

地铁钢轨短波长波磨形成原因分析*

周志军, 李伟, 温泽峰, 肖国放

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都, 610031)

摘要 国内某地铁线路运营后曲线轨道出现了短波长钢轨波磨现象,通过力锤敲击法对不同扣件轨道动态特性进行了测试。利用 ABAQUS 建立了轮轨三维实体有限元模型,分析了轮轨耦合模态特性以及白噪声激励时轨道频响特性。结合试验和仿真结果,分析了轮轨结构动态特性与短波长钢轨波磨之间的相关性。研究表明:普通扣件和减振扣件轨道钢轨波磨主波长分别为 30~63 mm 和 40~50 mm;白噪声激励下,两种轨道分别在 450~920 Hz 和 570~720 Hz 范围内的敏感共振频率与列车通过钢轨波磨频率(454~954 Hz 和 572~715 Hz)相吻合;线路轨道短波长波磨的产生主要与轨道结构高频固有特性相关,轨道短波长波磨通过频率与轮轨耦合模态频率相近,其模态振型表现为轮对弯曲扭转的同时,伴随钢轨相对轨道板的垂向弯曲振动,轮轨耦合高频模态特征加剧短波长波磨的发展。

关键词 地铁;短波长钢轨波磨;轨道动态特性;轮轨耦合模态

中图分类号 U213.2; U213.4; TH117.1

1 问题的引出

近年来,我国大部分城市地铁线路的钢轨波浪形磨耗(简称钢轨波磨)现象越来越普遍。钢轨波磨尤其是短波长波磨会恶化轮轨关系,加剧轮轨系统中的高频振动,造成车辆和轨道零部件振动噪声过大,影响车辆运行品质和乘坐舒适性,严重时会导致零部件疲劳失效,存在行车安全隐患^[1]。研究表明,影响钢轨波磨的因素众多,如:钢轨 Pinned-Pinned 共振^[2-3]、P2 共振^[4]、钢轨扣件刚度^[5]、初始钢轨不平顺^[6-7]、轨道初始几何缺陷^[8]、轨枕间距^[9]、列车运行速度^[10]和钢轨材质^[11]等。在针对不同线路条件下出现的不同波磨特征时,需结合现场试验和理论分析模型,全面探究钢轨波磨产生和发展的具体原因。

国内外众多学者对钢轨波磨特征、影响因素、产生机理和减缓措施等方面进行了大量研究。Zarembski^[12]将钢轨波磨定义为 3 类:①短波长波磨(波长 $\lambda=25\sim 75$ mm),通常出现在高速铁路和轻轨重车线路;②长波长波磨(波长 $\lambda=75\sim 600$ mm),通常出现在重载铁路线路;③超长波长波

磨(波长 $\lambda>600$ mm),通常出现在高速铁路线路。Grassie^[13]按照损伤机理和波长固定机理将钢轨波磨分为 Pinned-Pinned 共振(响轨)、车辙、其他 P2 共振、重载、轻轨和轨道形式 6 类,表明钢轨波磨问题的本质是常频率现象,解释了响轨波磨是由轨道结构的 Pinned-Pinned 共振所致。Egana 等^[14]通过现场试验和数值模拟分析轨垫刚度对地铁钢轨波磨发展的影响,研究表明产生 80~100 mm 和 160~185 mm 波长钢轨波磨分别与轨道垂向反共振和轨道垂向 1 阶共振模态相关,将原先轨垫(垂向刚度为 90 kN/mm)替换为低刚度轨垫(垂向刚度为 60 kN/mm)后,钢轨波磨现象得到明显减缓。Vadillo 等^[15]调查了轨枕间距为 1 m 的套靴轨枕混凝土整体道床出现的 66 mm 短波长波磨现象,钢轨加速度导纳测试发现,轨道横向 212 Hz 附近出现了弯曲共振,该频率与钢轨波磨的通过频率相近。通过将轨枕间距改为 0.5 m 后抑制了钢轨波磨。文献^[3,16]现场调查了“科隆蛋”扣件轨道 40~50 mm 波长波磨,数值仿真表明,钢轨波磨与轨道结构垂向振动特性密切相关,不同扣件的刚度和阻尼下轨道共振特性对波磨影响较大。Matsumoto 等^[17]通过数值仿真法和全比例台架试验法研究了

* 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201103-08);四川省科技计划资助项目(2019YFH0053)
收稿日期:2018-12-18;修回日期:2019-04-08

曲线段钢轨波磨的成因,表明轮轨间蠕滑率和法向载荷的波动导致产生了黏滑振动,最终形成钢轨波磨。

我国某城市地铁在普通扣件和减振扣件轨道均出现了短波长钢轨波磨现象,如图 1 所示。图 1 给出了 R800 曲线上钢轨表面状态情况,在曲线低轨侧有明显的钢轨波磨特征,高轨侧波磨轻微。笔者对其形成原因展开研究。首先,现场调查了普通扣件和减振扣件轨道钢轨波磨特征;其次,通过力锤敲击法对不同扣件轨道动态特性进行了测试;然后,结合线路轨道结构特征,利用 ABAQUS 建立了轮轨三维实体有限元模型,分析轮轨耦合模态特性,以及白噪声激励时轨道响应特性,确定钢轨波磨与轨道敏感频带的相关性;最后,结合试验和仿真结果,分析了轮轨结构动态特性与短波长钢轨波磨特征之间的关系,说明短波长钢轨波磨的形成原因。

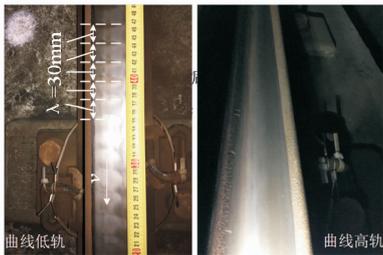


图 1 地铁短波长钢轨波磨 (R800)

Fig. 1 Short-pitch corrugation of metro rail (R800)

2 现场测试结果分析

2.1 钢轨波磨波长和通过频率

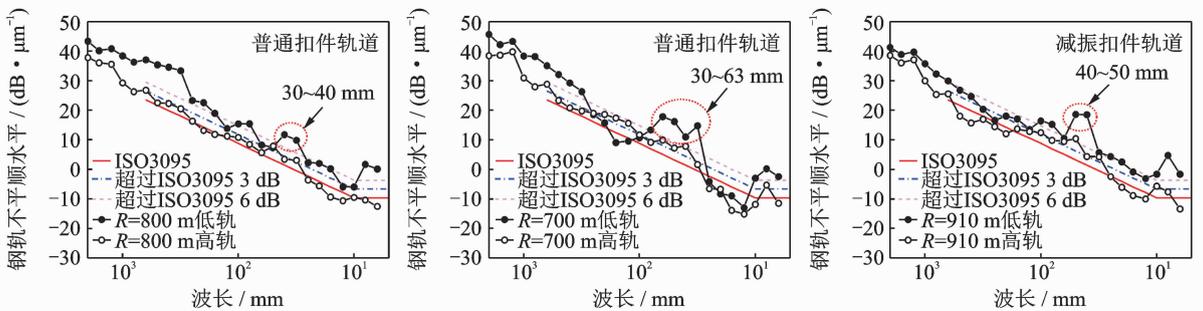
为掌握钢轨波磨特征,利用英国 Railmeasurement 公司生产的钢轨波磨测试仪 CAT 对钢轨表面纵向不平顺进行现场测试,如图 2 所示。CAT 测试仪测量精度为 0.01 μm,测量波长范围为 10~3 000 mm。测量速度为 0.5 m/s 时每 1 mm 记录 1 个数据。



图 2 钢轨表面纵向不平顺现场测试图

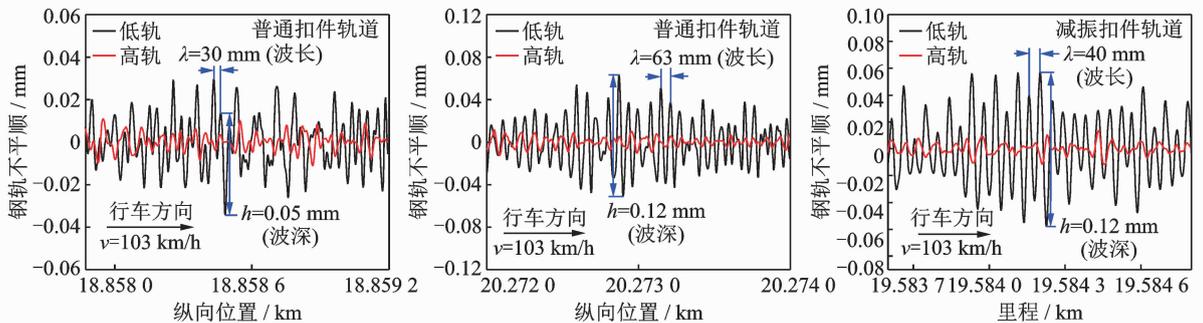
Fig. 2 Field test for longitudinal roughness of rail surface

图 3 给出了某区间普通扣件和减振扣件轨道钢轨表面纵向不平顺 1/3 倍频程谱图和局部空间不平顺图。表 1 统计了这 2 种轨道的钢轨波磨特征。由图表可知:



(a) 钢轨表面纵向不平顺 1/3 倍频程谱图

(a) 1/3 octave spectrogram of rail surface longitudinal roughness



(b) 局部空间不平顺

(b) Local space roughness

图 3 2 种轨道结构的钢轨表面纵向不平顺

Fig. 3 Rail surface longitudinal roughness of two track structures

表1 钢轨波磨状态统计
Tab.1 Statistics of rail corrugation

曲线半径/m	轨道形式	波磨波长/mm	波磨波深/mm	行车速度/(km·h ⁻¹)	通过频率/Hz
700	普通扣件轨道	30~63	0.04~0.158	103	454~954
800	普通扣件轨道	30~40	0.08~0.128	103	715~954
910	减振扣件轨道	40~50	0.115~0.18	103	572~715

1) 两种轨道钢轨在直线段波磨轻微,在曲线低轨短波长钢轨波磨较明显;

2) 普通扣件轨道在 R700 和 R800 曲线段低轨分别存在 30~63 mm 和 30~40 mm 波长波磨,波深(峰谷值)约为 0.04~0.158 mm;减振扣件轨道在 R910 曲线段低轨存在 40~50 mm 波长波磨,波深约为 0.115~0.18 mm;

3) 列车以 103 km/h 通过轨道波磨区域时,普通扣件和减振扣件轨道出现的 30~63 mm 和 40~50 mm 波长波磨导致通过频率 $f(f=v/\lambda, v$ 为列车运行速度, λ 为波磨波长)分别为 454~954 Hz 和 572~715 Hz。

从钢轨波磨的通过频率来看,以上 2 种轨道钢轨波磨属于 Grassie^[13] 6 种波磨类型的 Pinned-Pinned 共振(频率为 400~1200 Hz)波磨。图 4(a)和(b)分别给出了利用 ME' scope 软件的模态识别法获得普通扣件和减振扣件轨道的钢轨垂向 1 阶 Pinned-Pinned 共振频率及振型。由图可知:2 种轨道 1 阶垂向 Pinned-Pinned 共振频率分别为 1 100 和 1 110 Hz。垂向 Pinned-Pinned 对应的振型表现为钢轨弯曲的 1 个波长等于 2 个轨跨间距,在轨枕上方振动幅值接近 0,在跨中位置振动幅值最大。其振动频率主要与钢轨固有属性和轨枕间距有关^[18]。由此可见,2 种轨道的钢轨短波长波磨通过频率(454~954 Hz 和 572~715 Hz)均低于该轨道 1 阶垂向 Pinned-Pinned 共振频率,因此,波磨产生机理应该不是 Pinned-Pinned 共振引起。

2.2 轨道动态特性

由于轨道固有特性是影响钢轨波磨产生的重要影响因素,为了研究钢轨波磨与轨道特性之间的关系,采用力锤敲击法对该线路中的轨道结构动态特性进行测试,如图 5 所示。选择无焊接接头处的 3 个枕跨距离的钢轨(约 1.8 m),每跨 4 等份,分别在钢轨轨头垂向和横向共设 13 个响应点,采用单点激励单点响应法获得轨道频响特性曲线。

目前,国内地铁轨道钢轨波磨波长均小于 20 mm,其导致的波磨通过频率小于 1 600 Hz^[19],

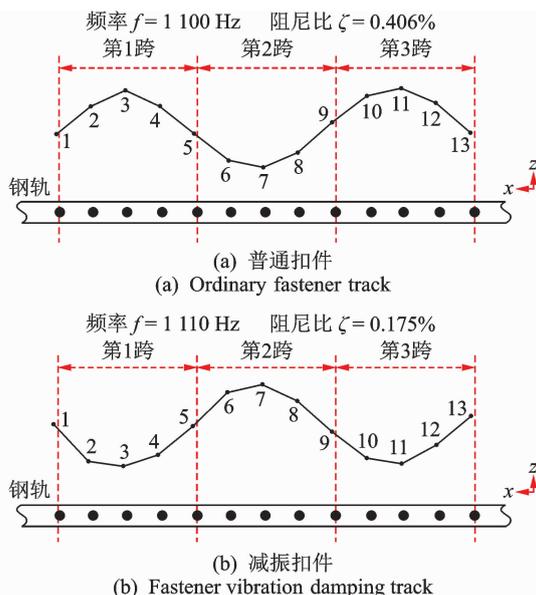


图4 模态识别得到的轨道垂向 1 阶 Pinned-Pinned 共振频率及振型

Fig.4 Vertical first-order Pinned-Pinned resonance frequencies and modes obtained by modal identification



图5 轨道结构特性测试现场

Fig.5 Field photos of track structure characteristics test

轨道的力锤响应结果在 40 Hz 以下的相干系数小于 0.8。因此,轨道频响特性分析频率仅考虑 40~1 600 Hz 范围。图 6、图 7 分别给出了 1 600 Hz 以下的普通扣件和减振扣件轨道垂向和横向频响特性结果,包含第 1、第 2 轨枕上方、跨中钢轨位置。

图 6(a)中,普通扣件轨道钢轨垂向弯曲共振频率主要为 151 和 1 101 Hz,次要频率为 905 Hz。其中:轨道频响特性曲线中的 905 Hz 垂向弯曲共振频率与 30 mm 波长钢轨波磨的通过频率(954 Hz)相

近;1 101 Hz 频率处的轨道垂向振动比较活跃,该频率为轨道垂向 1 阶 Pinned-Pinned 共振频率,利用模态识别参数法获得的该共振频率为 1 100 Hz,如图 4(a)所示。

图 6(b)中,普通扣件轨道钢轨横向弯曲共振频率主要为 78,98 和 505 Hz,次要频率为 416 和 1 243 Hz。其中,416 和 505 Hz 横向共振频率对应的共振形式为钢轨相对轨道板的横向弯曲振动,这 2 个共振频率与约 60 mm 波长波磨的通过频率相近,505 Hz 为轨道 1 阶横向 Pinned-Pinned 共振频率。

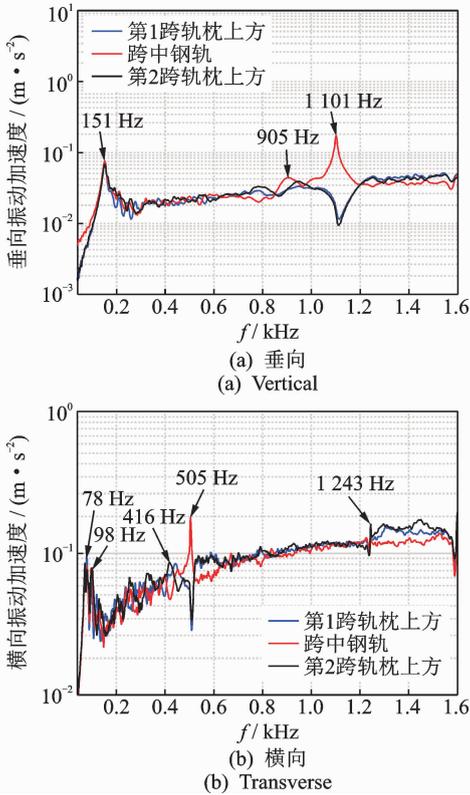


图 6 普通扣件轨道频响特性

Fig. 6 Frequency response characteristics of ordinary fastener track

图 7(a)中,减振扣件轨道钢轨主要垂向弯曲共振频率为 222 和 1 106 Hz,次要频率为 1 053 Hz,其振动形式均表现为钢轨相对轨道板的垂向弯曲振动。可以看出,这 3 种共振频率与钢轨波磨通过频率均无相关性。轨道频响特性曲线中的 1 106 Hz 为轨道垂向 1 阶 Pinned-Pinned 共振频率,利用模态识别参数法获得的该共振频率为 1 110 Hz,如图 4(b)所示。

图 7(b)中,减振扣件轨道钢轨主要横向弯曲共振频率为 97,507,675,853 和 1 303 Hz。其中:507 Hz 为轨道 1 阶横向 Pinned-Pinned 共振频率;

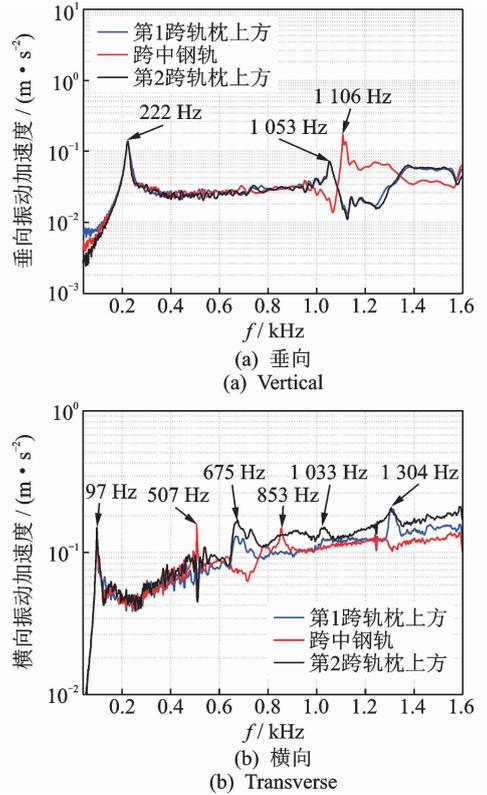


图 7 减振扣件轨道频响特性

Fig. 7 Frequency response characteristics of fastener vibration damping track

675 Hz 的横向弯曲共振频率与减振扣件轨道 40~50 mm 波长波磨的通过频率相近。

地铁车辆通过小半径曲线时,不同的曲线超高对钢轨磨耗的影响截然不同。根据现场调查了解,该地铁线路曲线超高大部分设置为欠超高,列车曲线(最小曲线 R700)通过时速度较高,轮对产生较大的横移量、摇头角和侧滚角,导致低轨侧轮轨纵向蠕滑率较大。轮轨蠕滑率直接影响轮轨磨耗,造成低轨侧钢轨磨耗比高轨侧大。若车辆通过这 2 种轨道结构引发共振,钢轨和轨道板发生垂向弯曲振动的同时,也伴随着钢轨相对轨道板的横向翻转振动,可能会导致低轨首先出现短波长波磨^[20]。由于普通扣件和减振扣件刚度和阻尼的差异,导致轨道结构共振模态特征不同,最终形成的钢轨波磨特征就有所差异。另外,现场力锤敲击试验时未考虑车辆簧下质量,而实际簧下质量对图 6 和图 7 所示的频响特性结果的低频部分有一定影响,但对高频部分影响较小^[16]。

从频响特性结果可知,由于轨道结构非线性、敲击停留时间长短等不确定因素的影响,有些与波磨通过频率相关的频带峰值特征不明显。为了进一步验证现场试验结果,研究轨道结构特性与钢轨波磨的相互关系,需结合数值仿真方法进行进一步分析。

3 数值模型

利用有限元软件 ABAQUS 建立轮轨三维实体有限元模型,研究轮轨结构特性与钢轨波磨的相互关系。有限元模型由钢轨、轮对、扣件系统、混凝土轨道板和地基组成。由于短轨枕镶嵌在轨道板中并固定在一起,中间几乎无减振缓冲特性,故在该模型中未考虑短轨枕,而是将其与轨道板作为整体建模^[21]。模型中考虑轨道板、钢轨和轮对为三维实体结构,轮轨接触由仅考虑垂向特性的赫兹弹簧单元(5组)模拟,扣件系统、道床地基的连接由弹簧阻尼单元模拟。其中,每组扣件系统由10组弹簧阻尼单元组成,地基与道床的连接由1个轨跨区域等效的弹簧阻尼单元组成。鉴于轨道结构的对称性,模型均只包含轨道结构的一半计算分析,具体参数见表2。在轨道板和轮对中心面处设沿 x 方向对称约束边界条件。模型采用 C3D8R 实体单元进行离散,总共有 574 185 个节点和 569 208 个单元,三维实体有限元模型如图 8 所示。

表 2 轮轨三维实体有限元模型结构参数

Tab. 2 Structural parameters of wheel-rail three-dimensional solid finite element model

部件	参数	数值	
钢轨	轨底坡	1 : 40	
	轨距/mm	1 435	
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850	
	弹性模量/GPa	206	
	泊松比	0.25	
轮对	踏面类型	LM	
	直径/mm	840	
	轴径/mm	170	
	轮对内侧距离/mm	1 353	
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 400	
轨道板	弹性模量/GPa	31.5	
	泊松比	0.2	
	轨枕间距/mm	600	
	垂向刚度/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)	30	
普通扣件	垂向阻尼/($\text{kNs} \cdot \text{m}^{-1}$)	34.8	
	横向刚度/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)	23	
	横向阻尼/($\text{kNs} \cdot \text{m}^{-1}$)	2	
	纵向刚度/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)	10	
	纵向阻尼/($\text{kNs} \cdot \text{m}^{-1}$)	2	
	减振扣件	垂向刚度/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)	16
		垂向阻尼/($\text{kNs} \cdot \text{m}^{-1}$)	40
横向刚度/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)		22	
横向阻尼/($\text{kNs} \cdot \text{m}^{-1}$)		2	
纵向刚度/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)		10	
纵向阻尼/($\text{kNs} \cdot \text{m}^{-1}$)	2		
轮轨接触赫兹弹簧垂向刚度/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)		1 524	

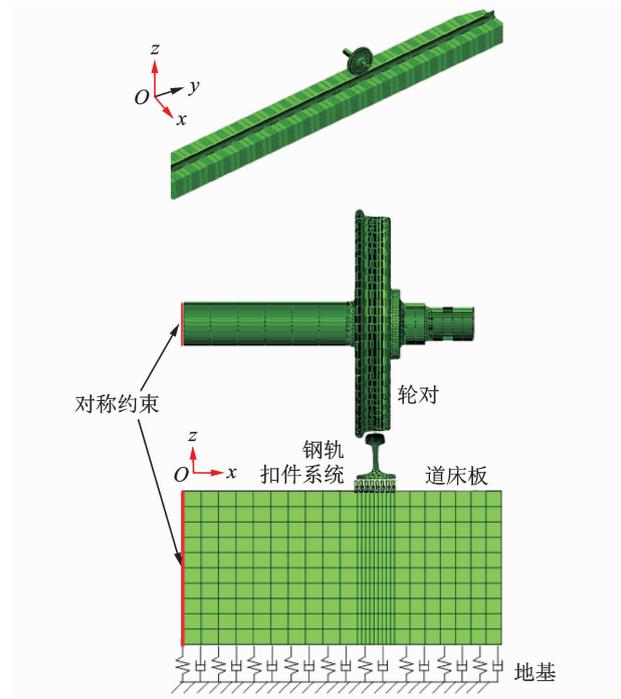


图 8 轮轨三维实体有限元模型

Fig. 8 Three-dimensional solid finite element model of wheel-rail

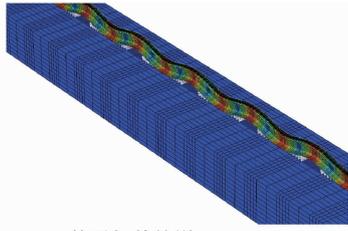
4 结果分析

4.1 轨道结构特性与钢轨波磨特征之间的相关性

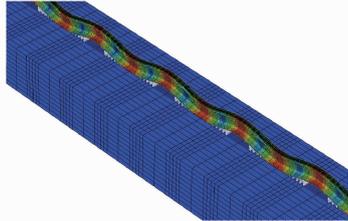
结合现场试验的 2 种轨道固有特性结果,对 2 种轨道结构进行模态分析。图 9 给出了模态分析后的 2 种轨道垂向 1 阶 Pinned-Pinned 共振模态,结果与力锤敲击得到的该共振频率及振型结果相吻合,验证了模型的准确性。

图 10 给出了普通扣件轨道与波磨通过频率相关频带内的 4 种模态振型。可以看出:449 Hz 的垂向共振频率与该轨道 63 mm 主波长波磨的通过频率(454 Hz)相近;577,645 和 717 Hz 的垂向共振频率与该轨道 40~50 mm 波长波磨的通过频率(572~715 Hz)相近;792,867 Hz 的垂向共振频率与该轨道 30~40 mm 波长波磨通过频率(715~923 Hz)相近。以上模态可能是引起普通扣件轨道 30~63 mm 波长波磨形成的关键,其对应的轨道模态振型均表现为钢轨相对轨道板的弯曲振动。

图 11 给出了减振扣件轨道在波磨通过频率相关频带内的 3 种模态振型。可以看出:569,638 和 711 Hz 的垂向共振频率与该轨道 40~50 mm 短波长波磨通过频率(572~715 Hz)相近。当列车在初始不平顺激励下(车轮擦伤、钢轨焊接头不平顺、道



(a) 普通扣件轨道($f=1\ 099\ \text{Hz}$)
(a) Ordinary fastener track ($f=1\ 099\ \text{Hz}$)



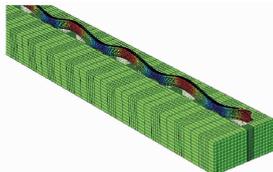
(b) 减振扣件轨道($f=1\ 097\ \text{Hz}$)
(b) Fastener vibration damping track ($f=1\ 097\ \text{Hz}$)

图 9 垂向 1 阶 Pinned-Pinned 共振模态振型

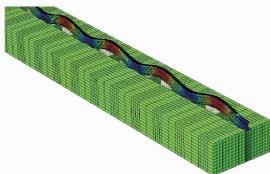
Fig. 9 Vertical first order Pinned-Pinned resonance mode shapes



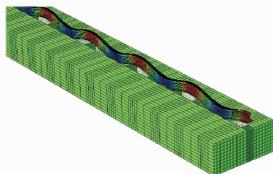
(a) 449 Hz



(b) 717 Hz



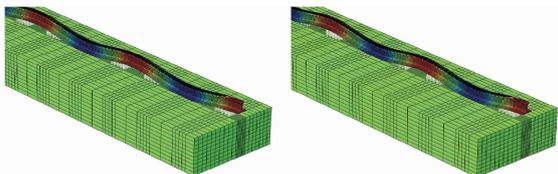
(c) 792 Hz



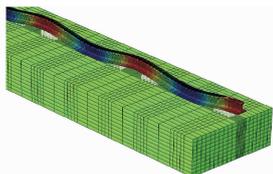
(d) 867 Hz

图 10 普通扣件轨道模态

Fig. 10 Modal of ordinary fastener track



(a) 569 Hz



(b) 638 Hz

图 11 减振扣件轨道模态

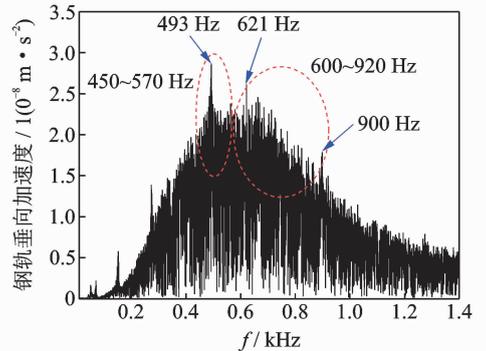
Fig. 11 Modal of fastener vibration damping track

岔等)运行时,易激发出轨道结构的这些固有模态特性,从而产生波动的轮轨作用力,导致不平顺发展,

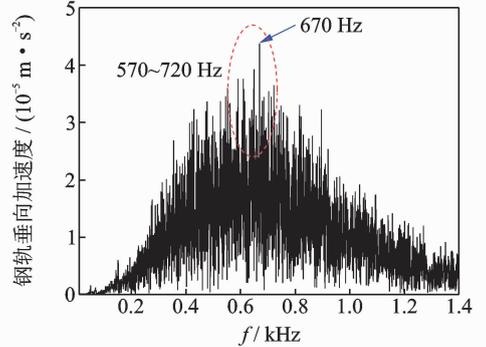
最终可能会诱发短波长波磨^[16]。

为了进一步研究钢轨波磨与轨道结构固有特性之间的内在联系,即车辆运行在 2 种轨道时,何种频率下的轨道固有模态振动最易被激发出来,利用建立的轨道模型计算分析未考虑簧下质量时,在钢轨上施加白噪声激励,得到钢轨垂向振动响应情况。其中,激励点与响应点距离为车辆轴距 2.5 m。

图 12 给出了 2 种轨道在白噪声激励下的垂向振动响应频谱图。由图可看出:普通扣件轨道在 450~920 Hz 频带内垂向振动明显;减振扣件轨道在 570~720 Hz 频带内垂向振动明显,这与现场力锤敲击试验结果基本吻合。当车辆以 103 km/h 速度通过时,普通扣件轨道 450~920 Hz 敏感频带引起的轨道共振会导致 31~63 mm 显著波长波磨的形成,减振扣件轨道 570~720 Hz 敏感频带引起的轨道共振会导致 39~50 mm 显著波长波磨的形成。



(a) 普通扣件轨道
(a) Ordinary fastener track



(b) 减振扣件轨道
(b) Fastener vibration damping track

图 12 钢轨垂向加速度响应频谱图

Fig. 12 Frequency spectrum of rail vertical acceleration response

4.2 轮轨耦合特性与钢轨波磨特征之间的相关性

实际上轮对通过一系悬挂与构架相连,但因为一系刚度较低,车体和构架质量相对轮对较大,对笔者的短波长波磨有关的轨道高频特性影响较小^[22],因此仅考虑实际轮对模态对轨道模态振动的约束作用,对 2 种轨道-轮对耦合结构模态进行分析。图 13

给出了考虑和不考虑轮对时轨道垂向弯曲振动模态差值曲线。计算结果发现,轮对结构对轨道中低频特性(40~300 Hz)模态振动影响较小(考虑和不考虑轮对时的轨道弯曲共振频率最大差值为13 Hz),此中低频频带对应的轨道弯曲共振与长波长($\lambda=75\sim 600$ mm)波磨的形成有关。轮对结构对轨道高频特性(300~1 500 Hz)模态振动影响较大(考虑和不考虑轮对时的轨道弯曲共振频率最大差值为36 Hz),此高频频带对应的轨道弯曲共振与短波长($\lambda=25\sim 75$ mm)波磨的形成相关。因此,笔者在研究短波长波磨形成原因时将轮对结构对轨道固有特性的影响考虑在内是合理的。

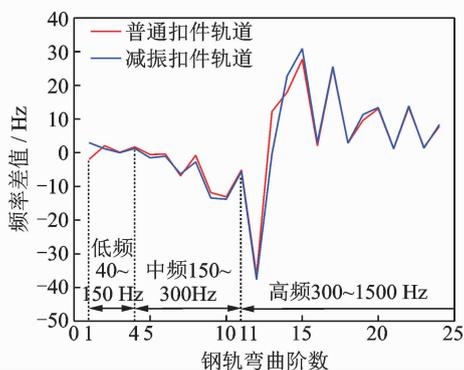


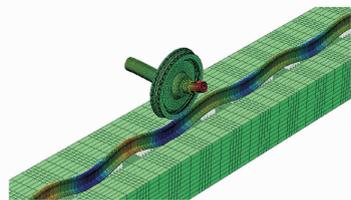
图13 2种轨道垂向弯曲振动模态频率差值

Fig. 13 The difference of vertical bending vibration modal frequencies between two kinds

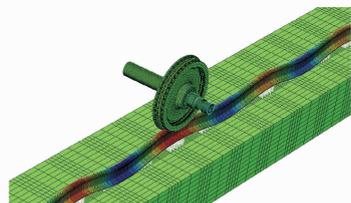
在波磨通过频率相关频带内,普通扣件轨道467,539,671,720,801,880和946 Hz垂向弯曲共振与30~63 mm波长波磨的形成相关;减振扣件轨道572,664和714 Hz垂向弯曲共振与40~50 mm波长波磨的形成相关。其中,467和720 Hz频率对应轨道共振形式表现为车轴弯曲扭转的同时,伴随钢轨垂向弯曲振动;其余频率对应轨道共振形式表现为以钢轨垂向弯曲振动为主,轮轴弯曲轻微。图14仅示意了2种轨道结构耦合模态的1种模态振型。以上轮轨结构耦合弯曲模态结果表明,普通扣件轨道30~63 mm和减振扣件轨道40~50 mm波长波磨的产生,主要与轨道结构高频固有特性相关。轨道短波长波磨通过频率与轮轨耦合弯曲模态频率相近,其模态振型表现为车轴弯曲扭转的同时,伴随钢轨相对轨道板的垂向弯曲振动。当车辆通过小半径曲线时,若诱发轮轨的高频耦合弯曲共振,会造成轮轨力以相同频率周期性振动,轮轨间蠕滑力周期性振动^[23]。在列车长期运行过程中,轮轨间蠕滑力周期性变化将加剧钢轨30~63 mm和40~50 mm短波长波磨的发展。

本研究主要从轮轨结构动态特性角度对普通扣

件和减振扣件轨道曲线段低轨钢轨波磨的形成原因进行了分析,未考虑多轮对与轨道耦合作用时的振动传递特性对钢轨波磨的影响。



(a) 普通扣件轨道($f=801$ Hz)
(a) Ordinary fastener track ($f=801$ Hz)



(b) 减振扣件轨道($f=664$ Hz)
(b) Fastener vibration damping track ($f=664$ Hz)

图14 轮轨结构耦合模态振型

Fig. 14 Coupled modal shapes of wheel-rail structure

5 结论

1) 普通扣件和减振扣件轨道钢轨波磨主要出现在曲线低轨,2种轨道钢轨波磨主波长分别为30~63 mm和40~50 mm。列车以103 km/h通过时,2种轨道钢轨波磨对应的通过频率分别为454~954 Hz和572~715 Hz。

2) 在白噪声激励下,普通扣件和减振扣件轨道分别在450~920 Hz和570~720 Hz范围内的敏感共振频率与列车通过钢轨波磨频率相吻合。

3) 轨道短波长钢轨波磨的产生主要与轨道结构高频固有特性相关。

4) 轨道短波长波磨通过频率与轮轨耦合弯曲模态频率相近,其模态振型表现为车轴弯曲扭转的同时,伴随钢轨相对轨道板的垂向弯曲振动。轮轨耦合的高频模态特征加剧30~63 mm和40~50 mm短波长钢轨波磨的发展。

参 考 文 献

- [1] 殷华,朱洪涛,魏晖,等.基于中点弦测模型的钢轨波磨量值估计[J].振动、测试与诊断,2016,36(5):954-959.
YIN Hua, ZHU Hongtao, WEI Hui, et al. Discussion on estimate rail corrugation amplitude based upon midpoint chord model [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(5): 954-959. (in Chinese)

- [2] GRASSIE S L, ELKINS J A. Corrugation on North American transit lines [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1998, 28(S): 5-17.
- [3] LI W, WANG H Y, WEN Z F, et al. An investigation into the mechanism of metro rail corrugation using experimental and theoretical methods[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(4): 1025-1039.
- [4] TASSILLY E, VINCENT N. Rail corrugation: analytical model and field tests [J]. *Wear*, 1991, 144(1/2): 163-178.
- [5] EGANA J, VINOLAS J, SECO M. Investigation of the influence of rail pad stiffness on rail corrugation on a transit system [J]. *Wear*, 2006, 261(2): 216-224.
- [6] JIN X S, WEN Z F, WANG K Y. Effect of track irregularities on initiation and evolution of rail corrugation [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 285(1/2): 121-148.
- [7] TYFOUR W R. Predicting the effect of grinding corrugated rail surface on the wear behavior of pearlitic rail steel [J]. *Tribology Letters*, 2008, 29: 229-234.
- [8] WEN Z F, JIN X S. Effect of track lateral geometry defects on corrugations of curved rails [J]. *Wear*, 2005, 259(7): 1324-1331.
- [9] VADILLO E G, TARRAGO J A, ZUBIAURRE G G, et al. Effect of sleeper distance on rail corrugation [J]. *Wear*, 1998, 217: 140-146.
- [10] BELLETTE P A, MEEHAN P A, DANIEL W J T. Effects of variable pass speed on wear-type corrugation growth [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 314(3/4/5): 616-634.
- [11] 杨克,张斌. 钢轨的波浪磨耗与钢轨强度的关系[C]//铁路用钢可靠性及寿命学术研讨会. 包头:中国铁道学会, 1998: 99-113.
- [12] ZAREMBSKI A M. Type of rail corrugation[J]. *Railway Track and Structures*, 1989, 85(8): 13-14.
- [13] GRASSIE S L. Rail corrugation: characteristics, causes, and treatments [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2009, 223(6): 581-596.
- [14] EGANA J, VINOLAS J, SECO M. Investigation of the influence of rail pad stiffness on rail corrugation on a transit system [J]. *Wear*, 2006, 261(2): 216-224.
- [15] VADILLO E G, TARRAGO J A, ZUBIAURRE G G, et al. Effect of sleeper distance on rail corrugation [J]. *Wear*, 1998, 217: 140-146.
- [16] 李伟, 杜星, 王衡禹, 等. 地铁钢轨一种波磨机理的调查分析[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(16): 26-32.
LI Wei, DU Xing, WANG Hengyu, et al. Investigation into the mechanism of type of rail corrugation of metro [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(16): 26-32. (in Chinese)
- [17] MATSUMOTO A, SATO Y, ONO H, et al. Formation mechanism and countermeasures of rail corrugation on curved track [J]. *Wear*, 2002, 253(1): 178-184.
- [18] MAN A P D. Dynatrack: a survey of dynamic railway track properties and their quality [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2002, 266(2): 1245-1249.
- [19] 李霞, 李伟, 申莹莹, 等. 基于轨道振动理论的梯形轨枕轨道钢轨波磨研究[J]. *机械工程学报*, 2016(22): 121-128.
LI Xia, LI Wei, SHEN Yingying, et al. Study on the rail corrugation of the ladder-type sleeper track based on track vibration theory [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016(22): 121-128. (in Chinese)
- [20] 李霞, 李伟, 温泽峰, 等. 普通短轨枕轨道结构钢轨波磨初步研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(2): 109-115.
LI Xia, LI Wei, WEN Zefeng, et al. Preliminary study on the rail corrugation of the fixed-dual short sleepers track [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(2): 109-115. (in Chinese)
- [21] 朱强强, 李伟, 温泽峰. 地铁浮轨式减振扣件轨道的轮轨接触有限元分析[J]. *润滑与密封*, 2019, 44(2): 59-65.
ZHU Qiangqiang, LI Wei, WEN Zefeng. Finite element analysis of wheel-rail contact for metro track with floating rail damping fastener [J]. *Lubrication Engineering*, 2019, 44(2): 59-65. (in Chinese)
- [22] GU G, CHOI J. The dynamic response of rail support [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(6): 798-820.
- [23] 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)



第一作者简介:周志军,男,1993年1月生,硕士生。主要研究方向为轮轨磨损。
E-mail: cqjtuzj@163.com

通信作者简介:温泽峰,男,1976年5月生,研究员、博士生导师。主要研究方向为轮轨关系及减振降噪。
E-mail: zfwen@home.swjtu.edu.cn