

2万t重载组合列车纵向冲动的 影响因素及优化研究

马睿杰¹, 吴 键²

(1. 国能运输技术研究院有限责任公司, 北京 100089;
2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 通过对朔黄铁路2万t重载组合列车的运行试验数据进行分析, 得出引起列车纵向冲动过大的具体原因和影响因素, 主要为列车在长大下坡道缓解时再生制动力较大、长大下坡道缓解地点选择不当和列车在大坡道与小坡道过渡区间运行等, 提出缓解纵向冲动的方案为优化列车再生制动力和调整缓解地点等措施。优化后现场实际应用情况表明, 2万t列车在朔黄线路的“神池南—宁武西”区间, 以及“滴流磴—猴烈”区间的列车纵向冲动显著降低, 验证了优化方案的可行性。

关键词: 2万t重载组合列车; 现场试验; 纵向冲动; 影响因素; 优化措施; 重载铁路

中图分类号: U292.92⁺¹

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2022)01-0103-06

Influencing factors and optimization measures for longitudinal impulse of 20 000-tonne combined heavy-haul trains

MA Ruijie¹, WU Jian²

(1. CHN Energy Institute of Transportation Technology Research Co., Ltd., Beijing 100089, China;
2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Based on the analysis of operation test data of several 20 000-tonne heavy haul combined trains on Shuohuang railway line, the specific reasons and influencing factors causing excessive longitudinal impulse of 20 000-tonne trains were obtained, mainly including large dynamic braking force adopted by the trains during air-braking release and the improper selection of air-braking release location on the long downhill grade line, as well as the operation process of the trains on the transition section between large and small downhill, etc. Then, the optimization schemes to alleviate longitudinal impulse were proposed, such as optimizing the dynamic braking force of the train, adjusting the air-braking release location. The field application after optimization shows that the longitudinal impulse of 20 000-tonne trains travelling from Shenchinan to Ningwuxi and Diliudeng to Houwen section of Shuohuang railway line have been significantly reduced respectively, which verifies the feasibility of the optimization measures.

Keywords: 20 000-tonne combined heavy-haul trains; field test; longitudinal impulse; influencing factors; optimization measures; heavy haul railway

0 引言

重载铁路运输凭借其大运量、高效率等诸多优势,

逐渐成为世界各国大宗货物陆运的主要方式。近年, 我国“西煤东运”等重载货运需求逐渐加大, 重载列车的编组和轴重也不断增加。当前, 采用“1+1”编组

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51825504)

通信作者: 马睿杰 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事重载铁路安全管理、重载列车纵向动力学等相关方面的研究;

E-mail: 466964383@qq.com

方式的2万t重载列车已在我国大秦线、朔黄线实现常态化开行,在大幅提升铁路运能的同时,也导致了列车的纵向冲动问题更为凸显。因此,大量专家学者从数值仿真和试验分析两方面开展了相关研究。

在数值仿真方面,钩缓系统和空气制动系统模型不断升级,使得列车纵向动力学仿真日趋完善^[1-3]。文献[4]研究了从控机车同步响应时间和制动初速度对2万t组合列车纵向力的影响。文献[5-6]计算分析了2万t组合列车的制动特性,指出采用组合模式可有效缩短制动波的传递时间,进而提高列车制动的同步性。文献[7]研究了机车无线同步控制方式对采用“1+2+1”编组方式的2万t重载列车纵向力分布特征的影响。文献[8]研究了不同编组方式的2万t列车纵向动力特性,比较了不同编组方式下2万t组合列车的纵向力分布特征。文献[9]研究了列车编组方式、从控机车响应时间和车辆结构等参数对2万t重载组合列车纵向冲动的的影响。文献[10]基于循环变量法建立2万t重载组合列车动力学模型,并分析了列车不同编组方式、主从控机车之间的同步延时和加装可控列尾等因素对纵向冲动的的作用特征。文献[11]研究了在空气制动缓解情况下,纵向冲动对2万t重载组合列车中部机车车钩分离的影响行为。文献[12]通过数值仿真揭示了纵向冲动导致的车钩分离形成原理,并提出了抑制车钩分离的防控对策。文献[13]研究了2万t列车在某重载线路长大下坡道循环制动过程中,将原来循环制动的四把闸优化到两把闸通过的可行性,并比较了优化前后的纵向车钩力分布特征。

同时,通过现场试验研究列车运行过程中纵向冲动的实际分布特征也是一个重要补充方式。文献[14]基于现场综合试验,通过列车静置试验和运行试验2种方式,研究了2万t重载组合列车的牵引和制动特性,提出了2万t列车的运行安全性、最大车钩力和最大纵向加速度等指标的限值,推动了2万t列车的正式开行。文献[15]研究了2万t重载列车不同编组方式、线路条件、操纵方式和车钩间隙等因素对列车不同位置的纵向车钩力的影响规律,指出了不同工况下纵向车钩力的分布特征。文献[16]研究了2万t重载组合列车在全线运行过程中中部机车最大车钩力和车钩横向摆角的分布规律,指出了在压钩力的作用下车钩更容易发生横向失稳。

当前,针对2万t重载列车纵向冲动的研究多基于数值仿真,而重载列车实际运营条件极其复杂,数值仿真无法兼顾诸多复杂的实际边界条件,因此通过现场试验研究2万t重载列车的纵向冲动特征不可或缺。但是现场动力学试验门槛高,开展频次有限,而针对朔黄线路2万t列车的现场运行试验更少。据统计,从2019年1月1日到2019年12月31日,朔黄线发生由列车冲动大而引起的停车事件共40起,发生车体错位事

件22起。2万t列车在运行中出现的纵向冲动大和车体错位不仅对乘务人员的正常操纵造成不利影响,同时也对列车的安全运行造成严重威胁。本文针对朔黄铁路2万t重载组合列车实际运营环境,通过现场试验研究,重点从操纵层面分析其冲动大的影响因素,提出优化措施,为列车平稳安全运行提供参考。

1 影响因素分析

将列车中任意位置的车辆简化为单质点,对其进行纵向受力分析,其模型如图1所示。

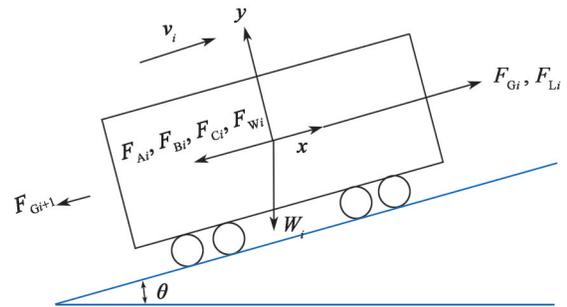


图1 车辆纵向动力学模型

Fig. 1 Vehicle longitudinal dynamics model

由图1可知,列车中任意位置的车辆,其纵向动力学方程可以表示为

$$m_i \ddot{x}_i = F_{1i} + F_{2i} \quad (1)$$

式中: m_i 为第*i*节车辆的质量; x_i 为第*i*节车辆的瞬时位置; F_{1i} 和 F_{2i} 分别为第*i*节车辆受到的2种不同性质的外力。

其中, F_{1i} 可以表示为

$$F_{1i} = F_{Gi} - F_{Gi+1} + F_{Li} - F_{Wi} \quad (2)$$

式中: F_{Gi} 与 F_{Gi+1} 分别为第*i*节车辆前车钩和后车钩所受的纵向力; F_{Li} 为第*i*节车辆所受到的牵引力或动力制动力; F_{Wi} 为第*i*节车辆所受的坡道阻力。

F_{2i} 可以表示为

$$F_{2i} = \begin{cases} -\frac{v_i}{|v_i|} (F_{Ai} + F_{Bi} + F_{Ci}), & v_i > 0 \\ -(F_{Ai} + F_{Bi} + F_{Ci}), & v_i = 0, F_{1i} \geq (F_{Ai} + F_{Bi} + F_{Ci}) \\ -F_{Li}, & v_i = 0, F_{1i} < (F_{Ai} + F_{Bi} + F_{Ci}) \\ 0, & v_i = 0, F_{1i} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: v_i 为第*i*节车辆的瞬时速度; F_{Ai} 、 F_{Bi} 和 F_{Ci} 分别为第*i*节车辆所受到的运行阻力、空气制动力和曲线阻力。

由上述公式可知,影响纵向冲动的因素较多,主要为列车操纵工况和运行线路条件。线路条件(如图2所示的线路海拔高度变化示意图)在修建之初已确定,没有优化的空间,因此减小纵向冲动的实际措施多集

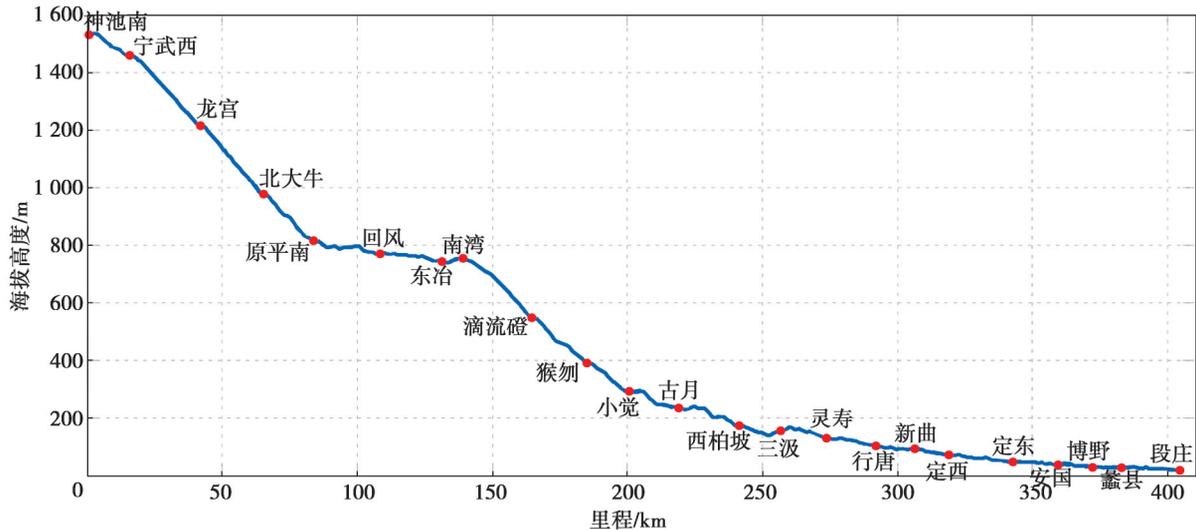


图2 朔黄线海拔高度随里程变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Shuohuang line altitudes change with mileage

中于列车操纵方式的优化。而列车操纵方式受限于线路平纵断面条件,也只在一定范围内进行调整。由于朔黄铁路长大下坡道众多,纵向冲动问题在长大坡道制动过程中尤为凸显。因此,本文主要针对2万t重载组合列车在长大坡道制动过程中发生较大纵向冲动时的列车操纵方式、线路条件等进行统计分析,并通过现场试验对再生制动力、缓解地点进行优化,以有效减小列车纵向冲动。

2 试验条件分析

朔黄铁路线路自西向东其海拔高度差达1527m(见图2),重车方向限制坡度为4‰,空车方向限制坡度为12‰,最小曲线半径400m,特别是在线路西段,桥隧相连,小半径曲线多,环境条件非常复杂。“神池南—西柏坡”线路属于困难区段,其中“宁武西—原平南”区段和“南湾—小觉”区段共计130km,为长大下坡道,有R400m半径曲线4条(长2229m),R500m半径曲线33条(长21363m),R600m半径曲线20条(长12043m),R700m半径曲线1条(长304m),R800m及以上半径曲线36条(长18996m),隧道55座(长56572m),因此主要针对该区段进行试验。

现场试验采用2万t重载组合列车,具体编组方式为“神华号8轴交流机车+108辆C80车辆+神华号8轴交流机车+108辆C80车辆+可控列尾”。其中,神华号8轴交流机车的轴式为 $2(B_0-B_0)$,轴重为25t,前后车钩中心距为35304mm,机车的最大运行速度为120km/h,轮周牵引功率/电制动功率为9600kW。C80货车车辆为双浴盆式铝合金运煤专用敞车,车辆的自重和载重分别为20t和80t,轴重为25t;车辆所配备的制动机型号为120-1型,其制动倍率为8.5,闸瓦类型为HGM新型高磨合成闸瓦;此外,C80车辆为2辆1组,2车之间

采用牵引拉杆连接,2端分别为16号旋转车钩和17号固定车钩。试验机车和货车的主要技术参数如表1所示。

表1 试验机车和货车的主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of the tested locomotive and wagon

参数名称	机车	货车
轴距/mm	1435	1800
轴式	$2(B_0-B_0)$	
轴重/t	25	25
整备质量/t	2×100	100
前后车钩中心距/mm	35304	12000
车体宽度/mm	3100	3184
转向架中心距(单节车)/mm	9000	8200
轮周牵引功率/kW	9600	
启动牵引力/kN	760	
持续牵引力/kN	532	
轮周电制动功率/kW	9600	
最大电制动力/kN	461	
制动机型号		120-1 阀
闸瓦型号		HGM 新型高磨合成闸瓦
制动倍率		8.5

纵向车钩力的大小与变化特征是衡量重载列车纵向冲动水平最为直接的指标,而根据运营数据统计,列车在长大下坡道运行过程中,中部机车与后部货车车钩间更容易出现较大的纵向冲动与纵向力,因此试验时将中部机车后的车钩替换为测力车钩。其中,纵向车钩力的测试主要通过钩体侧面粘贴应变片来实现,其粘贴位置如图3所示。

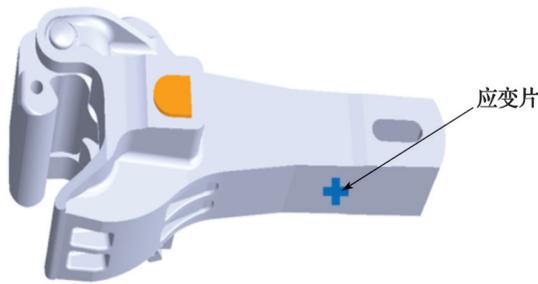


图3 应变片在车钩上的粘贴位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sticking position of strain gauge on coupler

3 试验数据分析

3.1 长大下坡道机车再生制动力

对“神池南—宁武西”区间3趟2万t列车的数据进行统计，将试闸后缓解过程中施加的再生制动力保持在350~400 kN，得到从控机车车钩在不同条件下的受力情况（如表2所示）。由表2可知，在上述试验条件下中部机车的后车钩受力较大，列车纵向冲动水平较为恶劣。因此，在保持列车缓解初速和缓解地点等条件大致相同的基础上，降低缓解后的再生制动力为200~300 kN，测得从控机车后车钩受力的最大值如表3所示。由于现场条件下对机车速度的控制较难达到完全一致，因此，对比缓解速度61 km/h（优化前）与62 km/h（优化后）的从控机车车钩受力可知，缓解再生制动力的降低对中部机车车钩受力影响不大；而在缓解速度为57 km/h时，再生制动力的降低将中部机车1 371 kN的最大压钩力降低至988 kN，减小了383 kN。

表2 再生制动力优化前从控机车后车钩受力情况

Table 2 Stress condition of rear coupler of slave control locomotive before dynamic braking force optimization

车次	制动初速/ (km·h ⁻¹)	缓解地 点/km	缓解速度/ (km·h ⁻¹)	从控机车车 钩受力/kN	缓解再生 制动力/kN
28450	69	10.911	61	-949	400
28106	70	11.008	57	-1 371	350

表3 再生制动力优化后从控机车后车钩受力情况

Table 3 Stress condition of rear coupler of slave control locomotive after dynamic braking force optimization

车次	制动初速/ (km·h ⁻¹)	缓解 地点/km	缓解速度/ (km·h ⁻¹)	从控机车车 钩受力/kN	缓解再生 制动力/kN
28940	70	10.875	62	-986	200
28424	70	11.152	57	-988	300

由试验可知，通过降低缓解过程中的再生制动力可显著降低从控机车纵向力水平和纵向冲动，特别是在缓解速度较低的情况下效果更加明显。

3.2 长大下坡道机车缓解地点

对“滴流磴—猴烈”区间3趟2万t列车的数据进行统计，缓解地点选择在174.000~177.300 km处，得到从控机车后车钩的受力情况如表4所示。由表4可知，在该试验条件下从控机车后车钩的整体受力情况均较大，特别是在缓解地点175.010 km处车钩受力达到1 283 kN。因此，将列车缓解地点东移到176.800~177.500 km处进行测试，结果如表5所示。由表5可知，从控机车车钩所受最大力降低至825 kN，与修改优化前相比降低了35.7%。由试验可知，在该区间内适当将缓解地点东移能够显著降低中部从控机车的纵向冲动。

表4 缓解地点优化前从控机车后车钩受力情况

Table 4 Stress condition of rear coupler of slave control locomotive before optimization of release location

车次	缓解地点/km	缓解速度/ (km·h ⁻¹)	从控机车车钩 受力/kN	缓解再生制 动力/kN
28106	175.315	39	-1 218	350
28708	175.010	50	-1 283	350
28166	176.522	55	-752	400

表5 缓解地点优化后从控机车后车钩受力情况

Table 5 Stress condition of rear coupler of slave control locomotive after optimization of release location

车次	缓解地点/ km	缓解速度/ (km·h ⁻¹)	从控机车车钩 受力/kN	缓解再生制 动力/kN
28312	176.892	55	-825	200
28940	176.889	48	-563	200
28230	176.853	56	-704	200

3.3 线路平纵断面条件

对朔黄铁路2万t重载列车开行以来出现大冲动的地点进行统计，具体如表6所示。由表6可知，北大牛站内、龙宫站内和长梁山隧道发生的问题较多。为此，统计了上述区段的线路平纵断面条件如表7所示。由表7可知，表6中所示的10处冲动缓解地点，其中就线路纵断面条件而言有8处为大坡道转小坡道，就线路平断面情况而言有5处地点缓解前需通过小半径曲线。上述分析表明，冲动大的发生地点多出现在大坡道转小坡道处，而车体错位问题多发生在列车通过小半径曲线后，并且列车承受较大受力的点。因此，列车在缓解过程中经过大坡道转小坡道处和在缓解前经过小半径曲线是导致大纵向冲动和车体错位的主要原因。

表6 列车发生纵向冲动过大和车体错位的地点汇总

Table 6 Summary of places where the train has large longitudinal impulse and car bodies misplace

地点	非正常情况	地点	非正常情况
174 km处	冲动大	龙宫站内	车体错位
74 km处	冲动大	龙宫站内	车体错位
北大牛站内	冲动大	龙宫站内	车体错位
龙宫站内	冲动大	滴流磴站内	车体错位
北大牛站内	冲动大	宁武西站内	车体错位
原平南站内	冲动大	长梁山内	车体错位
74 km处	冲动大	长梁山内	车体错位
龙宫站内	冲动大	北大牛站内	车体错位
原平南站内	冲动大	肃北站内	车体错位
北大牛站内	冲动大	北大牛站内	车体错位
北大牛站内	冲动大	滴流磴站内	车体错位
北大牛站内	冲动大	龙宫站内	车体错位
长梁山内	冲动大	北大牛站内	车体错位
10 km处	冲动大	滴流磴站内	车体错位
长梁山内	冲动大	龙宫站内	车体错位
174 km处	冲动大	北大牛站内	车体错位

表7 列车发生纵向冲动过大的线路平纵断面条件汇总

Table 7 Summary of plane and vertical section conditions of lines with large longitudinal impulse

地点	坡度	曲线半径/m
10 km处	8‰→2‰	600
宁武西	7‰→4‰→2‰	500
长梁山	10‰	0
龙宫	9.4‰→1.5‰	500
北大牛	10.5‰→1.5‰	500
74 km处	8‰→4‰→0‰→5‰	2 000
原平南	8‰→7‰→4‰→6‰→1‰	2 000
滴流磴	10‰→1‰	450
174 km处	12‰→10‰→4‰	4 000
肃宁北	0‰	1 500

4 结语

本文通过在朔黄铁路开展2万t重载组合列车运行试验, 获取了不同操纵工况通过不同线路条件时的从控机车后部机车车钩力, 基于实测数据分析了导致该列车纵向冲动大的具体原因, 并在此基础上提出优化方案, 现场实际应用情况表明, 采取上述优化操纵措施后, 2020年上半年朔黄铁路2万t重载列车冲动大的

情况比以往大幅减少, 优化效果明显。主要结论如下:

①列车在长大下坡道缓解时机车再生制动力较大、长大下坡道缓解地点选择不当或列车在大坡道与小坡道过渡区间运行时, 车辆间往往会出现较大的纵向冲动, 这也是造成朔黄铁路2万t重载组合列车实际运行过程中纵向冲动较大的主要原因。

②可通过优化列车再生制动力和调整缓解地点等措施缓解纵向冲动, 提高朔黄铁路2万t列车的运行安全性。

但由于朔黄线路条件的复杂性, 需要进一步对不同线路进行优化试验, 提出有针对性的再生制动力调整方案和缓解地点优化方案。后续还可尝试组织线路试验或通过数值仿真等手段, 进一步研究过分相时采取小电制或者惰行过分相、优化列车同步控制程序等措施对缓解纵向冲动的的作用, 全面提高朔黄铁路2万t列车的运行安全性。

参考文献:

- [1] COLE C, SUN Y Q. Simulated comparisons of wagon coupler systems in heavy haul trains[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2006, 220(3): 247-256.
- [2] PUGI L, MALVEZZI 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.
- [3] 魏伟. 列车空气制动系统仿真的有效性[J]. 中国铁道科学, 2006(5): 104-109.
WEI Wei. The validity of the simulation for train air brake system[J]. China Railway Science, 2006(5): 104-109.
- [4] 常崇义, 王成国, 马大炜, 等. 2万t组合列车纵向力计算研究[J]. 铁道学报, 2006(2): 89-94.
CHANG Chongyi, WANG Chengguo, MA Dawei, et al. Study on numerical analysis of longitudinal forces of the T20,000 heavy haul[J]. Journal of the China Railway Society, 2006(2): 89-94.
- [5] 魏伟. 两万吨组合列车制动特性[J]. 交通运输工程学报, 2007(6): 12-16.
WEI Wei. Brake performances of 20 000 ton connected train [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007 (6): 12-16.
- [6] 魏伟, 赵连刚. 两万吨列车纵向动力学性能预测[J]. 大连交通大学学报, 2009, 30(2): 39-43.
WEI Wei, ZHAO Liangang. Prediction of longitudinal dynamic coupler force of 20 000 ton connected train[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2009, 30(2): 39-43.
- [7] 赵鑫, 王成国, 马大炜. 机车无线同步控制技术对2万t重载组合列车纵向力的影响[J]. 中国铁道科学, 2008(3): 78-83.

- ZHAO Xin, WANG Chengguo, MA Dawei. Influence of locomotive wireless sync control technology on the longitudinal force of 20 000 t heavy haul combined train[J]. China Railway Science, 2008(3): 78-83.
- [8] 耿志修, 李学峰, 张波. 大秦线重载列车运行仿真计算研究[J]. 中国铁道科学, 2008(2): 88-93.
- GENG Zhixiu, LI Xuefeng, ZHANG Bo. Simulation study of heavy haul train operation on Datong-Qinhuangdao railway[J]. China Railway Science, 2008(2): 88-93.
- [9] 杨亮亮, 罗世辉, 傅茂海, 等. 2万吨重载组合列车纵向冲动影响研究[J]. 机车电传动, 2014(3): 34-39.
- YANG Liangliang, LUO Shihui, FU Maohai, et al. Study on effect of longitudinal impulse for 20 000 t heavy haul combined train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2014(3): 34-39.
- [10] 蒋益平, 池茂儒, 朱海燕. 两万吨重载组合列车牵引和制动时的车钩力分析[J]. 机车电传动, 2013(1): 23-26.
- JIANG Yiping, CHI Maoru, ZHU Haiyan. Coupler force analysis of 20 000-ton combined heavy haul train under traction and brake condition[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(1): 23-26.
- [11] 吴键, 凌亮, 郝崇杰, 等. 空缓条件下两万吨重载列车中部机车车辆纵垂向冲动仿真分析[J]. 机械, 2020, 47(10): 53-59.
- WU Jian, LING Liang, HAO Chongjie, et al. Simulation analysis of longitudinal and vertical impulse of central locomotive and its connected vehicles of 20 000 t heavy-haul train under air brake release conditions[J]. Machinery, 2020, 47(10): 53-59.
- [12] 凌亮, 吴键, 周坤, 等. 长大重载列车中部机车跳钩机理与防控对策[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(6): 310-320.
- LING Liang, WU Jian, ZHOU Kun, et al. Mechanism and countermeasures of coupler separation of middle locomotive for long heavy-haul trains[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(6): 310-320.
- [13] 魏伟, 张益铭. 2万吨重载组合列车操纵优化研究[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(4): 35-40.
- WEI Wei, ZHANG Yiming. Operating optimization study of 20,000-ton heavy haul combined train[J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(4): 35-40.
- [14] 王启铭. 大秦线2万t重载组合列车试验研究[J]. 铁道机车车辆, 2008, 28(6): 8-10.
- WANG Qiming. Testing research of 20 000 t heavy haul train on Da-Qin railway line[J]. Railway Locomotive & Car, 2008, 28(6): 8-10.
- [15] 徐倩, 王悦明, 倪纯双. 重载列车纵向冲动分布试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 77-83.
- XU Qian, WANG Yueming, NI Chunshuang. Test study on the longitudinal impulse distribution of heavy haul train[J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 77-83.
- [16] GE X, LING L, CHEN Z G, et al. Experimental assessment of the dynamic performance of slave control locomotive couplers in 20,000-tonne heavy-haul trains[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2021, 235(10): 1225-1236.