doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2022.02.018

基于惯性基准法的轨道高低 不平顺影响分析

刘堂辉1,刘锦辉2,冯青松3,许晨霄3,刘文武1,罗信伟1

- (1. 广州地铁设计研究院股份有限公司,广州 510010; 2. 深圳市地铁集团有限公司,深圳 518026;
 - 3. 华东交通大学 铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 南昌 330013)

摘 要: 为研究轨道结构敏感因素对中长波高低不平顺的影响,建立了车辆—轨道耦合模型,基于惯性基准法仿真检测轨道高低不平顺,分析了轨道结构振动及不同扣件刚度、路基支承刚度和轨枕间距对高低不平顺的影响。结果表明: 在波长 2~6 m 范围内,柔性轨道估算不平顺明显大于无质量轨道不平顺; 从时域角度分析时,扣件刚度、路基支承刚度和轨枕间距对高低不平顺影响较小,而从频谱角度分析时,轨道谱变化明显且主要影响波长 2~4 m、2~10 m、2~3 m 范围内的高低不平顺。因此,分析轨道不平顺的分布特征及其发展变化规律时,应结合幅值和轨道谱角度综合分析。

关键词: 轨道交通; 惯性基准法; 高低不平顺; 车辆-轨道动力学; 敏感因素

中图分类号: U213.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-6073(2022)02-0117-07

Influence Analysis of Track Longitudinal Irregularity Based on Inertial Reference Method

LIU Tanghui¹, LIU Jinhui², FENG Qingsong³, XU Chenxiao³, LIU Wenwu¹, LUO Xinwei¹

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010; 2. Shenzhen Metro Group Co., Ltd., Shenzhen 518026; 3. Engineering Research Center of Railway Environmental Vibration and Noise, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013)

Abstract: To study the influence of track structure-sensitive factors on medium-and long-wave longitudinal irregularities, a vehicle track coupling model was established. Based on the inertial reference method, the track longitudinal irregularity is simulated and detected. The influence of track structure vibration and different fastener stiffness, subgrade support stiffness, and sleeper spacing on the longitudinal irregularity are analyzed. The results show that the estimated irregularity of the flexible track is significantly larger than that of the massless track in the wavelength range of $2\sim6$ m. From the perspective of the time domain, the fastener stiffness, subgrade support stiffness, and sleeper spacing have little influence on the longitudinal irregularity; from the perspective of frequency spectrum, the track spectrum changes and affects the longitudinal irregularity in the wavelength range of $2\sim4$ m, $2\sim10$ m, and $2\sim3$ m. Therefore, the analysis of the distribution characteristics and development of track irregularities should be combined with the amplitude and track spectrum angle.

Keywords: rail transit; inertial reference method; longitudinal irregularity; vehicle-track dynamics; sensitivity factor

收稿日期: 2021-04-06 修回日期: 2021-09-09

第一作者: 刘堂辉, 男, 本科, 高级设计师, 主要从事轨道交通设计工作, liutanghui@dtsjy.com

基金项目: 江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(20194BCJ22008); 江西省重点研发计划(20192BBE50008)

引用格式: 刘堂辉, 刘锦辉, 冯青松, 等. 基于惯性基准法的轨道高低不平顺影响分析[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(2): 117-123. LIU Tanghui, LIU Jinhui, FENG Qingsong, et al. Influence analysis of track longitudinal irregularity based on inertial reference method[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 117-123.

随着城市轨道交通的高速化, 列车运行的舒适性 及安全性有了更高的要求,轨道结构应具有高平顺性、 高稳定性。线路运营一段时间后, 轨道几何状态会发 生改变,为保证轨道的平顺性应进行定期检测[1]。轨 道几何状态检测方法有静态检测和动态检测两种,静 态检测是利用人工或轨检小车在无轮载作用下的轨道 质量检测,动态检测是利用轨检车在列车车轮荷载作用 下对轨道质量的快速检测[2]。轨道动态不平顺对列车安 全、车辆振动及轮轨相互作用力产生重要影响,因此, 目前轨道质量评估中主要采用轨检车检测动态不平顺 评价轨道平顺状态[3],然而,车辆运行时会导致轨道结 构发生动态变形,从而影响动态不平顺的检测结果。

郭宇等[4]通过建立无砟轨道—路基力学模型,研 究了不同形式的路基沉降与轨面变形间的映射关系。 蔡小培等[5]针对高铁板式无砟轨道结构,分析了地面 沉降对轨道平顺性的影响规律。陈兆玮等[6-8]研究了桥 墩沉降引起轨道不平顺对行车的影响。以上主要对轨 道下部结构的变形、沉降等引起的静态不平顺进行研 究, 然而, 现有研究缺乏轨道结构敏感因素对高低不 平顺的影响分析。

本文通过多体动力学软件 Universal Mechanical 建立车辆-轨道动力学模型,基于惯性基准法原理计 算轨道高低不平顺。分析轨道结构振动及扣件垂向刚 度、路基支承刚度、轨枕间距对中长波高低不平顺的 影响及变化规律。

1 惯性基准法估算轨道高低不平顺

1.1 惯性基准法原理

目前,世界各国用来测量高低不平顺的方法可归 纳为弦测法和惯性基准法两大类[3]。弦测法有夸大、 缩小、不能反映出实际不平顺的正负方向等严重缺陷, 由于惯性基准法解决了"振动质量法"和"轴箱加速 度积分法"不能满足需测波长范围要求等问题,克服 了弦测法的严重缺陷,能够如实反映实际轨道不平顺, 因此, 各国铁路部门主要采用惯性基准法测量轨道不 平顺。本文估算轨道高低不平顺也采用惯性基准法, 当车轮与钢轨保持相互接触时,车轮轴箱的垂向位移 H 即为轨道高低不平顺 n,等于车体垂向位移 Z 和车 体与轴箱间的相对位移 W之和; 车体相对于惯性基准 线位移 Z 通过加速度传感器测出车体垂向加速度 Z, 对其进行二次积分所得:车体与轴箱间的相对位移W, 可通过车体与轴箱相对惯性基准线的位移得出。

$$\eta = H = Z + W = \iint \ddot{Z} dt dt + W \tag{1}$$

提取 Z 和 W 数据结果之后,则可通过公式(1)计 算得到轨道高低不平顺 $n^{[9]}$ 。

1.2 车辆模型

通过多体动力学软件 UM 建立车辆模型,该车辆 模型由一个车体和两个转向架子系统组成,其中转向架 子系统由一个构架、两个轮对和 4 个轴箱构成,构架与 轮对之间有一系悬挂, 车体和构架之间有二系悬挂。轮 对与轴箱之间通过铰连接,轴箱与构架之间通过弹簧力 元、减振器连接。车辆模型部分参数如表 1 所示, UM 中建立的转向架及6辆编组B型车如图1所示。

表 1 车辆系统参数 Table 1 Vehicle system parameters

参数	量值	参数	量值
车体质量/t	21.92	车体点头转动惯量/(t·m²)	617.31
构架质量/t	2.55	构架点头转动惯量/(t·m²)	1.750
轮对质量/t	1.42	轮对点头转动惯量/(t·m²)	0.097
轴重/t	14	转向架中心距/m	17.5
轴距/m	2.5	车轮踏面	LMA

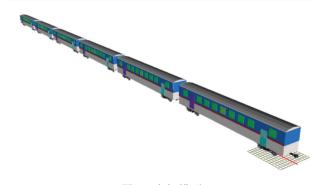
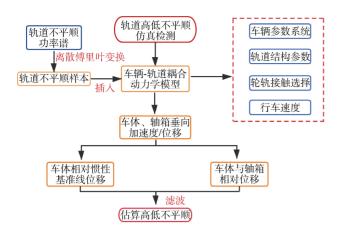


图 1 车辆模型 Figure 1 Vehicle model

1.3 高低不平顺计算方法的验证

无质量轨道是将轨道视为无质量的力元, 可用于 优化和检验所建立模型的正确性, 仿真检测高低不平 顺流程如图 2 所示。选用德国低于扰谱离散傅里叶变 换后的 1 km 高低不平顺样本作为激励,通过不平顺样 本与无质量轨道仿真计算出的不平顺作对比可以验证 估算方法的正确性,不平顺样本如图 3 所示,波长范 围为 2~100 m。

将高低不平顺样本作为外部激励,导入 UM 中建 立的车辆——无质量轨道耦合模型进行动力学分析, 计 算轴箱和车体底部对应轴箱位置处的加速度、位移, 计算结果如图 4 所示。



估算高低不平顺流程

Figure 2 Estimating longitudinal irregularity process

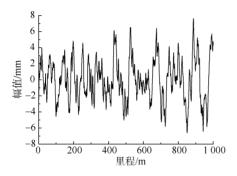
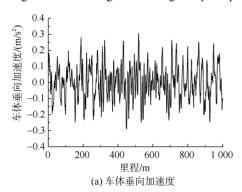
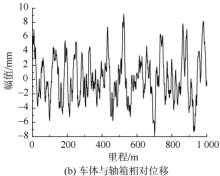


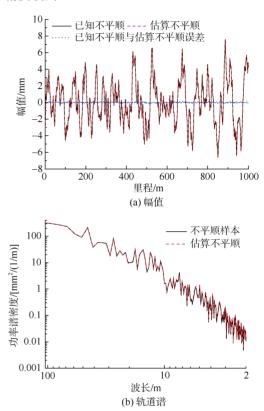
图 3 1 km 高低不平顺样本 Figure 3 1 km longitudinal irregularity sample





动力学计算结果 Figure 4 Dynamic calculation results

根据惯性基准法原理,由式(1)得出高低不平顺估 算值,将估算不平顺与样本的幅值、轨道谱进行对比, 如图 5 所示。分析图 5(a)可知, 估算不平顺与样本的 波形、幅值基本重合,两者幅值差最大值为 0.164 mm; 分析图 5(b)可知, 从频谱角度分析时两者轨道谱几乎 一致。因此,惯性基准法估算高低不平顺的方法较好, 计算精度较高。



不平顺样本与估算不平顺对比

Figure 5 Comparison between irregularity sample and estimated irregularity

轨道结构振动对高低不平顺的影响

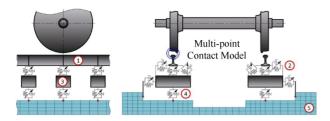
2.1 柔性轨道模型

在软件 UM 中,柔性轨道模型将钢轨视为 Timoshenko 梁, 扣件模拟为 Bushing 力元, 轨枕模拟为刚 体,模型如图 6 所示,结构主要参数如表 2 所示。

2.2 无质量轨道与柔性轨道对比

为探究轨道结构振动对动态高低不平顺的影响, 建立车辆——无质量轨道、车辆——柔性轨道耦合模型, 在已知 1 km 不平顺样本激励的情况下,计算无质量轨 道、柔性轨道高低不平顺, 计算结果如图 7 所示。

分析图 7 可知, 柔性轨道与无质量轨道高低不平 顺波形相似,幅值上差异不明显。为更直观地分析两 种不平顺在幅值上的差异,每200m数据为一段求幅 值差最大值,对比结果如表3所示。



1-钢轨; 2-扣件; 3-半轨枕; 4-半轨枕垫; 5-刚性地基

图 6 半刚性轨枕柔性轨道模型

Figure 6 Semi rigid sleeper flexible track model

表 2 柔性轨道结构参数

Table 2 Structural parameters of flexible track

参数	数值	参数	数值
钢轨/(kg/m)	60	扣件垂向阻尼/(Ns/m)	5.0×10^{4}
轨枕间距/m	0.6	路基垂向刚度/(N/m)	8.0×10^{7}
扣件垂向刚度/(N/m)	6.0×10^{7}	路基垂向阻尼/(Ns/m)	1.0×10 ⁵

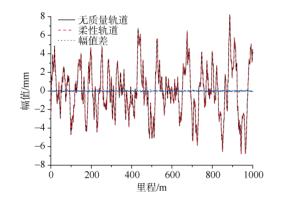


图 7 无质量与柔性轨道估算不平顺对比 Figure 7 Comparison of estimated irregularity between massless track and flexible track

表 3 柔性轨道与无质量轨道不平顺幅值差对比 Table 3 Comparison of irregularity amplitude differences between flexible track and massless track

里程/m	幅值差			
	最大值/mm	变化率/%		
0 ~ 200	-0.154	29.04		
200 ~ 400	0.157	35.80		
400 ~ 600	0.150	5.48		
600 ~ 800	-0.133	2.51		
800 ~ 1 000	-0.165	8.49		

由表 3 可知, 柔性轨道与无质量轨道不平顺幅值 差最大值为 0.157 mm, 最大变化率为 35.80%。由此 得出,柔性轨道模型估算得出的高低不平顺大于无质 量轨道模型, 其原因为无质量轨道下部结构较简化, 钢轨采用力元直接支承, 而柔性轨道的钢轨下部有半 轨枕及刚性地基支承,后者荷载传递性更好且能真实 反映轨道平顺性。为分析轨道结构振动对不同波长范 围内高低不平顺的影响,计算了两种轨道模型下的轨 道谱,如图8所示。

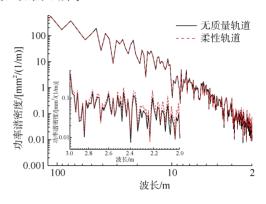


图 8 无质量轨道与柔性轨道的轨道谱对比 Figure 8 Comparison of track spectra between massless track and flexible track

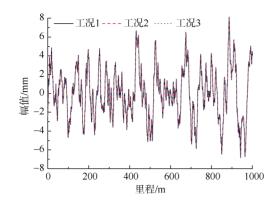
图 8 从轨道谱的角度分析了无质量轨道与柔性轨 道动态高低不平顺的差异,在波长6~120 m 范围内, 无质量轨道与柔性轨道的轨道谱相近,柔性轨道稍小 于无质量轨道的轨道谱; 在波长 2~6 m 范围内, 柔性 轨道轨道谱明显大于无质量轨道谱, 即表明轨道结构 振动对高低不平顺具有一定影响,且主要影响波长 2~6 m 范围内的高低不平顺。

结构敏感参数对高低不平顺的影响

线路在长期运营过程中, 轨道结构部件老化会 引起轨道结构参数改变;另一方面,不同的线路, 其轨道结构参数设计也不同,结构参数的不同对高 低不平顺发展趋势的影响有所不同。本文分析了扣 件垂向刚度、路基支承刚度、轨枕间距对高低不平 顺的影响。

3.1 扣件垂向刚度的影响

在轨道结构中, 扣件系统的作用是连接钢轨与轨 枕,并提供轨道系统弹性的主要部件[10]。当线路运营 一段时间后, 扣件会发生松动或脱落, 从而导致扣件 刚度发生变化[11]。本文设置了3种扣件垂向刚度工况。 工况 1: 3.0×10⁷ N/m; 工况 2: 6.0×10⁷ N/m; 工况 3: 9.0×10⁷ N/m, 3 种工况计算得出的高低不平顺如图 9 所示。



不同扣件刚度下高低不平顺对比 Figure 9 Comparison of longitudinal irregularity under different fastener stiffness

图 9 从幅值角度分析了 3 种扣件垂向刚度工况下 的轨道动态高低不平顺。由图 9 可知, 3 种工况下轨 道不平顺波形相似,幅值差异不明显。为了更直观地 分析 3 种工况下高低不平顺的差异, 文中以工况 1 为 基准, 计算了 3 种工况下高低不平顺的幅值差, 如 表 4 所示。

表 4 不同扣件刚度下不平顺幅值差对比 Table 4 Comparison of irregularity amplitude difference under different fastener 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	增大率/%
0~100	-0.058	-3.01	-0.048	-6.09
100 ~ 200	-0.047	-1.39	-0.056	-4.34
200 ~ 300	0.041	-0.95	0.040	-0.98
300 ~ 400	-0.039	-1.18	-0.057	-1.72
400 ~ 500	0.045	-0.70	0.048	-2.30

分析表 4 可知, 工况 2 与工况 1 不平顺幅值差最 大变化率为-3.01%, 工况 3 与工况 1 不平顺幅值差最 大变化率为-6.09%,即轨道高低不平顺随扣件垂向刚 度的增大而减小, 但幅值变化较小。为了分析扣件刚 度在不同波长成分范围内对高低不平顺的影响,计算 了轨道谱,如图 10 所示。

图 10 从轨道谱角度分析了 3 种工况的轨道高低 不平顺, 在波长 4~120 m 范围内, 3 种工况轨道谱 相近: 在波长 2~4 m 范围内, 可以较为明显地看出 轨道谱随着扣件垂向刚度的增大而减小。

综上可知,扣件垂向刚度对高低不平顺幅值的影 响较小,而从轨道谱角度分析时,在波长 2~4 m 范围 内, 高低不平顺随着扣件垂向刚度的增大而减小。其 原因为长波不平顺幅值大,中波幅值小,由于中波的 幅值变化被长波覆盖,导致从幅值角度无法准确分析 扣件的影响。因此,应结合幅值与轨道谱分析结构敏 感参数对不平顺的影响。

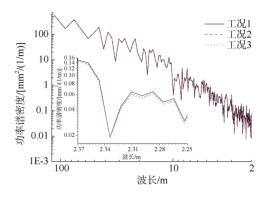
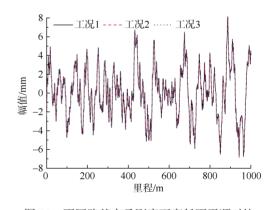


图 10 不同扣件刚度下轨道谱对比 Figure 10 Comparison of track spectra under different fastener stiffness

3.2 路基支承刚度的影响

路基承受列车运行的动荷载及轨道结构的静荷 载,并将承受的荷载传递至地基深处。路基受到自然 因素影响及列车在长期荷载运营下,路基刚度会发生 改变。本文设置了3种路基支承刚度工况。工况1: 4.0×10⁷ N/m; 工况 2: 8.0×10⁷ N/m; 工况 3: 1.2×10⁸ N/m。 3 种工况下轨道高低不平顺对比分析结果如图 11、 表 5 所示, 轨道谱对比结果如图 12 所示。



不同路基支承刚度下高低不平顺对比 Figure 11 Comparison of longitudinal irregularity under different subgrade support stiffness

分析图 11 和表 5 可知, 工况 2 与工况 1 高低不平 顺幅值差最大变化率为-8.44%, 工况 3 与工况 1 高低 不平顺幅值差最大变化率为-12.96%,即轨道高低不 平顺随路基支承刚度的增大而减小。

分析图 12 可知, 在波长 10~120 m, 3 种工况轨 道谱相近; 在波长 2~10 m 范围内, 轨道谱变化较为

明显且随路基支承刚度的增大而减小。由此表明,路 基支承刚度对动态高低不平顺具有一定影响,且主要 影响波长 2~10 m。

表 5 不同路基支承刚度下不平顺幅值差对比 Table 5 Comparison of irregularity 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 ~ 200	-0.075	-8.44	-0.124	-12.96
200 ~ 400	0.094	-2.91	0.141	-3.32
400 ~ 600	0.085	-2.30	0.107	-2.88
600 ~ 800	-0.081	-1.39	0.099	-1.73
800 ~ 1 000	-0.102	-2.19	0.108	-2.33

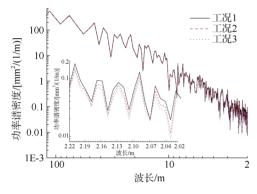


图 12 不同路基支承刚度下轨道谱对比 Figure 12 Comparison of track spectra under different subgrade support stiffness

轨枕间距的影响 3.3

轨枕间距作为轨道结构的重要参数,不同的轨枕 间距会造成不同的轨道结构刚度不平顺,对车辆—轨 道系统具有不同的动力响应。本文设置了3种轨枕间 距工况。工况 1: 0.6 m; 工况 2: 0.625 m; 工况 3: 0.65 m。3 种工况下轨道高低不平顺分析对比结果如图 13、表 6 所示, 轨道谱对比结果如图 14 所示。

分析图 13、表 6 可知, 工况 2 与工况 1 不平顺幅 值差最大变化率为 4.57%, 工况 3 与工 1 不平顺幅值 差最大变化率为 8.59%, 即轨道高低不平顺随轨枕间 距的增大而增大, 幅值总体上存在较大的变化。

分析图 14 可知, 在波长 3~120 m 范围内, 3 种 工况轨道谱相近; 在波长 2~3 m 范围内, 可以明显看 出轨道谱随轨枕间距的增大而增大。轨道高低不平顺 随轨枕间距增大的原因为:随着轨枕间距的增大同一 路段的轨枕数会减少,与此同时,共同承受车辆荷载 的轨枕数减少,进而每根轨枕承受的荷载加大、行车 平稳性降低、动荷载增大, 最终导致轨道高低不平顺 增大。

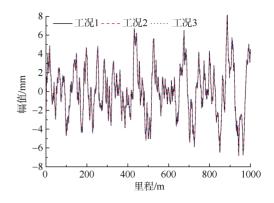
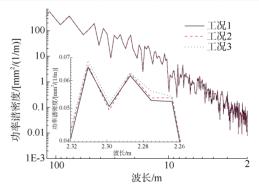


图 13 不同轨枕间距下高低不平顺对比 Figure 13 Comparison of longitudinal irregularity under different sleeper spacing

不同轨枕间距下不平顺幅值差对比 Table 6 Comparison of irregularity 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/%	
0~200	0.038	2.28	0.047	4.08	
200 ~ 400	0.048	4.57	0.062	8.59	
400 ~ 600	0.040	1.01	0.043	3.69	
600 ~ 800	0.042	0.09	0.047	1.40	
800 ~ 1 000	0.038	1.04	0.040	1.58	



不同轨枕间距下轨道谱对比 Figure 14 Comparison of track spectra under different sleeper spacing

结语 4

本文通过多体动力学软件 UM 建立车辆一轨道耦 合动力学模型,基于惯性基准法估算轨道高低不平顺, 分析了轨道结构振动及扣件系统垂向刚度、路基支承 刚度、轨枕间距等敏感因素对高低不平顺的影响, 主 要结论如下:

- 1) 柔性轨道与无质量轨道高低不平顺幅值差最 大值为 0.157 mm, 最大变化率为 35.80%; 在波长 2~ 6 m 范围内, 柔性轨道轨道谱明显大于无质量轨道, 即表明轨道结构振动对高低不平顺有一定影响,且主 要影响波长 2~6 m。
- 2) 轨道高低不平顺随扣件垂向刚度和路基支承 刚度的增大而减小,主要影响的波长范围分别为 2~ 4 m 和 2~10 m。
- 3) 轨道高低不平顺随轨枕间距的增大而增大, 目 在波长 2~3 m 范围内发展变化趋势较明显。

综上, 轨道结构敏感参数对高低不平顺幅值的影 响相对较小, 而从轨道谱角度可得出不同波长成分的 变化规律,波长小于6m范围内的高低不平顺随敏感 参数的改变而显著变化。因此,分析轨道高低不平顺 的分布特征及其发展变化规律时,应结合幅值角度和 轨道谱角度综合分析。

参考文献

- [1] 郭然. 铁路线路养护维修计划编制理论与方法[D]. 北 京: 北京交通大学, 2015.
 - GUO Ran. Theory and method of railway line maintenance planning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [2] 刘学文、杨怀志、杨飞、等、基于动静态检测数据的轨 道精测精调评价技术[J]. 铁道建筑, 2019, 59(9): 111-115.
 - LIU Xuewen, YANG Huaizhi, YANG Fei, et al. Evaluation technology of precise adjustment of track based on dynamic and static test data[J]. Railway architecture, 2019, 59 (9): 111-115.
- [3] 罗林. 轮轨系统轨道平顺状态的控制[M]. 北京: 中国 铁道出版社, 2006.
 - LUO Lin. Control of track smooth state of wheel rail system[M]. Beijing: China Railway Press, 2006.
- [4] 郭宇, 高建敏, 孙宇, 等. 路基沉降与双块式无砟轨道 轨面几何变形的映射关系[J]. 铁道学报, 2016, 38(9): 92-100.
 - GUO Yu, GAO Jianmin, SUN Yu, et al. Mapping relationship between subgrade settlement and geometric deformation of double block ballastless track surface[J]. Journal of railways, 2016, 38(9): 92-100.
- [5] 蔡小培, 刘薇, 王璞, 等. 地面沉降对路基上双块式无

- 砟轨道平顺性的影响[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 160-
- CAI Xiaoping, LIU Wei, WANG Pu, et al. Influence of land subsidence on the smoothness of double block ballastless track on Subgrade[J]. Engineering mechanics, 2014, 31 (9): 160-165.
- [6] 陈兆玮. 高速铁路桥墩沉降对行车性能影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
 - CHEN Zhaowei. Study on the influence of pier settlement on driving performance of high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [7] CHEN Z, ZHAI W, YIN Q. Analysis of structural stresses of tracks and vehicle dynamic responses in train-trackbridge system with pier settlement[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 2018, 232(2): 421-434.
- [8] AHMARI S, YANG M, ZHONG H. Dynamic interaction between vehicle and bridge deck subjected to support settlement[J]. Engineering structures, 2015, 84: 172-183.
- [9] WANG Y, YONG Q, WEI X. Track irregularities estimation based on acceleration measurements[C]. 2012 international conference on measurement, information and control (MIC). IEEE, 2012.
- [10] 马维国, 关庆华, 钟文生, 等. 轨道参数对轮轨耦合系 统固有频率的影响[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(3): 18-23.
 - MA Weiguo, GUAN Qinghua, ZHONG Wensheng, et al. Influence of track parameters on natural frequency of wheel rail coupling system[J]. Noise and vibration control, 2019, 39(3): 18-23.
- [11] 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. Study on the distribution characteristics of sensitive wavelengths in track irregularity and its influencing factors[J]. Journal of railways, 2015, 37(7): 72-78.

(编辑: 郝京红)