

基于UM的CRH2型车曲线通过性能分析

陈祺,火巧英,刘艳,刘晓良

(中车南京浦镇车辆有限公司,江苏南京210031)

摘要:轮轨间的动力学性能特别是车辆的曲线通过性能是影响行车安全的重要因素之一。基于多体动力学理论和轮轨简化接触理论,应用多体动力学软件UM建立CRH2型动车组拖车模型。在欠超高和过超高两种工况下,分析曲线半径、曲线通过速度、超高以及缓和曲线长度对各动力学指标的影响规律,进一步分析悬挂参数对曲线通过性能的影响。结果表明:分析曲线参数对曲线通过性能的影响趋势时,超高起主导作用;在轴箱弹簧垂向刚度取0.5~2.0 MN/m、横向和纵向刚度取0.9~1.5 MN/m、抗蛇行减振器阻尼取250~900(kN·s)/m时,车辆具有较好的动力学性能。

关键词:CRH2拖车;UM建模;动力学仿真分析;曲线参数;轮轨磨耗

中图分类号:U270.1; TP391.7 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)04-0157-04

Analysis of Curve Passing Performance of CRH2 Based on UM

CHEN Qi, HUO Qiaoying, LIU Yan, LIU Xiaoliang

(CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing 210031, China)

Abstract: The dynamic performance between wheels and rails, especially the curve passing performance of vehicle, is one of the important factors concerning driving safety. Based on multi-body dynamics theory and simplified wheel-rail contact theory, multi-body dynamics software UM was used to establish a CRH2 EMU trailer model. Under under-high and over-high working conditions, the influence laws of curve radius, curve passing speed, curve super-high and ease curve length on each dynamic index are studied, and further study on the influence of suspension parameters over the curve passing performance is conducted. The research results show that ultra-high curve plays a leading role in analyzing the influence of the curve parameters on the curve passing performance, and the vehicle has better dynamic performance with the vertical stiffness of the curve through the optimized axle box spring being 0.5–2.0 MN/m, the lateral and longitudinal stiffness 0.9–1.5 MN/m, and the anti-snagging damper 250–900(kN·s)/m.

Keywords: CRH2 trailer car; UM modeling; dynamic simulation; curve parameter; rail/wheel wear

0 引言

近年来,随着铁路技术的不断发展,列车逐步迈向高速化,轮轨间的动力学性能特别是车辆的曲线通过性能,是关乎行车安全的重要因素。

近些年国内外学者主要针对高速列车曲线通过能力的影响因素和计算曲线通过的动力学模型的改进做了大量研究。熊嘉阳等^[1]建立考虑轮轨力、直线电动机感应线圈和感应板之间电磁力两种耦合关系的地铁车辆-板式轨道耦合系统动力学模型,研究曲线参数对车辆曲线通过性能的影响。李国芳等^[2]将轮对柔性化处理后导入多体动力学软件UM中,建立了考虑轮对为柔性的某型高速车辆刚柔耦合动力学模型,研究了轮对柔性对高速车辆动态曲线通过的各项安全性能指标及平稳性的影响。胡敏等^[3]利用Simpack多体动力学软件建立某高速动车组拖车模型,研究直线轨道上的平稳性及曲线通过能力的影响。张科元^[4]采用多体系统动力学软件Simpack建立钢

轨打磨车辆的非线性模型,研究高速大半径和山区小半径两种线路工况下,曲线超高、半径和曲线通过速度对打磨车辆曲线通过性能的影响。ZBOINSKI K^[5]研究了曲线半径、超高速和车辆通过时动态曲线动态性能的影响。MIYAGAKI K等^[6]在频域和时域上系统分析了缓和曲线,从而经过不间断地分析发现了存在的另外一种缓和曲线。刘彬等^[7]对几种获取轨道车辆在最小半径曲线线路上几何通过能力的设计方法进行对比分析。韩志彬等^[8]运用Simpack软件建立了单轴转向架车辆动力学模型,研究了轨道参数对单轴转向架曲线通过性能的影响。岳三玲等^[9]采用Simulink建立车辆垂向-横向、垂向以及横向动力学模型,对比提出了3种模型的适用工况。

本文以CRH2为研究对象,根据其构造特征及技术参数,基于多体动力学软件UM建立车辆动力学模型,在不同的线路工况下对其曲线通过性能进行仿真分析,结合高速动车组曲线通过性能的相关评价标准,分析CRH2型车的曲线通过能力。

1 车辆动力学模型

1.1 动力学评价标准

评价高速客车曲线通过性能的指标主要有:脱轨系数、轮重减载率、倾覆系数、轮轨垂向力、轮轨横向力、轮轴横向力和车体振动加速度^[10],如表1所示。

表1 高速客车曲线通过能力评价指标

评价指标	评价标准数值	标准规范
脱轨系数	$Q/P \leq 0.8$	95J01—M
轮重减载率	$\Delta P/P \leq 0.6$	95J01—M/L
轮轨横向力/kN	$Q \leq 54.88$	GB5599—1985
轮轨垂向力/kN	$P \leq 170$	95J01—L
轮轴横向力/kN	$Q \leq 47.37$	95J01—M

1.2 CRH2 力元简化及建模

CRH2 转向架采用 SKTB-200,其中轮对为子系统,轴箱有1个旋转自由度,构架为6个自由度的体。轮对轴箱与构架通过铰相连,悬挂装置按简化力元建模^[11]。在三维软件 SolidWorks 中建立 CRH2 拖车的车体模型,通过外部接口导入到 UM 中,车体模型及转向架分别如图1、图2所示。

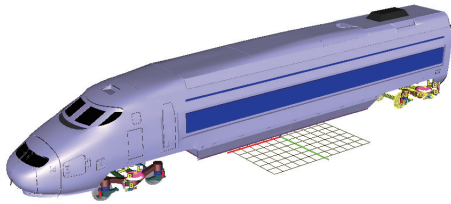


图1 CRH2 拖车模型

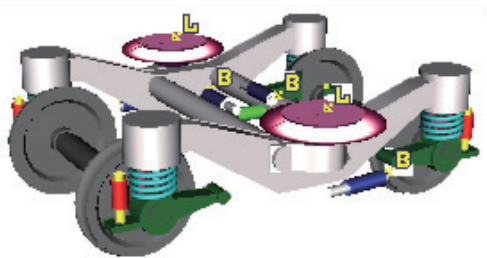


图2 CRH2 拖车转向架模型

2 曲线参数影响的仿真分析

2.1 曲线参数设置

CRH2 型拖车的车轮半径为 430 mm,选用 LMA 磨耗型踏面,钢轨型面选用 CN60,轨底坡坡度为 1/40,轮轨型面匹配如图3所示。

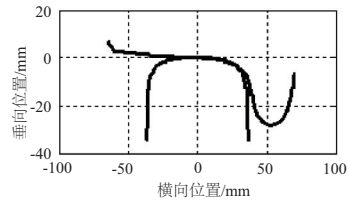


图3 轮轨匹配示意图

本文选取 UIC-good 作为轨道激励,则 UIC 谱左右轨的水平和高低不平顺幅值变化关系分别如图4、图5所示。

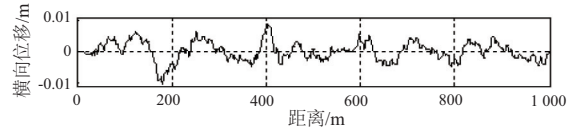


图4 左轨高低不平顺幅值图

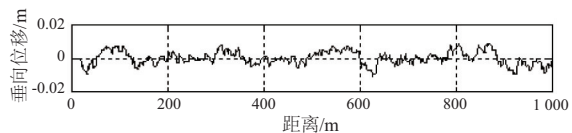


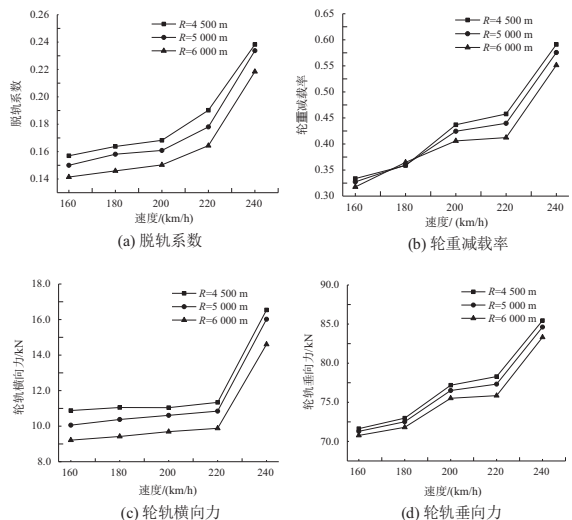
图5 右轨水平不平顺幅值图

2.2 曲线半径

根据我国高速铁路的建设标准,曲线半径取值参照《新建时速 200~250 km 客运专线铁路设计暂行规定》取 4 500~6 000 m,缓和曲线长度根据《GB 50090—2006 铁路设计规范》选取,速度取值为 160~240 km/h。

实设欠超高 $h = 50$ mm,根据《高速客运专线暂行规定》,最大超高允许值为 180 mm。对于提速线路,根据《GB 50090—2006 铁路设计规范》,实际欠超高或过超高之差允许值为 110 mm。

实设欠超高为 50 mm 时,最大欠超高为 101.04 mm,最小欠超高为 0.35 mm,满足规范要求。1 位轮对左轮各动力学指标仿真结果如图6所示。



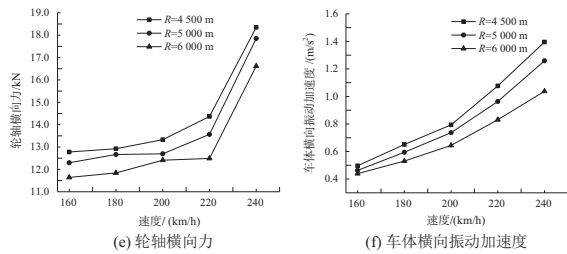


图6 欠超高工况下各动力学指标仿真结果

从图6可以得出在欠超高工况下,速度范围160~240 km/h时,各动力学指标都随速度的增大而增大;当速度>220 km/h时,各动力学评价指标值都明显增大;当半径为4500 m,速度为240 km/h时,各指标值最大,轮重减载率超过0.60,故该工况下2型车的最大运行时速不应该超过240 km/h;当欠超高为50 mm时,各动力学指标都随着曲线半径的增大而减小;欠超高工况下,当半径为4500 m,速度为240 km/h时,各指标值最大,即证明小半径大速度下车辆更容易脱轨。

实设过超高 $h=160$ mm,最大过超高量为109.65 mm,最小过超高量为8.96 mm,满足规范要求。测得1位轮对右轮各动力学指标随运行距离的变化关系如图7所示。

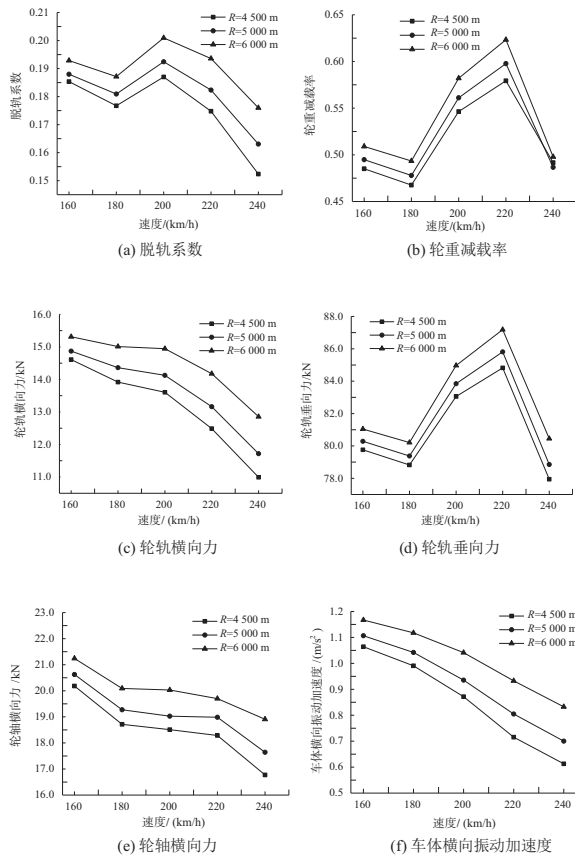


图7 过超高工况下各动力学指标仿真结果

由图7可以得出,过超高工况下,速度在160~240 km/h之间时,轮轨横向力、轮轴横向力和车体横向振动加速度都随速度的增大而单调递减。当速度为

220 km/h,半径为6000 m时,轮重减载率已超过0.60,动力学性能开始下降。故此工况下,2型车的最大速度不应超过220 km/h;当实设过超高为160 mm时,各动力学指标都随着曲线半径的增大而增大;过超高工况下,曲线半径越大,速度越小,轮轨横向力、轮轴横向力和车体横向加速度越大。

2.3 曲线超过

工况设置:曲线半径 $R=5000$ m,实设超高 $h=90\sim 170$ mm(欠超高29.58 mm~过超高45.16 mm),速度160~230 km/h。1位轮对各指标的仿真结果如图8所示。

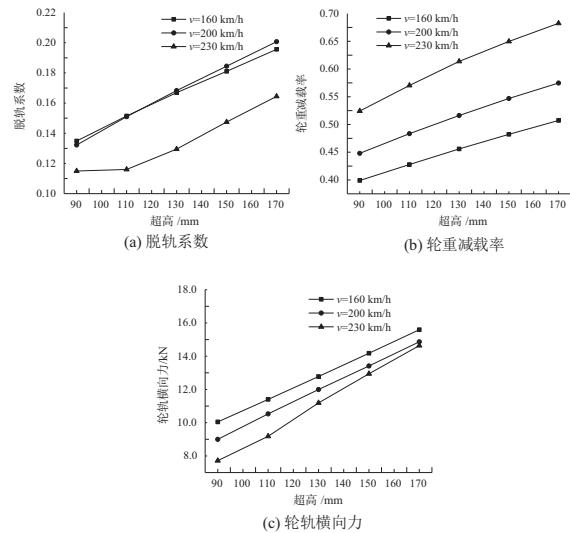


图8 超高对各动力学指标影响的仿真结果

从图8可以得出,在同一速度下,各动力学指标都随超高量的增大而增大;同一超高下,轮重减载率随速度的增大而增大;脱轨系数和轮轨横向力随速度的增大而减小;说明在过超高状态下,当速度超过200 km/h时,轮对反而不易脱轨;在半径5000 m时,2型车的实际运行速度不应>200 km/h,超高取值不应超过170 mm。

2.4 缓和曲线

工况设置:曲线半径 $R=5000$ m,实设缓和曲线长度 $P=100\sim 400$ mm,实设超高为110 mm(欠超高14.84 mm~过超高49.58 mm),速度160~230 km/h。1位轮对右轮脱轨系数和轮重减载率的仿真结果如图9所示。

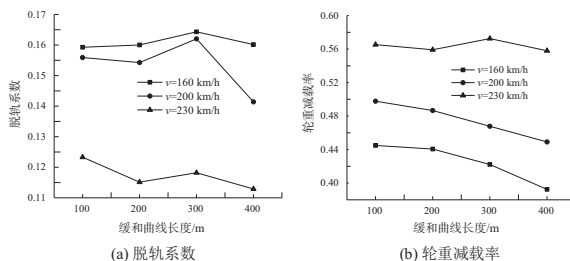


图9 缓和曲线长度对各动力学指标影响的仿真结果

从图9可以得出,在半径为5000m时,随着缓和曲线长度的增加,轮重减载率单调递减;脱轨系数在300m时最大,超过300m以后明显减小。根据《GB 50090—2006 铁路设计规范》,半径为5000m时,缓和曲线长度推荐值最小为300m。故实际缓和曲线长度取值应按大于标准推荐值。

3 悬挂参数分析

3.1 一系轴箱弹簧刚度

轴箱弹簧主要起缓和垂向冲击的作用,故分析其垂向刚度对车辆的动力学性能的影响。CRH2原型车的垂向刚度为1.2MN/m,取值0.5~2.0MN/m时,各指标随刚度变化的关系如表2所示。

表2 垂向定位刚度对动力学指标的影响

刚度/ (MN/m)	相对原型 偏差/%	轮轨垂 向力/N	车体垂向 加速度/(m/s ²)	脱轨 系数	轮重减 载率
0.5	-46.67	78.28	15.39	0.152	0.457
0.8	-33.30	78.88	15.38	0.151	0.469
1.2	0	79.67	15.36	0.151	0.483
1.5	25.0	80.26	15.32	0.151	0.494
2.0	66.60	81.21	15.23	0.150	0.512

从表2可知,轴箱弹簧的垂向定位刚度对各动力学指标的影响较小,随着刚度值的增大,各动力学指标值都减小。因此,垂向刚度取0.5~2.0MN/m时都可保证其良好的动力学性能。

进一步分析横向和纵向刚度对车辆曲线通过性能的影响。CRH2原型车的横向和纵向刚度都为0.9MN/m,刚度变化取0.2~1.5MN/m,测量1位轮对各动力学指标的仿真结果如图10所示。

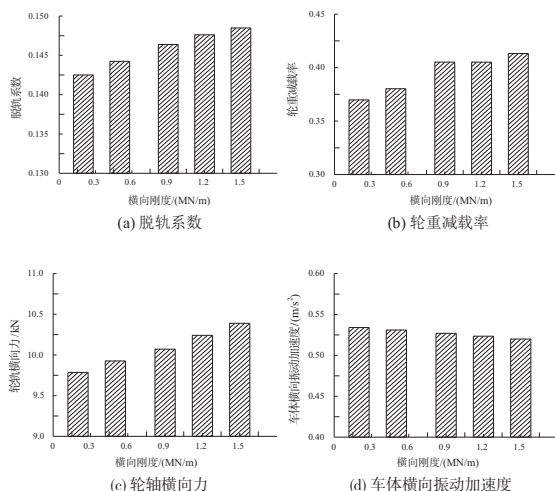


图10 车体各动力学指标随横向刚度的变化关系

从图10可知,轴箱弹簧的横向和纵向定位刚度对各

动力学指标的影响较大,随着横向刚度值的增大,除车体横向振动加速度外,各动力学指标值都单调递增。横向刚度超过0.9MN/m时,各动力学指标变化量较小。因此,横向和纵向刚度取0.9~1.5MN/m时都可保证其良好的动力学性能。

3.2 抗蛇形减振器阻尼系数

抗蛇形减振器主要起衰减车辆曲线通过时的蛇行失稳作用。因此,抗蛇形减振器的阻尼系数对车辆在直线上的非线性蛇行临界速度影响较大。CRH2原型车的阻尼为750(kN·s)/m,阻尼系数取值为:250~900(kN·s)/m,阻尼对曲线通过时的最大限制速度的影响规律见表3。

表3 阻尼系数对临界速度的影响

阻尼系数/ (kN·s·m ⁻¹)	相对原型 偏差/%	临界速度/ (km/h)	相对原型的 变化/%
250	67.66	236	-43.1
500	-33.30	260	-37.3
650	-13.33	347	-16.4
750	0	415	0
900	20	515	24.1

从表3可知,抗蛇形减振器的阻尼对车辆临界速度的影响较大,随着阻尼系数的增大,临界速度呈递增规律。因此,CRH2型车的阻尼系数至少取600(kN·s)/m时,才可使其蛇行失稳速度大于最大试验速度250km/h,留有足够大的安全裕度,可以保证车辆良好的动力学性能。

4 结语

本文以CRH2型动车的构造参数和高速铁路线路参数为依据,在多体动力学仿真软件UM中建立了CRH2模型和线路模型。研究曲线参数对曲线通过能力的影响,并对车辆悬挂参数进行了分析,综合考虑车—线的影响。结论如下:

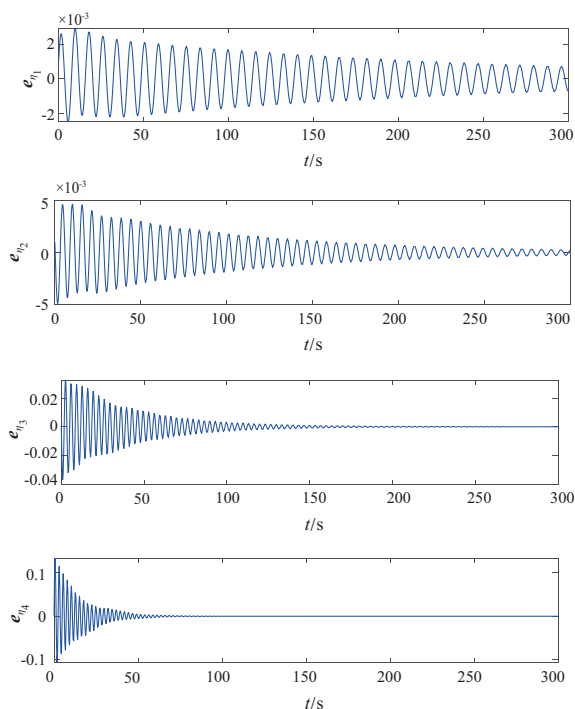
1)欠超高工况时:曲线半径越大,各动力学指标值越小。该工况下最大速度不应超过240km/h,半径取6000m时各动力学性能最优。过超高工况时:曲线半径越大,各指标值越大。该工况下最大速度不应超过220km/h,半径取4500m时性能最优。

2)同一速度下,各动力学指标随超高的增大而单调增大;结果表明:半径为5000m时,速度不超过200km/h,超高≤170mm,CRH2拖车的曲线通过性能最好。

3)曲线半径和超高对平稳性的影响很小,但速度对平稳性影响较明显。速度为230km/h时,平稳性指标值均<2.5。

4)当轴箱弹簧垂向刚度0.5~2.0MN/m,横向和纵向刚度取0.9~1.5MN/m时,抗蛇形减振器阻尼取250~900(kN·s)/m,可使动力学性能良好。

(下转第165页)

图8 挠性模态观测误差 e_n

5 结语

本文在外部干扰上界未知的情况下,研究惯性矩阵未知的挠性航天器姿态控制问题,设计一种基于模态观测器的自适应滑模控制器。本文提出的自适应滑模控制器,不需要获得惯性矩阵和外部干扰的先验知识,设计的自适应律能够估计惯性矩阵和外部干扰上界,并设计模态观测器观测模态信息,最后利用 Lyapunov 稳定性理论分析挠性

航天器闭环系统的稳定性。仿真结果表明:本文设计的控制律能够有效保证挠性航天器的抗干扰性和稳定性。

参考文献:

- [1] JOHNSTON J D, ROSS B D, BLANDINO J, et al. Development of sunshield structures for large space telescopes [C]//Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 4850, IR Space Telescopes and Instruments, Waikoloa, Hawai'i, USA: 2003, 4850:209-220.
- [2] 王小婷. 挠性卫星基于四元数的滑模姿态控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [3] MAGANTI G B, SINGH S N. Simplified adaptive control of an orbiting flexible spacecraft [J]. Acta Astronautica, 2007, 61(7/8):575-589.
- [4] WU S N, RADICE G, GAO Y S, et al. Quaternion-based finite time control for spacecraft attitude tracking [J]. Acta Astronautica, 2011, 69(1/2):48-58.
- [5] 完备, 张震亚, 乔兵, 等. 基于粒子群优化算法的航天器惯性参数辨识 [J]. 机械制造与自动化, 2011, 40(3):101-104.
- [6] WU A G, DONG R Q, ZHANG Y, et al. Adaptive sliding mode control laws for attitude stabilization of flexible spacecraft with inertia uncertainty [J]. IEEE Access, 2019, 7:7159-7175.
- [7] SUBBARAO K. The attitude control problem, re-visited [J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2003, 115:95-110.
- [8] 周湛杰, 王新生, 王岩. 基于模糊自适应算法的航天器姿态控制 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23(2):123-128.
- [9] AHMED J, COPPOLA V T, BERNSTEIN D S. Adaptive asymptotic tracking of spacecraft attitude motion with inertia matrix identification [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1998, 21(5):684-691.
- [10] 董瑞琦, 吴爱国, 张颖, 等. 转动惯量存在不确定性的挠性航天器动态自适应滑模姿态控制 [J]. 飞控与探测, 2019, 2(5):1-8.

收稿日期:2021-04-13

(上接第 160 页)

参考文献:

- [1] 熊嘉阳, 曹亚博, 肖新标, 等. 曲线轨道参数对直线电动机地铁车辆曲线通过性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(18):131-137.
- [2] 李国芳, 岳鹏, 丁旺才, 等. 轮对柔性对车辆动态曲线通过性能的影响研究 [J]. 铁道标准设计, 2019, 63(9):173-179.
- [3] 胡敏, 黄运华, 谭皓尹. 一系垂向减振器角度对高速车辆运行性能的影响 [J]. 机械工程与自动化, 2016(5):56-57, 60.
- [4] 张科元. 钢轨打磨小车动力学行为研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [5] ZBOIŃSKI K. Dynamical investigation of railway vehicles on a curved track [J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 1998, 17(6):1001-1020.
- [6] MIYAGAKI K, ADACHI M, SATO Y. Analytical study on effects of form in transition curve [J]. Vehicle System Dynamic, 2004,

41:657-666.

- [7] 刘彬, 景建辉, 乃国彦, 等. 轨道客车几何曲线通过能力的设计 [J]. 铁道车辆, 2019, 57(4):13-17, 1.
- [8] 韩志彬, 李芾, 黄运华, 等. 轨道参数对单轴转向架曲线通过性能的影响 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2018, 41(5):8-12, 16.
- [9] 岳三玲, 卜继玲, 傅茂海. 基于 Simulink 的车辆动力学仿真模型研究 [J]. 机械制造与自动化, 2010, 39(1):127-130.
- [10] 商跃进, 董雅宏. 动车组车辆构造与设计 [M]. 2 版. 成都: 西南交通大学出版社, 2019.
- [11] 李国芳, 姚永明, 丁旺才. 基于 UM 的车辆-轨道耦合动力学建模及仿真分析 [J]. 兰州交通大学学报, 2016, 35(1):142-146.

收稿日期:2020-12-15