

# 大型交通枢纽结构振动传播规律及隔振/震措施<sup>\*</sup>

徐 航<sup>1</sup> 荆国强<sup>2</sup> 马长飞<sup>2</sup> 吴巧云<sup>1,2,3</sup>

(1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院, 430073, 武汉; 2. 桥梁结构健康与安全国家重点实验室, 430034, 武汉;

3. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 150080, 哈尔滨)

**摘 要** [目的]大型综合交通枢纽结构作为城市布局的重要组成部分,具有投资巨大、建设规模庞大、使用功能繁杂等特点。保证此类建筑物在地震作用下免遭破坏或损伤同时保留其使用功能,以及在多重立体交通作用下使其具有足够的安全性和舒适性是具有实际意义的工程问题,因此需对相关文献研究进行整理和归纳总结。[方法]综述了各类交通荷载引起的沿线地面和建筑物等的环境振动问题,以及交通枢纽结构常采用的减隔振/震装置的研究现状;总结了现阶段国内外学者在振动响应实测、振动预测模拟和振动传播规律方面的研究成果;基于现有研究的局限性,阐述了在交通枢纽结构环境振动控制方面的未来研究方向。[结果及结论]国内外对于三维复合隔振/震的研究相对较少,研究主要集中在轨道交通沿线或上盖建筑物的地铁振动隔振,且主要集中在对所提隔振/震装置的力学性能和减隔振/震效应的试验研究。目前,对三维复合隔振/震的理论及技术研究还不够深入,三维复合隔振/震的应用还未普及并形成相关体系,相关装置的研发及其减振机理、力学性能、理论模型等仍是亟待解决的关键问题。

**关键词** 交通枢纽; 振动传播规律; 隔振/震措施

**中图分类号** U412.38

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.02.002

## Propagation Law of Structural Vibration in Large Transportation Hub and Vibration/Seismic Isolation Measures

XU Hang<sup>1</sup>, JING Guoqiang<sup>2</sup>, MA Changfei<sup>2</sup>, WU Qiaoyun<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, 430073, Wuhan, China; 2. State Key Laboratory of Bridge Structural Health and Safety, 430034, Wuhan, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 150080, Harbin, China)

**Abstract** [Objective] Large-scale integrated transportation hub structure is a vital component in urban layout, characterized by significant investment, extensive construction scale, and diverse functionalities. Ensuring the resilience of such buildings to seismic forces, preventing damage while preserving functionality, and providing sufficient safety and comfort under the influence of complex multidimensional traffic are engineering challenges of practical significance. Thus, it is necessary to sort through and summarize relevant literature research on this subject. [Method] The environmental vibration issues caused by various traffic loads along routes and buildings are reviewed. Additionally, the research status of vibration/seismic isolation devices commonly used in transportation hub structures is explored. The research achievements of scholars in China and worldwide in vibration response measurement, vibration prediction simulation, and vibration propagation laws are summarized. Based on the limitations of existing researches, the future research directions in environmental vibration control for transportation hub structures are discussed. [Result & Conclusion] There is relatively limited research on three-dimensional composite vibration/seismic isolation globally, with a main focus on metro vibration isolation along rail transit lines or superstructures. Research primarily concentrates on experimental studies of the mechanical performance of the proposed vibration/seismic isolation device and vibration/seismic isolation effects. Currently, theoretical and technical research on three-dimensional composite vibration/seismic isolation is not deep enough, and its application is not yet widely adopted or developed into a system approach. Key issues, such as the development of related devices, vibration reduction mechanisms, mechanical performance, theoretical models, remain crucial problems that urgently need resolution.

**Key words** transportation hub; vibration propagation law; vibration/seismic isolation measure

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金面上项目(52078395);国家自然科学基金重点项目(51838006);桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题(BHS-KL19-07-GF);中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室开放基金项目(2019D01)

## 0 引言

根据国务院印发的国发[2017]11号《“十三五”现代综合交通运输体系发展规划》,到2020年,我国将基本建成安全、便捷、高效、绿色的现代综合交通运输体系,着力打造一批由多种运输节点所形成的现代化、立体式综合交通客运枢纽。2019年建成的北京大兴国际机场旅客航站楼及综合换乘中心,作为“五纵两横”综合交通交汇网络中心,地下有5条轨道交通线路穿过,共设16个站台,站台总宽度为275 m,是全球首个集航空与高铁、城际铁路、地铁、高速公路等多种交通方式为一体的大型综合立体交通枢纽建筑<sup>[1]</sup>。综合交通枢纽的高架层、站台层与地下层之间可能有高速铁路、城际铁路、高速公路客运、城市轨道交通、公共交通、民用航空等多种运输方式,作为影响结构安全和环境振动与噪声的主要振源,它们之间相互作用,相互影响,大大加剧了建筑物振动的强度和站内环境噪声的复杂程度<sup>[2]</sup>。本文介绍了综合交通枢纽结构受环境振动影响及相应减隔振/震措施的相关研究,可为大跨空间结构、交通枢纽结构等建筑物的减隔振/震设计、装置研发等提供工程经验。

## 1 振动舒适度

文献[3-4]对某大型枢纽车站的交通振动响应进行现场实测后发现:由地铁列车引起的站台层振动响应超过了美国钢结构协会 ANSI/AISC-360—2010《美国建筑钢结构设计规范》的振动限值;当高铁列车低速从6号股道进出车站时,候车层的最大Z振级超过了 GB 1007—1988《城市区域环境振动标准》要求的限值,若列车高速通过则会产生更大的振动响应。由于人体各种器官的共振频率主要集中在1~80 Hz<sup>[5]</sup>,由交通运输引起的振动及其二次结构噪声会对人体的舒适度产生严重影响,甚至引发失眠、烦躁等症状。另外,由交通运输引起的振动可能引起周边建筑物结构长期反复的应力集中和动力疲劳等现象,过大幅值的反复振动甚至会导致地基不均匀沉降、场地液化和基础整体下沉等一系列工程问题<sup>[6]</sup>。例如,上海轨道交通8号线下穿位于虹口区鲁迅公园板块的某小区,因列车振动造成了该小区房屋的水平变形<sup>[7]</sup>。大型综合交通枢纽结构作为城市布局的重要组成,其具有投资成本高、建设规模庞大、使用功能繁杂等特点,在复杂

的多重立体交通振动条件下,如何保证其免遭振动破坏并确保使用舒适性是一个较难的工程问题。

目前,关于多重振源所导致的综合交通枢纽结构的减隔振研究较少,现有研究多集中于由地铁列车引起的地面建筑环境振动控制。对于大型综合交通枢纽结构,由各种交通运输方式振源诱发的环境振动频率范围有所不同<sup>[8]</sup>(见表1),因此有必要发展较宽频带内高效的竖向隔振技术。综合交通枢纽一般为人流密集的大跨度空间结构,其抗震设防要求较高,设计时需考虑水平和竖向的地震动加速度影响。为确保这类建筑正常运营时的振动舒适度能够兼顾地震安全性,对综合交通枢纽结构在多重振源共同作用下的多频段三维复合隔震减振研究,具有重要的理论研究意义和工程应用价值。

表1 不同交通运输方式振源诱发的地面环境竖向振动频率范围<sup>[8]</sup>

Tab.1 Vertical vibration frequency range of ground environment induced by vibration sources of different transportation modes<sup>[8]</sup>

交通运输方式	近源频率/Hz	远源频率/Hz
公路	≤30	>30
地铁	60~80	—
城市轨道交通(除地铁外)	50~60	25~30
铁路	100	20~50
高铁	40	10.0~12.5

## 2 建筑环境振动传播规律

### 2.1 振动响应实测研究

早期研究主要集中在地铁列车运行所诱发的地面环境振动测试。文献[9-10]分别以日本和北美地区的轨道交通系统为例进行地面环境振动测试,由测试结果可知,影响振动的主要因素有振源至敏感点的距离、背景振动、轨道类型、列车类型及列车运行速度等。文献[11]对地铁运行产生的振动频谱进行试验研究后发现,振源处的振动频率以运行列车的自振频率为主,非振源处(如敏感建筑物)的振动频率由建筑物自身的振动特性所决定。文献[12]以北京地铁隧道为例,研究隧道内的振动衰减情况,由试验结果可知,相较于低频振动,高频振动的衰减更快。

随着人们生活水平的改善和对建筑物使用功能要求的提高,由交通运输引起的周边建筑环境振

动,尤其是地铁运行引起的周边建筑环境振动问题已经获得了越来越多的关注。在由地铁运行引起的振动对建筑物的响应实测方面,目前已有研究以分析振动在建筑物中的衰减规律和振动特性为主。文献[13]对广州某地铁站进行了地面和附近三层建筑物内部振动和噪声的现场测试,发现在测试线路附近的地面和建筑物内部的垂直振动明显大于水平振动。文献[14-15]通过对上海某段地铁隧道内的三向环境振动进行监测,分析隧道内、自由场地和地面建筑物的振动频谱特性及振动传递规律。文献[16]对莫斯科某地铁线路附近的一座6层建筑物的地面、建筑基础、楼层轮廓和中间跨的振动情况进行了现场测试,计算并求出了相似建筑物和周围地面垂直振动的传递系数。文献[17-18]以北京地铁某线路周边的砖混结构为例,研究了建筑物场地内的振动情况,分析发现其竖向振动响应要显著大于水平向振动响应。文献[19-20]采用了现场振动测试的方法,对南京地铁1号线及4号线运行对邻近民国建筑物和鼓楼产生的不利影响进行了研究。

除了地铁振动响应测试外,有学者对高铁、轻轨、公路等交通振源进行了地面振动响应实测,发现不同振源诱发地面环境振动的频率范围有所不同,且交通振动主要以竖向振动为主。文献[21]在距轻轨列车轨道中心线0、8 m、16 m和32 m处采集了不同列车运行速度下的场地振动数据,并对其进行了时域分析、频谱分析和1/3倍频程曲线分析。文献[22]实测了广州市南大路和番禺大道北辅路在4种车辆混合通行工况下的市政道路路面振动加速度,研究表明汽车荷载激励以竖向振动为主,频率主要分布在5~40 Hz。已有文献关于除地铁外的其他交通振源的振动响应实测较少,且鲜见其诱发邻近建筑物的振动响应研究。

相比之下,关于多重交通振源诱发地面或周边建筑物环境振动的实测研究更为少见。文献[23]对北京地铁2号线某典型区间段进行了现场测试,评估了在既有地铁交通和路面交通作用下沿线邻近古建筑物的振动响应。测试结果表明:地铁交通和路面交通引起的结构响应主要频段分别为40~90 Hz和10~20 Hz,且路面交通引起的振动加速度在一定范围内可能会出现放大现象。文献[24]为评价地铁列车和道路车辆运行对环境的振动影响,选取北京地铁1号线及4号线某区间段,对地铁列

车与公交车单独引起的振动和两者叠加振动进行了现场测试,研究表明在距离地铁隧道中心线一定范围内,公交车引起的振动对沿线居民的影响要强于地铁列车引起的振动影响。文献[25]对美国波士顿地区铁路及地铁引起的周围地面环境振动特性进行了测试研究,研究表明距轨道中心线25 m范围内的振动速度级随着轨道与中心线距离的增大而减小,减小幅度约为1 dB/m。综上所述,多重振源对地面建筑物的环境振动与单一振源的振动响应明显有所不同,且低频振源在与高频振源叠加时会出现放大现象,因此目前对于多重振源共同作用下的环境振动进行研究显得尤为重要。

## 2.2 振动响应预测研究

通常情况下,在地铁或铁路线路的设计之初需对该类交通产生的振动影响进行充分考虑,如基于经验模型考虑受振体与振源的距离、列车运行速度、振动衰减程度等因素,预测出实际的结构振动有效值<sup>[26]</sup>。目前,使用较为普遍的是美国联邦铁路局基于以往实测列车运行引起的地面振动级数据所提出的振动-距离调整曲线。在我国制定的HJ 453—2018《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》中也给出了地铁列车运行引起的环境振动衰减的定量预测公式。但从现阶段行业的研究进程来看,经验模型较难对振动频率范围进行精确的预测。由交通振源造成的影响与其相应的振动频率密切相关,而振动频率的主要范围对减隔振方式的设计有重要的影响,因此国内外均基于理论推导和数值模拟等方法,尝试对振动较为敏感的区域进行精确的预测。

利用传递函数方法预测建筑物内交通环境振动的研究较为常见。文献[27]利用传递函数预测地铁列车引起的地面振动对建筑物内部的影响,提出在已知建筑物外地振动的情况下,通过了解建筑物的传递函数可以预测类似建筑物内的振动响应。文献[28]对北京地铁4号线的列车运行情况进行了现场实测,同时考虑了北京大学物理实验室内精密仪器所受到的振动影响程度,提出可以将振动预测问题归结到计算频率-波数域内的传递函数,以及频域内的移动轴荷载问题。

数值模型也是一种较为成熟的预测建筑物内振动的方法。为了研究地铁列车运行对古建筑物的影响,文献[29]基于2.5D有限元模型模拟列车-轨道-地基土体结构,并利用3D有限元模型模拟建



筑物结构,预测由地铁列车运行引起的建筑物振动。文献[30]建立了直接固定轨道和钢弹簧浮动板式轨道的2D和3D预测模型,研究地铁运行产生的环境振动对上盖建筑物的影响。文献[31-32]建立了列车-轨道-隧道-土体-建筑物3D模型,分别对成都某纪念碑和西安钟楼进行了振动响应预测分析。文献[33-34]建立了车轨垂向耦合振动数值分析模型和隧道-土体-建筑物有限元模型,以及车辆-轨道-高架桥-基础-地基-建筑物耦合的大型三维有限元分析模型,获得了不同工况下地铁列车运行引起地面及邻近建筑结构的振动特征。

大型综合交通枢纽结构容纳了多种交通工具,而交通振源引起的振动响应对站房结构安全性和人体舒适度的影响,使得该类大型综合交通枢纽结构在设计时必须考虑到振动控制方面的问题。为了研究综合交通枢纽在列车荷载下的振动响应规律,文献[35-36]分别以重庆市沙坪坝区和南昌市南昌西站综合交通枢纽结构等为例,通过振动响应实测及有限元模型研究了站房结构及站台层等建筑物,在不同车速和不同线路工况下高铁过站时的振动响应规律。

由此可见,交通振源引起的建筑物环境振动传播规律研究大都集中于对地铁、高铁等单一振源对邻近住宅、古建筑、砖混结构等影响的实测或预测研究,鲜见不同交通振源共同作用下的环境振动相关研究,尤其缺少对综合交通枢纽结构在多重立体交通共同作用下的振动传播规律及耦合效应研究。

### 3 建筑物环境振动的隔振/震措施

#### 3.1 竖向隔振/震研究

交通振源引起的邻近建筑物的振动控制措施之一便是建筑物隔振/震措施。文献[37]采用碟形弹簧隔震装置来有效隔离竖向地震动。文献[38-39]研究了厚肉型橡胶支座在地铁沿线建筑物中对地铁减振的有效性。文献[40]提出了一种竖向隔振支座,分析了支座性能参数并给出了支座竖向拉、压刚度的计算方法,以研究地铁隧道内的竖向振动影响其上盖建筑物舒适度的问题。

综上所述,目前国内外对交通振源引起的邻近建筑物减隔振/震研究还相对较少,主要集中于轨道交通沿线建筑物单一振源振动下的响应研究,多重交通振源诱发环境振动的综合交通枢纽结构减

隔振/震研究较少。

#### 3.2 三维复合隔振/震研究

由于地震作用是三维的,水平震动和竖向震动的共同作用是建筑物结构倒塌或破坏的主要诱因。隔震结构是指在建筑物上部结构与基础之间设置隔震层,以延长整个结构体系的自振周期,增大阻尼,减小输入上部结构的地震作用。目前的三维隔震技术主要是隔离水平向和竖向的地震动<sup>[41-42]</sup>,而由交通振源引起的竖向振动,其振动特性和传播路径有所不同,因此地震动的相关理论及隔震装置均不能直接应用。考虑地震与环境振动的混合作用,为了同时实现水平隔震和竖向地铁隔振,部分学者基于水平隔震支座(普通橡胶支座或铅芯橡胶支座等)和竖向隔振支座(厚肉型橡胶或蝶形弹簧等)等不同串并联连接方式,提出了三维复合隔振/震装置,如图1所示,并基于隔振/震装置的力学性能开展三维隔振/震研究。文献[43]介绍了一种由连接件、竖向隔振支座(多层厚橡胶体)和水平隔震支座(普通橡胶支座或铅芯橡胶支座等)串联组成的三维隔振/震支座(见图1a))。文献[44]提出了一种由普通橡胶支座与橡胶滑板支座并联而成的三维隔振/震支座。文献[45-47]设计了几种由橡胶支座和碟形弹簧串联所组成的三维多功能隔振/震支座。

综上所述,国内外对于三维复合隔振/震的研究相对较少,大多数研究主要集中于轨道交通沿线或上盖建筑物的地铁振动隔振,且主要集中在对所提隔振/震装置力学性能和减隔振/震效应的试验研究。总体而言,对三维复合隔振/震理论及技术的研究还不够深入,三维复合隔振/震的应用还未普及并形成相关体系,相关装置的研发及其减振机理、力学性能、理论模型等仍是亟待解决的关键问题。

### 4 未来研究方向

通过文献调研可以发现,环境振动对于周边建筑物的振动传播规律、三维隔振/震等研究方面已经取得了一定的研究成果,但成果较为有限,且关于多重振源共同作用下的综合交通枢纽结构振动特性和减隔振/震方式的研究尤为少见。各类大跨度综合交通枢纽结构的大量建设,对其建筑物结构在多重振源交互作用下的振动响应规律和振动控制的研究又有迫切的需求,因此未来的研究方向可能有:

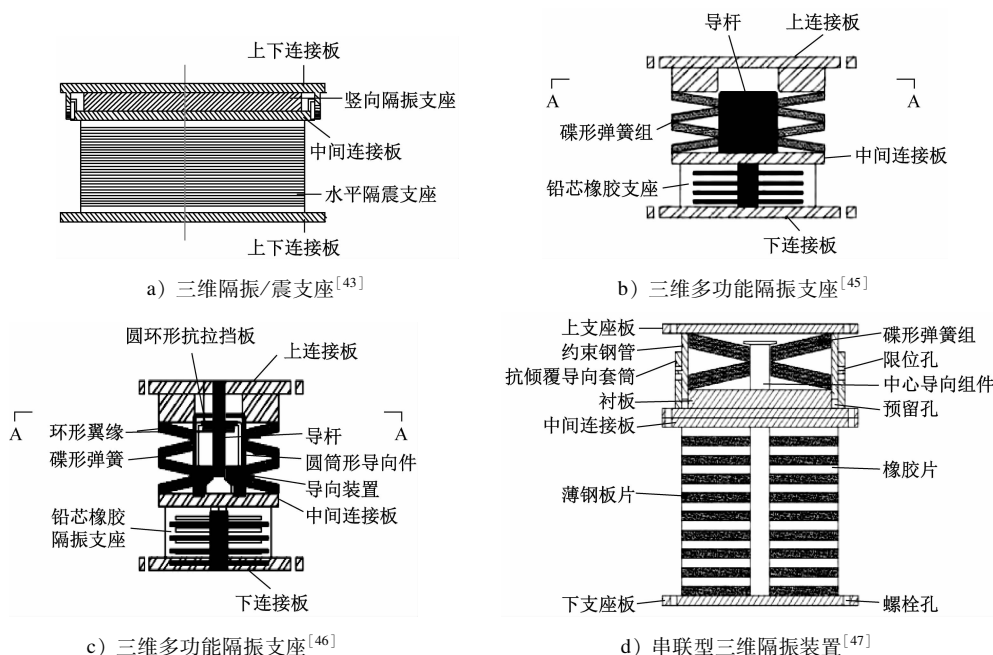


图1 几种三维复合隔振/震装置示意图

Fig.1 Diagram of three-dimensional composite vibration isolation/control devices

1) 通过振动预测分析、振动响应实测及数值模拟等方式,开展综合交通枢纽建筑物结构中不同交通振源共同作用下的振动传播规律及耦合效应研究。

2) 采用多频段三维复合隔振/震方法研究综合交通枢纽建筑物结构的力学性能和减振/震机理。

## 5 结语

本文主要介绍了由不同交通运输方式引起的环境振动传播规律,以及轨道交通沿线建筑物和交通枢纽结构所采用的减隔振/震装置的研究现状,总结了近年来国内外学者在相关领域的研究进展及现有研究的局限性,提出了大型综合交通枢纽结构在震动与环境振动多维控制方面的未来研究方向,对大型综合交通枢纽引起的环境振动预测、评价和控制有一定的参考作用。

## 参考文献

- [1] 曹建亚,张灏. 北京大兴国际机场大直径隔震支座施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(1): 122.  
CAO Jianya, ZHANG Hao. Construction technology of the large-diameter isolation bearing for Beijing Daxing International Airport [J]. Construction Technology, 2020, 49(1): 122.
- [2] 罗锐,张新亚,雷晓燕. 综合交通枢纽站内环境噪声特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(3): 152.  
LUO Kun, ZHANG Xinya, LEI Xiaoyan. Analysis of environ-

mental noise characteristics in integrated transport hubs [J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(3): 152.

- [3] 雷晓燕,崔聪聪,张凌. 地铁列车荷载激励下综合交通枢纽车站站房结构的振动响应[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(3): 119.  
LEI Xiaoyan, CUI Congcong, ZHANG Ling. Vibration response of station structure of comprehensive transportation hub station under subway train load excitations [J]. China Railway Science, 2019, 40(3): 119.
- [4] 张凌,雷晓燕,冯青松,等. 高铁综合交通枢纽车站结构振动传播的测试分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(9): 1107.  
ZHANG Ling, LEI Xiaoyan, FENG Qingsong, et al. An experimental study on the vibration propagation of high-speed railway integrated transportation hub station structure [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(9): 1107.
- [5] 张向东,高捷,闫维明. 环境振动对人体健康的影响[J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(1): 74.  
ZHANG Xiangdong, GAO Jie, YAN Weiming. Effects of environmental vibration on human health [J]. Journal of Environment and Health, 2008, 25(1): 74.
- [6] 夏禾,曹艳梅. 轨道交通引起的环境振动问题[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1): 44.  
XIA He, CAO Yanmei. Problem of railway traffic induced vibrations of environments [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004, 1(1): 44.
- [7] 朱瑾如,钱程,潘雨桐,等. 地铁振动对建筑物及人体舒适度影响的研究[J]. 结构工程师, 2017, 33(5): 125.  
ZHU Jinru, QIAN Cheng, PAN Yutong, et al. Study on subway-

- induced vibration response of building structures and human comfort[J]. *Structural Engineers*, 2017, 33(5): 125.
- [8] 叶茂, 任珉, 谭平, 等. 城市道路交通诱发建筑结构振动的实测和数值模拟[J]. *应用力学学报*, 2013, 30(3): 463.  
YE Mao, REN Min, TAN Ping, et al. In situ measurement and numerical simulation for building vibration induced by urban traffic[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2013, 30(3): 463.
- [9] OKUMURA Y, KUNO K. Statistical analysis of field data of railway noise and vibration collected in an urban area[J]. *Applied Acoustics*, 1991, 33(4): 263.
- [10] NELSON J T, SAURENMAN H J. State-of-art review: prediction and control of groundborne noise and vibration from rail transit train; DOT-TSC-UMTA-83-3[A]. Cambridge: United States Department of Transportation, Urban Mass Transportation Administration, 1983.
- [11] HUNG H H, YANG Y B. Elastic waves in visco-elastic half-space generated by various vehicle loads[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(1): 1.
- [12] 潘昌实, 谢正光. 地铁区间隧道列车振动测试与分析[J]. *土木工程学报*, 1990, 23(2): 21.  
PAN Changshi, XIE Zhengguang. Measurement and analysis of vibrations caused by passing trains in subway running tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1990, 23(2): 21.
- [13] ZOU C, WANG Y, WANG P, et al. Measurement of ground and nearby building vibration and noise induced by trains in a metro depot[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 761.
- [14] 盛涛, 张善莉, 单伽程, 等. 地铁振动的传递及对建筑物的影响实测与分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(1): 54.  
SHENG Tao, ZHANG Shanli, SHAN Jiazheng, et al. In-situ measurement and analysis of subway vibration's transmission and the influence to nearby buildings[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(1): 54.
- [15] XU R, LI X, YANG W, et al. Field measurement and research on environmental vibration due to subway systems; a case study in eastern China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(23): 6835.
- [16] VLADIMIR S, ILYA T. To the question of vibration levels prediction inside residential buildings caused by underground traffic[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 176: 371.
- [17] 金浩, 刘维宁, 周顺华, 等. 地铁运行对单层砌体结构的动力影响[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(2): 325.  
JIN Hao, LIU Weining, ZHOU Shunhua, et al. Vibration of single-story masonry structures induced by subway through in situ tests[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(2): 325.
- [18] 宋波, 王希慧, 李杨, 等. 地铁振动对邻近砖混结构住宅影响研究[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(增刊2): 48.  
SONG Bo, WANG Xihui, LI Yang, et al. Study on the influence of subway vibration on adjacent brick-concrete structure residence[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(S2): 48.
- [19] 高波, 蓝天, 朱利明. 地铁运行振动对邻近民国建筑的影响[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(6): 104.  
GAO Bo, LAN Tian, ZHU Liming. Effects of metro operation vibration on neighboring buildings of Republic China[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2018, 40(6): 104.
- [20] 朱利明, 王成龙, 蓝天, 等. 地铁运行引起的南京鼓楼振动测试与分析[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(增刊1): 291.  
ZHU Liming, WANG Chenglong, LAN Tian, et al. Vibration test and analysis of Nanjing Drum Tower caused by metro operation[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(S1): 291.
- [21] 袁金秀, 叶茂, 崔海龙, 等. 交通荷载诱发环境振动传播规律实测研究[J]. *国防交通工程与技术*, 2019, 17(2): 33.  
YUAN Jinxiu, YE Mao, CUI Hailong, et al. An experimental study of the spreading law of the traffic-load-induced environmental vibration[J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2019, 17(2): 33.
- [22] 邹锦华, 陈焰华, 黄龙田, 等. 交通荷载作用下市政道路路面振动测试与分析[J]. *路基工程*, 2019(5): 40.  
ZOU Jinhua, CHEN Yanhua, HUANG Longtian, et al. Pavement vibration test and analysis of municipal road under the action of traffic load[J]. *Subgrade Engineering*, 2019(5): 40.
- [23] 李克飞, 刘维宁, 刘卫丰, 等. 交通振动对邻近古建筑的动力影响测试分析[J]. *北京交通大学学报*, 2011, 35(1): 79.  
LI Kefei, LIU Weining, LIU Weifeng, et al. Tests and analysis of traffic-induced vibration effects on surrounding historic buildings[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2011, 35(1): 79.
- [24] 刘卫丰, 刘维宁, 袁扬, 等. 地铁列车与道路车辆运行对环境的振动影响现场测试与分析[J]. *铁道学报*, 2013, 35(5): 80.  
LIU Weifeng, LIU Weining, YUAN Yang, et al. In-situ measurements of and analysis on environmental effects of vibrations induced by passage of metro trains and vehicles on the road[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35(5): 80.
- [25] SANAYEI M, MAURYA P, MOORE J A. Measurement of building foundation and ground-borne vibrations due to surface trains and subways[J]. *Engineering Structures*, 2013, 53: 102.
- [26] CONNOLLY D P, KOUROUSSIS G, WOODWARD P K, et al. Scoping prediction of re-radiated ground-borne noise and vibration near high-speed rail lines with variable soils[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 66: 78.
- [27] WITH C, BODARE A. Prediction of train-induced vibrations inside buildings using transfer functions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, 27(2): 93.
- [28] 刘卫丰, 刘维宁, 马蒙, 等. 地铁列车运行引起的振动对精密仪器的影响研究[J]. *振动工程学报*, 2012, 25(2): 130.  
LIU Weifeng, LIU Weining, MA Meng, et al. Study of effect on sensitive equipment due to vibrations induced by metro traffic[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2012, 25(2): 130.
- [29] LOPES P, COSTA P A, FERRAZ M, et al. Numerical modeling

- of vibrations induced by railway traffic in tunnels; from the source to the nearby buildings[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 61/62: 269.
- [30] XU Q, XIAO Z, LIU T, et al. Comparison of 2D and 3D prediction models for environmental vibration induced by underground railway with two types of tracks[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 68: 169.
- [31] MA M, MARKINE V, LIU W N, et al. Metro train-induced vibrations on historic buildings in Chengdu, China[J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2011, 12(10): 782.
- [32] MA M, LIU W, QIAN C, et al. Study of the train-induced vibration impact on a historic Bell Tower above two spatially overlapping metro lines[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 81: 58.
- [33] 郑国琛, 祁皓. 地铁运行引起的建筑物振动响应预测[J]. *噪声与振动控制*, 2015, 35(1): 176.
- ZHENG Guochen, QI Ai. Prediction of vibration response of buildings induced by subway operations[J]. *Noise and Vibration Control*, 2015, 35(1): 176.
- [34] 赵凯, 王秋哲, 毛昆明. 地铁运行引起建筑物振动的三维有限元分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(2): 209.
- ZHAO Kai, WANG Qiuzhe, MAO Kunming. 3D FE analysis on building vibration induced by train running[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(2): 209.
- [35] 李正川, 冉汶民, 易兵, 等. 列车运行下综合交通枢纽站房结构振动分析[J]. *铁道标准设计*, 2018, 62(8): 127.
- LI Zhengchuan, RAN Wenmin, YI Bing, et al. Vibration analysis of integrated transport hub station structure under train load[J]. *Railway Standard Design*, 2018, 62(8): 127.
- [36] 崔聪聪, 雷晓燕, 张凌, 等. 综合交通枢纽的振动特性与舒适度研究[J]. *噪声与振动控制*, 2018, 38(1): 164.
- CUI Congcong, LEI Xiaoyan, ZHANG Ling, et al. Study on vibration characteristics and comfort of integrated transportation hub[J]. *Noise and Vibration Control*, 2018, 38(1): 164.
- [37] 刘天适, 赵强, 王兴国, 等. 碟形弹簧竖向减震体系的分析与研究[J]. *世界地震工程*, 2004, 20(2): 1.
- LIU Tianshi, ZHAO Qiang, WANG Xingguo, et al. A study on vertical seismic isolation system with disk spring[J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2004, 20(2): 1.
- [38] 周颖, 陈鹏, 陆道渊, 等. 地铁上盖多塔楼隔震与减振设计研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(增刊1): 84.
- ZHOU Ying, CHEN Peng, LU Daoyuan, et al. Design and seismic response analysis for multiple buildings with large podium using inter-story isolation technology[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(S1): 84.
- [39] 盛涛, 李亚明, 张晖, 等. 地铁邻近建筑的厚层橡胶支座基础隔振试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(2): 35.
- SHENG Tao, LI Yaming, ZHANG Hui, et al. Field experiment study of subway nearby building's base isolation by laminated thick rubber isolator[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(2): 35.
- [40] PAN P, SHEN S, SHEN Z, et al. Experimental investigation on the effectiveness of laminated rubber bearings to isolate metro generated vibration[J]. *Measurement*, 2018, 122: 554.
- [41] 吴从晓, 周云, 邓雪松, 等. 竖向隔振建筑振动反应分析研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(增刊2): 13.
- WU Congxiao, ZHOU Yun, DENG Xuesong, et al. Analytical studies on the vibration response of the vertical isolation building[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(S2): 13.
- [42] LIU W, TIAN K, WEI L, et al. Earthquake response and isolation effect analysis for separation type three-dimensional isolated structure[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018, 16(12): 6335.
- [43] 魏陆顺, 周福霖, 任珉, 等. 三维隔震(振)支座的工程应用与现场测试[J]. *地震工程与工程振动*, 2007, 27(3): 121.
- WEI Lushun, ZHOU Fulin, REN Min, et al. Application of three-dimensional seismic and vibration isolator to building and site test[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007, 27(3): 121.
- [44] 李亚明, 施卫星. 一种组合隔振(震)支座力学性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2013, 43(13): 17.
- LI Yaming, SHI Weixing. Experimental study on mechanical property of a composite isolation bearing[J]. *Building Structure*, 2013, 43(13): 17.
- [45] 李爱群, 王维. 三维多功能隔振支座设计及其在地铁建筑减振中的应用[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(2): 202.
- LI Aiqun, WANG Wei. Design of a three-dimensional isolation bearing and its application in building vibration control induced by underground train[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(2): 202.
- [46] 王维, 李爱群, 周德恒, 等. 新型三维多功能隔振支座设计及其隔振分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(4): 787.
- WANG Wei, LI Aiqun, ZHOU Deheng, et al. Design of novel three-dimension multifunctional isolation bearing and its isolation behavior analysis[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2014, 44(4): 787.
- [47] 杨维国, 王亚, 安鹏, 等. 基于某博物馆的新型三维隔振装置作用性能研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(6): 1050.
- YANG Weiguo, WANG Ya, AN Peng, et al. Application performance study of new three-dimensional vibration isolation device based on one museum structure[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2018, 48(6): 1050.

• 收稿日期:2021-07-15 修回日期:2021-09-04 出版日期:2024-02-10  
 Received:2021-07-15 Revised:2021-09-04 Published:2024-02-10  
 • 第一作者:徐航,硕士研究生, 643792727@qq.com  
 通信作者:吴巧云,教授, wuqiaoyun@wit.edu.cn  
 • ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
 © Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license