

文章编号:1005-0523(2021)01-0061-06

空车编组数量对货物列车安全性影响研究

蒋益平, 杨春辉, 罗世民

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:在既有线货物列车提速和重载的背景下,为了研究空车编组数量对货物列车运行安全性的影响,根据车辆系统动力学理论、列车纵向动力学理论、车辆-轨道耦合动力学理论,采用数值方法建立了空重车混编列车-轨道耦合系统动力学模型,分析了制动工况下不同数量空车编组在货物列车头、尾部时,货物列车的轮轴横向力、脱轨系数、轮重减载率等安全性指标变化情况。结果表明:当列车头部(机车后部)和尾部各编组5,10,20辆空车时,制动工况下,空车及重车的轮轴横向力、脱轨系数、轮重减载率均满足GB/T 5599-2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》标准要求,且有一定安全裕量;列车中空车的轮轴横向力和轮轨横向力均小于重车,空车的脱轨系数和轮重减载率大于重车;当列车头、尾部各编组5辆空车时,空车及重车的轮轴横向力均最小,而其他两种编组情况下横向轮轴力相差不大;对于脱轨系数和轮重减载率,除尾部编组5辆空车的情况外,编组在头部的空车的脱轨系数和轮重减载率均大于尾部空车,在列车头部和尾部各编组10,20辆空车时两列车整体轮重减载率差异较小。

关键词:空车;编组数量;货物列车;安全性

中图分类号:U271.92

文献标志码:A

本文引用格式:蒋益平,杨春辉,罗世民.空车编组数量对货物列车安全性影响研究[J].华东交通大学学报,2021,38(1):61-66.

Analysis of the Influence of Empty Vehicles Quantity on the Safety of Freight Trains

Jiang Yiping, Yang Chunhui, Luo Shimin

(School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract:In order to analyze the effect of the number of empty trains on the safety of freight trains, a dynamic model of the train-track coupling system with empty vehicles and heavy vehicles was established based on the theory of vehicle system dynamics, train longitudinal dynamics theory and the theory of vehicle-track coupling dynamics. Based on this, the lateral wheelset force, the derailment coefficient, the wheel unloading rate were analyzed when different numbers of empty vehicles were located in the head and rear parts of the freight train while braking. The results show that when 5, 10, and 20 empty vehicles at the head and tail of the train, the lateral wheelset force, the derailment coefficient, the wheel unloading rate of the empty and heavy vehicles all meet the standard requirements of the GB/T 5599-2019 standard and there is a certain safety margin. When the empty and heavy vehicles mixed marshalling train braking on curve railway, the lateral wheelset force of the empty vehicle is less than that of the heavy vehicle, and the derailment coefficient and wheel unloading rate of the empty vehicle are greater than that of the heavy vehicle. When 5 empty vehicles at the head and tail of the train, the lateral wheelset force of the empty vehicle and the heavy vehicle are all the minimum, but the wheel unloading rate of the empty vehicle at the tail is the largest at the same time. For the derailment coefficient and wheel unloading rate, except for the case of only 5 empty vehicles located in the head and rear marshalling, the derail-

收稿日期:2020-09-29

基金项目:江西省教育厅科技项目(GJJ170358,GJJ180291);国家自然科学基金资助项目(51665015)

作者简介:蒋益平(1984—),男,讲师,博士,研究方向为车辆系统动力学。E-mail:jyp84@126.com。

ment coefficient and wheel unloading rate of the empty vehicles marshalling at the head of the train are higher than those at the tail. When the head and tail of the train are marshalling of 10 and 20 empty vehicles respectively, the difference in the overall wheel load reduction rate of the two trains is small.

Key words: empty vehicles; marshalling number; freight train; safety

Citation format:JIANG Y P, YANG C H, LUO S M. Analysis of the influence of empty vehicles quantity on the safety of freight trains[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 61-66.

随着我国高速铁路的快速发展,既有线客货运输分离加速,既有线的货运能力得到进一步释放,既有线货物列车的提速和重载也日益得到重视^[1-3]。空车、重车混合编组(以下简称空重车混编)作为铁路货物列车常见的编组形式之一。由于空车的存在,而使列车成为非均质列车,随着现代制造技术及材料的发展,铁道货车单车载重量进一步增加,而自重进一步减轻;因此,空车和重车之间的重量差越来越大,制动时空车和重车的减速度不一致现象即列车冲动也越来越严重。此外,由于货物列车编组长度、车钩间隙等因素,在列车制动过程中,机车车辆间会产生冲动和挤压现象,尤其当空车编组位置及数量不当时,空车、重车间的冲动就更为剧烈,空车就可能因制动冲挤而造成压曲上浮,严重时可能导致脱轨,给铁路货物运输安全性带来较大影响。相关研究也表明出现较大脱轨系数和轮重减载率的车辆主要是空重混编列车中的空车^[4-8],对列车中的空车进行研究显得十分重要。

针对货物列车空重车混编,池茂儒^[9]建立了空重混编列车动力学模型,研究了空重罐车混合编组对货物列车稳定性的影响。田光荣^[10]分析了1辆空车位于货物列车的头、中、尾部时的曲线通过安全性。蒋益平^[11]对不同数量空车分别编组在列车的前、中、后三个部位时列车的动力学性能进行了对比分析。梁杰^[12]分析了机车不同组合方式下,2辆空车顺序编组在列车不同位置时的纵向力。郭刚等^[13]、杨亮亮等^[14]分析了27,23 t和21 t轴重轴重货车混编以及空重车混编制动时的纵向力。张生玉^[15]、王新锐^[16]分析了既有线27,23 t和21 t轴重混编试验列车在制动工况下的纵向车钩力及其变化规律。

以上研究对货物列车运输安全起到了巨大的促进作用,这些研究更关注空车编组位置对货物列车性能的影响,但是关于空车编组数量对货物列车动力学性能的影响研究较少。基于此,本文在当前既有线货物列车提速和重载的研究背景下,建立了空重车混编货物列车-轨道耦合动力学模型,分析

了列车在提速情况下,在重车数量保持不变,而在列车头部(机车之后)、尾部同时编组不同数量空车时货物列车在曲线线路制动时的安全性,为既有线提速和重载背景下货物列车的空重车混合编组和安全运行提供理论支持。

1 动力学模型

列车采用车辆系统动力学理论、列车纵向动力学理论、车辆-轨道耦合动力学理论,并采用数值方法建立了空重车混编列车-轨道三维耦合系统动力学模型。

1.1 机车/车辆动力学模型

货车以安装转K6转向架(如图1)的平车为研究对象,主要由车体、侧架、摇枕、轮对、轴箱以及八字型橡胶垫、钢弹簧、干摩擦减振器等零部件组成。其中车体、侧架、轮对均取6个自由度,摇枕考虑摇头和侧滚自由度,承载鞍考虑绕轮对旋转的点头自由度^[17-18],模型自由度如表1所示。机车还另外考虑电机的点头自由度,车辆的垂向、横向运动耦合在一起。

表1 货车模型自由度

Tab.1 Freedom of freight vehicle system

零部件	伸缩	横移	浮沉	侧滚	点头	摇头
车体	√	√	√	√	√	√
侧架	√	√	√	√	√	√
轮对	√	√	√	√	√	√
承载鞍	—	—	—	—	√	—
摇枕	—	—	—	√	—	√

建模时,车体、摇枕、侧架、承载鞍、轮对等均视为刚体,而橡胶垫、钢弹簧、摩擦减振器、旁承、交叉拉杆等部件视为弹性元件。轮轨接触几何关系采用非线性单点接触,蠕滑力采用Kalker简化蠕滑理论进行计算,同时考虑轴箱和侧架间的纵、横向间隙,以及摇枕和楔块之间、楔块和侧架导框之间的干摩

擦阻尼的非线性特性,轮轨均为新轮新轨状态,车轮等效锥度为 0.1^[7]。综合考虑以上因素,建立机车、货车的非线性动力学模型如图 2 所示。

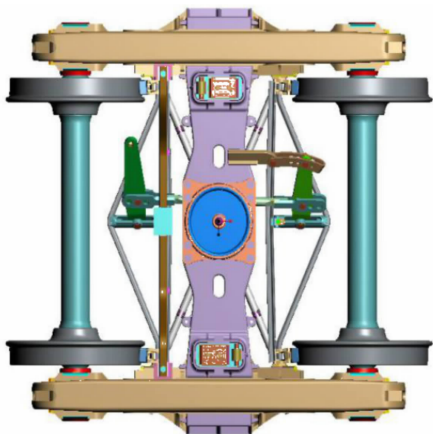


图 1 转 K6 转向架结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of K6 bogie structure

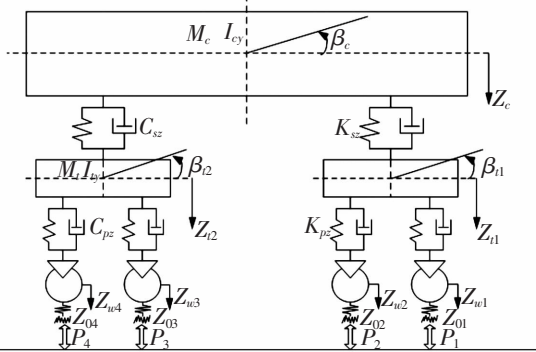


图 2 机车/车辆动力学模型

Fig.2 Locomotive/vehicle dynamics model

1.2 列车-轨道三维耦合动力学模型

在车辆模型的基础上,考虑机车车辆间的车钩缓冲器特性,车钩采用 17 号车钩,缓冲器为 MT-2 型。采用落锤实验所得加载和卸载特性曲线,参照文献[12]建立钩缓系统模型如图 3 所示,模型中包含了车钩间隙,弹性胶泥缓冲器特性、初压力、最大行程、最大阻抗力、吸收率及缓冲器压死后的刚性冲击等元素。

在此基础上,利用车辆-轨道耦合动力学理论^[9],并考虑轨道和车辆之间的垂向、横向耦合作用,建立列车-轨道耦合动力学模型。模型可以考虑列车-轨道系统垂向、横向、纵向 3 个方向的动力学性能,建立的货物列车-轨道三维耦合动力学模型如图 4 所示。

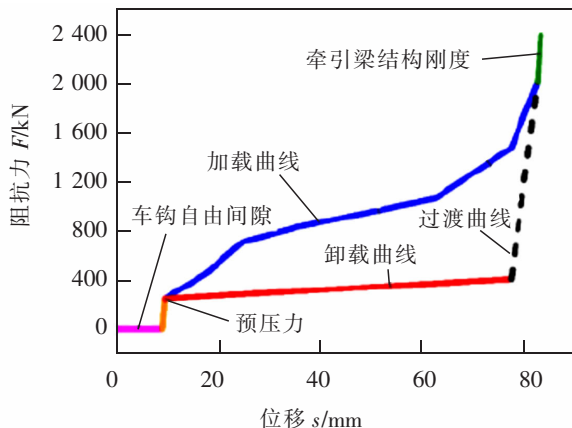


图 3 车钩缓冲器模型

Fig.3 Coupler and buffer dynamics model

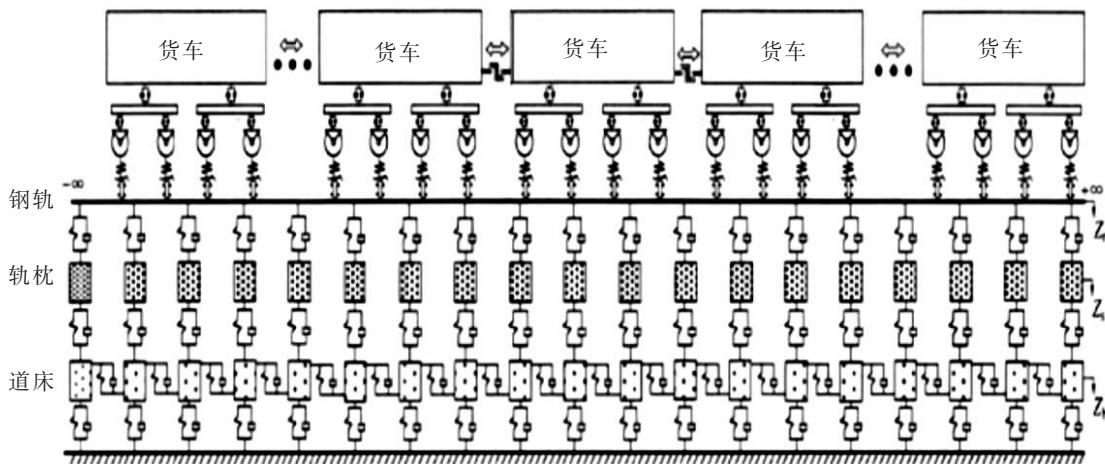


图 4 列车-轨道耦合动力学模型

Fig.4 Train-track three-dimensional coupling dynamics model

1.3 数值求解方法

由于视各质量为刚体,由振动力学原理,可列出各刚体运动微分方程的矩阵形式如下

$$M\ddot{Y}+C\dot{Y}+KY=F \quad (1)$$

式中: M 、 K 、 C 分别为刚体质量,阻尼,刚度矩阵; Y 为自由度变量; F 为广义载荷矢量。

对于列车系统,因既有线货车编组长度相对较短,为考虑恶劣运行工况,本文仅考虑空气制动,闸瓦采用高摩合成闸瓦,基础制动装置受力图如图5所示,列车阻力和制动力等均按照《列车牵引计算第1部分:机车牵引式列车》^[20]计算。

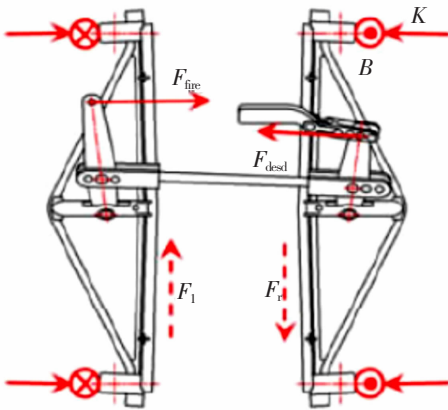


图5 基础制动装置受力图

Fig.5 Force diagram of basic braking device

考虑了机车、车辆之间的各种相互作用力后,货物列车系统的运动方程可以表达成

$$M\ddot{Y}+C\dot{Y}+KY=P+F \quad (2)$$

式中: P 为外部环境作用于列车系统的力。

为解决列车自由度多,计算困难的问题,采用循环变量法^[11,21-22]进行求解,按照该方法运动方程(2)可以分解成 n 个方程

$$m_i\ddot{y}_i+c_i\dot{y}_i+k_iy_i=p_i+f_i \quad (i=1,\dots,n) \quad (3)$$

式中: y_i 为第 i 辆车所有自由度的集合; m_i 、 c_i 、 k_i 分别为第 i 辆车的质量,阻尼和刚度矩阵; p_i 为作用在第 i 辆车的外部作用力; f_i 为第 i 辆车与第 $i+1$ 辆车之间的相互作用力。

利用该方法可把货物列车庞大的自由度计算问题划分为 n 个基本积分单元分别进行计算^[11,21-22]。

2 计算条件及列车编组情况

开展空重混编货物列车动力学分析时,线路激励采用美国AAR第五级线路谱,列车以90 km/h速

度通过曲线线路,曲线半径为600 m,缓和曲线长110 m,制动时减压量为70 kPa。体现运行安全性的轮轴横向力、脱轨系数、轮重减载率等动力学指标取通过缓和曲线和圆曲线部分的最大值。

众多的研究表明列车中部是列车纵向冲动比较大的位置,相关研究较多,因此,本文在机车后部和列车尾部这两个位置进行空车编组,研究空车编组在这两位置时的安全性。为体现既有有线列车重载化,采用的编组形式为机车+空车(5,10,20辆)+62重车+空车(5,10,20辆),保持列车中重车数量不变,而依次增加列车头、尾两部分的空车数量,从而增加列车编组长度,既考查空车数量增加又研究列车编组长度变化后的动力学性能。

在这种编组方式下,空车同时编组在机车后部(即列车头部)和列车尾部,每一部分空车的编组数量分别为5,10辆和20辆,即货物列车中的空车总数量分别为10,20辆和40辆,分析空车数量不同时货物列车的安全性变化情况。

3 空车编组数量对安全性影响

利用空重车混编列车-轨道耦合动力学模型分析不同数量空车编组在列车头部和列车尾部时的运行安全性,并采用GB/T 5599-2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》^[23]标准对轮轴横向力、脱轨系数和轮重减载率等运行安全性指标进行评价。

3.1 轮轴横向力

轮轨横向力为车轮和钢轨之间的相互横向作用力,轮轴横向力为左右轮轨横向力的向量和,用于评定车辆在运行过程中是否会因为过大的横向力而导致轨距扩宽或线路产生严重变形^[23]。根据GB/T 5599-2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》,空车重量为20.5 t,空车轮轴横向力评价标准为31.74 kN。

空重车混编货物列车的轮轴横向力和轮轨横向力如图6所示,从图6中可以看出,不同数量空车编组时,轮轴横向力均未超过GB/T 5599-2019标准要求的限度值;当列车头、尾部各编组5辆空车时,空车及重车的轮轴横向力均最小;当列车头、尾部各编组10,20辆空车时,列车中重车轮轴横向

力差异不大,但是当尾部编组 20 辆空车时,尾部空车的轮轴横向力略小。在 3 种空车编组数量情况下,头部空车的轮轴横向力要大于尾部空车。

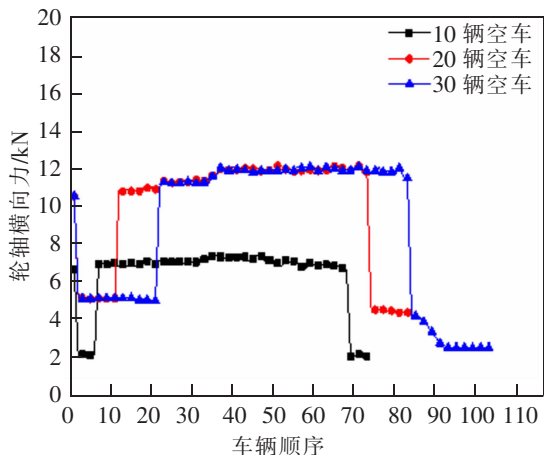


图 6 轮轴横向力
Fig.6 Lateral wheelset force

3.2 脱轨系数

脱轨系数为爬轨侧车辆作用于钢轨上的横向力与其作用于钢轨上的垂向力的比值,用于评定车辆的车轮轮缘在横向力作用下是否会爬上轨头而脱轨^[23]。根据 GB/T 5599-2019 标准,货车在曲线半径大于 400 m 的线路上运行时,脱轨系数限定值为 1.0,本文计算的曲线半径为 600 m,脱轨系数的评价限值为 1.0。

空重车混编货物列车的脱轨系数如图 7 所示,从图中可以看出,不同数量空车编组时,脱轨系数均未超过 GB/T 5599-2019 标准要求的限度值 1.0,

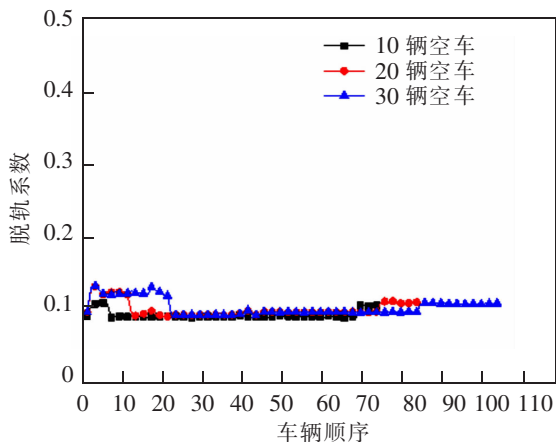


图 7 脱轨系数
Fig.7 Derailment coefficient

且有较大裕量;在空车不同编组数量时,编组在列车头部的空车脱轨系数均大于尾部空车;随着空车编组数量的增加,各编组情况下,脱轨系数大小相差不大,规律相似。

3.3 轮重减载率

轮重减载率为轮重减载量与该轴平均静轮重的比值,是用于评定因轮重减载过大而引起脱轨的另一种脱轨安全指标^[23]。根据 GB/T 5599-2019 标准,当速度小于等于 160 km/h 时,轮重减载率的评价限值为 0.65。

空重车混编货物列车的脱轨系数如图 8 所示,从图中可以看出,不同数量空车编组时,轮重减载率均未超过 GB/T 5599-2019 标准要求的限度值 0.65;3 种编组情况下,头部空车的轮重减载率无明显差异;当列车尾部编组 5 辆空车时,尾部空车轮重减载率大于 10,20 辆空车编组尾部空车,后两种编组情况下尾部空车轮重加载率相差不大;编组 10,20 辆空车时,头部空车的轮重减载率大于尾部空车。

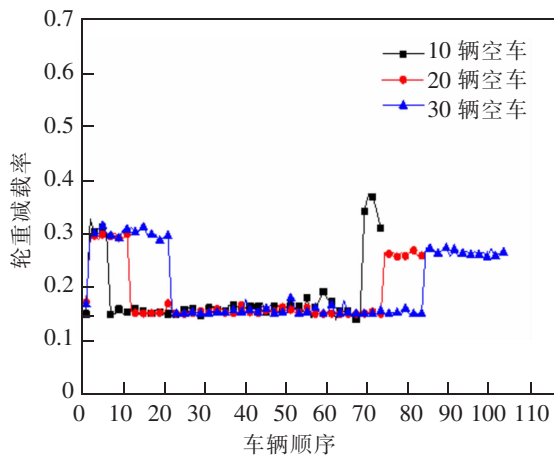


图 8 轮重减载率
Fig.8 Wheel unloading rate

4 结论

在制动状态下,同时在货物列车的头、尾部编组 5,10,20 辆空车时,对其动力学安全性进行分析,表明:

1) 在列车头部和尾部各编组 5,10,20 辆空车时,空车及重车的轮轴横向力、轮轨横向力、脱轨系数、轮重减载率均满足 GB/T 5599-2019 标准要求,

且有一定安全裕量。

2) 在本文计算条件下,空重混编列车在曲线上制动时,空车的轮轴横向力均小于重车,空车的脱轨系数和轮重减载率大于重车,且轮重减载率的值大于脱轨系数的值,说明在此工况下,轮重减载率是影响空重车混编列车脱轨最重要的因素。

3) 当列车头、尾部各编组 5 辆空车时,空车及重车的轮轴横向力均最小,但此时尾部空车的轮重减载率最大。

4) 对于脱轨系数和轮重减载率,除尾部编组 5 辆空车的情况外,编组在头部的空车的脱轨系数和轮重减载率均大于尾部空车,且在列车头部和尾部各编组 10,20 辆空车时列车整体轮重减载率差异较小。

参考文献:

- [1] 伍梦欢. 既有线开行重载列车关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [2] 中国国家铁路集团有限公司. 武汉局集团公司完成襄渝线货物列车提速试验[EB/OL]. (2018-05-03)[2020-09-20]. http://www.china-railway.com.cn/xwzx/zhxw/201812/t20181214_84812.html.
- [3] 严存义. 兰新铁路货物列车将提高运行速度[N]. 甘肃日报, 2019-12-18(2).
- [4] 马大炜. 重载列车及其试验研究(续四)—重载列车仿真研究(上)[J]. 铁道车辆, 1999, 37(2): 11-15.
- [5] 马大炜. 重载列车及其试验研究(续六)—我国重载列车的试验研究(上)[J]. 铁道车辆, 1999, 37(4): 16-19.
- [6] 陈雷, 王新锐, 孙蕾. 我国铁路提速货车动力学性能综述(待续)[J]. 铁道车辆, 2008, 46(1): 1-5.
- [7] 陈雷, 王新锐, 孙蕾. 我国铁路提速货车动力学性能综述(续完)[J]. 铁道车辆, 2008, 46(2): 8-12.
- [8] 向俊, 曾庆元. 轻重车辆混编对列车脱轨安全性的影响分析[J]. 长沙铁道学院学报, 2002, 20(3): 1-6.
- [9] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 空重车混编对列车稳定性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 10-13.
- [10] 田光荣, 张卫华, 池茂儒, 等. 列车混编对曲线通过安全性的影响分析[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(3): 5-8.
- [11] 蒋益平. 重载列车牵引制动动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [12] 梁杰, 米彩盈平, 王军平. 空重车混合编组方式对重载列车纵向力的影响[J]. 机械工程与自动化, 2013(6): 36-38.
- [13] 郭刚, 常崇义, 王俊彪, 等. 不同轴重货物列车编组方案的计算分析[J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(5): 12-16.
- [14] 杨亮亮, 罗世辉, 傅茂海, 等. 基于纵向冲动的混编货物列车编组方案研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(4): 18-24.
- [15] 张生玉, 熊芯, 张天婴, 等. 27 t 及以下轴重混编列车纵向车钩力试验研究[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(4): 12-16.
- [16] 王新锐, 姜成, 张生玉, 等. 27 t 轴重重载货车混编列车运行安全性试验研究[J]. 铁道车辆, 2015, 53(12): 20-25.
- [17] 蒋益平, 朱海燕, 杨春辉. 空气弹簧失气后地铁车辆动力学性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(2): 41-46.
- [18] 向金兰, 曾京, 彭莘宇, 等. 铁道货车车轮轮径差与轮轨力关系的研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(1): 9-14.
- [19] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [20] TB/T 1407.1-2018 列车牵引计算 第 1 部分: 机车牵引式列车[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [21] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 长大列车动力学建模的一种新方法[J]. 铁道车辆, 2007, 45(3): 1-5.
- [22] 池茂儒, 蒋益平, 张卫华, 等. 长大重载列车系统动力学[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(3): 34-40.
- [23] 中国铁道科学研究院. GB/T 5599-2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.