

基于有限状态机的轨道交通车辆防滑 控制建模仿真与验证^{*}

刁 锋 朱文良 秦凌光 吴萌岭

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 通过建立轨道车辆动力学模型、轮轨黏着模型和制动系统气路模型, 构建虚拟的列车运行环境。针对高速列车电空直通制动系统, 分析制动工况下的防滑控制策略, 并基于有限状态机模型, 利用 Stateflow 建立防滑控制模型。通过 Matlab/simulink 与 AMESim 软件联合仿真, 分析对比包括不同轮轨黏着条件(如黏着条件较好、持续低黏着)以及不同制动初速等工况在内的各滑行试验典型工况。结果表明, 整个仿真模型可用于模拟制动过程的滑行工况, 也可用于防滑控制判据的参数优化等研究。

关键词 轨道交通; 车辆; 防滑控制; 仿真

中图分类号 U270.35

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.01.012

Modeling Simulation and Verification of Railway Vehicle Anti-sliding Control Based on Finite State Machine

DIAO Feng, ZHU Wenliang, QIN Lingguang, WU Mengling

Abstract By establishing the rail transit vehicle dynamics model, wheel/rail adhesion model and gas path model of the braking system, a virtual train operation environment is constructed. In view of the electro-magnetic brake system of high-speed railway vehicle, the anti-sliding control strategy under braking condition is analyzed, an anti-sliding control model is set up by Stateflow based on the finite state machine model. Through the co-simulation of Matlab/simulink and AMESim, the typical working conditions of various sliding tests are analyzed and compared, such as the good adhesion condition, continuous low adhesion, different initial speeds of braking and so on. The results show that the whole simulation model can be used to simulate the sliding condition in the braking process, and to optimize the criterion parameters of the anti-sliding control as well.

Key words rail transit; vehicle; anti-sliding control; simulation

lation

Author's address Railway and Urban Rail Transit Research Institute, Tongji University, 201804, Shanghai, China

轮轨黏着制动是目前轨道交通车辆主要的制动方式。黏着制动存在的最大缺陷就是黏着力有限。列车制动时, 如制动力大于黏着极限, 则轮轨间将产生滑移。轮轨间适当的滑移可以提高黏着利用率, 提高制动性能; 但若防滑控制不当, 则易导致轮对抱死滑行, 引起轨面擦伤、制动距离增加、制动耗风量增大、车辆稳定性和舒适性降低等结果, 严重影响列车运行安全^[1]。因而为提高列车运行的安全性和经济性, 减少出现车轮抱死和擦轮的情况, 列车防滑器被广泛应用于各类轨道交通车辆中。可以说, 防滑控制装置的性能直接影响到制动部件甚至整个列车的安全, 必须经过充分的试验和性能检验。但由于实车线路试验成本高、效率低, 可重复性低, 难以模拟极限条件等, 故有必要对其进行仿真与研究^[2]。

高速列车制动防滑控制系统主要由制动控制单元(BCU)、气制动单元、防滑阀、基础制动装置等组成。BCU 根据制动指令、车体质量及速度计算出所需要的气制动力和目标 BC 压力(增压缸空气压力)。制动指令进入气制动单元, 经防滑阀输出给基础制动装置, 使轮对产生减速度。列车制动过程框架如图 1 所示。

1 制动动力学相关模型

1.1 轮轨黏着模型

轮轨黏着模型可用于模拟真实线路黏着条件, 包括干轨、湿轨、轨面污染导致的黏着系数突降等工况。需考虑黏着系数同速度及轴重之间的相互

^{*} 国家自然科学基金项目(U1534205)

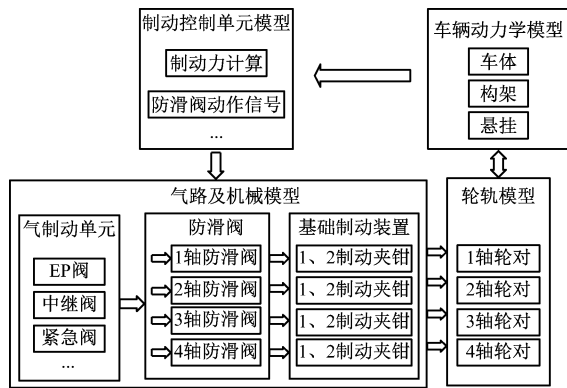


图1 列车制动过程框架图

关系,以及前后轮间由滑行引起的相互作用关系。车轮和钢轨实际上都是有弹性的。在载荷的作用下,轮轨接触的地方会发生弹性变形,其轮轨接触面呈椭圆状。而轮轨会在接触面间发生微量滑动(即“蠕滑”)^[3]。蠕滑的程度可用滑移率 s 表示:

$$s = \frac{v - \omega \times r}{v} \quad (1)$$

式中:

ω ——车轮旋转速度;

r ——车轮半径;

v ——车体平移速度。

基于 Polach 黏着理论,黏着力 F 可表示为:

$$F = \frac{2Qf}{\pi} \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon^2} + \arctan \varepsilon \right) \quad (2)$$

其中:

$$\varepsilon = \frac{2C\pi a^2 b s}{3Q\mu} \quad (3)$$

$$f = f_0 [(1 - A)e^{-Bw} + A] \quad (4)$$

式中:

a ——轮轨椭圆接触区纵半轴长度;

b ——轮轨椭圆接触区横半轴长度;

C ——轮轨接触剪切刚度;

Q ——轴重;

f ——轮轨摩擦因数;

ε ——剪切变形梯度;

A ——轮轨间极限滑动速度下摩擦系数与最大摩擦因数的比值;

μ ——黏着系数;

f_0 ——轮轨最大摩擦系数;

B ——摩擦系数调节参数;

w ——滑移速度,即轮轨间的速度差。

根据黏着系数定义:

$$\mu = \frac{F}{Q} \quad (5)$$

将 f 、 F 和 ε 代入可得:

$$\mu = \frac{2f_0 [(1 - A)e^{-Bw} + A]}{\pi} \left[\frac{\frac{2C\pi a^2 b s}{3Q\mu}}{1 + \left(\frac{2C\pi a^2 b s}{3Q\mu} \right)^2} + \arctan \left(\frac{2C\pi a^2 b s}{3Q\mu} \right) \right] \quad (6)$$

1.2 车辆动力学模型

车辆模型用于模拟制动过程中的实际位移、速度、减速度、各轴轴速、闸瓦摩擦系数变化、坡道、运行阻力等信息,在 MATLAB 软件的 simulink 模型搭建中,根据需要对模型进行简化。一方面,制动过程中不关注车体垂向、横向舒适度指标,且暂不考虑曲线通过,列车制动工况各性能指标主要与纵向自由度有关,且列车纵向自由度同横向及垂向自由度的耦合度较小,故只考虑其纵向自由度;另一方面,若完全考虑车辆各部件的所有自由度(包括垂向、伸缩、点头、横向、侧滚、摇头),则模型极复杂,仿真结果难以收敛,计算量过大^[4-5]。图2即简化后的单节车动力学模型拓扑图,自上而下依次包括车体、二系悬挂、构架、一系悬挂、轮对及轮轨黏着力。

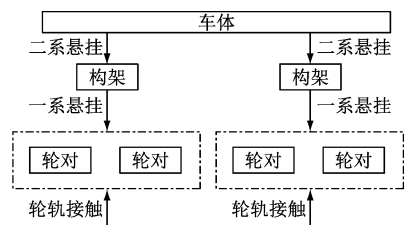


图2 单节车动力学模型拓扑图

2 防滑控制气路模型与控制策略模型

2.1 防滑控制气路模型

根据制动系统气路实际参数,建立 EP 阀、紧急阀、中继阀、防滑阀、制动缸等部件模型,模拟制动过程中气动单元动作,反映制动过程中气路的空气流量、压力升降速度、压力变化过程,以及防滑阀动作频率、次数等信息。利用 AMESim 软件中的气动元件组成气动模型,其仿真模型结构如图3所示。EP 阀根据压力控制信号将预控压力输入中继阀,由中继阀进行流量放大后经防滑阀进入基础制动装置。B₁₁调压阀与紧急电磁阀为中继阀提供紧急制动工况下的预控压力^[6-7]。将实车试验数据及阀类

试验台试验数据对比,并修正模型,对整个气制动系统模型进行常用阶段制动、缓解和紧急制动仿真。模型对制动指令相应速度快,对制动缸压力模拟准确^[8-9]。

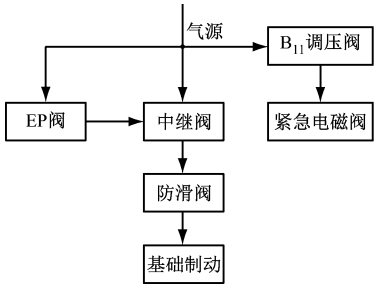


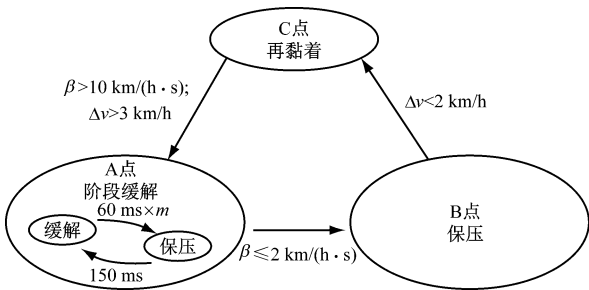
图 3 气路仿真模型示意图

2.2 防滑控制策略模型

制动控制单元是空气制动系统的核心,其接受制动指令并采集列车上与制动有关的信号,对指令与信号进行计算,得出列车所需的制动力;再向电制动和空气制动系统发出制动信号,同时通过运算协调电制动和空气制动的制动量。此外,该控制单元还会按照程序对各输入信号进行判断、计算,输出控制指令完成控制、安全监测及处理。其中,滑行判断和输出防滑阀的动作信号可实现防滑控制。

目前,在进行防滑控制时,防滑控制系统使用的判断依据主要有速度差、减速度、减速度微分和滑移率。其中,速度差和减速度最常用。

本文以 CRH2 型动车组的制动系统为研究对象,建立有限状态机模型,来研究空气制动的防滑控制策略。有限状态机模型是一种在实时系统设计中常用的数学模型,以描述控制特性为主,可应用在从系统分析到设计的所有阶段,利用 Matlab 软件中的 Stateflow 功能来实现有限状态机模型^[10]。滑行再黏着状态机模型示意图如图 4。



注:A 点为判定产生滑行点;B 点为开始保压点;C 点为确认黏着再恢复点; β 为轴减速度; Δv 为轴速与参考车速的速度差

图 4 滑行再黏着状态机模型示意图

由图 4,当某轮对的运动状态符合 A 点所对应

的条件时,制动控制单元判定该轮对即将产生滑行,然后防滑阀按照一定的排风策略对该轮对的制动缸压力进行调节。当该轮对的减速度满足 B 点的判断条件时,说明此时该轮对的滑行趋势已得到有效的控制,则制动控制单元控制防滑阀将对制动缸进行保压。当速度差值满足 C 点的判断条件时,制动控制单元认为该轮对的黏着已经恢复,不再产生滑行,故将重新对制动缸进行充气,以恢复制动再黏着。在制动缸压力阶梯式降低过程中,防滑阀保压时间 $t_2 = 150\text{ ms}$,防滑阀的缓解时间为:

$$t_1 = 60 \times m$$

式中:

- t_1 ——防滑阀缓解时间,ms;
- m ——倍数,取决于防滑阀的缓解次数 n 。
- n 与 m 关系见表 1。

表 1 n 与 m 的关系

n	1	2	3	4	5
m	1	1	3	5	100

由表 1 可知,当列车防滑控制系统检测到轮对产生滑行时,排风阀(RV)第 1 次排风, $n = 1, m = 1, t_1 = 60\text{ ms}$ 。若排风阀排风关闭后。检测到车轮仍在滑行,则排风阀在 150 ms 后进行第 2 次排风,排风时间 60 ms($n = 2, m = 1$)。如第 2 次排风后车轮依然滑行,则在 150 ms 后进行第 3 次排风,排风时间为 180 ms($n = 3, m = 3$)。如果第 4 次排风 300 ms($n = 4, m = 5$)后车轮仍在滑行,则第 5 次排气 6 s($n = 5, m = 100$)排风结束,直至检测到滑行轴的指标处于 B 状态后开始保压^[11-13]。

3 结果验证和分析

基于轨道交通车辆动力学模型、轮轨黏着力模型、制动系统气路模型,以及包含基于 Stateflow 的防滑控制器制动控制单元模型,通过 Matlab 软件 simulink 组件与 AMESim 软件联合仿真,对干轨(即黏着条件较好,不发生滑行)和湿轨(即低黏着条件,防滑器发生动作)两种工况对整体模型及环境进行验证分析,从而确认仿真模型的有效性。

3.1 干轨工况验证结果

在干轨工况下,仿真计算不同列车初速度下制动距离,并与根据目标减速度计算所得的制动距离进行对比进行验证。分别设置制动初速度为 200 km/h、250 km/h 和 300 km/h,制动级位为紧急制

动,目标减速度为^[14]:

$$a = \begin{cases} 0.931 \text{ m/s}^2, & \text{当 } v < 160 \text{ km/h 时,} \\ 0.842 \text{ m/s}^2, & \text{当 } v \geq 160 \text{ km/h 时} \end{cases}$$

制动距离的仿真结果和根据目标减速度计算的理论制动距离对比见表 2,其误差满足 EN 15595 中对制动距离模拟的相关要求。

表 2 干轨条件下制动距离仿真结果与理论计算值比较			
制动初速度/ (km/h)	仿真制动 距离/m	理论计算制动 距离/m	制动距离 误差/%
200	1 773	1 721	3.02
250	2 817	2 751	2.40
300	4 094	4 011	2.70

3.2 湿轨工况验证结果

根据 EN 15595:2011-07《Rail applications-Braking-Wheel Slide Protection》相关要求,通过调整车辆及轮轨模型参数,完成基于半实物仿真平台的防滑控制试验工况再现。参照标准中相关要求,将仿真得到的制动距离、速度曲线及速度差分布与现有实车试验数据进行对比。半实物仿真试验中,制动初速度为 103 km/h,制动级位为紧急制动,模拟轨面喷洒防冻液低黏着轨面条件。

3.2.1 制动距离

EN 15595 要求防滑模拟装置制动距离模拟值与真实值误差应小于 5%。列车制动距离实车试验值与仿真值对比结果见图 5。列车制动距离试验值为 748 m,制动距离仿真值为 733 m,误差约为 2%,满足 EN 15595 对制动距离模拟的相关要求。

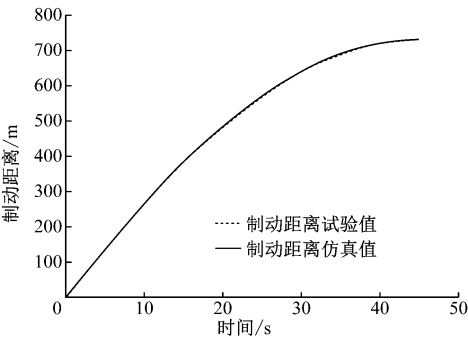


图 5 制动距离试验值与仿真值对比

3.2.2 速度曲线

EN 15595 对防滑模拟装置对速度模拟的要求为:从开始制动到车速到达 15 km/h 止任意时刻,试验车速与模拟车速的差值应小于 3 km/h,列车车

速试验值与仿真值对比结果见图 6。同一时刻仿真车速与试验车速最大差值为 1.06 km/h,符合 EN 15595 有关要求。

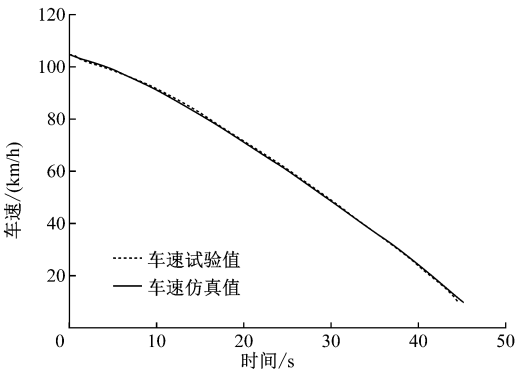


图 6 车速试验值与仿真值对比

3.2.3 滑行工况下各轴速度差分布

以第 i 轴轮轨间滑移速度 Δv_i (即轮轨速度差) 的均值 $E(\Delta v_i)$ 和标准差 $\sigma(\Delta v_i)$ 作为统计指标,故有:

$$\begin{cases} \Delta v_i = v_c - \omega_i R_w \\ E(\Delta v_i) = \frac{1}{t_2} \int_0^{t_2} \Delta v_i dt \\ \sigma(\Delta v_i) = \sqrt{\frac{1}{t_2} \int_0^{t_2} (\Delta v_i - E(\Delta v_i))^2 dt} \end{cases} \quad (7)$$

式中:

- v_c ——列车速度;
- ω_i ——第 i 轴的车轮角速度;
- t_2 ——制动时间。

在制动初速度为 103 km/h、制动级位为紧急制动、模拟轨面喷洒防冻液低黏着轨面条件的仿真工况下,各轴速仿真结果与试验结果对比见图 7。

图 8 为 1 轴的 HV(保压阀)控制信号和 RV(排气阀)信号情况,直接反映了滑行过程中防滑阀组的动作情况。

表 3 各轴速度差仿真值与试验值统计对比						
位置	$E(\Delta v_i)$			$\sigma(\Delta v_i)$		
	试验值/ (km/h)	仿真值/ (km/h)	误差/%	试验值/ (km/h)	仿真值/ (km/h)	误差/%
1 轴	3.89	3.88	0.26	2.70	2.57	4.81
2 轴	3.44	3.54	-2.91	2.67	2.55	4.49
3 轴	3.38	3.35	0.89	2.57	2.47	3.89
4 轴	3.35	3.29	1.79	2.53	2.43	3.95

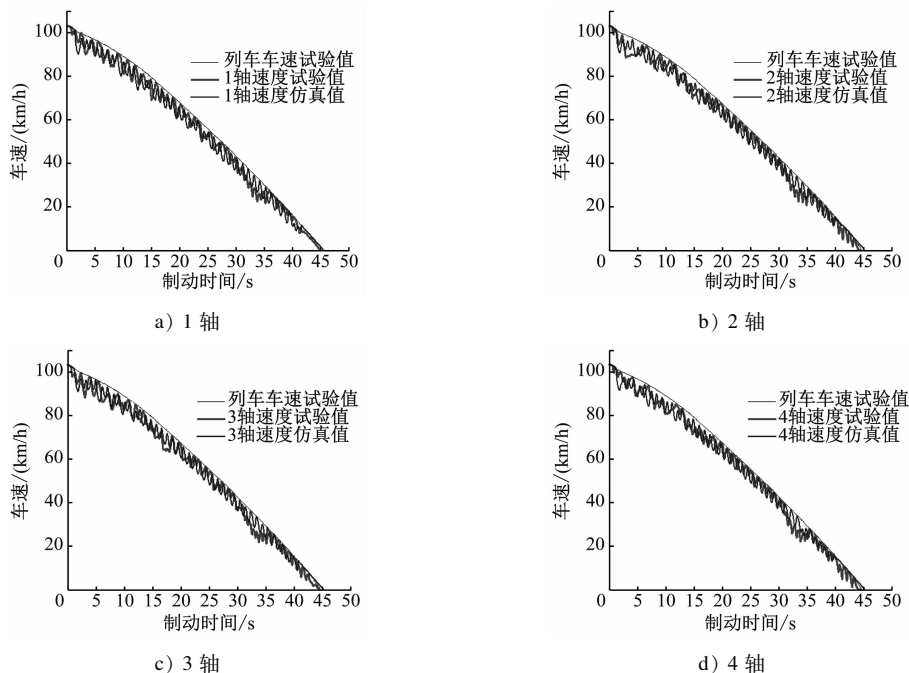


图7 各轴轴速仿真曲线与车速试验曲线对比图

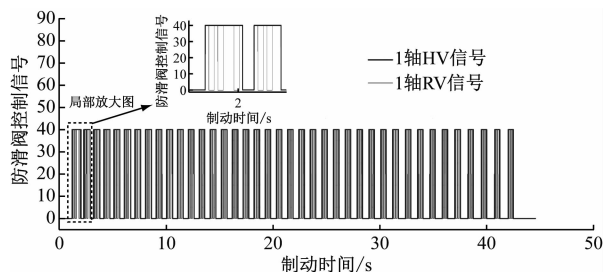


图8 1轴保压阀和排气阀动作信号

4 结语

针对轨道交通车辆制动系统的防滑控制研究, 可通过 Matlab 及 AMESim 等软件建立仿真模型, 并进行计算机仿真。

实际线路对极限工况的模拟难度大, 可重复性低。本文搭建的有限状态机模型能有效模拟滑行进程, 为防滑控制器的设计提供支持。

通过对不同黏着条件的仿真验证, 以及同实车数据的对比, 确认了整个仿真模型的有效性。

基于有限状态机理论的防滑控制器在滑行工况下作出的响应和判断满足要求, 将有限状态机模型应用在防滑控制器仿真设计上是合理的。

参考文献

[1] 左建勇, 任利惠, 吴萌岭. 铁道车辆制动系统防滑控制仿真与试验研究[J]. 同济大学学报, 2010(6): 912.

[2] KIM H Y, LEE N J, LEE D C, et al. Hardware-in-the-Loop Simulation for a Wheel Slide Protection System of a Railway Train[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3): 12134.

[3] CHOL J J, PARK S H, KIM J S. Dynamic adhesion model and adaptive sliding mode brake control system for the railway rolling stocks[J]. Journal of rail and rapid transit, 2007, 221(3): 313.

[4] 姚建伟. 机车车辆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[5] 丁莉芬. 重载列车纵向动力学建模研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

[6] 曹宏发, 周军, 陈伟, 等. 基于仿真技术的防滑试验方法研究[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(3): 11.

[7] 任利惠, 裴玉春, 左建勇, 等. 截止式气动中继阀的数学模型和仿真[C]//第一届中日制动技术论坛. 上海: 同济大学, 2008.

[8] 许桂红. 地铁制动系统的研究与仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

[9] 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.

[10] 崔晓军. 基于有限状态转换机制和非线性 PID 的防滑控制方法[J]. 铁道车辆, 2011(9): 6.

[11] 罗仁, 曾京. 铁道车辆防滑控制仿真[J]. 机械工程学报, 2008, 44(3): 29.

[12] 李伟. 动车组制动系统防滑控制仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.

[13] 胡准庆. 动车组制动系统[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2012.

[14] 张曙光. CRH2 型动车组[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.

(收稿日期: 2018-03-27)