【交通物流 / Transportation Logistics】

基于惯性基准法的短波不平顺影响因素研究

徐金辉¹, 许晨霄¹, 冯青松¹, 王浩², 孙魁¹

1) 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 江西南昌 330013;

2) 广州地铁集团有限公司运营事业总部, 广东广州 510310

摘要: 针对轨面短波不平顺敏感因素问题, 利用多体动力学软件 Universal Mechanical 建立车辆-轨道耦合动力学模型, 基于惯性基准法原理仿真检测轨面短波高低不平顺, 分析轨道结构及其关键参数对轨面短波高低不平顺的影响. 分析结果表明, 柔性轨道估算不平顺大于无质量轨道, 最大幅值差为 0.076 mm, 轨道结构振动对轨面短波高低不平顺具有一定影响, 主要影响波长范围为 0.15~0.46 m; 扣件系统垂向刚度对短波不平顺的影响较大, 幅值变化明显, 波长 0.15~0.33 m 内轨道谱随扣件刚度的增大显著增大; 短波不平顺随扣件阻尼、路基支承刚度及路基支承阻尼的增大而减小, 主要影响波长范围分别为 0.27~0.46、0.15~0.33 及 0.28~0.40 m; 短波不平顺随轨枕间距的增大而略增大. 研究成果可为短波不平顺的维护与控制提供理论依据, 为列车运营安全提供保障.

关键词: 铁道工程; 惯性基准法; 短波不平顺; 车辆-轨道耦合动力学; 柔性轨道; 轨道谱

中图分类号: U213.2

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.04347

Influence factors of short-wave irregularity based on inertial reference method

XU Jinhui¹, XU Chenxiao¹, FENG Qingsong¹, WANG Hao², and SUN Kui¹

1) Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise of Ministry of Education,

East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi Province, P. R. China

2) Operation Headquarters, Guangzhou Metro Group Co. Ltd., Guangzhou 510310, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Aiming at the sensitive factors of short wave irregularity on rail surface, the vehicle-track coupling dynamics model is established by using multi-body dynamics software Universal Mechanical. Based on the principle of inertial reference method, the short wave height irregularity of rail surface is simulated and detected. The influence of the track structure and its key parameters on the short wave height irregularity of rail surface is analyzed. The estimated irregularity of flexible track is greater than that of massless track, and the maximum amplitude difference is 0.076 mm; especially, the track spectrum of flexible track within the wavelength range of 0.15-0.46 m is significantly greater than that of massless track, which indicates that the vibration of the track structure has a certain impact on the short wave height irregularity of rail surface, and mainly affects the wavelength of 0.15-0.46 m. The vertical stiffness of the fastener system has a great influence on the short wave irregularity, and its amplitude

Received: 2020-01-16; **Revised:** 2020-08-28; **Accepted:** 2020-11-25; **Online (CNKI):** 2021-06-22

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51808221); Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20181BAB216029); Training Program for Academic and Technical Leaders of Major Disciplines of Jiangxi Province (20194BCJ22008); Key R & D Program of Jiangxi Province (20192BBE50008)

Corresponding author: Professor FENG Qingsong. E-mail: fqshdjtdx@aliyun.com

Citation: XU Jinhui, XU Chenxiao, FENG Qingsong, et al. Influence factors of short-wave irregularity based on inertial reference method [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(4): 347-357. (in Chinese)

changes obviously. The track spectrum in the wavelength range of 0.15-0.33 m increases significantly with the increase of fastener stiffness. The short wave irregularity decreases with the increases of fastener damping, subgrade support stiffness and subgrade support damping. The main wavelength ranges affected are 0.27-0.46, 0.15-0.33 and 0.28-0.40 m, respectively. The short wave irregularity increases slightly with the increase of sleeper spacing. The research results provide theoretical basis for the maintenance and control of short wave irregularity and guarantee the safety of train operation.

Key words: railway engineering; inertial reference method; short wave irregularity; vehicle-track coupling dynamics; flexible track; track spectrum

轨道短波不平顺是轨道不平顺按波长划分的一种类型, 波长小于 1 m 的短波不平顺主要包括轨面擦伤、波纹磨耗、剥离掉块及焊缝不平顺等, 其幅值在 1 mm 以内^[1-2]. 研究认为, 轮轨滚动振动和噪声主要由轮轨表面短波不平顺所激发^[3]; 短波不平顺会引起轮轨间剧烈冲击, 加快车辆与轨道各部件的损伤, 甚至可能导致钢轨和轮轴断裂^[4], 因此, 研究轨面短波不平顺敏感因素对保障行车安全和乘坐舒适具有重要意义.

已有学者针对轨道短波不平顺展开研究. 李浩然^[1]为有效检测短波不平顺, 研制出构架式检测系统. 李再伟等^[4]提出一种基于离散二进制小波的轨道短波不平顺数值模拟方法, 得出 ISO 3095 谱与小波系数的关系, 给出模拟算法流程与步骤. 刘秀波等^[5]针对焊接接头钢轨的短波不平顺, 首次将小波分析方法引入接头轨道谱分析. 朱志辉等^[6]分析短波不平顺对列车-简支梁桥耦合振动的影响. 徐庆元等^[7-8]分析了短波不平顺对列车-板式无砟轨道-桥梁(路基)系统动力特性的影响. 周宇^[9]对城市轨道交通轨面短波不平顺进行实测和检验, 计算短波不平顺水平谱, 分析轨面短波不平顺的特征. 牛留斌等^[10]在分析轮轨力监测数据基础上, 提出从轮轨动态作用能量的角度评价轨道短波不平顺的方法, 达到准确高效查找轨道短波不平顺病害的目的. 以上研究主要针对短波不平顺的检测和数值模拟、车桥耦合振动和评价方法等方面展开, 尚缺乏对其敏感因素的分析, 无法明确轨道结构及其关键参数对短波不平顺的影响.

本研究通过车辆-轨道耦合动力学模型, 基于惯性基准法仿真检测轨面短波高低不平顺, 分析轨道结构振动对短波不平顺的影响; 探讨扣件刚度和阻尼、路基支承刚度和阻尼、轨枕间距对短波不平顺的影响及变化规律; 进而确定了各因素对短波不平顺波长的主要影响范围, 为不平顺的维护控制提供依据.

1 基于惯性基准法估算轨面短波不平顺

1.1 惯性基准法检测原理

基于惯性基准法原理, 仿真检测轨面短波不平顺, 利用加速度计和位移计协同工作的方式, 有效避免弦测法传递函数不为 1 和轴箱加速度积分法精度不足的缺点^[1]. 惯性基准法的原理如图 1, 其中, M 为质量块; A 为加速度计; S 为位移计; K 为弹簧; C 为阻尼; R 为车轮半径. 设 Y 为轨道短波不平顺值, 则 W 为质量块 M 与轴箱的相对位移, Z 为质量块 M 相对惯性基准线的位移.

图 1 惯性基准法原理

Fig. 1 Principle of inertial reference method

由图 1 可知,

$$Y = Z - W - R \quad (1)$$

其中, W 可直接由位移计的输出值计算得出; Z 由加速度计的输出值 a 经二次积分得出, 则式(1)可进一步改写为

$$Y = \iint a dt dt - W - R \quad (2)$$

1.2 车辆模型

本研究所建立的车辆模型参考中国 CRH2 型动车, 仿真检测时选用单个动车, 车辆模型的轮对、构架和车体考虑为刚体; 一系悬挂和二系悬挂中各部件考虑为非刚性体. 模型通过铰连接轴箱与轮

对、通过减振器与弹簧力元连接构架和轴箱. 表 1 为车辆系统的部分关键参数, 图 2 为本研究建立的 CRH2 型动车模型.

表 1 车辆系统参数

Table 1 Vehicle system parameters

参数	数值	参数	数值
车体质量/t	26.1	车轮滚动圆半径/m	0.43
构架质量/t	2.6	车轮滚动圆横向跨距/m	1.493
轮对质量/t	2.1	轮对侧滚转动惯量/ (t·m ²)	0.756
轴长/m	2.382	轮对摇头转动惯量/ (t·m ²)	1.029
轴距/m	2.5	轮对点头转动惯量/ (t·m ²)	0.084
转向架中心距/m	17.5	轮对内侧距/m	1.353

图 2 CRH2 型动车模型
Fig. 2 CRH2 vehicle model

1.3 线路参数设置

本研究设置长度为 500 m 的直线轨道线路, 钢轨类型为中国铁路常用的 60 工字型, 轨底坡为 1/40, 车轮踏面为 LMA 型.

1.4 仿真检测方法的验证

在 Universal Mechanical 软件中建立 CRH2 动车的车辆-无质量轨道耦合系统模型, 通过对比无质量轨道模型反算出的不平顺与输入的不平顺样本, 验证仿真检测方法, 检测流程如图 3. 对短波谱进行离散傅里叶变换得到 500 m 短波高低不平顺样本^[11], 波长范围为 0.1 ~ 1.0 m, 如图 4.

将不平顺样本作为已建立无质量轨道模型的外部输入, 验证左右两股轨道输入相同激励的结果^[12]. 根据轨检车的位移和加速度传感器布设位置, 在计算模型中提取前转向架轴箱的垂向位移和轴箱正上方位置处车体底部的垂向位移和垂向加速度, 由两者的位移差可直接得出 W , 对车体底部垂向加速度进行二次积分, 得到 Z .

本研究检测方法是模拟轨检车的检测原理^[13], 基于惯性基准法的虚拟轨检技术求得无质量轨道短

图 3 仿真检测流程图
Fig. 3 Simulation detection process

图 4 500 m 高低不平顺样本
Fig. 4 Height irregularity sample with length of 500 m

波高低不平顺估算值, 经高通滤波器去除趋势项并与已知不平顺样本进行对比, 计算结果如图 5. 可见, 无质量轨道估算不平顺与不平顺样本的波形、幅值基本重合.

为进一步验证该方法的正确性, 对比软件模拟下的估算不平顺与不平顺样本通过时域的评价指标^[14], 分别以 1 m 和 10 m 数据滑动进行计算得出标准差曲线, 结果见图 6 和表 2.

由图 6 和表 2 可知, 估算不平顺同不平顺样本的标准差波形相似, 当以 1 m 数据滑动计算时, 估算不平顺标准差较不平顺样本的标准差最大减小 0.042 mm, 当以 10 m 数据滑动计算时, 最大减小 0.021 mm. 由于车-轨耦合模型、车体垂向加速度的二次积分及高通滤波等过程对计算结果具有一定干扰, 故认为该差值在合理范围之内, 表明估算不

(a) 短波不平顺幅值

(b) 局部放大图

图 5 无质量轨道估算不平顺与不平顺样本对比
Fig. 5 Comparison of massless track estimated irregularity and irregularity of samples

平顺和不平顺样本的标准差基本一致. 因此, 基于惯性基准法的虚拟轨检技术能够较好估算出短波高低不平顺, 证明了该方法的正确性.

表 2 标准差对比

Table 2 Comparison of standard deviation

里程/m	标准差最大差值/mm		变化率/%	
	1 m	10 m	1 m	10 m
0 ~ 100	-0.036	-0.021	-0.404	-0.193
100 ~ 200	-0.038	-0.019	-0.314	-0.192
200 ~ 300	-0.042	-0.017	-0.385	-0.168
300 ~ 400	-0.042	-0.016	-0.218	-0.126
400 ~ 500	-0.034	-0.018	-0.306	-0.188

2 轨道结构振动对轨面短波高低不平顺的影响

车辆-无质量轨道耦合动力学模型忽略了轨道

(a) 标准差曲线 (1 m 数据滑动)

(b) 局部放大图 (1 m 数据滑动)

(c) 标准差曲线 (10 m 数据滑动)

(d) 局部放大图 (10 m 数据滑动)

图 6 估算不平顺与不平顺样本的标准差曲线
Fig. 6 Comparison of standard deviation between estimated irregularity and irregularity of samples

结构振动, 无法分析轨道结构振动对短波不平顺的影响. 本研究通过柔性轨道模型, 建立车辆-轨道耦合系统刚柔耦合动力学模型.

2.1 柔性轨道模型

柔性轨道包括钢轨、紧固件、轨枕及刚性地基的详细三维模型, 将钢轨视为 Timoshenko 梁模拟, 紧固件模拟为 Bushing 力元, 轨枕模拟为刚体. 结构如图 7. 柔性轨道结构基本参数如表 3.

图 7 柔性轨道结构
Fig. 7 Flexible track structure

表 3 柔性轨道结构基本参数
Table 3 Basic parameters of flexible track structure

参数	数值	参数	数值
钢轨/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	60	地基横向阻尼/ ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	1.0×10^4
弹性模量/MPa	2.1×10^{11}	扣件垂向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	2.0×10^8
地基垂向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	6.0×10^7	扣件横向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	2.8×10^8
地基横向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	1.0×10^7	扣件垂向阻尼/ ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	9.8×10^4
地基垂向阻尼/ ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	9.3×10^4	扣件横向阻尼/ ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	5.9×10^4

2.2 无质量轨道与柔性轨道的对比

将已知不平顺样本作为无质量轨道、柔性轨道模型的外部输入, 对比柔性轨道和无质量轨道的仿真检测结果, 分析轨道结构振动对短波不平顺的影响, 结果如图 8. 可见, 无质量轨道与柔性轨道估算的短波不平顺波形相似, 幅值上差异不明显. 为更直观表述两种轨道不平顺在幅值上的差异, 每 100 m 求幅值差最大值, 并计算其变化率, 结果见表 4. 可见, 无质量轨道与柔性轨道不平顺幅值差的最大值为 0.076 mm, 最大变化率为 2.846%. 无质量轨道模型估算的短波不平顺小于柔性轨道, 但幅值变化较小.

图 8 无质量轨道与柔性轨道不平顺对比
Fig. 8 Comparison of irregularity between massless track and flexible track

表 4 无质量轨道与柔性轨道不平顺的幅值差对比
Table 4 Comparison of amplitude difference between massless track and flexible track

里程/m	幅值差最大值/mm	变化率/%
0 ~ 100	-0.076	1.335
100 ~ 200	-0.068	2.846
200 ~ 300	-0.066	0.709
300 ~ 400	0.076	0.361
400 ~ 500	0.072	0.328

图 9 为柔性轨道与无质量轨道短波不平顺的轨道谱. 可见, 当波长为 0.46 ~ 1.00 m 时, 柔性轨道与无质量轨道的轨道谱相近; 当波长为 0.15 ~ 0.46 m 时, 柔性轨道的轨道谱明显大于无质量轨道. 因此, 轨道结构振动对轨面短波不平顺具有一定影响, 且主要影响波长为 0.15 ~ 0.46 m 的短波不平顺.

图 9 无质量轨道与柔性轨道的轨道谱对比

Fig. 9 Comparison of track spectrum between massless track and flexible track

由以上结论可知,从幅值角度分析时,短波不平顺的幅值变化较小;从轨道谱角度分析时,波长为 0.15~0.46 m 柔性轨道的轨道谱明显大于无质量轨道。轨面短波不平顺在时域波形上主要反映了其整体分布,无法体现波长更短的细节变化,而频域分析能更直观体现不平顺特征,轨道谱密度可以体现不同波长成分对应的不平顺变化情况。因此,在分析短波不平顺时,不能仅从幅值角度分析,还应从轨道谱角度分析波长成分。

3 轨道结构参数对轨面短波高低不平顺的影响

铁路线路在长期运营过程中,轨道结构各部件会随之发生老化或损坏,相应的轨道结构参数会发生改变,进而影响轨面短波不平顺,以下分析轨道结构参数对轨面短波高低不平顺的影响。

3.1 扣件系统的影响

为对比分析扣件参数对轨面短波高低不平顺动态演化的影响,计算了扣件刚度在 30、60 及 90 kN/mm,以及扣件阻尼在 30、75 及 120 kN·s/m 工况下的轨面短波不平顺波形、幅值以及轨道谱的变化情况,结果见图 10 至图 13。

图 10 为不同扣件垂向刚度工况下短波不平顺的幅值对比。可见,3 种工况下的短波不平顺波形相似,幅值变化较大,但幅值并不随扣件刚度的增大单调变化,而是在某些里程处随之增大,某些里程处随之减小。由表 5 中不平顺的幅值差对比结果可知,工况 2 与工况 1 不平顺幅值差的最大值为

(a) 短波不平顺幅值

(b) 局部放大图

图 10 不同扣件垂向刚度下短波不平顺对比

Fig. 10 Comparison of short wave irregularities under different fastener vertical stiffness

图 11 不同扣件垂向刚度下的轨道谱对比

Fig. 11 Comparison of track spectrum under different fastener vertical stiffness

图 12 不同扣件阻尼下短波不平顺对比
Fig. 12 Comparison of short wave irregularity under different fastener damping

图 13 不同扣件阻尼下的轨道谱对比
Fig. 13 Comparison of track spectrum under different fastener damping

-0.205, 最大变化率为 -16.564%; 工况 3 与工况 1 不平顺幅值差的最大值为 -0.258, 最大变化率为 -4.589%。结果表明, 扣件垂向刚度对短波高低不平顺的影响较大。

表 5 不同扣件垂向刚度下的幅值差对比

Table 5 Comparison of amplitude difference under different fastener vertical stiffness

里程/m	工况 2 与工况 1 幅值差		工况 3 与工况 1 幅值差	
	最大值/mm	变化率/%	最大值/mm	变化率/%
0 ~ 100	0.139	-0.831	0.188	-0.824
100 ~ 200	-0.205	-3.646	-0.258	-4.589
200 ~ 300	0.133	-16.564	0.187	-3.729
300 ~ 400	-0.168	-0.951	-0.230	-0.976
400 ~ 500	-0.168	-0.475	-0.235	-0.589

图 11 为不同扣件垂向刚度工况下短波不平顺的轨道谱对比。可见, 当波长为 0.15 ~ 0.33 m 时, 轨道谱随扣件刚度的增大显著增大; 当波长为 0.40 ~ 1.00 m 时, 轨道谱随扣件垂向刚度的增大而减小。

图 12 为不同扣件阻尼工况下短波不平顺的幅值对比。可见, 3 种工况的不平顺波形相似, 幅值变化较小。结合不平顺幅值差对比, 结果如表 6。可见, 工况 2 与工况 1 不平顺幅值差的最大值为 -0.064, 最大变化率为 -0.271%; 工况 3 与工况 1 不平顺幅值差的最大值为 0.096, 最大变化率为 -0.587%。结果表明, 轨面短波高低不平顺随扣件阻尼的增大而减小。

表 6 不同扣件阻尼下的幅值差对比

Table 6 Comparison of amplitude difference under different fastener damping

里程/m	工况 2 与工况 1 幅值差		工况 3 与工况 1 幅值差	
	最大值/mm	变化率/%	最大值/mm	变化率/%
0 ~ 100	0.055	-0.143	0.090	-0.231
100 ~ 200	0.058	-0.182	0.096	-0.291
200 ~ 300	0.053	-0.271	0.087	-0.460
300 ~ 400	0.054	-0.214	0.088	-0.587
400 ~ 500	-0.064	-0.133	-0.109	-0.223

图 13 为不同扣件阻尼工况下短波不平顺的轨道谱对比。可见, 当波长为 0.27 ~ 0.46 m 时, 轨

道谱随扣件阻尼的增大显著减小；在其余波长范围内，3 种工况的轨道谱相近。结果表明，扣件阻尼对短波高低不平顺具有一定影响，主要影响的波长范围为 0.27 ~ 0.46 m。

3.2 路基的影响

为分析路基参数对轨面短波不平顺动态演化的影响，计算了路基支承刚度在 80、100 和 120 kN/mm，以及路基阻尼在 30、80 及 130 kN·s/m 工况下，轨面短波不平顺波形、幅值及轨道谱的变化情况。

图 14 为不同路基支承刚度工况下短波不平顺的幅值对比。可见，3 种工况的短波不平顺波形相似，幅值变化较小。不同路基支承刚度下的幅值差对比结果如表 7。可见，工况 2 与工况 1 不平顺幅值差的最大值为 -0.053，最大变化率为 -2.110%；工况 3 与工况 1 不平顺幅值差的最大值为 0.097，最大变化率为 -0.866%。结果表明，轨面短波高低不平顺随路基支承刚度的增大而减小。

图 14 不同路基支承刚度下短波不平顺对比

Fig. 14 Comparison of short wave irregularity under different subgrade support stiffness

表 7 不同路基支承刚度下的幅值差对比

Table 7 Comparison of amplitude difference under different subgrade support stiffness

里程/m	工况 2 与工况 1 幅值差		工况 3 与工况 1 幅值差	
	最大值/mm	变化率/%	最大值/mm	变化率/%
0 ~ 100	0.045	-0.223	-0.079	-0.866
100 ~ 200	0.044	-0.326	-0.081	-0.542
200 ~ 300	-0.042	-2.110	-0.073	-0.337
300 ~ 400	-0.045	-0.269	-0.080	-0.223
400 ~ 500	-0.053	-0.161	0.097	-0.552

图 15 为不同路基支承刚度工况下短波不平顺的轨道谱对比。可见，当波长为 0.15 ~ 0.33 m 时，轨道谱随路基支承刚度的增大而显著增大；当波长为 0.33 ~ 1.00 m 时，轨道谱随路基支承刚度的增大而略有减小。结果表明，路基支承刚度对短波高低不平顺具有一定影响，主要影响的波长范围为 0.15 ~ 0.33 m。

图 15 不同路基支承刚度下的轨道谱对比

Fig. 15 Comparison of track spectrum under different subgrade support stiffness

图 16 为不同路基阻尼工况下短波不平顺的幅值对比。可见，3 种工况的短波不平顺波形相似，幅值变化较小。不同路基阻尼下的幅值差对比结果如表 8，工况 2 与工况 1 不平顺幅值差的最大值为 -0.047，最大变化率为 -0.324%；工况 3 与工况 1 不平顺幅值差的最大值为 -0.084，最大变化率为 -0.370%。结果表明，轨面短波高低不平顺随路基阻尼的增大而减小。

(a) 短波不平顺幅值

(b) 局部放大图

图 16 不同路基阻尼下短波不平顺对比

Fig. 16 Comparison of short wave irregularity under different subgrade damping

表 8 不同路基阻尼下的幅值差对比

Table 8 Comparison of amplitude difference under different subgrade damping

里程/m	工况 2 与工况 1 幅值差		工况 3 与工况 1 幅值差	
	最大值/mm	变化率/%	最大值/mm	变化率/%
0 ~ 100	0.039	-0.105	0.068	-0.183
100 ~ 200	-0.042	-0.324	0.072	-0.233
200 ~ 300	0.039	-0.219	0.065	-0.370
300 ~ 400	0.039	-0.173	0.067	-0.289
400 ~ 500	-0.047	-0.100	-0.084	-0.185

图 17 为不同路基阻尼工况下短波不平顺的轨道谱对比. 可见, 当波长为 0.28 ~ 0.40 m 时, 轨道谱随路基阻尼的增大而显著减小; 在其余波长范围内, 3 种工况的轨道谱相近. 结果表明, 路基阻尼对短波

图 17 不同路基阻尼下的轨道谱对比

Fig. 17 Comparison of track spectrum under different subgrade damping

高低不平顺具有一定影响, 主要影响的波长范围为 0.28 ~ 0.40 m.

3.3 轨枕间距的影响

为对比分析轨枕间距对轨面短波不平顺动态演化的影响, 计算了每公里轨枕为 1 667、1 760 及 1 840 根时, 即轨枕间距分别为 0.600、0.568 及 0.543 m 时, 轨面短波不平顺波形、幅值及轨道谱的变化情况.

图 18 为不同轨枕间距工况下, 短波不平顺的幅值对比. 可见, 3 种工况的轨道不平顺波形相似, 幅值变化较小. 不同轨枕间距下的幅值差对比结果如表 9, 可见, 工况 2 与工况 1 不平顺幅值差的最大值为 0.046, 最大变化率为 -5.399%; 工况 3 与工况 1 不平顺幅值差的最大值为 0.072, 最大变化率为 -2.559%. 结果表明, 轨面短波高低不平顺随轨枕间距的增大而增大.

表 9 不同轨枕间距下的幅值差对比

Table 9 Comparison of amplitude difference under different sleeper spacing

里程/m	工况 2 与工况 1 幅值差		工况 3 与工况 1 幅值差	
	最大值/mm	变化率/%	最大值/mm	变化率/%
0 ~ 100	0.045	-5.399	0.061	-0.233
100 ~ 200	0.046	-3.305	0.062	-0.352
200 ~ 300	0.043	-0.214	0.057	-0.615
300 ~ 400	0.046	-0.424	0.072	-0.200
400 ~ 500	0.045	-0.392	0.056	-2.559

图 19 为不同轨枕间距工况下短波不平顺的轨道谱对比. 可见, 在全波长范围内, 3 种工况的轨

图 18 不同轨枕间距下短波不平顺对比

Fig. 18 Comparison of short wave irregularity under different sleeper spacing

图 19 不同轨枕间距下的轨道谱对比

Fig. 19 Comparison of track spectrum under different sleeper spacing

道谱密度相近, 波长 0.15 ~ 0.32 m 的轨道谱随轨枕间距的增大而略减小; 波长 0.33 ~ 1.00 m 的轨道谱随轨枕间距的增大而略增大. 结果表明, 轨枕间距对短波高低不平顺的影响较小.

4 结 论

本研究通过 Universal Mechanical 软件建立车辆-轨道耦合动力学模型, 基于惯性基准法仿真检测轨面短波高低不平顺, 分析轨道结构振动及其关键参数对短波不平顺的影响及其变化规律, 得到以下结论.

1) 柔性轨道估算不平顺大于无质量轨道, 最大幅值差为 0.076 mm; 尤其是波长 0.15 ~ 0.46 m 柔性轨道的轨道谱明显大于无质量轨道, 即轨道结构振动对短波不平顺具有一定影响, 主要影响波长范围为 0.15 ~ 0.46 m.

2) 扣件系统垂向刚度对短波不平顺的影响较大, 幅值不随扣件刚度的增大而单调增大或减小, 而是在某些里程处随之增大, 某些里程处则随之减小; 波长为 0.15 ~ 0.33 m 的轨道谱随扣件刚度的增大而显著增大, 波长为 0.40 ~ 1.00 m 时随扣件刚度的增大而减小.

3) 短波不平顺随扣件阻尼、路基支承刚度及路基支承阻尼的增大而减小, 主要影响的波长范围分别为 0.27 ~ 0.46、0.15 ~ 0.33 及 0.28 ~ 0.40 m.

4) 短波不平顺随轨枕间距的增大而略增大, 全波长范围内轨道谱密度相近.

以上研究结果可为短波不平顺的维护与控制提供理论依据, 可为列车运营安全提供保障.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808221); 江西省自然科学基金资助项目(20181BAB216029); 江西省主要学科学术和技术带头人培养计划资助项目(20194BCJ22008); 江西省重点研发计划资助项目(20192BBE50008)

作者简介: 徐金辉(1987—), 华东交通大学讲师、博士. 研究方向: 轨道不平顺、轨道动力学. E-mail: xjh1021@126.com

引 文: 徐金辉, 许晨霄, 冯青松, 等. 基于惯性基准法的短波不平顺影响因素研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(4): 347-357.

参考文献 / References:

- [1] 李浩然. 轨道短波不平顺检测技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.
- LI Haoran. Research on short-wavelength track irregularity detection technology [D]. Beijing: China Academy of

- Railway Sciences, 2019. (in Chinese)
- [2] 魏世斌, 刘伶萍, 刘维桢, 等. 提速线路轨道长波不平顺检测技术[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(2): 141-144.
- WEI Shibin, LIU Lingping, LIU Weizhen, et al. Technology for the measurement of long-wavelength track irregularity of speed-up railway [J]. China Railway Science, 2010, 31(2): 141-144. (in Chinese)
- [3] NIELSEN J C O, EKBERG A. Acceptance criterion for rail roughness level spectrum based on assessment of rolling contact fatigue and rolling noise [J]. Wear, 2011, 271(1): 319-327.
- [4] 李再伟, 雷晓燕, 高亮. 轨道短波不平顺数值模拟新方法[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(1): 37-45.
- LI Zaiwei, LEI Xiaoyan, GAO Liang. New numerical simulation method of shortwave track irregularity [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(1): 37-45. (in Chinese)
- [5] 刘秀波, 吴卫新. 钢轨焊接接头短波不平顺功率谱分析[J]. 中国铁道科学, 2000(2): 28-36.
- LIU Xiubo, WU Weixin. PSD analysis of shortwave irregularity on welded joints [J]. China Railway Science, 2000(2): 28-36. (in Chinese)
- [6] 朱志辉, 王力东, 杨乐, 等. 轨道不平顺短波分量对列车-简支梁桥耦合振动的影响[J]. 湖南大学学报自然科学版, 2016, 43(1): 53-60.
- ZHU Zhihui, WANG Lidong, YANG Le, et al. Effect of short-wavelength components in rail irregularity on the coupled dynamic responses of train and simple-supported bridge [J]. Journal of Hunan University Natural Sciences, 2016, 43(1): 53-60. (in Chinese)
- [7] 徐庆元. 短波随机不平顺对列车-板式无砟轨道-桥梁系统动力特性影响[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 132-137.
- XU Qingyuan. Influence of short-wave random irregularity on the dynamic characteristics of train-slab track-bridge system [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 132-137. (in Chinese)
- [8] 徐庆元, 曹扬风, 周小林. 短波随机不平顺对列车-板式无砟轨道-路基系统振动特性的影响[J]. 中南大学学报自然科学版, 2011, 42(4): 1105-1110.
- XU Qingyuan, CAO Yangfeng, ZHOU Xiaolin. Influence of short-wave random irregularity on vibration characteristic of train-slab track-subgrade system [J]. Journal of Central South University Science and Technology, 2011, 42(4): 1105-1110. (in Chinese)
- [9] 周宇. 城市轨道交通轨面短波不平顺水平谱分析[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(4): 18-22, 32.
- ZHOU Yu. Analysis of rail surface roughness level spectrum for urban rail transit [J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(4): 18-22, 32. (in Chinese)
- [10] 牛留斌, 李谷, 刘金朝, 等. 轮轨力在轨道短波不平顺检测中的应用[J]. 铁道建筑, 2019, 59(8): 133-139.
- NIU Liubin, LI Gu, LIU Jinzhao, et al. Application of the wheel-rail force in track short wave irregularity detection [J]. Railway Engineering, 2019, 59(8): 133-139. (in Chinese)
- [11] 田国英, 高建敏, 赵春发. 铁路轨道不平顺谱研究进展[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(9): 35-40, 81.
- TIAN Guoying, GAO Jianmin, ZHAO Chunfa. Progress in the research on the railway track irregularity power spectral density [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(9): 35-40, 81. (in Chinese)
- [12] 郭宝儒. 基于惯性基准法的大跨度桥上轨道高低不平顺估算[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- GUO Baoru. Estimation of track height irregularities on long-span bridges based on inertial reference method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [13] 熊仕勇. 轨道不平顺检测系统中关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- XIONG Shiyong. Research on key technology in track irregularity detection system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [14] 李帅, 易杨明, 王源, 等. 基于惯性基准法的高速铁路纵断面线形平顺性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(8): 1901-1910.
- LI Shuai, YI Yangming, WANG Yuan, et al. Study on profile line regularity based on the inertial reference method in high-speed railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(8): 1901-1910. (in Chinese)
- 【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】