

扣件参数对小半径曲线钢轨波磨的影响

朱琪^{1,2}, 谢俊^{1,2}, 张威^{1,2}, 庾军波^{1,2}

(1.重庆工商大学 制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室, 重庆 400067;

2.重庆工商大学 机械工程学院, 重庆 400054)

摘要: **目的** 研究扣件参数对小半径曲线钢轨波磨的影响, 获得抑制钢轨波磨的有效措施。**方法** 建立小半径曲线 DTVI2 扣件的轮轨系统有限元模型, 对扣件系统进行实体化建模, 考虑轨下垫板之间的接触情况, 同时模拟扣件系统中弹条预紧作用。采用复特征值分析和瞬态动态分析研究轮轨系统的摩擦自激振动特性, 并将预测结果与现场测试结果对比, 揭示该区段钢轨波磨产生的原因。最后开展轨下垫板材料属性以及扣件结构参数的影响分析, 获得其对钢轨波磨的影响。**结果** 轮轨间饱和蠕滑力引起轮轨系统发生频率为 500 Hz 的不稳定振动, 会导致波长为 30 mm 的钢轨波磨。轨下垫板杨氏模量在 10~50 MPa 区间, 等效阻尼比先从-0.015 2 减小到-0.016 9 又增大到-0.014 2; 阻尼系数在 0~0.000 1 区间内, 等效阻尼比从-0.016 9 增大到-0.010 2; 轨下垫板泊松比的变化没有引起系统等效阻尼比发生明显的变化; 扣件间距在 575~675 mm 区间内, 等效阻尼比从-0.016 3 降低到-0.019 0; 等效阻尼比随着弹条预紧力的增大而增大。**结论** 选取合适的轨下垫板杨氏模量可以减轻由轮轨摩擦自激振动导致的钢轨波磨; 提高阻尼系数对轮轨系统的自激振动具有较强的抑制作用; 而轨下垫板的泊松比对钢轨波磨的影响较小; 适当减小扣件间距可以略微降低钢轨波磨的产生趋势; 增大弹条预紧力可以抑制由轮轨系统摩擦自激振动导致的钢轨波磨。

关键词: 钢轨波磨; 摩擦自激振动; 扣件结构; 弹条预紧力; 数值仿真

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)01-0078-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.01.007

Influence of Fastener Parameters on Rail Corrugation of Sharp Radius Curve Track

ZHU Qi^{1,2}, XIE Jun^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, TUO Junbo^{1,2}

(1. Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2. College of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: Rail corrugation is one of the most serious rail damage problems. The rail surface appears to have wave-shaped uneven wear. The train through the rail corrugation line causes the vehicle violent vibration, which not only affects the running condition of the train, but also leads to derailment accidents in serious cases. In recent years, researchers have proposed various

收稿日期: 2022-11-26; 修订日期: 2023-05-16

Received: 2022-11-26; **Revised:** 2023-05-16

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202200846); 国家自然科学基金 (52005065); 重庆工商大学高层次人才科研启动项目 (CTBU950322041)

Fund: The Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJQN202200846); the National Natural Science Foundation of China (52005065); the Chongqing Technology and Business University High-level Talent Research Start-up Project (CTBU950322041)

引文格式: 朱琪, 谢俊, 张威, 等. 扣件参数对小半径曲线钢轨波磨的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(1): 78-86.

ZHU Qi, XIE Jun, ZHANG Wei, et al. Influence of Fastener Parameters on Rail Corrugation of Sharp Radius Curve Track[J]. Surface Technology, 2024, 53(1): 78-86.

suppression and mitigation measures for rail corrugation. Related research shows that the impact of track structure on rail corrugation is particularly obvious. The paper aims to study the influence of fastener parameters on rail corrugation of the sharp radius curve track, and put forward effective measures to suppress the rail corrugation.

Based on the theory of frictional self-excited vibration, a finite element model of the wheel-rail system on the sharp radius curve track supported by DTVI2 fasteners was established. In the finite element model, the rail pad was represented with solid element, the frictional contact between the rail and the pad was fully considered, while the spring preload was applied to simulate the preload effect of the clips on the rail. The friction self-excited vibration characteristics of the wheel-rail system of the metro vehicle were studied through complex eigenvalue analysis and transient dynamic analysis. The complex eigenvalue analysis results showed that the wheel-rail system occurred with an unstable vibration frequency of 499.46 Hz. The modal analysis showed that the deformation occurred mainly on the inner wheel and low rail, which indicated that the rail corrugation was most likely to occur on the low rail under the same line conditions. The transient dynamic analysis results showed that a self-excited vibration with a principal frequency of 504.64 Hz occurred in the low rail, which was close to the frequency of self-excited vibration obtained from the complex eigenvalue analysis. Therefore, it could be inferred that the frictional self-excited vibration with a frequency of about 500 Hz occurred in this section of the wheel-rail system was the main cause of rail corrugation. A long-term investigation of rail corrugation characteristics of Chengdu Metro Line 6 was carried out. The finite element prediction results were compared with the field test results, and the root cause of rail corrugation in this section was revealed. Finally, a parametric analysis of the material properties of the under-rail pads and the structural parameters of the fasteners was carried out with the finite element model, and the variation law of their effects on rail corrugation was obtained. On the sharp radius curve track supported by DTVI2 fasteners, the self-excited vibration at 500 Hz was excited by saturation creep force between the wheels and rails in the wheel-rail system. This unstable vibration would cause the wheelset-track system to produce rail corrugation with wavelength of 30 mm. When the Young's modulus of the under-rail pad is in the range of 10 MPa to 50 MPa, the equivalent damping ratio first decreased from $-0.015\ 2$ to $-0.016\ 9$ and then increased to $-0.014\ 2$. The damping factor varied from 0 to 0.000 1, and the equivalent damping ratio of the unstable vibration of the wheel-rail system increased from $-0.016\ 9$ to $-0.010\ 2$. The change in Poisson's ratio did not cause a significant change in the equivalent damping ratio of the system. The fastener spacing varied between 575 mm and 675 mm, and the equivalent damping ratio also decreased from $-0.016\ 3$ to $-0.019\ 0$ with increasing fastener spacing. At the same time, the equivalent damping ratio increased with the increase of the clips preload. Results show that selecting a appropriate Young's modulus of the under-rail pad can reduce the occurrence probability of rail corrugation caused by wheel-rail friction self-excited vibration. The higher damping coefficient of the under-rail pad has a certain suppression effect on the self-excited vibration of the wheel-rail system. Poisson's ratio has less effect on the occurrence of rail corrugation on the small radius curve track. Reducing the fastener spacing can slightly reduce the tendency of rail corrugation. Increasing the clips preload can suppress the rail corrugation caused by the frictional self-excited vibration of the wheel-rail system.

In this study, based on the mechanism study of rail corrugation, several main factors in rail fasteners are considered to influence the law of rail corrugation. This study provides reference for proposing the optimal design of rail support structure to suppress rail corrugation.

KEY WORDS: rail corrugation; frictional self-excited vibration; fastener parameters; clips preload; numerical simulation

随着轨道交通的快速发展,车辆运行环境和轨道结构逐渐复杂化,导致轮轨损伤问题越发严重,钢轨波磨作为其中最为严重的一种损伤问题,受到广大研究人员的关注。钢轨波磨是指钢轨表面出现的波浪形不均匀磨耗。当列车通过钢轨波磨线路时会引起车辆剧烈振动,长期以往很容易使得扣件发生松动、轨枕下沉,不仅影响列车的通过能力,严重时还可能会导致脱轨事故的发生。近些年来,研究人员针对钢轨波磨提出了多种抑制和减缓措施,如非对称打磨钢轨^[1]、

采用减振扣件或轨道、安装轨道吸振器^[2-3]、采用摩擦调节剂和提高钢轨硬度^[4]等。其中一部分科研人员主要从优化轨道结构的角度来抑制钢轨波磨,这是因为根据相关研究表明轨道结构对钢轨波磨的影响尤为明显,而且在实际工程中更换轨道支撑结构是抑止钢轨波磨最为经济和方便的一种方式。

Egana 等^[5]对比研究了轨枕垫刚度对钢轨波磨表现特征的影响,结果发现,在使用较软轨枕垫的线路上,钢轨波磨的波深更小,在减缓波磨生长的同时又

抑止另一个波长的波磨发展。Oyarzaba 等^[6]通过参数分析定性研究了各个轨道参数对钢轨波磨的影响,从中评测出影响力最大的 3 个轨道参数分别为轨枕间距、轨枕质量和轨枕垫垂直刚度。王志强等^[7]对上海地铁某 DTVI2 扣件路段的钢轨波磨实测数据进行分析,得到该路段波磨的通过频率,并用 UM 软件建立相应的磨耗模型,探究波磨的发展规律。王志强等^[8-9]对小半径曲线科隆蛋扣件的钢轨波磨特征进行实测,获得波磨波长及通过频率,然后运用车辆-轨道耦合动力学模型对波磨的演化特性进行研究分析。吴波文等^[10-11]通过有限元仿真对先锋扣件地段钢轨波磨的产生机理进行研究,结果表明:内轨严重的钢轨波磨是由饱和的蠕滑力引起轮轨系统发生自激振动所致。崔晓璐等^[12-13]通过现场测试和模拟仿真验证了轮轨摩擦自激振动是导致波磨产生的主要原因,然后基于该模型综合考虑扣件参数对轮轨摩擦自激振动的影响,采用最小二乘法对扣件结构进行多参数拟合方程。张厚贵等^[14]针对科隆蛋减振扣件的地铁线路上出现的钢轨波磨现象,通过现场观测获得该区段波磨的特征波长以及通过频率,通过锤击试验分析其产生的原因并给出有效的治理措施。陈嘉梁等^[15]针对北京地铁 DTVI2 扣件区段钢轨波磨现象,提出采用 TRD 来抑制波磨的发展,取得了有效的抑制效果。李霞^[16]、李伟等^[17]对钢轨波磨情况进行现场测量、跟踪调查以及理论建模,获得了不同轨道结构(弹性浮置板轨道、梯形轨枕、普通轨枕、套靴轨枕和减振轨枕)的钢轨波磨特性。李伟等^[18]对先锋扣件线路的研究发现,钢轨波磨的波长主要与轨道扣件的垂直刚度有关,在垂直刚度小于 20 MN/m 的弹性扣件的轨道上很容易出现波长为 25~63 mm 的钢轨波磨。Liu 等^[17]对北京地铁科隆蛋扣件线路的钢轨波磨现象治理措施进行研究,现场试验结果显示,在扣件内添加橡胶垫后,现有钢轨的波磨区段振动幅度减少,而在新铺修钢轨上未重新出现波磨。Yin 等^[19]认为轨道离散支撑诱导的超谐波共振是导致钢轨波磨的关键因素,曲线半径、扣件的支撑刚度和轨枕间距是影响波磨增长的 3 个关键因素,降低支撑刚度和轨枕间距可以抑制钢轨波磨的形成。Wu 等^[20]的研究表明,通过调整扣件支撑长度和扣件间距会诱导产生长波长波磨,但同时可以抑制危害性更强的短波长波磨,总体来看减轻了钢轨波磨对车辆轨道系统的影响。

由此可见,扣件系统对钢轨波磨的影响尤为明显,而在之前的研究中主要集中在扣件的刚度、阻尼等参数的影响研究。同时扣件系统的建模多采用弹簧-阻尼单元模拟其支撑作用^[13],而采用实体化建模的研究甚少。本研究基于轮轨系统摩擦自激振动理论,建立小半径曲线 DTVI2 扣件的轮轨系统有限元模型,对扣件系统进行实体化建模,考虑轨下垫板之间的接触情况,同时模拟扣件系统中弹条预紧作用。采用复特征值分析和瞬态动态分析研究该地铁线路轮轨系

统的摩擦自激振动特性。通过对比仿真结果和现场观测数据确定产生钢轨波磨的原因。最后利用该有限元模型开展有关轨下垫板的杨氏模量、泊松比、阻尼系数以及扣件间距和弹簧预紧力的参数化分析。研究结果表明,轨下垫板的材料属性以及扣件结构参数对轮轨间的不稳定振动具有较强烈的影响。本研究在明晰钢轨波磨产生机理的研究基础上,考虑轨道扣件中的多个主要因素对钢轨波磨的影响规律,可为提出抑制钢轨波磨的轨道支撑结构的优化设计提供参考。

1 轮轨系统摩擦自激振动有限元模型和理论方法

1.1 轮轨系统的接触模型

在某曲线半径为 350 m、扣件类型为 DTVI2 型的地铁线路,车辆运行一段时间后出现了严重的钢轨波磨现象。本研究建立了相同曲线半径的轮轨系统接触模型如图 1 所示,该模型展示了轮轨摩擦副的接触以及受力情况。当运行线路为小半径曲线轨道时,轮对会产生较大的横向位移,因此两侧的轮轨接触状态不同。高轨在靠近轮缘处与外侧车轮相接触,低轨则与内侧车轮的踏面相互接触,接触角分别为 δ_L 和 δ_R 。 N_L 和 N_R 分别表示车轮与钢轨在接触点位置的法向力, F_L 和 F_R 分别表示车轮与钢轨在接触点位置的横向蠕滑力,由于接触点位置不同导致法向力和横向蠕滑力的方向不同,具体方向如图 1 所示。 F_{VL} 和 F_{VR} 分别表示轴箱两侧的垂向悬挂力, F_{LL} 和 F_{LR} 表示轮对轴箱两侧的横向悬挂力。为得到车辆在通过曲线轨道时的运动情况,使用多体动力学软件 SIMPACK 建立某型地铁车辆动力学模型。通过动力学计算当车辆通过曲线半径为 350 m 的线路时的轮轨接触情况,选取列车经过圆曲线区段的平均值作为有限元分析中的轴端悬挂力参数,轴箱两侧的垂向悬挂力 F_{VL} 和 F_{VR} 分别为 57.2 kN 和 45.3 kN,轴箱两侧横悬挂力 F_{LL} 和 F_{LR} 分别为 3.97 kN 和 4.01 kN。导向轮对内、外侧轮轨接触角分别为 32.51° 和 2.18°。

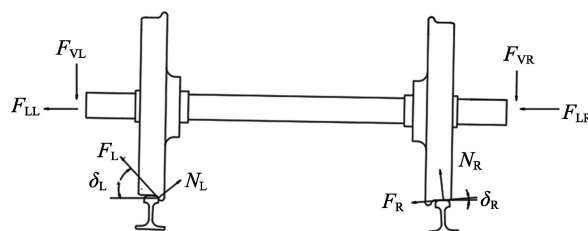


图 1 小半径曲线轨道轮轨接触模型
Fig.1 Wheel rail contact model of sharp radius curve track

1.2 轮轨系统有限元模型

图 2 为根据图 1 的轮轨接触模型所建立的轮轨系

统有限元模型。如图 2a 所示, 该模型主要包括导向轮对、钢轨和轨道支撑结构。车轮踏面类型为磨损型踏面, 滚动圆直径为 840 mm。钢轨型号为 60 kg/m, 长度为 36 000 mm。通过调节内、外侧车轮与钢轨的接触角来确定有限元模型的曲线半径为 350 m。整个轨道支撑结构主要由扣件和整体道床两部分组成。扣件系统是轨道结构的重要组成部分, 起到固定钢轨和传递轮轨冲击载荷的作用。图 3a 是地铁 DTVI2 型扣件的结构示意图, 扣件系统主要由弹性垫板、调高垫板、铁垫板、绝缘轨距块、紧固螺栓以及弹条组成。在有限元建模中简化为由铁垫板和弹性垫板组成, 其他部件由边界条件代替, 如图 3b 所示, 扣件间距为 625 mm。有限元模型的材料参数如表 1 所示。有限元模型的边界条件和建模细节如下:

- 1) 钢轨两端采用固定约束限制其自由度, 同时由于其长度足够长, 可以忽略有限元轨道的端点效应;
- 2) 车轮与钢轨之间采用面面接触, 并对轮轨接触区网格进行密集划分, 以提高接触分析的精度, 如图 2c 所示, 轮轨间摩擦因数设置为 0.4^[21];
- 3) 轨枕与轨道板之间采用 Tie 接触, 轨枕垫与铁垫板之间采用摩擦接触, 摩擦因数设置为 0.75^[11], 铁垫板与钢轨之间采用一系列弹簧和阻尼元件来模拟相互的接触刚度和阻尼;
- 4) 在扣件上方钢轨两侧位置各定义一系列模型

预紧力来模拟弹条与紧固螺栓对钢轨的约束作用, 如图 2c 所示;

5) 路基对轨道结构的支撑也采用节点接地弹簧和阻尼对来模拟。

表 1 轮轨系统有限元模型参数
Tab.1 Finite element model parameters of wheel-rail system

Part	Density/ (kg·m ⁻³)	Young's modulus/ MPa	Poisson's ratio
Wheelset	7 800	210 000	0.3
Rail	7 800	210 000	0.3
Slab	2 400	32 500	0.24
Iron pad	7 800	210 000	0.3
Rubber pad	900	32	0.37

1.3 摩擦自激振动的分析方法

本研究分别从频域和时域的角度对该模型进行复特征值分析和瞬时动态分析。复特征值分析主要用于预测轮轨系统摩擦自激振动的振动频率和相应模态, 复特征值分析的理论依据如下所述。

首先建立系统的运动方程:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \tag{1}$$

式中: x 为系统节点位移向量; M 、 C 、 K 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。无摩擦

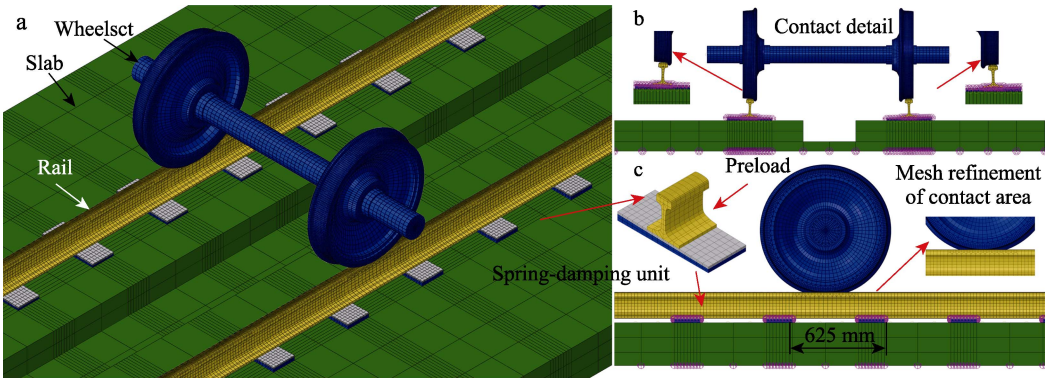


图 2 小半径曲线轮轨系统有限元模型
Fig.2 Finite element model of sharp radius curve track

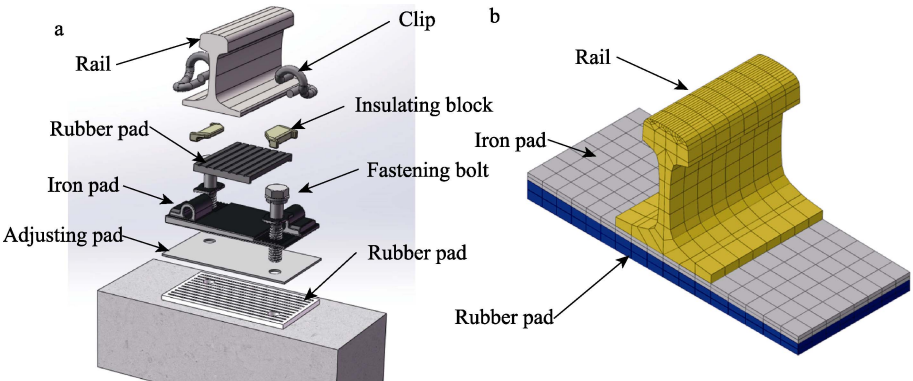


图 3 地铁 DTVI2 型扣件
Fig.3 DTVI2 fastener of metro: a) solid model; b) finite element model

时, \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 都是对称矩阵。当考虑系统摩擦面之间的耦合作用时, \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 都是非对称矩阵, 因此有可能产生自激振动, 对应的特征方程为:

$$(\mathbf{M}_r \lambda^2 + \mathbf{C}_r \lambda + \mathbf{K}_r) \phi = 0 \quad (2)$$

得到方程的通解为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \phi_i e^{\lambda_i t} = \sum_{i=1}^n \phi_i e^{(\alpha_i + j\omega_i)t} \quad (3)$$

式中: ϕ 代表特征向量, λ_i 代表第 i 阶复特征值, α_i 和 ω_i 分别代表特征值的实部和虚部。当特征值的实部 $\alpha_i > 0$ 时, 说明系统将会出现不稳定运动。同时, 将等效阻尼比作为一个评判系统自激振动发生趋势的常用参数:

$$\xi = -2\alpha_i / |\omega_i| \quad (4)$$

当 ξ 为负数时, 意味着系统存在发生摩擦自激振动的趋势。等效阻尼比越小, 系统发生不稳定振动趋势越强烈。

瞬时动态分析则主要用于计算轮轨系统摩擦自激振动过程中的动态响应, 瞬时动力分析过程中, 采用中心插值法求解其运动过程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_{(t)} = \mathbf{P}_{(t)} - \mathbf{I}_{(t)} \quad (5)$$

式中: \mathbf{M} 为对角集中质量矩阵; $\mathbf{P}_{(t)}$ 为系统的外力; $\mathbf{I}_{(t)}$ 为系统的内力; 下标 t 为时间增量。

在初始增量步, 节点的加速度可表示为:

$$\ddot{\mathbf{x}}_{(t)} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{P}_{(t)} - \mathbf{I}_{(t)} \quad (6)$$

利用中心差分法对式 (6) 进行显式积分计算可得到系统的节点速度和位移:

$$\dot{\mathbf{x}}_{(t+0.5\Delta t)} = \dot{\mathbf{x}}_{(t-0.5\Delta t)} + \frac{(\Delta t_{(t+\Delta t)} + \Delta t_{(t)})}{2} \ddot{\mathbf{x}}_{(t)} \quad (7)$$

$$\mathbf{x}_{(t+\Delta t)} = \mathbf{x}_{(t)} + \Delta t_{(t+\Delta t)} \dot{\mathbf{x}}_{(t+0.5\Delta t)} \quad (8)$$

其中下标 $(t-0.5\Delta t)$ 和 $(t+0.5\Delta t)$ 为中间时间增量。

通过上述分析方法在频域和时域上分别得到轮轨系统发生摩擦自激振动时的振动模态和响应。

2 结果分析

2.1 小半径曲线轨道轮轨摩擦自激振动模型的验证

通过复特征值分析可以预测得到轮轨系统在频域范围内的自激振动发生情况, 频率分布结果如图 4 所示。根据复特征值分析理论, 等效阻尼比是评判自激振动发生倾向的标准, 当它为负时说明系统可能发生自激振动, 且数值越小自激振动发生的可能性越大。根据图 4 所示, 系统共产生了 2 个等效阻尼比为负的自激振动, 其中红色圆点代表的自激振动频率为 499.46 Hz, 对应的等效阻尼比为 -0.016 9, 蓝色原点代表的自激振动频率为 516.53 Hz, 对应的等效阻尼比为 -0.007 1。需要重点关注的是最小等效阻尼比对应的自激振动, 该自激振动发生的可能性最大。根据自激振动的模态显示该轮轨系统的不稳定振动主要发生在导向轮对的内轮和低轨上, 这表明在同等线路条件下钢轨波磨极大可能发生在低轨。

通过瞬时动态分析获得轮对通过该曲线轨道时的动态响应情况, 在轨面上选取多个测点, 如图 5 所示。选取其中一组测点的垂向振动加速度进行分析, 如图 6 所示。当轮对通过钢轨表面相应测点时, 垂向振动加速度幅值明显增大, 表明此时发生了摩擦自激振动, 同一组测点低轨表面垂向振动加速度的振幅大于高轨表面垂向振动加速度的振幅, 这证明了轮轨系统的摩擦自激振动主要发生在低轨上。对低轨轨面垂向振动加速度进行 PSD 分析, 可获得系统发生摩擦自激振动的主频率为 504.64 Hz, 结果如图 7 所示, 与复特征值分析得到的自激振动的频率相接近。因此, 可以大致预测在该区段轮轨系统发生摩擦自激振动频率约为 500 Hz, 可以推断这是导致钢轨波磨产生的主要原因。

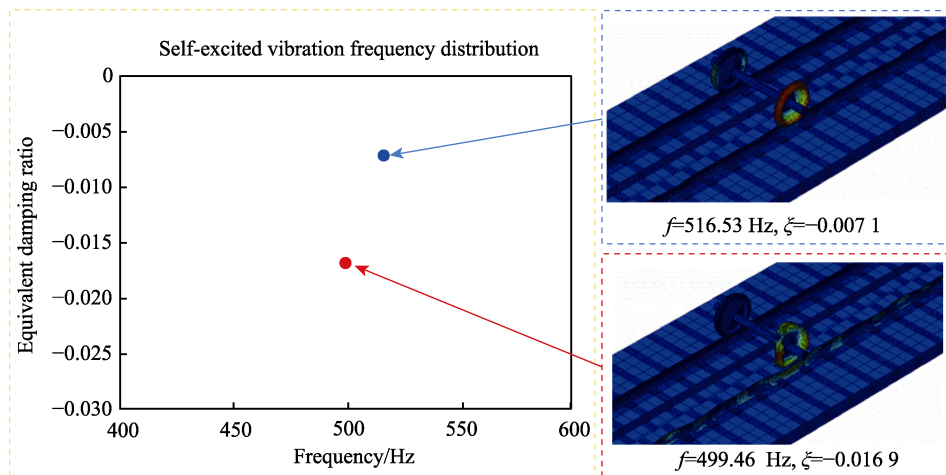


图 4 轮轨系统摩擦自激振动频率和模态

Fig.4 Frictional self-excited vibration frequency distribution and mode of wheel-rail system

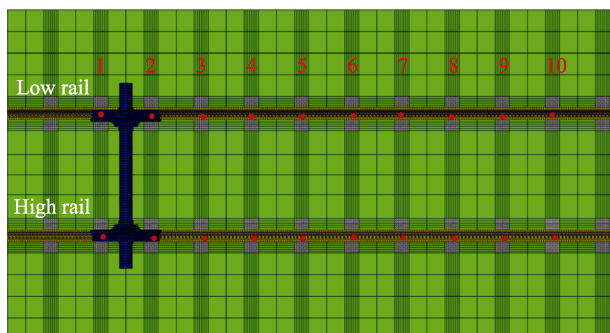


图 5 钢轨表面测点的分布情况

Fig.5 Distribution of measurement points on rail surface

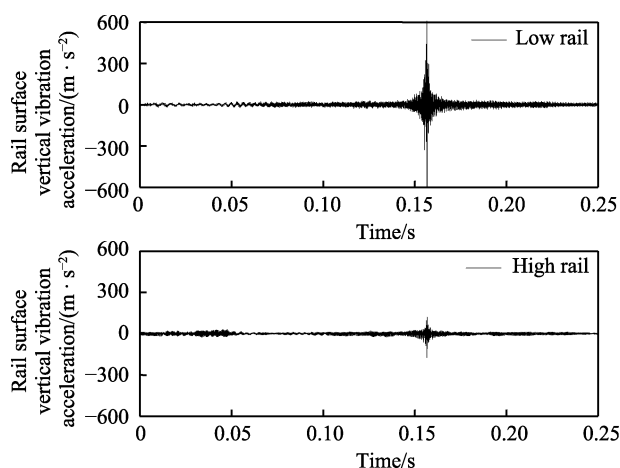


图 6 钢轨表面测点垂向振动加速度的变化情况

Fig.6 Variation of vertical vibration acceleration of measurement points on rail surface

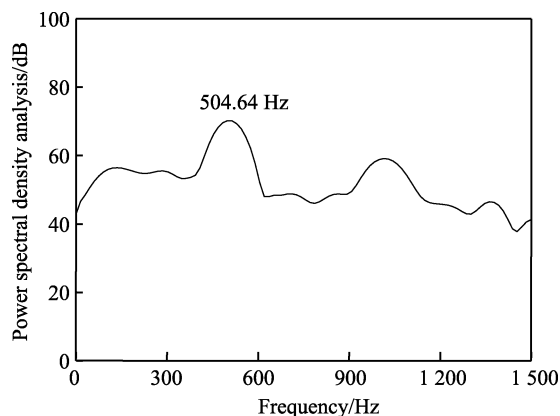


图 7 钢轨表面测点垂向振动加速度 PSD 分析结果

Fig.7 PSD analysis results of vertical vibration acceleration of measurement points on rail surface

为进一步验证轮轨摩擦自激励振动模型的正确性, 对其预测结果与现场测试结果进行了对比。在对成都地铁 6 号线进行现场调研时发现, 该线路在开通运行后不久就出现了钢轨波磨现象, 尤其是沙湾-西北桥区段, 该区段的曲线半径为 350 m, 为典型的小半径曲线区段, 属于钢轨波磨高爆发区段。现场调查发现, 该区段的现场钢轨波磨发生在内轨处, 且波长为 30 mm 的短波长波磨, 现场实测结果如图 8 所示。在通过该曲线半径线路时, 地铁车辆的运行速度为 50~55 km/h^[22],

则钢轨波磨的激励频率范围为 462~509 Hz。

预测得到轮轨系统摩擦自激励振动主频不仅在诱导波磨频率范围内, 并且自激励振动的发生位置与波磨位置一致。预测结果与现场观测结果的高度匹配证明轮轨系统的摩擦自激励振动是诱导该线路钢轨波磨的关键因素。

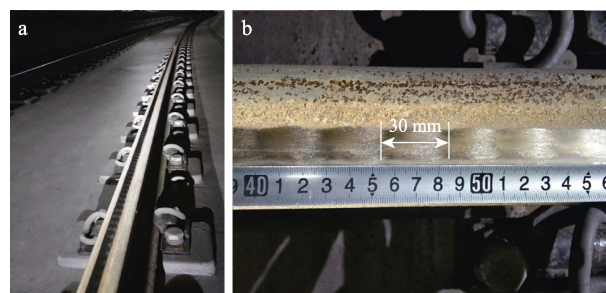


图 8 小半径曲线 DTVI2 扣件轨道波磨实测结果

Fig.8 Actual measurement results of rail corrugation on sharp radius curve track supported by DTVI2 fasteners

2.2 轨下垫板杨氏模量对小半径曲线轨道钢轨波磨的影响

文献指出, 扣件系统对轮轨系统的自激励振动发生趋势具有重要影响, 同时, 对扣件结构进行优化也是抑制钢轨波磨最为经济高效的措施^[23]。轨下垫板作为扣件系统中重要的减振部件, 为研究其杨氏模量对小半径曲线钢轨波磨的影响, 分别研究了杨氏模量在 10~50 MPa 之间变化时系统自激励振动情况, 变化规律曲线如图 9 所示。在研究轨下垫板杨氏模量对钢轨波磨的影响时, 轮轨系统均产生 2 个等效阻尼比为负的不稳定振动, 且自激励振动频率 (500 Hz 和 516 Hz) 没有发生非常明显的变化, 其中最有可能发生的不稳定振动频率均在 500 Hz 左右, 与成都地铁 6 号线钢轨波磨的激励频率吻合。两阶不稳定振动随垫板杨氏模量的变化趋势相类似。随着杨氏模量的增加, 频率为 500 Hz 的第一阶不稳定振动对应的等效阻尼比整

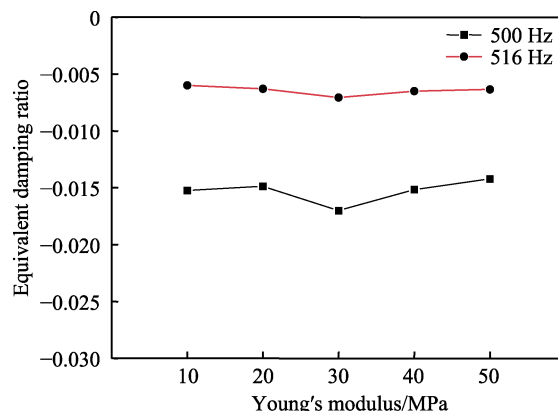


图 9 垫板杨氏模量对轮轨系统摩擦自激励振动的影响

Fig.9 Influence of Young's modulus of pad on frictional self-excited vibration of wheel-rail system

体变化趋势为先减小后增大,这说明轮轨系统发生钢轨波磨的可能性是与之相反的,先增大后减小,在杨氏模量为 30 MPa 时,系统最后可能发生钢轨波磨,钢轨波磨发生的位置在低轨。垫片的杨氏模量对小曲线半径轨道钢轨波磨有一定的影响,选择合适的参数可以在一定程度上抑制钢轨波磨的产生。

2.3 轨下垫板阻尼系数对小半径曲线轨道钢轨波磨的影响

相关研究表明,阻尼对系统的振动具有一定的抑制作用,尤其是高阻尼材料通过消耗系统的能量达到减振的目的^[11,21]。为探究轨下垫板阻尼系数对钢轨波磨的影响,分别研究阻尼系数在 0~0.000 1 范围内变化时轮轨系统摩擦自激振动情况,变化规律曲线如图 10 所示。可以看出,改变轨下垫板的阻尼系数并不会改变不稳定振动的数量,系统依然会产生两阶次不稳定振动,自激振动频率分别在 500 Hz 和 516 Hz 附近。整体来看,提高垫片的阻尼系数,第二阶不稳定振动频率 516 Hz 对应的等效阻尼比变化不明显,这说明垫板的阻尼系数对该激振频率的波磨影响较小。但是一阶不稳定振动频率 500 Hz 对应的等效阻尼比在不断提高。当不考虑阻尼系数时,对应的等效阻尼比为-0.016 9,当阻尼系数为 2×10^{-5} 时,对应的等效阻尼比为-0.013 1,等效阻尼比提高了 23.5%,说明系统的稳定性得到大幅度提高。当阻尼系数为 1×10^{-4} 时,对应的等效阻尼比为-0.010 2,与阻尼系数为 2×10^{-5} 时相比,增大了 23%,系统的稳定性进一步提高,表明在该条件下该不稳定振动发生的可能性在进一步降低,说明提高垫片的阻尼系数可以抑制激振频率在 500 Hz 附近的钢轨波磨发生。

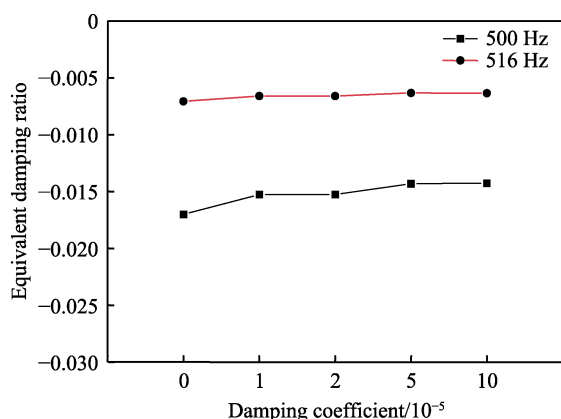


图 10 垫板阻尼系数对轮轨摩擦自激振动的影响
Fig.10 Influence of damping coefficient of pad on frictional self-excited vibration of wheel-rail system

2.4 轨下垫板泊松比对小半径曲线轨道钢轨波磨的影响

为研究轨下垫板泊松比对小半径曲线钢轨波磨

的影响,分别研究了泊松比在 0.2~0.4 之间变化时系统自激振动情况,变化规律曲线如图 11 所示。可以发现,系统发生两阶不稳定振动,自激振动频率均分布在 500 Hz 和 516 Hz 附近。其中最小等效阻尼比对应的不稳定振动频率都分布在 500 Hz 附近,对应的等效阻尼比分别为-0.017 3、-0.016 7、-0.016 9、-0.016 89、-0.017 1,对比发现等效阻尼比的变化幅度很小,具体情况如图 11 所示。这说明垫板泊松比对钢轨波磨有一定影响,但是影响效果较小。

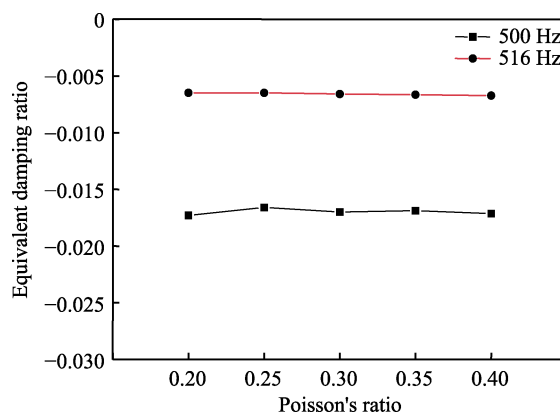


图 11 垫板泊松比对轮轨摩擦自激振动的影响
Fig.11 Influence of Poisson's ratio of pad on frictional self-excited vibration of wheel-rail system

2.5 扣件间距对小半径曲线轨道钢轨波磨的影响

扣件间距是轨道结构中一项重要参数,对车辆-轨道系统的动力学性能有重要影响。在本节中研究了扣件间距在 575~675 mm 之间变化时,轮轨系统的摩擦自激振动情况,结果如图 12 所示。随着轨枕间距的增大,系统第一阶不稳定振动对应的等效阻尼比呈现减小的趋势,即轮轨系统发生摩擦自激振动的趋势逐渐增强,发生钢轨波磨的可能性逐渐增大。而扣件间距对第二阶不稳定振动的影响比较轻微,等效阻尼

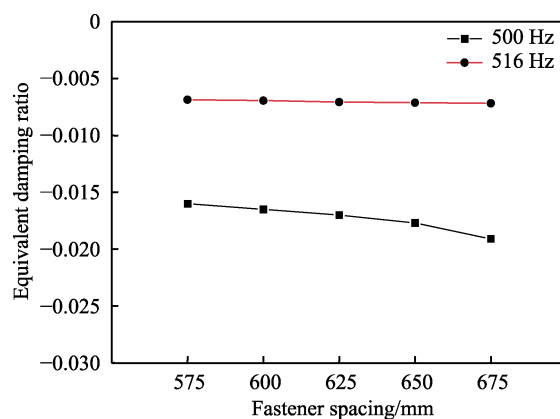


图 12 扣件间距对轮轨摩擦自激振动的影响
Fig.12 Influence of fastener spacing on frictional self-excited vibration of wheel-rail system

比没有发生比较明显的波动。因此,扣件间距对小曲线半径轨道上钢轨波磨的产生趋势有一些影响,减小轨枕间距可以略微降低钢轨波磨的产生趋势。

2.6 弹条预紧力对小半径曲线轨道钢轨波磨的影响

在扣件系统中需要依靠弹条的弹性以及自身变形使弹条趾端紧紧扣压在绝缘块上,起到固定钢轨的作用^[24],同时紧固螺栓为弹条提供预压力,保证钢轨、轨下垫板与铁垫板间的连接,因此在研究有限元建模中将弹条预紧力所产生的垂向压力进行了考虑^[25]。为

研究弹条预紧力对小半径曲线钢轨波磨的影响,分别研究了弹条预紧力为 10、12.5、15 kN 时轮轨系统的不稳定振动分布情况,结果如图 13 所示。根据结果可知,系统依然产生了两阶不稳定振动,激振频率分别在 500 Hz 和 516 Hz 附近,等效阻尼比最小的不稳定振动频率为 500 Hz,对应的等效阻尼比分别为 -0.017、-0.015 22、-0.012 02,即负等效阻尼比随着弹条预紧力的增大而增大,说明该轮轨系统发生摩擦自激振动的可能性在随之降低。这说明在该小半径曲线线路中,适当提高弹条预紧力可以抑制激振频率为 500 Hz、波长为 30 mm 的钢轨波磨的发生。

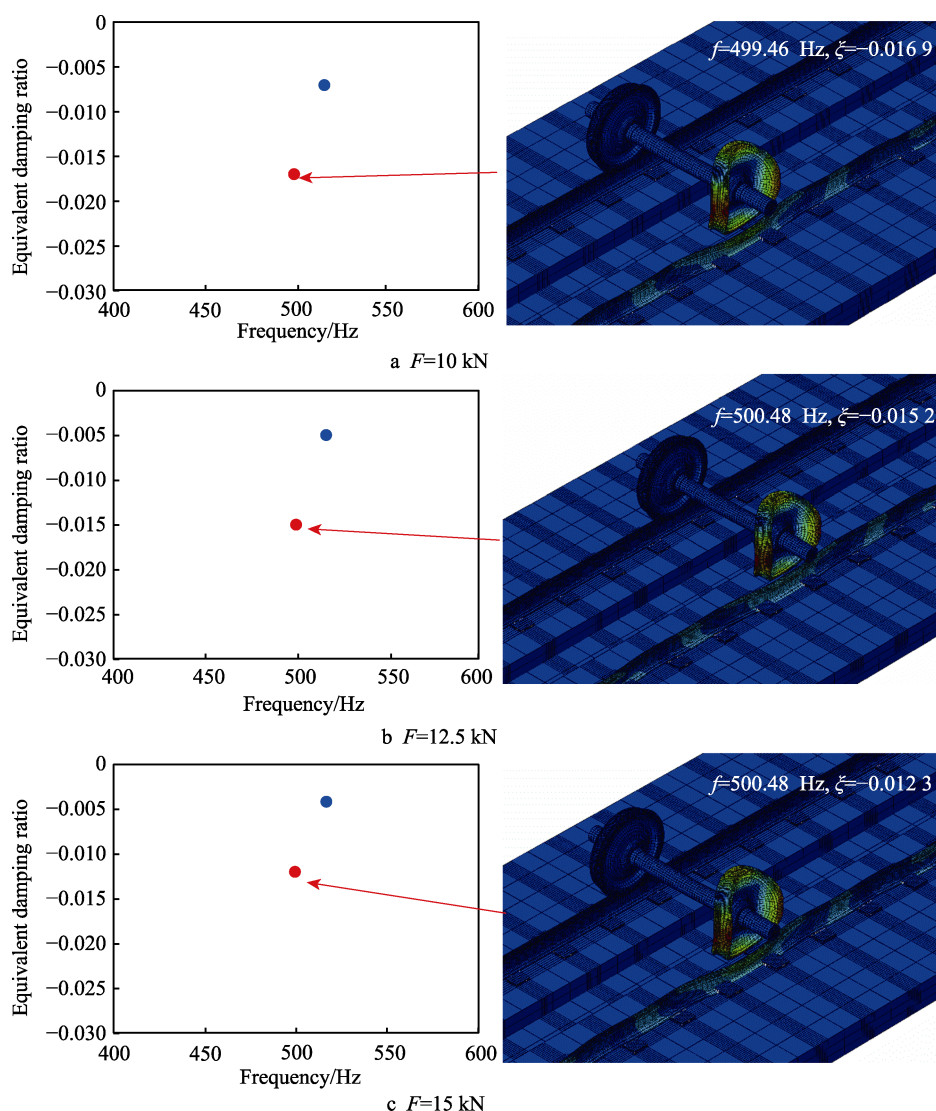


图 13 扣件弹条预紧力对轮轨摩擦自激振动的影响

Fig.13 Influence of fastener preload on frictional self-excited vibration of wheel-rail system

3 结论

1) 在小半径曲线 DTVI2 扣件轨道上,轮轨间饱和蠕滑力引起系统发生 500 Hz 左右的自激振动,当车辆以 55 km/h 速度运行时,会导致系统产生波长为

30 mm 的钢轨波磨。

2) 轨下垫板材料属性对轮轨间的不稳定振动具有较强烈的影响。选取合适的轨下垫板杨氏模量可以减轻由轮轨摩擦自激振动导致的钢轨波磨。提高阻尼系数对轮轨系统的自激振动具有一定的抑制作用。轨

下垫板的泊松比对小半径曲线钢轨波磨发生情况的影响较小。

3) 适当减小扣件间距可以略微降低自激振动频率为 500 Hz 的钢轨波磨的产生趋势, 增大弹簧预紧力可以抑制由轮轨系统摩擦自激振动导致的钢轨波磨。

参考文献:

- [1] 王青波. 地铁钢轨非对称打磨技术应用[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(6): 46-49.
WANG Q B. Application and Practice of Asymmetric Rail Grinding Technology in Metro Rails[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(6): 46-49.
- [2] 刘卫丰, 张厚贵, 陈嘉梁, 等. 北京地铁采用调频式钢轨减振器治理钢轨波磨的试验研究[J]. 振动工程学报, 2019, 32(4): 695-700.
LIU W F, ZHANG H G, CHEN J L, et al. A Test of Treating Rail Corrugation by Tuned Rail Damper for Beijing Metro[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(4): 695-700.
- [3] 王誉蓉, 吴天行. 高弹扣件轨道车轮间振动波的反射对钢轨短波长波磨的影响[J]. 振动与冲击, 2020, 39(6): 29-36.
WANG Y R, WU T X. Effects of Vibration Wave Reflections between Wheels and Tracks with High-Elastic Fasteners on Short Pitch Rail Corrugation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(6): 29-36.
- [4] 常崇义, 李果, 张银花, 等. 轮轨材料硬度匹配对车轮多边形磨耗影响的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(2): 87-93.
CHANG C Y, LI G, ZHANG Y H, et al. Experimental Study on Influence of Wheel-Rail Material Hardness Matching on Wheel Polygonal Wear[J]. China Railway Science, 2018, 39(2): 87-93.
- [5] EGANA J I, VINOLAS J, GIL-NEGRETE N. Effect of Liquid High Positive Friction (HPF) Modifier on Wheel-Rail Contact and Rail Corrugation[J]. Tribology International, 2005, 38(8): 769-774.
- [6] OYARZABAL O, GÓMEZ J, SANTAMARÍA J, et al. Dynamic Optimization of Track Components to Minimize Rail Corrugation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 319(3/4/5): 904-917.
- [7] 王志强, 雷震宇. 地铁直线轨道钢轨波磨影响参数研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(4): 420-430.
WANG Z Q, LEI Z Y. Study on Influence Parameters of Rail Corrugation on Tangential Tracks of Metro[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(4): 420-430.
- [8] WANG Z Q, LEI Z Y. Rail Corrugation Characteristics in Small Radius Curve Section of Cologne-Egg Fasteners[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(11): 4499-4511.
- [9] WANG Z Q, LEI Z Y. Analysis of Influence Factors of Rail Corrugation in Small Radius Curve Track[J]. Mechanical Sciences, 2021, 12(1): 31-40.
- [10] WU B W, CHEN G X, LV J Z, et al. Generation Mechanism and Remedy Method of Rail Corrugation at a Sharp Curved Metro Track with Vanguard Fasteners[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2020, 39(2): 368-381.
- [11] 吴博文, 陈光雄, 赵晓男, 等. 地铁先锋扣件地段钢轨波磨成因[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(3): 650-657.
WU B W, CHEN G X, ZHAO X N, et al. Formation Mechanism of Rail Corrugation Occurring on Tight Curved Track with Vanguard Fasteners[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(3): 650-657.
- [12] 崔晓璐, 尹越, 包鹏羽, 等. 山地城市地铁制动/轨道结构参数对钢轨波磨的影响 [J]. 表面技术, 2023, 52(1): 1-10.
CUI X L, YIN Y, BAO P Y, et al. Effect of the Structure and Parameter of Brake/Track on Rail Corrugation in a Mountain City Metro[J]. Surface Technology, 2023, 52(1): 1-10.
- [13] 崔晓璐, 李童, 漆伟. 抑制钢轨波磨的梯形轨道结构的多参数拟合与优化[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 185-192, 222.
CUI X L, LI T, QI W. Multi-Parameter Fitting and Optimization of the Ladder Track to Minimize Rail Corrugation[J]. Surface Technology, 2022, 51(2): 185-192, 222.
- [14] ZHANG H G, LIU W N, LIU W F, et al. Study on the Cause and Treatment of Rail Corrugation for Beijing Metro[J]. Wear, 2014, 317(1/2): 120-128.
- [15] 陈嘉梁, 刘维宁, 刘卫丰, 等. 北京地铁 DTVI₂ 扣件钢轨波磨整治措施的试验研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 64-69.
CHEN J L, LIU W N, LIU W F, et al. Demonstration Test on Treatment Solution Against Rail Corrugation Occurs at DTVI₂ Fastener Track Sections in Beijing Metro[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 64-69.
- [16] LI X. Study on the Rail Corrugation of the Ladder-Type Sleepers Track Based on the Track Vibration Theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(22): 121.
- [17] LIU W F, ZHANG H G, LIU W N, et al. Experimental Study of the Treatment Measures for Rail Corrugation on Tracks with Egg Fasteners in the Beijing Metro[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(5): 1360-1374.
- [18] LI W, ZHOU Z J, ZHAO X, et al. Formation Mechanism of Short-Pitch Rail Corrugation on Metro Tangent Tracks with Resilient Fasteners[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(6): 1524-1547.
- [19] YIN X X, WEI X K, ZHENG H C. Applying System Dynamics of Discrete Supported Track to Analyze the Rail Corrugation Causation on Curved Urban Railway Tracks[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2021, 2021: 9958163.

(下转第 95 页)