

高速铁路车轮多边形和钢轨波磨相关性影响*

崔晓璐¹, 卜涵¹, 徐晓天¹, 尹越¹, 徐佳¹, 杨红娟²

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院 重庆, 400074)

(2. 成都理工大学机电工程学院 成都, 610059)

摘要 基于轮轨系统摩擦耦合振动会引发车轮多边形和钢轨波磨的问题,以高速铁路长大坡道直线区段作为研究对象,建立了高速铁路轮轨系统的有限元模型,研究长大坡道直线区段轮轨系统的摩擦耦合振动特性,阐明了车轮多边形和钢轨波磨的耦合特性。研究表明:高速铁路长大坡道区段趋于饱和的轮轨蠕滑力,容易诱导轮轨系统的摩擦耦合振动,从而引发具有频率相关性的车轮多边形和钢轨波磨;具有频率相关性的车轮多边形和钢轨波磨均会加剧轮轨系统的摩擦耦合振动,其中车轮多边形的影响更为明显;无频率相关性的车轮多边形和钢轨波磨相互作用时,并未体现出相互促进的关系,且实际情况中难以出现完全吻合的具有频率相关性的车轮多边形和钢轨波磨,因此二者在后续发展中关联性较弱。

关键词 高速铁路;车轮多边形;钢轨波磨;摩擦耦合振动;耦合特性;关联性

中图分类号 U211;TH113

1 问题的引出

随着高速铁路运营里程的增加和运行速度的提高,车辆与轨道间的动态相互作用也逐渐增强。高速列车的牵引力及制动力较大,导致列车的轮轨间作用力增大。轮轨周期性磨耗是较为典型的轮轨损伤问题,表现在车轮上为车轮多边形磨耗(简称车轮多边形),表现在钢轨上为钢轨表面波浪形磨耗(简称钢轨波磨)。轮轨周期性磨耗^[1-2]如图1所示。车轮多边形和钢轨波磨会加剧轮轨振动,不仅降低了乘客的舒适度,还会造成车辆及轨道零件的疲劳失效,危及列车的行车安全。



(a) 车轮多边形
(a) Wheel polygon

(b) 钢轨波磨
(b) Rail corrugation

图1 轮轨周期性磨耗^[1-2]

Fig.1 Wheel-rail periodic wear^[1-2]

目前,无论是车轮多边形还是钢轨波磨均未得到有效解决,对其处理通常采用镟修和打磨的方法,但即使处理过后,车轮多边形和钢轨波磨仍会再次

出现,因此学者们对其机理开展了系列研究。车轮多边形机理的研究主要包括车轮的初始不圆顺理论、车辆-轨道系统的固有振动理论和热弹性失稳理论。基于车轮的初始不平顺理论,Kang等^[3]通过摄动法分析了车轮多边形磨耗,提出车轮多边形是在车轮的初始不圆顺和转动惯量共同作用下产生的。Liao等^[4]发现初始具有四边形的不圆顺车轮在运行中会逐渐演变为4阶多边形。对于车辆-轨道系统的固有振动理论,Jin等^[5]经过现场测试和数值模拟研究了车轮多边形磨耗的形成机理。陈光雄等^[6]采用有限元仿真研究轮轨系统的稳定性,认为轮轨间饱和蠕滑力引发轮轨系统摩擦自激振动,导致高速列车车轮多边形磨耗的产生。对于热弹性失稳理论,吴波文等^[7]提出车轮多边形的形成与踏面制动的热弹性失稳。

钢轨波磨机理的研究主要包括自激振动理论和反馈振动理论^[8-9]。自激振动理论认为,在一定条件下轮轨系统的固有特性会引起系统的自激振动,从而导致钢轨波磨产生。陈光雄等^[10]提出蠕滑力饱和时轮轨系统摩擦自激振动会引发钢轨波磨。Bao等^[11]分析了多种高速列车的摩擦自激振动特性,研

* 国家自然科学基金面上资助项目(52275176, 52375168);重庆市基础研究与前沿探索基金资助项目(CSTB2022NSCQ-MSX1542);重庆交通大学研究生科研创新资助项目(2023S0066)

收稿日期:2023-07-20;修回日期:2023-10-25

究高速铁路制动区段钢轨波磨的抑制措施。Zhao 等^[12]建立了轮轨瞬态滚动接触模型,研究了存在钢轨波磨时的高速车辆-轨道的相互作用。反馈振动理论认为,轮轨间的初始不平顺会激发轮轨振动,加剧初始不平顺。姜子清等^[13]通过现场测试和仿真实验发现,随着钢轨波磨的波深增加,轮轨系统的垂向接触力增大。Nielsen 等^[14]从车辆-轨道的接触和钢轨表面不平顺磨损的角度对钢轨波磨进行研究。

上述文献发现,车轮多边形和钢轨波磨的机理在一定程度上存在部分相似,均受到轮轨固有振动特性的影响,区别在于表现载体存在差异。然而,大多数研究仅关注单一轮轨周期性磨耗的形成机理,对车轮多边形和钢轨波磨相互作用的研究较少^[2]。笔者基于摩擦耦合振动理论,分别研究具有频率相关性和无频率相关性的车轮多边形和钢轨波磨的相互作用,阐明了高速铁路车轮多边形和钢轨波磨的关联性。

2 高速铁路轮轨系统仿真模型

2.1 轮轨系统接触模型

由于钢轨波磨易发生在高速铁路的长大坡道区段^[2],故选用高速铁路的长大坡道直线区段作为研究对象,其轮轨系统接触模型如图 2 所示。在轮对受力上,车轮的左右两端受到垂向悬挂力 F_{SVL} 和 F_{SVR} 。在轮轨接触中,车轮与钢轨间产生法向接触力 N_L 和 N_R ,切向接触力 F_L 和 F_R ,相应的接触角为 δ_L 和 δ_R 。在直线线路上,导向轮对和拖车轮对的左右车轮与钢轨的接触状态相同^[15]。在轨道支撑结构中,钢轨通过扣件与轨下结构连接,采用弹簧阻尼单元模拟扣件的连接作用,扣件的垂向刚度和横向刚度为 K_{RV} 和 K_{RL} ,垂向阻尼和横向阻尼为 C_{RV} 和 C_{RL} 。

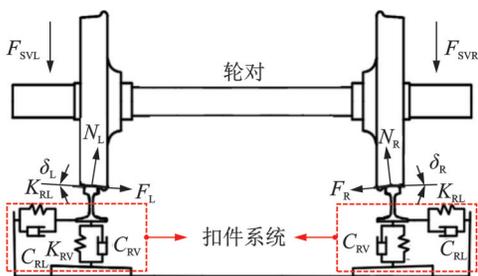


图 2 轮轨系统接触模型

Fig.2 Contact model of wheel-rail system

2.2 轮轨系统有限元模型

建立的轮轨系统有限元模型如图 3 所示。该模型包括轮对、钢轨和一系列扣件系统,相关参数^[15]如表 1 所示。其中,轮对的滚动圆直径为 920 mm,车轴为空心车轴,采用 LM_A 型车轮踏面,假设轮对两端分别受到 75 kN 的垂向悬挂力,轮轨接触摩擦因数设为 0.3^[6]。钢轨的轨距为 1 435 mm,总长选取 30 扣件跨距,并且对其两端进行固定约束。扣件采用纵向、垂向和横向 7×7 个等效弹簧阻尼单元模拟,间距为 650 mm,运行速度为 300 km/h。

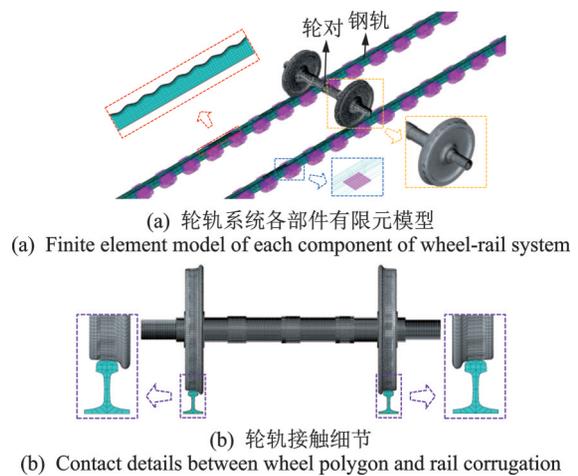


图 3 轮轨系统有限元模型

Fig.3 Finite element model of wheel-rail system

表 1 轮轨系统有限元模型的相关参数^[15]

Tab.1 Relevant parameters for finite element model of wheel-rail system^[15]

部件	弹性模量/ MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比
轮对	210 000	7 800	0.3
钢轨	210 000	7 800	0.3
扣件	纵向	垂向	横向
扣件刚度/(MN·m ⁻¹)	28	50	28
扣件阻尼/(kNs·m ⁻¹)	20	30	20

2.3 车轮多边形与钢轨波磨理论模型的构建

为研究车轮多边形和钢轨波磨的相互作用,构建车轮多边形磨耗和钢轨波磨耗模型。在高速铁路实际线路中,车轮多边形阶数主要为 18~23 阶,对应通过频率范围为 519.25~663.48 Hz;钢轨波磨波长主要为 120~160 mm,对应通过频率范围为 520.83~694.44 Hz。由于高速列车车轮多边形主要形成在车轮踏面滚动圆附近,因此可以通过修改车

轮踏面上滚动圆及其附近圆轮廓线的节点坐标来模拟车轮的多边形磨耗。假设玫瑰线方程是车轮踏面多边形磨耗的理想轮廓方程,在极坐标中 n 叶玫瑰线的数值表达式为

$$\rho_n(\theta) = 0.5A [1 - \cos(n\theta)] \quad (0 \leq \theta \leq 2\pi) \quad (1)$$

其中: A 为包络半径; θ 为角度。

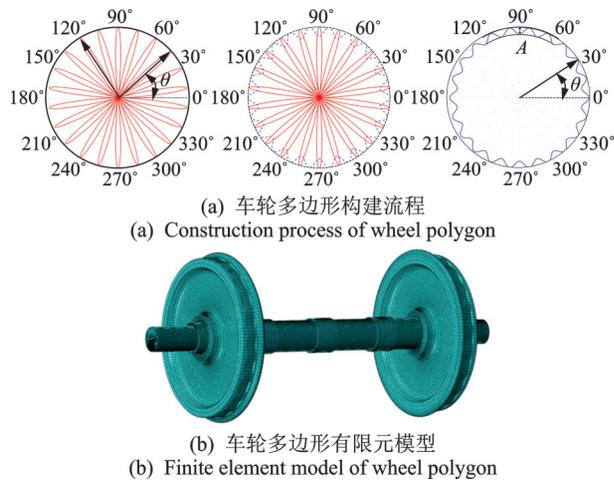
通过光滑车轮踏面轮廓线减去 n 叶玫瑰线方程,得到 n 级多边形车轮的理想廓线方程,表达式为

$$\rho_n(\theta) = R_0 - \rho_n(\theta) =$$

$$R_0 - 0.5A [1 - \cos(n\theta)] \quad (0 \leq \theta \leq 2\pi) \quad (2)$$

其中: R_0 为光滑车轮踏面轮廓的半径。

式(1)中包络半径等价于车轮多边形磨耗深度。22 阶作为车轮多边形的典型阶数,以此为例,22 阶车轮多边形理论模型如图 4 所示。



红色曲线为玫瑰线;黑色虚线为光滑车轮踏面理想圆廓线;蓝色曲线为车轮多边形理论廓线

图 4 22 阶车轮多边形理论模型

Fig.4 Theoretical model of 22-order wheel polygons

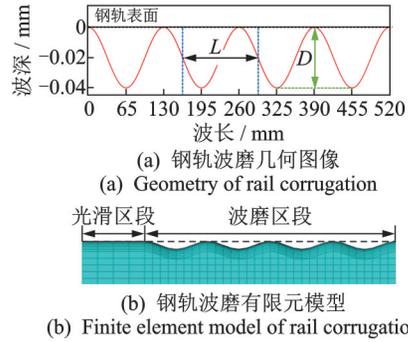
模拟钢轨上的波磨时,通常表示为周期性的谐波磨耗,表达式为

$$Y = Y_0 - Z_0 =$$

$$Y_0 - \frac{1}{2}D \left[1 - \cos \frac{2\pi}{L}(x - x_0) \right] \quad (0 \leq x \leq nL) \quad (3)$$

其中: Y_0 为光滑钢轨接触面坐标; Z_0 为波磨几何不规则; D 为波深; L 为波长; x_0 为初始相位; n 为周期数。

与车轮多边形有限元模型的修改方法一致,通过式(3)修改钢轨表面接触处的节点坐标模拟钢轨表面波状磨损。波长为 130 mm 的钢轨波磨理论模型如图 5 所示。



黑色虚线为光滑钢轨理想表面;红色曲线为钢轨波磨理论廓线

图 5 波长为 130 mm 的钢轨波磨理论模型

Fig.5 Theoretical model of rail corrugation with wavelength of 130 mm

3 轮轨系统摩擦耦合振动分析理论

基于摩擦耦合振动理论的观点,高速铁路长大坡道区段趋于饱和的轮轨蠕滑力诱导的轮轨摩擦耦合振动,会导致和加剧车轮多边形和钢轨波磨的产生和发展。笔者采用复特征值分析法和瞬时动态分析法研究轮轨系统的摩擦耦合振动特性。

复特征值分析法是一种在频域上预测分析系统发生不稳定振动的频率和模态的方法。当采用复特征值分析法时,轮轨摩擦系统的动力学方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (4)$$

其中:非对称矩阵 M , C 和 K 分别为系统的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; \ddot{x} , \dot{x} , x 分别为系统的节点加速度、节点速度和节点位移。

系统的特征值方程为

$$(\lambda^2 M + \lambda C + K)\phi = 0 \quad (5)$$

其中: λ 和 ϕ 分别为系统的特征值和特征向量。

采用 QZ 方法求解广义的非对称矩阵的特征值方程,得到通解为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \phi_i \exp(\alpha_i + j\omega_i)t \quad (6)$$

其中: $\alpha_i + j\omega_i$ 为第 i 阶特征值; α_i 为轮轨系统特征值实部。

特征值的实部是判断系统稳定性的重要参数,当实部 α_i 大于 0 时,系统趋于不稳定。因此,复特征值分析中可以根据实部来评估系统的稳定性。

在瞬时动态分析中,在时间增量步的开始建立系统平衡方程

$$M\ddot{x}_{(t)} = P_{(t)} + I_{(t)} \quad (7)$$

其中: t 为时间增量; $P_{(t)}$ 为系统的外力向量; $I_{(t)}$ 为系统的内力向量。

系统的加速度向量为

$$\ddot{x}_t = \frac{P_{(t)} - I_{(t)}}{M} \quad (8)$$

采用中心差分法对式(8)进行时间积分,计算系统在时间增量的中间增量 $t + \Delta t/2$ 时刻的速度和 $t + \Delta t$ 时刻的位移分别为

$$\dot{x}_{(t+\Delta t/2)} = \dot{x}_{(t-\Delta t/2)} + \frac{\Delta t_{(t+\Delta t)} + \Delta t_{(t)}}{2} \ddot{x}_t \quad (9)$$

$$x_{(t+\Delta t)} = x_{(t)} + \Delta t_{(t+\Delta t)} \dot{x}_{(t+\Delta t/2)} \quad (10)$$

由于存在中间增量,系统的加速度和速度在 $t=0$ 时需要被定义才能进行下一步的计算,因此系统的初始速度和加速度均设为 0,通过瞬时动态分析法求解轮轨系统在时域上的摩擦耦合振动特性。

4 结果与讨论

4.1 高速铁路车轮多边形和钢轨波磨成因

高速列车在长大坡道区段运行时,趋于饱和的轮轨蠕滑力会引发轮轨系统的摩擦耦合振动^[6,10]。首先,假设轮对和钢轨都是光滑的,为了模拟轮轨蠕滑力饱和的情况,在轮轨间设置摩擦滑动接触,引入摩擦耦合关系,在蠕滑力饱和的车轮上添加滑移;其次,通过模态分析提取轮轨系统的自然频率;最后,通过复特征值分析提取轮轨系统复特征值实部及模态,如图6所示。轮轨系统出现实部为 0.716 84、频率为 644.48 Hz 的摩擦耦合振动,在对应的振动模式中左右钢轨与轮对均发生摩擦耦合振动。

$$f_1 = nv/2\pi R \quad (11)$$

$$f_2 = v/\lambda \quad (12)$$

其中: n 为多边形阶数; λ 为波磨波长; R 为车轮滚动圆半径; f_1, f_2 分别为车轮多边形和钢轨波磨的频率特征; v 为车速。

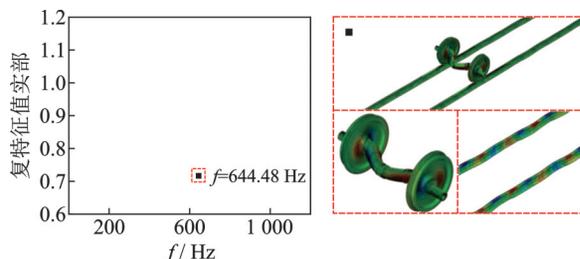


图6 轮轨系统复特征值实部及模态

Fig.6 Real parts and modal of complex eigenvalues of wheel-rail system

根据式(11),(12)可计算出诱导长大坡道区段车轮多边形和钢轨波磨的频率范围为 519.25~663.48 Hz 和 520.83~694.44 Hz。644.48 Hz 的摩擦耦合振动频率在车轮多边形和钢轨波磨的诱导频率范围内,且与该频率对应的是 22 阶车轮多边形和波长为 130 mm 的钢轨波磨。这说明轮轨系统的摩擦耦合振动诱导了 22 阶车轮多边形和波长为 130 mm 的钢轨波磨。

4.2 具有相关性的车轮多边形和钢轨波磨相互作用

分析发现,22 阶车轮多边形和波长为 130 mm 的钢轨波磨在诱发频率上存在一定的相关性。选用深度为 0.05 mm 的 22 阶车轮多边形和波深为 0.04 mm、波长为 130 mm 的钢轨波磨^[2],通过复特征值分析法研究不同工况下轮轨系统摩擦耦合振动特性,如表 2 所示。

表 2 轮轨系统摩擦耦合振动特性

Tab.2 States of contact between the wheel and rail under different operating conditions

工况	接触状态	接触模型
1	光滑车轮-光滑钢轨	
2	多边形车轮-光滑钢轨	
3	光滑车轮-波磨钢轨	
4	多边形车轮-波磨钢轨	

不同工况下轮轨系统复特征值实部如图 7 所示。可见,系统发生摩擦耦合振动的频率均在 645 Hz 左右,复特征值实部越大,轮轨系统发生摩擦耦合振动的可能性越大。

不同工况下轮轨系统摩擦耦合振动特性如表 3 所示。对比工况 2,1 发现,系统的复特征值实部增加,证明车轮多边形会加剧轮轨系统的摩擦耦合振动。对比工况 3,1,系统的复特征值实部也有一定的增大,说明钢轨波磨加剧轮轨系统的摩擦耦合振动。对比工况 1~3 发现,车轮多边形对系统稳定性的影响大于钢轨波磨。综合 4 种工况发现,车轮多边形和钢轨波磨同时存在时,对轮轨系统摩擦耦合振动的影响最大。

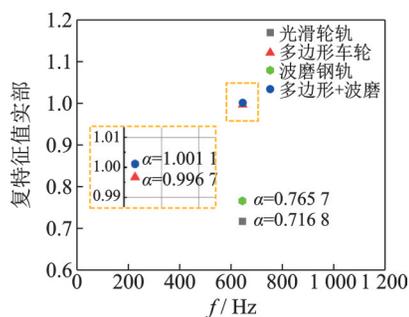


图 7 不同工况下轮轨系统复特征值实部

Fig.7 Real parts of complex eigenvalues of wheel-rail system under different operating conditions

表 3 不同工况下轮轨系统摩擦耦合振动特性

Tab.3 Friction coupling vibration characteristics of wheel-rail system under different operating conditions

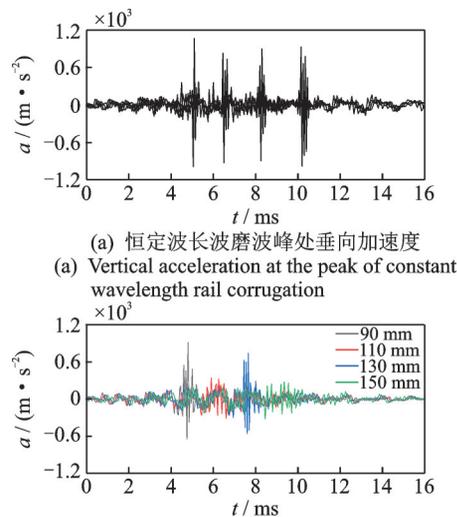
工况	f/Hz	实部
1	644.48	0.716 8
2	645.92	0.996 7
3	644.49	0.765 7
4	645.91	1.001 1

4.3 无相关性的车轮多边形和钢轨波磨相互作用

现场调研发现,在实际线路中同一区段钢轨波磨是以连续变波长的钢轨波磨出现,车轮多边形与这种变波长钢轨波磨之间不存在频率相关性。笔者通过瞬时动态分析法在时域上研究无频率相关性的车轮多边形和钢轨波磨相互作用时轮轨系统摩擦耦合振动的动态响应。将钢轨设置动态松弛区和细化研究区,对钢轨研究区段的网格进行局部细化,动态松弛区的网格不做细化处理以节约计算时间。此外,对车轮建立 22 阶多边形,波深为 0.05 mm;对钢轨研究区段分别建立波长为 90~110~130~150 mm 的连续变波长的钢轨波磨和波长恒定 130 mm 的钢轨波磨,波深为 0.1 mm^[16],并且在钢轨表面钢轨波磨波峰对应的节点设置加速度监测点,通过提取钢轨表面钢轨波磨波峰节点处的垂向振动加速度研究轮轨系统的摩擦耦合振动特性。

轮轨系统瞬时动态分析结果如图 8 所示。车轮经过波长恒定为 130 mm 的钢轨波磨区段时,钢轨波磨波峰处的垂向加速度幅值大致相同,呈现出明显的周期规律,如图 8(a)所示。车轮运行在连续变波长的波磨区段时,钢轨波磨波峰处的垂向加速度幅值没有规律,如图 8(b)所示。对比 2 种工况发现,恒定波长的钢轨波磨波峰处的垂向加速度幅值显著

大于变波长钢轨波磨波峰处的垂向加速度幅值。



(a) 恒定波长波磨波峰处垂向加速度
(a) Vertical acceleration at the peak of constant wavelength rail corrugation

(b) 变波长波磨波峰处垂向加速度
(b) Vertical acceleration at the peak of variable wavelength rail corrugation

图 8 轮轨系统瞬时动态分析结果

Fig.8 Instantaneous dynamic analysis result of wheel-rail system

综上所述,具有频率相关性的车轮多边形和钢轨波磨相互作用时,波磨波峰处垂向振动加速度呈现出明显的周期规律,且促进了轮轨系统的摩擦耦合振动;无频率相关性的车轮多边形和钢轨波磨相互作用时,波磨波峰处垂向振动加速度无规律,对轮轨系统的摩擦耦合振动的影响较小,后续发展不明确。笔者选取了 4 种波长的波磨,波长差均为 10 mm,而在高速铁路的实际线路中,不同波磨之间波长的差异可能更大且随机分布,说明两者关联性较弱。

5 结 论

1) 列车在高速铁路长大坡道直线区段行驶时,趋于饱和的轮轨蠕滑力会诱导轮轨系统发生摩擦耦合振动,从而会引发 22 阶车轮多边形和波长为 130 mm 钢轨波磨。

2) 在具有频率相关性的车轮多边形和钢轨波磨的研究中,车轮多边形和钢轨波磨会加剧轮轨系统的摩擦耦合振动,且车轮多边形对轮轨系统摩擦耦合振动的影响大于钢轨波磨。

3) 无频率相关性的车轮多边形和钢轨波磨相互作用时,未呈现出相互促进的关系。在高速铁路实际线路中,同一区段的钢轨波磨的波长为随机分布,车轮多边形和钢轨波磨的后续发展关联性较弱。

参 考 文 献

- [1] 朱海燕, 胡华涛, 尹必超, 等. 轨道车辆车轮多边形研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(1): 102-119.
ZHU Haiyan, HU Huatao, YIN Bichao, et al. Research progress on wheel polygons of rail vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(1): 102-119. (in Chinese)
- [2] XU X T, CUI X L, XU J, et al. Study on the interaction between wheel polygon and rail corrugation in high-speed railways[J]. Materials, 2022, 15(24): 8765.
- [3] KANG X, CHEN G X, SONG Q F, et al. Effect of wheelset eccentricity on the out-of-round wheel of high-speed trains[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 131(8): 105816.
- [4] LIAO X K, YI C, ZHANG Y, et al. A simulation investigation on the effect of wheel-polygonal wear on dynamic vibration characteristics of the axle-box system[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 139: 106513.
- [5] JIN X S, WU L, FANG J Y, et al. An investigation into the mechanism of the polygonal wear of metro train wheels and its effect on the dynamic behavior of a wheel/rail system[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(12): 1817-1834.
- [6] 陈光雄, 崔晓璐, 王科. 高速列车车轮踏面非圆磨耗机理[J]. 西南交通大学学报, 2016, 29(2): 244-250.
CHEN Guangxiong, CUI Xiaolu, WANG Ke. Generation mechanism for polygonalization of wheel treads of high-speed trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 29(2): 244-250. (in Chinese)
- [7] 吴波文, 刘婷, 王晓翠, 等. 基于有限元的高速列车车轮多边形磨耗成因分析[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(1): 131-141.
WU Bowen, LIU Ting, WANG Xiaocui, et al. Formation of polygonalization of the high-speed train wheels based on the finite element method[J]. Tribology, 2022, 42(1): 131-141. (in Chinese)
- [8] GRASSIE S L. Rail irregularities, corrugation and acoustic roughness: characteristics, significance and effects of reprofiling[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2012, 226(5): 542-557.
- [9] BLOCH C, TREIMER M, MULLER G. Linear and nonlinear energy analysis of a minimal model for brake squeal[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 508(2): 116188.
- [10] 陈光雄, 钱韦吉, 莫继良, 等. 轮轨摩擦自激振动引起小半径曲线钢轨波磨的瞬态动力学[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 71-76.
CHEN Guangxiong, QIAN Weiji, MO Jiliang, et al. A transient dynamics study on wear-type rail corrugation on a tight curve due to the friction-induced self-excited vibration of a wheelset-track system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 71-76. (in Chinese)
- [11] BAO P Y, CUI X L, DING H H. Influences of friction self-excited vibration characteristics of various types of high-speed trains on rail corrugations in braking sections[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 134: 106087.
- [12] ZHAO X, WEN Z F, WANG H Y, et al. Modeling of high-speed wheel-rail rolling contact on accorugated rail and corrugation development[J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering, 2014, 15(12): 946-963.
- [13] 姜子清, 司道林, 李伟, 等. 高速铁路钢轨波磨研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(4): 9-14.
JIANG Ziqing, SI Daolin, LI Wei, et al. On rail corrugation of high speed railway[J]. China Railway Science, 2014, 35(4): 9-14. (in Chinese)
- [14] NIELSEN J C O, LUNDEN R, JOHANSSON A, et al. Train-track interaction and mechanisms of irregular wear on wheel and rail surfaces[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 40(1/2/3): 3-54.
- [15] 崔晓璐, 唐传平, 包鹏羽, 等. 高速列车制动区段钢轨波磨抑制方法[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(3): 656-664.
CUI Xiaolu, TANG Chuanping, BAO Pengyu, et al. Rail corrugation suppressing method on braking sections of high-speed trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(3): 656-664. (in Chinese)
- [16] 朱海燕, 袁遥, 肖乾, 等. 钢轨波磨研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 110-133.
ZHU Haiyan, YUAN Yao, XIAO Qian, et al. Research progress on rail corrugation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 110-133. (in Chinese)



第一作者简介:崔晓璐,女,1990年7月生,博士、教授。主要研究方向为轮轨摩擦学。曾发表《Research on the failure mechanism of elastic strip fracture in corrugated sections of metros》(《Engineering Failure Analysis》2023, Vol.134)等论文。

E-mail: cui_xiaolu@foxmail.com