

轮轨耦合系统振动特性对钢轨波磨产生的影响^{*}

汪梦寒¹, 顾晓菡^{1,2}, 王安斌^{1,2}

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院 上海, 201620)

(2. 上海轨道交通振动与噪声控制技术工程研究中心 上海, 201620)

摘要 针对高铁线路的钢轨波磨问题, 基于轨道结构振动理论, 提出减缓钢轨波磨发展的方法。首先, 通过现场实测某高速铁路线路钢轨波磨与轨道频率响应函数, 开展了轮轴模态试验, 建立了轮轨三维实体有限元模型, 并验证模型准确性; 其次, 分析轮轨耦合系统动态特性与钢轨波磨的相关性。结果表明: 钢轨波磨主要发生在曲线段低轨部分, 其波长为 165 mm, 车速为 250 km/h 的车辆波磨频率为 420 Hz; 轮轨耦合条件下轨道系统钢轨横向 Pinned-pinned 模态频率为 418 Hz, 与波磨特征频率吻合; 轮对在波磨特征频率附近的轴向响应大于径向响应, 其车轮在 418 Hz 左右的一阶轴向弯曲模态与钢轨横向 Pinned-pinned 模态重叠形成多重共振, 对激励和加快钢轨周期性波浪磨损的影响较大; 轮轨耦合条件下钢轨横向 Pinned-pinned 频率随着轮轴质量的减少而增加, 但影响较弱, 而不同类型钢轨对横向 Pinned-pinned 共振频率的影响较大; 在车轮轴固定情况下, 改变钢轨参数可避免钢轨与轮轴系统模态重叠而发生共振现象, 从而减缓波磨的发展。

关键词 高速铁路; 钢轨波磨; 轮轨动态特性; 轮轨耦合

中图分类号 U213.4; TH117.1

引言

铁路在客运行业中占据重要地位, 随着运营速度与运营里程的大幅增加, 高速铁路运营及维护过程中的线路问题逐渐显现, 如钢轨表面擦损、弹条断裂、钢轨波磨等, 其中, 钢轨波磨问题始终影响铁路的运营安全和维护保养^[1-2]。目前, 相关学者多采用时域模型和频域模型研究钢轨波磨的成因^[3-4]。Sato 等^[5]将日本钢轨波磨总结并分类为小半径曲线短波长波磨(半径为 200~400 m)、直线或大半径曲线短波长波磨(半径大于 800 m)、小半径曲线中等波长波磨(半径为 400~600、600~800 m)。王安斌^[6]提出轮轨柔度差变理论, 认为降低轮轨横向柔度差变以及控制钢轨横向振动可有效抑制钢轨波磨的产生和发展。

钢轨波磨的形成受轨道和车辆动态参数及相互作用的直接影响, 同时也与线路情况密切相关。大量高速铁路与地铁线路的现场调查及测试发现, 较为严重的钢轨波磨通常位于曲线路段, 直线地段虽有发生, 但其严重程度通常较低。此外, 直线段与曲线段的波磨特性(波长、波深等)及成因亦有所区别。王志强等^[7]建立了车辆-轨道刚柔耦合数值模型, 分

析了直线和曲线轨道的轮轨黏滑特性, 利用黏着系数总体离散率衡量钢轨波磨的发生趋势, 发现在曲线轨道内侧轮轨界面纵横向黏着系数的总体离散率大于外侧轮轨界面, 曲线轨道内轨更易发生大强度黏滑振动, 促使内轨波磨的形成和发展。前述研究为揭示钢轨波浪磨损的产生机理奠定了理论基础。然而, 上述研究主要关注轮轨耦合或非轮轨耦合条件下轨道系统垂直方向的振动特性, 鲜有从柔性体轮轨耦合的角度考虑轮轨横向振动特性与钢轨波磨的相关性。轮轨耦合系统为高度复杂的弹塑性动态滚动及滑动摩擦系统。目前, 难以通过测试手段获取实际运行线路中轮轴高速旋转时车轮不同位置的响应及高频轮轨力。

本研究以轮轨耦合系统的特征为目标, 首先, 对耦合系统中轨道和轮对的振动特性进行分析, 确定仿真无载轨道及轮对的振动特性与实际情况一致; 其次, 研究轮轨耦合系统动态响应特性, 分析轮轨系统动态参数与钢轨波磨的相关性, 特别是耦合系统轨道横向动态特性及横向激励对钢轨波磨形成和发展的影响, 明确钢轨波磨在所测试线路的产生原因, 并提出相应减缓波磨的方法。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(52178441); 中国国家铁路集团科技研究开发计划资助项目(L2021G005)

收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2023-08-19

1 高速铁路钢轨波磨与测试

某高速铁路车辆运行速度约为 300 km/h,困难路段曲线半径为 7 km。该高速铁路所铺设的无砟轨道为中国铁路轨道系统(China railway track system, 简称 CRTS) I 型板式无砟轨道与 CRTS II 型板式无砟轨道,测试路段铺设 CRTS II 型板式无砟轨道,钢轨为 60 kg/m,轨道扣件为 W300 型高铁扣件,扣件支承间距为 0.65 m。轨道系统如图 1 所示。



图 1 轨道系统

Fig.1 Track system

采用如图 2 所示的波磨分析小车(corrugation analysis trolley, 简称 CAT)钢轨波磨测试系统测量钢轨波磨特征。测试探头在轮轨接触面(光带)中间,沿钢轨长度方向记录轨面不平顺幅值,获得“不平顺幅值-里程”数据。



图 2 CAT 钢轨波磨测试系统

Fig.2 CAT rail corrugation testing system

对某高速铁路上行线典型地段 100 m 长度钢轨波磨进行测试记录和分析,测试线路段为曲线段,参考国际标准^[8]对“不平顺幅值-里程”数据进行拉普拉斯变换及频谱分析,测试数据包含高轨和低轨部分。钢轨波磨测试结果如图 3 所示。由图可知,钢轨波磨主要发生在低轨,且低轨波长主要集中在 165 mm。

为研究钢轨波浪磨耗对应的频率特性,该地段车辆实际运营速度约为 250 km/h,对应钢轨波磨波长的频率为

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{250/3.6}{0.165} \approx 420$$

即对应车速 250 km/h 下,发生 165 mm 波长钢轨波磨的车辆通过频率为 420 Hz。

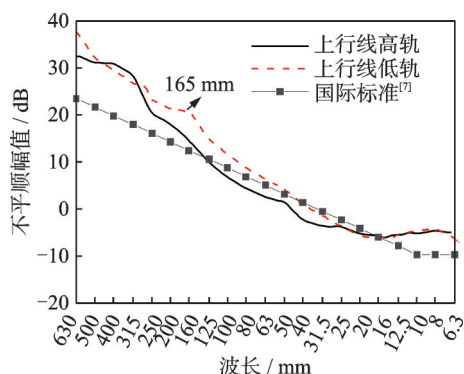


图 3 钢轨波磨测试结果

Fig.3 Rail corrugation of testing results uptrack

2 数值模拟

为探究钢轨波磨与轨道结构振动特性的关系,采用 Abaqus 有限元分析软件建立 1:1 仿真模型。轮轨道结构模型如图 4 所示。该模型考虑了本研究关注的主要特征频率(100~2 000 Hz)^[9],因而轨道长度为 25 m,以对应实际整体道床长度。模型中扣件采用添加弹簧和阻尼单元进行模拟,轨道结构参数如表 1 所示。对单个轮对以及有载、无载条件下的钢轨进行仿真计算,以探究轮轨耦合条件下轮轴模态对钢轨响应结果的影响。

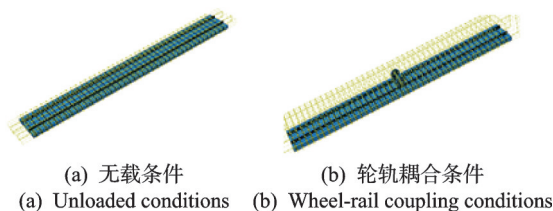


图 4 轮轨道结构模型

Fig.4 Model of wheel-rail structure

表 1 轨道结构参数

Tab.1 Structure parameters of track

结构	参数	数值
钢轨	弹性模量/Pa	2.06×10^{11}
	泊松比	0.3
	密度/(kg·m ⁻³)	7 790
道床板	弹性模量/Pa	3.25×10^{10}
	泊松比	0.25
	密度/(kg·m ⁻³)	2 400
轮对	弹性模量/Pa	2.06×10^{11}
	泊松比	0.3
	密度/(kg·m ⁻³)	7 790
扣件	垂直方向刚度/(N·m ⁻¹)	49×10^6
	横向刚度/(N·m ⁻¹)	26×10^6
	垂直方向阻尼/(N·s·m ⁻¹)	7 000
	横向阻尼/(N·s·m ⁻¹)	5 000
地基	间距/m	0.65
	支撑刚度/(N·m ⁻¹)	1.7×10^8
	支撑阻尼/(N·s·m ⁻¹)	3×10^4

3 高速轮轴-轨道系统动态特性

3.1 无载轨道振动特性

3.1.1 轨道动态特性仿真分析

图 5 为无载条件下钢轨垂直方向柔度。由图可知, 178 Hz 为钢轨相对于轨道板的一阶垂直方向振动模态频率^[9]。图 6 为钢轨垂直方向振动模态。如图 6(a) 所示, 对于无载轨道系统相当于“钢轨-扣件”垂直方向共振频率。第 2 个峰值频率 975 Hz 为钢轨垂直方向 Pinned-pinned 共振频率, 其模态振型如图 6(b) 所示。

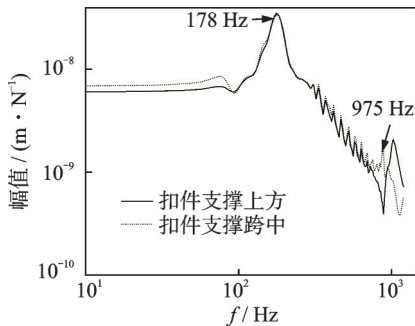


图 5 无载条件下钢轨垂直方向柔度
Fig.5 Rail vertical receptance of the unloaded track

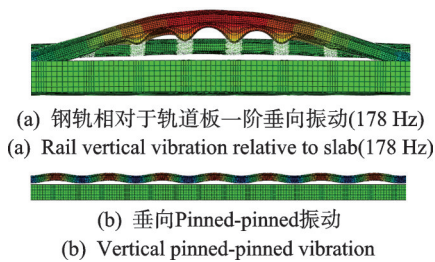


图 6 钢轨垂直方向振动模态
Fig.6 Rail vertical vibration modes

图 7 为无载条件下钢轨横向柔度。由图可知, 130、478 Hz 分别对应钢轨无载条件下的一阶横向弯曲共振频率以及钢轨横向的 Pinned-pinned 频率。478 Hz 的 Pinned-pinned 模态振型如图 8 所示。

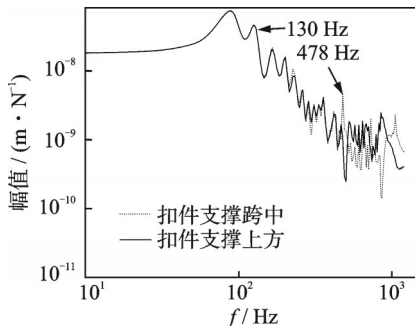


图 7 无载条件下钢轨横向柔度
Fig.7 Rail transverse receptance of the unloaded track

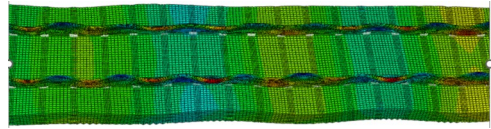


图 8 478 Hz 的 Pinned-pinned 模态振型
Fig.8 Pinned-pinned modal vibration mode of 478 Hz

3.1.2 轨道动态特性测试及仿真模型验证

为研究钢轨波磨与轨道结构动态特性的关系, 建立轨道计算机仿真模型, 对仿真模型的可靠性进行验证, 用力锤在钢轨轨头处进行垂向和横向的激励。图 9 为响应测点示意图。

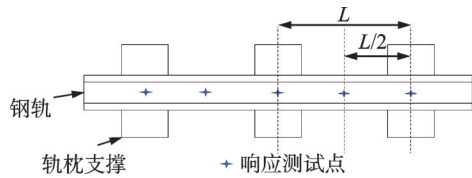


图 9 响应测点示意图
Fig.9 Diagram of response measurement positions

轨道系统激励方式与传感器安装位置如图 10 所示。轨头下方布置垂直方向加速度传感器, 轨头另一侧和轨腰位置布置横向加速度传感器。力锤安装测力传感器。

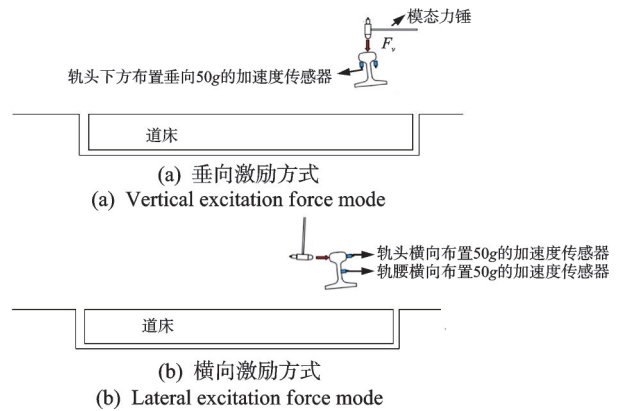
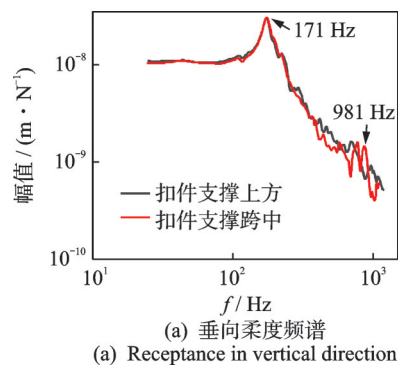
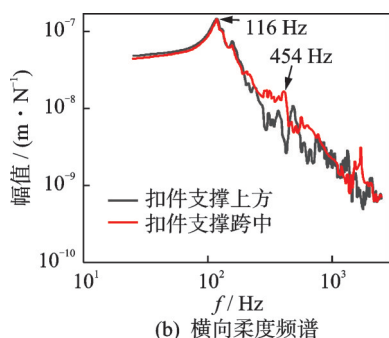


图 10 轨道系统激励方式与传感器安装位置
Fig.10 Excitation force mode of track system and positions of sensors

测试钢轨柔度频谱如图 11 所示, 分别给出了钢轨





(b) 横向柔度频谱
(b) Receptance in lateral direction

图 11 测试钢轨柔度频谱

Fig.11 Measured receptance of rail

垂直方向和横向在扣件支承跨中以及扣件支承处上方截面的柔度测试结果。采用锤击法测得钢轨横向、垂向 Pinned-pinned 频率分别为 454 和 981 Hz。结合图 6(b) 和图 8 可知,测试结果与仿真得到的 Pinned-pinned 频率相吻合,验证了仿真模型的准确性。

3.2 轮轴系统振动特性

3.2.1 轮轴动态特性仿真分析

车轮振动可分为轴向、径向与周向振动,用节径个数 n 与节圆个数 m 表示的模式为轴向振动模式 (n, m) 。在所研究的频率范围内,车轮在圆盘平面的振动一般不出现 1 个或多个节圆 ($m \geq 1$) 的径向和周向模式,因而平面的径向和周向模式分别以节径 n 表示为 (n, R) 和 $(n, C)^{[10]}$ 。其中: R 为径向; C 为周向。

为研究轮对振动特性对轮轨系统动态响应特性的影响,本研究对高速列车轮对进行模式仿真分

析。轮对有限元模型如图 12 所示。为统一轮轴坐标和轨道坐标定义,车轮径向在轮轨接触点与轨道垂直方向一致,车轮轴向与轨道横向方向一致。

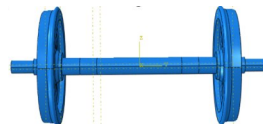


图 12 轮对有限元模型

Fig.12 Finite element model of wheelset

为研究轮轨耦合系统的振型,模式振型统一按耦合后车轮的表现形态进行定义。表 2 为轮对自由模式振型,即轮对在自由状态下的前 32 阶模式频率和模式振型。由表可知,轮对在 1 000 Hz 以下,模式振型主要为车轴弯曲、扭转以及车轮弯曲。车轮出现一阶、二阶轴向弯曲模式振型,在 376 Hz 表现为车轮同向伞形模式振型。在 410 Hz 为车轮一阶轴向弯曲模式,表现为 2 个节径 0 个节圆的 $(2, 0)$ 振型,在 520 Hz 表现为车轴四阶弯曲模式振型。上述轮轴模式频率相对接近轨道横向 Pinned-pinned 频率与波磨峰值频率。车轮在 1 600 Hz 出现径向模式,与文献 [11] 中车轮的径向模式结果类似,即同样在 1 500 Hz 以上车轮才出现径向模式振型,说明车轮径向模式频率较高。从在线测试的波磨频率范围可以看出,车轮径向模式远高于轨道波磨峰值频率和轨道垂直方向的 Pinned-pinned 频率。鉴于车轮对钢轨波磨的影响,需深入研究车轮轴向模式对轨道横向振动影响及相对钢轨波磨的形成和发展。

表 2 轮对自由模式振型

Tab.2 Free mode shape of wheelset

阶数	f/Hz	振型	模式
1	45		轮辋一阶扭转模式
2,3	60		车轴一阶弯曲模式
4,5	105		车轴二阶弯曲模式
6	220		车轮伞形模式对称
7,8	256		车轴三阶弯曲模式

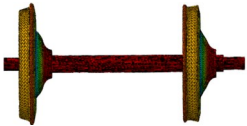
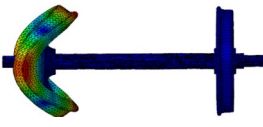
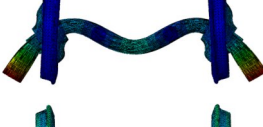
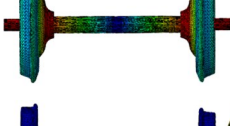
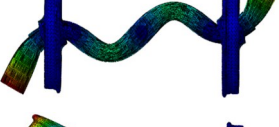
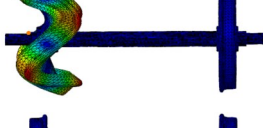
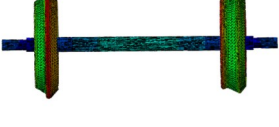
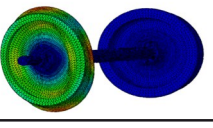
续表			
阶数	f/Hz	振型	模态
9	376		车轮伞形模态反对称
10,11,12,13	410		车轮一阶轴向弯曲模态
14,15	520		车轴四阶弯曲模态
16,17	720		车轴五阶弯曲模态
18	928		车轮相对伞状变形,车轴拉伸
19,20	967		车轴六阶弯曲模态
21,22,23,24	1 076		车轮二阶轴向弯曲模态
25	1 167		车轴外鼓
26,27	1 327		车轴七阶弯曲模态
28,29	1 520		车轴八阶弯曲模态
30,31	1 546		辐板振动
32	1 600		车轮一阶径向模态

图 13 为轮对自由状态下轮轨接触点的车轮轴向柔度频谱。由图可知,波磨特征频率附近的峰值为 410 Hz,即(2,0)振型。在峰值频率处,轮对轴向柔度大于径向柔度。图 14 为轮对仿真模态振型。由图可知,相对于波磨频率 420 Hz,车轮轴向模态(2,0)产生的横向振动频率更接近钢轨波磨频率。

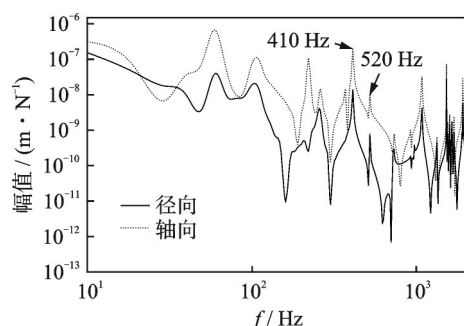


图 13 轮对自由状态下轮轨接触点的车轮轴向柔度频谱
Fig.13 Wheel axial receptance of wheel-rail contact points for unconstrained wheelset

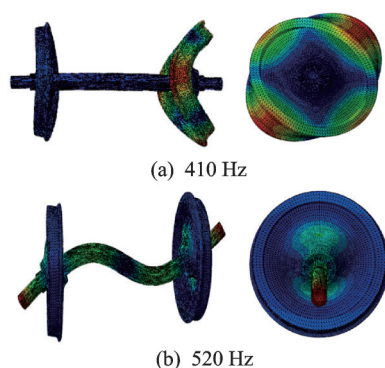


图 14 轮对仿真模态振型
Fig.14 Simulated mode shape of wheelset

3.2.2 轮轴动态特性测试及仿真模型验证

采用移动力锤和固定响应点的方法对轮对进行轮对动态特性模态试验,利用特征系统实现算法进行拟合,得到前 28 阶固有频率及振型。激励点共 86 个,其中车轮激励 72 个(每个车轮 36 个,包含 28 个轴向分布在车轮的 3 个八等分同心圆位置和车轴处的 4 等分点位置,以及 8 个沿周边的径向激励点),车轴激励 14 个(沿车轴 7 个截面的水平方向和垂直方向)。轮轴模态试验测点布置如图 15 所示。

图 16 为车轮一阶轴向弯曲模态振型,图 17 为车轴四阶弯曲模态振型,展示了模态测试的模态频率的试验结果和仿真结果。可以看出,仿真结果与试验测试结果的误差在 5% 以内,验证了轮对模型的准确性。

4 轮轨耦合系统动态特性与钢轨波磨的相关性分析

4.1 轮轨耦合系统动态特性

为进一步研究轮轨耦合动态特性,针对实际运营线路中车载条件下出现的钢轨波磨问题,建立轮轨耦合三维动力模型,并进行垂向、横向频率响应分

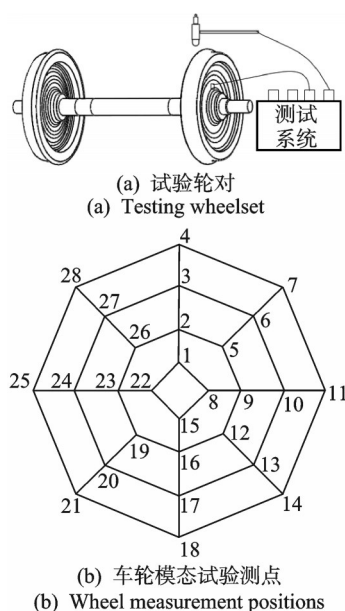


图 15 轮轴模态试验测点布置
Fig.15 Wheel modal test measurement positions

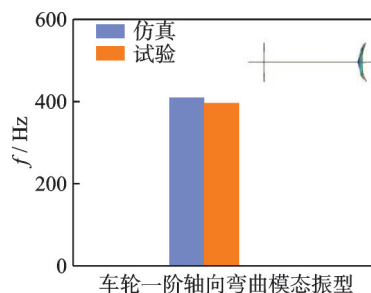


图 16 车轮一阶轴向弯曲模态振型
Fig.16 Wheel first-order axial bending mode shapes

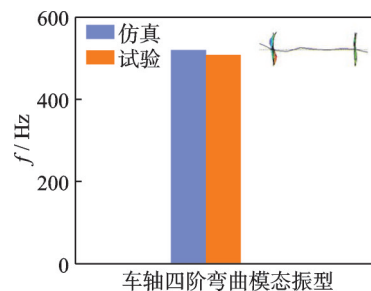


图 17 车轴四阶弯曲模态振型
Fig.17 Axle fourth-order bending mode shapes

析,结合轮轨耦合模型的模态振型,研究轮轨耦合动态特性与钢轨波磨的相关性。

图 18 为轨道振动模态频率差值,分别给出了在轮轨耦合条件下与无载条件下轨道垂直方向和横向模态频率差值曲线。由图可知,考虑轮对结构对轨道中低频垂直方向模态振动(73~400 Hz)和轨道中低频横向模态振动(43~400 Hz)的影响较小,考虑和不考虑轮对结构时的轨道垂直方向模态频率最大差值为 15 Hz,轨道横向模态频率最大差值为

16 Hz,而轮对结构对轨道高频模态(400~1 000 Hz)振动影响相对较大,达到 38~70 Hz。为准确研究轮轨系统动态特征对钢轨波磨的相关性,须建立轮轨三维耦合模型对相关特性进行研究。

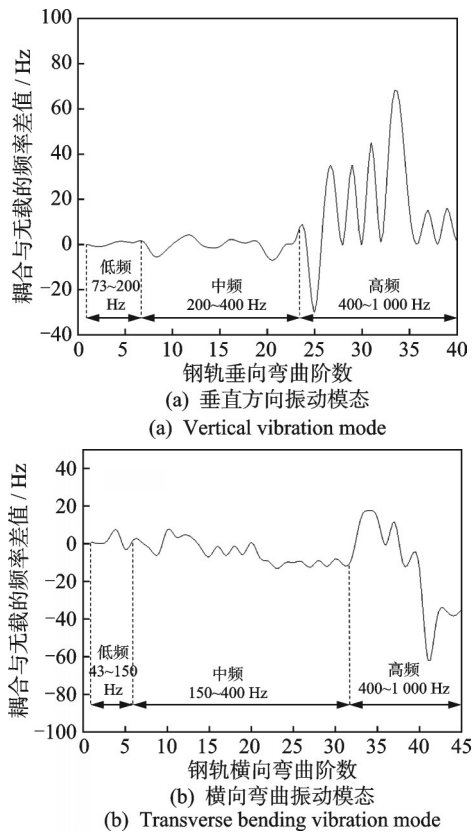


图 18 轨道振动模式频率差值
Fig.18 Frequency difference of rail vibration mode

4.2 轮轨耦合系统动态特性与钢轨波磨的相关性

4.2.1 钢轨垂直方向柔度的影响

轮轨耦合系统钢轨垂直方向柔度频谱如图 19 所示。由图可知,钢轨垂直方向 P2 频率在 70 Hz 左右,Pinned-pinned 频率为 1 067 Hz,在波磨特征频率

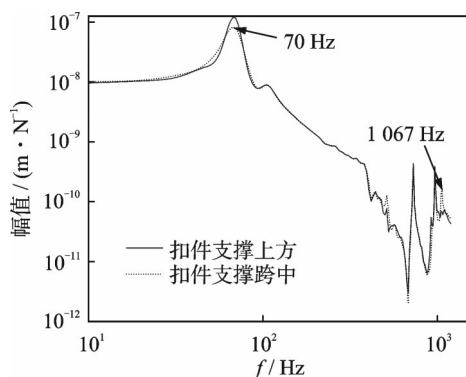


图 19 轮轨耦合系统钢轨垂直方向柔度频谱
Fig.19 Rail vertical receptance of wheel-rail coupling system

附近。轮轨耦合系统在垂向无明显共振峰值模态频率,说明轮对径向模态及轨道垂向模态对钢轨波磨的影响不大。

4.2.2 钢轨横向柔度的影响

轮轨耦合系统钢轨横向柔度频谱如图 20 所示。图中钢轨横向 P2 频率在 60 Hz 左右,横向 Pinned-pinned 频率为 418 Hz。轮轨耦合下 418 Hz 模态振型如图 21 所示,其振型表现为以钢轨弹性扣件支承点相对固定。对比图 3 可知,图 21 中轮轨耦合条件下横向 Pinned-pinned 模态频率 418 Hz 与钢轨波磨频率几乎一致,具有较强的关联性。分析表明,钢轨横向 Pinned-pinned 模态形成轨道共振,导致钢轨的横向振动以及车轮的相互横向滑动增大,这是导致钢轨周期性波浪磨损产生和发展的主要原因之一。

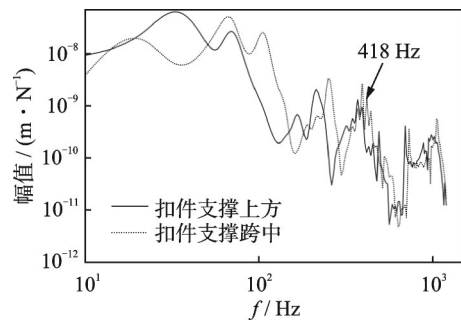


图 20 轮轨耦合系统钢轨横向柔度频谱
Fig.20 Rail lateral receptance of wheel-rail coupling system

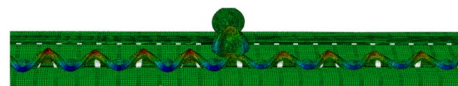


图 21 轮轨耦合下 418 Hz 模态振型
Fig.21 Mode shape of wheel-rail coupling system at 418 Hz

由于多数轨道系统采用不连续支承方式,且通过弹性扣件将钢轨以固定间距安装于轨枕或道床,这种不连续支承形成的 Pinned-pinned 模态振型表现为钢轨支承点相对固定(见图 21),使钢轨沿纵向模态振型节点与扣件支承间距成整倍数关系。车辆每次通过线路激励时,钢轨横向振动的峰值与节点位置相对于扣件支承位置较为固定。因此,当车辆在相同或相近车速通过时,轮轨相对横向滑动的“谷-峰”及节点的位置也基本保持不变,即钢轨在 Pinned-pinned 频率下的振动波形沿钢轨方向呈同相位或反相位。随着通过车辆逐渐增多,钢轨表面“谷-峰”磨损加大,形成钢轨波磨,最终造成固定波长的周期性钢轨磨损。

4.2.3 轮轴轴向柔度对钢轨波磨的影响

图 21 中轮轴振型与图 14(a)轮轴振型一致,同为 2 节径 0 节圆(2,0)的车轮一阶轴向弯曲模态,车轴几

乎没有弯曲,以车轮轴向弯曲振动为主。可以看出,轮轴轴向弯曲模态相对钢轨横向 Pinned-pinned 频率 418 Hz 较为接近。对比图 3 可知,轮轨耦合条件下轮轴一阶轴向弯曲频率与波磨频率的相关性较高。轮轨耦合模态分析结果表明,耦合的轮轴一阶轴向弯曲模态与钢轨横向 Pinned-pinned 模态重叠形为多重共振,使轮轨间各自横向振动及相互滑动增大,对激励和钢轨周期性波浪磨损的产生和发展影响较大。

4.2.4 线路曲线半径对钢轨波磨的影响

在车辆运营过程中,尤其在线路曲线段,车辆难以持续以线路设计的平衡速度运行。同时,轨道系统横向柔度往往大于垂向,导致车辆在弯道行驶时更易产生显著的横向振动,这种高频横向振动会引发轮轨间蠕滑力周期性变化^[12],这与实际线路中钢轨波磨多发于小半径曲线段的现象一致。

在曲线段,由于高低轨上车轮的滚动圆周长存在差异,轮轨在高频横向振动时的纵向滑动及踏面接触位置不同,钢轨严重磨损在低轨时多发于钢头顶面,在高轨则多发于轨头侧面。车轮和轨头侧面的接触面增加,降低了轨头顶面横向轮轨间蠕滑力分量和顶面磨损量,造成曲线段低轨的波磨比高轨更为严重(见图 3)。

4.3 轮轴及钢轨对轮轨耦合系统钢轨横向 Pinned-pinned 频率的影响

为研究轮轨耦合系统中车轮与钢轨对波磨的影响,特别是避免轮轴模态与轨道 Pinned-pinned 模态重叠共振,对不同车轮及钢轨参数对耦合系统的影响进行探索,在原建立的耦合模型基础上,采用半轨模型进行参数分析,以提高计算效率。

4.3.1 车轮质量的影响

通过改变模型中车轮材料密度,设置正常车轮 0.01、0.1、0.96(车轮磨损)、2、10 及 100 倍的工况,获得不同质量轮对的轮轨耦合系统横向 Pinned-pinned 共振频率如图 22 所示。由图可知,随着轮轴载重的减少,轮轨耦合后横向 Pinned-pinned 共振频率逐渐升高。然而,在实际运行中,列车里程超过 2×10^6 km 时,车轮踏面磨损深度仅为 1.7 mm 左右^[13],即质量损耗不足原质量的 4%。

如图 22(d) 可知,横向 Pinned-pinned 频率为 419 Hz,与未磨损的横向 Pinned-pinned 频率 418 Hz 相比几乎不变。当车轮质量变化幅度达 1 000%,即从 0.1 倍增加至 10 倍时,轮轴耦合系统钢轨横向 Pinned-pinned 频率从 443 Hz 降至 375 Hz。相较于于

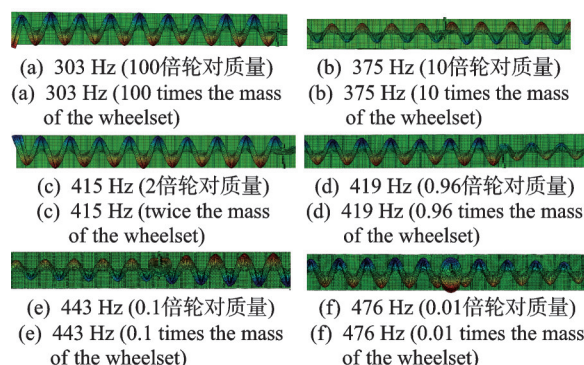


图 22 不同质量轮对的轮轨耦合系统横向 Pinned-pinned 共振频率

Fig.22 Transverse pinned-pinned resonance frequency of wheel-rail coupling system with different mass wheelsets

正常车轮工况,频率变化仅为 6%~10%。总体而言,车轮质量对轨道 Pinned-pinned 频率影响并不显著,这表明通过更换不同质量的轮对来调控轮轨耦合系统钢轨横向 Pinned-pinned 共振的效果有限。

4.3.2 钢轨的影响

研究不同类型钢轨对轮轨耦合系统横向 Pinned-pinned 共振的影响时,须参考相关国家标准^[14]。选用 50、75 kg/m 的钢轨与正常线路的 60 kg/m 钢轨进行对比,不同类型钢轨的轮轨耦合系统横向 Pinned-pinned 共振频率如图 23 所示。由图可知,钢轨型号对共振频率的影响较大。因此,通过调整钢轨类型,可改变轨道结构横向 Pinned-pinned 振动频率,在不改变车轮轴的情况下避免与轮轴系统模态重叠而发生共振,从而减缓钢轨波磨的发展。

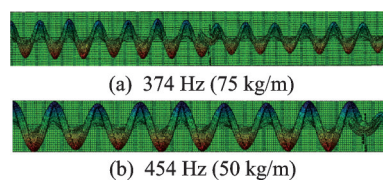


图 23 不同类型钢轨的轮轨耦合系统横向 Pinned-pinned 共振频率

Fig.23 Transverse pinned-pinned resonance frequency of wheel-rail coupling system with different rail types

基于上述轮轨耦合系统动态特性研究,可进一步开展钢轨波磨控制研究。例如,通过调频阻尼器控制钢轨横向 Pinned-pinned 模态的振动强度或降低轮轨横向摩擦力等手段,抑制钢轨波磨的形成和发展。

5 结 论

1) 在某高速铁路线路隧道内,钢轨波磨主要发生在曲线段低轨,波磨波长主要为 165 mm;在 250 km/h 的条件下,由固定波长机理得出波磨特征

频率为420 Hz。

2) 在轮轨耦合条件下,钢轨横向 Pinned-pinned 模态频率为418 Hz,与波磨地段钢轨波磨频率一致;在轮轨力激励下,该模态增大了钢轨横向振动以及车轮间的相对横向滑动,且由于振型在钢轨支承点相对固定,磨损持续积累,最终形成并发展出固定波长的周期性钢轨磨损。

3) 轮对模态与轮轨耦合动态仿真结果表明,在轮轨耦合条件下,轮对轴向(2,0)模态与钢轨横向 Pinned-pinned 模态在约418 Hz重叠,形成多重共振,对激励和加快钢轨周期性波浪磨损有重要影响。

4) 在轮轨耦合条件下,钢轨横向 Pinned-pinned 频率随着轮轴质量降低而增加,但该影响并不显著;不同类型的钢轨对横向 Pinned-pinned 共振频率影响较大,在不改变车轮轴的情况下,可通过调整钢轨参数避免与轮轴系统模态重叠而发生共振,从而减缓波磨的发展。

5) 通过对轨道结构进行模态与频率响应分析,从振动特性的角度分析了钢轨波磨的形成机理。该机理十分复杂,影响因素较多,本研究所构建有限元模型可为研究不同轨道与轮轴系统参数(扣件动刚度、轮轨间黏滑状态及黏滑振动等)提供參考。

参 考 文 献

- [1] 于森. 高速铁路轨道-车辆系统高频瞬态仿真及波磨机理研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.
- [2] 王志强, 雷震宇. 基于黏滑振动特性的钢轨波磨形成机制[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(5): 949-957.
WANG Zhiqiang, LEI Zhenyu. Research on the formation mechanism of rail corrugation based on stick-slip vibration characteristics [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(5): 949-957. (in Chinese)
- [3] GÓMEZ J, VADILLO E G, SANTAMARÍA J. A comprehensive track model for the improvement of corrugation models[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3/4/5): 522-534.
- [4] CARLBERGER A, TORSTENSSON P T, NIELSEN J C O, et al. An iterative methodology for the prediction of dynamic vehicle-track interaction and long-term periodic rail wear[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(6): 1718-1730.
- [5] SATO Y, MATSUMOTO A, KNOTHE K. Review on rail corrugation studies[J]. Wear, 2002, 253(1/2): 130-139.
- [6] 王安斌. 钢轨横向动态位移及振动水平对轨道安全性

及钢轨波浪磨损的影响[J]. 材料开发与应用, 2016, 31(3): 1-6.

WANG Anbin. Effects on track safety and rail corrugation development with rail lateral deflection and vibration level[J]. Development and Application of Materials, 2016, 31(3): 1-6. (in Chinese)

- [7] 王志强, 雷震宇. 基于轮轨黏滑特性的地铁线路波磨趋势分析[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(1): 17-25.
WANG Zhiqiang, LEI Zhenyu. Analysis of corrugation trend on metro line based on wheel-rail stick-slip characteristics [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(1): 17-25. (in Chinese)
- [8] ISO. ISO 3095:2013(en) acoustics-railway application-measurement of noise emitted by rail bound vehicles[S]. London: British Standards Institution, 2013.
- [9] 李霞. 地铁钢轨波磨形成机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [10] 王发明. 轮轨系统振动及声辐射特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [11] 钟庭生. 高速铁路板式轨道轮轨滚动噪声预测[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [12] 李伟, 李言义, 张雄飞, 等. 地铁车辆车轮多边形的机理分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 17-22.
LI Wei, LI Yanyi, ZHANG Xiongfei, et al. Mechanism of the polygonal wear of metro train wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(18): 17-22. (in Chinese)
- [13] 林凤涛, 翁涛涛, 杨洋, 等. 道岔辙叉区磨耗车轮动力学分析及摩擦因数影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(4): 1316-1325.
LIN Fengtao, WENG Taotao, YANG Yang, et al. Dynamic analysis of wear wheel in turnout frog area and influence of friction coefficient[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(4): 1316-1325. (in Chinese)
- [14] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 2585—2021 铁路用热轧钢轨[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.



第一作者简介:汪梦寒,男,1998年1月生,硕士生。主要研究方向为钢轨波浪磨损机理及其控制方法。
E-mail:wmhstu@163.com

通信作者简介:王安斌,男,1961年5月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为钢轨波磨、噪声产生机理及控制方法。
E-mail:wangab725@163.com