

文章编号:1671-1637(2015)05-0044-06

## 地铁列车紧急制动故障特征再现仿真

左建勇<sup>1</sup>, 韩飞<sup>1</sup>, 胡薇<sup>2</sup>

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 200092; 2. 法国国立高等工程技术大学  
机械工程学院, 洛林大区 梅兹 57070)

**摘要:**介绍了地铁列车紧急制动环路工作原理与紧急制动气动系统特点,提出了以综合制动指令和中继阀容积室压力为参数的紧急电磁阀故障特征判定法则,分析了有紧急制动指令时紧急制动不施加、无紧急制动指令时紧急制动异常触发与无紧急制动指令时的中继阀容积室压力异常3类紧急电磁阀故障特征,研究了紧急电磁阀的故障诊断流程,运用 AMESim 软件建立了制动系统仿真模型,基于故障再现的模型驱动仿真法模拟了3类紧急电磁阀故障,并在气路控制试验台上进行了第1类故障对比试验。试验结果表明:在正常情况下触发紧急制动信号时,中继阀容积室压力延时1.1 s后达到目标压力;人为断开紧急电磁阀信号线并触发紧急制动信号时,中继阀容积室压力为0,并维持不变,2.6 s后系统报警紧急电磁阀故障。可见,运用 AMESim 建立的制动系统模型能有效再现紧急制动的故障特征,以制动指令与中继阀容积室压力为参数的紧急制动故障识别分析方法可用于紧急制动在途故障监测与服役性能跟踪。

**关键词:**地铁列车;紧急制动;故障特征;故障再现

**中图分类号:**U270.35

**文献标志码:**A

## Reproduction simulation of emergency brake fault feature for subway train

ZUO Jian-yong<sup>1</sup>, HAN Fei<sup>1</sup>, HU Wei<sup>2</sup>

(1. Institute of Railway Transit, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Mechanical Engineering, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Metz 57070, Lorraine, France)

**Abstract:** The working principle of emergency braking loop and the characteristics of emergency pneumatic braking system for subway train were introduced. The diagnostic rules of the faults of emergency electromagnetic valve were provided based on comprehensive braking command and volume-chamber pressure of relay valve. Three kinds of fault characteristics for emergency electromagnetic valve are analyzed respectively corresponding to three kinds of cases, in which emergency brake was invalid with emergency braking command, emergency brake occurred without emergency braking command and volume-chamber pressure of relay valve was abnormal without emergency braking command. The detailed process of fault diagnosis for emergency electromagnetic valve was analyzed. The pneumatic braking system model was set up by using AMESim, three types of faults were simulated based on fault reappearance method, and the contrast test of the first type fault was conducted on the pneumatic control test bed. Test result shows that in triggering the emergency braking signal under normal condition, the volume-chamber pressure delays 1.1 s and reaches its goal. Under artificially disconnecting the signal wire of emergency electromagnetic valve and triggering the emergency braking signal, the

收稿日期:2015-07-05

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAG19B02);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2860219030)

作者简介:左建勇(1976-),男,山西运城人,同济大学副教授,工学博士,从事列车制动与主动安全研究。

volume-chamber pressure is zero and remains unchanged. After 2.6 s, the system alarms the faults of emergency braking electromagnetic valve. So, the braking system model can effectively represent the emergency braking fault features, the fault feature identification method is feasible based on braking command and volume-chamber pressure of relay valve, and it can be used for emergency braking fault's on-line monitoring and service status tracking. 13 figs, 20 refs.

**Key words:** subway train; emergency brake; fault feature; fault reproduction

**Author resume:** ZUO Jian-yong (1976-), male, associate professor, PhD, +86-21-69584712, zuojy@tongji.edu.cn.

## 0 引言

紧急制动是地铁列车安全运行的根本保障<sup>[1]</sup>,紧急制动触发源于列车紧急制动环路,通过制动控制单元中的紧急制动气路实现,压缩空气通过紧急电磁阀、空重车阀等部件驱动基础制动装置动作<sup>[2]</sup>,因此,监测紧急制动气路关键部件即紧急电磁阀故障非常重要<sup>[3-4]</sup>。目前,关于紧急电磁阀的在线故障监测手段较为单一,往往在触发紧急制动后再进行故障排查<sup>[5]</sup>,造成列车运行效率低下等问题,有必要研究快速定位与分析紧急制动故障的有效途径,关键是制动系统建模。Pugi 等将制动系统分成 3 个元件库,采用 MATLAB/Simulink 建模<sup>[6-7]</sup>,3 个元件库包括基本元件库(管路、腔体与节流孔等)、复杂元件库(制动缸、制动阀与分配阀等)与车辆元件库(头车、拖车与信号车等),其中复杂元件库中的制动阀模型和分配阀模型用基本元件库里的基本元件通过 MATLAB/Simulink 中的状态流图和有限状态机来建立,建模过程复杂,工作量大,也不考虑气体与固体传热的影响;Cantone 等基于试验数据进行建模,没有考虑司控室制动阀与分配阀的实际机械结构,而是将其视为“黑箱”,利用试验数据拟合函数进行建模<sup>[8]</sup>,通用性不强;Acarman 等建立了重载汽车的空气制动系统模型,用一阶滤波器来模拟由管长和管内摩擦引起的压力损失变化<sup>[9]</sup>,侧重分析管路对制动性能的影响;Taghzadeh 等建立了 On/Off 阀的详细模型<sup>[10]</sup>;Messina 等建立了由 2 个二位三通 On/Off 阀和 1 个气缸组成的气动系统模型<sup>[11]</sup>,模型包含电磁子模型、机械子模型与流体子模型,解决了控制信号与气动信号的联合建模;魏伟等主要针对货车制动系统建立了列车管的一维非等熵气体流动数学模型,采用了特征线法进行求解<sup>[12]</sup>,属于解析性建模方法,较复杂。以上建模旨在研究制动系统性能与制动单元的参数匹配问题,较少同时运用控制信号、气动信号与机械参数针

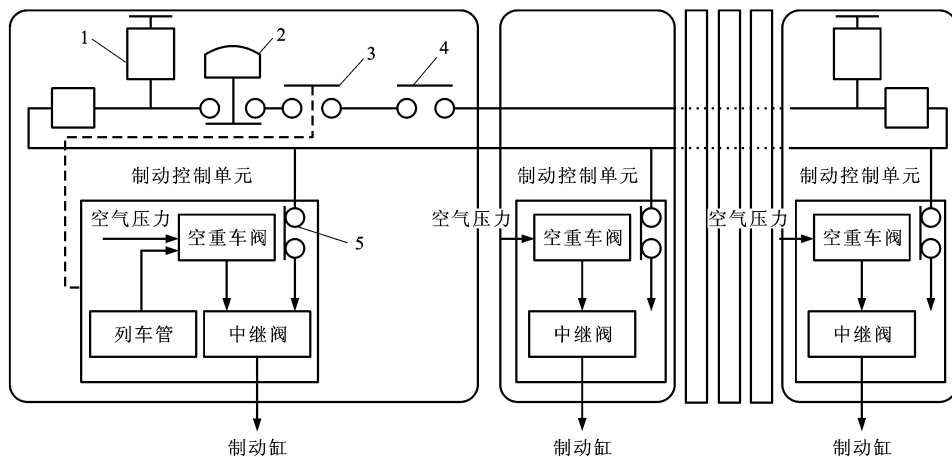
对故障特征分析进行建模。

故障再现仿真是研究结构化复杂机电系统动态情况下发生故障的一个重要手段<sup>[13]</sup>,曹宏发等基于解析模型进行故障再现,即在给定的控制系统中给定输入向量和输出向量,及时发现系统故障以避免可能出现的风险<sup>[14]</sup>;Niu 等利用键合图理论对制动系统列车管压力控制模块开展动态建模和故障仿真,通过增加测量参数不确定性因素并添加虚拟传感器元件,进行了故障再现仿真<sup>[15]</sup>;黄志武等根据键合图模型的因果路径关系推导系统的解析冗余关系,仿真获得系统故障特征矩阵,再通过系统观测特征与故障特征的比较实现系统的故障监测与再现<sup>[16]</sup>。这些研究在有效分离故障方面均有一定优势,但模型复杂,适应范围受限<sup>[17-20]</sup>。为了实现鲁棒的故障监测与再现,本文基于 AMESim 软件,综合运用控制、气动与机械参数针对故障特征分析进行建模,分析了紧急制动故障特征,提出了面向典型参数的故障再现分析方法。

## 1 紧急制动故障

### 1.1 紧急制动环路与工作原理

图 1 为 6 节编组地铁列车的紧急制动环路,贯穿整个列车,触发紧急制动条件包括:司机手柄手动操作、乘务员开关手动操作、列车管压力过低自动动作与列车自动运行系统(ATO)检测到超速、列车分离、制动力不足时均会自动动作。一旦紧急制动触发,压缩空气将通过制动控制单元(BCU)控制制动缸压力变化,实施紧急制动。图 2 为 BCU 工作原理,主要包括电空转换阀(EP 阀)、紧急电磁阀、空重车阀、中继阀与压力传感器等,这些零部件集成在一块气路板上,其中 EP 阀包括缓解阀与制动阀,EP 阀产生的预控压力与制动指令相适应。紧急电磁阀结构等效于二位三通电磁阀,正常情况下得电且允许 EP 阀经过空重车阀,与中继阀连通。当紧急电磁阀失电时,来自制动风缸的压缩



1—司机手柄；2—乘务员开关；3—主风缸压力开关；4—列车自动运行系统与自动保护装置的保护开关；5—制动力检测开关

图 1 紧急制动环路

Fig. 1 Emergency braking loop

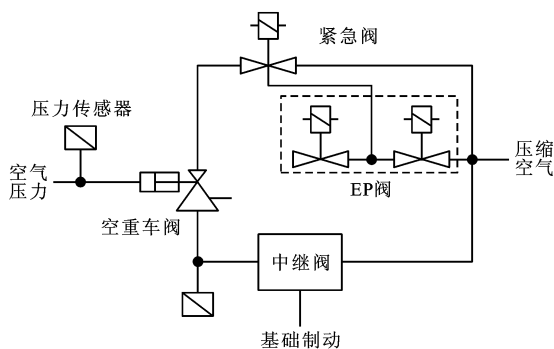


图 2 制动控制单元工作原理

Fig. 2 Operational principle of BCU

空气直接通过空重车阀与中继阀产生紧急制动。空重车阀根据空气弹簧车辆载重信息限制其后端的最高空气压力，预调的压缩空气进入中继阀的容积室后经流量放大作用至制动缸，最终实现基础制动单元的制动力控制。

## 1.2 紧急制动故障

从紧急制动环路工作过程来看，紧急电磁阀常得电的状态直接影响其使用寿命，也是紧急电磁阀故障的主要来源，其表现形式有：紧急制动指令发出后制动系统不能正常施加紧急制动与在没有紧急制动指令时制动系统施加紧急制动。根据图 2 BCU 工作原理可知紧急电磁阀是否动作直接影响中继阀容积室压力变化，因此，中继阀容积室压力可以表征紧急电磁阀故障状态，而制动指令和中继阀容积室压力可通过制动系统检测得到。3 类紧急电磁阀故障为：第 1 类，在紧急制动工况下，紧急电磁阀失电时，1 s 后监测中继阀容积室压力，如果小于 150 kPa，说明紧急电磁阀故障，正常紧急制动时中继阀容积室压力为 300~500 kPa；第 2 类，在非紧急制动工

况下，且无常用、快速制动时，1 s 后监测中继阀容积室压力，如果大于 100 kPa，说明紧急电磁阀发生故障，即在没有任何制动指令情况下施加了紧急制动，正常情况下的中继阀容积室压力应小于 100 kPa；第 3 类，在非紧急制动工况下，且有常用、快速制动时，1 s 后监测中继阀容积室压力，如果高于目标值 50 kPa 以上，说明紧急电磁阀故障，这主要是由于紧急电磁阀失电等原因，即正常制动时错误施加了紧急制动。

## 1.3 故障诊断流程

从故障分析可知：判断紧急电磁阀是否故障的依据主要是制动指令和中继阀容积室压力。根据制动指令判定是否处于紧急制动工况，根据中继阀容积室(CV)压力判定紧急电磁阀实际动作，综合以上 2 个信号作为紧急电磁阀故障诊断的依据，建立紧急电磁阀故障诊断流程见图 3。

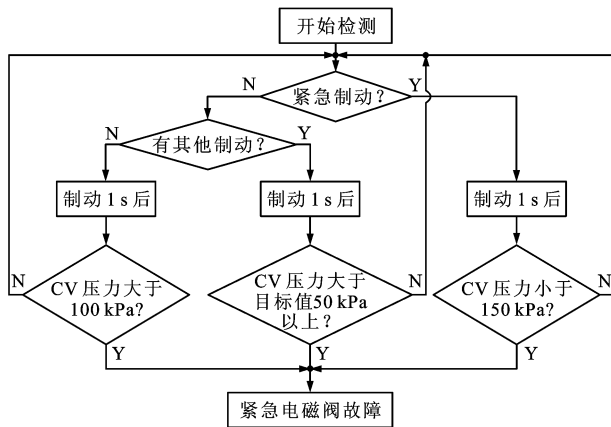


图 3 故障诊断流程

Fig. 3 Fault diagnosis flow

## 2 故障再现与验证

### 2.1 建立仿真模型

AMESim 软件集成了多种气动元件库,构成地铁列车制动系统的各类控制阀可通过标准气动元件二次开发完成,建模原理基于软件定义的3类基本气动单元:容性单元、阻性单元和感性单元。容性单元内部有气体容腔,模型中考虑传热,容腔内部气体的压强、温度与密度等状态变量由相应的微分方程描述,容性单元模型是瞬态模型。容腔内气体的压力变化取决于质量流量、热传导和容积变化。感性单元模型描述了气体的宏观运动规律,反映了气体的惯性效应。气体在管道内的运动特性可用伯努利方程式描述,由于气体质量和黏性很小,建模中不考虑气体惯性效应。

地铁列车气制动系统是一个典型的复杂气动系统,其中 EP 阀等可采用通用的电磁阀模拟,中继阀与空重车阀等则需要通过二次开发建立模型。运用 AMESim 软件建立的气制动系统仿真模型见图 4,模型包含控制信号、空重车调整阀、中继阀、紧急电磁阀、风缸、防滑阀与制动缸等,信息流包含相互独立的气动信息和控制信息,其中气动信息通过气动元件之间的管路相连,控制信息通过等效气动元件的电磁阀控制端输入, $f(x)$ 表示空重车阀输出随空气弹簧压力变化特性, $x$ 为对应空重车阀输出的电磁阀控制信息, $y$ 为反馈压力。图 5 为图 4 中紧急电磁阀的细化模型,由 AMESim 软件标准模块,基于软件定义的3类气动单元:容性单元、阻性单元和感性单元通过信息流传递组合而成。图 6 为 6 节车辆编组的列车级模型,每节车辆上包含一组空气制动系统仿真模型,车辆间以车钩相连,用弹簧与阻尼器等效简化。

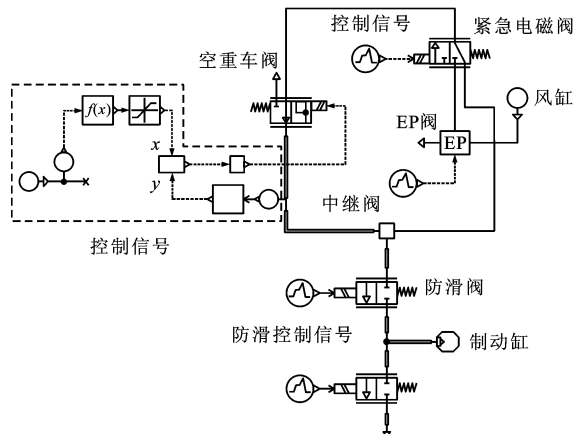


图4 空气制动系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of pneumatic braking system

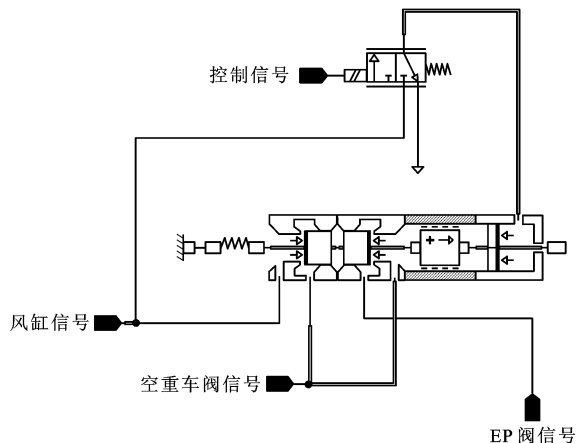


图5 紧急电磁阀仿真模型

Fig. 5 Simulation model of emergency valve

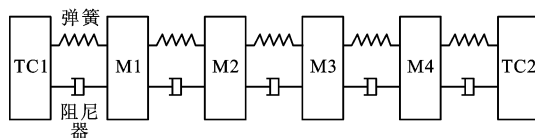


图6 列车空气制动系统仿真模型

Fig. 6 Simulation model of pneumatic braking system for train

器等简化。当某节车辆紧急制动发生故障时,对其他车辆或整列车的影响体现在加速度与车钩力上。模型中 TC1 为头车, M1~M4 为中间车辆, TC2 为尾车。

### 2.2 仿真结果分析

#### 2.2.1 第1类故障

图 7 为 1 节车辆紧急电磁阀失电时,故障状态与正常状态下中继阀容积室压力变化仿真曲线,当发生第 1 类紧急电磁阀故障时,中继阀容积室压力有明显变化,从正常的 500 kPa 降至 150 kPa 以下,说明可以根据中继阀容积室压力变化判断紧急电磁阀故障,与前述故障特征相符。

图 8 为一列车中,当 M2 车辆发生紧急制动第 1 类故障时,车辆之间的车钩力变化仿真曲线。可以看出,当 M2 车辆发生第 1 类紧急电磁阀故障时, M3-

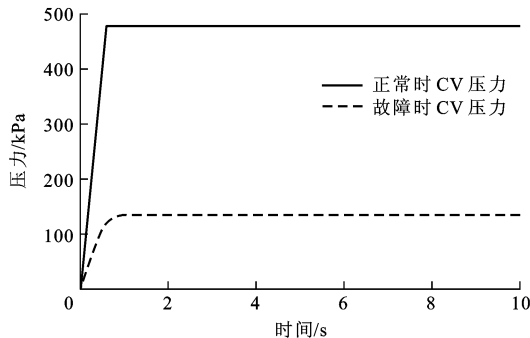


图7 第1类压力曲线

Fig. 7 First kind of pressure curves

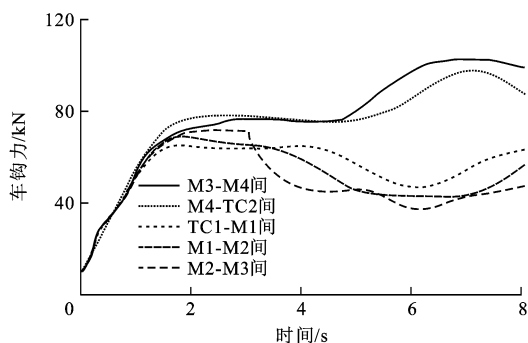


图 8 车钩力曲线

Fig. 8 Coupling force curves

M4 车辆间的车钩力由正常的 80 kN 增大到约 100 kN, M2-M3 车辆间的车钩力则降低至 40 kN, 车辆间纵向力变化剧烈。

### 2.2.2 第 2 类故障

第 2 类故障实质是在没有紧急制动指令的情况下触发了紧急制动, 仿真中通过模拟常用制动工况下施加紧急制动进行分析。常用制动时紧急电磁阀处于得电状态, 通过分析中继阀容积室压力变化曲线间接确定紧急电磁阀故障状态。

图 9 为第 2 类故障仿真结果, 当列车没有施加任何制动指令, 包括紧急、常用与快速制动时, 中继阀容积室压力超过 100 kPa, 说明紧急电磁阀发生故障, 导致 CV 压力出现异常升高。在正常情况下, 由于未施加制动, CV 压力为 0。

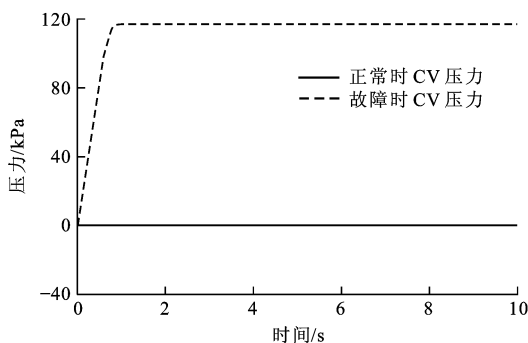


图 9 第 2 类压力曲线

Fig. 9 Second kind of pressure curves

### 2.2.3 第 3 类故障

图 10 为第 3 类故障仿真结果, 在没有施加紧急制动的情况下, 常用制动时中继阀容积室压力应为 200~300 kPa, 而发生故障时中继阀容积室压力约为 500 kPa, 超过标准值 50 kPa 以上, 说明系统错误地施加了紧急制动。

### 2.3 试验验证

为验证仿真结果, 在制动系统气路控制试验台上进行了紧急制动故障再现模拟。图 11 为试验台,

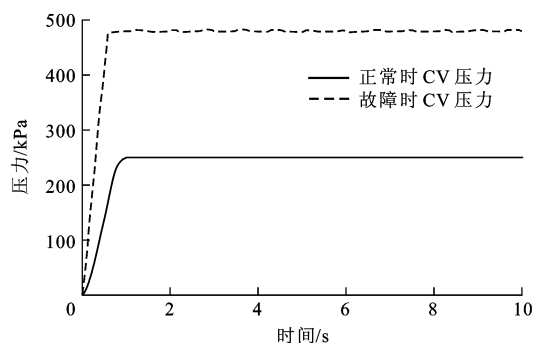


图 10 第 3 类压力曲线

Fig. 10 Third kind of pressure curves

由试验台控制中心、基础制动单元、风源模块、气路被测部件 BECU、BCU 与紧急电磁阀等组成, 可以对气路被测部件 BCU 中各个部件的性能进行测试, 也可实现紧急电磁阀的故障模拟。图 12 为试验控制界面。针对紧急电磁阀第 1 类故障进行模拟试验, 即在紧急制动工况下, 当紧急电磁阀失电时, 1 s 后测得中继阀容积室压力应小于 150 kPa, 试验方法如下。

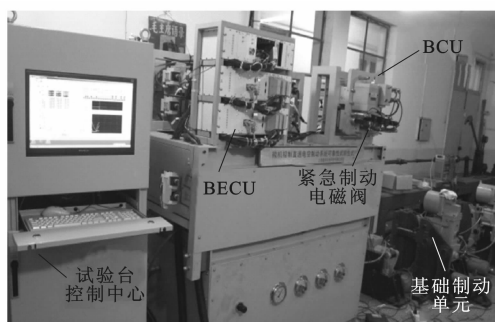


图 11 试验台

Fig. 11 Test bed

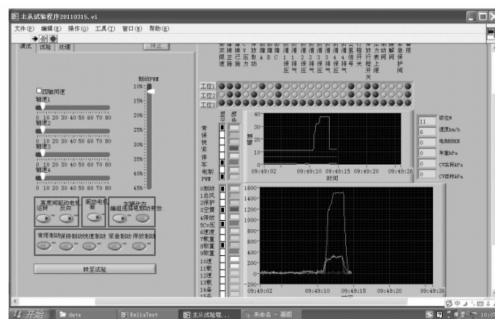


图 12 操作界面

Fig. 12 Operation interface

(1) 触发紧急制动信号, 测试中继阀容积室压力变化情况。

(2) 断开气路被测部件 BCU 的紧急电磁阀信号线, 触发紧急制动信号, 测试中继阀容积室压力变化情况。

紧急阀状态判定标准如下。

(1)紧急电磁阀正常:中继阀容积室实际压力与目标压力一致。

(2)紧急电磁阀故障:中继阀容积室压力小于150 kPa。

图13为试验结果,紧急电磁阀故障状态与紧急制动信号均为0、1逻辑信号,为了便于区分不同信号的变化,将紧急电磁阀故障状态与紧急制动信号分别放大150倍与170倍。从试验结果可以得出如下结论。

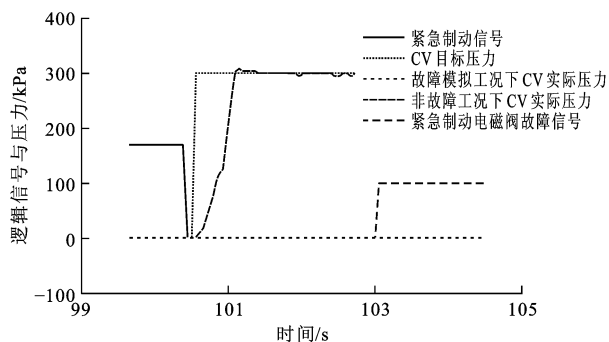


图13 故障再现试验结果

Fig. 13 Fault reproduction test result

(1)在第100.5 s时触发紧急制动信号,根据设定参数计算得到CV目标压力为300 kPa,正常情况下CV实际压力变化约1.1 s后上升至300 kPa。

(2)当人为断开紧急电磁阀信号线,在第100.5 s时触发紧急制动信号,紧急制动状态控制BCU紧急电磁阀失电,模拟第1类故障,CV实际压力为0,中继阀容积室压力达不到预定值,即车辆无法动作,反映紧急制动。一旦出现这类紧急电磁阀故障,就会引起车辆间车钩力的异常变化等问题。根据图3设定的故障判断方法,在紧急制动信号失电后的3 s内连续判断以确认发生紧急电磁阀故障,即在第103 s时紧急电磁阀故障状态翻转。

(3)试验结果表明切断紧急电磁阀的信号以模拟第1类故障,2.6 s后紧急电磁阀故障被识别,与仿真结果一致。同样基于该试验台可以进行紧急电磁阀第2、3类故障模拟试验。

### 3 结 语

根据地铁列车紧急制动环路工作原理与紧急制动气动系统特点,基于AMESim仿真方法,建立了制动系统与列车制动仿真模型,运用故障再现仿真方法对紧急电磁阀故障进行了模拟,并通过气路控制试验台进行了紧急制动故障再现模拟与验证。结果表明:基于AMESim建立的制动系统与列车制动

模型可用于紧急制动故障的模拟,为研究紧急制动故障特征规律提供了参考;提出的基于制动指令与中继阀容积室压力为特征的紧急制动故障分类与分析方法的可行性;通过人为切断紧急制动信号模拟第1类紧急电磁阀故障的试验,对比验证了正常情况与故障情况的紧急电磁阀故障特征识别,研究成果可用于制动系统在途故障监测与制动系统服役安全跟踪。

### 参考文献:

### References:

- [1] 李邦国,范荣巍,杨伟君,等.高速动车组制动防滑阀建模及仿真分析[J].铁道机车车辆,2011,31(5):128-131.  
LI Bang-guo, FAN Rong-wei, YANG Wei-jun, et al. Modeling and simulation analysis of anti-skid valve[J]. Railway Locomotive and Car, 2011, 31(5): 128-131. (in Chinese)
- [2] MILLER J I, HENDERSON L M, CEBON D. Designing and testing an advanced pneumatic braking system for heavy vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2013, 227(8): 1715-1729.
- [3] 廖志坚,刘争平,王月明.基于AMESim的动车组制动防滑系统自定义建模与仿真[J].电力机车与城轨车辆,2012,35(4): 29-32.  
LIAO Zhi-jian, LIU Zheng-ping, WANG Yue-ming. Custom modeling and simulation for anti-skid braking system of EMUs based on AMESim[J]. Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles, 2012, 35(4): 29-32. (in Chinese)
- [4] 边心文,赵翼翔,陈新度.基于AMESim优化功能的参数识别法建模研究[J].机床与液压,2011,39(21):121-124.  
BIAN Xin-wen, ZHAO Yi-xiang, CHEN Xin-du. Study on modeling with parameter identification method based on optimization function of AMESim[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2011, 39(21): 121-124. (in Chinese)
- [5] FRANK P M, KÖPPEN-SELIGER B. New developments using AI in fault diagnosis[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1997, 10(1): 3-14.
- [6] PUGI L, PALAZZOLO A, FIORAVANTI D. Simulation of railway brake plants: an application to SAADKMS freight wagons[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2008, 222(4): 321-329.
- [7] PUGI L, MALVEZZI M, PAPINI S. Design and preliminary validation of a tool for the simulation of train braking performance[J]. Journal of Modern Transportation, 2013, 21(4): 247-257.
- [8] CANTONE L, CRESCENTINI E, VERZICOR R. A numerical model for the analysis of unsteady train braking and releasing manoeuvres[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(3): 305-317.

(下转第56页)

交通运输工程学报, 2005, 5(4): 20-26.

SHI Hong-guo, PENG Qi-yuan, GUO Han-ying. Traction calculation model of urban mass transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 20-26. (in Chinese)

- [16] ZHUAN X, XIA X. Cruise control scheduling of heavy haul trains[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(4): 757-766.

- [17] CHOU M, XIA X, KAYSER C. Modelling and model validation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(4): 501-509.

- [18] ZHAI Wan-ming. Two simple fast integration methods for

large-scale dynamic problems in engineering[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39(24): 4199-4214.

- [19] 黄运华, 李 芾, 傅茂海, 等. 缓冲器特性曲线间断点算法比较[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(1): 9-12.

HUANG Yun-hua, LI Fu, FU Mao-hai, et al. Comparison of algorithms for discontinuity on the characteristics curves of draft gears[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(1): 9-12. (in Chinese)

- [20] WANG Kai-yun, HUANG Chao, ZHAI Wan-ming, et al. Progress on wheel-rail dynamic performance of railway curve negotiation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(3): 209-220.

(上接第 49 页)

- [9] ACARMAN T, OZGUNER U, HATİPOĞLU C, et al. Pneumatic brake system modeling for systems analysis[C]// SAE International. Truck and Bus Meeting and Exposition. Warrendale: SAE International, 2000: 1-9.

- [10] TAGHIZADEH A, GHAFARI A, NAJAFI F. Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications[J]. Comptes Rendus Mecanique, 2009, 337(3): 131-140.

- [11] MESSINA A, GIANNOCARO N I, GENTILE A. Experimenting and modelling the dynamics of pneumatic actuators controlled by the pulse width modulation (PWM) technique[J]. Mechatronics, 2005, 15(7): 859-881.

- [12] 魏 伟, 杜念博. 重载列车制动管路对制动性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(5): 49-54.

WEI Wei, DU Nian-bo. Influence of braking pipe on braking performance for heavy haul train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 49-54. (in Chinese)

- [13] DING S X, ZHANG P, NAIK A. Subspace method aided data-driven design of fault detection and isolation systems[J]. Journal of Process Control, 2009, 19(9): 1496-1510.

- [14] 曹宏发, 乔 峰, 温熙圆, 等. 和谐号动车组制动系统故障再现及分析[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(5): 43-47.

CAO Hong-fa, QIAO Feng, WEN Xi-yuan, et al. Reproduction and analysis of failure for braking system of CRH<sub>3</sub> EMU[J]. Railway Locomotive and Car, 2011, 31(5): 43-47. (in Chinese)

- [15] NIU Gang, ZHAO Ya-jun, TRAN Tung-van. Fault detection and isolation based on bond graph modeling and empirical residual evaluation[J]. Proceedings of the Institution of

Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(3): 417-428.

- [16] 黄志武, 刘建刚, 刘伟荣, 等. 基于解析冗余关系的法维莱制动机系统故障诊断技术[J]. 铁道学报, 2013, 35(3): 29-35.

HUANG Zhi-wu, LIU Jian-gang, LIU Wei-rong, et al. Fault diagnosis of Faiveley braking system based on analytical redundancy relations[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(3): 29-35. (in Chinese)

- [17] PUGI L, MAVLEZZI M, ALLOTTA B, et al. A parametric library for the simulation of a Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) pneumatic braking system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218(2): 117-132.

- [18] 陆 强, 杨美传. 基于 AMESim 的地铁车辆空气制动系统的建模及仿真[J]. 液压气动与密封, 2011, 31(10): 45-48.

LU Qiang, YANG Mei-chuan. Modeling and simulation methodology of pneumatic braking system in metro vehicles using AMESim[J]. Hydraulics Pneumatics and Seals, 2011, 31(10): 45-48. (in Chinese)

- [19] KAMINSKI Z. Mathematical modeling of the pneumatic relay emergency valve for dual-line agricultural trailer braking systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2011, 226(5): 603-612.

- [20] 曹 源, 王玉珏, 马连川, 等. 基于 DTW 的车辆轴温监测方法[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(3): 78-84, 100.

CAO Yuan, WANG Yu-jue, MA Lian-chuan, et al. Monitoring method of vehicle axle temperature based on dynamic time warping[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(3): 78-84, 100. (in Chinese)