

地铁车辆段上盖结构振动特性分析

王玉龙

中国矿业大学, 江苏 徐州
Email: 182607265222@163.com

收稿日期: 2021年4月12日; 录用日期: 2021年4月27日; 发布日期: 2021年5月12日

摘要

针对地铁车辆段上部结构存在的振动舒适度超标问题, 本文以某地铁车辆段及上部结构工程为背景, 在考虑土体对振动传播影响的基础上建立有限元模型, 分析不同列车运行方向作用下, 上部结构的传播规律, 研究表明: 车辆段上部结构在列车荷载作用下引起的振动以竖向振动为主; 列车沿上部结构刚度最大方向运行时引起的振动效应最小; 上盖结构竖向振动强度在垂直方向上随着楼层的升高主要呈现先减小后增大的规律, 在水平方向上随着距离轨道中心线距离的增加而呈现衰减的趋势。

关键词

地铁车辆段, 上盖结构, 振动舒适度, 振动传播规律

Analysis on Vibration Characteristics of Metro Depot Cover Structure

Yulong Wang

China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu
Email: 182607265222@163.com

Received: Apr. 12th, 2021; accepted: Apr. 27th, 2021; published: May 12th, 2021

Abstract

In view of the problem that the vibration comfort of the superstructure of Metro Depot exceeds the standard, this paper takes a Metro Depot and superstructure project as the background, establishes a finite element model based on considering the influence of soil on the vibration propagation, analyzes the propagation law of the superstructure under the action of different train running directions, and the research shows that: the vibration of the superstructure of Metro Depot under the action of train load The results show that the main dynamic mode is vertical vibration;

the vibration effect caused by the train running along the direction of the maximum stiffness of the upper structure is the smallest; the vertical vibration intensity of the upper cover structure decreases first and then increases with the rise of the floor in the vertical direction, and decreases with the increase of the distance from the track center line in the horizontal direction.

Keywords

Upper Cover Structure, Vibration Comfort, The Law of Vibration Propagation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济的高速发展和城市人口的不断增加,提高土地综合利用效率已成为城市发展的必然趋势。而地铁车辆段作为全线列车停放和检修的场所,具有占地面积大、可开发性强等优势,因此对其上部结构进行物业开发是提高城市土地利用率的有効途径。然而地铁列车运行时在车辆段上部结构中产生的振动舒适度问题成为制约其发展的关键。地铁列车行驶产生的振动与地震作用下产生的强振不同,它对结构的安全性不会产生影响,但会影响建筑物内居住者的生活质量。而且振动产生的二次噪声属于低频噪声,这种噪声会对人体产生慢性损伤,不仅影响人的听力,易使人烦躁、发怒,而且长期受其侵扰会造成失眠、神经衰弱等症状[1]。因此,真实准确地分析地铁车辆段上盖结构的振动特性和传播规律,对提高地铁车辆段上盖结构的适用性和城市土地综合利用效率等问题具有重要的实用价值。

目前,国内学者对轨道交通诱发的环境振动问题进行了一系列的研究。邬玉斌等研究了车辆段上建筑受地铁振动影响明显,楼板振动程度与自身固有频率有关,楼板自振频率应尽量避免地铁振动主频范围[2];谢伟平等提出了地铁车辆段上盖结构的精细化建模方法[3];伍永胜等通过对全框支剪力墙结构屈服机制的选择、控制楼层屈服的措施,以及框支框架、节点、转换层楼板等的设计,提出了一种全框支剪力墙结构体系[4]。综上所述,国内学者对地铁运行引起的振动问题开展了大量的研究,但多集中于地铁运行时对线路周围建筑物的振动影响规律研究,对地铁车辆段上部结构的研究较少,而且我国开发地铁上盖物业的时间较短,实际工程并不多[5]。

与地铁在隧道中运行不同,当列车进出车辆段时,上部结构位于其正上方,列车引发的振动经由道床、立柱、剪力墙及周围土体传播至平台上方结构,此时上盖建筑物振动特性表现与地铁在区间隧道内运行引起的建筑物振动特性完全不同[6]。因此本文以某地铁车辆段上部建筑物为研究对象,在以有研究的基础上,进一步考虑了土体对地铁运行振动传播的影响。利用 Midas 建立有限元模型,分析得到地铁车辆段上盖建筑物在列车运行作用下产生的振动响应规律。

2. 工程概况

某地铁车辆段主要由地铁功能建筑和商业开发建筑组成,总建筑面积达 97 万 m^2 ,本文选取该车辆段试车线正上方某栋建筑物作为研究对象,该建筑物地上部分长 52.8 m、宽 12.4 m、高 24 m,共 8 层,上部结构二层平面布置见图 2。地下部分 2 层,平台层层高 11 m,上部住宅底层 5.25 m,下部结构平面布置见图 1。列车型号为空载 B 型列车,6 辆编组。试车线区段列车车速可控,最大运行速度可达到 80 km/h,是理想的试验场地。

更加准确地模拟土体 - 结构相互作用, 对网格采用多尺度思想划分, 同时考虑到振动波在土体中会发生反射, 并未采用自由场边界[8]。以舒适度评价为指标的建模过程中, 楼板作为主要水平构件对结构的整体刚度, 和各向构件的内力影响较大, 因此建模时需要建立楼板的有限元模型, 并按照弹性板考虑。对于边界条件, 研究的车辆段 - 上部结构与周边邻近建筑在车辆段边界处采取伸缩缝连接, 地铁运行引起的振动属于弱振, 伸缩缝在弱振作用下不会发生破坏, 连接尚属完好, 对结构仍有较强的约束, 所以在大平台边界处采用固结的方式。对于结构柱底, 将其简化为固定支座。基于以上几个方面的假设建立了结构 - 土体三维有限元模型, 其结构单体与整体有限元模型如图 3、图 4 所示, 各层测点布置及房间标号图如图 5 所示。列车荷载选取 B 型空载车, 6 辆编组, 车轴数为 4, 轴重取 140 kN, 固定轴距为 2.2 m, 运行速度为 80 km/h [9]。

Table 1. Soil parameters

表 1. 土层参数

土层名称	模型类型	土层厚度(m)	弹性模量(MPa)	泊松比	容重(kN/m ³)
人工填土	3D 弹性实体	3.0	101.3	0.333	19
全新世砂土	3D 弹性实体	5.3	100.3	0.320	19
更新世黏土 1	3D 弹性实体	22.8	196.0	0.400	19
更新世黏土 2	3D 弹性实体	25.0	290.3	0.300	19
更新世砂土	3D 弹性实体	30.0	560.1	0.260	20

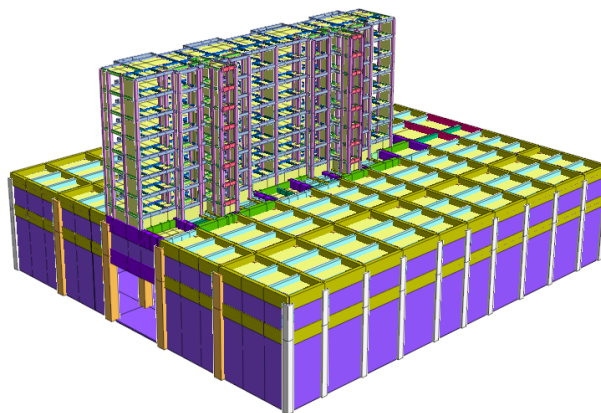


Figure 3. Finite element model of depot and superstructure

图 3. 车辆段与上部结构有限元模型

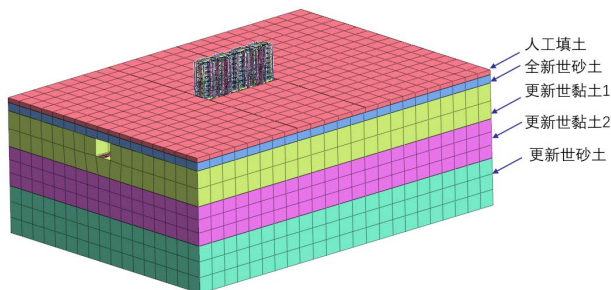


Figure 4. Structural soil finite element model

图 4. 结构 - 土体有限元模型

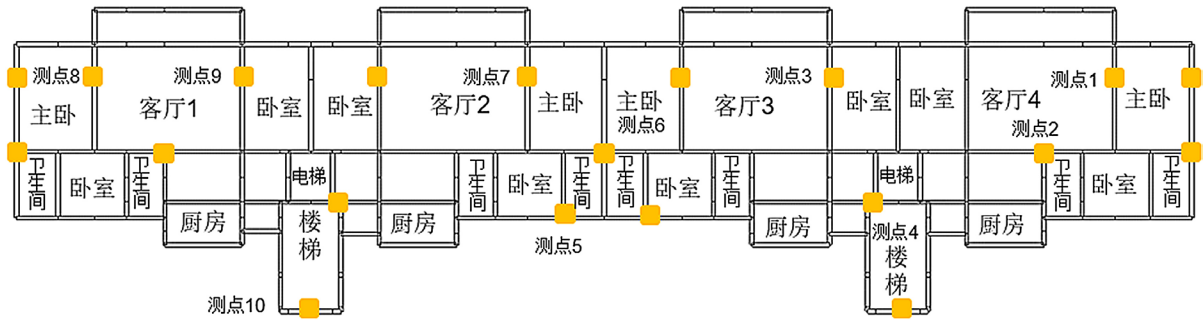


Figure 5. Layout of measuring points on each floor and room marking drawing
图 5. 各层测点布置及房间标号图

4. 上盖建筑物车致振动分析

表 2 为结构的特征值分析结果，由表 2 可知整体结构一阶振型为 Y 向平动，二阶振型为 X 向平动，三阶振型为 Z 轴转动，振型参与质量均在正常范围，且结构整体位移均较小，并未发生特殊破坏，判定结构安全。

Table 2. Eigenvalue analysis table
表 2. 特征值分析表

模态	频率(Hz)	周期(s)	振型参与质量(%)					
			TRAN-X	TRAN-Y	TRAN-Z	ROTN-X	ROTN-Y	ROTN-Z
1	1.5263	0.6552	0.0013	14.2133	0	0.0471	0.0086	0.0583
2	2.1289	0.4697	12.4207	0.0026	0	0.0145	0.3137	0.42
3	2.3132	0.4323	0.169	0.0125	0	0.0508	1.2048	5.1315
4	5.308	0.1884	0	33.6283	0	2.5063	0	0.0047
5	6.3581	0.1573	0	39.5692	0	0.0264	0	0.0242
6	6.9867	0.1431	0	0.8559	0	0.0181	0	0.001
7	7.0917	0.141	0	0	0	0	0.0104	0.0002
8	8.1506	0.1227	0.0001	0.0196	0	0.0166	0.0001	13.5678
9	8.585	0.1165	0	1.7987	0	0.1699	0	0.5125
10	8.8706	0.1127	0.0003	1.3718	0	0.2103	0.0001	2.1009

地铁列车运行所引起的环境振动的主频率一般在 30~50 Hz 之间，属于高频成分。因此在分析时采用直接积分法对结构 - 土体模型进行计算，该方法不仅能够考虑到高频成分的振动，而且具有较高的计算精度。由于各测点呈现的规律比较一致，所以只从计算结果中提取典型测点 7 处的竖向和水平向加速度时程曲线和频谱图。从图 6 可知，该测点竖向振动加速度幅值大于水平向幅值，竖向加速度最大值约为 0.0118 m/s²，水平向最大值约为 0.0017 m/s²；典型测点 7 处竖向振动特征频带范围为 10~100 Hz，最大峰值频率出现在 40 Hz 处。同时，利用特征值分析方法得到有限元模型的三向自振频率和振型云图。如图 7 所示，上盖建筑物竖向的自振频率明显大于横向和纵向的自振频率，且由于地铁运行产生的振动频率高频成分较多[10]，所以产生在竖向的加速度振动响应会更大。结合以上两点可知：地铁列车运行时引起的上盖建筑物振动以竖向振动为主，因此下文分析时以竖向振动加速度作为描述振动效应的主要指标。

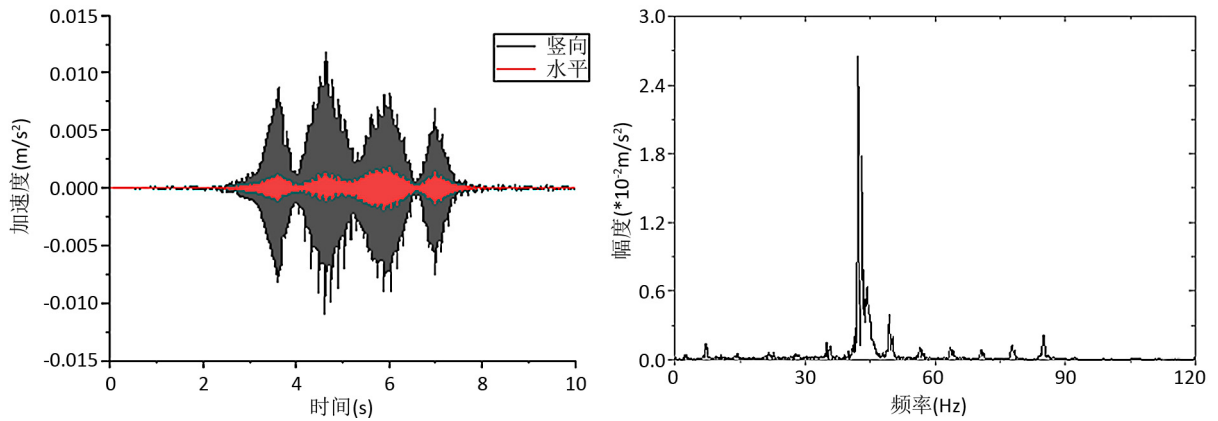


Figure 6. Vibration acceleration time history diagram and frequency spectrum diagram of measuring point 7
图 6. 测点 7 振动加速度时程图与频谱图

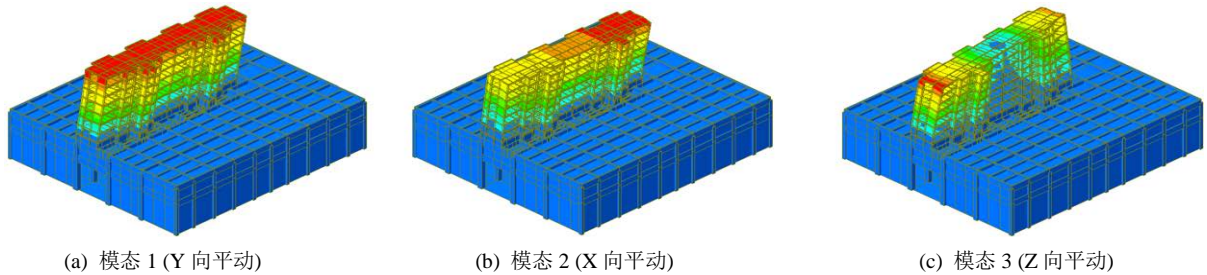


Figure 7. Modal nephogram of structural finite element model
图 7. 结构有限元模型振型云图

如图 8 所示，首先以地铁列车行驶方向作为分析的变量，列车分为纵向与横向两种方向穿越车辆段。设置动力分析步骤并选择国内 B 型列车运行时引起的振动作为激励荷载，由于第一层楼板厚度较其他层大，得到竖向振动加速度较小，所以不做考虑。分别选取结构地上部分第二、四、六、八层各测点进行分析，通过提取列车荷载作用下各测点的竖向振动加速度时程图和频谱图得到各层各测点的车致振动规律。各层各测点最大竖向振动加速度由下表所示，由表 3 与表 4 对比可知，列车横向穿过车辆段时引起的上部结构振动加速度峰值保持在 10^{-2} m/s^2 量级，远大于列车纵向穿过车辆段时 10^{-3} m/s^2 量级，原因主要在于上部结

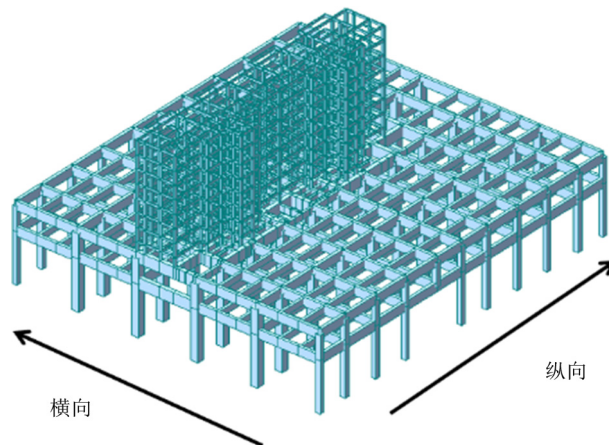


Figure 8. Schematic diagram of different train operation directions
图 8. 列车不同运行方向示意图

构纵向刚度较横向刚度大，所以在上盖结构设计时应考虑列车运行方向，以结构刚度较大方向沿着列车线建设为宜。基于此结论，后文主要针对列车纵向运行条件下对上部结构进行振动特性分析。

Table 3. Vibration acceleration of each measuring point caused by train longitudinal operation

表 3. 列车纵向运行引起的各测点振动加速度 $\times 10^{-3} \text{ m/s}^2$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
第二层	5.92	8.31	6.06	6.10	6.63	3.68	11.80	9.63	15.77	12.83
第四层	4.27	5.90	4.28	4.90	3.98	3.89	9.08	10.08	11.07	10.53
第六层	4.53	6.97	4.91	6.49	4.47	4.77	9.29	12.69	13.63	13.56
第八层	4.90	7.49	5.63	7.41	4.93	4.92	9.92	13.51	15.41	15.03

Table 4. Vibration acceleration of each measuring point caused by train lateral operation

表 4. 列车横向运行引起的各测点振动加速度 $\times 10^{-3} \text{ m/s}^2$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
第二层	19.69	10.88	7.45	4.86	1.99	12.82	9.62	14.36	138.78	5.65
第四层	30.87	6.39	8.03	4.27	4.07	12.59	8.74	16.49	58.02	5.85
第六层	37.64	12.57	8.51	7.06	6.44	21.45	15.35	32.01	59.79	11.81
第八层	41.88	26.85	20.46	19.50	9.65	44.94	13.07	9.49	11.64	10.28

列车沿纵向运行时引起的竖向振动加速度最大值出现在第二层的测点 9 位置处，提取该处竖向振动加速度时程曲线和频谱图。从图 9 可知，竖向振动加速度最大值为 0.0158 m/s^2 ，且该测点竖向振动特征频带范围为 $10\sim 90 \text{ Hz}$ ，最大峰值频率出现在 40 Hz 处。该测点不仅位于结构平面内开间最大的客厅 1 内，而且还处在地铁运行线路的正上方。因此地铁车辆段上部结构振动控制时应特别注意振动效应最大的区域，即列车运行线路上方开间最大的房间位置。

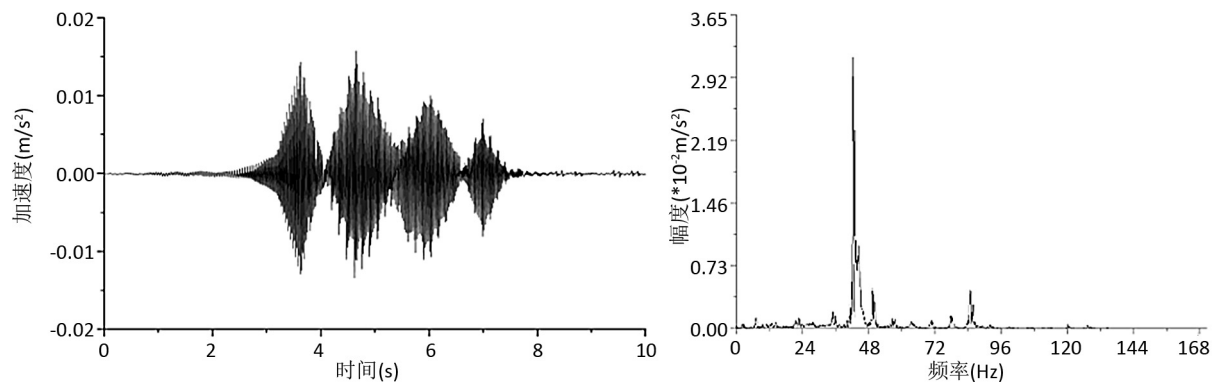


Figure 9. Time history diagram and frequency spectrum diagram of measuring point 9

图 9. 测点 9 时程图与频谱图

评价振动源和环境振动强度用的单位，各国有所不同，本文采用振动加速度级 L_a [11]来表示：

$$L_a = 20 \lg \frac{a_e}{a_0}。$$

其含义为振动加速度与基准加速度之比的以 10 为底的对数乘以 20，基准加速度 a_0 取 10^{-6} m/s^2 。提

取结构各测点位置的振动加速度级，如图 10 所示，车辆段上部结构振动强度随楼层上升呈现先衰减后上升的趋势，且振动加速度级均保持在 70~85 dB 范围内。第 2 层测点加速度级大多高于 8 层测点加速度级，所以结构在二层的振动效应是最明显的。地铁上盖结构多以商业金融、居民住宅为主要功能，按《机械工业环境保护设计规范》[11]属于 2 类振动环境功能区。如表 5 所示，竖向振级限值昼间为 75 dB，夜间为 70 dB，本文模型并未采取减振措施，大多数测点加速度级存在超限问题，因此地铁车上盖结构应采取适当减振措施来降低振动效应。另外，测点 7、8、9 均位于列车运行轨道的正上方，三个测点振动加速度最大值比其他测点要大 $5\sim 10 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ 的值，且随着各测点的水平距离离轨道运行线路越远，引起的竖向振动加速度越小，即地铁列车运行引起的结构振动强度随着距离轨道中心线距离的增加呈现衰减的趋势。

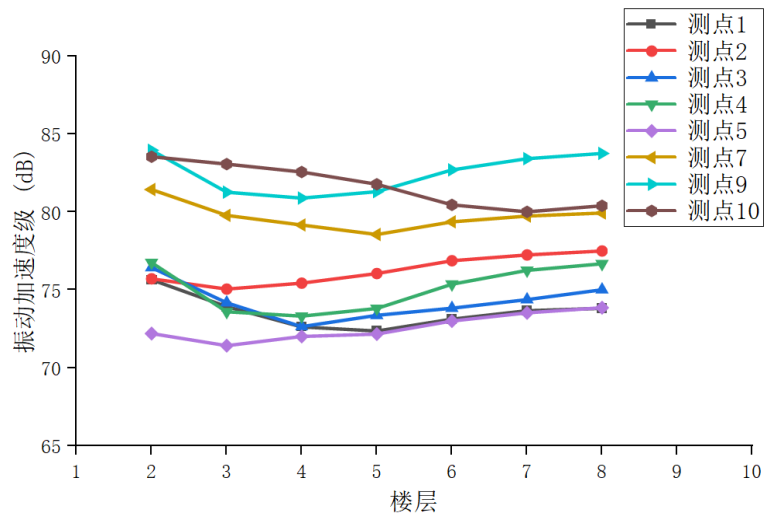


Figure 10. Vibration acceleration level of each measuring point of structure
图 10. 结构各测点振动加速度级

Table 5. Limit value of vertical vibration level of environmental vibration
表 5. 环境振动竖向振级限值

振动环境功能区类别		竖向振级限值(dB)	
		昼间	夜间
0 类		65	65
1 类		70	65
2 类		75	70
3 类		75	70
4 类	4a 类	75	70
	4b 类	80	80

5. 结论

本文从振动舒适度评价的角度，利用 Midas 建立车辆段上盖结构 - 土体有限元模型，研究地铁上盖建筑物的车致振动规律，得到以下结论：

- 1) 上盖建筑物竖向的自振频率明显大于横向和纵向的自振频率，且地铁列车行驶产生的振动以高频

为主, 因此地铁列车运行在车辆段上部结构引起的振动以竖向振动为主。在进行隔振支座设计时, 应重点考虑支座的竖向减振效果。

2) 由于结构纵横向刚度的差异, 地铁列车横向穿越车辆段引起的振动效应远大于列车纵向行驶时引起的振动, 为减小地铁振动对上盖建筑物居民舒适度的影响, 车辆段上部结构刚度较大方向应沿着地铁运行线路方向进行设计。

3) 上盖结构竖向振动强度在垂直方向上随着楼层的升高主要呈现先减小后增大的规律, 在水平方向上随着距离轨道中心线距离的增加而呈现衰减的趋势。所以在进行结构设计时应重点防控地铁运行线路正上方处低楼层的振动效应。

参考文献

- [1] 李晨. 地铁上盖物业开发车辆段减振降噪措施[J]. 科技创新与应用, 2019, 268(12): 136-137.
- [2] 邬玉斌, 张斌, 刘应华, 等. 地铁车辆段库上建筑环境振动影响规律研究[J]. 铁道学报, 2015(8): 98-103.
- [3] 谢伟平, 赵娜, 何卫, 等. 地铁上盖物业振动舒适度分析[J]. 土木工程学报, 2013(6): 90-96.
- [4] 伍永胜, 农兴中. 地铁车辆段上盖高层建筑结构体系研究与应用[J]. 建筑结构, 2020, 50(10): 95-100.
- [5] 张硕. 地铁车辆段上盖高层层间隔震结构的抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [6] 范重, 崔俊伟, 薛浩淳, 杨开, 高嵩, 王金金, 吴徽. 地铁上盖结构隔震效果研究[C]// 第 29 届全国结构工程学术会议. 第 29 届全国结构工程学术会议论文集: 第 I 册. 北京: 工程力学, 2020: 103-120.
- [7] 邹超. 地铁车辆段及上盖建筑物振动传播规律及减振技术研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [8] 孙璐. 上海某项目地铁上盖综合体结构设计[J]. 建筑结构, 2017, 47(14): 19-24.
- [9] 万学红, 李忍相, 冯爱军. 市域快速轨道交通的技术特征与标准研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016(6): 10-16.
- [10] 王国波, 伍火胜, 王亚西. 地铁车站与其上盖钢框架结构体系的地震响应分析[J]. 建筑结构学报, 2016(37): 79-84.
- [11] 中国机械工业联合会. GB50894-2013 机械工业环境保护设计规范[M]. 北京: 中国计划出版社, 2013.