

文章编号: 1674—8247(2021)02—0056—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.010

400 km/h 高速铁路车辆曲线通过安全性能分析

高建敏¹ 梁 浩¹ 杨吉忠² 凌 亮¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:文章基于 CR400 型动车组车辆结构参数和成渝中线线路设计参数,建立了考虑车辆牵引与制动特性的高速铁路车辆-线路耦合动力学模型,对 400 km/h 高速铁路车辆限速通过曲线时的动力学性能进行了分析。研究结果表明:(1)CR400 型动车组在成渝中线正线区间上运行时,安全性指标均低于限值,适当的欠超高设计更有利于提升车辆曲线通过安全性;(2)车辆在成渝中线进出站区间运行时,运行速度对列车通过小半径曲线的安全性有显著影响,应对小半径曲线通过设置速度限制;(3)车辆惰行通过曲线可以明显降低部分安全性指标,改善动车组车辆曲线通过性能。研究结果可为成渝中线高速铁路线路规划设计提供理论参考。

关键词:400 km/h 高速铁路; 成渝中线; 高速车辆; 曲线通过安全性; 线路参数

中图分类号:U260.15⁺3

文献标志码:A

Safety Analysis of 400 km/h High-speed Railway Vehicles Passing Curves

GAO Jianmin¹ LIANG Hao¹ YANG Jizhong² LING Liang¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on the structure parameters of CR400 EMU vehicles and the route design parameters of the Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway, we established the vehicle-track coupling dynamics model considering the vehicle traction and braking characteristics of the high-speed railway and analyzed the dynamics performance of 400 km/h high-speed vehicles passing curves at a limited speed. The results indicate that: (1) When CR400 EMU run on the main line of the Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway, all safety indicators are lower than the limits, and the appropriate deficient superelevation design can better improve the curve negotiation performance. (2) When a vehicle is running in the arrival-departure section of the Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway, the operation speed has a significant impact on the safety of the train passing small radius curves, so a speed limit shall be imposed for trains passing such curves. (3) For vehicles coasting through the curve, some safety indicators can be significantly reduced and the curve passing performance can be improved. The research results can provide reference for the planning and design of the Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway.

Key words: 400 km/h high-speed railway; second Chengdu-Chongqing High-speed Railway; high-speed vehicle; curve passing safety; line parameters

随着我国经济的快速发展,人们对出行效率的要求也越来越高,高速铁路有必要研究发展 400 km/h

等级的高速铁路技术,推动铁路技术水平上升至新的高度^[1]。目前,国内外学者对更高速铁路系统进行了

收稿日期:2021-03-01

作者简介:高建敏(1981-),女,副研究员。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目(KSNQ202051)

引文格式:高建敏,梁浩,杨吉忠,等. 400 km/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.

GAO Jianmin, LIANG Hao, YANG Jizhong, et al. Safety Analysis of 400 km/h High-speed Railway Vehicles Passing Curves[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 56-61.

大量前瞻性的研究,Yongseok Kim^[2]等计算了为400 km/h等级铁路新研制的铜镁接触线的累积疲劳损伤,研究了铜镁接触线在许用应变条件下的疲劳安全系数。王雷^[3]等针对动车组提速的运营需求,从运行能力、安全性、舒适性、经济性等角度分析了动车组运营速度由350 km/h提升至400 km/h的可行性。马红伟^[4]对轮轨系统、高速磁浮系统和真空管道运输系统进行对比分析,比较了三种不同速度等级的高速轮轨铁路,根据对比结果推荐了成渝中线高速铁路速度目标值。朱颖^[5]对设计速度400 km/h的莫喀高速铁路线路主要参数、季节性冻土特征及工程影响、路基防冻胀结构及主要材料等进行了研究,为莫喀高速铁路设计和建设提供了理论依据。徐银光^[6]等基于既有400 km/h高速动车组技术现状,对更高速度等级车辆主要技术指标进行了研究。王淇^[7]等建立了8节速度400 km/h高速列车动力学模型,研究和比较了新轮和磨耗轮状态下的车辆动力学性能。罗绛豪^[8]等在速度350 km/h既有线的基础上,对速度400 km/h列车通过常规跨度桥梁时的动力响应进行了仿真计算。刘磊^[9]和梁晨^[10]等对速度400 km/h的高速铁路最小曲线半径取值进行了研究。龙许友^[11]等建立了车辆-线路动力相互作用模型,从动力学角度得到了高速铁路线形核心参数合理取值。时瑾^[12]等则对不同车速下平面曲线半径、超高对车辆动力学性能的影响,并对实际高铁区段线路进行动力学性能评估,分析了既有速度350km/h铁路运行400 km/h高速列车的适应性。

综合以上研究发现,目前学者们的研究主要是在既有线的基础上针对更高速铁路系统进行分析,而考虑实际线路设计参数对车辆动力学性能的研究较少,研究结果缺乏实际数据支撑。成渝中线作为400 km/h等级的线路,车辆运行时必然会经过一些曲线,而此时速度如果过高将会造成车辆动力学性能恶化,威胁行车安全,因此有必要对列车在高速行驶时的曲线通过安全性能进行深入细致的分析。本文基于CR400型动车组结构参数和成渝中线线路设计参数,建立了考虑车辆牵引与制动特性的高速车辆-线路耦合动力学模型,对车辆在成渝中线正线区间和进出站区间线路曲线通过性能进行计算,根据计算结果对线路设计参数和曲线通过限速提出了建议。

1 动力学分析模型

动力学模型是动力学仿真分析的基础,本文根据系统的结构、特性和所要分析的问题对模型进行一定的简化,忽略一些对车辆动力学性能影响较小的部件,

建立高速车辆-线路耦合动力学模型并进行验证分析。由于本文侧重分析研究曲线线路参数对高速车辆曲线通过安全性能的影响,故未考虑轨道结构的影响。

1.1 模型建立

基于多体动力学理论,应用SIMPACK多体动力学软件建立了CR400型动车组车辆动力学模型,模型主要由1个车体、2个转向架构架、4个轮对、8个转臂轴箱等刚体组成。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;建立轴箱时不考虑轴箱间隙,轴箱和转臂视为一个刚体,并将轴箱的运动方式定义为只绕车轴转动的自由度,即点头自由度。总计50个自由度,其中包含42个独立自由度。

轮对和构架通过一系悬挂相连,其中一系钢簧及轴箱转臂节点和牵引拉杆采用线性弹簧-阻尼力元模拟;构架和车体通过二系悬挂相连,其中二系空气弹簧采用线性弹簧-阻尼力元模拟,横向止挡采用非线性弹簧力元模拟;一系垂向减振器、二系横向减振器及抗蛇行减振器均采用非线性弹簧-阻尼力元模拟,抗侧滚扭杆采用线性扭转弹簧力元模拟。此外,车轮采用LMA车轮踏面,钢轨采用60D廓形,采用Kalker简化滚动接触理论计算轮轨蠕滑力和蠕滑力矩,利用FASTSIM算法计算轮轨作用力。

1.2 模型验证

设置与文献资料[12]相同的计算工况,进行模型验证分析。仿真计算时,超高设置为175 mm,车速为400 km/h,曲线半径分别设为6 000 m、6 500 m、7 000 m、7 500 m、8 000 m、8 500 m和9 000 m,轮轨间激励采用了中国高速铁路无砟轨道不平顺谱。以脱轨系数和轮轴横向力为例,将仿真结果最大值与文献结果进行对比,结果如图1所示。由图1可以看出,由于建模简化方式的不同,脱轨系数和轮轴横向力的计算结果与文献结果有微小的差异,但从整体来看,两者趋势吻合较好,由此说明本文所建立的模型是可行的,可用于进行车辆曲线通过仿真计算分析。

1.3 行车安全性能评价指标

根据车辆-轨道耦合动力学理论^[13],选择脱轨系数、轮重减载率、轮轨垂向力和轮轴横向力作为安全性评价指标。各评价指标限值如表1所示。

表1 评价指标安全限值表

指标	安全限值
脱轨系数	≤ 0.8
轮重减载率(动态)	≤ 0.8
轮轨垂向力/kN	≤ 170
轮轴横向力/kN	$\leq 10 + P_0/3(34.18)$

注: P_0 为72.54 kN

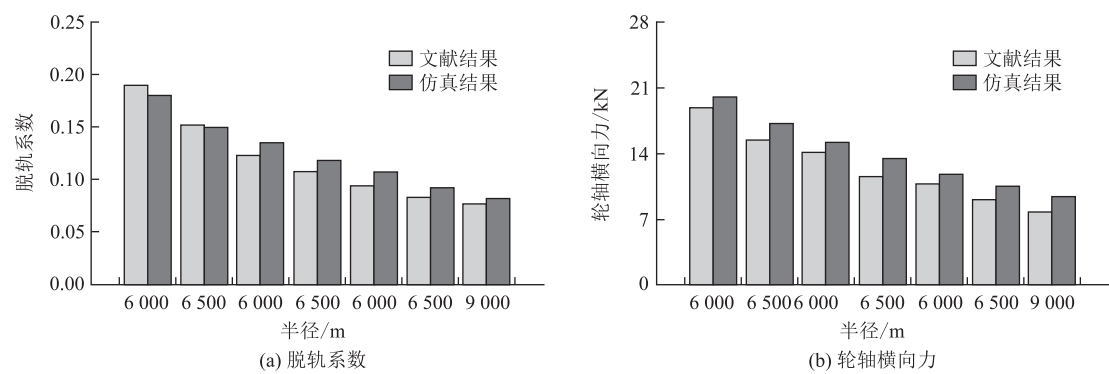


图1 模型验证对比结果图

2 高速车辆曲线通过性能分析

车辆在行驶过程中会因为运行阻力和曲线阻力等导致运行速度降低,为尽量模拟车辆在通过曲线和进

出站时的真实状态,分析时,根据车辆实际牵引及制动特性曲线将相应牵引及制动力以力矩的形式施加于每个轮对中心。CR400 型动车组牵引及制动特性曲线^[14]如图 2 所示。

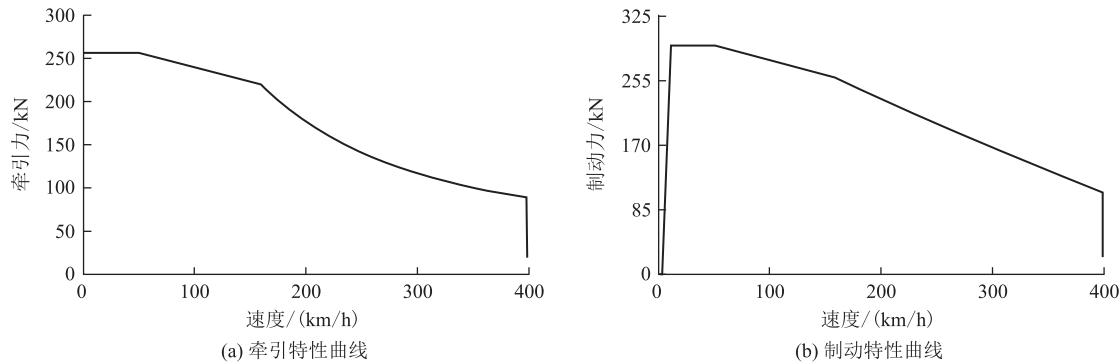


图2 CR400 型动车组牵引/制动特性曲线图

2.1 正线区间曲线安全性分析

对成渝中线正线区间平面曲线半径进行统计,统计结果如表 2 所示。根据统计结果,设置正线运行时曲线半径分别为 8 500 m、9 000 m、10 000 m、12 000 m 和 14 000 m,根据曲线半径 14 000 m 时线路设计超高和均衡超高,对超高为 70 ~ 130 mm 每隔 20 mm 取值,分析车辆正线运行时不同半径和不同超高组合工况对车辆曲线通过性的影响规律。计算时,运行速度均为 400 km/h,轨道不平顺采用中国高速铁路无砟轨道谱。

表2 成渝中线正线平面曲线统计表

曲线半径/m	8 500	9 000	10 000	12 000	14 000
数量	1	1	5	10	2

给高速车辆正线运行时不同曲线半径和超高组合对车辆安全性指标的影响规律如图 3 所示。由图 3 可以看出,曲线超高恒定时,随着曲线半径的增大,高速车辆的安全性指标峰值呈递减趋势,所有安全性指标均未超出限值,其中轮轨垂向力在半径 8 500 ~

10 000 m 时减小速率稍大于在半径 10 000 ~ 14 000 m 时,脱轨系数、轮重减载率和轮轴横向力的减小速率变化不明显,但在超高为 130 mm 时,轮轴横向力随着曲线半径的增大先减小后增大,在半径 12 000 m 附近时取得最低值。因此,在超高为 130 mm 时,推荐曲线半径设置为 12 000 m 相对较为安全。

曲线半径恒定时,大部分高速车辆安全性指标峰值随着曲线超高的增大而减小,所有安全性指标均未超出限值;但在曲线半径为 14 000 m 时,轮轴横向力随着曲线超高的增大出现先减小后增大的变化趋势,在超高 110 mm 附近时出现最低值;脱轨系数和轮轨垂向力在不同半径时超高对其峰值的影响不同,半径越大时,不同超高下脱轨系数变化幅度越大,而轮轨垂向力与之相反,轮重减载率与轮轴横向力随超高变化的幅度与曲线半径的大小无太大关系。

为分析图 3 中曲线半径 14 000 m 与超高 130 mm 组合工况下轮轴横向力出现跳跃的原因,对超高为 110 ~ 150 mm 每隔 5 mm 取值,曲线半径仍设置为

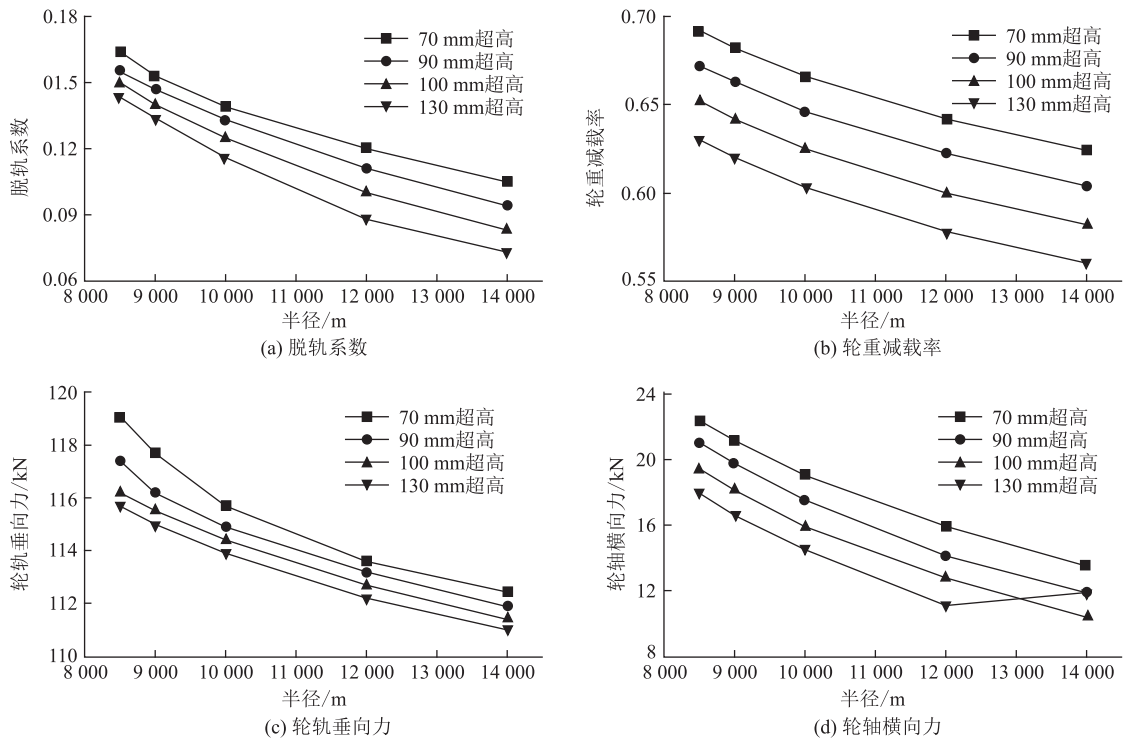


图3 正线区间运行时车辆安全性指标图

14 000 m,进行计算分析,得出不同超高对轮轴横向力的影响规律如图4 给所示。由图4 可以看出,曲线半径为 14 000 m时,随着曲线超高的增大,轮轴横向力呈先减小后增大的变化趋势,在超高 115 mm 时出现最低值,而此半径所匹配的均衡超高为 135 mm,由此可见,均衡超高并非为最适超高,适当的欠超高设计更有利于提升车辆曲线通过安全性。

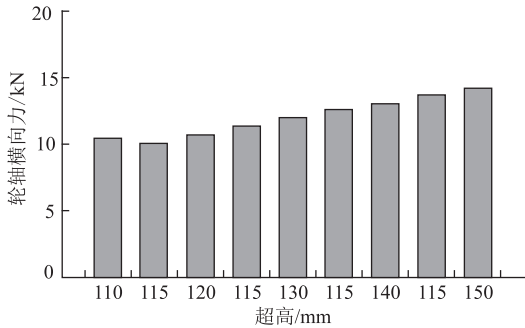


图4 轮轴横向力统计结果图

2.2 进出站区间曲线通过安全性分析

由于对列车高速横向稳定性有着高标准要求,高速动车组一般采用较大的定位悬挂参数设计,而这不利于动车组通过车站附近的小半径曲线。因此,在上节正线区间高速车辆曲线通过安全性能分析基础上,本节对高速车辆在进出站区间小半径曲线上运行的安全性能进行分析。分析时,小半径曲线的选取依据成

渝中线进出站区间小半径平面曲线的统计结果(见表3),曲线半径选为 600 m、800 m 和 1 300 m;车辆进入小半径曲线时初速度为 80 km/h 左右,因此设置车辆进入曲线初速度为 80 ~180 km/h,每隔 20 km/h 取值;分析车辆牵引状态运行时不同速度和不同半径对车辆曲线通过安全性的影响,超高设置为限速 80 km/h时所对应的曲线半径设计的超高,轨道不平顺依然采用中国高速铁路无砟轨道谱。

表3 成渝中线进出站平面曲线统计表

曲线半径/m	600	800	1 300
数量	2	1	2

车辆牵引状态运行时不同初速度和曲线半径组合对高速车辆安全性指标的影响规律如图5 所示。

由图5 可以看出,曲线半径恒定时,随着车辆进曲线时初速度的增大,安全性指标峰值大部分呈递增趋势,速度区间在 160 ~180km/h 时部分安全性指标峰值增幅明显大于区间 80 ~160 km/h 时;曲线半径为 600 m 时,轮重减载率在速度大于 140 km/h 时超过限值,轮轴横向力在速度大于 120 km/h 时超过限值;曲线半径为 800 m 时,轮轴横向力在速度大于140 km/h 时超出限值;脱轨系数和轮轨垂向力则在所有工况均未超出限值。因此,推荐曲线半径为 600 m 时,车辆进入曲线初速度不应大于 120 km/h,而曲线半径增大至800 m时,车辆进入曲线时的初速度不应

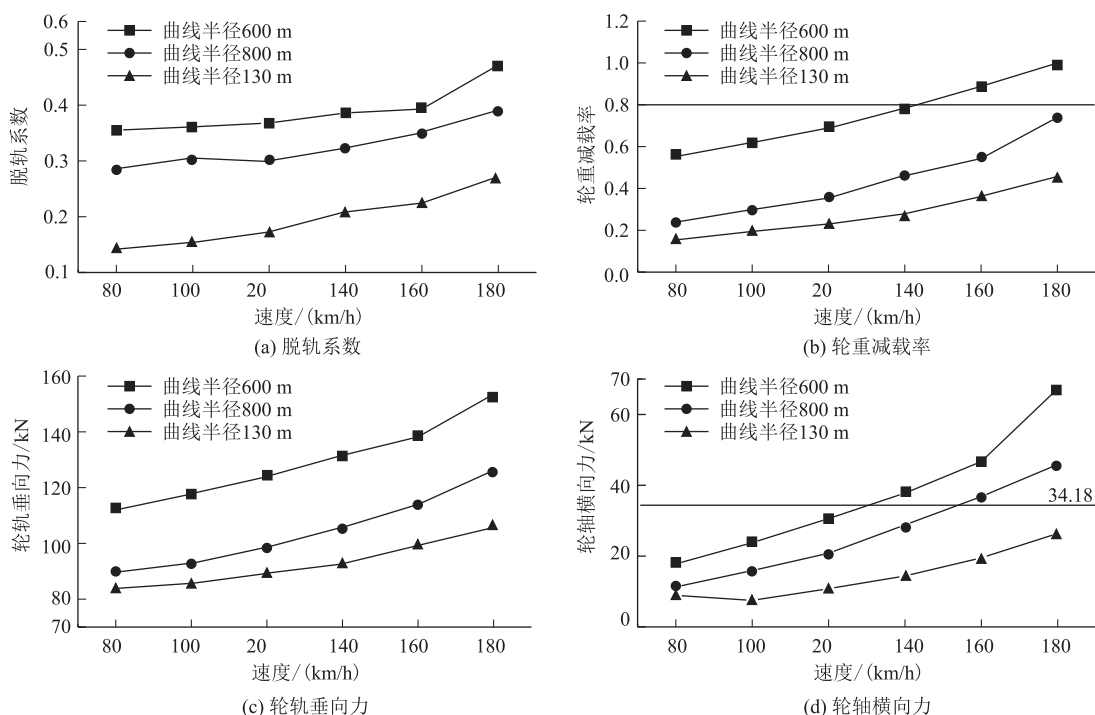


图5 进出站区间运行时车辆安全性指标图

大于 140 km/h。

当车辆进曲线初速度恒定时,安全性指标峰值大部分随着曲线半径的增大而减小,其中脱轨系数和轮轴横向力在半径 600 ~ 800 m 时整体变化幅度要小于半径在 800 ~ 1 300 m 时,而轮重减载率和轮轨垂向力在半径 600 ~ 800 m 时整体变化幅度比半径在 800 ~ 1 300 m 时更敏感。因此,推荐曲线半径在 800 ~ 1 300 m 范围内取值。

2.3 运行模式的影响分析

对于 400 km/h 高速列车来说,需要特别大的牵引力来使车辆运行速度尽快达到目标值,但过大的牵引力也会造成车辆在过曲线时动力学性能恶化。为分析车辆牵引通过曲线与惰行通过曲线时的运行安全性差异,以 600 m 半径为例,在相同线路设置情况下,计算车辆惰行通过曲线时的安全性指标。车辆惰行通过速度按照牵引通过时安全性指标最大值对应速度取值,分别为 85 km/h、105 km/h、122 km/h、142 km/h、162 km/h 和 182 km/h。

车辆牵引通过曲线与惰行通过曲线时各安全性指标的对比结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,除了轮轴横向力之外,其余安全性指标均随车辆运行模式的改变得到了相应的变化。车辆惰行通过曲线时的脱轨系数在速度区间为 80 ~ 140 km/h 时要比车辆牵引通过曲线时小,速度大于 140 km/h 时反而要比牵引状态时更大,最后在速度 180 km/h 时与牵引状态时趋于相

等;车辆惰行通过曲线时的轮重减载率和轮轨垂向力与牵引通过曲线时相比峰值明显降低,但随着车辆运行速度的增大,车辆运行模式的变化对其减幅的影响越来越小;车辆处于牵引状态时轮重减载率在速度约大于 142 km/h 时超出限值,惰行状态时轮重减载率在速度约 166 km/h 时超出限值,因此,惰行运行可明显提升车辆曲线通过限速;轮轴横向力几乎不随车辆运行模式的改变而变化。

3 结论

本文基于 CR400 型动车组车辆结构参数和成渝中线线路设计参数,建立了考虑车辆牵引与制动特性的高速车辆-线路耦合动力学模型,对 400 km/h 高速车辆限速通过曲线时的安全性能进行了分析,得出主要结论如下:

(1) CR400 型高速动车组车辆在成渝中线正线区间上运行时,安全性指标均低于限值,曲线半径越小,其对部分安全性指标影响越明显;不同曲线半径应设置不同超高,适当的欠超高设计更有利于提升车辆曲线通过性能。

(2) CR400 型动车组车辆在成渝中线进出站区间上运行时,运行速度对车辆通过小半径曲线的安全性有显著影响,应对进出站小半径曲线设置速度限制。

(3) 高速动车组车辆惰行通过曲线可以明显降低部分安全性指标,改善车辆曲线通过性能,且低速运行

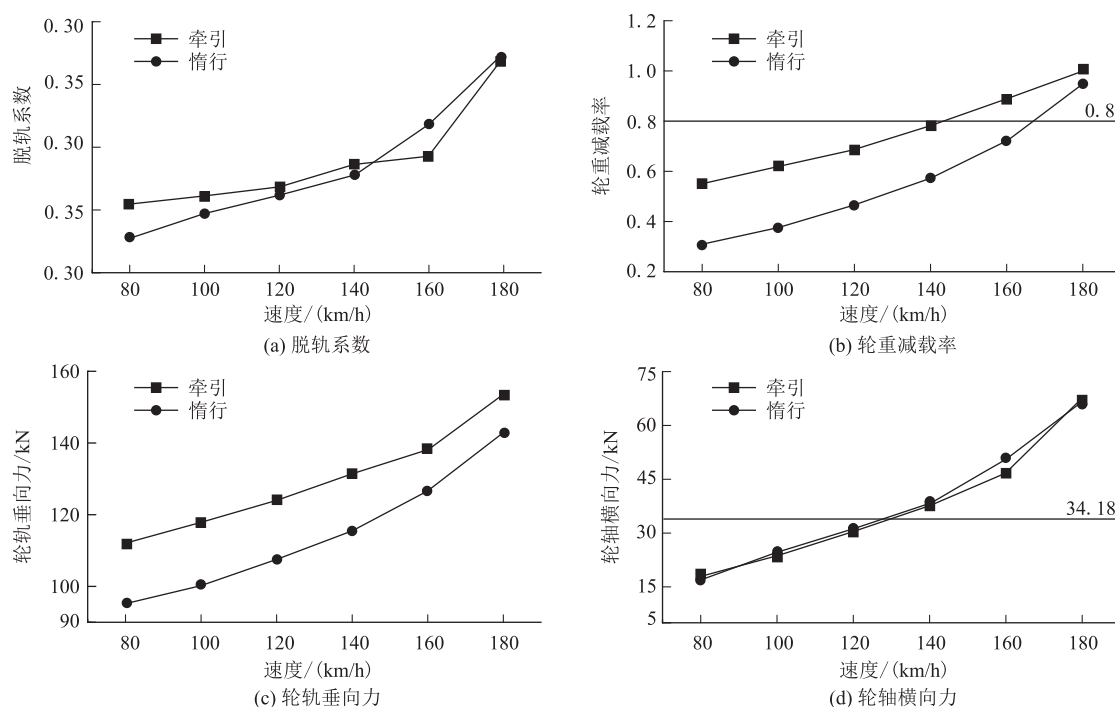


图6 牵引和惰行运行模式的对比分析图

时改善效果比高速时更好。

参考文献:

- [1] 田长海. 发展中的我国铁路列车速度、密度、重量[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(4): 127-135.
TIAN Changhai. China's Railway Train Speed, Density and Weight in Developing[J]. China Railway Science, 2020, 41(4): 127-135.
- [2] KIM Y, LEE K, CHO Y H, et al. Fatigue Safety Evaluation of Newly Developed Contact Wire for Eco-Friendly High Speed Electric Railway System Considering Wear [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2016, 3(4): 353-358.
- [3] 王雷, 于东明, 丁勇. 动车组运营速度由 350 km/h 提升至 400 km/h 可行性研究[J]. 机车电传动, 2020(2): 17-22.
WANG Lei, YU Dongming, DING Yong. Feasibility Study on Raising the Operation Speed of EMU from 350 km/h to 400 km/h [J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(2): 17-22.
- [4] 马红伟. 成渝中线高铁速度目标值研究[J/OL]. 铁道标准设计: 1-7[2021-01-16]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202004110001>.
MA Hongwei. Research of Speed Target Value of Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway [J/OL]. Railway Standard Design: 1-7[2021-01-16]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202004110001>.
- [5] 朱颖. 严寒地区 400 km/h 高速铁路线下基础关键技术[C]// 严寒地区高速铁路技术研讨会论文集. 哈尔滨, 2017: 40-45.
ZHU Ying. Key Technologies of Track Foundation on 400 km/h High Speed Railway in Cold Regions[C]// Proceedings of Technical Seminar on High-speed Railway in Cold Regions. Harbin, 2017: 40-45.
- [6] 徐银光, 李艳. 成渝中线 400 km/h 轮轨动车组技术指标研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 7-11.
XU Yinguang, LI Yan. Research on Technical Indexes of 400 km/h Wheel-Rail EMU for Chengdu-Chongqing Middle Line [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 7-11.
- [7] 王洪, 崔涛, 丁学彬, 等. 时速 400 km 高速动车组动力学性能分析[J]. 大连交通大学学报, 2021, 42(1): 20-24.
WANG Qi, CUI Tao, DING Xuebin, et al. Dynamics Performance Analysis of 400 km/h EMU [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2021, 42(1): 20-24.
- [8] 罗绛豪, 郭向荣, 许三平, 等. 既有时速 350 km 高速铁路运营时速 400 km 常规跨度桥梁列车走行性研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(S1): 45-50.
LUO Jianghao, GUO Xiangrong, XU Sanping, et al. Research on Performances of Train Running at 400 km/h on the Existing 350 km/h High-speed Railway with Conventional Span Bridges[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(S1): 45-50.
- [9] 刘磊. 时速 400 km 高速铁路曲线超高研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(4): 91-94.
LIU Lei. Study on Curve Superelevation of 400 km/h High Speed Railway[J]. Railway Engineering, 2017, 57(4): 91-94, 101.
- [10] 梁晨, 司道林, 徐玉坡. 时速 400/380 km 高速铁路最小曲线半径取值研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(1): 63-66.
LIANG Chen, SI Daolin, XU Yupu. Research of Minimum Curve Radius Value for High Speed Railway at 400/380 km/h [J]. Railway Engineering, 2016, 56(1): 63-66.
- [11] 龙许友, 时瑾, 王英杰, 等. 高速铁路线路线形动力仿真及乘坐舒适度评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(3): 26-33.
LONG Xuyou, SHI Jin, WANG Yingjie, et al. Dynamic Simulation and Ride Comfort Evaluation of Track Alignment for High Speed Railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(3): 26-33.

(下转第 67 页)

峰峰值要大。单列车通过隧道情形下,最大正压值的 K 值在 1.3 ~ 2.2 之间;隧道中央等速交会情形下,最大正压值的 K 值在 1.4 ~ 3.6 之间;单列车通过和隧道中央等速交会情形下,最大负压值和最大压力峰峰值的 K 值均小于 1.4。

(4) 单列车通过隧道情形下,车外压力幅值随列车速度的增大而增大,且与列车速度的 B 次方成正比。隧道长度为 500 m 时,车外最大正压值的拟合指数 B 最大,为 2.613;隧道长度为 300 m 时,车外最大负压值和最大压力峰峰值的拟合指数 B 最小,分别为 1.411 和 1.484;隧道长度大于 800 m 后,车外压力幅值随列车速度变化的拟合指数 B 逐渐减小并约等于 2。

(5) 隧道中央等速交会情形下,车外最大正压值、最大负压值和最大压力峰峰值随列车速度的增大而增大,近似与列车速度的 B 次方成正比,但拟合误差相对单列车通过隧道情形较大,且指数 B 波动范围较大(在 1.1 ~ 2.75 之间),无明显迹象收敛于何值。

参考文献:

- [1] YANG Yonggang, MA Dongbao, MEI Yuangui. Numerical Simulation of Aerodynamic Drag of Single High-speed Train Passing through a Tunnel[J]. DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, 2017(icia).
- [2] ANTHOINE J. Alleviation of Pressure Rise from a High-speed Train Entering a Tunnel[J]. AIAA Journal, 2009, 47(9): 2132-2142.
- [3] BAKER C J. A Review of Train Aerodynamics Part 2-Applications[J]. The Aeronautical Journal, 2014, 118(1202): 345-382.
- [4] 肖京平,黄志祥,陈立. 高速列车空气动力学研究技术综述[J]. 力学与实践, 2013, 35(2): 1-12.
- XIAO Jingping, HUANG Zhixiang, CHEN Li. Review of Aerodynamic Investigations for High Speed Train[J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(2): 1-12.
- [5] 梅元贵,周朝晖,许建林. 高速铁路隧道空气动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- MEI Yuangui, ZHOU Zhaohui, XU Jianlin. Aerodynamics of High-speed Railway Tunnel [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [6] HARA T. Aerodynamic Force Acting on a High Speed Train at the Tunnel Entrance[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1960, 26(171): 1581-1586.
- [7] BAKER C J, DALLEY S J, JOHNSON T, et al. The Slipstream and Wake of a High-speed Train[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2001, 215(2): 83-99.
- [8] UIC 660(E) Measures to Ensure the Technical Compatibility of High-speed Trains[S].
- [9] UIC 779-11:2005 Determination of Railway Tunnel Cross-sectional Areas on the Basis of Aerodynamic Considerations[S].
- [10] CEN-EN 14067-5 Railway Applications-Aerodynamics-Part 5: Requirements and Test Procedures for Aerodynamics in Tunnels[S].
- [11] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
- TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [12] TB/T 3503.3-2018 铁路应用空气动力学 第3部分:隧道空气动力学要求和试验方法[S].
- TB/T 3503.3-2018 Railway Applications. Aerodynamics. Part 3: Requirements and Test Procedures for Aerodynamics in Tunnels [S].
- [13] MEI Yuangui. A Generalized Numerical Simulation Method for Pressure Waves Generated by High-speed Trains Passing through Tunnels[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(8): 1427-1436.
- [14] 徐银光,李艳. 成渝中线 400 km/h 轮轨动车组技术指标研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 7-11.
- XU Yinguang, LI Yan. Research on Technical Indexes of 400 km/h Wheel-Rail EMU for Chengdu-Chongqing Middle Line [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 7-11.

(上接第 61 页)

- [12] 时瑾,孙征南,孙宪夫,等. 现行 350 km/h 高铁线路技术条件运营 400 km/h 高速列车适应性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(9): 2171-2180.
- SHI Jin, SUN Zhengnan, SUN Xianfu, et al. Research on the Adaptability of High-speed Train Running at 400 km/h under Current 350 km/h High-speed Railway Technical Conditions[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(9): 2171-2180.
- [13] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学(第4版)[M]. 北京: 科学出版

社, 2007.

Zhai Wanming. Vehicle-Track Coupling Dynamics (Fourth Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2015.

- [14] 赵红卫,梁建英,刘长青. 高速动车组技术发展特点及趋势[J]. 工程(英文), 2020, 6(3): 67-88.
- ZHAO Hongwei, LIANG Jianying, LIU Changqing. High-speed EMUs: Characteristics of Technological Development and Trends[J]. Engineering, 2020, 6(3): 67-88.