

# 直线轨道涡流制动对高速列车制动 动力学特性的影响\*

李婧<sup>†</sup> 曾明睿 张智博 徐佳明 罗俊

(西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 成都 610031)

**摘要** 列车制动性能直接影响车辆运行安全性和平稳性、稳定性,本文研究了加装直线轨道涡流制动系统对不同动力分配方式的高速列车制动动力学特性的影响规律.首先建立了 6M2T 和 4M4T 两种编组方式的列车动力学仿真模型,并与线路实验数据进行对比,验证了模型的有效性.基于该模型,研究了不同时速下的列车在不同动力分配形式下的动力学特性.针对惰行工况、电空制动工况与加装直线轨道涡流制动系统的联合制动工况,分别研究了第 1、5、8 节车厢的 Sperling 指标、脱轨系数、轮重减载率、轮轨作用力的变化规律,研究结果表明,动力分配方式、制动特性对车辆动力学性能有显著影响,涉及的关键动力学性能指标均满足安全限值标准,研究结果将为高速列车加装直线轨道涡流制动系统提供理论参考.

**关键词** 涡流制动, 动力分配, 制动动力学, 高速列车

中图分类号:N941.3

文献标志码:A

## The Influence of Eddy Current Braking on the Braking Dynamics Characteristics of High-Speed Trains on Straight Track\*

Li Jing<sup>†</sup> Zeng Mingrui Zhang Zhibo Xu Jiaming Luo Jun

(National Key Laboratory of Rail Transit Transportation Systems, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract** The braking performance of trains directly affects the safety, stability, and stability of vehicle operation. This article studies the impact of installing a linear track eddy current braking system on the braking dynamics characteristics of high-speed trains with different power distribution methods. Firstly, a train dynamics simulation model was established for two grouping modes, 6M2T and 4M4T, and its effectiveness was verified by comparing it with experimental data on the line. Based on this model, the dynamic characteristics of trains at different speeds under different power distribution forms were studied. The Sperling index, derailment coefficient, wheel load reduction rate, and wheel rail interaction force of the the 1st, 5th, and 8th carriages were studied for the combined braking conditions of coasting, electro-pneumatic braking, and linear track eddy current braking system. The research results showed that the dynamic force distribution method and braking system have a significant impact on the dynamic performance parameters of the vehicle, The key dynamic performance indicators involved all meet the safety limit standards, and the research results provide theoretical reference for installing a linear track eddy current braking system on high-speed trains.

**Key words** eddy current braking, power distribution, braking dynamics, high-speed trains

2023-12-12 收到第 1 稿,2024-01-09 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金资助项目(52277018),四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0447),中央高校基本科研业务费(2682022ZTPY055),国家重点实验室自主课题(2023TPL-T07), National Natural Science Foundation of China (52277018), Natural Science Foundation of Sichuan Province (2022NSFSC0447), Fundamental Research Funds for Central Universities (2682022ZTPY055), Independent Project of State Key Laboratory (2023TPL-T07).

<sup>†</sup> 通信作者 E-mail:jingli324@163.com

## 引言

铁路运输具有准时准点、高效率、运量大等优点,是我国交通运输中的重要组成部分<sup>[1]</sup>.随着各地区经济的发展,高速列车的运用将会越来越频繁,而且站点将会增加,运行速度也越来越快,使高速列车面临频繁起停运行,这对制动系统提出更高要求,不仅需要列车在高速运行工况可以有效制动,还需保证制动运行的稳定性和平稳性<sup>[2,3]</sup>.高速列车的动能远大于普通列车,而高速下轮轨间的粘着系数以及闸瓦与动轮之间的摩擦系数都大大降低,依靠摩擦的传统制动方式,会在列车高速行驶时造成严重磨损和噪声,为保障高速列车的运行安全性及乘坐舒适性,需同时引入不依赖轮轨黏着、无摩擦的制动技术作为辅助制动手段.

自上个世纪60年代起,德国、法国、日本相继开展直线涡流制动器的研发测试,现已应用于德国ICE3动车组和法国TGV-NG高速动车组中<sup>[4,5]</sup>.日本铁道技术研究院于21世纪初提出交流励磁直线轨道涡流制动器.2009年,Sakamoto等研制出全尺寸的直线感应式轨道涡流制动器原型,并验证了制动性能和动态控制方法的可行性<sup>[6]</sup>.2017年,Hiroshi重新设计了电枢并使其更小、更轻,证明该涡流制动器在高速运行具有优良的制动特性<sup>[7,8]</sup>.并且Hiroshi在2018年重新设计轻量化的初级绕组,进而提升高速运行工况的制动特性.日本预计在其新一代高速动车组ALFA-X的转向架上安装交流励磁直线轨道涡流制动装置,并计划在2030年投入运营.哈尔滨工业大学提出了一种双绕组交流励磁直线轨道涡流制动器,可有效降低励磁功率,基于变频调速方法进行恒磁通制动,实现对制动力恒定输出控制<sup>[9]</sup>.2021年西南交通大学针对交流励磁直线轨道涡流制动器进行结构设计,实验研究了初级绕组电磁、结构参数对制动性能,轨道温升的影响规律<sup>[10]</sup>.直线轨道涡流制动利用交变磁场与轨道涡流场的耦合作用产生与列车运行方向相反的制动力,相比于通过车轮贴附于轨面,依赖轮轨间的黏着力实现制动,制动力受轮轨黏着系数限制的传统制动方式,轨道涡流制动具有不依赖轮轨黏着、非接触、无磨损的优势,在高速和低黏着环境下仍可保持平稳的制动特性,是对高速列车制动系统的有力补充,为高速列车运行于更高速域,

更严苛工况提供安全保障.

列车在制动期间处于非稳态运行工况,编组车辆的增加将导致相邻车辆间的相互作用力急剧上升,而线路上又存在各种干扰,当在不利因素同时发生时,可能使车辆失去稳定性,引起严重危及运输安全的脱轨事故.为保证列车保持安全平稳的运行状态,需要优化列车制动系统的制动特性,深入研究多种混合制动方式下的列车制动动力学性能.

在制动工况下列车动力学研究方面,赖奎建立了200km/h电力机车模型,对制动工况下的垂向和纵向平稳性、轮轴横向力、轮重减载率、脱轨系数、曲线通过性能等进行分析<sup>[3]</sup>.刘鹏飞建立了考虑钩缓系统作用力的重载机车车辆-轨道耦合动力学模型,考核承载万吨货物时,机车电制动及紧急制动下的轮轨作用力情况<sup>[11]</sup>.魏伟等研发了将列车空气制动与纵向动力学相结合的同步仿真系统,基于该系统对制动工况下长编组列车的纵向动力学特性进行研究,研究了列车空气制动过程中纵向动力学性能指标的变化规律<sup>[12]</sup>.Zhang等建立模型对车辆在不平顺轨道上行驶时的动力学性能进行分析,表明不同大小的制动力矩对轮重减载率有不同的影响<sup>[13]</sup>.王开云等在制动工况下,考虑车钩力的影响,利用机车-轨道垂向耦合动力学模型进行重载机车直线和曲线轨道上的动力学仿真分析<sup>[14]</sup>.在前期的列车制动动力学性能研究方面,主要将机械制动作为列车制动方式进行动力学性能研究,并没有考虑列车涡流制动下的列车制动动力学性能.研究内容主要集中于列车的情行、牵引工况下的动力学性能分析,很少涉及列车在制动运行工况下,动力分配方式、纵向力等对车辆运行品质的影响研究.

由于直线轨道涡流制动力直接施加于车辆的转向架上,涡流制动性能不依赖于轮轨黏着系数,特别是高速状态下仍可实现可靠、安全制动,因此直线轨道涡流制动具有制动力稳定、无接触摩擦等技术优势,有利于列车整体制动性能的提升.由涡流制动器带来的簧下质量增加和法向吸力将影响列车轮轨力,对列车的平稳性和脱轨系数有一定程度的优化,而不同编组方式决定了安装于列车的涡流制动器的位置和数量,为了获得加装涡流制动器对CRH2动车组制动动力学特性影响规律,并验证直线轨道涡流制动器能否适用于不同编组的高

速列车,本文建立了由8节车辆组成的列车系统动力学仿真模型,研究了不同时速下的列车在不同动力分配形式下的动力学特性.针对惰行工况、电空制动工况以及添加涡流制动系统的涡流制动工况下,分别研究了第1、5、8号车厢的 Sperling 指标、脱轨系数、轮重减载率、轮轨作用力的变化规律,最后总结了涡流制动系统对不同动力分配方式的列车制动动力学特性影响规律,为直线轨道涡流制动器在高速列车应用储备理论基础.

## 1 制动性能的获取方法

高速列车普遍采用电空复合制动,直线轨道涡流制动器作为辅助制动方式,用于紧急制动工况,与电空复合制动系统共同构成了高速列车联合制动系统.本文针对 CRH2 车型展开动力学性能研究,根据该车型的电空制动特性曲线,制动力计算公式如下公式(1).

$$F_1 = \begin{cases} 59.8, v \leq 5 \\ -0.285v + 300, 5 < v \leq 118 \\ 28800/v, v > 118 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $F_1$  为电空联合制动力(kN),  $v$  为列车运行速度大小(km/h),其中电制动力的计算公式(2)如下:

$$F_2 = \begin{cases} 0, v \leq 15 \\ 2.8v - 42, 15 < v \leq 25 \\ 42, 25 < v \leq 100 \\ -1.44v + 100, v > 100 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $F_2$  为电制动力(kN),  $v$  为列车运行速度大小(km/h).

通过建立直线轨道涡流制动性能解析模型的方法来获取在各种运行工况下的涡流制动特性曲线,制动器结构参数均参考德国 ICE3 高速列车直线轨道涡流制动器系统,如表 1 所示.

表 1 涡流制动器结构参数

Table 1 Parameters of the ECB model

Items	Description	Values
$L$	Length of primary iron core	1224 mm
$\sigma$	Rail conductivity	$1 \times 10^6$ S/m
$g$	Air gap distance	6 mm

根据麦克斯韦方程组,推导了直线轨道涡流制动器的垂向力和纵向力公式,

$$\begin{cases} B = \nabla \times A \\ B = \mu_0 \mu_n \times H \\ J = \nabla \times H \end{cases} \quad (3)$$

其中  $B$  是磁通密度,  $H$  是磁场强度,  $J$  是电流密度,磁通密度计算公式如下:

$$\begin{cases} B_{2x} = k(C_2 e^{ky} - D_2 e^{-ky}) e^{j(\omega t - kx)} \\ B_{2y} = jk(C_2 e^{ky} + D_2 e^{-ky}) e^{j(\omega t - kx)} \end{cases} \quad (4)$$

其中  $C_2, D_2$  都是待定系数,由磁场边界条件进行确定,再由磁通密度公式,推导涡流制动器的制动力和法向力公式如下:

$$\begin{cases} F_x = \frac{pL}{2\mu_0} \int_0^{2\tau} \operatorname{Re}[B_{2x}(x-g)B_{2y}^*(x-g)] dx \\ F_y = \frac{pL}{4\mu_0} \int_0^{2\tau} \operatorname{Re}[|B_{2x}(x-g)|^2 - |B_{2y}(x-g)|^2] dx \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $L=2\tau$  为 ECB 装置铁芯长度,  $p$  为涡流制动器极对数,  $F_x$  为制动力(kN),  $F_y$  为法向吸力(kN),  $B_{2y}^*$  为  $B_{2y}$  的共轭复数<sup>[15]</sup>.

基于建立的直线轨道涡流制动特性解析模型获得气隙距离为 6mm 时的制动力、法向力与速度关系曲线,如图 1 所示.

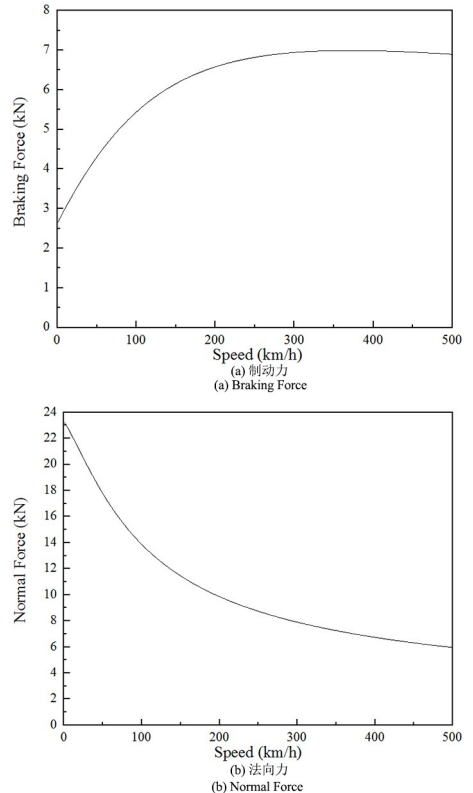


图 1 直线轨道涡流制动器的电磁力曲线  
Fig. 1 Electromagnetic force of eddy current brake

## 2 制动动力学模型的建立

动力学模型是动力学仿真分析的基础,本文采用多体动力学软件 SIMPACK 建立列车动力学模型并进行验证.为提高模型计算效率,对模型进行一定的简化,忽略对列车动力学性能较小的抗侧滚扭杆等部件,由于本文针对列车横向和垂向动力学性能指标展开研究,车辆外形是影响车体空气动力学性能的主要因素<sup>[16]</sup>,车钩力柔性变形主要影响列车的纵向性能指标<sup>[17]</sup>,而车辆外形、车钩力柔性变形对本文涉及的横向、垂向动力学性能指标影响较小.另外本文模型采用了 CN60 型号的常规标准钢轨,不存在轨面磨损、钢轨扭曲形变,因此不考虑轨道几何结构变化对动力学性能参数的影响.为了研究动力分配方式对制动动力学的影响,分别对 4M4T 和 6M2T 两种编组方式的列车进行建模.

### 2.1 车辆动力学模型

基于多体动力学理论,应用 SIMPACK 多体动力学软件建立 CRH2 型动车组车辆动力学模型,转向架主要包括枕梁、构架、轮对、轴箱悬挂装置、中央悬挂装置、制动和牵引装置.轴箱悬挂装置包

括转臂定位、轴箱钢弹簧和一系垂向减振器;中央悬挂装置采用二系空气弹簧,最后在拖车中加装涡流制动器.

模型主要由 1 个车体、2 个转向架和 4 个轮对等刚体组成的,其中车体、构架、轮对均取 6 个自由度,即纵向、横向、垂向、侧滚、点头、摇头,考虑模型各部分均为刚体,则车辆动力学模型总共有 42 个自由度.

由于 CRH2 型高速动车组中,各个减振器都具有明显的非线性特性,故采用 input function (输入函数)通过力元进行模拟,在几何上用弹簧形态表示.轮对和构架通过一系悬挂相连,其中一系钢弹簧及轴箱转臂节点和牵引拉杆采用阻尼力元模拟;构架和车体由二系悬挂相连,其中二系空气弹簧采用线性弹簧阻尼力元模拟,中央止挡用非线性弹簧力元模拟;一系垂向减振器及二系横向减振器用非线性弹簧阻尼力元模拟<sup>[18]</sup>.

### 2.2 模型参数设置

本文主要以 CRH2 型列车为研究对象,车辆动力学模型的主要参数见表 2,CRH2 动车组列车动力学模型如图 2 所示.

表 2 车辆结构参数  
Table 2 Parameters of the vehicle model

Description	Values	
Car-body mass/kg	26100 (TC)	28800 (M)
Car-body rolling moment of inertia/t·m <sup>2</sup>	84560 (TC)	93310 (M)
Car-body pitching moment of inertia/t·m <sup>2</sup>	1278900 (TC)	1411200 (M)
Car-body yawing moment of inertia/t·m <sup>2</sup>	1102700 (TC)	1331700 (M)
Wheelset mass/kg	2100 (TC)	1970 (M)
Wheelset rolling moment of inertia/t·m <sup>2</sup>	756 (TC)	623 (M)
Wheelset pitching moment of inertia/t·m <sup>2</sup>	84 (TC)	78 (M)
Wheelset yawing moment of inertia/t·m <sup>2</sup>	1029 (TC)	623 (M)
Secondary-suspension longitudinal stiffness/kN·m <sup>-1</sup>	158 (TC)	166 (M)
Secondary-suspension lateral stiffness/kN·m <sup>-1</sup>	158 (TC)	166 (M)
Secondary-suspension vertical stiffness/kN·m <sup>-1</sup>	189 (TC)	176 (M)

其余参数如下:车轮踏面类型为 LMB\_10,钢轨类型采用 CN60 钢轨,轨距为 1.435m,轨底坡为 1:40.

仿真过程中,电空复合制动以及涡流制动系统等会导致列车运行性能不同,在行驶过程中,由于

车辆会因为运行阻力和不同的制动力等从而运行速度降低,为了尽量模拟出车辆在不同动力分配方式下的惰性工况和制动工况下的真实的运行状态,在进行动力学性能分析时,根据车辆的涡流制动及电空制动的特性曲线将制动力和法向吸力施加在

列车上,同时将列车行进中的阻力模型施加在第1号车厢上进行模拟。

针对列车不同编组方式进行建模,主要是对4M4T和6M2T两种编组方式,如图3所示.因为动车和拖车的相关参数不同以及制动方式不同,将电制动力直接施加在动车车轮上,同时将空气制动力直接施加在每节车厢的车轮上.由于动车车下辅助电气设备过多及车身重量过重,无法添加涡流制动器,因此在拖车上添加涡流制动器,涡流制动力作用在转向架构架上,直接在涡流制动器上施加涡流制动力和法向吸力的相关力元.制动过程中使用涡流制动,不同的编组方式将会影响不同工况下的列车动力学性能。

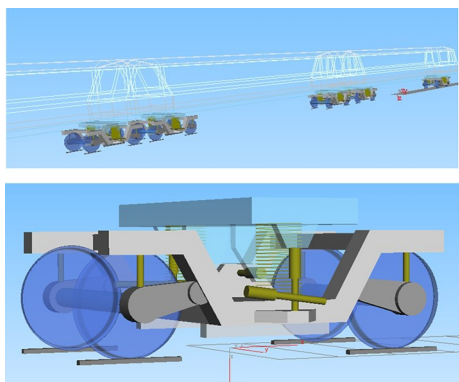


图2 CRH2 动车组动力学模型  
Fig. 2 CRH2 EMU dynamics model

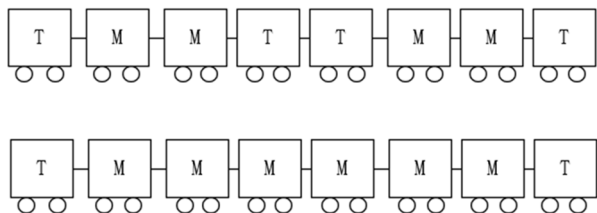


图3 列车编组方式  
Fig. 3 Form of train formation

由于在列车制动动力学分析中,曲线工况下的受力分析较为复杂,仿真分析时线路设置为10km直线轨道,施加武广谱的垂向激励和横向激励,根据高速铁路线路条件并根据武广谱中的平面曲线参数的线路几何设置,以此进行参考确定轨道线路。

轮轨接触几何关系如图4所示,车辆模型与轨道模型之间通过轮轨相互作用力连接,而在本文建立参数化仿真模型中,由于轮轨接触几何关系非线性,进行近似处理线性化后得到,而轮轨接触作用力计算以Hertz接触理论为基础<sup>[19,20]</sup>。

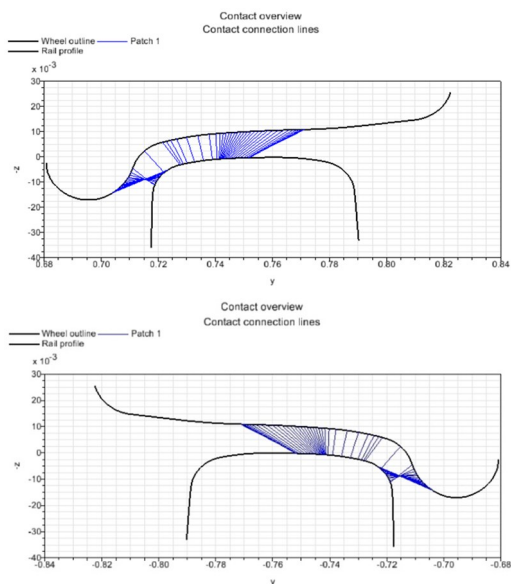


图4 轮轨接触几何关系图  
Fig. 4 Wheel-rail contact geometric relationship

### 2.3 动力学性能评价指标

根据车辆—轨道耦合动力学理论,选择脱轨系数、轮重减载率、Sperling指标、轮轴横向力和轮轨垂向力作为安全性评价指标,各评价指标限值如表3所示<sup>[21]</sup>。

表3 动力学性能限值表  
Table 3 Parameters of the ECB model

Description	Values
Derailment coefficient	$\leq 0.8$
Rate of wheel load reduction	$\leq 0.8$
Sperling metrics	$\leq 3$
Wheel-rail vertical force	$\leq 170\text{kN}$
Wheel-axle lateral force	$\leq 10 + P_0/3$

### 3 动力学模型验证

本文利用已有动车组动力学性能测试数据来验证文中建立的列车动力学模型的准确性,动力学模型中的列车运行参数、运行工况与文献<sup>[22]</sup>的动车组测试试验完全一致,针对车辆初始运行速度为250km/h的情况,由于本文研究的相关动力学性能指标都与车体垂向振动加速度相关,本部分对比分析了线路试验采集的惰行工况下的车体垂向振动加速度时域图与仿真结果<sup>[22]</sup>,如图5所示.振动加速度的计算结果与试验结果存在微小差异,但从整体来看,两者的变化趋势吻合较好.进一步的,由

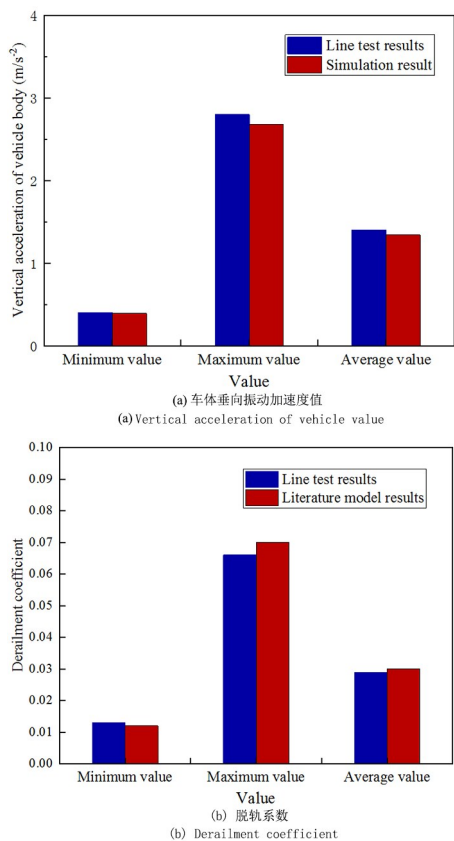


图 5 模型验证数据对比图

Fig. 5 Comparison chart of model validation data

于列车的轮轨力是影响列车脱轨系数的直接因素, 本文利用参考文献[23]中基于 ADAMS 软件建立的具有相同模型参数的 CRH2 动车组动力学模型, 对比了在列车在直线线路上以 200km/h 速度运行工况下, 相应拖车的脱轨系数, 图 5(b) 所示, 发现由两个不同模型获得的脱轨系数吻合良好. 通过上述对比分析验证了本文所建立的列车动力学模型的可靠性, 可用于研究高速列车在制动工况下的动力学性能.

#### 4 动力学性能结果与分析

基于已建立的列车动力学模型, 研究了列车运行平稳性 Sperling 指标、脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力和轮轨垂向力的变化规律. 本文主要针对列车的第 1、5、8 节车厢在惰行工况、电空制动工况及与电空+涡流联合制动工况下的动力学性能指标进行分析, 通过对列车初始速度进行变化, 对比分析不同动力分配方式、加装涡流制动系统对动力学性能的影响规律.

本文中仿真分析时的六种工况分别为: 4M4T 惰行工况 (工况 1)、4M4T 电空制动工况

(工况 2)、4M4T 电空+涡流联合制动工况 (工况 3)、6M2T 惰行工况 (工况 4)、6M2T 电空制动工况 (工况 5) 和 6M2T 电空+涡流联合制动工况 (工况 6).

#### 4.1 运行平稳性

平稳性指标是反映列车运行品质及抗干扰能力的重要指标, 并且直观的反映乘客乘坐的舒适性, 目前最常用的就是平稳性 Sperling 指标, 本部分通过对横向平稳性和垂向平稳性进行分析, 使用第一轮对的平稳性指标作为判据<sup>[24]</sup>.

运用动力学仿真分析, 分别计算六种工况下的

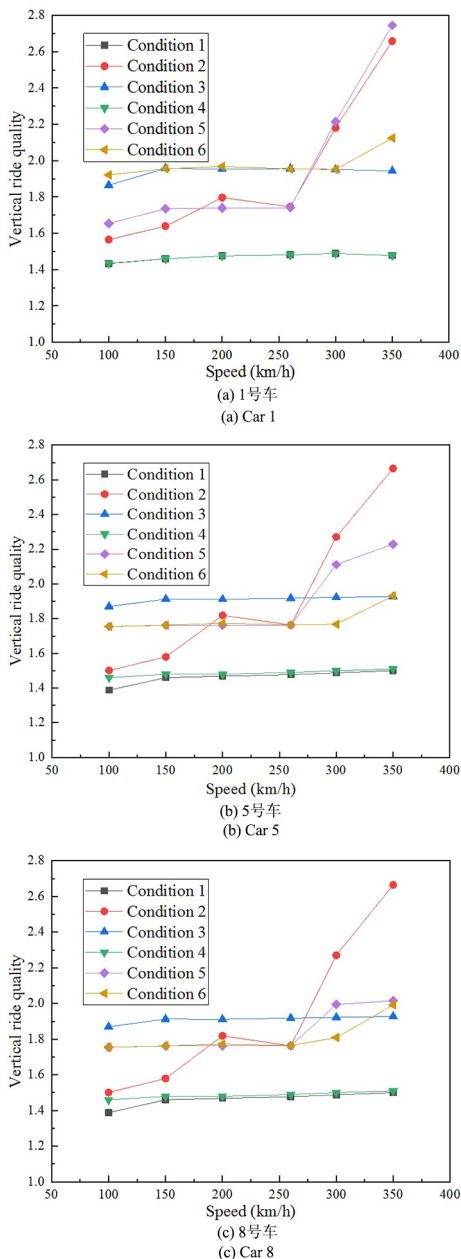


图 6 垂向平稳性指标

Fig. 6 Vertical ride quality index

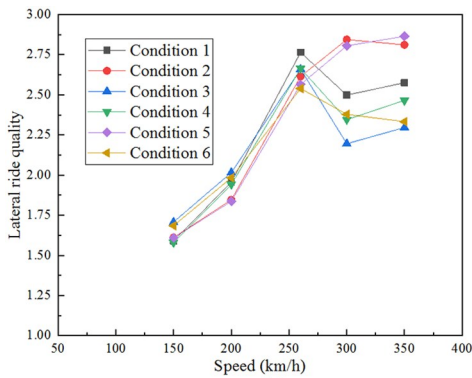
列车垂向平稳性指标,本节对于第1、5、8节车厢的不同工况下各车第一轮对的垂向平稳性指标进行绘制,从图6中可以得出以下研究结论:

(1)均满足垂向平稳性要求.在惰行工况下,每个车厢的垂向平稳性指标都随着速度的增大而增大.电空制动工况中,高速状态下垂向平稳性指标与其他制动初速度下相比,有很大突变.

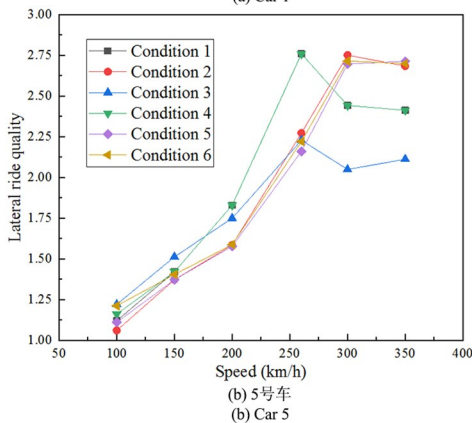
(2)涡流制动工况下列车相较于电空制动,在高速状态时垂向平稳性指标减小,低速状态时增大.同时通过图中可以看出,头尾车在低速时,4M4T编组状态下增长较大,由于第5号车厢在两种编组情况下分别是动车和拖车,在4M4T编组下的5号车厢加装了涡流制动器,因此该编组下第5节车厢的垂向平稳性指标在高速时减小,低速时增长明显;而6M2T编组下垂向平稳性指标在高速时增大,低速时增长较小.说明编组方式对于列车加装涡流制动系统后的垂向平稳性影响较大.

同时,对于列车的横向平稳性指标,本节第1、5、8号车厢的不同工况下各车第一轮对的横向平稳性指标进行绘制,从图7中可以得到以下研究结论:

(1)均满足横向平稳性要求.在惰行工况下,每



(a) 1号车  
(a) Car 1



(b) 5号车  
(b) Car 5

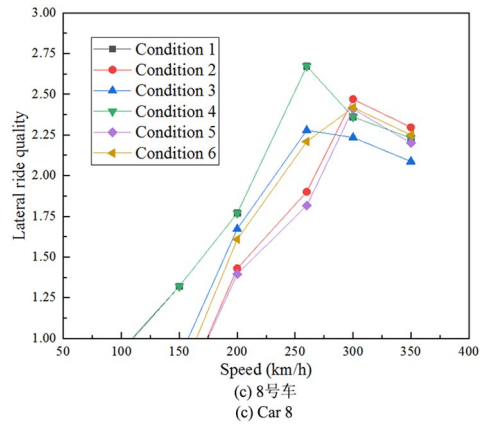


图7 横向平稳性指标

Fig. 7 Lateral ride quality index

个车厢的横向平稳性指标都随着速度的增大而增大,但是在高速状态下趋于平稳,说明速度对于横向平稳性指标影响较大.而在电空制动工况中,列车的横向平稳性指标较惰行工况下均有减小.

(2)涡流制动工况下,观察图中可以看出第1、8号车厢在高速状态下的横向平稳性对比其余工况减小,第5号车厢在4M4T编组时高速状态下减小,6M2T编组时的变化较小,说明编组方式对于列车加装涡流制动系统后的横向平稳性略有优化.

(3)由于涡流制动器有较大的法向吸力,对列车运行具有提升稳定性的作用,对列车横向和垂向平稳性指标均有优化,因为4M4T编组情况相比于6M2T编组情况多加装了2节车厢的涡流制动器,因此4M4T编组下的列车在平稳性方面优化更为明显.

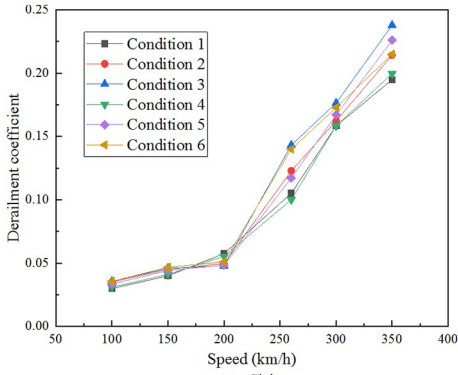
## 4.2 脱轨系数

由于线路状态、运用条件和列车结构等参数的不当选择会导致列车发生脱轨现象,为了确保列车的运行安全,本节采用脱轨系数作为列车运行安全性的评价标准,通过对列车第一轮对的第一脱轨系数<sup>[25]</sup>作为判据进行分析.

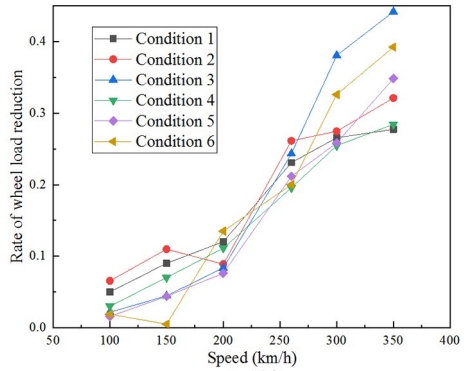
运用动力学仿真分析,分别计算六种工况下的列车的脱轨系数指标,分别对列车第1、5、8号车厢的不同工况下的第一轮对脱轨系数进行绘制,从图8中可以得出以下研究结论:

(1)不同工况下,脱轨系数均随着速度增大而增大,最大值为0.24远小于0.6,等级属于优.

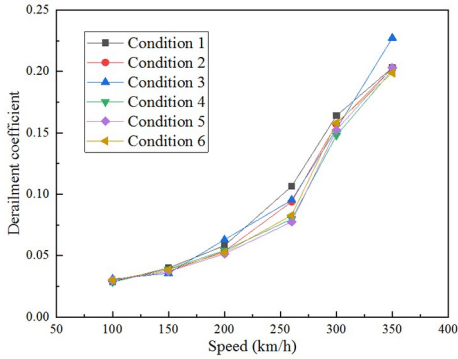
(2)并且列车在低速状态时,脱轨系数均变化较小,可以说明低速状态下,列车工况及动力分配



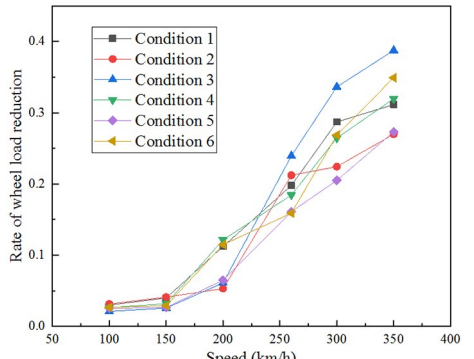
(a) 1号车  
(a) Car 1



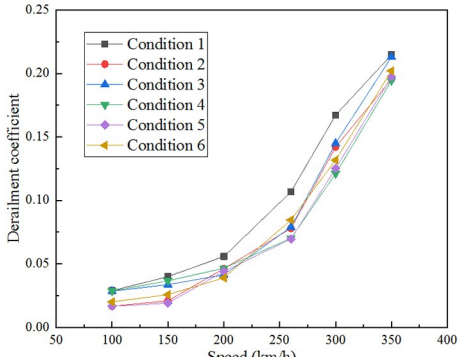
(a) 1号车  
(a) Car 1



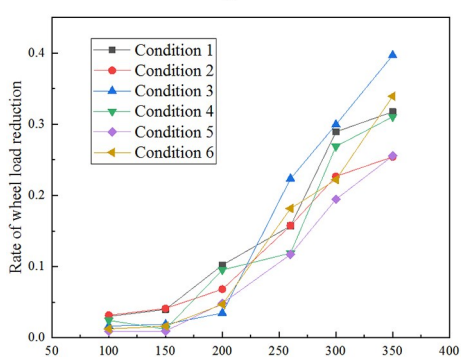
(b) 5号车  
(b) Car 5



(b) 5号车  
(b) Car 5



(c) 8号车  
(c) Car 8



(c) 8号车  
(c) Car 8

图 8 脱轨系数

Fig. 8 Derailment coefficient

图 9 轮重减载率

Fig. 9 Rate of wheel load reduction

方式对脱轨系数的影响较小;高速状态下,涡流制动系统下脱轨系数在 4M4T 编组下增大更大,在 6M2T 编组下变化较小.由于复合制动系统中,法向吸力会增大轮轨蠕滑,因此对列车脱轨系数具有优化作用.

### 4.3 轮重减载率

轮重减载率是轮重减少程度的指标,是对脱轨系数的补充,用于衡量有无可能由于一侧车轮减载过大而导致脱轨,单凭脱轨系数来判定列车脱轨趋势并不完善<sup>[26,27]</sup>,本部分继续通过对列车轮重减载率进行分析,使用第一轮对作为判据进行分析.

计算结果如图 9 所示,可以得出以下研究结论:

(1)均满足轮重减载率要求.在惰行工况下,每个车厢的轮重减载率指标都随着速度的增大而增大,在高速状态下增长幅度趋于平稳,而在电空制动中,轮重减载率指标随速度增长的幅度在 6M2T 编组的情况下较小.

(2)加装涡流制动系统后,低速状态下,不同动力分配情况下变化较小;高速状态下,4M4T 编组的情况下增大较为明显.复合制动系统中,法向吸力的增大将轮对的轮轨接触力差异进行放大,因此不同车厢在不同的制动方式下,由轮轨力的变化导致了轮重减载率的增大.



#### 4.4 轮轴横向力和轮轨垂向力

轮轴横向力和轮轨垂向力同时对列车的行驶安全有着重要的影响,并直接影响列车的运行安全性指标<sup>[28,29]</sup>.在铁路运输设计中,均是非常重要的参数,需要同时考虑轮轴横向力和轮轨垂向力的限值,以保证列车的行驶安全和轨道的使用寿命.

轮轴横向力是列车在行驶过程中用来反映轨道轨距加宽的程度,轮轴横向力过大是导致线路失稳、胀轨及跑轨现象最主要的原因,因此列车需要限制轮轴横向力的最大值保证行车安全<sup>[30]</sup>.轮轨垂向力是用来反映车轮不圆等因素引起的垂向冲击作用而使用的载荷,如果轮轨垂向力过大,会导致轮缘与轨道之间的摩擦力增大,轮胎和轨道的磨损加剧,甚至会导致轮胎脱轨.

本部分对于轮轴横向力指标,运用动力学仿真分析,对列车第1、5、8号车厢的第一轮对的轮轴横向力的最大值作为判据,绘制的轮轴横向力计算结果如图10所示,通过图中结果进行对比分析可以得出以下研究结论:

(1)均满足轮轴横向力指标要求.在惰行工况下,每个车厢的轮轴横向力指标都随着速度的增大

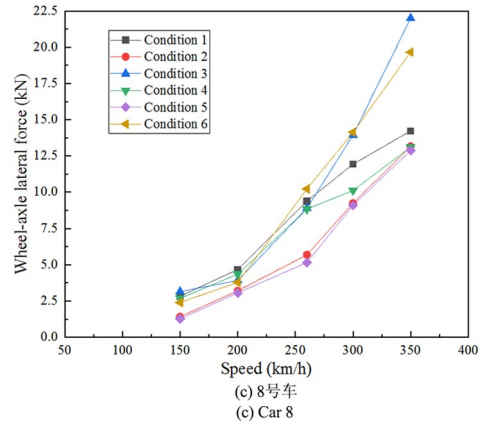


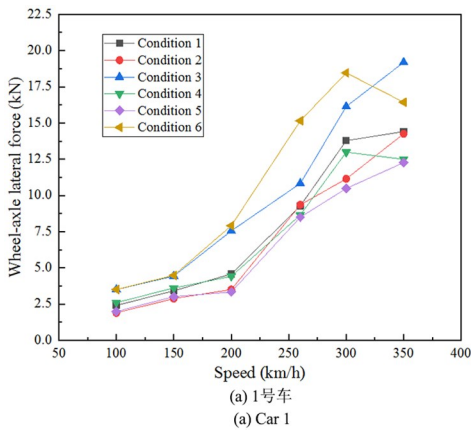
图10 轮轴横向力

Fig. 10 Wheel-axle lateral force

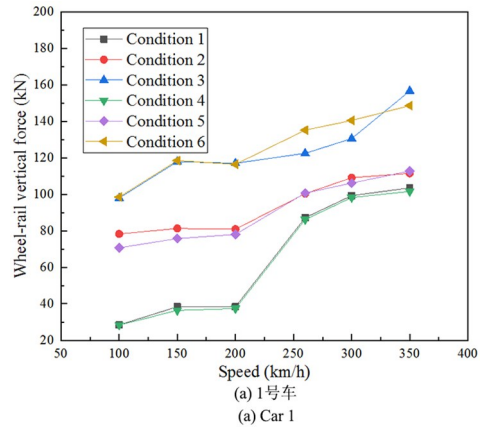
而增大,在高速状态下增长幅度趋于平稳;而在电空制动中,列车的轮轴横向力相对于惰行工况下在高速状态下均有减小.

(2)在涡流制动系统工况下,头尾车的轮轴横向力较其余工况增大较为明显;而对于中间车厢,4M4T编组下,轮轴横向力较其余工况增大较为明显,6M2T编组下变化较小.

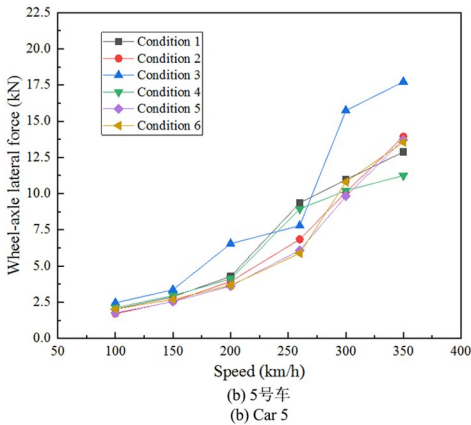
本部分对于轮轨垂向力指标,对列车第1、5、8号车厢的第一轮对的轮轨垂向力最大值作为判据,绘制的计算结果如图11所示,通过图中结果可以



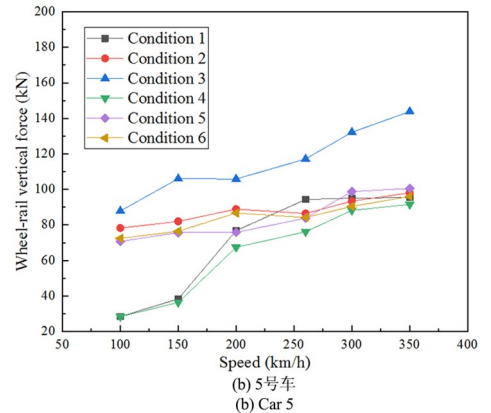
(a) 1号车  
(a) Car 1



(a) 1号车  
(a) Car 1



(b) 5号车  
(b) Car 5



(b) 5号车  
(b) Car 5

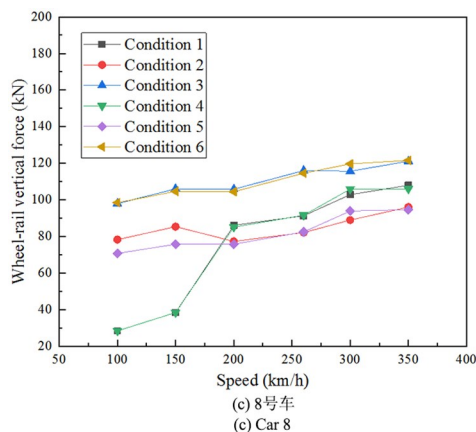


图 11 轮轨垂向力  
Fig. 11 Wheel-rail vertical force

得到以下研究结论:

(1)均满足轮轨垂向力指标要求.在惰行工况下,每个车厢的轮轨垂向力指标都随着速度的增大而增大,低速状态和高速状态下差值较大,而对于电空制动工况中,列车轮轨垂向力在不同速度状态下的差值较小,变化较为平缓.

(2)在涡流制动系统工况下,轮轨垂向力较其余工况增大较为明显,低速状态较高速状态增大幅度更大,中间5车相比于头尾车来说,在4M4T编组情况下比于6M2T编组情况下增大更为明显.涡流制动系统的簧下质量和法向吸力是影响轮轴横向力和轮轨垂向力的主要原因.

## 5 结论

本文基于CRH2型动车组车辆和直线轨道涡流制动器的结构参数,建立了考虑不同动力分配方式下的高速列车动力学模型,对列车时域范围不同动力分配方式、涡流制动系统的制动动力学性能进行了仿真分析,获得以下主要结论:

(1)三种工况下的平稳性指标进行对比,电空制动下较其余两种工况更大,当速度高于250km/h时,4M4T编组下,涡流制动工况具有更低的平稳性指标参数,因此得到4M4T编组情况的平稳性指标优化效果更为明显.

(2)在列车运行安全性中的脱轨系数方面,6M2T编组情况下,涡流制动对其影响较小,4M4T编组情况下1车和8车的略有降低,中间5车的有一定程度增大,均在合理范围内;运行安全性中的轮重减载率方面,6M2T编组情况下,涡流制动对其影响较小,而在4M4T编组情况下,高速状态涡

流制动加装后使其逐渐增大.

(3)编组方式、加装直线轨道涡流制动对轮轴横向力和轮轨垂向力的引起明显变化,头尾车的轮轴横向力较其余工况增大较为明显;加装涡流制动装置会导致第5号车厢轮轨垂向力指标的增大.

(4)列车的动车与拖车所受制动力存在差异,导致了动力分配方式、制动系统对车辆的动力学性能参数均有显著影响,同时,曲线线路、牵引工况及其他车型将作为下一步开展的研究内容.

## 参考文献

- [1] 彭其渊,文超,闫海峰.提速战略对我国铁路运输发展的带动作用[J].西南交通大学学报,2008,43(6):685-691.  
PENG Q Y, WEN C, YAN H F. Driving effects of speed increase on development of railway transportation in China [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(6): 685-691. (in Chinese)
- [2] 吴云飞.高速动车组线性轨道涡流制动系统研究[D].成都:西南交通大学,2017.  
WU Y F. Research on linear eddy current braking system of high speed EMU [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [3] 赖奎,陈清.制动工况下电力机车直线运行动力学性能分析[J].电子科技,2013,26(9):74-77.  
LAI K, CHEN Q. Dynamics analysis of electric locomotive on straight track under braking working conditions [J]. Electronic Science and Technology, 2013, 26(9): 74-77. (in Chinese)
- [4] J. Prem,王渤洪.大功率常用制动系统—ICE3的涡流制动(一)[J].变流技术与电力牵引,2005(1):7-12.  
J P, WANG B H. Eddy-current brake in the ICE 3 as high-efficiency service brake system—part 1 [J]. Converter Technology & Electric Traction, 2005 (1): 7-12. (in Chinese)
- [5] 罗琼. AGV—下一代高速动车组[J].变流技术与电力牵引,2001,(04):38-40.  
LUO Q. AGV—Next generation high speed multiple unit [J]. Converter Technology & Electric Traction, 2001, (04): 38-40. (in Chinese)
- [6] SAKAMOTO Y, KASHIWAGI T, TANAKA M, et al. Rail brake system using a linear induction motor for dynamic braking [J]. IEEJ Transactions on

- Industry Applications, 2009, 129(3): 342–349.
- [7] YODA H, SAKAMOTO Y, UKITA K, et al. Study on miniaturization and weight reduction for the application of LIM-type eddy-current rail brakes to high-speed trains [J]. Quarterly Report of RTRI, 2017, 58(4): 311–317.
- [8] SAKAMOTO Y, KASHIWAGI T, HASEGAWA H, et al. Design considerations and experimental verification of a rail brake armature based on linear induction motor technology [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 131(1): 127–134.
- [9] 牛旭. 环形绕组结构交流励磁轨道涡流制动器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- NIU X. Research on orbital eddy current brake with the ring winding structure and AC excitation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [10] LI Y Z, LI J, SONG X L, et al. Research on braking characteristics of rail eddy current brake with AC excitation [C]//2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA). Wuhan, China. IEEE, 2021: 1–6.
- [11] 刘鹏飞, 王开云, 张大伟. 牵引及制动操纵对重载机车轮轨动力作用的影响[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(2): 96–104.
- LIU P F, WANG K Y, ZHANG D W. Influence of traction and braking operation on wheel-rail dynamic interaction for heavy haul locomotive [J]. China Railway Science, 2017, 38(2): 96–104. (in Chinese)
- [12] 魏伟, 赵旭宝, 姜岩, 等. 列车空气制动与纵向动力学集成仿真[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 39–46.
- WEI W, ZHAO X B, JIANG Y, et al. The integrated model of train air brake and longitudinal dynamics [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 39–46. (in Chinese)
- [13] ZHANG Z Y, DHANASEKAR M. Dynamics of railway wagons subjected to braking torques on defective tracks [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(1): 109–131.
- [14] 王开云, 翟婉明. 纵向压力作用下重载机车与轨道的动态相互作用[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(1): 7–12.
- WANG K Y, ZHAI W M. Dynamic interaction between heavy locomotive and track under longitudinal force of coupler [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(1): 7–12. (in Chinese)
- [15] LI J, LI Y Z, XU J M, et al. Calculation and characterization of braking performance for rail eddy current brake with AC excited ring-winding armature [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(2): 1614–1625.
- [16] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 1–9.
- TIAN H Q. Study evolvement of train aerodynamics in China [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 1–9. (in Chinese)
- [17] Д. В. ШЕВЧЕНКО. 自动车钩连接动力学的数字模拟[J]. 宋忠明译. 国外机车车辆工艺, 2020(6): 6–9+14.
- [18] 杜进辅, 胡亮. 纯电动汽车高速齿轮传动全工况抑振修形方法[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(10): 94–102.
- DU J F, HU L. Vibration suppression modification method of battery electric vehicle high-speed gear transmission under full working conditions [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(10): 94–102. (in Chinese)
- [19] 罗楚钰, 曾梦竹, 王响军, 等. 基于表面吸气的矩形截面涡激振动抑制及机理研究[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(6): 72–80.
- LUO C Y, ZENG M Z, WANG X J, et al. VIV suppression and mechanism analysis based on the surface aspiration of rectangular section [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(6): 72–80. (in Chinese)
- [20] 鲁昌霖, 王志伟, 王权, 等. 考虑轮轨蠕滑的高速列车制动非线性振动行为研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(6): 10–19.
- LU C L, WANG Z W, WANG Q, et al. Research on nonlinear braking vibration of high-speed trains considering wheel-rail creep [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(6): 10–19. (in Chinese)
- [21] 铁道部标准所. 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范: GB5599–85 [S]. 北京: 国家标准局, 1985.
- Railway standards institute. Railway vehicles – Specification for evaluation the dynamic performance and accreditation test: GB5599 – 85 [S]. Beijing: National Bureau of Standards, 1985. (in Chinese)
- [22] 杨荣峰, 王林栋, 章亮. 铁路线路动车组动力学响应检测应用研究[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(1): 20–21+47.

- YANG R F, WANG L D, ZHANG L. EMU dynamic performance test and research on railway line [J]. *Railway Locomotive & Car*, 2010, 30(1): 20-21+47. (in Chinese)
- [23] 郑松, 刘海娥. 基于 ADAMS 的 CRH2 型高速动车组建模与仿真[J]. *郑州铁路职业技术学院学报*, 2020, 32(2): 26-29+39.
- ZHENG S, LIU H E. Modeling and simulation of CRH2 high speed emu based on ADAMS [J]. *Journal of Zhengzhou Railway Vocational and Technical College*, 2020, 32(2): 26-29+39. (in Chinese)
- [24] CHEN Z G, ZHAI W M, WANG K Y. Locomotive dynamic performance under traction/braking conditions considering effect of gear transmissions [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2018, 56(7): 1097-1117.
- [25] 刘一鸣. 高速列车牵引与制动工况下的动力学性能仿真研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- LIU Y M. Simulation of dynamic performance for high speed train under traction and braking conditions [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [26] 阳光武, 肖守讷, 马卫华. 制动力对机车直线运行安全性的影响 [J]. *西南交通大学学报*, 2010, 45(5): 657-662.
- YANG G W, XIAO S, MA W H. Effect of coupler compression force on locomotive safety on tangent track [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2010, 45(5): 657-662. (in Chinese)
- [27] 高建敏, 梁浩, 杨吉忠, 等. 400km/h 高速铁路车辆曲线通过安全性能分析 [J]. *高速铁路技术*, 2021, 12(2): 56-61+67.
- GAO J M, LIANG H, YANG J Z, et al. Safety analysis of 400km/h high-speed railway vehicles passing curves [J]. *High Speed Railway Technology*, 2021, 12(2): 56-61+67. (in Chinese)
- [28] 程海涛, 侯霄. 制动工况下车辆的动力学分析 [J]. *铁道车辆*, 2000, 38(9): 1-6+1.
- CHENG H T, HOU X. Dynamics analysis on railway cars under braking working conditions [J]. *Rolling Stock*, 2000, 38(9): 1-6+1. (in Chinese)
- [29] LEVA S, MORANDO A P, COLOMBAIONI P. Dynamic analysis of a high-speed train [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(1): 107-119.
- [30] 赖奎. 200km/h 机车制动工况下动力学分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- LAI K. Dynamics analysis of 200km/h locomotive under braking conditions [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)