

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.019

# 万吨重载列车提速试验及动力学性能分析

呼泉

(国能新朔铁路有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要:**为探明提速后万吨重载列车的动力学性能,构建万吨重载列车纵向动力学模型,分析重载列车提速前后在不同线路上紧急制动的纵向冲动力和制动距离;建立货车动力学仿真模型,研究典型工况下提速列车通过小半径曲线区段时的动态性能。试验结果表明:列车运行速度提升 10 km/h 后,机车车辆及线路试验中的各指标均满足限值要求。仿真结果表明:万吨重载列车提速至 90 km/h 后通过平均坡度较大的连续下坡道时紧急制动距离超过 800 m 的限值,建议根据列车紧急制动距离对其提速等级进行限制;采取 100% 电制动力时,万吨重载列车空车、重车编组以 90 km/h 的速度通过某重载线路 R600 m 曲线区段时,轮轨垂向力、轮轨横向力、脱轨系数和轮重减载率均小于限值。

**关键词:**重载铁路;万吨重载列车;提速;动力学性能

**中图分类号:**U270.1<sup>+</sup>1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)01-0085-06

## Speed-raising Test and Dynamic Performance Analysis of Ten Thousand Tons Heavy-haul Trains

HU Xiao

(CNNE Xinshuo Railway Co., Ltd., Ordos 017000, China)

**Abstract:**To ascertain the dynamic performance of train after speed-raising, a longitudinal dynamic model of ten thousand tons heavy-haul train was established and the longitudinal in-train forces and braking distances under emergency braking conditions before and after the speed-raising on different tracks were analyzed. A wagon dynamic model was established to study the dynamic performance of the train passing through a small radius curve under typical operating conditions. The test results show that when the train speed increases by 10 km/h, all indicators meet the limit requirements during the locomotive and vehicle tests as well as on the track. The simulation results indicate that the emergency braking distance of the Ten Thousand Tons heavy-haul train on a continuous downhill section with a high average gradient exceeds the limit of 800 m when the speed increases to 90 km/h, which suggests that the speed increase level should be restricted based on the emergencybraking distance. When implementing 100% electric braking, the wheel-rail vertical and lateral forces, derailment coefficient, and wheel load reduction rate of the ten thousand tons heavy-haul train during both empty and loaded train operations passing through a R 600 m curve of a certain heavy-haul line at a speed of 90 km/h are below limits.

**Keywords:**heavy-haul railway; ten thousand tons heavy-haul train; speed-raising; dynamic performance

### 0 引言

重载铁路运输是我国运输大宗货物的主要途径之一,为满足随着经济发展而不断增长的煤炭需求,铁路运能亟待提升。目前,国内重载列车的最高运行速度普遍在 80 km/h 以下,与机车车辆及线路的设计速度相比存在一定提升空间。重载线路条件复杂,运行速度的提高将影响列车动态性能及人员防护距离等诸多问题,因此开展提速列车动力学性能研究十分必要。

针对提速列车,研究人员从理论分析、数值仿真、现场试验等多个角度开展了相关研究。高健

等<sup>[1]</sup>以我国现有客货共线线路为例,仿真研究了小半径曲线群地段实施列车提速的可行性,提出了合理的建议方案。张文月<sup>[2]</sup>采用基床-路基-地基三维有限元模型分析了列车运行速度、单双线运行条件对路基竖向位移的影响规律,提出使用斜向高压旋喷桩加固路基后,提速至 140 km/h 的列车可以安全运行。

GAO 等<sup>[3]</sup>通过数值仿真,分析了重载列车紧急制动工况中初始制动速度对纵向车钩力的影响,指出在低速条件下采取紧急制动将产生较大的压钩力,易造成车钩缓冲装置的损坏。WU 等<sup>[4]</sup>在重载列车紧急制动条件下分析了连挂货车

**作者简介:**呼泉(1971—),男,内蒙古鄂尔多斯人,高级工程师,硕士,研究方向为铁路运输组织,xst\_erdos@163.com。

单元包含的车数对列车动力学性能的影响。罗世豪<sup>[5]</sup>分析了列车在不同平纵断面条件下紧急制动动力学性能的差异。在3万吨重载列车开行以后,常崇义等<sup>[6]</sup>基于纵向动力学理论,采用长编组列车模型研究了编组长度、机车同步控制延时、线路纵断面等因素对重载列车紧急制动纵向力的影响。肖襄雨<sup>[7]</sup>基于 SIMPACK 软件分析了车辆在重载下通过小半径曲线时的动力学问题。

综上所述,目前针对提速列车紧急制动时的纵向动力学性能分析鲜有报导。因此,本文在万吨编组重载列车场景下,以我国某实际重载线路为例,首先开展列车运行速度由 80 km/h 提升至 90 km/h 的动力学试验。随后,通过数值仿真对提速后的列车在试验未涉及的关键工况下的动力学性能进行评估。考虑具体线路条件和机车车辆配置情况,构建了万吨重载列车纵向动力学模型并编制相应的动力学仿真计算程序,分析了重载列车提速前后在不同线路上紧急制动的纵向冲击力和制动距离。同时,建立货车-轨道三维动力学仿真模型,在典型工况下研究提速列车通过小半径曲线区段时的动态性能,以期为既有铁路列车提速提供理论参考。

## 1 提速试验数据分析

以国内某既有重载铁路为例,针对万吨重载

列车及轨道结构开展动力学试验。本次试验共开行 10 列试验列车,机车涵盖 SS<sub>4B</sub> 机车、神华号十二轴机车及 HXD<sub>3C</sub> 机车等多种车型,货车为 C<sub>80</sub> 系列货车。试验过程中,空、重车进行阶梯提速,监测机车、车辆关键部件的振动和位移等指标。图 1 展示了测量货车车体、承载鞍、货车侧架、机车车体、机车构架、机车轴箱振动加速度的传感器具体安装位置。

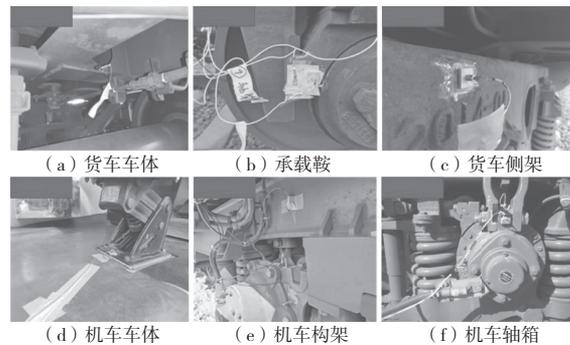


图 1 机车车辆关键部件测点布置

表 1 和表 2 分别列出了试验货车、机车各部件振动加速度的最大值,可知试验列车空车编组和重车编组提速运行时,机车和货车车体三向加速度均小于限值,货车承载鞍和机车轮对横垂加速度也均小于限值。货车侧架和机车构架最大横向加速度超过 0.8g,但其振动迅速衰减,未出现连续 6 次以上的超限情况。

表 1 试验时货车部件振动加速度最大值

编组	车体加速度×g			侧架横向 加速度×g	承载鞍加速度×g	
	纵向	横向	垂向		横向	垂向
空车编组	0.30	0.24	0.29	8.60	36.10	48.07
重车编组	0.25	0.19	0.27	2.45	24.67	57.78

表 2 试验时机车部件振动加速度最大值

编组	构架横向 加速度×g	轴箱加速度×g	
		横向	垂向
空车编组	2.66	16.73	27.45
重车编组	0.92	20.78	42.51

## 2 仿真计算模型

### 2.1 列车纵向动力学模型

本文以 HXD<sub>3C</sub> 机车双机重联牵引 105 辆 C<sub>80</sub> 货车重车为例,考虑三连挂货车单元,建立了万吨重载列车纵向动力学模型,如图 2 所示。模型中

的机车车辆仅考虑纵向自由度,RFC 型牵引杆、机车车辆的钩缓装置采用具有迟滞特性的非线性弹簧-阻尼单元模拟,考虑连挂车钩之间的间隙,牵引杆则不考虑间隙。此外,机车车辆运行时的牵引制动力、单位基本阻力、坡道阻力、曲线阻力等均可通过《列车牵引计算规程》<sup>[8]</sup>中规定的方法计算得出。

### 2.2 货车-轨道动力学模型

以 HXD<sub>3C</sub> 机车双机重联牵引 C<sub>80</sub> 货车为例,采用 SIMPACK 软件建立了多节编组的货车动力学仿真分析模型,如图 3(a) 所示。该模型主要由多节重载货车子模型及相应的钩缓装置子模型组

成。线路激励采用某重载线路实测轨道不平顺,在最前部货车车钩销处施加纵向力以模拟列车中的纵向车钩力。

图 3(b)展示了钩缓装置的动力学模型图,模

型中充分考虑了车钩和牵引杆的结构特性,其主要组成部件为钩尾框、从板、钩体及缓冲器等。模型中详细考虑了钩尾与从板之间的摩擦及车钩的最大摆角等。

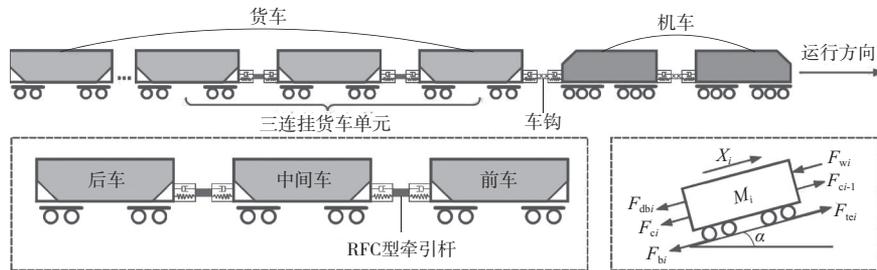


图 2 单编万吨重载列车纵向动力学模型

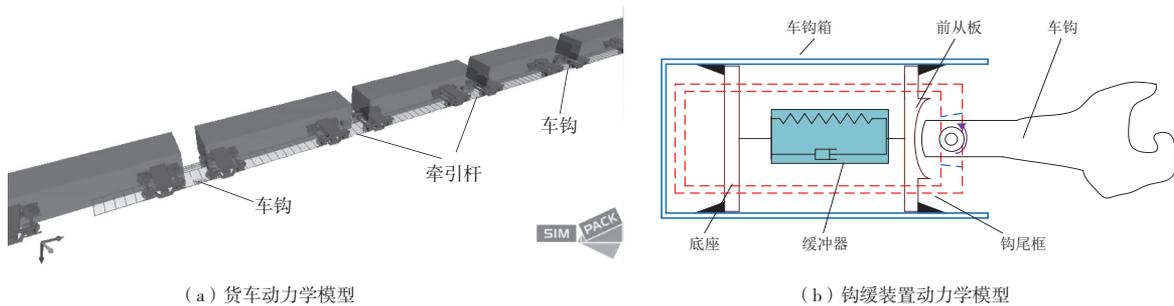


图 3 货车动力学模型

### 2.3 模型验证

本节采用现有文献和现场试验数据对建立的模型进行验证。首先,选取现有文献中的紧急制动工况作为纵向动力学模型的验证工况:SS<sub>4B</sub>型机车双机重联牵引 108 节 kM<sub>70</sub> 货车于平直道实施紧急制动,制动初速为 69 km/h<sup>[9]</sup>。

图 4 对比了实测和仿真的列车紧急制动动态响应。由图 4 可知,重载列车以 69 km/h 的速度于平直线路紧急制动时,实测制动距离为 629 m,在相同条件下仿真得到的列车紧急制动距离为 622 m,与实测数据相比,相对误差为 1.1%,验证了模型的可靠性。

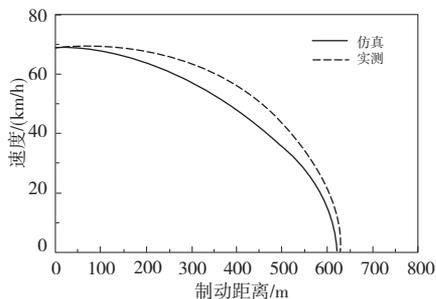


图 4 列车在平直道的紧急制动距离

对于货车动力学模型,针对如图 5 所示的试验线路中的典型直线和曲线区段(曲线 1—曲线 4 的半径分别为 600 m、800 m、1 000 m 和 1 200 m),采用实测轨道不平顺作为线路激励,依据现场试验中 HXD<sub>3C</sub> 机车双机重联及“神华号”十二轴机车牵引 C<sub>80</sub> 空车、重车编组的机车 LKJ 数据,设置相同工况进行模型验证。

针对现场试验测试结果和仿真计算结果,选取车体横向和垂向加速度进行对比验证。图 5(a)—图 5(d)展示了万吨列车空车、重车编组通过各典型区段时,货车车体横向、垂向加速度的最大值。由图 5 可知:当空车编组通过曲线区段时,车体横向与垂向加速度的试验与仿真结果的最大误差均为 0.02g;当重车编组通过曲线时,车体横向、垂向加速度的最大误差分别为 0.04g、0.03g;当列车通过直线时,对于空车编组,车体横向和垂向加速度的最大误差均为 0.02g;对于重车编组、车体横向、垂向加速度的最大误差均为 0.01g。综上所述,试验结果与仿真结果在数值上误差较小,验证了模型的可靠性。

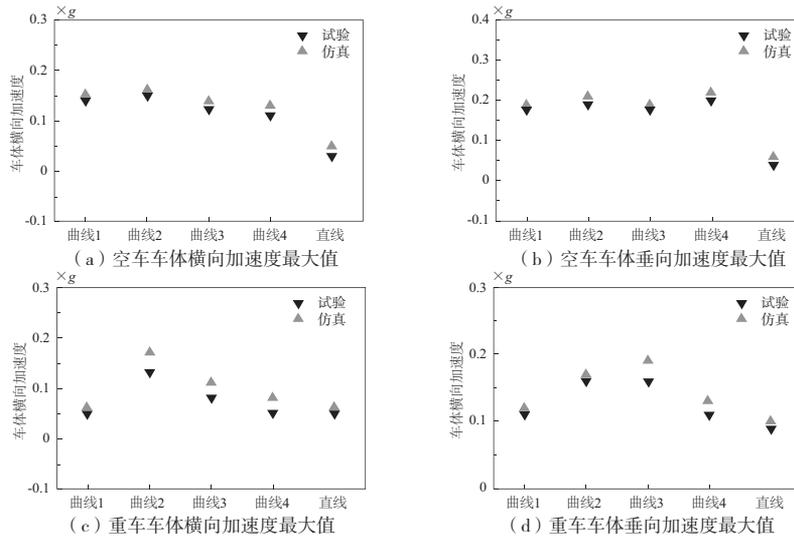


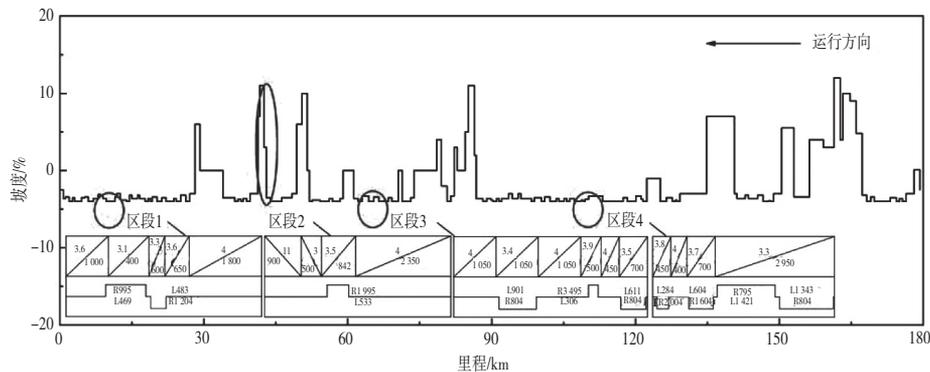
图5 动力学模型验证结果

### 3 列车紧急制动纵向动力学性能分析

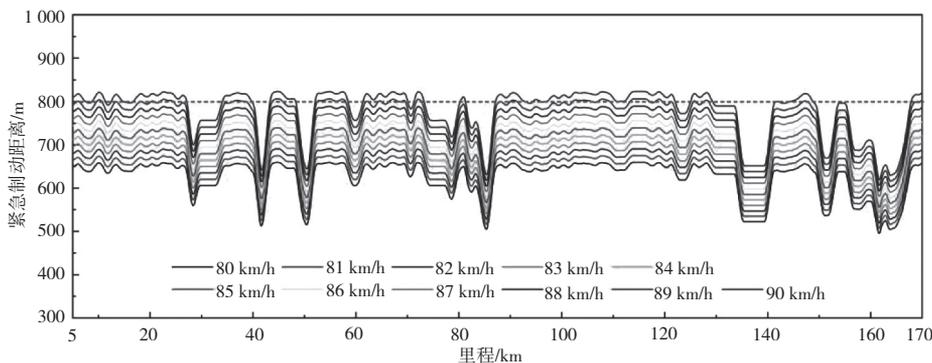
本节对以 1 km/h 为间隔阶梯提速的万吨重载列车在全线实施紧急制动的纵向冲动特征展开分析。列车制动初始位置以正线每隔 100 m, 选取某铁路典型连续下坡道、变坡道区段, 仿真研究重载列车的紧急制动纵向动力学性能。

重车上行线路纵断面如图 6(a) 所示, 该上行线路中下坡道的最大坡度为 4‰, 在局部区段有

少量的 10‰ 左右的上坡道。图 6(b) 展示了万吨编组重载列车在重车上行正线上阶梯提速运行时的紧急制动距离, 可知列车以不同速度实施紧急制动后, 其制动距离的变化规律大致相同(本刊黑白印刷, 相关疑问咨询作者)。列车通过下坡道路段时, 紧急制动距离增加, 初速度越高, 列车紧急制动距离越长。重载列车在平均坡度较大的连续下坡道区段以 90 km/h 的速度运行时, 紧急制动距离超过 800 m 的限值, 需进行限速。



(a) 重车上行线路坡度图与典型区段平纵断面图



(b) 重车上行正线紧急制动计算结果

图6 重车上行线路坡度图、典型区段平纵断面图及正线紧急制动计算结果

图7(a)—图7(c)分别展示了阶梯提速的万吨编组重载列车在上述区段紧急制动的制动距离、最大纵向车钩力和加速度。由图7可以看出:当列车的制动初速大于89 km/h时,列车在连续下坡道区段1的紧急制动距离超过限值;当列车以80~90 km/h的速度等级在凹形坡道区段2实施紧急制动时,制动距离均小于800 m;对于连续下坡道区段3和区段4,当万吨编组重载列车的制动初速超过88 km/h时,其紧急制动距离大于800 m。列车的最大纵向车钩力和最大纵向加速度在4个区段上均未超限,且随列车制动初速增

加的变化幅度较小。列车在凹形坡道区段2上紧急制动时,最大纵向车钩力约为1184 kN,其余3个连续下坡道区段中的最大纵向车钩力约为827 kN;列车分别在4个区段紧急制动时,最大纵向加速度依次约为0.20g、0.34g、0.24g和0.31g。

综上可知,万吨编组重载列车提速后在长大下坡道和凹形坡道运行时,为保障列车行车安全,在典型连续下坡道区段1应限速89 km/h;列车在连续下坡道区段3或区段4运行时最高运行速度应不超过88 km/h;当列车在区段2这种坡度差较大的凹形坡道上运行时,应尽量避免紧急制动。

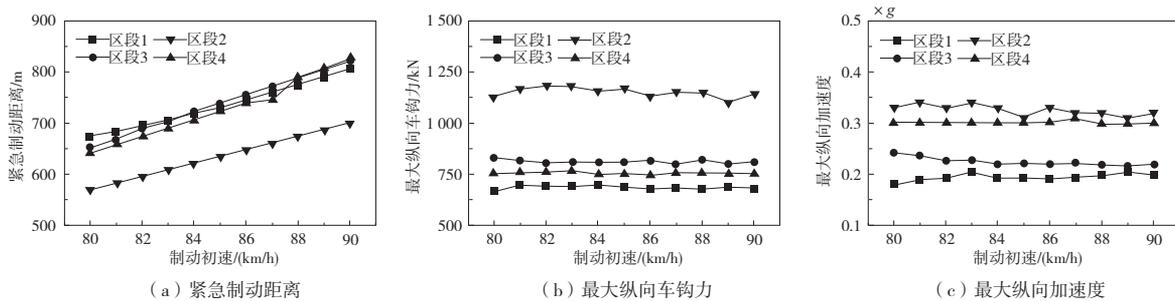


图7 典型区段上列车紧急制动动态响应的统计结果

#### 4 典型工况下的列车动态性能分析

本节采用列车与轨道相互作用动力学仿真模型,选取某重载线路最小半径 $R600\text{ m}$ 曲线,以HXD<sub>3C</sub>机车双机重联施加100%电制动力的工况为例,校核万吨重载列车空车、重车编组以提速后最高运行速度90 km/h通过典型曲线区段时的运行安全性。以一位轮对为例,图8和图9分别展示了空车、重车编组的计算结果。

由图8可知,空车一位轮对轮轨垂向力、轮轨横向力的最大值分别约为42.18 kN、20.20 kN,其脱轨系数最大值约为0.79,均未超出限值。一位轮对轮重减载率时域曲线局部超过0.65,但其最长超限时间小于35 ms,满足限值要求。图9表明:重车一位轮对轮轨垂向力、轮轨横向力的最大值分别约为182.28 kN、62.00 kN,其脱轨系数、轮重减载率最大值分别约为0.40、0.42,均小于限值。

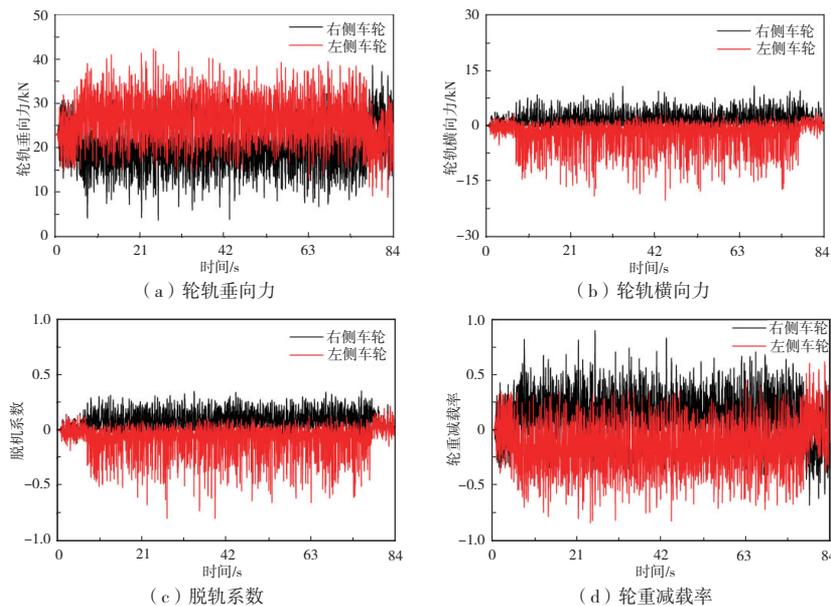


图8 空车编组的计算结果

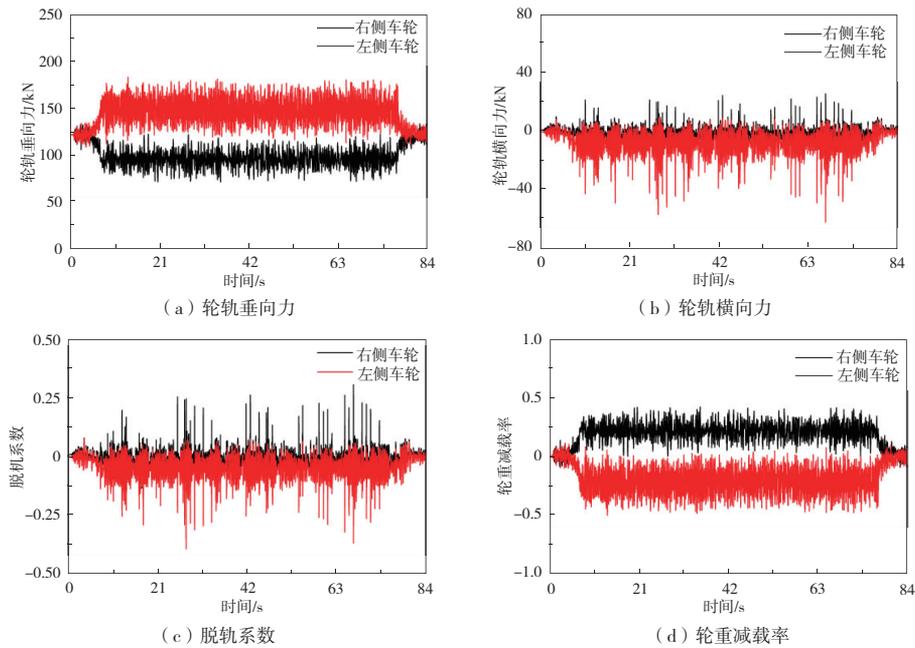


图9 重车编组的计算结果

## 5 结语

本文针对我国某重载线路万吨重载列车提速问题,结合现场试验和动力学模型的仿真分析,对列车最高运行速度由 80 km/h 提升至 90 km/h 后的动力学性能进行综合评估,主要结论如下:

1) 万吨重载列车运行速度提升了 10 km/h 后,现场动力学试验得到的各动力学指标均满足限值要求;

2) 提速至 90 km/h 之后,万吨重载列车在平均坡度较大的连续下坡道运行时,紧急制动距离超过 800 m 的限值,需限制列车提速等级;

3) 动力学计算结果表明电制动工况下,万吨重载列车空车、重车编组以提速后最高运行速度 90 km/h 通过某重载线路 R600 m 曲线区段时,轮轨垂向力、轮轨横向力、脱轨系数和轮重减载率均小于限值。

### 参考文献:

[1] 高健,韩峰.小半径曲线群地段列车提速适应性分析[J].科学技术与工程,2017,17(13):280-285.

- [2] 张文月.列车提速对路基竖向位移的影响及加固效果评价[J].沈阳大学学报(自然科学版),2022,34(2):140-145.
- [3] GAO G J, CHEN W, ZHANG J, et al. Analysis of longitudinal forces of coupler devices in emergency braking process for heavy haul trains [J]. Journal of Central South University, 2017, 24(10):2449-2457.
- [4] WU Q, COLE C, SPIRYAGIN M. Assessing wagon pack sizes in longitudinal train dynamics simulations [J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2020, 18(3):277-287.
- [5] 罗世豪.线路参数对紧急制动重载列车动力性能的影响[D].成都:西南交通大学,2018.
- [6] 常崇义,马颖明,郭刚,等.超长重载列车纵向力影响规律仿真研究[J].中国铁道科学,2021,42(1):87-94.
- [7] 肖襄雨.基于 SIMPACK 的车辆系统动力学性能分析[J].机械制造与自动化,2022,51(5):95-97,122.
- [8] TB/T 1407—1998 列车牵引计算规程[S].
- [9] 黄超.托电铁路万吨重载列车纵向动力学性能分析[D].成都:西南交通大学,2015.

收稿日期:2023-05-05