

# 地铁列车在隧道运行时引起的环境振动影响分析

贾晓宏<sup>1,2</sup>, 石广田<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学 机电工程学院, 兰州 730070; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

**摘要:** 为了研究运用浮置板轨道结构后列车在隧道中运行时对浮置板、基底、隧道壁、地面以及上部建筑的振动响应变化,建立了车辆-钢弹簧浮置板轨道-土体-建筑物耦合振动模型,计算分析了车辆运行在不同轨道结构和不同车速下,引起浮置板、隧道壁、地面和建筑物振动加速度特性与振级特性。当采用钢弹簧浮置板轨道结构时,车辆引起隧道正上方地面和楼层的Z振级最大值均小于70 dB,能够满足环评标准;当隧道埋深大于11 m时,地面正上方和楼层Z振级均未超过70 dB,满足环评居民、文教区要求。对比整体道床和钢弹簧浮置板轨道结构的楼层振动加速度Z振级可知,钢弹簧浮置板结构减振效果优于整体道床。该研究方法可对未来其他轨道交通线路减振降噪轨道设计甚至其他城市的轨道交通沿线敏感点减振降噪提供重要参考。

**关键词:** 城市轨道交通;隧道;减振;环境振动;振级

**中图分类号:** U237;TB533+.2

**文献标志码:** A

## Analysis of Environmental Vibration Impact Induced by Metro Train Running in Tunnels

JIA Xiaohong<sup>1,2</sup>, SHI Guangtian<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

**Abstract:** In order to study the changes in the vibration response of the train to the floating slab, the base, the tunnel wall, the ground and the superstructure when the floating slab track structure is used in the tunnel. The coupling vibration model of vehicle-steel spring floating plate track-soil-building was established, and the vibration acceleration characteristics and vibration level characteristics of the floating plate, tunnel wall, ground and building caused by the vehicle running under different track structures and different vehicle speeds were calculated and analyzed. When the steel spring floating plate track structure is adopted, the maximum Z vibration level of the ground and floor directly above the tunnel caused by the vehicle is less than 70 dB, which can meet the EIA standard. When the buried depth of the tunnel is greater than 11 meters, the vibration level directly above the ground and the floor does not exceed 70 dB, which meets the requirements of the EIA residents and the cultural and educational district. Comparing the floor vibration acceleration Z level of the integral track bed and the steel spring floating plate track structure, it can be seen that the vibration damping effect of the steel spring floating plate structure is better than that of the overall track bed. The research method proposed in this paper can provide an important reference for the future design of vibration and noise reduction tracks of other rail transit lines and even the vibration and noise reduction of sensitive points along rail transit lines in other cities.

收稿日期: 2024-06-04

修回日期: 2024-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(52162047)

第一作者: 贾晓宏(1985-), 男, 甘肃天水人, 高级工程师, 主要研究方向为车辆-线路系统动力学、轨道交通车辆段工艺设计。E-mail: 603062370@qq.com

通讯作者: 石广田(1962-), 男, 甘肃天水人, 教授, 主要研究方向为轨道交通系统动力学研究。E-mail: shigt@mail.lzjtu.cn

**Key words:** urban rail transit; tunnel; vibration damping; environmental vibration; vibration level

城市轨道交通的快速发展给城市居民出行带来了便利的同时,其列车在隧道运行过程引起的环境振动与噪声问题也不容小觑。这种环境振动问题给地铁沿线居民的出行安全和身心健康造成了一定的影响,严重干扰了人们的正常生产生活,同时对线路附近敏感区如科研院所、精密仪器设备使用单位以及重要的古建筑等的影响也亟待采取一定措施来控制。如今列车在隧道中运行引起的环境振动在许多城市已经严重影响新线路的规划选线。学者们也提出了许多减振措施,如钢弹簧浮置板轨道、梯形轨枕轨道、减振垫轨道、弹簧扣件、压缩型扣件等。本文重点对钢弹簧浮置板结构的减振效果展开研究,国内外对轨道振动研究的常用方法主要有理论分析和数值模拟。文献[1-10]通过建立地铁-弹簧浮置板轨道-下部基础的有限元模型,来研究地铁车辆在浮置板轨道结构下引起的振动响应。孙晓静等<sup>[11]</sup>首先建立车辆-轨道耦合系统动力学模型,然后在 ANSYS 中对系统进行了模态分析和谐响应分析,从而得到耦合系统的固有频率和振型,最后根据振动理论推导出地基反力和力传递率幅频特性曲线。以 Sperling 指标为依据,对乘车舒适度进行了评价分析。谷爱军等<sup>[12]</sup>为了研究不同设计参数和激振频率下浮置板钢弹簧轨道结构的动力传递特性和隔振效率,建立了有限元模型。郭亚娟等<sup>[13]</sup>结合 ANSYS 有限元模型和 Newmark 时间积分方法来仿真列车载荷作用下的浮置板轨道的响应。王俊杰<sup>[14]</sup>以成都地铁 1 号线为基础,运用 ABAQUS 和 ADAMS 分析浮置板轨道结构的模态和隔振效率,以及环境振动的传递效率。张晓芸等<sup>[15]</sup>通过建立车辆-钢弹簧浮置板轨道-箱梁桥三者相互耦合的动力学模型和浮置板声学边界元模型,对钢弹簧浮置板结构下的振动噪声传递规律展开了研究。蒋崇达<sup>[16]</sup>通过在 SIMPACK 中建立车辆 MBS 模型,从时域的角度分析振动在钢弹簧浮置板轨道结构中的传递过程,从而确定其隔振效果。张龙庆<sup>[17]</sup>建立了附加动力吸振器前后的浮置板轨道有限元模型,依据浮置板轨道结构的设计原理,分析了不同质量比下浮置板的固有模态,从而得到最优的设计参数和附加位置。

本文基于前人研究的基础,建立了地铁列车-钢弹簧浮置板轨道-隧道-土体-建筑物耦合系统有限元模型,充分地考虑了车辆结构、轨道结构和隧道结构

对地面和建筑物振动的影响,分析了列车通过设有浮置板轨道结构的隧道时引起隧道壁、地面及地面建筑物的振动响应,本文研究可为城市轨道交通减振降噪设计提供一定的理论参考。

## 1 地铁列车-浮置板轨道-隧道-土体-建筑物耦合系统有限元模型

### 1.1 模型建立

为研究地铁车辆引起振动在轨道板、隧道、土层及建筑物间的传递规律和不同轨道结构的减振效果,建立了地铁列车-轨道-隧道-土层-建筑物耦合振动分析模型。

在车辆-轨道-隧道-土层-建筑物耦合系统动力学模型中,车辆被抽象为一个多刚体系统,车辆的不同部分(如车轮、车体、悬挂系统等)被视为多个相互连接的刚体。钢轨作为轨道的主要组成部分,其模拟方式采用了连续离散点支承的 Euler 梁模型。轨下基础的建模则根据具体的轨道结构形式进行调整。不同的轨道结构,如混凝土轨枕、碎石道床等,有不同的支撑特性和动力响应。

采用 Hertz 非线性弹性接触理论确定轮轨间的垂向作用力  $P(t)$ , 即有:

$$P(t) = \{[Z_{w_j}(t) - Z_r(x_{w_j}, t) - Z_0(t)]/G\}^{3/2} \quad (1)$$

式中: $G$ 为轮轨接触常数,对于磨损型踏面  $G = 3.86 R^{-0.115} \times 10^{-8}$ ,  $R$ 为车轮半径; $Z_{w_j}(t)$ 为  $t$ 时刻第  $j$  位车轮位移; $Z_r(x_{w_j}, t)$ 为  $t$ 时刻第  $j$  位车轮  $x_{w_j}$  处钢轨位移; $Z_0(t)$ 为轨道随机不平顺。

车辆-轨道-隧道-土层-建筑物耦合系统动力学方法,将该系统分为两个子系统,即车辆-轨道子系统和隧道-土层-建筑物子系统,通过扣件力实现二者的联系和交互计算<sup>[18]</sup>。其中车辆-浮置板轨道耦合动力学模型如图 1 所示。

钢弹簧浮置板建模中,钢轨采用 60 轨实体单元模拟,两端简支约束;轨道板为正六面体结构;支撑层两端施加对称约束;扣件和钢弹簧隔振器采用弹簧-阻尼单元模拟。钢弹簧隔振器和扣件间距按照实际要求布置,扣件间距为 0.6 m;钢弹簧隔振器主要以 1.2 m 为主,钢弹簧浮置板轨道结构示意图如图 2 所示。

隧道-土层-建筑物子系统采用三维有限元方法建模,如图 3 所示。首先参考某地铁线路地勘资料,

建立隧道土层有限元模型,土层厚度、宽度、长度分别为40、40、80 m,包括素填土、黄土状土、卵石土以及砂岩四层。然后建立隧道上方建筑物模型,建筑物高6层(每层3 m),地下桩基长10 m,与卵石层接触。

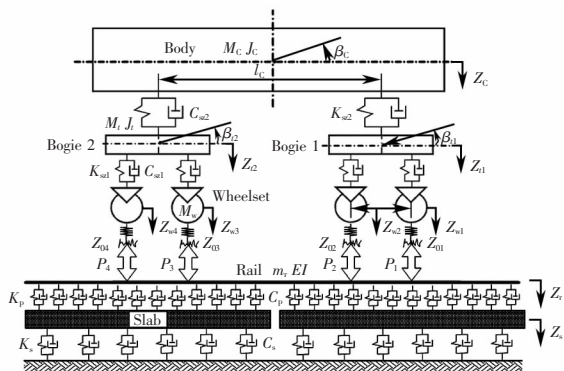


图1 车辆-浮置板轨道耦合动力学模型

Fig. 1 Vehicle-floating plate track coupling dynamics model

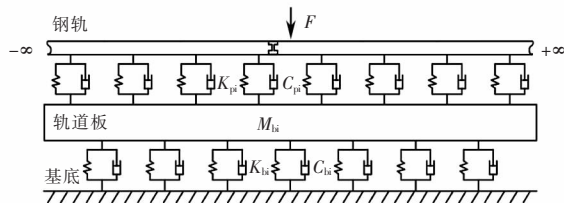


图2 钢弹簧浮置板轨道结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the track structure of the steel spring floating plate

合动力学软件<sup>[19]</sup> VICT 中计算出扣件支座反力,然后把这组反力施加在 ANSYS 中建立的有限元模型中,分析列车荷载引起的地面环境振动的特性<sup>[20-23]</sup>。在 VICT 软件中计算垂向轮轨力时,地铁车辆采用8节编组的A型车,A型车的参数如表1所列,其中车体质量、构架质量等参数均基于某型地铁车辆的实际数据。钢弹簧浮置板轨道结构的计算参数如表2所列,其中扣件刚度、阻尼、间距等轨道关键参数均基于某地地铁线路实际参数。根据某黄土地区轨道交通工程沿线地质勘测资料,选取建立模型所需土层的物理性质等参数如表3所列。

表1 地铁A型车辆参数

Tab. 1 Parameters of metro A vehicles

车辆参数	参数值
车体质量/kg	50 878
构架质量/kg	2 721
轮对质量/kg	1 900
车体惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	2.446×10 <sup>6</sup>
构架惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	3 605
一系悬挂刚度/(N/m)	2.14×10 <sup>6</sup>
二系悬挂刚度/(N/m)	2.5×10 <sup>6</sup>
一系悬挂阻尼/(N·s/m)	4.9×10 <sup>4</sup>
二系悬挂阻尼/(N·s/m)	1.96×10 <sup>5</sup>
车辆定距之半/m	7.85
固定轴距之半/m	1.25
车轮半径/m	0.42
轴重/kg	16 000

表2 轨道模型计算参数

Tab. 2 Calculated parameters of the orbital model

参数	取值
钢轨的弹性模量/(N·m <sup>-2</sup> )	2.059×10 <sup>11</sup>
钢轨的截面惯性矩/m <sup>4</sup>	3.217×10 <sup>-6</sup>
扣件刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	4.0×10 <sup>7</sup>
扣件阻尼/(N/(m·s <sup>-1</sup> ))	7.5×10 <sup>4</sup>
扣件间距/(m)	0.625
减振垫刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	6.6×10 <sup>7</sup>
减振垫阻尼/(N/(m·s <sup>-1</sup> ))	10×10 <sup>4</sup>
浮置板的长×宽×厚/m	25×3.25×0.35
浮置板的弹性模量/(N·m <sup>-2</sup> )	3.5×10 <sup>10</sup>
浮置板密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 500

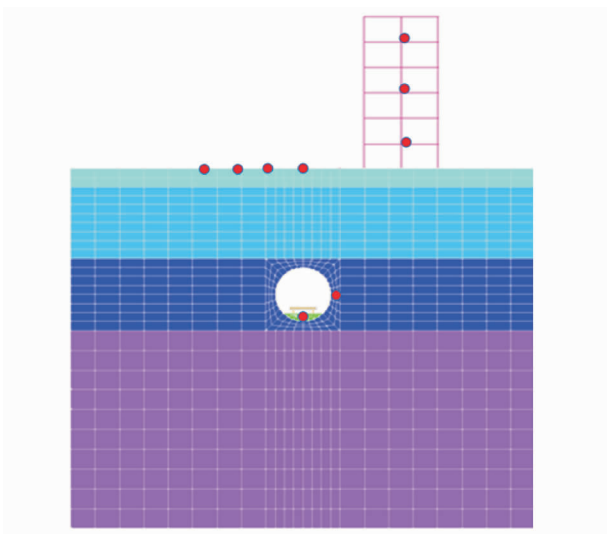


图3 浮置板轨道-隧道-土体-建筑物耦合模型(图中红的圆点为拾振点)

Fig. 3 Floating plate rail-tunnel-soil-buildings coupling model

鉴于模型的计算效率问题,首先在车辆-轨道耦

### 1.2 模型验证分析

根据本文建立的仿真模型,选取类似工程场地的环境振动的测试结果,将现场实测的车致环境振动的Z振级最大值<sup>[24-25]</sup>与本模型中计算结果进行了对比如图4所示。

表 3 土层模型计算参数

Tab. 3 Calculated parameters of soil model

土层名称	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	厚度 /m
素填土	30	0.39	1.42	2
黄土状土	40	0.29	1.57	8
卵石	60	0.23	2.33	8
强风化砂岩	300	0.22	2.03	22

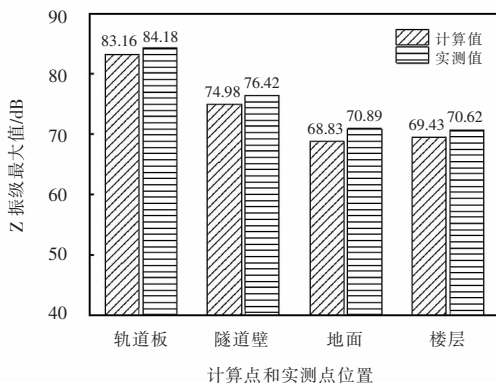


图 4 计算值与实测值的 Z 振级最大值对比

Fig. 4 Comparison of maximum values of Z vibration level between calculated and measured values

从图 3 可知,仿真得到的浮置板、隧道壁、地面和楼层的振动响应变化趋势与实测值的变化趋势一致。且各点计算值与实测值相比差值都小于 2 dB,从而验证了本文建立模型的准确性。地面和楼层的实测结果略微大于计算结果的原因初步推测是由于现场测试是在白天进行,周围环境干扰对实验测试有一定的影响。由于本文所建立模型中土层等参数是以某工程地勘资料为基础,因此存在一定的局限性,但模型建立的方法具有普适性。

## 2 系统环境振动分析

### 2.1 车致环境振动特性分析

为了探明列车运行引起的轨道板、隧道壁、地面和建筑物的振动水平,提取出浮置板板顶、隧道壁、地面和楼层的垂向加速度结果进行对比分析,如图 5 所示。

从图 5 可知,同一观察点断面浮置板到隧道壁的衰减远大于隧道壁到地面的衰减,这说明了浮置板轨道的减振作用主要体现在轨道结构;隧道正上方地面和楼层的垂向加速度大小基本相等,这与文献[8]中得出的结论是一致的。

### 2.2 不同轨道结构条件下振动特性分析

为分析轨道结构类型变化对隧道内及地面环境

的影响规律,取整体道床和钢弹簧浮置板轨道两种情况进行动力计算。其中,整体道床结构与钢弹簧浮置板轨道区别为整体道床将轨道板直接置于基底,二者之间没有钢弹簧的连接。计算荷载为 8 节地铁 A 型列车,计算步长为 0.005 s。为保证计算结果可比性,计算结果均处于同一断面。

为了说明浮置板轨道的减振效果,图 6 和图 7 给出了不同整体道床与浮置板轨道结构引起的轨道、隧道、地面和建筑物结构振动的波形图与频谱图。

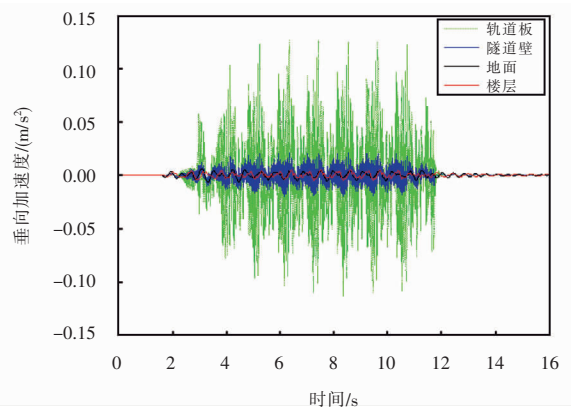


图 5 不同计算点的垂向加速度

Fig. 5 Vertical acceleration at different calculation points

由图 6 可知,在列车通过时,轨道、隧道、地面和建筑物的振动波形具有如下特性:轨道结构类型变化时,整体道床、钢弹簧浮置板的轨道板的振动加速度分别为  $0.1 \text{ m/s}^2$  和  $1.1 \text{ m/s}^2$ ,隧道壁振动加速度分别为  $0.025 \text{ m/s}^2$ 、 $0.015 \text{ m/s}^2$ ;地面 5 m 处整体道床和钢弹簧浮置板的加速度幅值约为  $0.015 \text{ m/s}^2$  和  $0.005 \text{ m/s}^2$ ,楼层二层处整体道床和钢弹簧浮置板的加速度幅值约为  $0.015 \text{ m/s}^2$  和  $0.007 \text{ m/s}^2$ ,可见钢弹簧浮置板相对于整体道床减振作用良好。

由图 7(a)可知,钢弹簧浮置板轨道板的振动加速度三分之一倍频 dB 值明显大于整体道床,其值约为 20 dB;从图 6(b)可知,在 4~16 Hz,钢弹簧浮置板三分之一倍频 dB 值大于整体道床,16~80 Hz 频段钢弹簧浮置板轨道具有较好的减振效果。钢弹簧浮置板轨道减振效果的主要集中于第一阶固有频率的 1.414 倍以上频段。由图 6(c)和 6(d)中地面及楼层振动对比可知,16 Hz 以上频段,钢弹簧浮置板轨道表现较好的减振效果。

图 8 给出了地面不同地点振动的 Z 振级最大值对比图,图 9 给出了不同楼层 Z 振级最大值对比图。

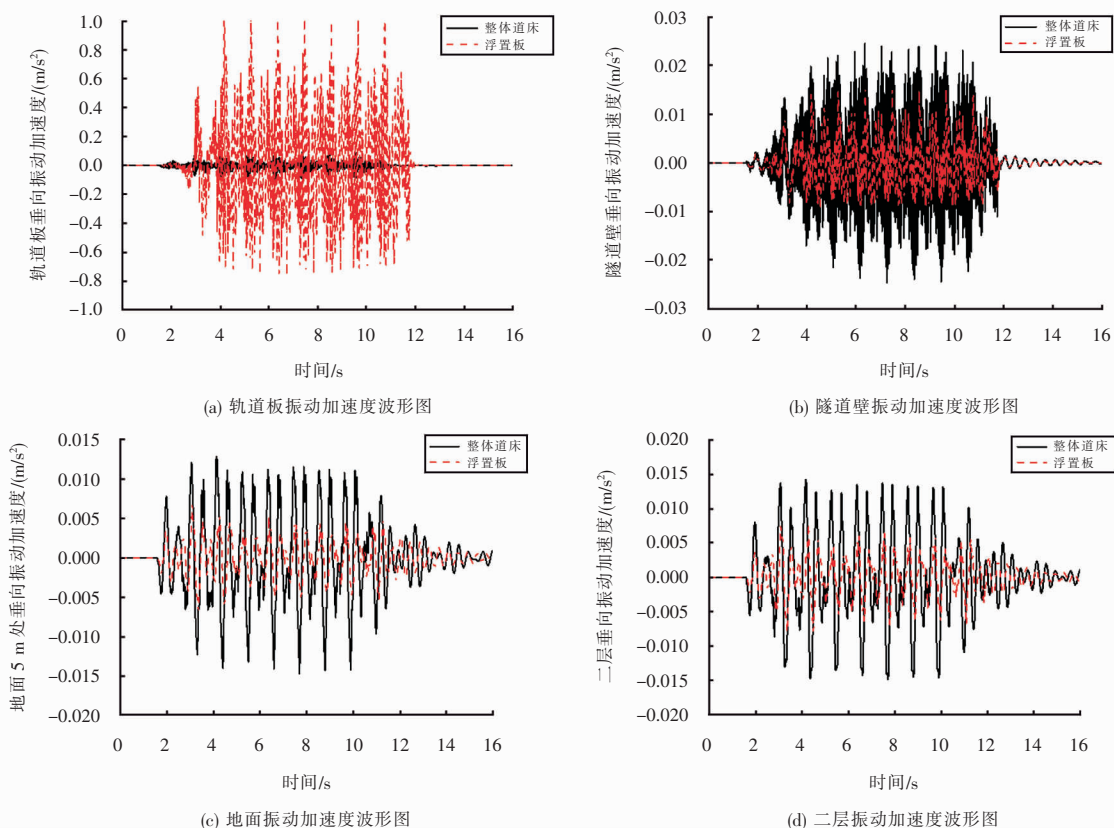


图 6 轨道、隧道、地面和建筑物振动波形对比

Fig. 6 Vibration waveforms comparison of tracks, tunnels, floors and buildings

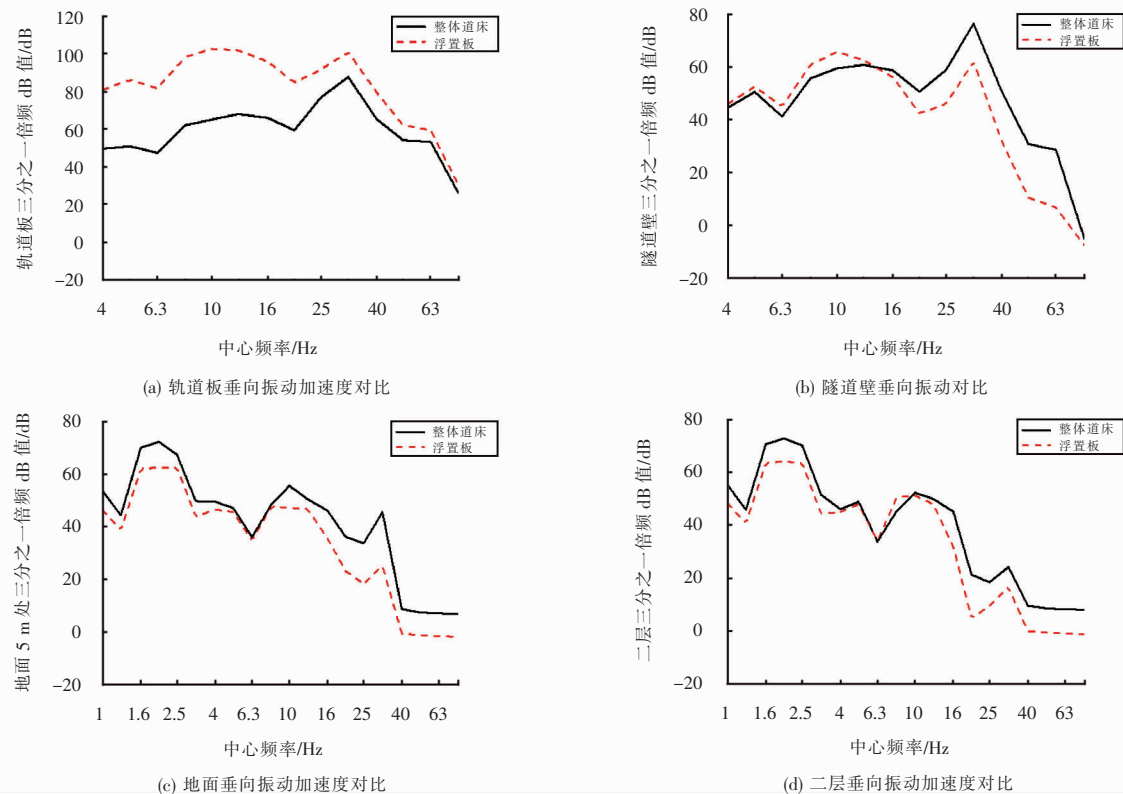


图 7 轨道、隧道、地面和建筑物振动对比

Fig. 7 Vibration comparison of track, tunnel, ground and building

由图 8 可知,当采用整体道床轨道结构时,地面正上方 0 m、5 m、10 m、20 m 处 VLZ 振级分别为 76.66、75.47、74.56、73.71 dB,均超过 70 dB,不符合环评居民、文教区要求;当采用钢弹簧浮置板时,地面正上方 0 m、5 m、10 m、20 m 处 VLZ 振级分别为 69.78 dB、68.71 dB、67.95 dB、63.24 dB;均未超过 70 dB,符合环评居民、文教区要求;可见钢弹簧浮置板相比于整体道床,可以减少地面振动 6~10 dB。

由图 9 可知,楼层对振动的衰减作用较弱,当采用整体道床轨道结构时,楼层 2、4、6 层处 VLZ 振级约为 76.68 dB,当采用整体道床轨道结构时,楼层 2、4、6 层处 VLZ 振级约为 69.9 dB;可见钢弹簧浮置板相比于整体道床,可以减少楼层振动约 6~8 dB。

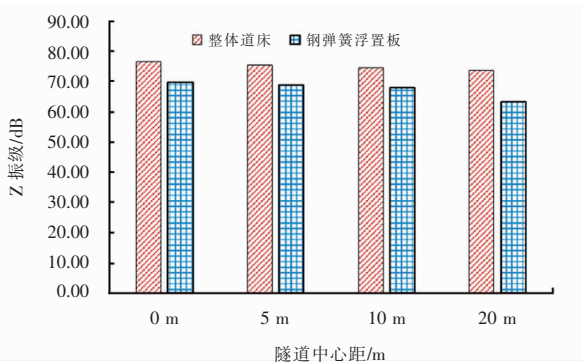


图 8 不同轨道结构类型下地面 Z 振级统计图

Fig. 8 Statistics of ground Z vibration level under different track structure types

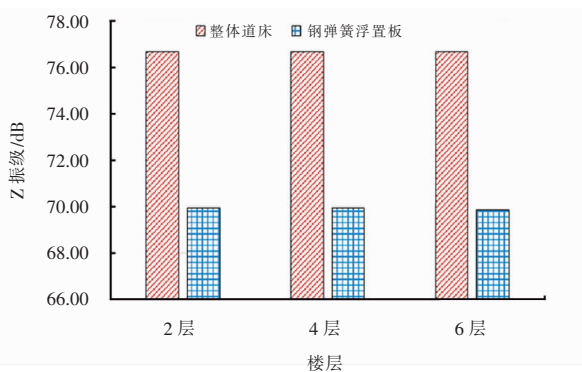


图 9 不同轨道结构类型下楼层 Z 振级统计图

Fig. 9 Statistics of floor Z vibration level for different track structure types

### 2.3 隧道埋深变化时结构振动加速度分析

为分析地铁隧道埋深变化对地面及上部建筑物振动的影响规律,假设轨道结构为钢弹簧浮置板结构,取隧道埋深 11 m、19 m、27 m 三种情况进行动力计算。其中,当隧道埋深 11 m 时,隧道整体处于黄土状土层;当隧道埋深为 19 m、27 m 时,隧道整体处于卵石土层。

由图 11 可知,当隧道埋深为 11 m 时,地面正上方 0 m、5 m、10 m、20 m 处 Z 振级分别为 69.78 dB、68.71 dB、67.95 dB、63.24 dB;当隧道埋深为 19 m 时,地面正上方 0 m、5 m、10 m、20 m 处 Z 振级分别为 63.08 dB、61.74 dB、60.67 dB、52.59 dB;当隧道埋深为 27 m 时,地面正上方 0 m、5 m、10 m、20 m 处 Z 振级分别为 54.98 dB、52.45 dB、50.86 dB、46.61 dB;均小于限值 70 dB,符合环评标准<sup>[12]</sup>的要求。由图 12 可以看出,隧道埋深对于楼层及地面振动的的影响较大。

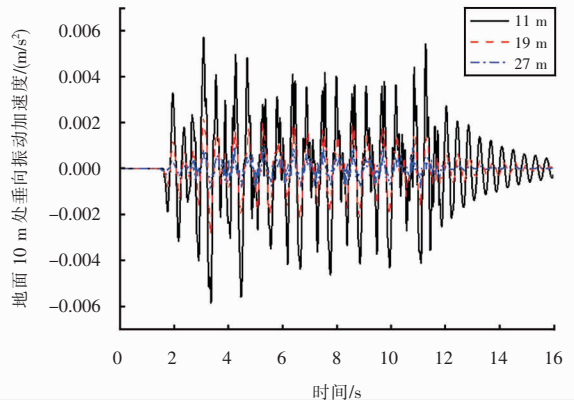


图 10 地面 10 m 处垂直向振动加速度波形图

Fig. 10 Waveform of vertical vibration acceleration at 10 m above ground level

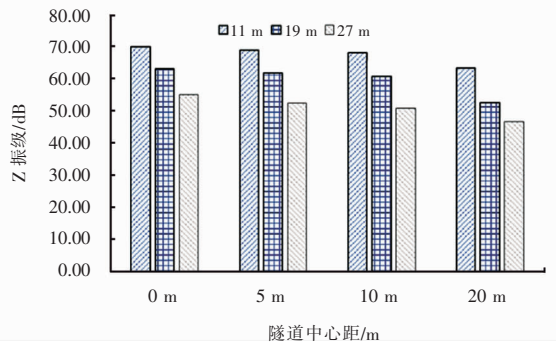


图 11 不同隧道埋深下地面 Z 振级统计图

Fig. 11 Statistics of ground Z vibration level at different tunnel depths

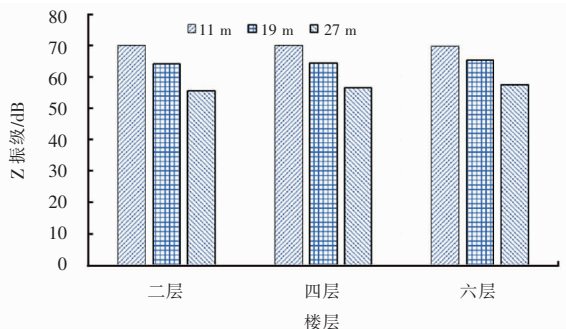


图 12 不同隧道埋深条件下楼层 Z 振级统计图

Fig. 12 Statistics of Z vibration level of floors under different tunnel depth conditions

### 3 结论

针对地铁列车引起的环境振动问题,本文建立了地铁列车-轨道-隧道-土层-建筑物耦合振动分析模型,研究分析了轨道结构类型、隧道埋深和避让距离等对车致环境振动的影响规律,在本文所建立仿真模型参数下可得到如下结论:

1) 首先建立了轨道-隧道-土体-建筑物耦合模型,并通过实验数据对模型的准确性进行了验证。该预测模型可为后续的研究提供大量的数据支撑。

2) 列车运营引起的振动在传递途径中,轨道板到隧道壁的降低量远大于隧道壁到地面的降低量,楼层和地面的垂向振动加速度水平基本相当。

3) 对比分了不同轨道结构条件下轨道板、隧道壁、地面的振动特性,研究结果表明钢弹簧浮置板结构减振效果优于整体道床。钢弹簧浮置板轨道减振效果的主要集中于第一阶固有频率的 1.414 倍以上频段。

4) 对比整体道床和钢弹簧浮置板轨道结构的楼层振动加速度 Z 振级可知,使用钢弹簧浮置板相比于整体道床,可以减少楼层振动约 8 dB。

本文仅研究了在特定地质条件下车辆运行在直线区段引起环境振动的特征,研究结论具有一定的局限性。但该方法对未来其他轨道交通线路减振降噪轨道设计甚至其他城市的轨道交通沿线敏感点减振降噪提供重要参考。

#### 参考文献:

[1] 于鹏,蔡向辉,蔡小培,等.不同减振垫刚度下板式轨道减振特性研究[J].铁道标准设计,2017,64(4):1-5.

[2] 边学成,陈云敏.列车荷载作用下轨道和地基的动响应分析[J].力学学报,2005,37(4):439-445.

[3] 王友会,刘彦琦,宋春芳,等.含有磁流变阻尼器的准零刚度浮置板轨道系统隔振性能分析[J].固体力学学报,2023,44(5):687-698.

[4] 张群,程志宝,石志飞.惯性增强动力吸振器-浮置板轨道低频减振性能研究[J].铁道学报,2024,46(8):102-111.

[5] 李明航,王文斌,吴宗臻,等.轮轨激励对橡胶垫浮置板轨道减振效果的影响[J].中国铁道科学,2024,45(2):30-40.

[6] 刘文武,赵才友,贺利工,等.预制式浮置板轨道隔振器/剪力铰设计参数优化研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(11):4497-4506.

[7] 汪杰.地铁钢弹簧浮置板轨道结构振动传递特性分析

[J].四川建筑,2023,43(5):101-103.

[8] 杨舟,冯青松,成功,等.基于振幅放大机制的浮置板轨道低频轻质减振[J].土木工程学报,2024,57(5):117-132.

[9] 王宁.地铁浮置板轨道结构动态响应研究及参数影响分析[D].秦皇岛:燕山大学,2023.

[10] 刘花,李斌,窦晓峥.CRTSⅢ型板式无砟轨道振动特性和减振效果研究[J].兰州交通大学学报,2024,43(6):138-143.

[11] 孙晓静,李术才,张敦福,等.车辆-钢轨-钢弹簧浮置板道床耦合系统振动特性分析[J].山东大学学报(工学版),2011(3):126-130.

[12] 谷爱军,张宏亮.钢弹簧浮置板轨道结构在不同频段隔振效率[J].噪声与振动控制,2009,29(1):39-42.

[13] 郭亚娟,杨绍普,郭文武.钢弹簧浮置板轨道结构的动力特性分析[J].振动、测试与诊断,2006,26(2):146-150.

[14] 王俊杰.钢弹簧浮置板轨道动力特性研究[D].成都:西南交通大学,2011.

[15] 张晓芸,张小安,石广田,等.箱梁桥顶板对钢弹簧浮置板声辐射的影响[J].噪声与振动控制,2020,40(1):180-185.

[16] 蒋崇达.内置式钢弹簧浮置板轨道动力特性分析[D].上海:华东交通大学,2014.

[17] 张龙庆.基于动力吸振器的浮置板轨道低频振动控制研究[D].成都:西南交通大学,2016.

[18] 杨力,张小安,张晓芸,等.声学边界对轨道交通桥上浮置板振动声辐射预测的影响研究[J].兰州交通大学学报,2023,42(6):75-80,90.

[19] 翟婉明.车辆-轨道耦合动力学[M].4版.北京:科学出版社,2015.

[20] 宫寅.城市轨道交通盾构隧道内3种典型减振轨道性能比较[J].铁道勘察,2023,49(2):131-136.

[21] 黄瑞堂.城市轨道交通不同减振轨道结构振动测试与分析[J].噪声与振动控制,2023,43(3):232-237.

[22] 王梦林,陈宪麦.聚氨酯减振浮置板轨道结构减振参数研究[J].铁道建筑,2022,62(10):51-54.

[23] 张劲明.波磨激励下地铁车辆与浮置板轨道耦合动力学研究[D].北京:北京建筑大学,2022.

[24] 和振兴.板式无砟轨道交通引起的环境振动研究[D].成都:西南交通大学,2008.

[25] 中华人民共和国环保部.城市区域环境噪声标准:GB 3096-1993[S].北京:中国标准出版社,1994.

(责任编辑:赵冬艳)