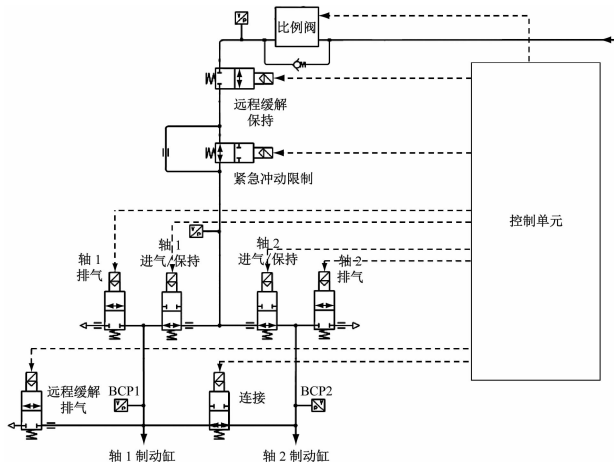


图 5 EP2002 阀等效单元等效气路结构图

Fig. 5 Equivalent air circuit structure diagram of EP2002 valve equivalent unit

EP2002 阀等效单元等效气路与实际 EP2002 阀 PVU 气路保持着相同的气路结构与作用机制。所以,只要二者的制动外特性一致,EP2002 制动仿真



控制系统就能完全反映 EP2002 制动系统的实际功能和特性。

### 3 制动仿真控制系统特性的仿真验证

#### 3.1 EP2002 阀气路的 AMESim 模型

利用 AMESim 软件构建 EP2002 阀气路的 AMESim 模型:首先,使用分立部件构造中继阀<sup>[8]</sup>、气控阀等部件模型;然后,根据 EP2002 阀 PVU 气路构建起完整气路模型<sup>[9]</sup>。气路中设置了压力传感器,根据 BCP 值向先导阀发送控制指令;先导阀的通断改变后端气路的气压值,进而控制主阀的通断。按照实际情况,设置 BSRP(制动储风缸压力)为 0.9 MPa,副调节器输出气压为 0.54 MPa,主调节器输出气压为 0.5 MPa。设置进气节流口面积为 15 mm<sup>2</sup>,排气节流口面积为 15 mm<sup>2</sup>。

#### 3.2 EP2002 阀等效单元的 AMESim 模型

类似地,先使用分立部件构造比例阀、先导式电磁阀等部件模型,再根据 EP2002 阀等效单元气路的结构,用比例阀取代负荷调节单元和中继阀,使用先导式电磁阀代替气控阀,省略了先导阀,直接使用电信号控制先导式电磁阀的通断。EP2002 阀等效单元的 AMESim 模型如图 6 所示。

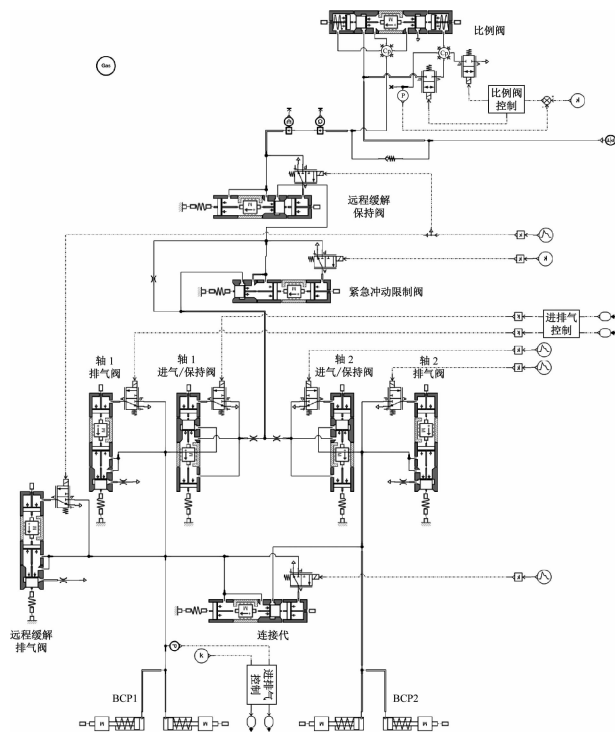


图 6 EP2002 阀等效单元的 AMESim 模型

Fig. 6 AMESim model of EP2002 valve equivalent unit

EP2002 阀等效单元 AMESim 模型与实际

EP2002 阀气路 AMESim 模型的 BSRP、副调节器输出气压、主调节器输出气压、设置进气节流口面积与排气节流口面积保持一致。

基于 AMESim 模型,对 EP2002 阀气路和 EP2002 阀等效单元分别进行常用制动与紧急制动仿真试验,观察对比两者输出的 BCP 曲线。

#### 3.3 EP2002 阀与等效单元的仿真外特性比较分析

##### 3.3.1 常用制动仿真特性比较

在常用制动仿真试验中:制动施加前,轴 1 与轴 2 的进排气阀均关断,处于保压状态,目标压力为 0.42 MPa;1 s 时开始施加制动,轴 2 处于保压状态,轴 1 的进排气阀根据 BCP 与目标压力的大小关系进行调整——当 BCP 高时排气,反之进气,当 BCP 与目标气压接近时进入保压状态;4 s 时制动缓解,远程缓解保持阀关闭,截止对后端气路的供气,同时远程缓解排气阀打开,将制动缸中的气体排出。常用制动下轴 1 的气压仿真曲线如图 7 所示。

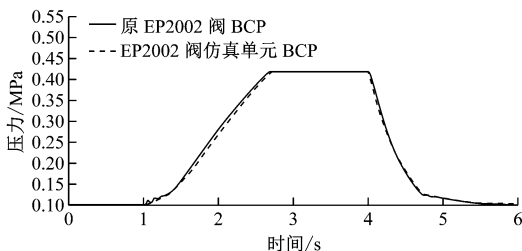


图 7 常用制动下轴 1 的气压仿真曲线

Fig. 7 Air pressure simulation curve of axle 1 under service braking

由图 7 可见,在常用制动施加过程中:EP2002 阀的 BCP 经过 1.69 s 上升至 0.419 MPa 并达到稳定;EP2002 阀等效单元的 BCP 经过 1.72 s 上升至 0.419 MPa 并达到稳定。同理得到常用制动下轴 2 的气压仿真曲线,变化规律类似。由此可看出,等效前后的常用制动外特性基本一致。

##### 3.3.2 紧急制动仿真特性比较

在紧急制动仿真试验中:制动施加前,轴 1 与轴 2 处于保压状态;1 s 时开始施加制动,轴 1、轴 2 都将进气阀打开,排气阀关闭,工作在进气状态,直接将主调节器调制后的气压输送到制动缸中;4 s 时制动缓解。常用制动下轴 1 的气压仿真曲线如图 8 所示。

由图 8 可见,在紧急制动施加过程中:EP2002 阀的 BCP 经过 1.31 s 上升至目标气压的 90%,并最终稳定在 0.499 6 MPa;EP2002 阀等效单元的

BCP 经过 1.30 s 上升至目标气压的 90%, 并最终稳定在 0.500 3 MPa。同理得到紧急制动下轴 2 的气压仿真曲线, 变化规律类似。由此可看出, 等效前后的紧急制动外特性基本一致。

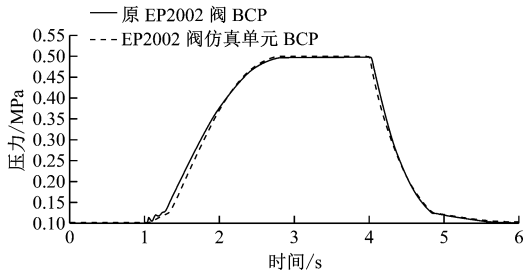


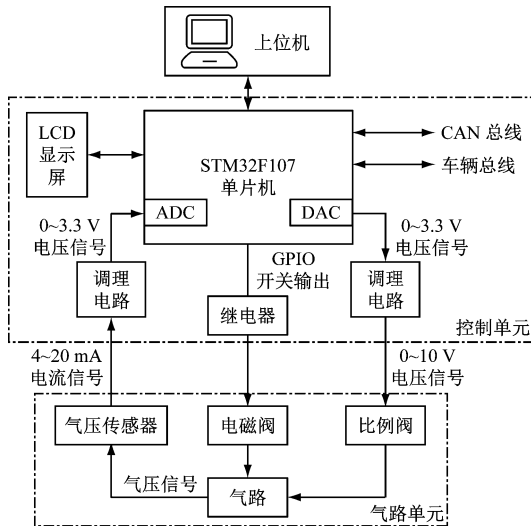
图 8 紧急制动下轴 1 的气压仿真曲线

Fig. 8 Air pressure simulation curve of axle 1 under emergency braking

## 4 EP2002 阀等效单元的实现

### 4.1 EP2002 阀等效单元的硬件实现

图 9 为 EP2002 阀等效单元的硬件示意图。



注: ADC—模拟/数字转换; DAC—数字/模拟转换。

图 9 EP2002 阀等效单元硬件示意图

Fig. 9 Hardware diagram of EP2002 valve equivalent unit

EP2002 阀等效单元的气路单元由先导式电磁阀、比例阀与气路管道等按原 EP2002 阀 PVU 的气路结构组建而成。在气路中关键节点接入气压传感器, 以监视 BCP 与其他关键节点的气压。

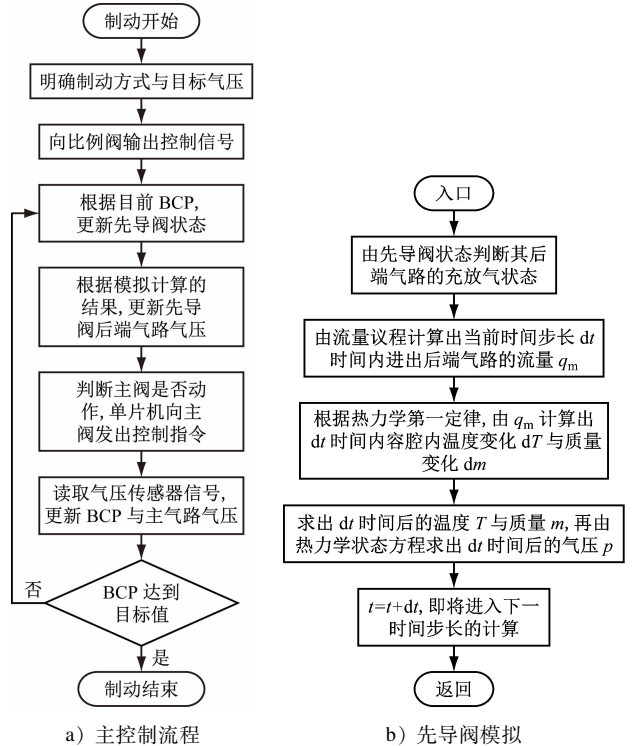
EP2002 阀等效单元的控制单元由基于 STM32F107 单片机的嵌入式控制系统实现, 单片机通过 ADC 读取气路中气压传感器传回的信号, 并按照一定的控制逻辑, 通过 DAC 控制比例阀的输出气压, 并通过 GPIO 输出开关信号控制电磁阀的

通断, 将 BCP 调制在目标值。

LCD 显示屏与上位机能够实现对气路状态的实时显示以及气路故障的注入。STM32F107 支持 CAN 总线与以太网通信, 以此实现原 EP2002 阀的 CAN 总线与车辆总线通信功能, 便使得多个 EP2002 阀等效单元能够组网以实现整列车制动系统的仿真。

### 4.2 EP2002 阀等效单元软件控制流程

EP2002 阀等效单元制动的软件控制流程如图 10 所示, 分为主控制流程与先导阀模拟两部分。



a) 主控制流程

b) 先导阀模拟

图 10 EP2002 阀等效单元软件控制流程

Fig. 10 Control process of EP2002 valve equivalent unit software

先导阀模拟部分子程序以 0.1 ms 为时间间隔被调用, 根据先导阀后端气路的热力学模型, 对其内部气压进行实时仿真计算。

主流程部分根据气路单元中气压传感器传回的信号以及先导阀模拟部分的计算结果, 对气路中阀体进行控制, 以达到控制 BCP 的目的。

## 5 结语

对比 EP2002 阀气路与等效后 EP2002 阀等效单元气路的 AMESim 仿真结果可以看出, 不管是常用制动还是紧急制动, 控制阀均能够以相同的规律动作, BCP 变化曲线也十分接近。可见, EP2002 制

动仿真控制系统能够较为准确地还原出 EP2002 制动系统的特性。

EP2002 制动仿真控制系统以较为低廉的成本,在保留完整作用机制且不失精确性的前提下,用基本气路元件实现对原系统外部特性的正确反映。

## 参考文献

- [1] 杜守忠,吴志明. EP2002 制动系统的控制过程研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2013, 36(4): 35.  
DU Shouzhong, WU Zhiming. Control process study of brake system EP2002[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2013, 36(4): 35.
- [2] 马喜成,龙倩倩. 地铁车辆用 EP2002 制动控制系统[J]. 机电传动, 2007(4): 38.  
MA Xicheng, LONG Qianqian. EP2002 braking control system for metro vehicle[J]. Electric Drive for Locomotives, 2007(4): 38.
- [3] 史富强. 西安地铁 1 号线车辆 EP2002 制动系统[J]. 电子设计工程, 2013, 21(24): 187.  
SHI Fuqiang. Xi'an Metro Line 1 vehicle braking system of EP2002[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(24): 187.
- [4] 罗天培,孙德,张家仙,等. 常温及低温容器充放气模型研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(4): 55.  
LUO Tianpei, SUN De, ZHANG Jiaxian, et al. Charge and discharge model investigation of vessel at normal and cryogenic circumstance[J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(4): 55.
- [5] 徐兴,陈照章,黄俊明,等. 电控空气悬架充放气的动态建模及特性仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(6): 1225.  
XU Xing, CHEN Zhaozhang, HUANG Junming, et al. Dynamic modeling and characteristic simulation of charging-discharging sys-

tem for electronically controlled air suspension[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(6): 1225.

- [6] 姚衡,王涛,范伟,等. 带有高速开关阀的先导式电/气比例阀仿真分析[J]. 机床与液压, 2010, 38(13): 147.  
YAO Heng, WANG Tao, FAN Wei, et al. The simulation of proportional pressure valve with high-speed pilot switches[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(13): 147.
- [7] 张伟,李淳潮,李志远,等. 基于 AMESim 的电/气比例压力阀仿真与试验[J]. 液压与气动, 2020(3): 65.  
ZHANG Wei, LI Chunchao, LI Zhiyuan, et al. Simulation and test for electro-pneumatic proportional pressure valve based on AMESim[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(3): 65.
- [8] 伍智敏,任利惠,裴玉春,等. 地铁列车制动系统的中继阀性能仿真[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(9): 52.  
WU Zhimin, REN Lihui, PEI Yuchun, et al. Simulation of relay-valve of metro braking system performance[J]. Urban Mass Transit, 2011, 14(9): 52.
- [9] 胡薇,朱皓青,王宗明,等. 基于 AMESim 的轨道交通车辆架控制动系统建模与仿真[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(1): 89.  
HU Wei, ZHU Haoqing, WANG Zongming, et al. Modeling of railway bogie controlling pneumatic brake system based on AMESim[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(1): 89.

· 收稿日期:2023-03-11 修回日期:2023-04-06 出版日期:2024-01-10

Received:2023-03-11 Revised:2023-04-06 Published:2024-01-10

通信作者:章文川,硕士研究生,DarlZhan@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

## (上接第 253 页)

- CHEN Yuehua, WANG Yichuan, JIA Lu. Research on classification and coding system of pure digital code at operation and maintenance stage of metro based on BIM[J]. Construction Technology, 2018, 47(3): 118.
- [4] 华叶飞. 国有企业资产交付管理问题研究:以轨道交通资产为例[J]. 中国商论, 2020(11): 80.  
HUA Yefei. Research on asset delivery management of state-owned enterprises—taking rail transit assets as an example[J]. China Journal of Commerce, 2020(11): 80.
- [5] 解知彦. 面向运维的地铁设备信息自动化集成方法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.  
XIE Zhiyan. Research on information automation integration method of metro equipment oriented to operation and maintenance[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [6] Project Management Institute (PMI). A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide) [M]. 5th ed.

Philadelphia: PMI, 2013.

- [7] MOHAMMADI A, AMADOR-JIMENEZ L, NASIRI F. Review of asset management for metro systems: challenges and opportunities [J]. Transport Reviews, 2019, 39(3): 309.
- [8] SUH N P. Axiomatic design theory for systems[J]. Research in Engineering Design, 1998, 10(4): 189.
- [9] KULAK O, CEBI S, KAHRAMAN C. Applications of axiomatic design principles: a literature review[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(9): 6705.

· 收稿日期:2022-05-22 修回日期:2022-06-18 出版日期:2024-01-10

Received:2022-05-22 Revised:2022-06-18 Published:2024-01-10

· 通信作者:洪浩,高级工程师,19426119@qq.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