

文章编号: 1674—8247(2024)01—0029—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.01.006

400 km/h 高速铁路小半径曲线地段橡胶浮置板轨道参数优化研究

臧传臻

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

摘要: 为了研究 400 km/h 高速铁路列车经过小半径曲线地段时的动力响应特性, 建立小半径曲线地段 CRH380B 车辆-轨道动力学模型, 结合列车实测数据验证模型的准确性, 随后模拟列车以 400 km/h 速度通过 7 000 m 半径曲线路段的动力响应。结果表明: (1) 相较于非减振轨道地段, 当橡胶浮置板轨道的减振垫铺设刚度为 0.019 N/mm³、0.033 N/mm³、0.042 N/mm³、0.1 N/mm³ 时, 轨道减振效果分别为 13.4 dB、13.4 dB、12.5 dB、8.6 dB; (2) 道床板厚度、减振垫刚度的建议取值分别为 300 mm、0.03 N/mm³。研究成果可为 400 km/h 高速铁路橡胶浮置板轨道结构设计提供理论依据。

关键词: 高速铁路; 橡胶浮置板轨道; 小半径曲线; 插入损失

中图分类号: U213.2+12

文献标志码: A

Study on Optimization of Track Parameters for Rubber Floating Slab in Small Radius Curved Section of 400 km/h High-speed Railway

ZANG Chuanzhen

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: In order to study the dynamic response characteristics of 400 km/h high-speed train when passing through a small radius curve, a vehicle-track dynamics model of the CRH380B train on section with small radius curve was established. The model's accuracy was verified with actual measured data from the train. Subsequently, simulations were conducted to predict the dynamic response of the train while traversing a curve with a 7 000 m radius at the speed of 400 km/h. The results showed that: (1) Compared to a track section without damping, the vibration reduction effect of the rubber floating slab track with damping pads at stiffness levels of 0.019 N/mm³, 0.033 N/mm³, 0.042 N/mm³, and 0.1 N/mm³ were 13.4 dB, 13.4 dB, 12.5 dB, and 8.6 dB, respectively. (2) The recommended values for the slab thickness and damping pad stiffness are 300 mm and 0.03 N/mm³, respectively. The conclusions provide a theoretical basis for the design of rubber floating slab track structures for 400 km/h high-speed railways.

Key words: high-speed railway; rubber floating slab track; small radius curve; insertion loss

橡胶减振垫浮置板轨道是将整体道床与基础分离, 做成有足够刚度和质量的道床板, 并浮置于橡胶减振垫上, 构成了质量弹簧系统, 其减振原理是在轨道

上部建筑和基础之间插入一个固有频率很低的线性谐振器, 防止由钢轨传来的振动传入基础。自 1973 年以来, 减振垫浮置板轨道在全球 100 多个国家城市轨

收稿日期: 2023-11-06

作者简介: 臧传臻(1990-), 男, 高级工程师。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2603400), 中国铁路设计集团有限公司科技开发课题(2021A240101; 2022BXZ005)

引文格式: 臧传臻. 400 km/h 高速铁路小半径曲线地段橡胶浮置板轨道参数优化研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(1): 29-34.

ZANG Chuanzhen. Study on Optimization of Track Parameters for Rubber Floating Slab in Small Radius Curved Section of 400 km/h High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(1): 29-34.

道交通项目中得到广泛应用,使用量超过 100 万 m²。该系统在德国柏林地铁铺设使用了 30 多年,至今减振效果优良。橡胶减振垫浮置板轨道在台湾高雄地铁实测减振效果达到 23 dB。轨道不平顺和小半径曲线线路参数作为导致轮轨振动的激扰源,直接影响列车安全平稳运行^[1]。然而,目前我国对 400 km/h 高速铁路橡胶浮置板轨道动力特性的研究还不完善,对高速铁路小半径曲线地段橡胶浮置板轨道的减振效果及参数优化的研究很少。因此,有必要研究轨道不平顺和曲线因素共同作用下的橡胶浮置板轨道结构动力响应峰值。

国内外相关学者已对高速铁路列车动力学响应规律进行了一定研究:杨吉忠^[2]等研究了 400 km/h 行车速度条件下高速铁路轨道几何不平顺的敏感波长;Karis^[3-4]等分析了轨道不平顺对车辆动力响应的影响;练松良^[5]等针对客货共线铁路,研究了多种类型车辆的车体加速度同轨道不平顺的关系;高建敏^[6]等分析了轨道不平顺波长变化引起的高速铁路列车动力响应变化规律;杨飞^[7]等针对 CRH2 动车组对比分析了速度为 300 km/h、350 km/h 时轨道不平顺波长对车辆动力响应的影响;徐金辉^[8]等分析了轨道参数、车辆悬挂参数、车速对敏感波长的影响;袁玄成^[9]等通过改变各类轨道不平顺的波长及幅值,研究了动力响应变量的变化规律;芦睿泉^[10]等对比分析了多种类型轨道不平顺下的动力响应峰值,从而确定了需重点关注的轨道不平顺类型。

为研究 400 km/h 车速下小半径曲线地段橡胶浮置板轨道动力响应特性,本文建立了 7 000 m 半径曲线地段 CRH380B 车辆-轨道动力学模型,分析轨道参数对插入损失的影响规律,确定了 400 km/h 高速铁路橡胶浮置板轨道参数合理值。研究结论可为运营期高速铁路橡胶浮置板轨道的减振效果评价提供理论依据。

1 动力学模型建立

根据 CRH380B 车辆参数(如表 1 所示),从下向上依次设置轮对、构架、车体等刚体,输入各部件的质量、转动惯量及质心坐标等,然后将各部件间通过铰、力元等连接,最终组装成动力学模型。

采用 S1002G 型车轮磨耗踏面、FASTSIM 简化轮轨接触算法理论,构建车辆动力学仿真模型。

建立轨道结构有限元模型,钢轨采用 Euler 梁单元,扣件采用线性弹簧,道床板、自密实混凝土层、橡胶减振垫、底座板和下部基础均为实体单元,有限元

表 1 车辆主要参数表

参数	取值	参数	取值
车体质量/t	38.054	一系纵向刚度/(kN/m)	919.8
构架质量/kg	2 235	一系横向刚度/(kN/m)	919.8
轮对质量/kg	1 517	一系垂向刚度/(kN/m)	886.5
车体摇头转动惯量/(kg·m ²)	1 744 000	一系垂向减振器阻尼/[(kN·s)/m]	10
车体点头转动惯量/(kg·m ²)	1 773 000	二系纵向刚度/(kN/mm)	0.124
车体侧滚转动惯量/(kg·m ²)	98 300	二系横向刚度/(kN/mm)	0.124
车轮滚动圆横向跨距/mm	1 435	二系垂向刚度/(kN/mm)	0.182
轴距/mm	2 500	二系横向减振器阻尼/[(kN·s)/m]	15
抗蛇行减振器阻尼/[(kN·s)/m]	12	二系垂向减振器阻尼/[(kN·s)/m]	10.4

模型如图 1 所示。

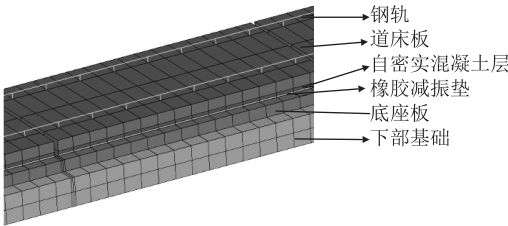
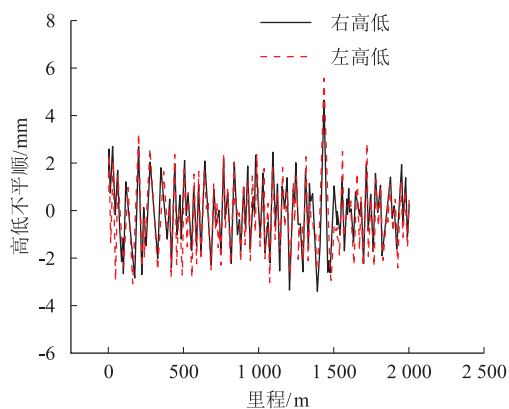


图 1 橡胶浮置板轨道模型图

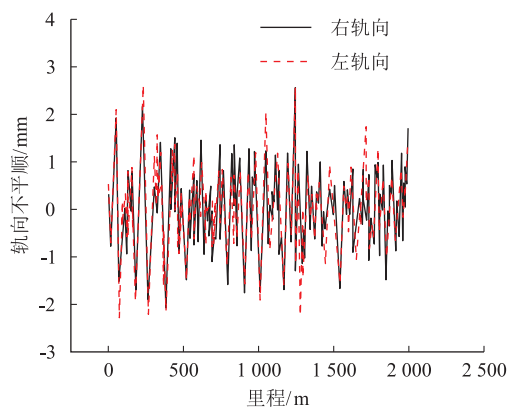
钢轨采用 60 kg/m 钢轨、材质为 U71MnG,采用 1/40 的轨底坡,轨距取 1 435 mm。扣件节点垂直静刚度为 35 kN/mm。道床板材料为 C60 混凝土,长 5.6 m、宽 2.5 m,相邻道床板之间缝隙 0.07 m。自密实混凝土层材料为 C40 混凝土,长度和宽度与道床板相同,厚 0.1 m。底座板材料为 C40 混凝土,长度与道床板相同,宽 3.1 m、厚 0.3 m。自密实混凝土层与底座板之间设置橡胶减振垫,面积与道床板相同,厚度为 0.03 m。

根据 GB/T 5599 - 2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》^[11]的规定,在车厢地板面上布设车体加速度测点,并令转向架中心在地板面的投影点与该测点位置横向相距 1 m。采用某高速铁路 2 000 m 区段的轨道不平顺,构建相应的无砟轨道结构模型,并基于该区段的列车实测数据进行模型验证。实测轨道不平顺如图 2 所示。车体垂向、横向加速度时频如图 3、图 4 所示。

由图 3、图 4 可知,车体垂向加速度的仿真与实测数据在时域和频域上均能得到较好的对应。车体横向加速度相对垂向加速度的对应效果较差,主要是因

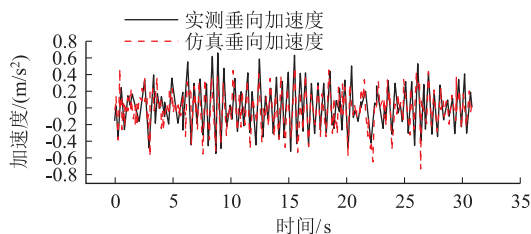


(a) 左、右高低不平顺

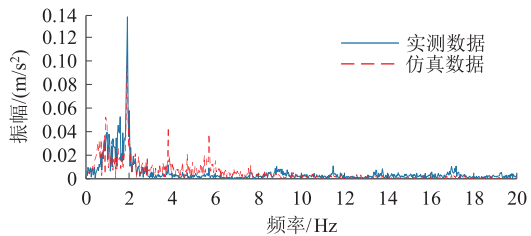


(b) 左、右轨向不平顺

图2 实测轨道不平顺图



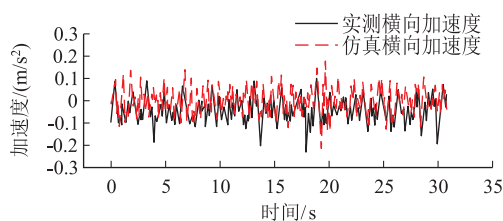
(a) 车体垂向加速度时域对比



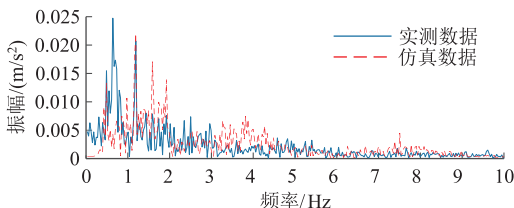
(b) 车体垂向加速度频域对比

图3 车体垂向加速度时频域对比图

为仿真模型中的车辆参数进行了适当简化,且实际中车体横向加速度的影响因素更为复杂。然而,仿真计算数据与实测数据在时域幅值上接近且线形相似,在频域上各峰值位置与线形走向也相近。



(a) 车体横向加速度时域对比



(b) 车体横向加速度频域对比

图4 车体横向加速度时频域对比图

总的来说,仿真与实测数据有较好的相关性,表明仿真模型的计算结果合理。

2 轨道参数优化研究

TB 10621-2014《高速铁路设计规范》^[12]中规定,超高、欠超高的最大值分别为175 mm、90 mm,可知400 km/h车速下所允许设置的最小曲线半径近似为7 000 m,因此模型中的曲线半径均设为7 000 m。轨道不平顺采用某高速铁路区段实测数据,模拟列车以400 km/h速度通过直线、缓和曲线和圆曲线($R=7\,000\text{ m}$, $h=175\text{ mm}$)的工况。

2.1 不同位置处振动响应变量时程曲线

通过分析列车通过橡胶浮置板轨道时,不同位置处的加速度时程曲线如图5所示。由图5可知,道床板中部处钢轨加速度峰值明显大于道床板端部处钢轨加速度峰值,道床板端部处加速度峰值明显大于道床板中部处加速度峰值,道床板端部处底座加速度峰值和道床板中部处底座加速度峰值大致相等,底座处加速度峰值和隧道壁处加速度峰值大致相等。

2.2 减振垫刚度对减振效果的影响

选取减振垫刚度为 0.019 N/mm^3 、 0.033 N/mm^3 、 0.042 N/mm^3 、 0.1 N/mm^3 ,各部分垂向加速度如图6所示。底座板垂向加速度1/3倍频程分频振级如图7所示。

由图6、图7可知,当减振垫刚度增大时,钢轨垂向加速度改变不显著,道床板垂向加速度变小,底座板垂向加速度变大;减振垫刚度分别为 0.019 N/mm^3 、 0.033 N/mm^3 、 0.042 N/mm^3 、 0.1 N/mm^3 的情况下,底座板垂向加速度Z振级分别为66.2 dB、66.2 dB、67.1 dB、

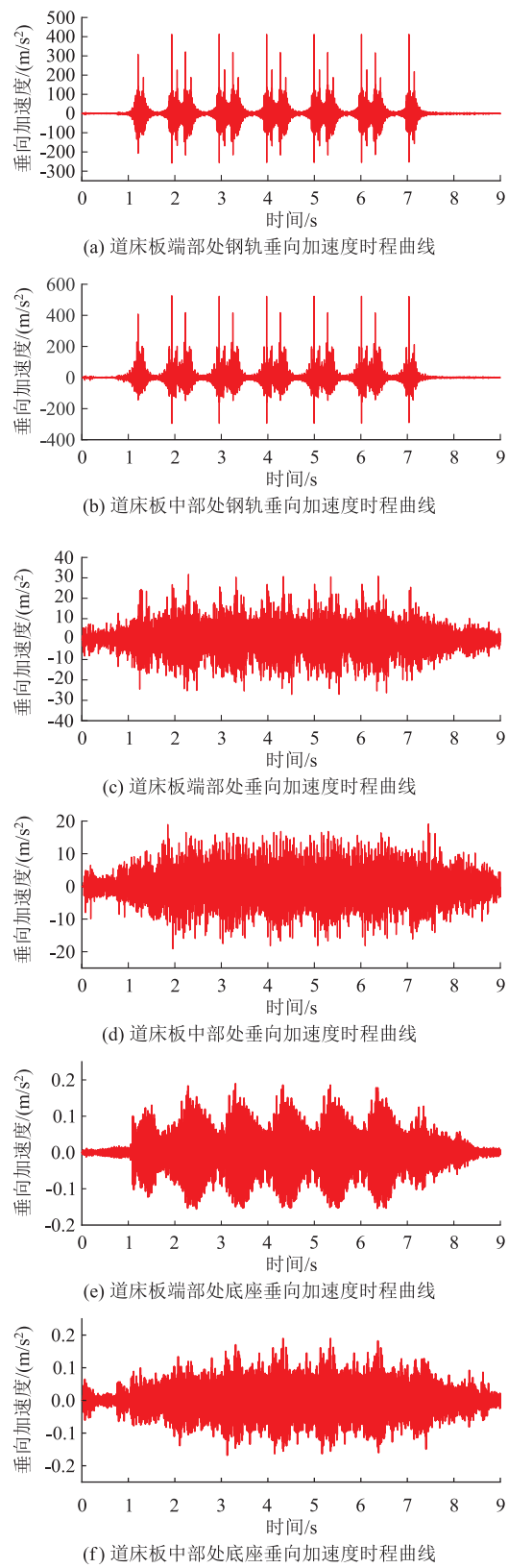


图 5 轨道结构不同位置处垂向加速度时程曲线图

71.0 dB。当去除轨道结构中的减振垫后,底座板垂向加速度 Z 振级为 79.6 dB,故橡胶浮置板轨道结构的插入损失分别为 13.4 dB、13.4 dB、12.5 dB、8.6 dB。

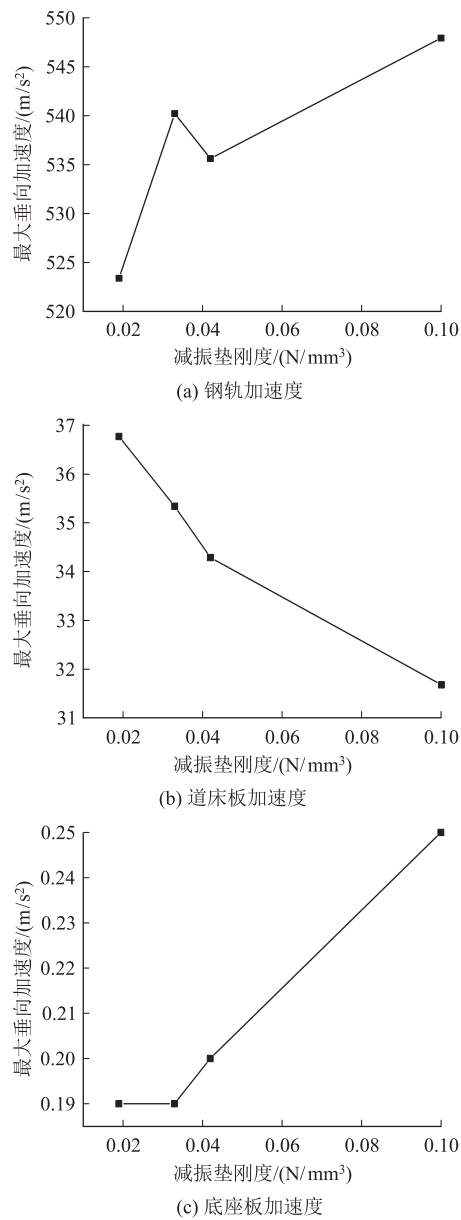


图 6 轨道结构各部分最大垂向加速度和减振垫刚度的关系图

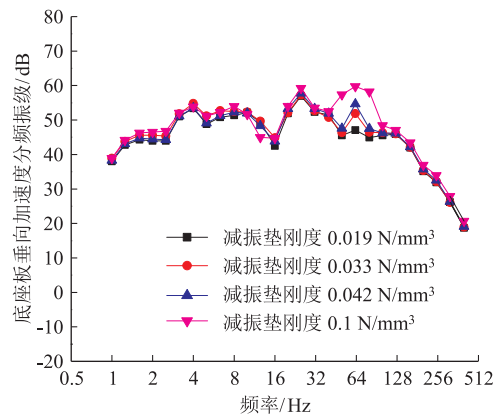
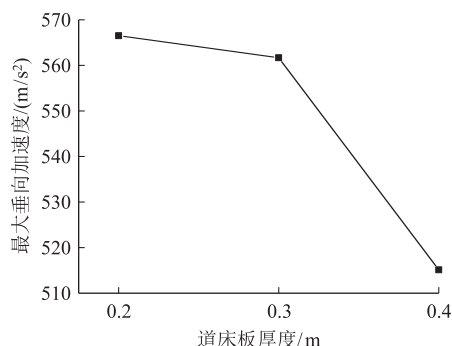


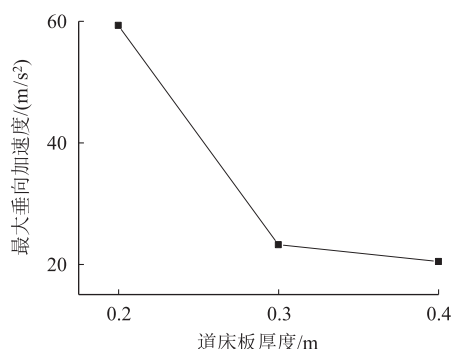
图 7 底座板垂向加速度分频振级图

2.3 道床板厚度对减振效果的影响

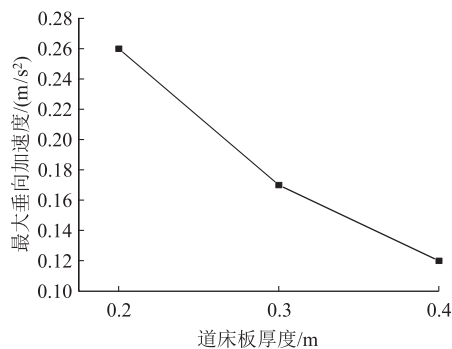
道床板厚度取 0.2 m、0.3 m 和 0.4 m 时,轨道各部分的最大垂向加速度如图 8 所示。



(a) 钢轨加速度



(b) 道床板加速度



(c) 底座板加速度

图 8 轨道结构各部分最大垂向加速度和道床板厚度的关系图

道床板厚度对底座板垂向加速度分频振级的影响如图 9 所示。

由图 8、图 9 可知,随着道床板厚度增大,道床板、底座板的垂向加速度变小,钢轨垂向加速度变化不大。当道床板厚度为 0.2 m、0.3 m 和 0.4 m 时,底座板垂向加速度 Z 振级分别为 73.5 dB、66.2 dB 和 60.1 dB。考虑轨道结构高度以及限界的影响,道床板厚度宜采用 300 mm。

2.4 行车动力响应特性

当道床板越厚或减振垫刚度越大时,轨道动

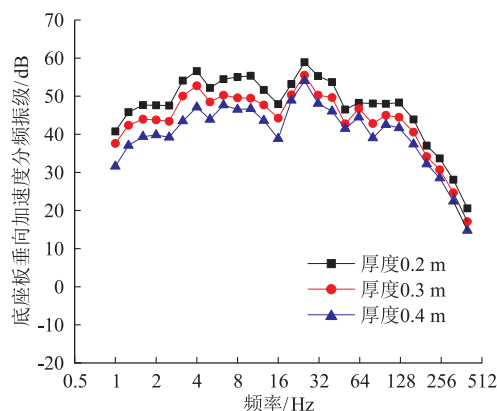


图 9 道床板厚度对底座板垂向加速度分频振级的影响图

力响应和行车动力响应越小。当道床板厚度采用 300 mm 时,为了兼顾行车安全舒适性和减振性能,基于动力学仿真可确定合理的减振垫刚度取值为 0.03 N/mm^3 。减振垫刚度取 0.03 N/mm^3 时列举的行车性能指标时程曲线如图 10 所示。将各指标的计算结果进行统计可知:车体垂向加速度峰值约为 0.4 m/s^2 ,车体横向加速度峰值约为 0.5 m/s^2 ,轮重减载率峰值约为 0.4,脱轨系数峰值约为 0.75,轮轨垂向力峰值约为 105 kN,轮轴横向力峰值约为 50 kN,均满足相关控制标准且具有一定安全富余量。

3 结论

本文研究了 400 km/h 高速铁路列车行驶至 7 000 m 半径曲线地段时的动力响应规律,分析了轨道参数对振动特性的影响,得到主要结论如下:

(1) 道床板中部处钢轨加速度峰值明显大于道床板端部处钢轨加速度峰值,道床板端部处加速度峰值明显大于道床板中部处加速度峰值,道床板端部处底座加速度峰值和道床板中部处底座加速度峰值大致相等,底座处加速度峰值和隧道壁处加速度峰值大致相等。

(2) 随着道床板厚度的增加,钢轨垂向加速度变化不大,道床板和底座板的垂向加速度减小。道床板厚度的增大,可以提高减振轨道的减振效果。考虑轨道结构高度以及限界的影响,道床板厚度宜采用 300 mm。

(3) 减振轨道与普通轨道相比,底座板振动整体减小。减振垫刚度为 0.019 N/mm^3 、 0.033 N/mm^3 、 0.042 N/mm^3 、 0.1 N/mm^3 时,底座板垂向加速度 Z 振级分别为 66.2 dB、66.2 dB、67.1 dB 和 71.0 dB,普通轨道的底座板垂向加速度 Z 振级为 79.6 dB。减振垫

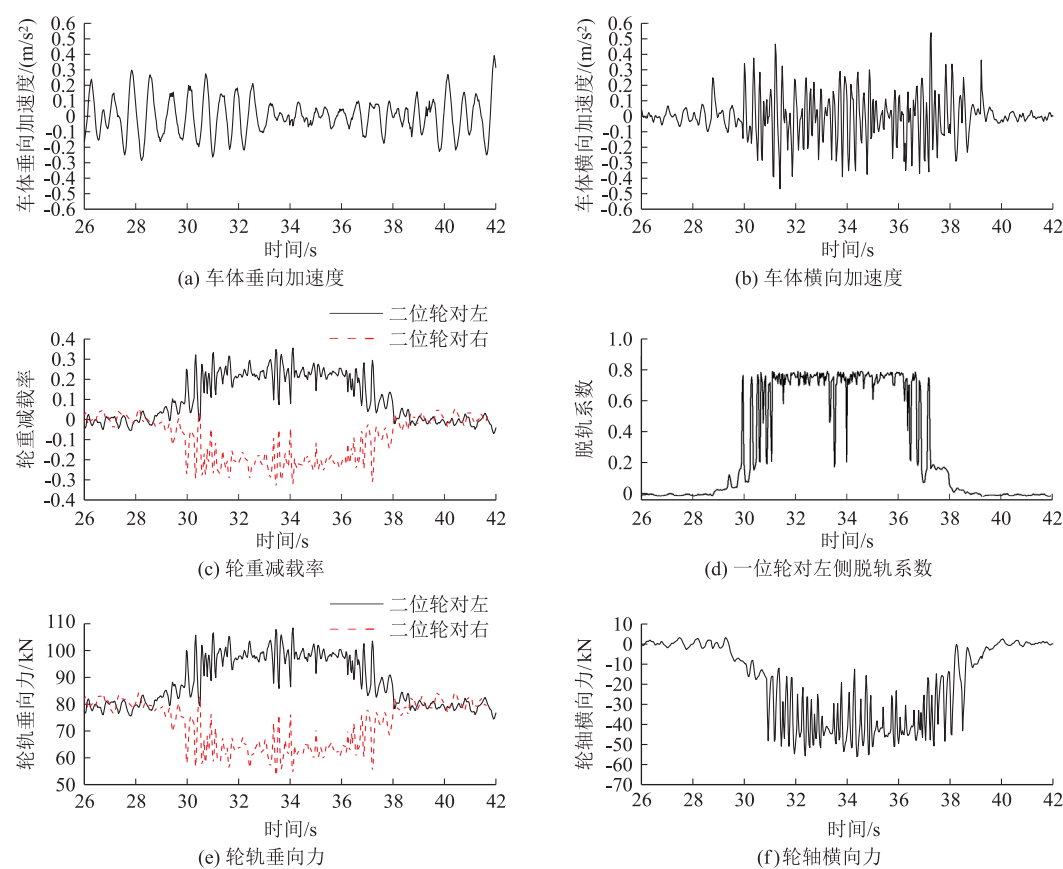


图 10 行车性能指标时程曲线图

铺设刚度为 0.019 N/mm^3 、 0.033 N/mm^3 、 0.042 N/mm^3 、 0.1 N/mm^3 时,减振效果分别为 13.4 dB、13.4 dB、12.5 dB 和 8.6 dB。考虑行车安全舒适性和轨道结构稳定性,建议减振垫刚度采用 0.03 N/mm^3 。

参考文献:

[1] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHAI Wanming. Vehicle-track Coupled Dynamics [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.

[2] 杨吉忠,谢毅,庞玲,等. 400 km/h 高速铁路轨道几何不平顺敏感波长分析[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 50-55, 114.
YANG Jizhong, XIE Yi, PANG Ling, et al. Sensitive Wavelength Analysis on Track Geometric Irregularities of 400 km/h High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 50-55, 114.

[3] KARIS T, BERG M, STICHEL S, et al. Correlation of Track Irregularities and Vehicle Responses Based on Measured Data [J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 56(6): 967-981.

[4] XIN Tao, WANG Pengsong, DING Yu. Effect of Long-wavelength Track Irregularities on Vehicle Dynamic Responses [J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 1-11.

[5] 练松良,黄俊飞. 客货共运线路轨道不平顺不利波长的分析研究

[J]. 铁道学报, 2004, 26(2): 111-115.

LIAN Songliang, HUANG Junfei. Study of the Detrimental Wavelengths of Track Irregularities for Railways with Passenger and Freight Traffic [J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(2): 111-115.

[6] 高建敏,翟婉明,王开云. 高速行车条件下轨道几何不平顺敏感波长研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 83-88.
GAO Jianmin, ZHAI Wanming, WANG Kaiyun. Study on Sensitive Wavelengths of Track Irregularities in High-speed Operation [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7): 83-88.

[7] 杨飞,黎国清,刘金朝. 时速 300~350 km 高速铁路轨道不平顺管理波长研究[J]. 铁道建筑, 2013, 53(1): 86-90.
YANG Fei, LI Guoqing, LIU Jinzhao. Study on Management Wavelength of Track Irregularity of High-speed Railway with Speed of 300~350 km/h [J]. Railway Engineering, 2013, 53(1): 86-90.

[8] 徐金辉,王平,汪力,等. 轨道高低不平顺敏感波长的分布特征及其影响因素的研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(7): 72-78.
XU Jinhui, WANG Ping, WANG Li, et al. Research on the Distribution Characteristics and Influence Factors of Sensitive Wavelength of Track Vertical Profile Irregularity [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(7): 72-78.

[9] 袁玄成,王开云,閻鑫,等. 轨道不平顺波长和幅值对高速动车组

(下转第 52 页)

法[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(2): 55 – 61.

PU Hao, ZHAO Haifeng, LI Wei. A 3D Spatial Intelligent Route Selection Approach for Railway Alignments Based on Dynamic Programming [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(2): 55 – 61.

[5] ZHANG Hong, PU Hao, SCHONFELD P, et al. Multi-objective Railway Alignment Optimization Considering Costs and Environmental Impacts [J]. Applied Soft Computing, 2020, 89: 106105.

[6] VAZQUEZ - MENDEZ M E, CASAL G, CASTRO A, et al. An Algorithm for Random Generation of Admissible Horizontal Alignments for Optimum Layout Design [J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021, 36(8): 1056 – 1072.

[7] 李伟,蒲浩,郑晓强. 基于双向广义距离变换的复杂环境铁路线路优化[J]. 铁道学报, 2017, 39(2): 90 – 98.

LI Wei, PU Hao, ZHENG Xiaoqiang. Methodology for Railway Alignment Optimization in Complex Environment Based on Bidirectional Generalized Distance Transform [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(2): 90 – 98.

[8] GAO Tianci, LI Zihan, GAO Yan, et al. A Deep Reinforcement Learning Approach to Mountain Railway Alignment Optimization [J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37(1): 73 – 92.

[9] PUSHAK Y, HARE W, LUCET Y. Multiple-path Selection for New Highway Alignments Using Discrete Algorithms [J]. European Journal of Operational Research, 2016, 248(2): 415 – 427.

[10] DOLGOV D, THRUN S, MONTEMERLO M, et al. Practical Search Techniques in Path Planning for Autonomous Driving [J]. AAAI Workshop-Technical Report, 2008, : 32 – 37.

[11] SONG Taoran, PU Hao, SCHONFELD P, et al. Mountain Railway Alignment Optimization Integrating Layouts of Large-scale Auxiliary Construction Projects [J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2023, 38(4): 433 – 453.

(上接第 34 页)

动力学性能的影响分析[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(2): 1 – 9.

YUAN Xuancheng, WANG Kaiyun, GE Xin, et al. Influences of Track Irregularity Wavelength and Amplitude on Dynamic Performance of High-speed EMU [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36(2): 1 – 9.

[10] 芦睿泉,练松良. 轨道复合不平顺对提速列车运行影响的研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(5): 17 – 22.

LU Ruiquan, LIAN Songliang. Research of the Effect of Track Complex Irregularities on the Vehicle Dynamic Response [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(5): 17 – 22.

[11] GB/T 5599 – 2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》[S].

GB/T 5599 – 2019 Specification for Dynamic Performance Assessment and Testing Verification of Rolling Stock [S].

[12] TB 10621 – 2014 高速铁路设计规范[S].

TB 10621 – 2014 Code for Design of High Speed Railway [S].