

声子晶体嵌入式轨道落轴试验时频特性分析

刘光胜¹, 徐溢¹, 罗泽洋涌², 雷佳鑫², 赵才友^{2*}

(1.成都市新筑交通科技有限公司, 四川 成都 611430; 2.西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为分析声子晶体嵌入式轨道在轮轨瞬态冲击下的振动传递及减振特征, 开展足尺落轴对比试验, 设置 15 mm 空载、15 mm 满载和 25 mm 空载 3 种工况, 同步采集声子晶体嵌入式轨道与普通扣件轨道的钢轨、轨道板和地基竖向加速度。比较六种时频分析方法的能量聚集度与衰减一致性, 选用小波同步压缩变换 (wavelet synchro squeezing transform, WSST) 分析冲击后的时频演化, 并结合 1/3 倍频程振级评价减振效果。WSST 的综合评价指数为 0.521 92, 在六种方法中最高。声子晶体嵌入式轨道的振动响应沿钢轨—轨道板—地基逐级减弱, 地基响应主要集中于 20~80 Hz。与普通扣件轨道相比, 三种工况下其 1~80 Hz 总振级分别降低 29.5、15.1 dB 和 3.9 dB, 4~200 Hz 总振级分别降低 28.8、14.4 dB 和 3.4 dB。WSST 方法可表征落轴冲击后的主导频率脊线及其衰减过程, 为轨道结构冲击减振性能的精细化评价提供依据。

关键词: 声子晶体嵌入式轨道; 落轴试验; 小波同步压缩变换; 时频分析; 振动衰减; 减振性能。

中图分类号: U215

文献标志码: A

Time-Frequency Characteristics of Drop-Wheel Tests on a Phononic Crystal Embedded Rail Track

Liu Guangsheng¹, Xu Yi¹, Luo Zeyangyong², Lei Jiabin², Zhao Caiyou²

(1. Chengdu Xinzhutransportation Technology Co., Ltd., Chengdu 611430, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To investigate vibration transmission and mitigation in a phononic crystal embedded rail track under transient wheel-rail impact, full-scale drop-wheel tests were conducted in comparison with a conventional fastened track. Three conditions were examined: 15 mm unloaded, 15 mm fully loaded, and 25 mm unloaded. Vertical accelerations were recorded simultaneously at the rail, track slab, and foundation. Six time-frequency analysis methods were compared in terms of energy concentration and consistency with vibration decay. Wavelet synchro squeezing transform (WSST) was selected to examine the time-frequency evolution of the impact response, while one-third-octave vibration levels were used to evaluate the mitigation effect. WSST achieved the highest overall evaluation index among the six methods, at 0.521 92. In the phononic crystal embedded rail track, the vibration response decreased progressively from the rail to the track slab and foundation, with the foundation response concentrated mainly within 20~80 Hz. Compared with the conventional fastened track, its overall vibration levels under the three conditions were lower by 29.5, 15.1 dB and 3.9 dB within 1~80 Hz, and by 28.8, 14.4 dB and 3.4 dB within 4~200 Hz, respectively. WSST characterizes the dominant frequency ridges and their decay following drop-wheel impact, providing a basis for a more detailed evaluation of track vibration mitigation under transient impact.

Key words: phononic crystal embedded rail track; drop-wheel test; wavelet synchrosqueezing transform; time-frequency analysis; vibration attenuation; vibration mitigation performance.

嵌入式轨道采用弹性材料连续包裹钢轨, 能够满足轨道与城市道路衔接的要求, 是有轨电车常用的轨道结构形式^[1]。车辆通过轨面不平顺、接头及道岔等局部不连续位置时, 轮轨冲击可激发轨道振动, 并经基础和土体向周边建筑传播。对于邻近住宅及其他振动敏感建筑的线路, 仍需关注轮轨振动对沿线环境的

影响^[2]。城市道路振动可能同时受到重型车辆等多类振源影响,各类振源的贡献取决于车辆运行、路轨状态及传播条件,因此有必要针对有轨电车自身的振动传递路径开展研究。

嵌入式轨道采用弹性材料连续包裹钢轨,可改善钢轨支承条件并抑制部分频段的振动,但其减振性能具有明显的频率依赖性^[3],弹性材料刚度变化还会影响钢轨动力响应及振动向隧道结构的传递^[4]。因此,传统嵌入式轨道对目标频段的振动调控能力仍有提升空间。声子晶体可利用周期结构的局域共振或布拉格散射形成弹性波带隙,为轨道结构的频带化振动控制提供了新的途径。落轴冲击具有作用时间短、频率范围宽和响应快速衰减等特点,能够在可控条件下模拟轮轨瞬态冲击。研究声子晶体嵌入式轨道在落轴作用下的时频响应,有助于揭示冲击能量在不同频率和结构层级间的传递规律,并为阻振单元设计及轨道减振性能评价提供依据。

国内外学者围绕嵌入式轨道动力特性、周期结构振动控制和非平稳振动信号分析开展了相关研究。时潇迪等^[5]建立嵌入式轨道三维轮轨瞬态滚动接触模型,分析焊接接头冲击作用下的轮轨动力响应,结果表明连续支承能够减小部分轮轨冲击力。曾志平等^[6]依托足尺落轴试验平台,对嵌入式轨道与普通扣件轨道的冲击振动响应进行对比,验证了嵌入式轨道对振动峰值及结构传递响应的抑制作用。在周期结构振动控制方面,罗文俊等^[7]针对板式无砟轨道设计基于振幅放大机制的周期性减隔振装置,建立波动分析模型并揭示其对轨道弯曲波的调控规律。Qu等^[8]将手性声子晶体引入轨道结构,利用惯性放大与极化耦合机制拓宽低频带隙,并通过车辆—浮置板轨道—隧道耦合模型验证其低频减振效果。Gao等^[9]设计多孔局域共振声子晶体隔振器,通过能带结构与传递损失分析获得了较宽的低频带隙。Shi等^[10]将颗粒阻尼与声子晶体隔振器结合,并采用足尺落轴试验分析其耗能机制和空间振动响应,表明该结构能够限制带隙频段内的振动能量传递。在时频分析方面,贾宝新等^[11]采用高阶局部极大同步压缩变换处理浅埋隧道高铁振动信号,提高了噪声条件下的时频聚集性,并分析了振动频率随时间的衰减特征。Li等^[12]将同步压缩小波变换用于高速列车—道岔动力响应研究,辨识了不同运行条件下瞬态响应的主导频带。现有研究表明,嵌入式连续支承和声子晶体带隙均具有轨道振动控制潜力,同步压缩小波变换也适用于轨道非平稳振动信号分析。然而,现有声子晶体轨道研究主要集中于浮置板轨道的理论计算、数值模拟及隔振器设计,针对声子晶体阻振单元与嵌入式连续支承结构协同减振作用的足尺试验仍较少;已有落轴试验多采用时域峰值和频域振级评价,难以反映冲击能量随时间和频率的迁移、衰减过程。不同冲击强度和承载状态下,声子晶体嵌入式轨道相对于普通扣件轨道的优势减振频段及竖向振动传递规律仍需进一步研究。

针对传统嵌入式轨道目标频段调控能力不足,以及声子晶体轨道缺少足尺瞬态冲击验证的问题,本文采用足尺落轴试验开展结构对比研究。正线测试能够反映实际运营条件下的振动响应,但车辆速度、轮轨状态、基础条件及其他交通振源的差异,会增加不同轨道结构减振性能的辨识难度。足尺落轴试验能够保持轮对、基础和测点布置一致,通过调整落轴高度与预压状态开展重复测试,便于在可控条件下分析冲击强度和承载状态对振动传递的影响。

本文在嵌入式连续支承结构中设置声子晶体阻振单元,以普通扣件轨道为对照,开展15 mm空载、25 mm空载和15 mm满载三种工况试验,同步采集钢轨、轨道板和地基的竖向振动加速度。采用时域分析、WSST和分频振级分析相结合的方法,在统一的时间范围、频率范围及系数强度基准下,辨识主导频带、时频脊线及其衰减过程,补充时域峰值和总振级难以呈现的瞬态演化信息。在此基础上,比较不同工况下

两类轨道的振动传递特征与减振效果，为声子晶体嵌入式轨道的参数优化和结构方案比较提供试验依据，其实际运营条件下的环境减振效果仍需通过正线测试进一步验证。

1 基于 WSST 方法的声子晶体嵌入式轨道落轴实验

1.1 声子晶体嵌入式轨道

嵌入式轨道通过将钢轨嵌入整体道床中的 U 形钢槽，并在钢轨与钢槽之间设置连续弹性包覆材料，形成钢轨—弹性包覆层（聚氨酯弹性体）—钢槽—道床的连续传力体系。该结构利用弹性材料的隔振作用和钢轨连续支承特征，减弱轮轨作用引起的局部冲击及振动向基础结构的传递。钢轨横向几何形位可通过横向调轨组件进行调整，调高垫板沿钢轨纵向连续布置，以满足线路高程调整及稳定支承要求。

在传统嵌入式轨道基础上，声子晶体嵌入式轨道将声子晶体带隙理论引入轨道减振结构设计，如图 1 所示。在钢槽侧向区域设置周期性声子晶体阻振单元（纵向间距 0.6m），并结合钢槽下部垫板的参数优化，构建具有特定频段振动调控能力的复合隔振体系。阻振单元主要由橡胶和钢材组合而成，材料之间采用硫化方式进行粘接。

根据前期实测获得的轮轨冲击振动频谱，选取振动响应较强且需要重点控制的 50~150 Hz 作为目标频段^[16, 17]。在此基础上，通过调整声子晶体阻振单元的几何尺寸、材料参数及周期布置间距，使其带隙与目标频段相匹配。冲击振动由钢轨向钢槽、道床及周边结构传播时，周期性阻振单元抑制带隙频段内的弹性波传播^[18-20]；弹性包覆材料和钢槽下部垫板则通过弹性隔振与阻尼耗能减弱振动传递。各部分共同作用，使嵌入式轨道在保持连续支承和结构稳定特点的基础上，提高振动波传播路径上的衰减能力。

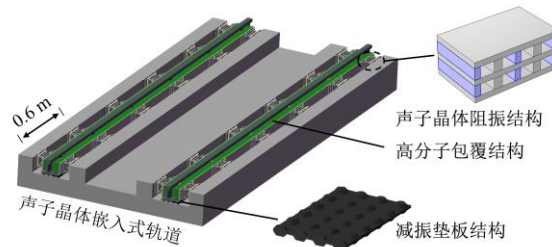


图 1 声子晶体嵌入式轨道结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the phononic crystal embedded rail structure

1.2 落轴实验平台及测试流程

为研究轮轨瞬态冲击作用下不同轨道结构的振动响应及能量传播特征，依托室内足尺落轴冲击试验平台开展对比试验，如图 2 所示。该平台主要由轮对提升与释放装置、导向机构、轨道试件、基础结构及数据采集系统组成。试验时，通过提升装置将轮对抬升至设定高度，随后解除约束，使轮对在重力作用下自由下落并冲击钢轨。该加载方式能够在较短时间内施加显著的轮轨冲击荷载，从而获得钢轨、轨道板及基础结构的瞬态振动响应。

试验对象包括声子晶体嵌入式轨道和传统扣件轨道。两类轨道均布置于同一试验平台，并保持轮对、基础条件、测点位置及采集参数一致，以减小非结构因素对测试结果的影响。测试设备主要包括数据采集设备（INV3062SC），传感器采用 INV982X 型 ICP 压电加速度传感器，其中钢轨振动加速度传感器量程为

500 g, 轨道板振动加速度传感器量程为 100 g, 地基振动加速度传感器量程为 10 g, 采样频率设置为 2 000 Hz, 测试设备还包括传输信号线路若干、移动电源及电脑等。传感器布置图详见图 2 所示。

在冲击作用区域附近布置竖向加速度测点, 分别采集钢轨、轨道板和地基(或基础)处的振动加速度信号。钢轨测点用于表征轮轨冲击的直接响应, 轨道板测点用于分析振动由钢轨向下部结构传递过程中的衰减与重分配特征, 基础测点则用于评价不同轨道结构对外部环境振动的隔离效果。为模拟车辆系统的参振作用, 在轮对前后设置两根参振横梁, 横梁间距为 2.5 m。试验装置及车辆预压加载方式参考《轨道减振效果实验室评价方法》(T/CCTAS 76—2023)中落轴冲击激振法的相关规定。为比较冲击强度与承载状态对减振性能的影响, 本文设置 15 mm 空载、25 mm 空载和 15 mm 满载三种工况。满载工况按地铁 A 型车满载轴重 17 t 设置车辆荷载。15 mm 与 25 mm 落轴高度用于比较不同冲击强度下的响应, 15 mm 空载与满载工况用于比较车辆荷载状态的影响。两类轨道均按上述工况进行测试。

正式测试前, 各工况先进行不少于 5 次预冲击, 以检查轮对是否垂直下落。每次正式落轴前均对采集系统清零; 每种工况取得不少于 5 次有效数据, 并将组内加速度峰值及有效值的偏差控制在 10%以内。轮对提升至该工况的设定高度、采集系统清零后开始记录, 直至振动衰减结束。试验期间通过实时波形检查信号, 并排除其他振动源的干扰。

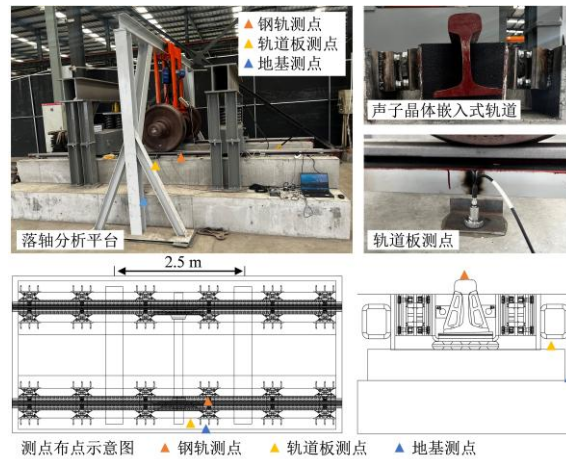


图 2 声子晶体嵌入式轨道落轴测试平台

Fig.2 Drop-weight impact test platform for the phononic crystal embedded rail system

1.3 WSST 分析方法

落轴冲击引起的扣件轨道振动具有突发性、宽频性和快速衰减等特点, 信号在冲击起始阶段往往同时包含多个瞬态分量。传统固定窗时频变换易受窗长限制: 较短窗可提高时间分辨率, 但频率分辨率随之降低; 较长窗则可能掩盖冲击瞬间的频率跃迁^[13, 14]。连续小波变换能够适应不同尺度的振动特征, 但其能量在时频平面上易发生扩散。WSST 以连续小波变换为基础, 利用局部瞬时频率将小波系数重新聚集^[15], 可在保持时间连续性的同时提高频率脊线的清晰度, 适于提取冲击振动的非平稳频率演化特征。

设原始振动信号为 $x(t)$, 其连续小波变换系数可表示为:

$$W_x(a, b) = a^{-\frac{1}{2}} \int x(t) \psi^* \left[\frac{t-b}{a} \right] dt \quad (1)$$

式中： a 和 b 分别为尺度参数与时间平移参数， ψ 为母小波函数。对于幅值大于阈值的时频系数，利用其相位随时间的变化可得到局部瞬时频率估计：

$$\omega_x(a, b) = \frac{1}{2} \pi \frac{\partial \arg W_x(a, b)}{\partial b} \quad (2)$$

WSST 随后将具有相近瞬时频率的小波系数压缩至对应频率邻域，使同一振动分量的能量沿时频脊线重新汇聚。与直接平滑时频图不同，该过程以局部相位信息为依据，因而能够减少冲击瞬间的频率扩散，并保留冲击后各频带能量的连续衰减轨迹。针对 0~1 s 内的落轴冲击响应，WSST 可同时揭示冲击初始阶段的主导频率、低频脊线迁移及后续能量衰减过程。2.1 小节比较结果表明，WSST 在能量聚集度和衰减一致性的综合评价中得分最高，因此本文采用 WSST 作为扣件轨道瞬时冲击振动的主要时频分析方法。

2 落轴实验时频特性分析

2.1 不同时频分析方法对比

为识别落轴冲击作用下扣件轨道振动的瞬时频率迁移及其衰减规律，选取 15 mm 空载工况下的扣件测试数据进行比较。采样频率为 2 000 Hz，分析时段为冲击发生后 0~1 s；为减小边界效应，计算时保留冲击前 0.1 s 信号。对短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)、连续小波变换(Continuous Wavelet Transform, CWT)、WSST 分别进行时频分析，并将展示结果统一插值至 512 个频率点和 1000 个时间点，频率范围统一为 0~200 Hz，颜色尺度统一为 0~55 dB，避免因系数幅值和显示尺度不同而造成的主观判断偏差。

为兼顾冲击特征的清晰度与振动衰减过程的可解释性，采用瞬时衰减表征指数 Q 作为统一比较准则：

$$Q = CR^2, C = 1 - \frac{H^3}{\ln N} \quad (3)$$

式中： C 为由三阶 Rényi 熵获得的时频能量聚集度^[21]， R 为时频图总能量包络与原始振动局部均方能量包络之间的相关系数， H 为时频能量归一化分布的三阶 Rényi 熵， N 为统一网格中的时频点数。 C 用于衡量瞬时冲击能量是否集中， R 用于检验时频结果是否能够保持能量随时间衰减的真实趋势， R 的平方可降低稀疏脊线或模态混叠对结果的偶然抬升。

图 3 中顶部为冲击后 0~1 s 内的原始振动响应，冲击初始阶段振幅迅速达到峰值，随后呈快速衰减特征。CWT 结果能够反映低频至中频能量随时间衰减的总体趋势，但瞬态能量在频率方向扩散较明显；STFT 结果较为平稳，但受固定分析窗限制，冲击初始阶段的频率成分存在一定展宽。相比之下，WSST 将小波时频系数沿局部瞬时频率重新聚集，使冲击后的主导频率脊线及其迁移过程更加清晰。在 0~0.4 s 的强响应阶段，WSST 可更准确地区分相邻低频分量，并连续表征其后续衰减轨迹。WSST 能够将冲击振动的时频能量聚集到更清晰的频率脊线上，对低频主导分量及其衰减过程的识别效果优于其余方法。

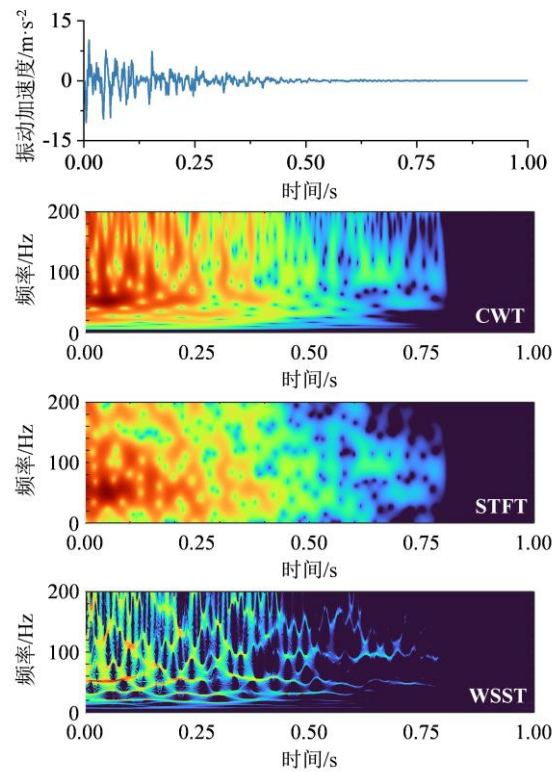


图 3 三种时频分析方法在统一尺度下的结果对比

Fig.3 Comparison of the results using three time–frequency analysis methods on a unified scale

在前述 3 种时频分析方法基础上补充了傅里叶同步压缩变换 (Fourier Synchrosqueezed Transform, FSST)、斯托克韦尔变换 (Stockwell Transform, S-transform) 和希尔伯特–黄变换 (Hilbert–Huang Transform, HHT) 等时频分析方法, 进一步验证所提出 WSST 方法的优越性。表 1 中, Rényi 熵越小表示时频能量越集中, 能量聚集度 C 、衰减一致性 R 及瞬时衰减表征指数 Q 均以数值越大为优。WSST 的 Rényi 熵最低、能量聚集度最高, 且衰减一致性保持较高水平, 瞬时衰减表征指数 Q 达到 0.52192, 为六种方法中最高。因此, WSST 能够更清晰地表征冲击后的频率脊线及其衰减过程, 本文选取 WSST 作为主要时频分析方法。

表 1 六种时频分析方法的定量评价结果

Tab.1 Quantitative evaluation results of six time–frequency analysis methods

方法	Rényi 熵	能量聚集度 C	衰减一致性 R	瞬时衰减表征指数 Q
STFT	7.336 9	0.376 11	0.885 04	0.294 61
CWT	8.085 3	0.312 46	0.972 40	0.295 45
WSST	4.984 4	0.576 15	0.951 78	0.521 92
FSST	6.645 3	0.434 92	0.979 99	0.417 68
S-transform	8.069 7	0.313 79	0.974 27	0.297 85
HHT	5.371 0	0.543 28	0.847 53	0.390 24

2.3 声子晶体嵌入式轨道与普通扣件轨道对比

为进一步揭示不同轨道结构在落轴冲击作用下的振动传播与衰减特征, 采用 WSST 方法对声子晶体嵌入式轨道和普通扣件轨道的地基加速度信号进行时频分析。通过统一时间范围、频率范围及颜色尺度, 对

比 15 mm 空载、25 mm 空载和 15 mm 满载三种工况下两类轨道的时频系数强度、主要频带及持续时间,进而评价声子晶体嵌入式轨道对瞬态冲击振动的调控效果。

如图 4 所示,落轴冲击发生后,声子晶体嵌入式轨道各测点均产生明显的瞬态振动响应,且振动幅值随传播路径由钢轨向轨道板和地基逐级减小。钢轨是冲击荷载的直接作用部位,其加速度响应最为显著,冲击初期呈现正负交替的高频振荡特征,最大绝对加速度为 352.1 m/s^2 。轨道板测点的最大绝对加速度约为 80.2 m/s^2 ,钢轨与轨道板之间的弹性包覆材料及阻振结构对冲击振动具有明显的缓冲和耗能作用。振动继续向下部基础传播后,地基测点的最大绝对加速度进一步降低至约 4.3 m/s^2 ,说明轨道内部弹性结构能够有效削弱冲击振动向基础的传递。从振动持续时间来看,三个测点的主要响应均集中在冲击后的 $0 \sim 0.15 \text{ s}$ 内,随后振幅迅速衰减并逐渐恢复至稳定状态。其中,钢轨响应包含较为密集的高频振荡成分,轨道板和地基测点的波形则相对平缓,表明振动在向下传递过程中不仅幅值明显降低,高频成分也受到一定抑制。约 0.20 s 后,各测点加速度基本接近零值,未出现明显的长时间周期性振荡,反映出该轨道结构具有较快的瞬态振动耗散能力。

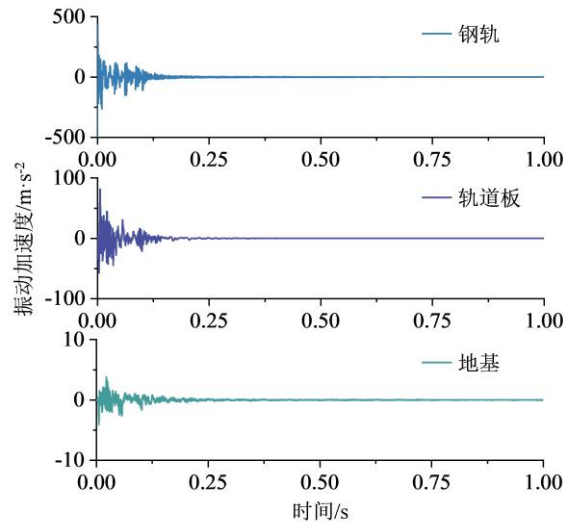


图 4 声子晶体嵌入式轨道时域结果分析

Fig.4 Time-domain response analysis of the phononic crystal embedded rail system

如图 5 所示,落轴冲击使声子晶体嵌入式轨道产生明显的宽频瞬态响应,各测点的 WSST 时频系数强度主要集中于冲击后的 $0 \sim 0.25 \text{ s}$,并随时间快速衰减。钢轨测点在 $0 \sim 200 \text{ Hz}$ 范围内均存在较明显的时频成分,较强响应集中于 $20 \sim 120 \text{ Hz}$,峰值强度级约为 $135 \sim 140 \text{ dB}$; 0.25 s 后中高频成分明显减弱,部分低频成分可持续至 0.50 s 以后。振动传递至轨道板后,高强度区域明显收缩,主要频率降至 $10 \sim 150 \text{ Hz}$,峰值约为 $125 \sim 130 \text{ dB}$,且 150 Hz 以上成分显著减少。地基响应进一步减弱,主要集中于 $20 \sim 80 \text{ Hz}$,峰值约为 $110 \sim 120 \text{ dB}$, 0.20 s 后大部分时频成分接近色标下限。在 $60 \sim 140 \text{ dB}$ 统一色标下,三个测点由暖色逐渐转变为冷色,振动沿钢轨—轨道板—地基路径传播时,其强度、频率范围和持续时间均逐级减小,说明连续弹性支承、阻尼材料和声子晶体阻振单元共同促进了冲击振动的传播衰减。

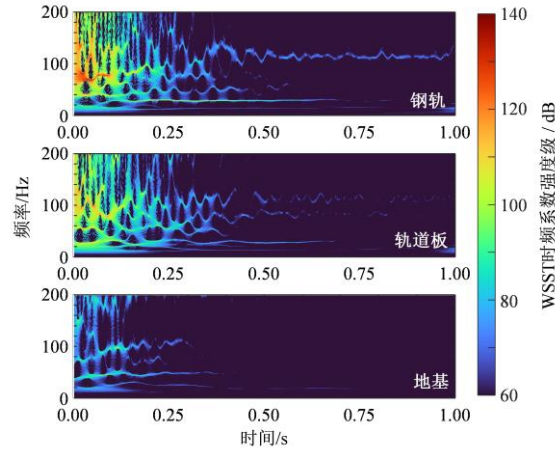
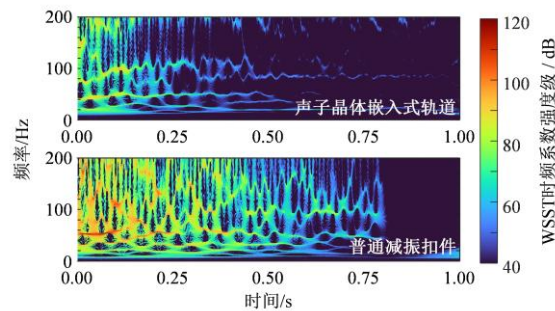


图5 声子晶体嵌入式轨道时频特性分析

Fig.5 Time-frequency characteristics of the phononic crystal embedded rail system

图6对比了15 mm空载、25 mm空载和15 mm满载三种工况下,声子晶体嵌入式轨道与普通扣件轨道地基测点的WSS时频响应。所有子图采用40~120 dB统一色标,可直接比较不同结构和工况下的时频系数强度。普通扣件轨道的高强度区域更大,中高频成分持续时间更长;声子晶体嵌入式轨道响应主要集中于冲击初期,并快速衰减,表明其能稳定削弱冲击振动向地基的传递。15 mm空载时,声子晶体轨道的强响应主要集中在冲击后0~0.25 s,100 Hz以上成分衰减较快,约0.50 s后仅剩少量低强度成分。普通扣件轨道则在0~200 Hz范围内存在密集时频脊线,较强响应持续至约0.70 s,尤其低频振动强度和持续时间更大。落轴高度增至25 mm后,两类轨道响应均增强,时频脊线增多、持续时间延长。声子晶体轨道部分中低频成分可持续至0.60~0.70 s,但高强度区域仍集中于冲击初期;普通扣件轨道在0~200 Hz范围内分布更连续,较强响应可持续至约0.80 s,说明其对冲击增强更敏感。15 mm满载时,两类轨道低、中频响应均有所增强。普通扣件轨道在约20~150 Hz形成连续高强度区域,部分脊线持续超过0.70 s;声子晶体轨道响应仍主要集中于前0.30 s,中高频成分快速减弱。声子晶体轨道通过连续弹性支承、阻尼材料及阻振单元协同作用,降低中高频传递并加快衰减,表现出稳定的隔振能力。



(a) 15 mm 空载

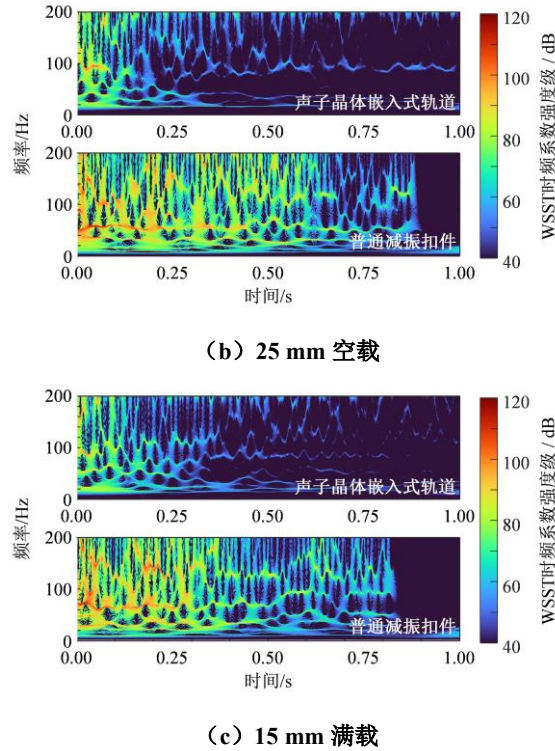


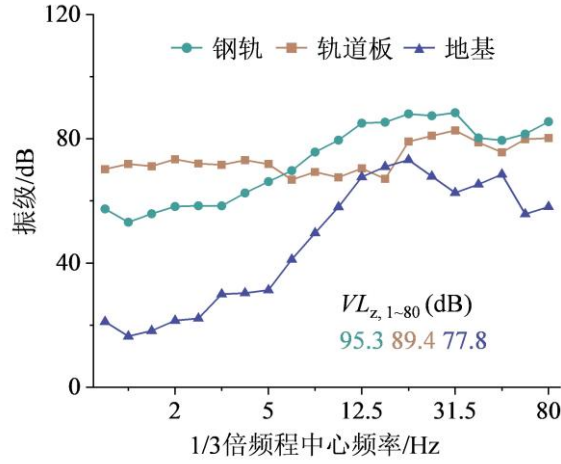
图6 声子晶体嵌入式轨道与普通扣件轨道地基时频对比

Fig.6 Time-frequency comparison of the foundation responses between the phononic crystal embedded rail system and the conventional fastened track

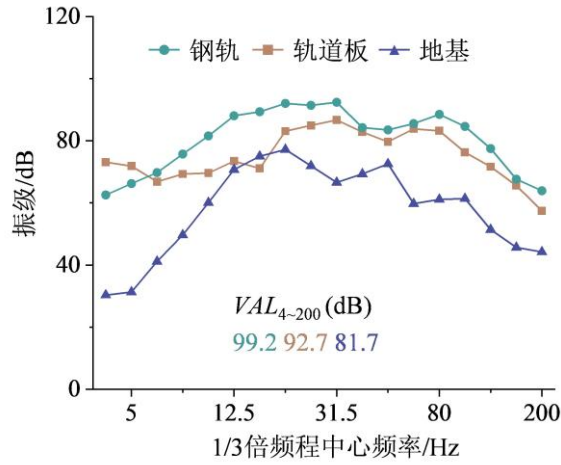
2.4 声子晶体嵌入式轨道减振效果分析

为进一步评价声子晶体嵌入式轨道的整体减振性能, 本节选取普通扣件轨道作为对比对象, 分别从 4~200 Hz 和 1~80 Hz 两个典型频段对两种轨道结构的振动响应进行分析。通过对两种轨道结构总振级及其差异进行对比, 定量评估声子晶体嵌入式轨道在不同频率范围内的减振效果, 并进一步分析其对中低频振动能量的调控能力。

如图 7 所示, 声子晶体嵌入式轨道中钢轨、轨道板及地基的振动响应随振动传播路径逐级衰减, 且在不同频段内均表现出较为明显的层间衰减特征。1~80 Hz 范围内, 钢轨振级在中高频段逐渐增大, 并在约 20~40 Hz 附近达到较高水平; 轨道板整体变化相对平缓, 地基振级则明显低于钢轨和轨道板, 尤其在低频段衰减更为显著。对应的 1~80 Hz 总振级分别为 95.3 dB、89.4 dB 和 77.8 dB, 钢轨至轨道板、轨道板至地基分别降低 5.9 dB 和 11.6 dB。4~200 Hz 范围内, 各结构振级总体呈现先增大后减小并伴随局部波动的变化规律, 钢轨响应整体最高, 轨道板次之, 地基最低; 三者总振级分别为 99.2 dB、92.7 dB 和 81.7 dB, 沿传播路径分别降低 6.5 dB 和 11.0 dB。总体来看, 声子晶体嵌入式轨道能够在轨道结构内部形成较明显的振动逐级衰减, 其中轨道板向地基传递过程中的衰减更为突出, 表明该结构对向基础传播的振动具有较好的隔振作用。



(a) 1~80 Hz 振级对比



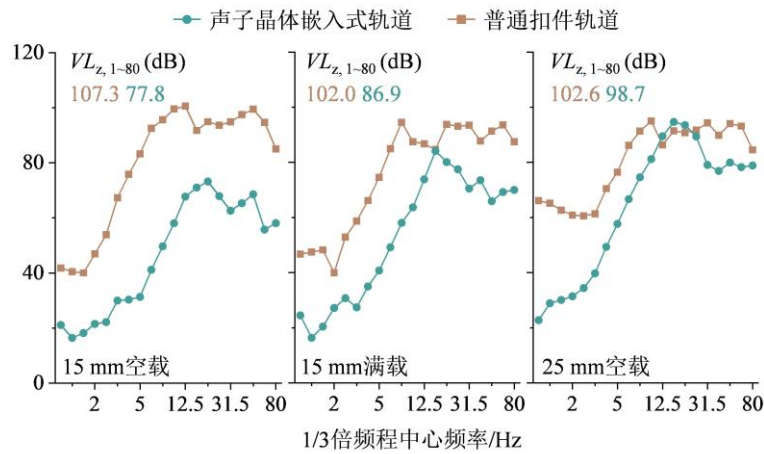
(b) 4~200 Hz 振级对比

图7 声子晶体嵌入式轨道各结构振级对比

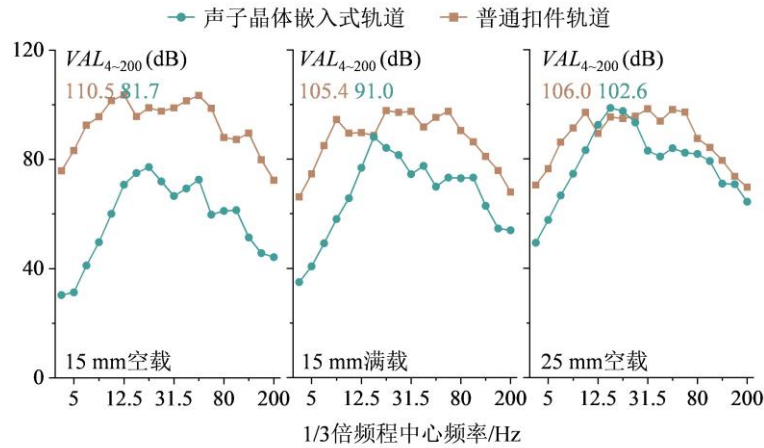
Fig. 7. Comparison of vibration levels among different components of the phononic crystal embedded rail track

如图8所示,在不同落轴工况下,声子晶体嵌入式轨道的振级总体均低于普通扣件轨道。对于1~80 Hz频段,在15 mm空载、15 mm满载和25 mm空载工况下,普通扣件轨道总振级分别为107.3、102.0和102.6 dB,声子晶体嵌入式轨道分别为77.8、86.9和98.7 dB,对应降低29.5、15.1和3.9 dB。其中,15 mm空载工况下减振效果最为显著,而25 mm空载工况下两种轨道的振级差异明显缩小。对于4~200 Hz频段,普通扣件轨道总振级分别为110.5、105.4 dB和106.0 dB,声子晶体嵌入式轨道分别为81.7、91.0 dB和102.6 dB,对应降低28.8、14.4和3.4 dB,与1~80 Hz频段呈现出基本一致的变化规律。从1/3倍频程结果来看,声子晶体嵌入式轨道在低、中频范围内具有较为明显的振动抑制作用,而随着冲击作用增强,部分频带内两种轨道的响应逐渐接近。

落轴高度由15 mm增至25 mm后,声子晶体嵌入式轨道的地基总振级在两个统计频段均升高20.9 dB,相对普通扣件轨道的减振量随之明显缩小。较强冲击可能使弹性包覆层及下部垫板产生更大压缩,改变其等效动力刚度,削弱弹性隔振作用;同时,冲击激发的振动成分增多,部分能量可能超出阻振结构的优势控制频段。因此,该结构在高冲击工况下仍有减振效果,但减振优势明显减弱。



(a) 1~80 Hz 振级对比



(b) 4~200 Hz 振级对比

图 8 声子晶体嵌入式轨道与普通扣件轨道振级对比

Fig. 8. Comparison of vibration levels between the phononic crystal embedded rail track and the conventional fastener track

4 结论

本文采用落轴冲击试验、WSST 时频分析及 1/3 倍频程振级分析方法,对声子晶体嵌入式轨道的瞬态振动响应、振动传播特征及减振性能进行了研究,并与普通扣件轨道进行了对比,得出以下结论。

1) 六种时频分析方法对比表明,WSST 具有最低的 Rényi 熵和最高的能量聚集度,瞬时衰减表征指数 Q 达到 0.52192,能够有效抑制时频能量扩散,准确识别冲击振动的主导频率及其衰减特征。

2) 声子晶体嵌入式轨道的冲击振动主要集中于冲击后 0~0.25 s,并沿钢轨—轨道板—地基逐级衰减。钢轨响应频带覆盖 0~200 Hz,传递至轨道板后 150 Hz 以上的振动成分明显减弱,地基响应主要集中于 20~80 Hz,振动持续时间进一步缩短。

3) 与普通扣件轨道相比,15 mm 空载、15 mm 满载和 25 mm 空载工况下,声子晶体嵌入式轨道在 1~80 Hz 频带的总振级分别降低 29.5、15.1 dB 和 3.9 dB,在 4~200 Hz 频带分别降低 28.8、14.4 dB 和 3.4 dB,减振效果随冲击强度增大总体呈减弱趋势。

参考文献:

- [1] 欧阳滔, 刘庆杰, 罗信伟, 等. 快速地下线振动源强特性实测分析[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(3): 55-64.
OUYANG Tao, LIU Qingjie, LUO Xinwei, et al. Measured characterisation of vibration source strengths for express underground lines[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(3): 55-64.
- [2] 张凌, 彭思捷, 冯青松, 等. 地铁车辆段试车线减振改造后振动特性研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(3): 12-21.
ZHANG Ling, PENG Sijie, FENG Qingsong, et al. Research on vibration characteristics after vibration reduction renovation of the testing line in subway depot[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(3): 12-21.
- [3] 杨刚, 何远鹏, 韩健, 等. 嵌入式轨道系统振动传递研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 197-203.
YANG Gang, HE Yuanpeng, HAN Jian, et al. Research on embedded track system vibration transmission[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(7): 197-203.
- [4] 刘向明, 王甲生, 徐磊, 等. 地铁嵌入式轨道刚度试验及车致振动特性[J]. 铁道建筑, 2026, 66(2): 89-94.
LIU Xiangming, WANG Jiasheng, XU Lei, et al. Stiffness test and train-induced vibration characteristics of metro embedded track[J]. Railway Engineering, 2026, 66(2): 89-94.
- [5] 时潇迪, 李松, 韩健, 等. 嵌入式轨道三维滚动接触模型冲击特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(3): 165-169.
SHI Xiaodi, LI Song, HAN Jian, et al. Research on impact characteristics of embedded track based on a three-dimensional rolling contact model[J]. Noise and Vibration Control, 2024, 44(3): 165-169.
- [6] 曾志平, 胡新财, 罗信伟, 等. 基于落轴冲击的嵌入式轨道振动特性试验研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报, 2026: 1-14.
DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20260579.
ZENG Zhiping, HU Xincan, LUO Xinwei, et al. Experimental study on vibration characteristics of embedded track based on falling-wheel impact[J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering, 2026: 1-14.
- [7] 罗文俊, 张梁, 郭文杰, 等. 基于振幅放大机制的无砟轨道周期结构弯曲波调控研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(2): 25-32.
LUO Wenjun, ZHANG Liang, GUO Wenjie, et al. Research on bending wave control of ballastless track periodic structure based on amplitude amplification mechanism[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(2): 25-32.
- [8] QU S, DING W, DONG L, et al. Chiral phononic crystal-inspired railway track for low-frequency vibration suppression[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 274: 109275.
- [9] GAO X L, SUN X W, LI R S, et al. The low-frequency bandgap characteristics of phononic crystal isolators with multi-hole[J]. Journal of Vibration and Control, 2025, 31(13/14): 2759-2768.
- [10] SHI D J, ZHANG X H, GONG Z L, et al. Dissipation mechanism and spatial vibration behavior of floating slab track with particle damping phononic crystal isolator under falling wheel impacts[J]. Journal of Vibration and Control, 2026, 32(11/12): 2852-2868.
- [11] 贾宝新, 翟子威, 张静, 等. 基于高阶局部极大同步压缩变换的浅埋隧道高铁振动信号时频及衰减分析[J]. 岩土力学, 2025, 46(1): 337-352.
JIA Baoxin, ZHAI Ziwei, ZHANG Jing, et al. Time-frequency and attenuation analysis of shallow tunnel high-speed railway vibration signal based on high-order local maximum synchrosqueezing transform[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(1): 337-352.
- [12] LI T Y, XIANG K L, YAN Z, et al. Effect of operating conditions on the time-frequency characteristic of high-speed vehicle-turnout dynamic interaction using synchrosqueezed wavelet transform[J]. Vehicle System Dynamics, 2026, 64(1): 203-225.
- [13] TANG L, SHANG X Q, HUANG T L, et al. An improved local maximum synchrosqueezing transform with adaptive window width for instantaneous frequency identification of time-varying structures[J]. Engineering Structures, 2023, 292: 116543.
- [14] ZHOU Y, LING B W K. Adaptive local maximum synchrosqueezing transform via adaptive window with time-varying function and time-varying searching region[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-19.
- [15] MARCHI E, CERVETTO M, GALARZA C. Adaptive synchrosqueezing wavelet transform for real-time applications[J]. Digital Signal Processing, 2023, 140: 104133.
- [16] 张洪, 杜显德, 刘林芽, 等. 基于 PSO-BP 和 NSGA-II 的地铁嵌入式轨道结构优化研究[J]. 机械工程学报, 2026, 62(15): 183-194.
ZHANG Hong, DU Xiande, LIU Linya, et al. Optimization of metro embedded track structure based on PSO-BP and NSGA-II[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2026, 62(15): 183-194.
- [17] 杨刚, 何远鹏, 韩健, 等. 嵌入式轨道系统振动传递研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 197-203.
YANG Gang, HE Yuanpeng, HAN Jian, et al. Research on embedded track system vibration transmission[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(7): 197-203.
- [18] ZHAO C Y, SHI D J, ZHENG J Y, et al. New floating slab track isolator for vibration reduction using particle damping

- vibration absorption and bandgap vibration resistance[J]. Construction and Building Materials, 2022, 336: 127561.
- [19] XIAO P, MIAO L C, ZHENG H Z, et al. Low frequency vibration reduction bandgap characteristics and engineering application of phononic-like crystal metaconcrete material[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134734.
- [20] SHENG X, TANG R, XU Y J, et al. Low frequency vibration mitigation performance of a phononic crystal-enhanced floating slab track[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2026, 30(4): 100455.
- [21] SHI D J, ZHAO C Y, ZHANG X H, et al. Application and optimization design of non-obstructive particle damping-phononic crystal vibration isolator in viaduct structure-borne noise reduction[J]. Journal of Central South University, 2024, 31(7): 2513-2531.
- [22] GENG M J, SHI D J, LEI J X, et al. Effects of particle damped phononic crystal isolators on wave propagation and vibration isolation in periodic floating slab tracks[J]. Construction and Building Materials, 2026, 521: 146138.
- [23] HE Y, HU M H, JIANG Z N, et al. Local maximum synchrosqueezes from entropy matching chirplet transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 181: 109476.



第一作者：刘光胜（1985—），男，高级工程师，研究方向为轨道交通减振降噪。



通信作者：赵才友（1984—），男，教授，博士，博士生导师，国家万人计划青年拔尖人才，研究方向为轨道交通减振降噪。