

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.044



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 基于 FE-SEA 法的上盖建筑宽频段振动噪声分析与控制

冯兆伟<sup>a</sup>, 罗文俊<sup>b</sup>, 郭文杰<sup>b</sup>, 李佳宝<sup>a</sup>, 张梁<sup>a</sup>

(华东交通大学 a. 土木建筑学院; b. 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 南昌 330013)

**摘要:** 为分析地铁车辆段运行对上盖建筑振动与室内二次结构噪声的影响, 基于 FE-SEA 混合法, 以某地铁车辆段上盖建筑为依托, 建立轨道-盖板-上盖建筑耦合模型, 开展地铁振动作用下不同频域范围内上盖建筑振动与室内二次结构噪声分析, 揭示上盖建筑振动产生机理, 探究上盖建筑振动与噪声传播规律。结果表明: 采用 FE-SEA 混合法分析预测上盖建筑振动及室内结构噪声准确性较高; 受固有频率影响, 上盖建筑各楼板主频振动位于 31.5~50 Hz 的低频段内; 车致上盖建筑振动 Z 振级在第 9 层衰减至最低水平, 随着楼层的增加, 振动出现放大现象; 各典型房间二次结构噪声声压主要集中于 20~80 Hz 范围内, 随着楼层的增加, 不同典型房间的 A 声级均出现先减小后增大的现象; 施加隔振支座可以起到较好的减振效果, 能有效降低结构的自振频率, 并降低上盖结构对高于这一频率的振动响应。

**关键词:** FE-SEA 混合法; 地铁车辆段; 上盖建筑; 振动; 噪声; 隔振支座

**中图分类号:** TB533; U231    **文献标志码:** A    **文章编号:** 2096-6717(2025)05-0218-11

## Analysis and control of wide-band vibration and noise of roof building based on FE-SEA method

FENG Zhaowei<sup>a</sup>, LUO Wenjun<sup>b</sup>, GUO Wenjie<sup>b</sup>, LI Jiabao<sup>a</sup>, ZHANG Liang<sup>a</sup>

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China)

**Abstract:** Using the FE-SEA mixed method, this study establishes a coupled model of the track-cover-upper covered building to analyze the impact of subway car depot operation on vibration and indoor secondary structure noise in an upper covered building. The vibration and noise of the roof building and indoor secondary structure in different frequency domains are analyzed under subway vibrations. The mechanism underlying the generation of vibrations in overlying buildings is revealed, while also delving into the propagation patterns governing vibration and noise in such structures. Results show that the FE-SEA mixed method accurately predicts roof-building vibrations and indoor structural noise. Each floor's vibration is affected by its natural frequency, with main-

收稿日期: 2024-03-07

基金项目: 国家杰出青年科学基金(52225210)

作者简介: 冯兆伟(2000-), 男, 主要从事上盖建筑环境振动与噪声研究, E-mail: fengzhaowei@ecjtu.edu.cn。

罗文俊(通信作者), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: lwj06051979@163.com。

**Received:** 2024-03-07

**Foundation item:** National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 52225210)

**Author brief:** FENG Zhaowei (2000-), main research interests: environmental vibration and noise of roof construction, E-mail: fengzhaowei@ecjtu.edu.cn.

LUO Wenjun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: lwj06051979@163.com.

frequency vibrations located in the low-frequency band between 31.5 and 50 Hz. Vehicle-induced roof-building Z-vibration levels attenuate to their lowest point on the ninth floor before magnifying as floors increase; typical room secondary structure noise pressure mainly concentrates within the 20~80 Hz range, with A-levels decreasing then increasing as floors rise; application of a vibration isolation support effectively reduces natural frequencies while reducing higher-frequency responses from roof structures above this range. These findings provide a useful reference for predicting, reducing, or isolating subway-depot-related vibrations.

**Keywords:** FE-SEA mixing method; subway car depot; cover the building; vibration; noise; isolation support

城市轨道交通对城市建设的发展起着重要作用,面对城市地铁建设工程造价高、占地面积大、施工困难等问题,地铁上盖建筑的开发利用在地铁工程中越来越得到重视。由于紧邻地铁运行线路,日夜运行的地铁车辆产生的振动经由钢轨、轨道结构、地基土体传递到上盖建筑,进而引起上盖建筑结构振动,诱发室内二次结构噪声,极大地影响了周围上盖建筑物中居民生活的舒适度。如何有效地减少和消除地铁运行引起的上盖建筑振动与噪声问题,成为地铁上盖建筑开发与有效利用的重要条件之一。

由于地铁振动诱发上盖建筑振动的因素复杂,对地铁运行引起上盖建筑振动的研究越来越受到重视。许暮迪等<sup>[1]</sup>通过有限元仿真方法对某试车线上盖建筑进行了振动舒适度分析,发现地铁振动引起的上盖建筑楼板振动频率集中于楼板基频附近。采用同样的分析方法,王艺臻<sup>[2]</sup>建立了土体-建筑物动力分析模型,并综合考虑地铁车辆、轨道结构、土体隧道等结构的作用机理,研究并计算了各动力学参数对建筑物振动与噪声的影响。冯青松等<sup>[3]</sup>建立了大地-车辆段-上盖建筑有限元模型,分析发现,对于地铁运行产生的上盖建筑振动,当楼层较低时,结构振动逐渐衰减;当楼层较高时,结构振动逐渐增大。在数值分析的基础上,更多学者采用现场实测或现场实测结合有限元的方法<sup>[4]</sup>,汪益敏等<sup>[5]</sup>对广州某地铁车辆段试车线上盖建筑进行现场实测,从时域和频域的角度分析上盖建筑振动传播特性,发现临近地面车致竖向振动明显大于水平振动。贺玉龙等<sup>[6]</sup>测试并分析了住宅建筑室内噪声和楼板振动速度,发现室内结构噪声声压级与楼板中央振动速度级近似呈线性关系。邹超等<sup>[7]</sup>对某地铁车辆段进行现场实测,提出由于列车在各区域段运行条件不同,运行产生的振源对上盖建筑的振动也会产生较大差异。当地铁列车在试车线与咽喉区运行时,随着层高的增加,上盖建筑振动先减小后增大。

车致上盖建筑振动与室内二次结构噪声从原理上讲均属于振动,二者只是传播媒介不同。结合振动传递途径以及各阶段振动传播规律,可以从振

源、传播途径、受振体保护3个方面进行减振控制。目前,对于振源与传播途径的减振措施研究已取得大量成果<sup>[8-10]</sup>,如设计钢轨动力吸振器、添加约束阻尼、浮置板轨道、各种减振扣件等措施。曹志刚等<sup>[11]</sup>分析了道砟垫对上盖建筑的减振影响,通过现场测试道床轨道与上盖建筑振动响应情况,仿真建立上盖建筑耦合动力学模型,数值模拟不同道砟垫刚度对上盖建筑的减振效果。王一干等<sup>[12]</sup>对比分析了不同减振轨道结构的减振效果及其对上盖建筑结构噪声的降噪效果,根据实测结构振动与噪声数据,分析并验证了结构振动与二次结构噪声的关系。

目前,研究结构振动噪声的方法主要有有限元法(FEM)、边界元法(BEM)、统计能量法(SEA)<sup>[13]</sup>。有限元法针对低频段简单结构动力学问题求解精度较高,但对高频段分析计算量大,边界元法求解较高频段时计算量大且耗时较长,而统计能量法求解低频时计算准确性大幅度降低,采用其中任何一种方法都不能很好地解决宽频段结构振动与噪声问题。因此,可以综合不同方法的优点,建立混合模型,如将有限元法与统计能量法混合建模。Langley等<sup>[14]</sup>最先提出基于模态理论的FE-SEA混合算法,在前人研究的基础上,Shorter等<sup>[15-16]</sup>提出基于波动理论的改进FE-SEA混合算法,Cotoni等<sup>[17]</sup>采用现场试验测试数据与数值模拟计算数据对比验证该方法的可行性。

综上所述,已有研究大部分是针对地铁振源邻近建筑物的振动响应,而对地铁运行引起的上盖建筑振动特性研究较少。地铁上盖物业位于振源上方,振源与上盖建筑的空间关系与以往研究对象差异较大。同时,已有研究大多利用有限元仿真技术,针对的是地铁引起的建筑物低频振动,而对建筑物宽频段振动的研究罕有报道。对于上盖建筑的二次噪声问题,已有研究主要利用边界元法或根据结构振动预测公式来进行计算,分析频段也主要针对低频部分。针对以上问题,笔者采用FE-SEA混合法建立地铁列车运行下上盖建筑宽频段振动与噪声预测模型,预测在频域1.25~200 Hz范围内地铁振动作用对上盖建筑振动及二次噪声的影响,

揭示上盖建筑振动产生的机理,分析上盖建筑振动的传播规律。

## 1 基本理论及仿真流程

### 1.1 FE-SEA 混合法的基本原理

对于复杂的整体结构,通常根据结构自身特性的不同划分为若干子系统<sup>[18-19]</sup>。若子系统自身刚度较大、模态稀疏、系统中的一些不确定因素对计算结果不产生作用,则可定义为确定子系统,可采用FE建模,如上盖建筑的结构梁和结构柱等构件。若该子系统自身柔性很大、模态密集、子系统中不确定因素对系统计算结果影响较大,则可定义为随机子系统,可采用SEA建模。

确定子系统响应可由一系列确定性位移广义坐标 $q_d$ 表示。确定子系统(FE)受到外力 $f_{ext}$ 作用,还可承受多个随机子系统 $m$ (SEA)的反作用力 $f_{rev}^m$ ,其运动方程表示为<sup>[15]</sup>

$$D_{tot}q_d = f_{ext} + \sum_m f_{rev}^m \quad (1)$$

式中: $D_{tot}$ 为系统的总动刚度矩阵,由确定子系统(FE)的动刚度矩阵和混合连接处动刚度矩阵的线性叠加;  $\sum_m f_{rev}^m$ 为随机子系统(SEA)通过混响场向确定子系统(FE)传递能量。

受外力作用的随机子系统能量平衡方程为<sup>[15]</sup>

$$\sum_k \omega \eta_{j,k} n_j \left( \frac{E_j}{n_j} - \frac{E_k}{n_k} \right) + \omega E_j (\eta_j + \eta_{dj}) = P_{in,j}^ext \quad (2)$$

式中: $\omega$ 为角频率; $E_j$ 、 $E_k$ 为随机子系统的统计能量响应; $n_j$ 、 $n_k$ 为随机子系统的模态密度; $\eta_j$ 为随机子系统中的阻尼损耗因子; $\eta_{j,k}$ 为随机子系统 $j$ 和 $k$ 之间的耦合损耗因子; $\eta_{dj}$ 为确定子系统与随机子系统 $j$ 之间的耦合损耗因子; $P_{in,j}^ext$ 为随机子系统 $j$ 受外力的输入功率。

采用FE-SEA混合法建立上盖建筑宽频段振动与噪声预测模型,能有效避开有限元法在高频段计算量大、边界元法求解时间长、统计能量法针对低频计算准确性下降等问题。FE-SEA混合法结合有限元法与能量有限元法各自的优点,实现有限元模型与统计能量模型耦合建模及求解,引入统计能量模型可大幅提高求解效率,耦合有限元模型可以对复杂模型进行精确建模并获得对应子系统的响应分布<sup>[20]</sup>。

### 1.2 仿真分析流程

车致上盖建筑振动与室内结构二次噪声仿真分析流程如图1所示。首先,建立车辆-轨道耦合动力学模型,分析计算频域动态轮轨力,将1/3倍频程

转换为1/3倍频程轮轨力,转换所得轮轨力作为上盖建筑计算模型的激励源<sup>[21]</sup>。在上盖建筑中运用库行车间道床与邻近柱子布置测点,计算分析其振动频谱,与某地铁实测运用库振动结果对比,验证混合法模型的正确性。最后,对上盖建筑进行振动与噪声响应分析,观察并分析列车运行对上盖建筑的振动与噪声传递规律,针对振动及噪声超标的情况,采取隔振措施,分析上盖建筑的隔振效果。

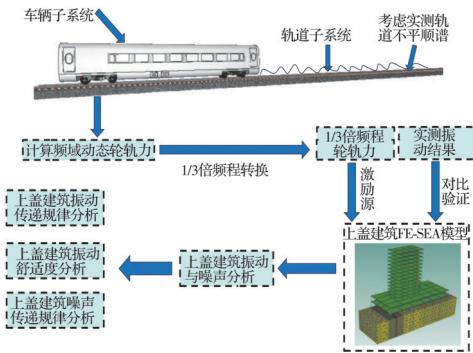


图1 上盖建筑计算模型仿真流程图

Fig. 1 Simulation flow chart for the calculation model of the overlying building

以深圳某地铁车辆段运行下双层运用库上盖建筑为例,根据FE-SEA混合法理论建立振动预测模型对其进行分析。在此基础上,对上盖建筑二次噪声进行预测分析,建立对应的上盖建筑声腔模型进行计算。由于地铁车辆段运行导致上盖建筑振动涉及到轨道车辆、运用库结构、上盖建筑结构和土体,各结构振动与噪声的频率范围不同,因此,根据FE-SEA混合法理论<sup>[18]</sup>,对于低频段振动结构,采用FE法建模,建立FE子系统;对于中高频段振动结构,利用SEA法建模,形成SEA子系统,两个子系统采用混合法耦合。

## 2 基于FE-SEA混合法的模型建立

建立车辆-轨道-盖板-上盖建筑宽频段振动与噪声预测模型,该模型包括两个子模型:第一,建立车辆-轨道耦合动力学模型,考虑该双层车辆段车辆与轨道结构运行情况,分析计算不同运行工况条件下地铁产生的动态轮轨力,作为上盖建筑的激励源;第二,建立轨道-盖板-上盖建筑耦合模型,其中,运用库盖板为双层框架结构,上盖建筑为13层框架结构商业楼。

### 2.1 上盖建筑振动与二次结构噪声预测模型

利用VA one商业软件建立轨道-盖板-上盖建筑耦合模型,其中上盖建筑振动预测模型整体构件包括结构梁、结构柱、楼板等,结构中主要构件的物

理参数如表1所示。

表1 主要结构构件物理参数

Table 1 Main physical parameters of structural components

构件	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$E/\text{GPa}$	泊松比
结构梁	2 400	34.5	0.2
结构柱	2 400	34.5	0.32
楼板	2 500	33.0	0.2
杂填土	1 850	0.16	0.38
黏土	1 950	0.194	0.38
砂土	1 950	0.217	0.35

土体采用实体单元建立FE子系统,对于轨道结构建模,在1.25~200 Hz频段,钢轨模态数量稀疏,采用Beam单元建立FE子系统,轨道结构采用Plate单元建立FE子系统,钢轨与轨道结构之间采用弹簧-阻尼点连接,以模拟扣件系统,钢轨两端采用固定约束。双层运用库及上盖建筑主要由结构梁、结构柱与楼板等构件组成,首先利用统计能量法建立上盖建筑SEA模型,对结构构件进行各频段模态数计算<sup>[21]</sup>。当构件模态数大于5时,采用SEA单元建模;当模态数小于5时,采用FE单元建模,各结构构件弯曲模态数如图2所示。其中,结构柱1与结构梁1为运用库的柱与梁,结构柱2与结构梁2为上盖建筑的柱与梁,盖板选取地铁列车运行正上方位置,上盖楼板选取上盖建筑近轨侧2层楼板位置。

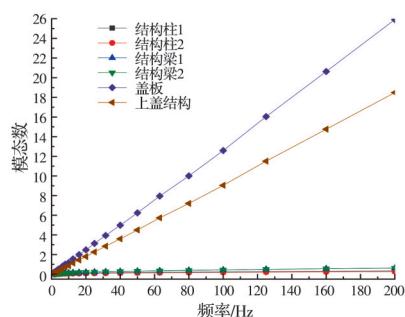


图2 模态数与频率关系图

Fig. 2 Relationship between modal number and frequency

由图2可见,在全频域内不同长度的结构梁和结构柱的模态数小于5,因此,上盖框架中所有结构梁与结构柱均采用FE单元建模。楼板的弯曲模态数随着频率的增加呈线性增加,当频率大于40 Hz时,楼板的模态数大于5。因此,在1.25~40 Hz频域范围内,各结构构件采用FE单元,建立全FE结构系统,形成FE上盖建筑模型,如图3所示。在40~200 Hz频域内,由于结构梁、结构柱自身刚度较大,全频段内模态稀疏,因此始终采用FE单元建模,形成FE子系统;对于模态数量密集的楼板,采

用SEA法建模,形成SEA子系统,最终形成FE-SEA混合模型,如图4所示。在相同的子系统中,如上盖建筑全有限元模型中各子系统以有限元点或线连接的形式进行能量传递。在不同的子系统中,有限元模型与统计能量模型相互耦合,采用FE-SEA混合法进行混合连接,可以准确地表述子系统之间的能量传递特性。在建立整体上盖建筑FE-SEA计算模型的基础上,对上盖建筑各房间建立SEA声腔模型,分析车致上盖建筑振动对室内二次结构噪声的影响。上盖建筑各房间声腔模型如图5所示。

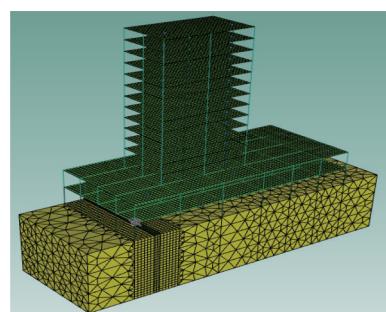


图3 整体上盖建筑FE计算模型图

Fig. 3 FE calculation model diagram of the overall building

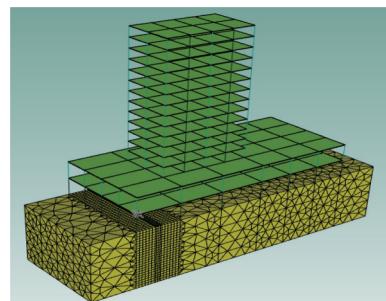


图4 整体上盖建筑FE-SEA计算模型图

Fig. 4 FE-SEA calculation model diagram of the overall building

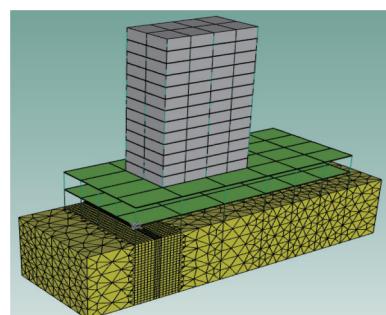


图5 上盖建筑声腔模型图

Fig. 5 Sound chamber model of the overlying building

## 2.2 地铁列车多体动力学模型

轮轨接触是引起上盖建筑振动的主要原因,结合动柔度思想建立车辆-轨道耦合动力频域模型,求

解地铁运行产生的动态轮轨力<sup>[22-23]</sup>。根据动柔度法计算原理,计算所需钢轨动柔度、车轮动柔度、轮轨接触动柔度以及轨道不平顺,即可计算动态轮轨力。轮轨相互作用力可由式(3)计算<sup>[24]</sup>。

$$F_c = -\frac{R}{(\beta_w + \beta_c + \beta_r)} \quad (3)$$

式中: $\beta_w$ 为车轮动柔度; $\beta_c$ 为轮轨接触弹簧柔度, $\beta_c = 1/k_H$ , $k_H$ 为线性轮轨接触刚度; $\beta_r$ 为钢轨动柔度; $R$ 为轨道不平顺幅值。

文献[5]指出,上盖建筑车致竖向振动明显大于水平振动,因此,分析计算轮轨力时,主要考虑垂向轮轨力。分析宽频段车辆轨道动态轮轨力变化对上盖建筑振动的响应,考虑短波、中长波轨道不平顺激励,其中,长波段采用地铁车辆段现场实测轨道不平顺,并叠加短波 Sato 谱,形成轨道不平顺<sup>[3]</sup>,如图 6 所示。车型采用地铁 B 型车,考虑列车在运用库运行时通常速度较低,设置运行速度为 2.5 m/s,求解作用在运用库内的宽频段轨道交通荷载,计算所得动态轮轨力作为上盖建筑的激励源,计算得到的频域动态轮轨力如图 7 所示。可以看出,该频域轮轨力峰值出现在 50 Hz 附近,与文献[24]结论一致,证明了计算轮轨力的正确性。

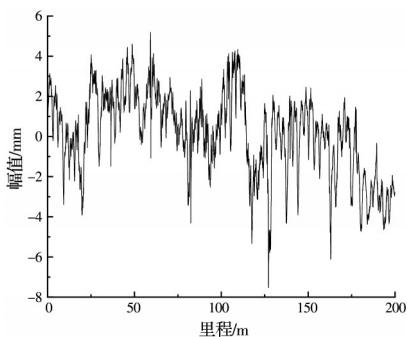
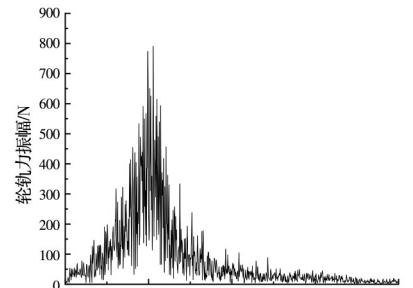


图 6 轨道不平顺样本

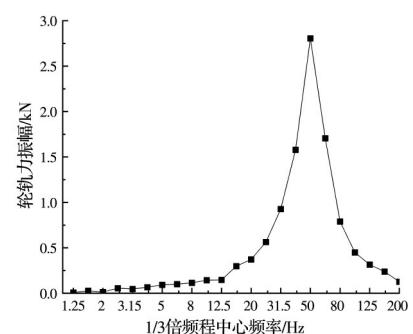
Fig. 6 Sample of track irregularity

### 2.3 模型验证

采用混合法可以快速建立上盖建筑振动与噪声预测模型,为验证模型与动态轮轨力的正确性,将计算所得动态轮轨力施加于钢轨上,模拟列车在运用库运行时所产生的振动。计算并提取道床与运用库临近柱子位置处的振动响应,道床测点位于施加振源荷载邻近的位置,运用库柱子测点位于距离施加振源荷载最近的位置,振动测点位置示意如图 8 所示。其中,道床弹性模量为 36.5 GPa,密度为 2500 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为 0.2。振动响应结果如图 9 所示,与实测某地铁运用库振动响应对比可见,实测结果与仿真计算运用库道床与运用库柱子测点振动加速度的振动主频率均在 30~60 Hz 之间,变化



(a) 轮轨力有效值



(b) 1/3倍频程轮轨力

图 7 动态轮轨力图

Fig. 7 Dynamic wheel-rail diagram

趋势基本一致,验证了模型的正确性。由于主要考虑轮轨竖向动态激励的影响,与现场实测运行情况相比,有一定简化,故两者的结果在数值上存在略微差异。

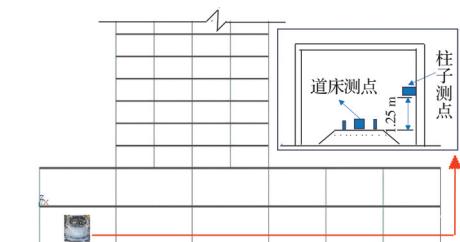


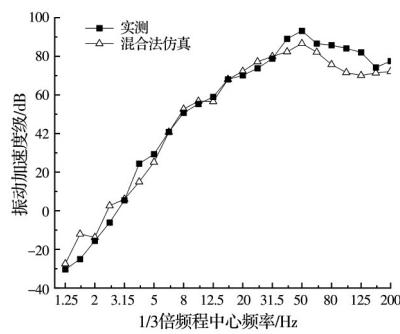
图 8 振动测点示意图

Fig. 8 Vibration measuring points diagram

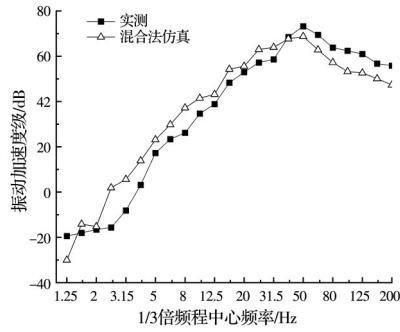
## 3 上盖建筑振动与噪声响应分析

### 3.1 上盖建筑振动响应分析

为准确预测双层车辆段地铁运行对上盖建筑宽频段振动的影响,分别进行水平方向盖板表面振动传递规律分析与上盖建筑竖向振动传递规律分析。按照距离行车线的远近选取运用库盖板,每处盖板跨中布置振动拾取点,进行振动传递规律分析,从左到右依次命名为盖板 1~6,观察并分析不同位置处振动响应结果;对于竖向传递,选取不同的典型楼层(1 层、4 层、7 层、11 层、顶层)位置以及距离行车线较近的房间楼板跨中位置进行分析,各振动拾取点位置如图 10 所示。



(a) 道床振动仿真与实测频谱图



(b) 运用库柱子振动仿真与实测频谱图

图9 实测与仿真计算振动加速度频谱图

Fig. 9 Measured and simulated plate vibration acceleration spectra

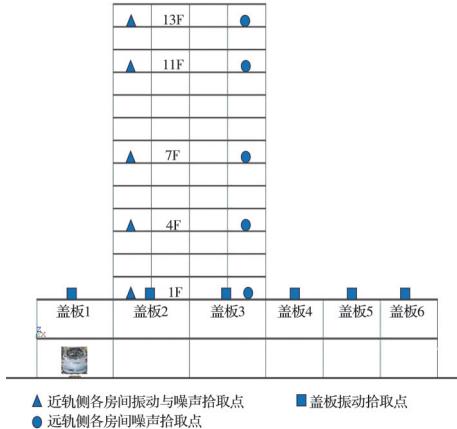


图10 上盖建筑剖面图

Fig. 10 Section view of the overlying building

对于上盖建筑水平振动传递规律的分析,运用库盖板表面各位置振动加速度级结果如图11所示。由于盖板拾取点数量较多,选取盖板1、盖板2、盖板3与盖板5代表各楼板。盖板表面各拾取点的振动均呈逐渐增大再减小的趋势,其中各拾取点振动主要集中在50 Hz附近,这与上盖建筑楼板振动的固有频率有关。不同盖板的振动振幅峰值不同,表现为:盖板1>盖板2>盖板3>盖板5,主要是由于在水平方向上与列车行车线的距离不同所致,其中,盖板1距离列车行车线距离最近。采用1/3倍频程计算各盖板振动可以直观地表现出水平方向的振

动传递规律,各盖板振动差异主要位于1.25~20 Hz的低频范围内,在频段25 Hz以上,各盖板振动加速度差异较小。在低频段1.25~6.3 Hz范围内,盖板振动加速度级增长较快。在6.3~50 Hz范围内,盖板振动变化范围变小,整体上呈增大趋势。在中高频段50~200 Hz范围内,盖板振动能量衰减较快,呈逐渐减小的趋势。

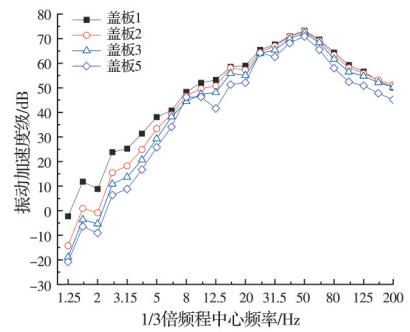


图11 上盖建筑水平方向振动传递规律

Fig. 11 Propagation law of horizontal vibration of overlying buildings

对上盖建筑竖直方向的振动传递规律进行分析,各典型楼层同一位置处振动加速度级如图12所示。各典型楼层拾取点振动趋势与上盖建筑水平方向的振动传递规律相同,均呈逐渐增大再减小的趋势,各楼层楼板振动主要位于31.5~50 Hz范围内,原因与水平方向上各盖板振动一致。

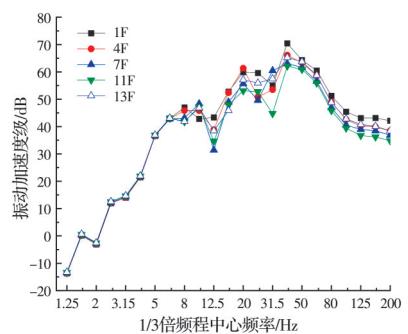


图12 上盖建筑竖直方向振动传递规律

Fig. 12 Propagation law of vertical vibration of overlying buildings

一层楼板跨中拾取点振动峰值最大,这主要是由于车辆段运行产生的振动直接经过运用库结构柱传递至楼板位置处,经过结构柱、结构梁与隔墙的能量损耗较小。随着楼层层高的增加,在低频段1.25~8 Hz范围内,上盖建筑各层楼板振动加速度级相差不大,振动能量损耗较小;在40 Hz以上频段,各层楼板振动损耗较大,楼板振动加速度级迅速衰减。这主要是由于振动能量在低频处通过楼板向上传递,高频振动能量经过土体与运用库平台

盖板振动损耗较大,导致楼板振动加速度级迅速衰减<sup>[25]</sup>。

为研究双层车辆段地铁运行引起的振动对上盖建筑振动舒适度的影响,分别对上盖建筑竖直方向与水平方向的振动舒适度进行分析,其中,在上盖建筑近轨侧各典型楼层同一位置布设振动拾取点,对竖直方向Z振级进行分析,在距离行车线水平垂轨方向上不同运用库盖板跨中处布设振动拾取点,对水平方向Z振级进行分析,即图10中盖板1~6。对于振动舒适度评价方法,采用住宅建筑室内振动限值<sup>[26]</sup>规定的夜间限值70 dB。不同方向的Z振级均为采用国际标准ISO 2631-1:1997拟定的全身振动Z计权因子进行修正的结果。

水平方向与竖直方向Z振级的计算结果如图13所示,由图13(a)可知,随着楼层高度的增加,楼板振动Z振级出现先减小后增大的变化趋势,车致上盖建筑振动在第9层楼板衰减至最低,随后出现增大趋势,其中,上盖建筑楼板振动最小Z振级为56.7 dB,随后逐渐增大。原因是车辆段列车运行产生振动经盖板传递至上盖建筑,首先传递至上盖建筑底层,所以底层楼板振动Z振级最大。随后振动经由楼板、结构梁、结构柱等结构构件向上传递,传递至上盖建筑顶层楼板时,上盖建筑已经没有太多的结构构件损耗振动能量,振动波出现反射现象。

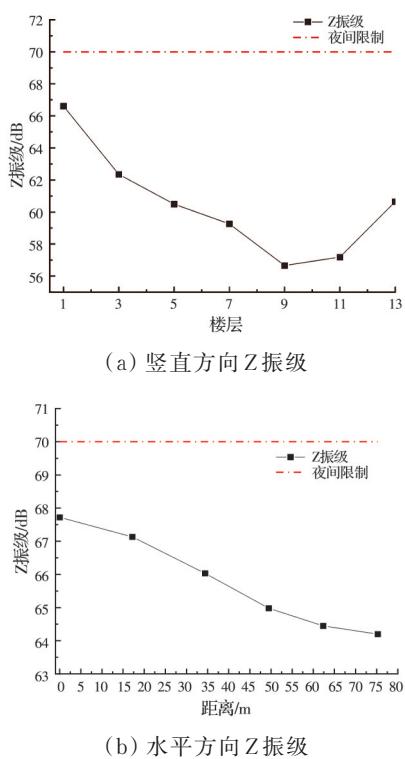


图13 上盖建筑不同方向Z振级

Fig. 13 Z vibration levels of the overlying building in different directions

这时顶层下部楼板出现原有的入射波与反射波的叠加行为,从而使楼板振动呈增大趋势。总之,无论低层楼板还是高层楼板,车致上盖建筑振动均未超出相关规范的夜间限值要求。

分析车致上盖建筑振动对水平方向上各盖板振动舒适度的影响,由图13(b)可知,随着与列车行车线距离的增大,各盖板振动Z振级振动规律近似呈线性衰减,衰减率约为0.05 dB/m。其中,距离行车线最近的盖板位于振源上方,产生的最大Z振级为67.7 dB;距离行车线75.3 m的盖板振动衰减至最低水平,最小Z振级为64.2 dB;产生这一现象的原因:随着与行车线距离的增加,振动波传递经过结构构件的振动损耗逐渐增大,产生随着距离的增大振动逐渐减小的趋势;总之,对于水平方向上各盖板振动的舒适度而言,无论近轨侧还是远轨侧均未超出相关规范的夜间限值要求。

### 3.2 上盖建筑噪声响应分析

在已获得上盖建筑振动响应分析的基础上,对上盖建筑振动产生的二次噪声进行分析。为准确预测双层车辆段列车运行对上盖建筑室内结构噪声的影响,对噪声声压分布情况以及传递规律进行分析。在建立轨道-盖板-上盖建筑耦合振动模型的基础上,增加上盖建筑各房间声腔模型,如图5所示,将上盖建筑声腔与声腔、声腔与结构、结构与结构进行耦合,建立各上盖建筑室内结构之间的能量传输模型。按照结构噪声评价标准<sup>[27]</sup>规定的噪声限值要求,设置分析频率为16~200 Hz,并判断车致上盖建筑振动产生的室内结构噪声是否超过夜间限值。

选取不同典型楼层(1层、4层、7层、11层、顶层),分析上盖建筑室内结构噪声分布情况,选择近轨侧房间声腔与最远轨侧房间声腔进行分析,其噪声拾取位置如图10所示。分析结果采用声压级参数形式表现,如图14所示。

各房间声腔的声压级曲线与上盖建筑竖向振动加速度级曲线变化趋势大体相同,呈现先增大后逐渐减小的变化趋势,原因是上盖建筑室内结构噪声主要由楼板等结构构件振动引起。选取的房间声腔中,首层楼板声腔声压级最大,且在16~50 Hz范围内,各房间声压级增长较快。当频率为50 Hz时,各典型房间声压级均出现峰值,原因是上盖建筑楼板振动的固有频率位于该频率附近,楼板振动幅值较大,导致该频率处出现峰值;在该峰值频率处,近轨侧房间噪声峰值大于远轨侧房间。室内结构噪声声压主要集中在20~80 Hz范围内,在63 Hz

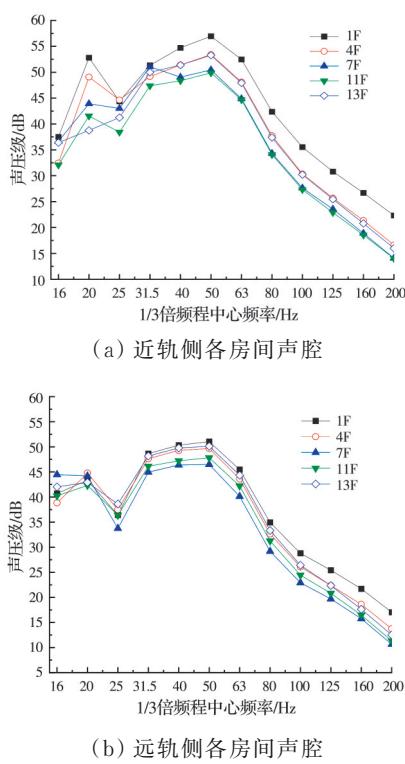


图14 不同房间声腔声压级

Fig. 14 Sound pressure levels of different chamber

中高频后,室内二次结构噪声呈降低趋势,说明后续进行室内结构噪声降噪时,应该重点关注频段在20~80 Hz范围内的声压级。

为分析上盖建筑各房间噪声的竖向传递规律,对各房间A声级进行分析,如图15所示。由图15

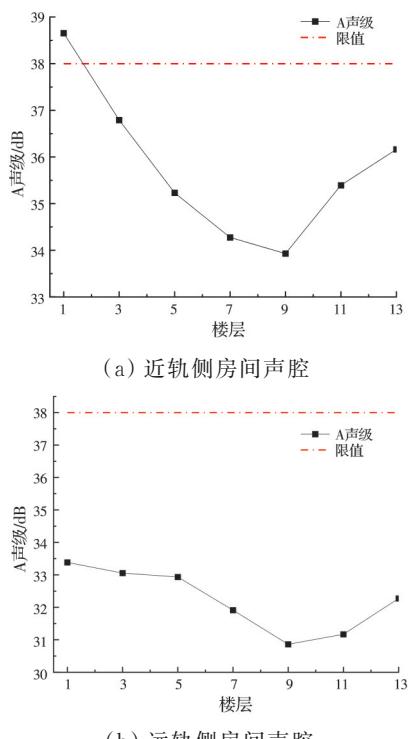


图15 不同房间A声级

Fig. 15 A sound levels of different rooms

可知,随着楼层的增加,不同房间的A声级均出现先减小后增大的现象,与上盖建筑竖直方向的振动Z振级趋势相同,并且在同一位置处,竖直方向的振动Z振级与噪声A声级均在第9层降低至最低水平,说明车致上盖建筑振动与室内二次结构噪声存在一定的相关性。其中,近轨侧房间噪声A声级出现超限现象,首层房间A声级均大于其他各楼层,说明后续对上盖建筑室内降噪时应该首先关注首层各房间的噪声水平。

#### 4 上盖建筑隔振效果分析

近年来,随着地铁上盖物业的开发,针对上盖建筑振动控制的研究引起学者们的关注。为降低地铁运行产生的振动对上盖建筑的影响,采用隔振支座对上盖建筑进行减振控制以及在运用库盖板与上盖建筑底层之间添加隔振层。隔振层中各隔振支座位置如图16所示。隔振支座采用文献[28]中的参数值,支座直径为800 mm,设计承载力为1676 kN,竖向刚度为230 kN/mm。选取上盖建筑近轨侧4层和11层房间,利用原上盖建筑楼板振动加速度级为参考标准进行减振效果分析。

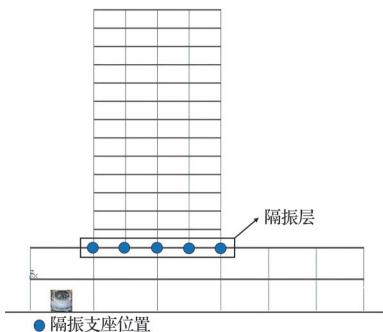


图16 隔振支座位置示意图

Fig. 16 Diagram of vibration isolation support positions

各楼层楼板竖向1/3倍频程振级如图17所示,分别对比原上盖结构与隔振结构在各楼层的振动加速度级。从图17中可以看出,在低频段,原上盖结构与隔振结构振动加速度级较为接近;当频率为40 Hz时,原上盖结构振动加速度级达到峰值,增加隔振支座后,隔振结构的振动加速度峰值频率减小到20 Hz,说明增加隔振支座可以有效降低结构的自振频率以及上盖结构对高于这一频率的输入振动的反应。

当频率低于31.5 Hz时,隔振结构在20 Hz附近出现振动放大现象,主要是因为增加隔振支座后,隔振结构楼板的局部模态频率位于该频率附近。隔振结构与未隔振结构在20 Hz附近的振型图如图

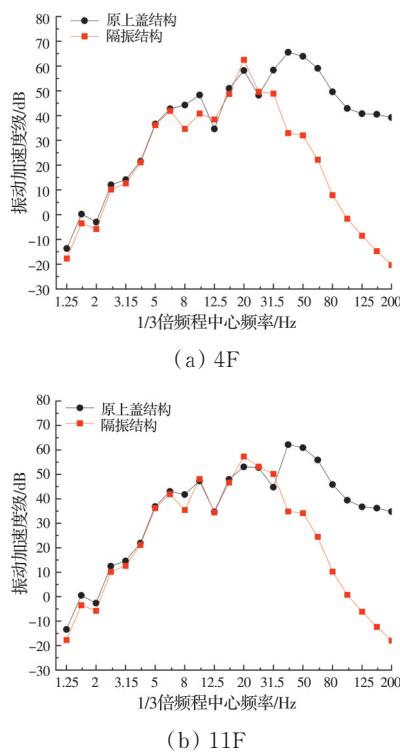


图 17 各楼层楼板竖向振动加速度级

Fig. 17 Vertical vibration acceleration levels of each floor

18 所示,在地铁车辆荷载激励下,隔振结构发生共振效应,导致上盖建筑楼板局部振动,在共振效应下,隔振结构受到的激励被放大,因此出现放大现

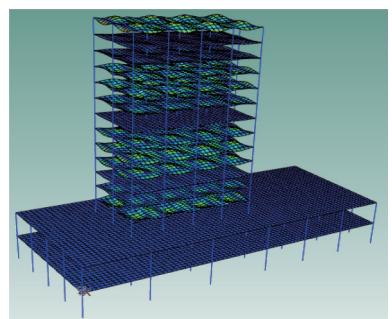
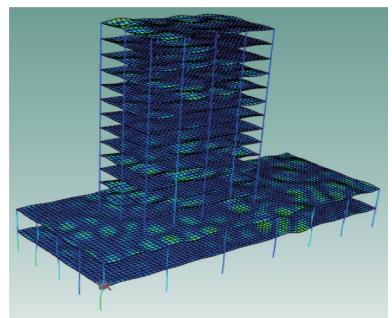
(a) 隔振结构第 1821 阶振型  $f=19.51$  Hz(b) 未隔振结构第 1855 阶振型  $f=20$  Hz

图 18 上盖建筑振型图

Fig. 18 Modal diagram of the overlying building

象。在 40 Hz 以上频段,增加隔振支座明显降低了原上盖建筑楼板的振动,表现出良好的减振效果。

## 5 结论

以深圳某地铁车辆段运行下双层运用库上盖建筑为例,根据 FE-SEA 混合法理论,建立车辆-轨道-盖板-上盖建筑振动与噪声预测模型进行分析,揭示上盖建筑振动产生原因,系统分析上盖建筑振动与噪声传递规律,结果表明:

1) 采用 FE-SEA 混合法可以快速准确地建立上盖建筑振动与噪声预测模型,通过与实测某地铁运用库振动数据进行对比验证,结果吻合良好,证明采用混合法理论建立的上盖建筑预测模型的准确性。

2) 对上盖建筑进行竖直方向振动传递规律分析,各层楼板振动趋势相同,楼板振动主频位于 31.5~50 Hz 附近,这主要与楼板的固有频率相关。各层楼板在低频段表现为整体振动状态,在中高频段体现出差异,这主要是由于在低频段上盖建筑各层楼板振动损耗较小,中高频段振动能量经由土体与运用库盖板,振动损耗较大。

3) 在车致上盖建筑振动舒适度分析中,对于竖直方向的振动舒适度,楼板振动 Z 振级表现为先减小后增大的趋势。在竖直方向上,上盖建筑楼板振动 Z 振级在第 9 层衰减至最低水平,这主要是由于振动传递至上盖建筑顶层楼板时已经没有太多结构构件损耗振动能量,振动波出现反射现象,导致顶层下部楼板出现增大趋势。水平方向各盖板振动 Z 振级变化近似呈线性衰减规律。

4) 上盖建筑各典型房间二次结构噪声声压主要集中于 20~80 Hz 范围内,在中高频 63 Hz 后,室内结构噪声呈降低状态。相对于其他楼层室内结构噪声,首层房间噪声更为严重。因此,后续进行上盖建筑降噪时,应该重点关注首层各典型房间。

5) 增加隔振支座可以有效降低结构的自振频率以及上盖结构对高于这一频率的振动响应;相对于原上盖结构,隔振结构振动会出现一定的放大现象,这主要是由于楼板局部模态频率与振动荷载频率接近,发生了共振现象。在中高频段施加隔振支座减振效果较好。

## 参考文献

- [1] 许暮迪,袁葵,花雨萌,等.地铁车辆段试车线上盖建筑振动舒适度研究[J].世界地震工程,2021,37(1):137-143.  
XU M D, YUAN K, HUA Y M, et al. Research on

- vibration serviceability of over-track buildings on the test lines of subway depots [J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(1): 137-143. (in Chinese)
- [2] 王艺臻. 城市轨道交通地下线诱发邻近建筑物振声特性及控制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- WANG Y Z. Study on vibration characteristics and control methods of adjacent buildings induced by underground line of urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [3] 冯青松, 余超, 唐柏赞, 等. 双层车辆段上盖建筑振动与结构噪声预测分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(9): 304-311, 321.
- FENG Q S, YU C, TANG B Z, et al. Prediction and analysis of vibration and structural noise of upper cover building of double-deck depot [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(9): 304-311, 321. (in Chinese)
- [4] 汪益敏, 陶子渝, 邹超, 等. 地铁车辆段咽喉区上盖建筑振动传播规律[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(1): 112-121.
- WANG Y M, TAO Z Y, ZOU C, et al. Vibration propagation law within over-track buildings above throat area of metro depot [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 112-121. (in Chinese)
- [5] 汪益敏, 曾泽民, 邹超, 等. 地铁车辆段试车线列车振动影响的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 1-8.
- WANG Y M, ZENG Z M, ZOU C, et al. Experimental investigation into train-induced vibrations of test-line at metro depot [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(12): 1-8. (in Chinese)
- [6] 贺玉龙, 张群, 陈瑞, 等. 成都地铁诱发室内结构噪声实测与分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(2): 202-206.
- HE Y L, ZHANG Q, CHEN R, et al. Measurements and analyses of indoor ground-borne noise induced by Chengdu metro [J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(2): 202-206. (in Chinese)
- [7] 邹超, 陈颖, 胡子豪, 等. 地铁车辆段不同区域车致上盖建筑振动传播规律研究[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(6): 181-186.
- ZOU C, CHEN Y, HU Z H, et al. Train-induced vibration transmission within over-track buildings in different areas of metro depot [J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(6): 181-186. (in Chinese)
- [8] 刘冀钊, 姜博龙. 浮轨扣件控制地铁车辆段上盖建筑振动效果研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(8): 200-206.
- LIU J Z, JIANG B L. Study on vibration control effects on the metro depot and over-track buildings using floating rail fasteners [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(8): 200-206. (in Chinese)
- [9] 姜博龙, 何宾, 刘冀钊, 等. 地铁车辆段周期性桩基础隔振效果研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(4): 216-221.
- JIANG B L, HE B, LIU J Z, et al. Study on vibration isolation effects of periodic pile foundation adopted in metro depot [J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(4): 216-221. (in Chinese)
- [10] 邬玉斌, 宋瑞祥, 何蕾, 等. 地面列车荷载作用下地屏障对建筑楼板的隔振效果分析[J]. 振动工程学报, 2020, 33(2): 322-330.
- WU Y B, SONG R X, HE L, et al. Isolation effect of barriers on building floor under the vibration induced by trains of ground line [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(2): 322-330. (in Chinese)
- [11] 曹志刚, 王思崎, 许逸飞, 等. 地铁车辆段上盖建筑道砟垫减振机理与效果[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(1): 71-80.
- CAO Z G, WANG S Q, XU Y F, et al. Vibration mitigation mechanism and effect of ballast mats for over-track buildings on metro depot [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(1): 71-80. (in Chinese)
- [12] 王一干, 刘鹏辉, 李腾, 等. 车辆段轨道减振措施对上盖建筑减振降噪效果试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(21): 284-291.
- WANG Y G, LIU P H, LI T, et al. Tests for effect of track vibration reduction measures in a depot on vibration and noise reduction of a superstructure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(21): 284-291. (in Chinese)
- [13] 汤旭, 焦映厚, 于东. 高铁高架车站候车环境噪声的数值预测[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(6): 129-133.
- TANG X, JIAO Y H, YU D. Numerical prediction of interior noise of waiting hall of high-speed railway station [J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(6): 129-133. (in Chinese)
- [14] LANGLEY R S, BREMNER P. A hybrid method for the vibration analysis of complex structural-acoustic systems [J]. Acoustical Society of America Journal, 1999, 105(3): 1657-1671.
- [15] SHORTER P J, LANGLEY R S. Vibro-acoustic analysis of complex systems [J]. Journal of Sound Vibration, 2005, 288(3): 669-699.
- [16] SHORTER P J, LANGLEY R S. On the reciprocity relationship between direct field radiation and diffuse reverberant loading [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 117(1): 85-95.
- [17] COTONI V, SHORTER P, LANGLEY R. Numerical and experimental validation of a hybrid finite element-statistical energy analysis method [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 122(1): 259-270.
- [18] LANGLEY R, SHORTER P, COTONI. A hybrid FE-SEA method for the analysis of complex vibro-

- acoustic systems [C]//Proceedings of the International Congress on Noise and Vibration Emerging Methods, 2005: 85-95.
- [19] LUO W J, CHENG L, TONG L H, et al. Prediction and analysis of structural noise from a U-beam using the FE-SEA hybrid method [J]. PROMET-Traffic & Transportation, 2018, 30(3): 333-342.
- [20] 张瑾, 马兴瑞, 韩增尧, 等. 中频力学环境预示的FE-SEA混合方法研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(2): 206-214.
- ZHANG J, MA X R, HAN Z Y, et al. FE-SEA hybrid method for the mid-frequency dynamic prediction [J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(2): 206-214. (in Chinese)
- [21] 罗文俊, 蒋峻楠, 雷晓燕, 等. 基于FE-SEA混合法的车内结构噪声预测分析[J]. 铁道学报, 2017, 39(12): 137-145.
- LUO W J, JIANG J N, LEI X Y, et al. Prediction analysis of internal structure noise of train based on FE-SEA hybrid method [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(12): 137-145. (in Chinese)
- [22] 马蒙, 李明航, 谭新宇, 等. 地铁轮轨耦合不平顺激励对轨道振动影响分析[J]. 工程力学, 2021, 38(5): 191-198.
- MA M, LI M H, TAN X Y, et al. Influence analysis on track vibration due to coupled irregularity excitation of metro wheel-track [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38 (5): 191-198. (in Chinese)
- [23] 刘林芽, 卢沛君, 秦佳良. 基于扣件FVMP模型的车轨耦合随机振动分析[J]. 铁道学报, 2019, 41(5): 93-100.
- LIU L Y, LU P J, QIN J L. Random vibration analysis of vehicle-track coupling system based on fastener FVMP model [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(5): 93-100. (in Chinese)
- [24] THOMPSON D J, JONES C, GAUTIER P E. Railway noise and vibration: Mechanisms, modelling and means of control [M]. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [25] 冯青松, 江煊, 成功, 等. 库内线不同减振扣件刚度组合对双层车辆段上盖建筑振动噪声影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(9): 3320-3330.
- FENG Q S, JIANG X, CHENG G, et al. Influence of different stiffness combinations of damping fasteners on vibration and noise of upper building of double-deck depot excited by garage inner track [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(9): 3320-3330. (in Chinese)
- [26] 住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准: GB/T 50355—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. Standard for limits and measurement methods of vibration in the room of residential building: GB/T 50355—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [27] 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准: JGJ/T 170—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. Standard for limit and measuring method of building vibration and secondary noise caused by urban rail transit: JGJ/T 170—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [28] 谢伟平, 王政印, 孙亮明. 地铁车辆段新型隔振支座的减振效果研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10): 63-70, 93.
- XIE W P, WANG Z Y, SUN L M. Vibration reduction effect of a new isolation bearing for a metro depot [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(10): 63-70, 93. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)