

文章编号: 1674—8247(2021)02—0050—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.009

400 km/h 高速铁路轨道几何不平顺敏感波长分析

杨吉忠¹ 谢毅¹ 庞玲¹ 姜培斌² 凌亮²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘要:本文基于车辆-轨道耦合动力学理论,建立了考虑柔性车体的高速列车-轨道耦合动力学模型,对比分析了轨道几何不平顺波长变化对典型高速动车组动力学性能的影响规律,探讨了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。结果表明:(1)400 km/h高速铁路轨道几何不平顺敏感波长主要存在两个范围,短波范围的敏感波长主要与动车组车体的柔性模态有关,中长波范围的敏感波长主要与动车组车辆系统的刚体模态有关;(2)由于悬挂参数的差异,不同型号高速动车组对应的轨道几何不平顺敏感波长存在明显差异,在制定线路养护维修标准时,应考虑整条线路上所有运营的动车组型号;(3)不同类型轨道几何不平顺的敏感波长也存在差异,应针对不同的轨道几何不平顺类型制定相应的敏感波长管理标准。

关键词:400 km/h 高速铁路; 车辆-轨道耦合动力学; 轨道几何不平顺; 敏感波长; 高速动车组

中图分类号:U213.2;U238

文献标志码:A

50

Sensitive Wavelength Analysis on Track Geometric Irregularities of 400 km/h High-speed Railway

YANG Jizhong¹ XIE Yi¹ PANG Ling¹ JIANG Peibin² LING Liang²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In this paper, we established a high-speed train-track coupling dynamics model considering flexible vehicle bodies based on the theory of vehicle-track coupling dynamics, studied the influence of track geometric irregularities on the dynamics performance for different types of high-speed trains, and discussed the sensitive wavelengths of track geometric irregularities on 400 km/h high-speed railway. The results show that: (1) There are two ranges of sensitive wavelengths for track geometric irregularities of 400km/h high-speed railway, where the sensitive wavelengths of the short-wave range are mainly related to the flexible mode of the EMU car-body, and the sensitive wavelengths of the medium and long-wave ranges are mainly related to the rigid mode of the EMU vehicle system. (2) Due to the difference in suspension parameters, high-speed trains of different models are much different in the sensitive wavelengths for the same type of track geometric irregularities. All types of high-speed trains operating on the same line shall be considered when maintenance rules are developed. (3) The sensitive wavelengths vary with types of track geometric irregularities. Thus, proper management criteria of sensitive wavelengths shall be developed based on different types of track geometric irregularities.

收稿日期:2021-03-01

作者简介:杨吉忠(1980-),男,教授级高级工程师。

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(KSNQ202058)

引文格式: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.

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.

Key words: 400 km/h high-speed railway; vehicle-track coupling dynamics; track geometric irregularities; sensitive wavelength; high-speed EMU

随着高速铁路的不断发展,列车运行速度不断提高。轨道不平顺作为车辆振动的主要激励源,会对轮轨相互作用以及车辆振动产生重要的影响^[1],当列车以较高车速通过某些特定波长的轨道几何不平顺时,车辆系统与不平顺激励会发生共振,从而导致车体加速度大幅度放大,进而造成列车的显著振动^[2],影响运行安全性和乘坐舒适度。

针对轨道几何不平顺敏感波长,国内外学者展开了一系列研究。国外学者 Karis、Xin 等人^[3-4]仿真研究了车辆动力学性能与轨道不平顺之间的关系。练松良等人^[5]分析了轨道随机不平顺与不同类型车辆车体加速度之间的关系,并归纳出客货共运线路轨道不平顺的不利波长范围。高建敏等人^[6]应用车辆-轨道耦合动力学理论及分析软件 TTISIM 建立了高速客车模型,研究了轨道几何不平顺波长变化对高速列车系统动力学性能的影响。杨飞等人^[7]利用 CRH2 动车组的动力学仿真模型,分析了运行速度为 300 km/h 和 350 km/h 时轨道不平顺波长对车辆动力学性能的影响。徐金辉等人^[8]基于车辆-轨道耦合动力学理论,分析了行车速度、车辆悬挂参数、轨道参数对敏感波长的影响。袁玄成等人^[9]基于车辆-轨道耦合动力学理论,仿真分析了不同类型轨道不平顺波长和幅值对车辆动力学性能的影响。芦睿泉等人^[10]利用模拟仿真计算了多种类型轨道单一不平顺、复合不平顺和实测随机不平顺激励下提速车辆的动力响应,分析了相对不利的轨道不平顺类型。

综上可知,现有研究大多针对一种型号的列车进行研究,但我国高速动车组型号众多,在同一条线路上存在多种型号动车组同时运营的情况,由于参数设计的差异,不同型号动车组对于线路轨道不平顺的敏感程度不同,可能出现某一型号动车组出现异常振动的情况。目前,针对不同型号动车组轨道几何不平顺敏感波长的对比研究还较少。且 Ling 等人^[11]的研究表明,车体柔性振动对车辆的动力学性能有很大影响,因此,有必要在分析轨道几何不平顺敏感波长时考虑车体的柔性振动。

为探讨 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,本文基于车辆-轨道耦合动力学理论,建立考虑柔性车体的高速列车-轨道耦合动力学模型,系统对比分析轨道几何不平顺波长变化对典型高速动车组动力学性能的影响规律,总结不同

型号动车组在不同类型轨道几何不平顺上的敏感波长。

1 计算模型

1.1 车辆-轨道耦合动力学模型

为仿真研究 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,针对 400AF、400BF 和 CIT500 3 种型号的动车组,基于车辆-轨道耦合动力学理论,建立了考虑柔性车体的高速列车-板式轨道相互作用的空间耦合动力学模型,如图 1 所示。

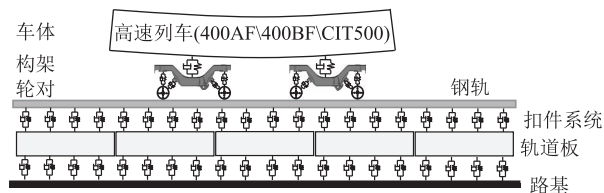


图 1 高速列车-轨道耦合动力学模型图

模型分为车辆动力学模型、轨道动力学模型、轮轨相互作用模型 3 个部分。3 种不同型号动车组刚柔耦合车辆动力学模型均考虑了 1 个车体、2 个构架、4 个轮对共 7 个部件,其中车体为柔性体,构架和轮对为刚体。各部件都考虑纵向、横向、垂向、侧滚、点头和摇头 6 个方向的自由度。除此之外,车体还考虑了 38 阶柔性模态。因此,对于每个型号的动车组,整个车辆系统为 80 个自由度的刚柔耦合系统。考虑一、二系悬挂系统的非线性特性(如二系横向止挡的刚度非线性和减振器的阻尼非线性特性)建模。车辆系统运动方程的推导、各阶柔性车体模态及悬挂非线性处理详见参考文献^[1-2,11]。

轨道动力学模型为板式轨道结构,由钢轨、扣件、轨道板及 CA 砂浆层组成的。其中,钢轨模拟成连续弹性离散点支承的 Timoshenko 梁,考虑其垂向、横向和扭转振动;钢轨扣件系统和 CA 砂浆层采用周期性离散的弹簧-阻尼单元模拟;轨道板为等厚度矩形板。

采用迹线法进行轮轨空间接触几何的计算;采用 Hertz 非线性弹性接触理论计算轮轨法向力。针对轮轨蠕滑力,首先以 Kalker 线性蠕滑理论计算,当轮轨间蠕滑达到饱和后,采用 Shen-Hedrick-Elkins 理论进行非线性修正;采用新型快速显式积分方法(翟方法)计算系统的动力学响应。

1.2 轨道不平顺激励模型

本文采用轨道高低不平顺、方向不平顺、水平不平顺和复合不平顺 4 种轨道几何不平顺模型进行仿真计算,如图 2 所示。其中,轨道复合不平顺分析采用的是方向和水平的复合不平顺。图 2 中, L 为波长, A 为幅值,采用连续三峰谐波不平顺作为系统激励。

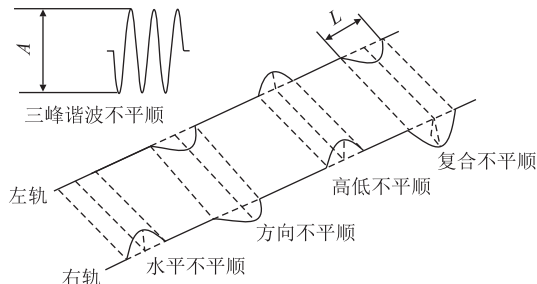
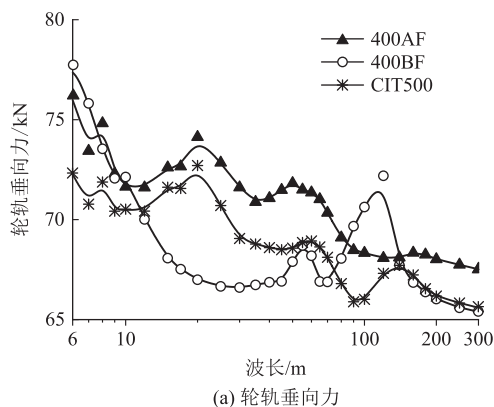


图 2 轨道几何不平顺类型图



2 不同型号高速动车组在单一轨道不平顺作用下的动力学性能分析

本节分别以方向不平顺、水平不平顺和高低不平顺 3 种单一轨道不平顺作为系统激励。通过系统研究不同型号动车组在不同波长轨道不平顺作用下的车辆动力学性能,对比研究不同型号动车组在不同类型轨道几何不平顺作用下的敏感波长。为避免曲线线路的影响,采用直线线路进行仿真分析,行车速度设置为 400 km/h,轨道几何不平顺幅值为 4 mm。

2.1 方向不平顺

不同型号动车组轮轨作用力随轨道方向不平顺波长的变化情况如图 3 所示。

由图 3 可知,3 种车型在波长范围 40 ~ 70 m 内存在峰值区域,动车组 400AF、400BF、CIT500 对应的敏

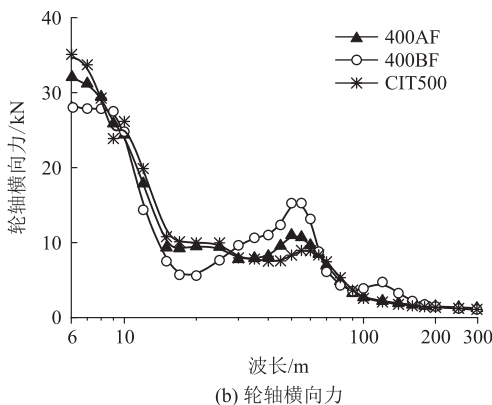


图 3 方向不平顺波长变化对轮轨作用力的影响图

感波长分别为 50 m、55 m、60 m。但在波长范围 10 ~ 30 m 内,动车组 400AF 和 CIT500 在波长为 20 m 时有明显峰值,而动车组 400BF 则不敏感。在波长范围 100 ~ 160 m 内,动车组 400BF 和 CIT500 有明显的峰值区域,对应的敏感波长分别为 120 m、140 m。上述

分析的中长波范围的敏感波长主要与车辆的刚体模态有关,加之不同型号动车组的悬挂参数不同,因而不平顺波长的变化情况必然存在不同之处。

不同型号动车组车体加速度随轨道方向不平顺波长的变化情况如图 4 所示。

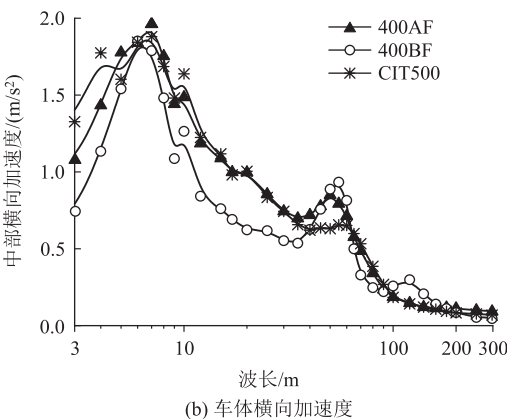
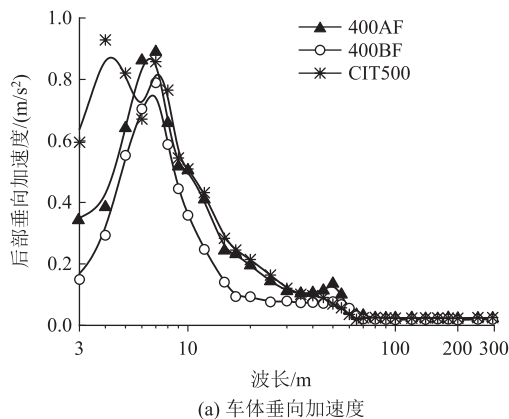


图 4 方向不平顺波长变化对车体加速度的影响图

由图 4 可知,3 种型号动车组在波长范围 3 ~ 10 m 内存在 2 个共同的峰值区域,不同车型对应的敏感波长均为 7 m 和 10 m。除此之外,对于动车组 CIT500 在轨道方向不平顺波长为 4 m 时,存在明显的峰值。上述分析的中短波范围的敏感波长主要与车体

柔性模态有关。

2.2 水平不平顺

不同型号动车组轮轨作用力随轨道水平不平顺波长的变化情况如图 5 所示。

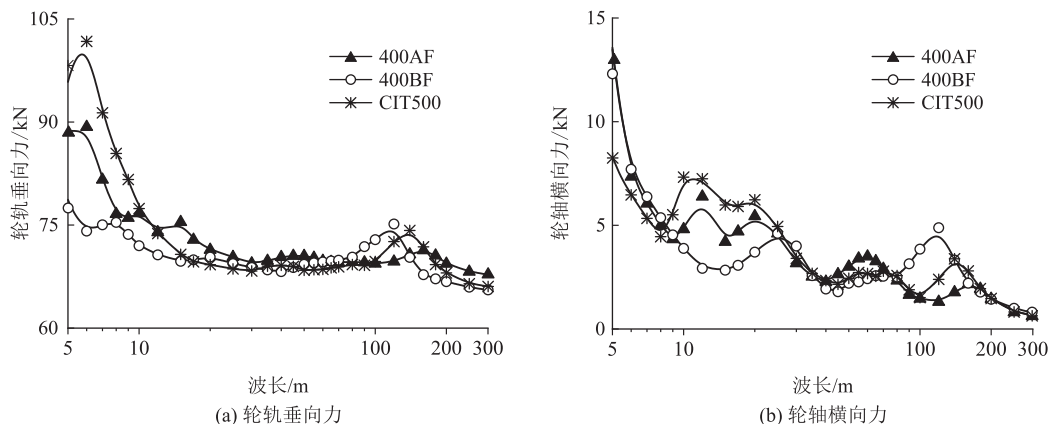


图 5 水平不平顺波长变化对轮轨作用力的影响图

由图 5 可以看出,3 种车型在波长范围 15 ~ 30 m 内存在峰值区域,动车组 400AF、400BF、CIT500 对应的敏感波长分别为 20 m、25 m、20 m。同样,在波长范围 40 ~ 65 m 和波长范围 100 ~ 180 m 内存在峰值区域,3 种车型对应的敏感波长分别为 60 m、45 m、55 m 和 160 m、120 m、140 m。除此之外,由图 5 (b) 可知,在波长为 6 m 时,动车组 400AF 和 CIT500 有明显的峰

值,出现该峰值的原因主要与车体的柔性模态有关,同时在车体后部垂向加速度上也有类似峰值出现。由于悬挂参数的差异,动车组 400AF 和 CIT500 在波长为 12 m 处有明显峰值出现,但动车组 400BF 并无明显的峰值现象,该峰值与构架的某一刚体模态有关。

不同型号动车组车体加速度随轨道水平不平顺波长的变化情况如图 6 所示。

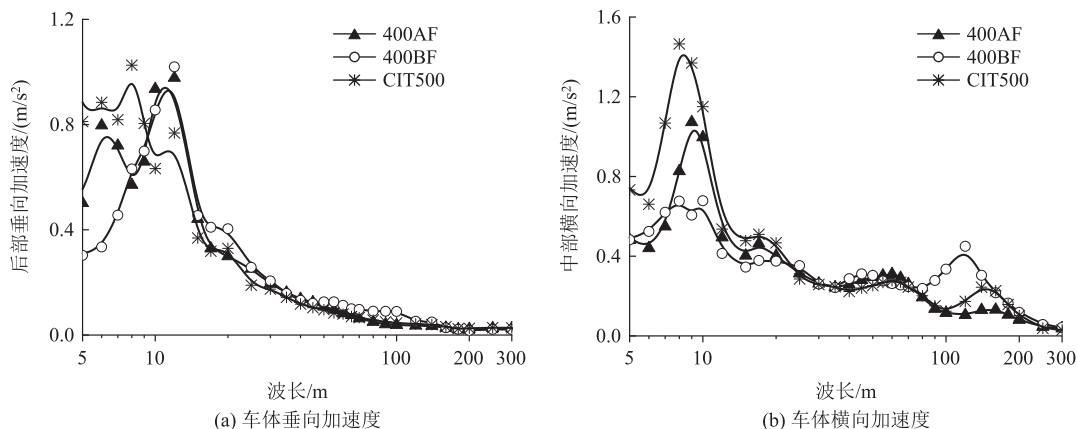


图 6 水平不平顺波长变化对车体加速度的影响图

由图 6 (a) 可知,当轨道不平顺波长为 12 m 时,3 种车型都有明显的峰值出现,对比图 5 (b) 结果可知,此峰值出现的原因在于不平顺除激发了构架刚体模态外,还激发了车体的柔性模态,且车体的柔性振动起到了主要的作用。结合图 6 (b) 可知,动车组 CIT500 和 400BF 在轨道不平顺波长为 8 m 时有明显

峰值,动车组 400AF 在轨道不平顺波长为 9 m 时存在明显峰值,出现峰值原因均与车体柔性模态有关。

2.3 高低不平顺

不同型号动车组车辆系统垂向动力学响应随轨道高低不平顺波长的变化情况如图 7 所示。

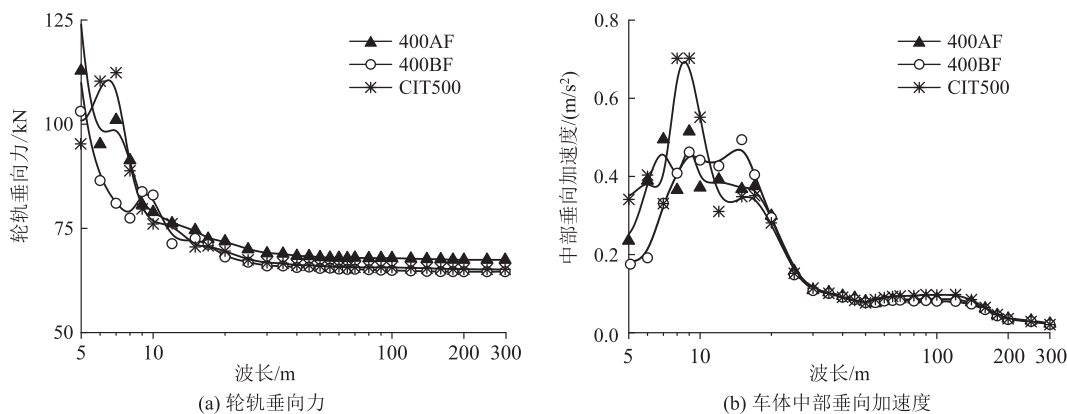


图7 高低不平顺波长变化对车辆垂向动力学性能的影响图

由图7可知,3种车型在波长为9 m时都有明显的峰值,出现该峰值的原因是不平顺激发了车体的某一柔性模态,从而导致车体垂向加速度大幅度放大。除此之外,动车组400AF和CIT500在波长为7 m时也有明显峰值,但动车组400BF没有明显的峰值现象,出现峰值的原因是不平顺激发了车体的柔性模态。由图7(b)可知,在波长范围10~20 m内,3种车型都有

明显的峰值,动车组400AF、400BF、CIT500对应的最不利波长分别为20 m、25 m、20 m。

不同型号动车组车辆系统横向动力学响应如图8所示。动车组400AF和400BF在波长为6 m和12 m时都存在明显的峰值区域,除此之外,动车组400BF在波长为8 m时也存在明显峰值,出现峰值的原因是不平顺激发了车体的柔性模态。

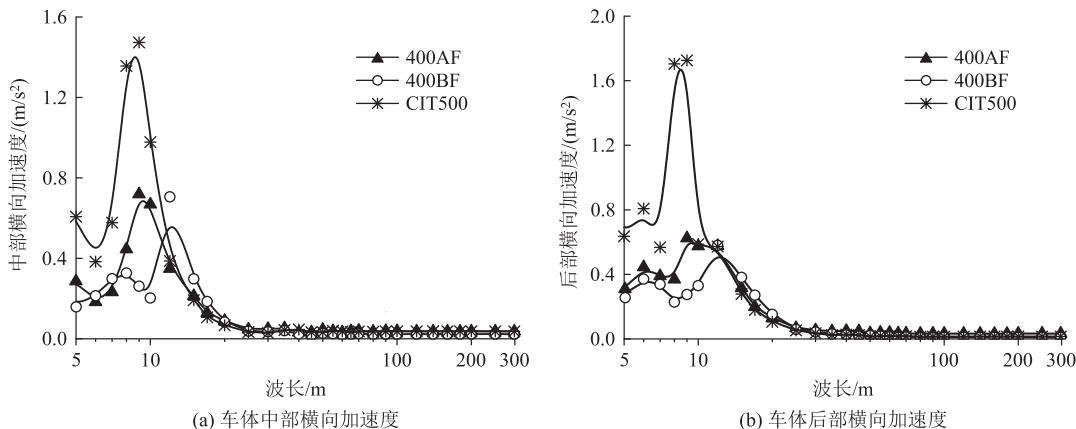


图8 高低不平顺波长变化对车辆横向动力学性能的影响图

3 不同型号动车组在复合轨道不平顺作用下的动力学性能分析

本文以轨道复合不平顺作为系统激励,系统研究不同型号动车组在不同波长轨道复合不平顺作用下车辆的动力学性能,进而研究不同型号动车组在轨道复合不平顺作用下的敏感波长。为避免曲线线路的影响,采用直线线路进行仿真分析,行车速度设置为400 km/h,轨道几何不平顺的幅值4 mm,轨道复合不平顺采用的是方向和水平的复合不平顺。

不同型号动车组轮轨作用力随轨道复合不平顺波长的变化情况如图9所示。

由图9可知,3种车型在波长范围10~20 m、40~70 m内都存在峰值现象。在波长范围10~20 m内,动车组400AF、400BF、CIT500对应的最不利波长都为17 m;在波长范围40~70 m内,动车组400AF、400BF、CIT500对应的最不利波长分别为50 m、55 m、60 m;动车组400BF在波长为120 m处存在明显峰值。上述峰值的出现均与车辆部件的刚体模态有关。除此之外,动车组400AF和CIT500在波长为7 m时有明显峰值,动车组400BF在波长为10 m时有明显的峰值,出现峰值的原因是不平顺激发了车体的柔性模态。

不同型号动车组车体加速度随轨道复合不平顺波长的变化情况如图10所示。

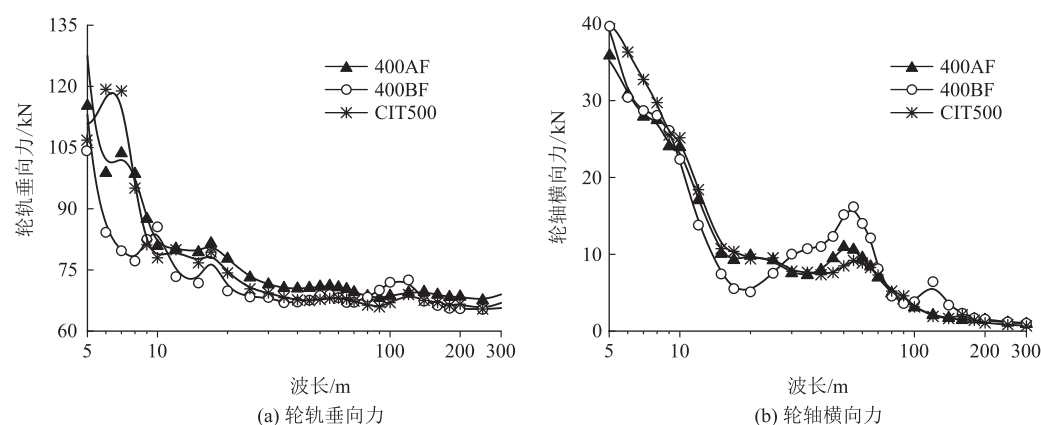


图9 复合不平顺波长变化对轮轨作用力的影响图

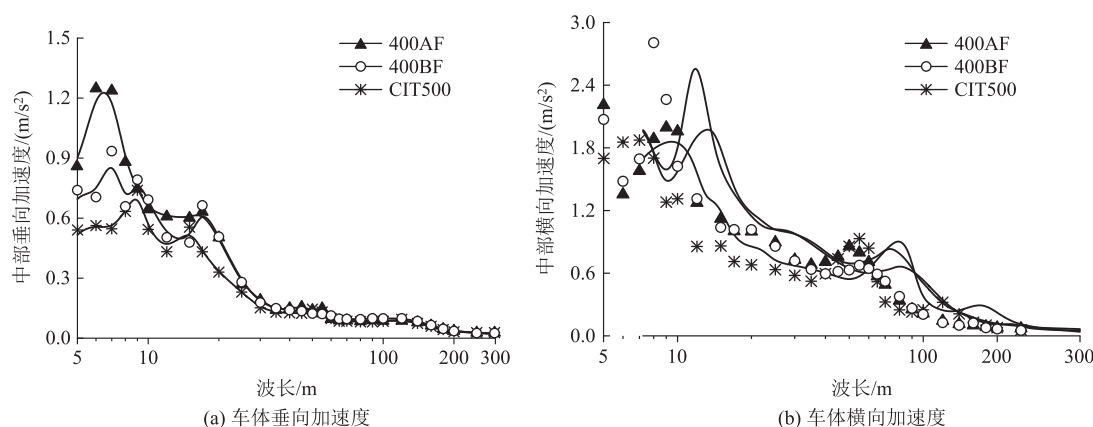


图10 复合不平顺波长变化对车体加速度的影响图

由图10可知,动车组400AF和CIT500在波长为7 m时有明显峰值,和轮轨力响应一样(如图9(b)所示)。3种车型在波长为9 m时有明显峰值,此外,动车组CIT500在波长为8 m时存在明显的峰值,出现上述峰值的原因是不平顺激发了车体的柔性模态。

4 结论

本文通过对比研究不同型号高速动车组车辆动力学性能随轨道几何不平顺波长变化的规律,分析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,得出以下结论:

(1)总体来说,400 km/h高速铁路轨道几何不平顺敏感波长主要存在两个范围,分别为3~10 m的短波范围和10~140 m的中长波范围,短波范围的敏感波长主要与车体的柔性模态有关,中长波范围的敏感波长主要与车辆系统的刚体模态有关。

(2)由于悬挂参数的差异,不同型号动车组对应的轨道几何不平顺敏感波长存在明显差异,在制定线路养护维修标准时,应考虑整条线路上所有运营的动

车组型号。

(3)不同类型轨道几何不平顺的敏感波长存在差异,应针对不同的轨道几何不平顺类型制定相应的敏感波长管理标准。

参考文献:

- [1] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2015. ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupled Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [2] 凌亮. 高速列车-轨道三维刚柔耦合动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015. LING Liang. 3D Rigid-Flexible Coupling Dynamics of High-speed Train/Track System[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [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(3): 1-11.

(下转第114页)

- Design Method for Subgrade Bed of High-speed Railway[J]. China Railway Science, 2005, 26(6):53-57.
- [3] 胡一峰,李怒放. 高速铁路无砟轨道路基设计原理[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.
- HU Yifeng, LI Nufang. Theory of Ballastless Track-Subgrade for High Speed Railway [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [4] 周波,张良,付正道. 高速铁路无砟轨道软岩路堑基床换填厚度研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(3): 73-77.
- ZHOU Bo, ZHANG Liang, FU Zhengdao. Research on Replacement Thickness of Soft Rock Cutting Subgrade Bed of High-speed Railway with Ballastless Track[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(3): 73-77.
- [5] VUCETIC M. Cyclic Threshold Shear Strains in Soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(12): 2208-2228.
- [6] 中铁二院工程集团有限责任公司. 现有高速铁路路基结构技术标准在时速 400 km 条件下的适应性研究[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司,2020.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co.,Ltd. Research on the Adaptability of Existing Technical Standards for High-speed Railway Subgrade under the Condition of 400 km/h[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co.,Ltd.,2020.
- [7] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学(第四版)[M]. 北京:科学出版社,2015.
- ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupled Dynamics (Fourth Edition) [M]. Beijing:China Science Publishing,2015.
- [8] 罗强,张瑞国,谢宏伟,等. 400 km·h⁻¹ 高速铁路无砟轨道基床结构及关键参数研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(2): 34-44.
- LUO Qiang, ZHANG Ruiguo, XIE Hongwei, et al. Structural Analysis and Key Parameter of Ballastless Track Subgrade for 400 km·h⁻¹ High-speed Railway [J]. China Railway Science, 2020, 41(2): 34-44.
- [9] 叶阳升,蔡德钧,魏少伟,等. 高速铁路无砟轨道路基动应力分布特征及解析算法[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(6): 1-9.
- YE Yangsheng, CAI Degou, WEI Shaowei, et al. Distribution Characteristics and Analytical Method of Dynamic Stress on Subgrade of Ballastless Track for High-speed Railway [J]. China Railway Science, 2020, 41(6): 1-9.

(上接第 55 页)

114

- [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 the Irregularity Management Wavelength of High-speed Railway Track with the Speed of 300-350km [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] Ling L, Zhang Q, Xiao X, et al. Integration of Car-body Flexibility into Train-track Coupling System Dynamics Analysis [J]. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2018, 56(4-6):485-505.