

城市轨道交通环境振动影响研究综述^{*}

陈建琪¹ 孙勇^{*,1} 王晖¹ 张晓敏¹ 杨楠²

(1. 山东农业大学水利土木工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 济南 250100)

摘要:我国城市轨道交通蓬勃发展,其运营引发的环境振动问题日益突出,受到社会各界广泛关注。本文分别从振动产生机理与振源特性、振动传播规律、环境振动影响三个方面总结了近年来已取得的成果。并对该领域今后需要研究的问题提出建议,认为今后的研究应注重将实测、数值分析与理论计算相结合;重视标准制定方面的基础性研究;开展综合减振方案研究;依托物联网、云计算平台,实现预测的可视化。

关键词:城市轨道交通;环境振动;振动影响

中图分类号:U231;X593 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2018.04.007

A Review on Influence of Environmental Vibration Induced by Urban Mass Transit^{*}

CHEN Jianqi¹ SUN Yong^{*,1} WANG Hui¹ ZHANG Xiaomin¹ YANG Nan²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Shandong Provincial Research Institute of Coal Geology Planning and Exploration, Ji'nan 250100, China)

Abstract: With the rapid development of urban mass transit in China, the problem of environment vibration caused by its operation is becoming increasingly prominent, which has attracted wide attention from all walks of life. In this paper, vibration generation mechanism and its source characteristics, rule of vibration propagation and environmental vibration effect are summarized. Some suggestions on the future research in this field are put forward. The following researches should be carried out at present: the combination of measurement, numerical analysis and theoretical calculation, the fundamental research on standards setting, comprehensive design of mitigation of vibration, and the visual prediction based on Internet of Things and cloud computing platform.

Key words: urban mass transit; environmental vibration; vibration effects

1 引言

城市轨道交通是世界公认的绿色交通,在生态城市建设与缓解城市病方面发挥了巨大作用,近年来因其运量大、速度快、安全舒适、节能环保

等优点而发展迅猛。截至2017年第三季度,我国已有29个城市的118条城市轨道线路投入运营,总里程达3862 km^[1]。现阶段,有41个城市193条线路(含续建段)正在紧张建设中,总里程超过4700 km。随城市轨道交通网的加密,其带来的环

2018-02-11 收稿,2018-04-09 接受,2018-04-25 网络发表

^{*} 国家科技支撑计划(2014DAL04B05)资助

^{**} 通讯作者, E-mail: sunyong@sdau.edu.cn; Tel: 18653866176

境振动影响越来越大。以北京市区为例,在行车高峰时段,行车道 100 m 以内区域的环境振动水平短期内提高了 20 dB^[2]。

城市轨道交通环境振动由运行车辆对轨道冲击产生,是通过结构(路基、高架桥梁墩台及其基础、隧道基础和衬砌)传播至地表环境、与车辆运行状态相关的持续性小幅振动,会对周围建筑结构和建筑物内的人体、精密仪器、设备产生不利影响。上世纪 60 年代,地下铁道建设步入发展高潮期,人们开始对城市轨道交通环境振动问题展开系统研究。现今,为保证城市轨道交通健康、可持续性发展,诸多学者围绕城市轨道交通环境振动问题开展大量研究,但与之相关的综述性文章少且缺乏系统性。本文分别从振动产生机理与振源特性、振动传播规律、环境振动影响三个方面总结了近年来国内外学者在该领域的研究成果,并结合目前研究中存在的问题,为该领域今后需进一步研究的问题提出建议。

2 城市轨道交通环境振动问题研究概述

2.1 城市轨道交通环境振动的产生机理与振源特性

城市轨道交通是一种振动源,其引发振动的根源在于轮轨相互作用。自 1991 年起,翟婉明^[3]围绕车辆-轨道耦合动力学领域开展大量基础研究工作,分析了轨道波磨、擦伤车轮等轮轨激励所致的冲击振动在行车条件下的形态特征。杨宜谦^[4]总结了国内外学者在地铁和铁路环境振动源方面的研究成果,将轨道交通产生环境振动的主要机理归纳为如下六种:准静态、参数激励、钢轨不连续、轮轨粗糙度、波速、横向激励。其中,轮轨粗糙度机理对环境振动的贡献率最大。随着铁

路提速、高速铁路迅猛发展,列车速度可能达到或超过地层中的瑞雷波速、剪切波速或在轨道中传播的弯曲波的最小相速度,由此而产生很大的轨道振动和地面振动^[5]。行车速度提高导致轮轨磨损加重,轨道减振措施的大量使用导致轨道刚度平顺性降低,进而成为车体对轨道产生冲击作用的重要影响因素。较平滑轨道而言,轨道不平顺引发的振动明显增加,且传播距离更远;轨面高低错牙接头对铁路振动贡献最大,轮轨擦伤的贡献率相对要小得多^[6]。在分析振源特性时,若只考虑准静态列车荷载和离散轨枕作用率而忽略了轨道、车轮不平顺等因素,会使得计算结果与实测值相比,高频振动偏大、中频振动偏小^[7]。

列车通过桥梁段时,对桥梁的冲击通过桥墩传递给地基,每个桥墩可视为一个点荷载源,桥梁段的荷载源可视为由一系列桥墩点荷载排列而成的点列式荷载,是一种处于点荷载和线荷载之间的荷载形式:当相邻点荷载之间的距离足够大时,可将点列式荷载看作多个相互独立的点荷载;当间距为 0 时,点列式荷载就成为了线荷载^[8]。在已开通运营的城市轨道交通线路中,地下线比重相当大,约占线路总长度的 70%^[9],其振源形式可以看作埋藏在土层中的线振源。较传统的地上线路结构而言,地下交通可直接穿过建筑物下方,通过地层与建筑物相连,振动能量完全通过土介质逸散,且在传播过程中局部出现振动反弹增大区,可能产生更大的振动干扰。特别是浅埋式地下交通,其与建筑物之间的距离更近,对沿线场地及结构物造成的振动响应更大。Lopes^[10]、汪益敏^[11]等的研究表明:地铁引起的地面振动响应频带宽度为 10 ~ 120 Hz,受行车速度、轨道垫层刚度等影响,峰值出现在 25 ~ 70 Hz 范围,振级在 60 ~ 90 dB 范围。与高架桥段^[12]相比,地下交通振源

影响频带更宽、传播更远,距轨道相同距离处,振动量级高出 2 ~ 4dB。

振源特性主要通过现场测试或模拟计算获得。Heckl^[13]、Auersch^[14]等实测了列车振动,利用频谱分析法对测试信号进行分解并统计,模拟和讨论了振源静态和动态成分以及高、中、低频率成分。潘昌实和谢正光^[15]、李德武^[16]、张玉娥^[17]等现场测试得到轨道振动加速度波形,利用频谱分析法得到轨道振动加速度的数学表达式,根据机车振动模型建立运用方程,推导出列车振动荷载。雷晓燕^[18]、刘维宁^[19]、夏禾^[20]等建立车辆 - 轨道耦合模型,计算获得模型中列车荷载激励力并进行轨道交通环境振动的相关研究。现今,在高速铁路振动问题研究中,越来越多地考虑轨道不平顺影响,依靠线路轨检测得轨道不平顺的统计特征数据,将数据输入到车辆 - 轨道耦合模型,通过设定特定型号列车以不同时速运行,计算出特定工况下的激励荷载。

2.2 城市轨道交通环境振动的传播规律

当列车高速通过时,地基土的动应变一般为 10^{-5} m 或更小^[21],土颗粒之间的连接没有遭到破坏,列车振动在土层中以弹性波为主要形式传播。轨道交通所致环境振动通过土介质传递能量是 P、S 波和 Rayleigh 波三者组合,这三种波能在激励荷载作用下在远场的主要分配为:Rayleigh 波 67%、S 波 26%、P 波 7%^[22]。不同频率的波传播规律不同,振源频率越高,衰减越快。在频率曲线上,距离轨道较近时以高频成分为主,随着距离的增加,高频成分逐渐被抑制,主频向低频转移,地面振动幅值也随之衰减。闫维明等^[23]研究表明,垂直于地铁线路的水平向振动最大,而顺地铁方向和竖向均比垂直振动小 10 dB,频率在 16 Hz 以下,高频波衰减很快,而低频波在 100 ~ 200 m 处

都可检测到。而在岩石等坚硬地层中,高频波衰减慢,传播距离更远,更容易通过刚度较大的建筑基础传播至沿线建筑,造成更大的振动干扰。曹艳梅等^[24]研究表明:振动在硬性地基土中传播时衰减波动性更强,局部振动放大更明显,且传播距离更远,在距轨道中心线 100 m 处的振动量级达 70 dB。

振动在传播过程中因受“几何阻尼”和“材料阻尼”作用随着传播距离增大而衰减,但衰减不是单调的,受场地土的力学性能、地质条件等因素影响,存在振动放大区。对该现象存在如下两种解释:一种观点认为,列车振动的振源频率与该处土层固有频率相近,因发生共振导致振动在该处被放大;另一种观点认为,振动放大区附近存在下卧基岩,振动波在下卧基岩面与地表面之间多次反射,在地表形成振动放大区,其位置、振动放大程度与列车荷载的大小、运行速度及场地条件等因素有关。

列车所致环境振动预测模型分为经验预测模型、解析预测模型和数值预测模型三种。经验预测模型相比于其他两种模型具有公式简单、计算方便等优点,得到广泛应用。常用的经验预测模型是 Bornitz 模型,它考虑了几何扩散和材料衰减,能够较好地反映环境振动衰减规律。振动传播衰减不仅受场地条件影响,还与振动频率密切相关,而一些预测公式^[25,26]和《铁路建设项目环境影响评价噪声振动源强取值和治理原则指导意见》中推荐的预测方法未考虑频率因素的影响。对此,张光明等^[8]通过对成灌快速铁路环境振动预测研究,提出了一种精度更好的常用预测方法 - 分频段预测方法。随着计算机仿真技术的发展,数值模型计算精度日益提高。陈建国等^[27]建立车 - 桥和墩 - 土两个子系统模型,通过改变模

型中单个参数研究了桥梁跨度、列车速度、车辆轴重、支座刚度、土的剪切波速、桥梁单位质量、桥墩基础埋深等因素对环境的振动影响,并通过线性回归得到比较理想的振动传播衰减预测公式。Kuo^[28]利用现场实测与数值方法相结合的混合模型预测铁路沿线环境振动量值,提高预测精度。Paneiro 等^[29]综合考虑轨道类型、地质条件、建筑类型、列车速度和距离等因素,基于多元线性回归的统计研究,提出里斯本地区地下铁路交通振源作用下的地面振动预测模型。虚拟仪器、物联网、云计算、大数据的发展,为城市轨道交通沿线场地振动数据采集、处理与分析提供技术支持,将推动环境振动预测向着可视化发展。

2.3 城市轨道交通环境振动产生的影响

1) 环境振动对人的影响

人体最敏感的频率范围为竖向振动 4 ~ 8 Hz、水平向振动 1 ~ 2 Hz,刚能感觉到的竖向振动为 10^{-3} m/s^2 (对应 60 dB),不可忍耐的加速度大小为 0.5 m/s^2 (对应 114 dB)^[30-32]。当竖向加速度振级小于 65 dB 时,对睡眠基本无影响;振级为 65 dB 时,70% 浅睡眠状态的人觉醒,振级为 74 dB 时,中度睡眠的人全部觉醒,当振动达 79 dB 时,50% 的熟睡中的人觉醒^[33]。已有实测研究中^[18,34,35],城市轨道交通附近建筑物内的环境振动处在 65 ~ 80 dB 范围,短期内不会对人体健康造成影响,但会影响甚至降低人的生活与工作质量。除此之外,振动还会对视觉产生影响,妨碍集中精力,降低仪表读数精度和阅读速度,给人的工作与生活带来困扰。美^[36]、日^[37]、英^[38]等国结合本国实情,通过测试调查,开展轨道交通环境振动与噪声对人体影响的基础研究,得到适用于本国人体质的暴露-响应关系曲线。我国鲜有类似基础性研究,仅于 2012 年在大连开展过道路-轨道

组合交通噪声污染对城市居民影响的调查研究^[39]。

2) 环境振动对建筑物的影响

城市轨道交通环境振动的振幅与能量较小,一般不会对建筑结构造成影响,但会破坏建筑内饰,如墙皮剥落。对于一些脆性材料建成的古建筑、砌体结构而言,环境振动易造成石材间灰泥开裂,影响灰缝的粘结。捷克的一些砖石结构古建筑因交通环境振动而产生裂缝,我国西安大雁塔、古城墙、杭州六和塔、洛阳龙门石窟等诸多历史遗迹因受振动影响而产生不同程度破坏。现今,建筑业高速发展,长大高柔结构不断涌现,城市轨道交通造成的周边场地环境振动频率在 80Hz 以下,易激励起建筑物基频处振动。楼房地面振动响应随着楼层增高存在振动放大或反弹增大现象,将对建筑物的室内环境产生更大影响^[40-42]。

3) 环境振动对精密仪器的影响

随着半导体、光电、航空航天、汽车、医疗及通信等行业迅猛发展,高精密仪器、设备的应用在社会发展、科技进步中扮演着越来越重要的角色,精密加工设备相关的各项技术日趋成熟,其精度也逐渐接近到纳米级水平,环境振动成为影响超精密加工精度的一个重要因素^[43]。地铁、高铁线路大规模修建不可避免地经过工业园区、医院、科研院所、精密仪器实验室等振动敏感区域,可能降低生产设备加工精度和使用寿命,增加设备工作磨损和工业事故发生率;造成精密仪器仪表损毁或精度下降,产生错误的试验数据。借鉴 IEST(美国环境科学与技术协会)发布的推荐实施规程《洁净室设计注意事项》^[44],马蒙等^[45]研究指出当地铁列车行车时速大于 60 km 时,应采取高级别减振以保证精密仪器正常工作;刘卫丰等^[46]预测了北京地铁 8 号线开通后对科研楼内仪器的影

响,发现地铁振动叠加道路交通振动后,楼内 30 ~ 100 Hz 的振动超出仪器限值,采用浮置板轨道减振后,仍会有部分测点存在 10 Hz 的振动超限;孙晓静等^[47]研究预测北京地铁 16 号线的振动影响,指出钢弹簧浮置板能有效降低 10 ~ 20 Hz 范围振动,减振后,北大新建实验楼外预测点处 10Hz 以下的振动仅满足 VC-C 限值。

3 对城市轨道交通环境振动研究的建议

通过对城市轨道交通环境振动的产生机理与振源特性、传播规律、振动影响三方面的研究综述可以看出,城市轨道交通环境振动问题是一个涉及诸多因素、跨越多个领域的课题。我国城市轨道交通起步晚、发展迅猛,研究工作始于上世纪 80 年代,基础性研究相对落后,在一定程度上限制了城市轨道交通健康平稳地发展。尽管目前国内学者在该领域开展了大量研究并取得一定学术成果,但这些研究系统性不强,数值计算与现场测试联系不紧密。针对上述问题,提出如下建议:

1)注重多种研究手段相结合。理论计算具有普遍性与通用性,对实际工程具有指导意义,但也存在模型过度简化、公式推导繁琐、计算量大等不足。现场实测兼顾列车载重和运行速度、线路形式、地基结构、地质条件、受振体结构等因素影响,能够获取真实准确的振动数据,但测试结果因工况而异,只能针对具体工程,且测试成本高、工作量大、测试易受现场条件制约。随有限单元法理论成熟与计算机硬件、软件发展,基于数值分析理论建立的预测分析模型研究越来越成熟,既能实现多因素耦合,又能避免复杂的人工计算,且节约成本,但也存在模型简化与计算假定带来的计算误差。数值计算方法从经典数学分析方法发展

到有限元和边界元耦合方法,数值计算模型由 2D、2.5D 向着更加复杂、接近实际的 3D 模型发展^[48]。目前,多数学者由纯数值手段研究转变为数值与实测相结合,同时应当注重与理论计算相结合,实现各研究方法优势互补。

2)统一振动测量标准,完善评价体系。目前的环境振动测试与评价标准仍然沿用 1988 年编制的《城市区域环境振动标准》、《城市区域环境振动测量方法》。在环境振动对精密仪器设备的影响方面,大量实验室(如新建实验室、光学平台等)对环境振动的现场测试工作量呈逐年上升趋势,但测试的方法无统一的技术标准可依,各测量单位测试结果呈现形式千差万别,无可比性;对人体影响的评价标准制定较早,但在适用于国人体质的人体暴露 - 响应关系方面缺乏基础性研究,难以满足新时代人们对良好生活环境的需求。尽管目前已有多部轨道交通环境振动影响评价标准^[49-52],但各标准限值之间的振动量描述指标不统一,且描述方式仍以列车通过时的最大 Z 振级为主^[2]。鉴于水平向振动随楼层增高存在放大现象,且轨道转弯处的水平向振动可能超过竖向,测量与评价标准中同时应关注水平向振动。

3)注重综合减振研究。环境振动减振隔振措施主要包括轨道减振、传播路径屏障隔振和受振体减振。由于受振体减振需要结合被保护对象的动力性能、抗微振能力进行具体分析,当前对前两种减振方式的研究较多。而不论是浮置板、减振垫层的轨道减振研究^[53,54],还是空沟、空井、填充沟、排桩、混凝土连续墙、波阻板等传播路径屏障隔振研究^[55-57],仅仅针对某一种减振措施,减振效果有限,实际工程中通常考虑采用综合减振。因此,今后的减振研究应注重对多种减振隔振的组合布置研究,寻找最优的减振隔振组合与最佳

布置方式。

4)实现城市轨道交通环境振动预测的可视化。随着计算机、振动电测技术的进步,虚拟仪器概念的提出,采用虚拟仪器技术实现对城市轨道交通所致环境振动信号的测试与分析成为必然趋势。与此同时,随着人工智能、物联网、云计算与大数据时代的到来,振动测试仪器将向虚拟化、网络化、智能化方向发展,全国诸多高校致力于虚拟仪器技术研究、振动实时监测与分析系统的研发^[58,59],有望通过城市轨道交通环境振动实时监测实现环境振动预测的可视化。

参考文献

- [1]崔学忠,贾文峥.城市轨道交通蓝皮书:中国城市轨道交通运营发展报告(2017—2018)[M].北京:社会科学文献出版社,2018.
- CUI Xuezhong, JIA Wenzheng. Blue Book of Urban Rail Transit: Report on the Development of Urban Rail Transit Operation in China (2017-2018) [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2018.
- [2]刘维宁,马蒙,刘卫丰,等.我国城市轨道交通环境振动影响的研究现况[J].中国科学(技术科学),2016,46(6):547-559.
- LIU Weining, MA Meng, LIU Weifeng, et al. Overview on Current Research of Environmental Vibration Influence induced by Urban Mass Transit in China[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2016, 46(6):547-559.
- [3]翟婉明.车辆-轨道耦合动力学研究的新进展[J].中国铁道科学,2002,23(2):1-14.
- ZHAI Wanming. New Advance in Vehicle-Track Coupling Dynamics[J]. China Railway Science, 2002, 23(2):1-14.
- [4]杨宜谦.地铁和铁路环境振动源[J].环境工程,2013,31(S1):654-658,746.
- YANG Qianyi. Environmental Vibration Source from Metro and Railway[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(S1):654-658,746.
- [5]MADSHUS C, KAYNIA A. High-speed Railway Lines on Soft Ground: Dynamic Behaviour at Critical Train Speed[J]. Journal of Sound Vibration, 2000, 231(3):689-701.
- [6]KOUROUSSIS G, CONNOLLY D P, ALEXANDROU G, et al. The Effect of Railway Local Irregularities on Ground Vibration[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 39:17-30.
- [7]高广运,李志毅,冯世进,等.秦一沈铁路列车运行引起的地面振动实测与分析[J].岩土力学,2007(9):1817-1822,1827.
- GAO Guangyun, LI Zhiyi, FENG Shijin, et al. Experimental Results and Numerical Predictions of Ground Vibration induced by High-speed Train Running on Qin-Shen Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(9):1817-1822,1827.
- [8]张光明,贺玉龙,梅昌良,等.铁路桥梁段环境振动频段预测方法[J].安全与环境学报,2015,15(1):285-288.
- ZHANG Guangming, HE Yulong, MEI Changgen, et al. Forecasting Method for the Dividing Frequency Bands as to the Environmental Vibrations in the Railway Bridge Section[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1):285-288.
- [9]曹宇静.城市轨道交通环境影响评价振动预测模型对比分析[J].噪声与振动控制,2017,37(2):192-196.
- CAO Yujing. Comparison and Analysis of Vibration

- Prediction Models in Environmental Impact Assessment of Urban Rail Transit[J]. Noise and Vibration Control, 2017, 37(2):192-196.
- [10] 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, 61-62:269-285.
- [11] 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 Yimin, ZENG Zemin, ZOU Chao, 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.
- [12] 李小珍, 刘全民, 张迅, 等. 高架轨道交通附近自由地表振动试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(16):56-61.
- LI Xiaozhen, LIU Quanmin, ZHANG Xun, et al. Ground Vibration Induced by Inter-city Express Train[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(16):56-61.
- [13] HECKL M, HAUKE G, WETTSCHURECK R. Structure-borne Sound and Vibration from Rail Traffic[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1):175-184.
- [14] AUERSCH L. Ground Vibration due to Railway Traffic-The Calculation of the Effects of Moving Static Loads and Their Experimental Verification [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293:599-610.
- [15] 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):21-28.
- 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):21-28.
- [16] 李德武. 列车振动荷载的数定分析[J]. 甘肃科学学报, 1998, 10(2):25-29.
- LI Dewu. A Deterministic Analysis of Dynamic Train Loading [J]. Journal of Gansu Sciences, 1998, 10(2):25-29.
- [17] 张玉娥, 白宝鸿. 地铁列车振动对隧道结构激励荷载的模拟[J]. 振动与冲击, 2000, 19(3):68-76.
- ZHANG Yu'e, BAI Baohong. The Method of Identifying Train Vibration Load Acting on Subway Tunnel Structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(3):68-76.
- [18] 雷晓燕. 高速铁路轨道动力学:模型、算法与应用[M]. 北京:科学出版社, 2015.
- LEI Xiaoyan. High Speed Railway Track Dynamics: Model, Algorithm and Application [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [19] 刘维宁, 马蒙. 地铁列车振动环境影响的预测、评估与控制[M]. 北京:科学出版社, 2014.
- LIU Weining, MA Meng. Metro Train Induced Environmental Vibrations: Prediction, Evaluation and Control [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [20] 夏禾, 张楠. 车辆与结构动力相互作用 [M]. 第2版. 北京:科学出版社, 2005.
- XIA He, ZHANG Nan. Dynamic Interaction of Vehicle and Structure [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2005.
- [21] 马利衡. 沪宁城际高速铁路振动及其对周围环境影响研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015.

- MA Liheng. Research on Vibration of Shanghai-Nanjing Intercity High-speed Railway and Its Environmental Impact[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [22] 吴世明. 土动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- WU Shiming. Soil Dynamics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [23] 闫维明, 聂晗, 任珉, 等. 地铁交通引起的环境振动的实测与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 187-191.
- YAN Weiming, NIE Han, REN Min, et al. In situ Experiment and Analysis of Environmental Vibration Induced by Urban Subway Transit[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(4): 187-191.
- [24] 曹艳梅, 王福星, 张允士. 高速列车作用下场地振动的分析方法及特性研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(6): 118-124.
- CAO Yanmei, WANG Fuxing, ZHANG Yunshi. Analysis Method and Vibration Characteristics of Field Vibrations Induced by High-speed Trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(6): 118-124.
- [25] 杨先健. 动力机械引起的地面振动衰减[J]. 湖南大学学报, 1982(3): 12-18.
- YANG Xianjian. Attenuation of Ground Vibration Induced by Dynamical Machinery[J]. Journal of Hunan University, 1982(3): 12-18.
- [26] 茅玉泉. 交通运输车辆引起的地面振动特性和衰减[J]. 建筑结构学报, 1987(1): 67-77.
- MAO Yuquan. Characteristics and Attenuation of Ground Vibration Caused by Traffic Vehicle[J]. Journal of Building Structures, 1987(1): 67-77.
- [27] 陈建国, 夏禾, 曹艳梅. 高架轨道交通引起的环境振动影响分析与预测[J]. 工程力学, 2012, 29(2): 285-291.
- CHEN Jianguo, XIA He, CAO Yanmei. Analysis and Prediction on Environmental Vibration Induced by Elevated Rail Transit[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(2): 285-291.
- [28] KUO K A, VERBRAKEN H, DEGRANDE G, et al. Hybrid Predictions of Railway Induced Ground Vibration Using a Combination of Experimental Measurements and Numerical Modelling[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 373: 263-284.
- [29] PANEIRO G, DURAO F O, SILVA M C, et al. Prediction of Ground Vibration Amplitudes due to Urban Railway Traffic Using Quantitative and Qualitative Field Data[J]. Transportation Research Part D, 2015, 40: 1-13.
- [30] ISO2631-2, 2003(E), Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration-Part 1: General Requirements[S]. [S.1]: ISO Copyright Office, 2003.
- [31] 董霜, 朱元清. 环境振动对人体的影响[J]. 噪声与振动控制, 2004(3): 22-25.
- DONG Shuang, ZHU Yuanqing. Effects of Environmental Vibration on Man[J]. Noise and Vibration Control, 2004(3): 22-25.
- [32] 杜阳阳. 环境振动下人体动力特性和舒适度评价[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- DU Yangyang. Vibration Characteristic of Human Body and Comfort Evaluation under Ambient Vibration[J]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.
- [33] 公害防止的技术与法规编辑委员会. 公害防止技术与法规振动篇[M]. 北京: 化学工业出版社

- 社,1988.
- Editorial Board of Technology and Regulations for the Prevention of Public Hazards. Vibration of Public Hazards Prevention Technology and Regulation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988.
- [34] 夏禾,张楠,曹艳梅. 列车对周围地面及建筑物振动影响的试验研究[J]. 铁道学报,2004(4): 93-98.
- XIA He,ZHANG Nan,CAO Yanmei. Experimental Study of Train-induced Vibrations of Ground and Nearby Buildings [J]. Journal of the China Railway Society,2004(4):93-98.
- [35] 刘力,王文斌,陈曦,等. 城市轨道交通运营引起建筑物内振动超标治理研究[J]. 铁道标准设计,2015,59(8):150-155.
- LIU Li,WANG Wenbin,CHEN Xi,et al. Study on Excessive Vibration in Buildings Caused by Urban Rail Transit [J]. Railway Standard Design, 2015,59(8):150-155.
- [36] ZAPFE J A, SAURENMAN H, FIDELL S. Ground-borne Noise and Vibration in Buildings Caused by Rail Transit [R]. Toronto: Transportation Research Board of the National Academies, 2009.
- [37] YANO T, MORIHARA T, SATO T. Community Response to Shinkansen Noise and Vibration: A Survey in Areas along the Sanyo Shinkansen Line [C].// [S. n.]. Forum Acusticum 2005. Budapest: European Acoustics Association, 2005: 1837-1841.
- [38] SICA G,PERIS E,WOODCOCK J S,et al. Waddington. Design of Measurement Methodology for the Evaluation of Human Exposure to Vibration in Residential Environments [J]. Science of the Total Environment,2014,482-483:461-471.
- [39] DI Guoqing,LIU Xiaoyi,LIN Qili,et al. The Relationship between Urban Combined Traffic Noise and Annoyance:An Investigation in Dalian,North of China [J]. Science of the Total Environment, 2012,432:189-194.
- [40] 高广运,陈娟,朱林圆. 上海地铁荷载作用下邻近建筑物振动响应分析[J]. 噪声与振动控制, 2016,36(6):136-141.
- GAO Guangyun,CHEN Juan,ZHU Linyuan. Numerical Analysis of the Vibration Impact Induced by Underground Moving Trains on Surrounding Buildings in Shanghai [J]. Noise and Vibration Control,2016,36(6):136-141.
- [41] 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): 176-181.
- ZHENG Guochen,QI Kai. Prediction of Vibration Response of Buildings Induced by Subway Operations [J]. Noise and Vibration Control,2015,35(1):176-181.
- [42] 于凯文,金浩. 地铁运营对沿线不同基础型式建筑物的振动影响[J]. 华东交通大学学报, 2017,34(2):37-44.
- YU Kaiwen,JIN Hao. Influence of Metro Operation on Vibration of Buildings with Different Foundations along the Metro Line [J]. Journal of East China Jiaotong University,2017,34(2):37-44.
- [43] 袁巨龙,王志伟,文东辉,等. 超精密加工现状综述[J]. 机械工程学报,2007(1):35-48.
- YUAN Julong,WANG Zhiwei,WEN Donghui,et al. Review of the Current Situation of Ultra-prec-

- sion Machining [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007(1):35-48.
- [44] IEST-RP-CC012. 2, Considerations in Cleanroom Design [S]. Walden: Institute of Environmental Sciences and Technology, 2007.
- [45] 马蒙, 刘维宁, 丁德云, 等. 地铁列车振动对精密仪器影响的预测研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(3):185-190.
- MA Meng, LIU Weining, DING Deyun, et al. Prediction of Influence of Metro Trains Induced Vibration on Sensitive Instruments [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3):185-190.
- [46] 刘卫丰, 刘维宁, 聂志理, 等. 地铁列车运行引起的振动对精密仪器影响的预测研究 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(8):18-23.
- LIU Weifeng, LIU Weining, NIE Zhili, et al. Prediction of Effects of Vibration Induced by Running Metro Trains on Sensitive Instruments [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(8):18-23.
- [47] 孙晓静, 袁扬, 马蒙, 等. 地铁列车运行引起远场低频振动响应预测研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(4):198-202.
- SUN Xiaojing, YUAN Yang, MA Meng, et al. Prediction of Metro Train-induced Low Frequency Vibration Responses in Far Field [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4):198-202.
- [48] CONNOLLY D P, KOUROUSSIS G, LAGHROUCHE O, et al. Benchmarking Railway Vibrations-Track, Vehicle, Ground and Building Effects [J]. Construction and Building Materials, 2015, 92:64-81.
- [49] GB10070-88, 城市区域环境振动标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- GB10070-88, Standard of Environmental Vibration in Urban Area [S]. Beijing: Standards Press of China, 1988.
- [50] HJ453-2008, 环境影响评价技术导则—城市轨道交通 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- HJ453-2008, Technical Guidelines for Environment Impact-assessment of Urban Rail Transit [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.
- [51] JGJ/T170-2009, 城市轨道交通引起建筑物振动及二次辐射噪声限值及其测量方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- JGJ/T170-2009, Standard for Limit and Measuring Method of Building Vibration and Secondary Noise Caused by Urban Rail Transit [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [52] GB50868-2013, 建筑工程容许振动标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- GB50868-2013, Standard for Allowable Vibration of Building Engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [53] 韦凯, 周顺华, 翟婉明, 等. 地铁与建筑物合建中不同固有频率钢弹簧浮置板轨道的适用性分析 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(11):134-142.
- WEI Kai, ZHOU Shunhua, ZHAI Wanming, et al. Applicability of Steel-spring Floating-slab Tracks of Different Natural Frequencies for Integrated Metro-and-Building Structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(11):134-142.
- [54] 辛涛, 张琦, 高亮, 等. 高速铁路 CRTS III 型板式无砟轨道减振垫层动力影响及结构优化 [J]. 中国铁道科学, 2016, 37(5):1-7.
- XIN Tao, ZHANG Qi, GAO Liang, et al. Dynamic

- Effects and Structure Optimization of Damping Layers of CRTS III Slab Ballastless Trace for High Speed Railway[J]. China Railway Science, 2016, 37(5):1-7.
- [55] 雷晓燕, 刘庆杰, 伍明辉, 等. 高速、重载铁路环境振动控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2008(5):1-6.
- LEI Xiaoyan, LIU Qingjie, WU Minghui, et al. Investigation of Environmental Vibration Control for High Speed and Heavy Haul Railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008(5):1-6.
- [56] 谢伟平, 常亮, 杜勇. 中南剧场隔振措施分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11):1720-1725.
- XIE Weiping, CHANG Liang, DU Yong. Analysis on Vibration Isolation of Zhongnan Theater[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(11):1720-1725.
- [57] 高广运, 王非, 陈功奇, 等. 轨道交通荷载下饱和地基中波阻板主动隔振研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(3):433-440.
- GAO Guangyun, WANG Fei, CHEN Gongqi, et al. Active Vibration Isolation of the Saturated Ground with Wave Impedence Block inside and under the Load of the Travelling Train[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(3):433-440.
- [58] 王迪. 基于虚拟仪器的振动测试分析系统研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2014.
- WANG Di. Study on System for Vibration Test and Analysis Based on Virtual Instruments[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [59] 刘庆杰, 孙茂棠, 雷晓燕. 铁路环境振动实时监测分析系统开发[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(5):53-58, 63.
- LIU Qingjie, SUN Maotang, LEI Xiaoyan. Development of Real-time Monitoring and Analysis System for Railway Environmental Vibration[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(5):53-58, 63.