我国城市轨道交通环境振动影响的研究现况

刘维宁*, 马蒙, 刘卫丰, 孙晓静, 孙方道

北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044

* E-mail: wnlui@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2015-12-28; 接受日期: 2016-02-26; 网络出版日期: 2016-04-22

国家自然科学基金(批准号: 51278043, 51508022, 51408033)资助项目

摘要 明确给出了交通环境振动的一般强度、频率与传播特征. 分析了城市轨道交通环境振动问题的 12 个主要影响因素, 总结了目前我国正在研究的 8 个主要方面和面临的 3 个主要问题, 即行业标准与评价方法、振动传播与辐射噪声的预测以及减隔振技术工程的实施. 作为当前城市轨道交通发展最快、规模最大的国家, 我们必须开展交通环境振动相关标准的基础性研究工作, 完善相应的规范编制; 深入开展列车振动、道路交通振动振源输入谱及其传播计算方法的理论研究工作, 结合大数据及云计算技术, 推动交通环境振动预测的可视化进程; 促进轨道交通行业在项目可行性研究、初步设计及工程实施的全过程中, 将交通环境振动的综合减振降噪优化工作纳入其方案规划、线路布局、产品准入、结构设计以及工后验收评估等关键工作环节中.

关键词 城市轨道交通, 交通环境振动, 振动评价, 减振技术

1 引言

1.1 交通环境振动的定义

在日常生活中, 人们常会遭受来自周围环境的各类振动对工作及生活的影响, 比如各类施工设备以及工业设备运转振动的影响. 最近几十年, 随着我国交通事业的迅猛发展, 城市轨道交通、铁路交通、道路交通等各类交通车辆运行振动所带来的环境振动影响也越来越突出. 相比施工设备以及固定位置工业设备振动的影响, 交通车辆运行所带来的影响

涉及的范围更加广泛, 而且有着明显的特殊性质, 比如振动的幅频特性与车辆运行速度高度相关. 作者在总结近十多年此类研究成果的基础上, 为了推动这门学科的全面发展, 从交通车辆振动对环境影响的角度, 给出交通环境振动的一般强度、频率与传播特征. 希望有助于界定一些模糊不清的认识.

所谓交通环境振动, 是指由地面、地下或高架线路有轨或无轨交通运载车辆所产生的, 传播至地表环境的具有与车辆运行状态相关的持续性小幅振动, 感受这种振动的时长是 365 d/a, 16~18 h/d. 对于暴露

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 547~559
Liu W N, Ma M, Liu W F, et al. Overview on current research of environmental vibration influence induced by urban mass transit in China (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 547~559, doi: 10.1360/N092015-00334

于其中的建筑结构以及建筑物内的艺术作品、振动敏感设备、人或动物等可能产生不利影响。长期暴露于这种交通环境振动中,可能致使结构薄弱部位的耐久性降低、壁画或雕塑等艺术品损伤、振动敏感设备无法正常工作。振动以及诱发的建筑结构二次噪声的影响,还会使人的工作、生活质量下降,甚至影响身心健康。这种振动的影响频率范围一般在 200 Hz 以内,显著频率在 20~80 Hz,经地层衰减后,通常地表振动速度响应峰值不超过 1 mm/s 或最大 Z 振级不超过 85 dB(地面交通车辆的,距离行车道 30 m 以内区域除外)。这种交通环境振动的响应强度,随距行车道横向距离的增加呈“起伏式”衰减,其显著频率的振动影响范围,土质地层条件下在行车道两侧 100 m 以内,而较低频率的振动影响可达 200 m 以上。

1.2 轨道交通环境振动的影响

目前,我国正处于城市轨道交通的高速发展阶段.截至2014年底^[1],我国已有22个城市的97条城市轨道交通线路投入运营,总里程达2934 km.现阶段有35个城市共126条线路(含续建段)在紧张建设中,总

共在建里程超过 3000 km. 同时, 已发展和规划发展城市轨道交通的城市总数已经超过 54 个, 全部规划线路超过 480 条, 总里程超过 23000 km.

尤其是随着城市轨道交通路网的加密, 轨道线路走向或埋深设计愈加难以绕避环境振动敏感点. 仅以北京为例, 近十余年形成的密集的交通网络(图 1), 在高峰时段同时有 490 列编组车辆在地下运行. 再叠加日益增加的路面交通量, 使得北京市区距离行车道 100 m 以内区域的环境振动水平在短期内提高了近 20 dB, 对临近线路人员的工作生活质量、振动敏感设备的正常使用和古建筑的保护正在产生直接影响. 北京地铁 3 号线、6 号线、8 号线、16 号线等多条线路为确保古建筑不发生损伤或振动敏感设备的正常使用而被迫改线, 广州、西安等古老城市, 为了绕避环境振动敏感点而被迫调整路网的案例比比皆是, 这种情况直接影响或降低了快速轨道交通的路网效率. 与此同时, 为满足城市环境对交通振动控制的需要, 在地铁线路上大量采用不同等级的轨道减振措施(分中等、高等和特殊等级三种), 且采取减振措施的铺轨里程不断上升. 北京、上海、广州、

图 1 (网络版彩图)北京地铁 2015 年运营线路图

深圳城市轨道交通线路中, 减振措施占全线比例大多在 40% 以上, 个别线路超过 50%^[2], 最近开始建设的北京地铁 16 号线, 仅特殊等级的减振措施用量就占全线总长 40% 以上。

不同种类轨道减振措施的大量使用, 一方面带来了投资压力, 另一方面也降低了轨道结构的刚度平顺性, 甚至引起了较大规模的钢轨异常波磨等轨道病害, 大大增加了轨道结构与车辆的维护工作量与成本, 对行车安全造成了隐患。尽管如此, 由于我国缺乏对交通环境振动承受限值标准体系的基础性研究, 同时评估体制与交通工程建设工程不协调, 法制不健全, 以及预测方法研究、成果应用转化缺失评价监管等各种不确定性因素的综合结果, 导致几乎所有新线开通运行后, 居民对振动噪声的投诉越来越多^[3], 甚至自发举行抗议活动。同时, 伴随着车辆基地的商业房地产开发, 控制交通振动环境影响是其建筑品质的关键要素之一。因此可以断言, 交通环境振动的预测评估及控制问题, 目前已经成为制约我国城市轨道交通规划与建设的瓶颈因素之一。

2 轨道交通环境振动的主要影响因素

交通环境振动是由轨道交通与地面或高架的非轨道交通共同引发的, 但是其中轨道交通占主要贡献。目前这个问题, 已经由个别线路的影响正在发展成为整个交通路网的区域性问题的, 因此研究交通环境振动的重点是轨道交通的贡献程度。本文的讨论也集中于此。

轨道交通网区域环境振动的影响是一个十分复杂的系统问题, 总体上看, 至少包括如下 12 个主要影响因素。

1) 轨道结构。轨道既是引起列车振动的主要振源之一, 也是承担和传递振动的第一子结构。因此轨道的结构型式、材料组成及其相应的动力特性极大地影响着轨道交通环境振动的特性。轨道结构型式的动力特性随着轨道单元的质量、刚度和阻尼的不同而改变。改变轨道的动力特性意味着直接改变了振源的频率组成及振动强度。对轨道结构动力特性的合理优化, 可设计出不同的减振轨道产品; 相反, 不合理的设计会恶化轮轨相互作用关系。

2) 车辆结构。包括车辆的类型、轴重、轴距、悬挂特性等。车辆的轴重影响着振动准静态低频分

量的能量集度, 而列车各轮轴间的相对位置关系则直接影响着振源的频率特性。如图 2 所示, 除扣件间距外的 4 种特征距离构成不同行车车速下引发的 4 种通过频率。

3) 行车速度。当列车匀速运行时, 行车车速 v , 特征距离 L 与特征频率 f 满足如下关系:

$$f = \frac{v}{L}. \quad (1)$$

通常轨道交通由轨道和车辆特征距离引发的特征频率主要在 40 Hz 以下的低频段。另外, 对于城市轨道交通来说, 其站间距相对较小, 约 30% 的线路上列车运行处于变速行驶状态。而且列车在进出站时的频繁加速与减速, 比城际列车的加速度要高出许多。研究表明^[5]: 当通过速度相同时, 变速移动荷载作用下轨道结构的动力响应超过匀速荷载通过时的响应, 即列车频繁的加减速是交通环境振动影响研究中不容忽视的一个问题。

4) 车辆-轨道相互作用。列车运行引起的振动通常可分为准静态激励和动态激励两部分^[6]。准静态激励与轴重的静态成分相关, 其频率相对较低; 动态激励与车辆-轨道动力相互作用相关, 其频率相对较高。轨道不平顺、车轮圆顺度是造成动态激励的主要诱因。特征波长、行车速度与频率也满足(1)式的关系, 如图 3 所示。

5) 轨道和车辆的养护维修水平。车辆和线路的工作状态, 尤其轮轨关系, 对振动噪声有较大影响, 钢轨和车轮打磨、扣件维修、轮轨接触面摩擦管理以及小半径曲线等养护技术和维修管理水平, 与轨道交通环境振动影响及噪声水平直接相关。

6) 行车密度和运量。城市及城际轨道交通属于高密度大运量交通系统, 行车密度直接影响城市轨道交通振动作用持续的时间。通常情况下, 一列地铁列车通过时, 在地面建筑物上引起振动的持续时间大约为 10~15 s, 很多线路在高峰小时发车间隔可降

图2 车辆与轨道特征距离^[4]

1, 扣件间距; 2, 转向架内轴距; 3, 转向架间轴距; 4, 车辆内轴距; 5, 车辆间轴距

图3 (网络版彩图)特征波长、车速与频率的关系

至 2 min 甚至更短, 再加上交汇运行和相邻线路振动影响的相互传播作用, 交通环境振动的影响持续时间可达到总运营工作时间的 80% 以上. 而且随着早晚高峰与非高峰时段的运量不同, 振动量级的大小也有明显变化.

7) 线路条件. 线路条件包括曲线半径、坡度、道岔、线间距等. 大量实测表明^[7], 列车在曲线上运行时, 地表的横向振动分量明显增加. 一般城市轨道交通线路的曲线长度可达整个线路长度的 80% 以上, 计算分析表明^[8]: 曲线轨道的振动响应大于直线轨道的响应, 且响应频谱更为丰富.

8) 桥梁、隧道结构类型. 不同型式或跨度的桥梁结构以及不同型式的隧道结构会引起地表环境振动特性的差异. 以隧道结构为例, 研究表明^[9]: 圆形隧道的尺寸改变会影响垂直于隧道径向的波的传播. 当隧道尺寸明显小于土中波长时, 尺寸效应并不明显; 随着隧道尺寸的增大, 不同隧道模态的贡献会引起较高频率的差异. 而隧道截面形状则会引起地表近场振动的差异, 而在远场这种差异较小.

9) 振动敏感点距线路中心的距离. 总体上交通环境振动随离开振源距离的增大而衰减, 但具体到某一频率分量则表现为起伏式衰减, 即这类振动的衰减并非一致单调, 频率越低这种衰减的起伏越明显. 与地面线列车环境振动问题相比, 地下线路的埋置会造成土体中体波与面波的复杂叠加效应, 研究表明当距离线路中心线水平距离与隧道埋深量值大体相当时, 会出现一个较为明显的振动放大区^[10,11]. 因此, 受隧道埋深、建筑物基础、地下管线等因素影

响, 随敏感点距线路中心距离的增加, 地表总的振动衰减也可能出现局部放大现象, 这都会增加对其进行预测评价的难度、影响预测精度.

10) 地质条件. 各地轨道交通线路间的地质条件千差万别, 即使同一条线路也会穿越各种不同的地质区域. 地质条件差异和不确定性大大加剧了交通环境振动影响预测的技术难度.

11) 房屋建筑结构的特性. 建筑物体量、楼层数、平面布置、基础型式、建筑材料等因素的不同会直接影响建筑物周边地表环境振动场的改变以及建筑物内振动及二次噪声的传播与分布.

12) 受振体对交通振动承受的限值标准和范围. 建筑结构、仪器设备、人体对振动频率、幅值和持时的敏感程度、承受能力都有很大差异. 确定合理的限值标准是轨道交通环境振动评价的必要条件.

3 目前正在研究的问题

随着我国城市轨道交通的大规模建设, 由此引发的交通环境振动问题已得到业内学者的广泛关注. 目前正在研究的问题主要包括如下 8 个方面.

1) 列车振源特性. 现场测试和模拟计算是获取列车振源特性的两种主要手段. 20 世纪 90 年代, 潘昌实和谢正光^[12]对北京地铁区间隧道进行了振动测试. 随着地铁路网的加密、各类减振轨道的广泛使用, 现场测试已成为评价轨道减振效果、获取环境影响评价所需源强量值、验证与校核计算模型等不可或缺的研究手段. 北京交通大学^[13~15]、中国铁道科学研究院^[16,17]、北京市劳动保护科学研究所^[18,19]等单位, 对此均进行了大量的振源测试与分析工作. 在振源的车轨耦合模拟计算方面, 翟婉明^[20]、雷晓燕^[21]、刘维宁等人^[22]、夏禾等人^[23]均建立了车辆-轨道耦合模型, 可获得模型中列车荷载激励并进行交通环境振动的相关研究.

2) 振动波在地层与建筑结构中的传播特性. 其中包括振动波在不同埋深条件下随距离的传播范围和衰减梯度, 以及振动在建筑结构中的传播与衰减. 闫维明等人^[24,25]、栗润德等人^[26]、楼梦麟等人^[27]、袁扬等人^[7]、邹超等人^[28]对不同地铁线路(包括直线段、曲线段、车辆段)进行了大量的现场测试与分析. 由于不同线路所处地质条件、车辆轨道型式等因素的差异, 地表响应量值也不同. 但总体上, 直线地段的地表响

应以竖向振动为主, 而曲线地段表现为以水平振动为主. 响应频率成分在 50~80 Hz 占优势, 振动能量总体上随距离衰减, 但特定范围存在局部放大. 振动在建筑结构中的传播规律研究主要包括振动随楼层增加的变化规律^[29,30]、同一楼层振动分布规律^[31]、地铁与建筑物合建问题^[32]、以及近年来逐渐凸显的地铁车辆段上盖物业振动问题^[33~35].

3) 结构辐射噪声. 由交通环境振动引发的结构噪声是另一类复杂的问题. 这类问题分两个方面, 1) 行车引起桥梁结构振动产生噪声, 经由空气介质传播增加了周边的声环境污染; 2) 列车振动引发的建筑结构振动在室内造成的二次噪声影响. 工程上时常出现环境振动符合规范限值但结构辐射噪声超标的情况. 在这方面, 辜小安等人^[36]探讨了城市轨道交通列车运行引起的建筑物二次噪声、相关标准及评价量. 张海滨等人^[37]和蒋伟康等人^[38]建立城市高架轨道交通噪声辐射预测模型, 并通过测试手段分析了模型的适用性, 在此基础上测试分析了道间声屏障和动力吸振阻尼钢轨技术工程应用效果. 高飞等人^[39]应用列车通过高架桥梁时的噪声预测模型, 对由结构噪声和轮轨振动引起的高架结构附近的噪声传播规律进行了研究.

4) 预测方法. 工程中目前常见的振动环境响应预测方法包括参数法(含解析法、数值法)、经验法和半经验法^[40]. 在工程可行性研究阶段, 环评预测以经验法或半经验法为主, 其简单便捷但精度有限. 在项目初步设计与施工图设计阶段, 线路及振动敏感目标往往有较大的调整, 因此基于工程可行性的环评报告经验预测, 其预测精度常常难以保证, 需要依靠数值法结合实测校准进行建模分析, 这一方法虽可提高预测精度但耗时较长. 理想的环境振动影响预测不仅要具备较高的预测精度, 同时也要兼顾经济与效率. 在这一方向的研究上, 结合轨道交通的整体规划、设计与施工周期, 刘维宁等人^[40]和马蒙等人^[41]提出了分区、分类、分阶段进行动态预测及环评的理论与方法(图 4), 以及敏感目标的敏感度定义及其分级方法: 环境振动“敏感度” S 由承振能力 T 与激励强度 Q 之间的接近程度描述

$$S = \|T - Q\|. \quad (2)$$

则敏感度的数学定义可以表述为: 激励强度 Q 的分布为 F 时, 在所有构成激励强度 F 的激励中, 超出目标受振体承振能力 T 的标准值 k 的概率, 表示为

图 4 (网络版彩图)轨道交通环境振动分区、分类、分阶段动态预测方法

$$S = P(F > k) = 1 - P(F \leq k). \quad (3)$$

在此理论指导下, 刘维宁等人^[22,40]提出了提高预测精度的“两位校准预测法”, 并将该方法用于西安地铁对钟楼的振动影响预测中^[42]. 为了解决针对特殊高敏感度目标的精确预测问题, 王文斌等人^[43]、Zhang 等人^[44]探索采用实测传递函数法来解决土层振动衰减预测的不确定性. 进一步, 袁扬^[45]提出了单点列脉冲激励的精确预测的误差估计方法. 最终, 由吴宗臻等人^[46]给出了针对特殊高敏感度目标实施精确预测的实测传递函数列预测方法(图 5).

这样一来, 按照工程项目进展及预测精度进行分类, 上述预测方法实际上可分类为初步预测、确认预测和精准预测三大类别, 分别对应于工程可行性研究、方案设计和施工图设计三个工程建设阶段. 初步预测方法包括经验法及半经验法, 确认预测方法

图5 (网络版彩图)基于深孔激励的实测传递函数列预测方法
(a) 预测原理示意图; (b) 现场测试

包括经过实测校准的参数法, 精准预测方法则为实测传递函数列预测法。各类预测方法的工作成本也存在差异(表 1)。

5) 标准与评价。轨道交通振动环境影响评价量与评价限值因敏感目标的类别存在较大差异。表 2

表 2 国内轨道交通影响评价常用标准

标准	评价量	指标描述方式 ^{a)}	适用敏感目标
城市区域环境振动标准 ^[47]	加速度	$VL_{z,max}$	城市区域
环境影响评价技术导则—城市轨道交通 ^[48]	加速度	预测量为 $VL_{z,10}$ 和 $VL_{z,max}$, 评价量为 $VL_{z,10}$	敏感建筑
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 ^[49]	加速度	分频 VL_{max}	敏感建筑
地铁噪声与振动控制规范 ^[50]	加速度	$VL_{z,max}$	敏感建筑
城市轨道交通(地下段)列车运行引起的住宅室内振动与结构噪声限值及测量方法(上海市) ^[51]	加速度	$VL_{z,max}$	建筑室内
古建筑防工业振动技术规范 ^[52]	速度	PPV	古建筑结构
建筑工程容许振动标准 ^[53]	速度	PPV	建筑结构
隔振设计规范 ^[54]	速度或位移	最大值或 1/3 倍频程有效值	对振动敏感的精密仪器设备

a) $VL_{z,max}$ 为最大 Z 振级; $VL_{z,10}$ 为累计百分振级; VL_{max} 为分频最大振级; PPV 为速度时域最大值

表 3 用于轨道减振试验的常用定点激励设备

振源类型	激励设备	适用范围	优缺点	设备图片及源文献
脉冲激励	落锤	实验室、现场测试	便携、锤头可调、激励频带宽, 锤击质量小	图 6 ^[55,56]
	车辆轮对	实验室、现场测试	锤击质量大, 在线测试需大型起吊设备、测试信号会出现多次反弹	图 7 ^[57]
	带锤头落轴	实验室	纵向可移动、锤头可调高、锤击同步性好, 无法用于在线测试	图 8(作者摄)
扫频激励	大型扫频激振仪	实验室	有预载, 只能实施低频(<35 Hz)激励、无法用于在线测试	图 9(作者摄)
	小型扫频激振器	实验室、现场测试	-	图 10 ^[56]
	扫频激振车	隧道内在线测试	只能用于铺轨前、且要求大型马蹄形断面隧道	图 11 (http://www.stce.at/leistungen/vibroscan.html)
随机激励	简易随机激励设备	实验室、在线测试	设备简单、操作便捷, 但无法测试激振力	图 12 ^[56]

总结了国内城市轨道交通振动环境影响评价中各标准使用的评价量及适用范围。这些标准包括国家标准、行业标准和地方标准, 其中评价城市区域与敏感建筑所使用的指标描述方式, 以列车通过时间的最大 Z 振级为主。

6) 轨道试验测试技术。振动试验测试主要包括了现场测试和实验室测试。现场测试和实验室测试时, 用于轨道减振试验的激励振源除运行列车外, 还包括脉冲激励、扫频激励和随机激励。见诸文献的代表性设备见表 3 和图 6~12。从频率角度看, 表 3 中各类激励方式均是在关心频率范围内提供激励源, 激

表 1 预测方法分类表

	预测适用阶段	可靠性	预测成本
初步预测	可行性研究	低	低
确认预测	方案设计	中	中
精准预测	施工图设计	高	高

图 6 (网络版彩图)自动落锤激励装置

图 7 (网络版彩图)落轴(轮对)装置

图 8 (网络版彩图)纵向可移动式自由落轴激振设备

发轨道在不同频率的固有特性,从而实现对轨道动力特性和振动传递特性的分析.

7) 减振技术. 城市轨道交通减振工程现阶段主

图 9 (网络版彩图)偏心式大型轨道扫频激振器

图 10 (网络版彩图)DYNAQ®偏心式(左)和 BUTTERFLY®液压式(右)小型扫频激振器

图 11 (网络版彩图)扫频激振车

图 12 (网络版彩图)简易随机激励设备

要采用轨道减振措施,按照产品减振效果划分为中等减振、高等减振和特殊减振,研究人员针对减振扣件^[58-60]、梯形轨枕^[61-64]、浮置板轨道^[65]等主流减振措施进行了相关测试、试验研究及参数分析,此外,金浩和刘维宁^[66,67]利用多元连续函数蚁群算法,对梯形轨枕参数进行了多目标耦合分析以优化其减振效果.王志强等人^[68]提出一种新型组合式减振道床.杨吉忠等人^[69]提出了控制低频振动的被动式动力减振轨道结构.黄舰等人^[70]提出了喷涂型地铁阻尼防护材料用于地铁减振的设想.除轨道减振技术外,传播路径减振、建筑物隔振的工程实施案例相对较少.楼梦麟等人^[71,72]对地铁附近安装有隔振支座的建筑物及有地下连续墙的建筑物分别进行了测试.葛家琪等人^[73]分析了成都博物馆采用隔振支座等措施后对地铁振动的控制.对于波阻块、传播路径屏蔽隔振、周期性结构隔振技术等目前在我国主要停留在理论分析阶段.

8) 与轨道减振相关的钢轨异常波磨问题.伴随着轨道减振措施使用量的大幅增加,钢轨异常波磨也在全国各地不同线路上相继出现.以北京为例,北京地铁4号线、5号线、6号线、10号线一期、房山线等线路开通不久就出现了严重的钢轨波磨^[74,75].其中4号线除钢弹簧浮置板轨道外,其余各种减振轨道结构型式(轨道减振器扣件、梯形轨枕、先锋扣件)均发生钢轨异常波磨^[76].而10号线一期除上述减振路段(主要为Ⅲ型轨道减振器扣件)外,个别浮置板轨道路段和整体道床路段也发生异常波磨,6号线则在普通整体道床、梯形轨枕和钢弹簧浮置板轨道上均出现了大规模的异常波磨.总的来说,发生钢轨异常波磨地段涵盖各种半径的曲线及直线地段.经研究发现,北京地铁4号线、5号线、10号线的钢轨异常波磨与

车速相关,当车速达到60 km/h时,轮轨动力相互作用的共振与反共振被认为是波磨的主要原因^[77].谷爱军等人^[78]、李伟等人^[79]的研究均指出减振扣件路段异常波磨与扣件刚度和阻尼密切相关.闫子权^[80]探讨了轮对振动与钢轨异常波磨的关系,并从理论角度分析了减缓梯形轨枕钢轨异常波磨的合理轨道参数.张厚贵^[81]经过大量的研究测试,对上述异常波磨的发生、发展机理,提出了轨下支点结构模态诱导假说,丰富了钢轨波磨的机理研究,并通过现场实测,验证了相应治理措施的有效性.

4 需要突破的问题

由于城市轨道交通环境振动影响是一个影响因素众多、跨学科的系统问题,目前虽然在许多技术层面开展了一定程度的研究工作,但是与我国许多领域的发展情况一样,缺乏基础性研究的积累,这就造成了我国在城市轨道交通环境振动影响日益严峻的形势面前,只有市场利益驱动的公司带领整个行业进行被动的应付.通过分析笔者认为,只有在如下三方面投入力量进行研究并取得突破,才能从根本上改变目前这种被动局面.

4.1 限值标准与评价方法

针对城市轨道交通环境振动对人体在工作、休息舒适度及其健康方面影响,寻求有效的振动量描述方式、测量统计方式,制定科学的室内外振动环境控制标准,是当前必须开始的一个多学科的基础性科学研究工作.其核心问题是寻找人体的暴露-响应关系.这一研究直接反映了一个国家在交通环境振动领域的研究水平.目前我们的工作与发达国家相比,显现出很大的差距.这似乎与我国几乎所有的工程领域一样,目前正处于高速发展的建设阶段,还顾不上具有真正科学意义的科学研究工作.这就造成了大量的投诉事件和环境振动评价实际上并没有真正具有科学依据的判别标准.

美国^[82]、英国^[83-85]、德国^[86]、日本^[87]、瑞典^[88,89]、挪威^[90]等国均结合各自国家的实际情况,通过测试以及调查,开展了铁路环境振动与噪声对人体影响的基础研究工作,建立了合理的暴露-响应关系.图13是欧盟框架计划(2011~2014)资助的CargoVibes国际合作项目通过大量研究推荐的暴露-响应关系曲线.

图 13 铁路振动的暴露-响应关系图^[92]

图中横坐标为四次方计量值 VDV 描述的振动强度(亦可转换为其他振动描述方式), 纵坐标为受振动干扰的人群所占百分比, 3 条实线分别代表不同的干扰程度. 决策部门应该在科学合理的振动暴露-响应关系的基础上, 充分考虑城市经济发展水平及应该受保护人群的百分比, 制定合理的振动限值. 遗憾的是, 目前我国尚未开展这样的基础研究工作, 各类振动标准所设定的限值缺乏科学系统的实验测试数据支

撑. 而假如直接引入国外实验结果, 则忽略了东、西方人种对振动响应的差异性, 国外标准限值并不一定适用于我国的人体情况.

表 4 总结、比较了当前国内外主要振动标准的技术参数^[22,47,49,91,92]. 其中我国的国家标准制定较早, 随着人们对环境振动要求的提高, 近年来缺乏有针对性的测试数据, 而且振动量描述指标混乱, 也没有明确的测试及统计规定. 主要存在以下问题: 1) 国内不同标准限值之间的振动量描述指标不统一(表 2); 2) 国内标准对测试数据的处理方式, 如采用平均化处理还是峰值保持处理、信号截取时长、信号分析重叠系数等问题均不明确; 3) 国内一些振动量描述指标与国际常用指标间难以简单正确地换算. 因此, 直接借鉴国外暴露-响应研究成果也变得几乎不可能. 在城市轨道交通大规模发展的今天, 我们必须独立自主地研究适合我国人群的振动限值标准.

4.2 振动与结构辐射噪声的预测

振动与噪声预测的关键在于提高预测精度, 且需要在精度与预测时间、预测成本间寻求平衡. 该问题未来寻求研究突破的着眼点如下.

1) 针对不同预测方法(初步预测、确认预测及精准预测)提出其可靠性的量化评价方法及指标. 确定基于实测传递函数及数值计算相互校正的标准化方

表 4 各国振动标准中主要参数比较^{a)}

国家	评价物理量	振动量描述方式	常用单位	时间常数(s)	计权曲线	频率范围(Hz)
中国 GB10070-88, JGJ/T170-2009	加速度	$VL_{z,max}; VL_{max}$	dB ref 10^{-6} m/s^2	1	Z 计权	1~80 4~200
美国 FRA(2012), FTA(2006)	速度	L_v	dB ref $1 \mu\text{in/s}$	1	-	-
英国 BS 6472-1:2008	加速度、 四次方剂量值	列车通过 rms, VDV	m/s^2 ; $\text{m/s}^{1.75}$	-	W_k, W_d ; BS6472 W_b, W_d	0.5~80
日本 JIS C 1510:1995	加速度	$L_{v,max}$	dB ref 10^{-5} m/s^2	0.63	W_k, W_d	1~80
德国 DIN4150-2:1999	速度	KB	-	0.125	DIN45669-1 (类似 W_m)	1~80
荷兰 SBR-B:2002	速度	V_{max}, V_{per}	-	0.125	DIN45669-1 (类似 W_m)	1~80
挪威 NS8176:2005	速度、加速度	$v_{w,95}, a_{w,95}$	mm/s, mm/s^2	1	W_m	0.5~160
瑞典 SS 460 48 61:1992	速度、加速度	L_{aw}, L_{vw}	dB ref 10^{-6} m/s^2 ; dB ref 10^{-9} m/s	1	W_m	1~80
奥地利 ÖNORM S 9012:2010	加速度	E_{max}, E_t	mm/s^2	1	W_m	1~80
意大利 UNI9614:1990	加速度	A_w, L_{aw}	mm/s^2 , dB ref 10^{-6} m/s^2	1	W_m	1~80
西班牙 RD 1307:2007	加速度	L_{aw}	dB ref 10^{-6} m/s^2	1	W_m	1~80

a) 振动量描述方法的详细计算方法可参见各国对应标准, 或文献[22,93]给出的详细总结

法, 以便规范振动环境影响评价中预测方法的选择。

2) 继续深入研究各类车辆振源在各类工况下的基本统计数据, 提出移动荷载计算输入谱的计算规范。

3) 继续深入研究针对多种传播路径的计算分析理论, 提出并开发基于大数据云计算的可视化预测分析软硬件系统。

4) 建立基于本文作者提出的动态环评机制与分区、分类、分阶段预测评价思想及方法^[40,41]的规范体系。防止预测过程中工作深度不一致, 工作阶段不衔接, 预测方法选择不恰当, 以及缺失疏漏重要环节等现象, 从而使交通工程运营后, 因为环境振动所导致的重大过失现象不再重演。

4.3 减隔振技术工程实施

目前, 我国城市轨道交通减隔振技术工程实施存在的主要问题如下。

1) 综合减振不综合的问题。减少或控制城市轨道交通环境振动的负面影响, 是一个综合性的工程过程, 需要在振源、传播路径及敏感目标自身隔振等多个层面综合规划及优化。目前工程上过度依赖轨道减振, 而忽略了车辆及传播路径综合减振措施的研究与推广。目前传播路径隔振及敏感目标自身隔振技术的研究工作明显不足, 尚需更多的科研投入和实践积累。同时, 需要推进车辆系统自身进行减振降噪设计研发的力度。如此才能在根本上解决综合减振不综合的问题。

2) 减振措施效果的评定问题。在城市轨道交通建设项目环境影响评价中, 提出的减小运营期环境振动所采取的保护措施主要是根据产品标称的减振效果, 但环评推荐使用的产品在使用中是否能够达到预期减振效果, 能否在相应的频率范围内具有相应的减振作用还缺少客观权威的评价。目前, 各厂家提供的产品减振性能参数, 一般是根据商业广告标称的特定频率而给出的, 与环境振动关注的 1~80 Hz 的减振效果不对应。另外厂家提供减振效果时, 并不注明使用的测量方法、评价量、频率范围、评价位置等与减振效果直接相关的条件, 从而导致引用时存在诸多问题。此外, 减振产品实验室测试效果与在线

实际效果的差异性(如预载差异、移动加载差异等)仍有待进一步研究。

3) 轨道减振产品的设计问题。现阶段轨道减振措施在设计时缺少对减振轨道设计的总体性把握, 而多重于产品本身减振效果, 对产品在整个轮轨系统中的作用有所忽视。轨道减振产品是在车辆运行动力作用下工作的, 首先必须确保列车在高密度行车下实现加减速及通过曲线的安全、平稳、低噪声, 同时实现其减振性能。这个问题也需要提出相应的设计方法并设立相应的规范予以明确, 同时考虑减振与非减振轨道过渡段、施工条件预留、误差控制、过轨管线、排水等问题。

4) 开发结构类减振产品。为了减少过度采用轨道减振措施给轮轨作用带来的不利影响, 需要开发更多种类的道床、隧道衬砌、路基、桥梁结构、地层隔振屏障、建筑结构以及设备的隔振工程技术措施, 加大科研开发力度, 促进市场转化机制的建立。

5 总结

本文明确给出交通环境振动的一般强度、频率与传播特征, 总结了城市轨道交通振动的 12 个主要影响因素以及我国在该领域正在研究的 8 个主要问题, 指出了在各标准与评价方法、振动与结构辐射噪声预测、减隔振技术工程实施三个方面需取得突破的关键问题。

作为当前城市轨道交通发展最快、规模最大的国家, 我们必须开展交通环境振动相关限值标准的基础性研究工作, 完善相应的规范编制; 深入开展列车振动、道路交通移动振源输入谱及其传播计算方法的理论研究工作, 结合大数据及云计算技术, 推动交通环境振动预测的可视化技术发展; 促进轨道交通行业在项目可行性研究、初步设计及工程实施的全过程中, 将交通环境振动的综合减振降噪优化工作纳入其线路布局、方案规划、结构设计、产品准入以及工后验收评估等关键工作环节中去, 推动相关法律法规的建设, 为促进我国城市交通尤其是轨道交通的良性发展做出贡献。

致谢 感谢中国铁道科学研究院杨宜谦研究员对本文提出的宝贵修改意见。

参考文献

- 1 中国城市轨道交通年度报告课题组. 中国城市轨道交通年度报告 2014. 北京: 北京交通大学出版社, 2015
- 2 王文斌, 刘力, 孙宁. 我国城市轨道交通轨道减振现状与发展趋势. 中国铁路, 2013, 4: 91-94
- 3 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. 铁道标准设计, 2015, 59: 150-155
- 4 International Standard. Ground-borne noise and vibration arising from rail system, Part 1: General guidance. ISO14837-1. 2005
- 5 李克飞. 基于变速及曲线车轨耦合频域解析模型的地铁减振轨道动力特性研究. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2012
- 6 Lombaert G, Degrande G. Ground-borne vibration due to static and dynamic axle loads of intercity and high speed train. J Sound Vib, 2009, 319: 1036-1066
- 7 袁扬, 刘维宁, 刘卫丰. 基于现场测试的曲线段地铁地面振动传播规律. 中国铁道科学, 2012, 33: 133-138
- 8 刘维宁, 李克飞, Markine V L. 移动荷载作用下曲线轨道振动响应解析研究. 土木工程学报, 2013, 46: 133-140
- 9 Gupta S, Stanus Y, Lombaert G, et al. Influence of tunnel and soil parameters on vibrations from underground railways. J Sound Vib, 2009, 327: 70-91
- 10 马蒙, 刘维宁, 王文斌. 轨道交通地表振动局部放大现象成因分析. 工程力学, 2013, 30: 275-280, 309
- 11 马龙祥. 基于无限-周期结构理论的车轨耦合及隧道-地层振动响应分析模型研究. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2014
- 12 潘昌实, 谢正光. 地铁区间隧道列车振动测试与分析. 土木工程学报, 1990, 23: 21-28
- 13 李克飞, 刘维宁, 孙晓静, 等. 北京地铁 5 号线地下线减振措施现场测试与分析. 铁道学报, 2011, 33: 112-118
- 14 李克飞, 刘维宁, 孙晓静, 等. 北京地铁 5 号线高架线减振措施现场测试与分析. 中国铁道科学, 2009, 30: 25-29
- 15 夏禾. 交通环境振动工程. 北京: 科学出版社, 2010
- 16 刘鹏辉, 杨宜谦, 尹京. 地铁隧道内不同轨道结构振动测试与分析. 振动与冲击, 2014, 33: 31-36
- 17 张莉, 刘鹏辉, 杨宜谦, 等. 杭州地铁 1 号线浮置板轨道减振效果对比分析. 铁道建筑, 2013, 10: 80-83
- 18 李宪同, 张斌, 户文成, 等. 北京地铁环境振动预测中源强选取的研究. 城市轨道交通研究, 2012, 15: 80-83, 89
- 19 张斌, 俞泉瑜, 户文成, 等. 地铁减振措施过渡段减振性能的测试与分析. 振动、测试与诊断, 2013, 33: 138-143
- 20 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2007
- 21 雷晓燕. 高速铁路轨道动力学: 模型、算法与应用. 北京: 科学出版社, 2015
- 22 刘维宁, 马蒙. 地铁列车振动环境影响的预测、评估与控制. 北京: 科学出版社, 2014
- 23 夏禾, 张楠. 车辆与结构动力相互作用. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2005
- 24 闫维明, 聂晗, 任珉, 等. 地铁交通引起地面振动的实测与分析. 铁道科学与工程学报, 2006, 3: 1-5
- 25 闫维明, 张祎, 任珉, 等. 地铁运营诱发振动实测及传播规律. 北京工业大学学报, 2006, 32: 149-154
- 26 栗润德, 刘维宁, 张鸿儒. 区间地铁列车振动的地面响应测试分析. 中国铁道科学, 2008, 29: 120-126
- 27 楼梦麟, 贾旭鹏, 俞洁勤. 地铁运行引起的地面振动实测及传播规律分析. 防灾减灾工程学报, 2009, 29: 282-288
- 28 邹超, 汪益敏, 汪朝晖, 等. 地铁车辆段咽喉区地面振动传播规律实测与分析. 振动与冲击, 2015, 34: 200-206
- 29 丁德云, 刘维宁, 李克飞, 等. 地铁运营引起的环境低频振动传播特征试验研究. 中国铁道科学, 2011, 32: 20-26
- 30 王田友, 丁洁民, 楼梦麟, 等. 地铁运行所致建筑物振动的传播规律分析. 土木工程学报, 2009, 42: 33-39
- 31 夏倩, 屈文俊. 地铁振动对既有砌体结构影响规律及因素数值分析. 振动与冲击, 2014, 33: 189-194, 200
- 32 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. 土木工程学报, 2011, 44: 134-142
- 33 谢伟平, 赵娜, 何卫, 等. 地铁上盖物业振动舒适度分析. 土木工程学报, 2013, 46: 90-96
- 34 何蕾, 宋瑞祥, 邬玉斌, 等. 车速对车辆段上盖物业振动影响的实测分析. 建筑结构, 2015, 45: 96-99
- 35 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. 铁道学报, 2015, 37: 98-103
- 36 辜小安, 谢咏梅, 刘扬. 地铁列车运行引起建筑物二次辐射噪声执行标准探讨. 现代城市轨道交通, 2012, 4: 56-59
- 37 张海滨, 万泉, 蒋伟康. 城市高架轨道交通噪声辐射预测与实验研究. 振动与冲击, 2009, 28: 21-24
- 38 蒋伟康, 张海滨, 严莉. 高架轨道交通噪声的分析与控制技术研究. 声学技术, 2012, 31: 138-146
- 39 高飞, 夏禾, 安宁. 北京地铁 5 号线高架结构的辐射噪声分析与实验研究. 中国铁道科学, 2010, 31: 134-139
- 40 刘维宁, 马蒙, 王文斌. 地铁列车振动环境响应预测方法. 中国铁道科学, 2013, 34: 110-117
- 41 马蒙, 刘维宁, 王文斌. 基于敏感度的地铁振动动态预测评价体系. 都市快轨交通, 2012, 25: 65-69
- 42 马蒙, 刘维宁, 邓国华, 等. 基于校准法的地铁振动对西安钟楼影响研究. 工程力学, 2013, 30: 18-23
- 43 王文斌, 刘维宁, 孙宁, 等. 基于脉冲激励的地铁运营引起邻近建筑物内振动预测方法. 中国铁道科学, 2012, 33: 139-144
- 44 Zhang N, Xia H, Yang W G, et al. Prediction and control of building vibration under metro excitations. In: Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2011). Leuven, 2011. 705-711
- 45 袁扬. 地铁列车振动环境响应预测的人工单点列脉冲激励方法研究. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2014

- 46 吴宗臻, 刘维宁, 马龙祥, 等. 基于实测频响函数列的地铁环境振动响应预测方法. 工程力学, 2015, 32: 155–161
- 47 中华人民共和国国家标准. 城市区域环境振动标准. GB10070-88. 北京: 中国标准出版社, 1988
- 48 中华人民共和国环境保护部. 环境影响评价技术导则——城市轨道交通. HJ453-2008. 北京: 中国环境科学出版社, 2008
- 49 中华人民共和国行业标准. 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. JGJ/T170-2009. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009
- 50 北京市地方标准. 地铁噪声与振动控制规范. DB11/T838. 2011
- 51 上海市地方标准. 城市轨道交通(地下段)列车运行引起的住宅室内振动与结构噪声限值及测量方法(上海市). DB31/T470-2009. 2009
- 52 中华人民共和国国家标准. 古建筑防工业振动技术规范. GB/T50452-2008. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- 53 中华人民共和国国家标准. 建筑工程容许振动标准. GB50868-2013. 北京: 中国计划出版社, 2013
- 54 中华人民共和国国家标准. 隔振设计规范. GB50463-2008. 北京: 中国计划出版社, 2008
- 55 王文斌. 基于脉冲实验的地铁环境振动响应传递函数预测方法研究. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2011
- 56 Garburg R, Stiebel D, Cuellar V. RIVAS Project Deliverable D1.10: Description of Test and Field Tests Including Validation. German: Deutsche Bahn, 2013
- 57 许良善. 北京机场线弹性长轨枕落轴冲击减振对比试验. 北京: 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所, 2007
- 58 王文斌, 刘维宁, 贾颖绚, 等. 更换减振扣件前后地铁运营引起地面振动的研究. 中国铁道科学, 2010, 31: 87–92
- 59 王志强, 王安斌, 雷涛, 等. 谐振式浮轨扣件系统减振效果的分析. 噪声与振动控制, 2014, 34: 95–100
- 60 王志强, 王安斌, 白健, 等. 成都地铁轨道 GJ-III 型减振扣件振动控制效果分析. 噪声与振动控制, 2014, 34: 190–194
- 61 王文斌, 刘维宁, 马蒙, 等. 梯形轨道系统动力特性及减振效果试验研究. 中国铁道科学, 2010, 31: 24–28
- 62 金浩, 刘维宁, 王文斌. 梯式轨枕轨道模态试验分析. 工程力学, 2013, 30: 459–463
- 63 马蒙, 刘维宁, 刘卫丰, 等. 有砟梯式轨枕轨道减振性能的理论分析与试验研究. 振动与冲击, 2015, 34: 62–66
- 64 邓玉姝, 夏禾, 善田康雄, 等. 城市轨道交通梯形轨枕轨道高架桥梁试验研究. 工程力学, 2011, 28: 49–54
- 65 丁德云, 刘维宁, 李克飞, 等. 钢弹簧浮置板轨道参数研究. 中国铁道科学, 2011, 32: 30–34
- 66 金浩, 刘维宁. 蚁群算法耦合 LS-DYNA 梯式轨枕轨道动力特性优化. 振动与冲击, 2013, 32: 24–28
- 67 金浩, 刘维宁. 基于蚁群算法梯式轨枕轨道减振优化研究. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43: 2751–2756
- 68 王志强, 王安斌, 魏军光, 等. 新型组合式道床系统静态特性试验研究. 噪声与振动控制, 2014, 34: 109–114
- 69 杨吉忠, 颜华, 蔡成标. 城市轨道交通低频减振轨道结构研究. 铁道学报, 2015, 37: 90–95
- 70 黄舰, 黄微波, 杨林, 等. 轨道交通减振降噪技术研究进展. 见: 中国青岛城市轨道交通管理和技术创新研讨会. 青岛, 2014. 153–158
- 71 楼梦麟, 贾宝印, 陆秀丽, 等. 地铁振动下基础隔振效应的实测与分析. 同济大学学报, 2011, 39: 1622–1628
- 72 楼梦麟, 贾宝印, 宗刚, 等. 混凝土连续墙隔振后建筑结构的地铁振动实测与分析. 华南理工大学学报, 2013, 41: 50–62
- 73 葛家琪, 王毅, 张玲, 等. 地铁所致成都博物馆振动全过程性能化研究. 建筑结构学报, 2015, 36: 27–34
- 74 刘维宁, 任静, 刘卫丰, 等. 北京地铁钢轨波磨测试分析. 都市快轨交通, 2011, 24: 6–9
- 75 任静, 孙京健, 陈鹏, 等. 从钢轨异常波磨研究反思地铁设计. 都市快轨交通, 2011, 24: 2–5
- 76 郭建平, 刘维宁, 雷黔湘, 等. 北京地铁 4 号线钢轨异常波磨调查及整治措施. 都市快轨交通, 2011, 24: 10–13
- 77 Zhang H G, Liu W N, Liu W F, et al. Study on the cause and treatment of rail corrugation for Beijing metro. Wear, 2014, 317: 120–128
- 78 谷爱军, 刘维宁, 张厚贵, 等. 地铁扣件刚度和阻尼对钢轨异常波磨的影响. 都市快轨交通, 2011, 24: 17–21
- 79 李伟, 杜星, 王衡禹, 等. 地铁钢轨一种波磨机理的调查分析. 机械工程学报, 2013, 49: 26–31
- 80 闫子权. 控制梯型轨道钢轨波磨的动力性能优化研究. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2013
- 81 张厚贵. 北京地铁钢轨波磨的机理及整治方案研究. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2014
- 82 Zapfe J A, Saurenman H, Fidell S. Ground-borne noise and vibration in buildings caused by rail transit. Final report for TCRP Project D-12. Transportation Research Board of the National Academies, 2009
- 83 Woodcock J, Peris E, Sica G, et al. Human response to vibration in residential environments: Establishing exposure-response relationships. In: 10th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN). London, 2011. 719–726
- 84 Peris E, Woodcock J, Sica G, et al. Annoyance due to railway vibration at different time of the day. J Acoust Soc Am, 2012, 131: 191–196
- 85 Waddington D, Moorhouse A, Steele A, et al. Human Response to Vibration in Residential Environmental. Sarford: University of Sarford, 2011
- 86 Passchier-Vermeer W, Zeichart K. Vibrations in the living environment: Relationships between vibration annoyance and vibration metrics. Amsterdam: TNO, 1998

- 87 Yano T, Morihara T, Sato T. Community response to Shinkansen noise and vibration: A survey in areas along the Sanyo Shinkansen Line. In: Proceedings Forum Acusticum 2005: 4th European Congress on Acoustics. Budapest, 2005. 1837–1841
- 88 Öhrström E, Skånberg A B. A field survey on effects of exposure to noise and vibration from railway traffic, part I: Annoyance and activity disturbance effects. *J Sound Vib*, 1996, 193: 39–47
- 89 Gidlöf-Gunnarsson A, Ögren M, Jerson T, et al. Railway noise annoyance and the importance of number of trains, ground vibration, and building situational factors. *Noise Health*, 2012, 14: 190–201
- 90 Klæboe R, Turunen-Rise I H, Hårvik L, et al. Vibration in dwellings from road and rail traffic—Part II: Exposure–effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models. *Appl Acoust*, 2003, 64: 89–109
- 91 Waddington D, Woodcock J, Smith M G, et al. CargoVibes: Human response to vibration due to freight rail traffic. *IJRT*, 2015, 3: 233–248
- 92 Elias P, Villot M. RIVAS Project Deliverable D1.4—Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration. Paris: CSTB, 2012

Overview on current research of environmental vibration influence induced by urban mass transit in China

LIU WeiNing, MA Meng, LIU WeiFeng, SUN XiaoJing & SUN FangQiu

School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

The definition of traffic-induced environmental vibration is proposed in this paper. 12 main factors of environmental vibration by urban mass transit are analyzed, and eight current research topics in this field in China are summarized. Three key problems needed to break through in the further research are presented, which are the standards of allowable vibration and its evaluation methods, the prediction of vibration transmission and radiated noise and the implementation of vibration mitigation technology. The authors believe that the following researches must be carried out at present in China, where the urban mass transit has the fastest development and the largest scale in the world: the fundamental research on standards of traffic induced environmental vibration, the source spectra of train and road traffic induced vibrations and the visual prediction based on big data and cloud computing technology. And the comprehensive design of mitigation of vibration and noise should be considered in scheme, line plan, product access, structure design, check and assessment of mitigation effect after operation and so on in the course of feasibility study, scheme design, and project implementation.

urban mass transit, traffic-induced environmental vibration, vibration evaluation, vibration mitigation technology

doi: 10.1360/N092015-00334