

文章编号: 1005-0523(2015)06-0001-07

# 城市轨道交通振动对古建筑影响综述

张逸静, 陈 甦, 周俊杰, 孙斌彬

(苏州大学城市轨道交通学院, 江苏 苏州 215131)

**摘要:**城市轨道交通引起的振动对古建筑影响是当今社会的一个新问题, 古建筑因为蕴含的历史价值和不可复生性, 其保护标准更为严格。为加强古建筑的防振保护, 分别介绍了轨道交通振动的传播途径和对古建筑的影响机理; 轨道交通振动对古建筑影响的研究方法; 古建筑减振隔振的控制措施; 以及国内外的古建筑振动评价指标和标准。在总结轨道交通振动对古建筑影响的研究状况及进展基础上, 提出了我国在轨道交通振动对古建筑影响方面需要进一步研究的问题。

**关键词:**轨道交通; 古建筑; 振动

中图分类号: U231 文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.06.001

改革开放以来, 我国经济建设迅猛发展, 城市规模日益扩大, 与此同时, 交通问题也日益突出。城市轨道交通以其占地少、运量大、速度快, 以及准时、方便、舒适等优点, 正在并将最终成为城市公共交通的主动脉。城市轨道交通周边环境通常较为复杂, 在其施工和运营期间的振动及沉降将对周边建筑物产生一定影响。

古建筑是中华文明的珍贵遗产, 蕴藏着丰富的历史文化信息, 但由于历史久远, 其结构的耐久性、抗震性日益衰退, 同时作为珍贵的历史文化遗产, 古建筑相对于现代建筑有着特有的“不可复生性”。因此, 对于古建筑的保护已成为目前抢救中华历史文化遗产的重要内容, 其保护工作的要求更高、标准更严。然而, 在城市规划中, 地铁线路不可避免的会穿过古建筑附近, 此时, 轨道交通施工和运营引起的振动将对古建筑产生影响, 研究其对古建筑的影响机理和特点, 提出相应保护措施已成为古建筑保护中一个至关重要的问题。

## 1 轨道交通振动对邻近建筑物的影响机理

振动是国际上公认的七大公害之一, 轨道交通相比地面交通, 速度快、载重大、持续时间长, 所引起的周围建筑物振动也更加强烈<sup>[1]</sup>, 北京、上海的有关部门根据地面线路投入运营后引起的环境噪声问题, 提出了未来城市轨道交通建设在城区范围内不宜发展地面线路的建议<sup>[2]</sup>。地铁列车运行时其振动的传播途径为通过轨道—车轮振动—隧道结构—周围土层—相邻建筑物内—地板、墙壁、天花板振动—二次结构噪声<sup>[3]</sup>。地铁引起的路面振动的频率集中在 40~90 Hz<sup>[4]</sup>, 其中 60~80 Hz 对应的振级最大, 而传到建筑物的振动以 20 Hz 以内的低频振动为主, 其次是轨道交通引起的振动来源于列车以一定的速度通过轨道时的各种激振因素, 轨道不平顺是轮轨系统最重要的激扰根源<sup>[6]</sup>。轨道交通运行中振动大小及对周边建筑物的影响程度与车辆、轨道、道床、隧道、地质条件及建筑物与地铁间距离等因素有关<sup>[7]</sup>。日本对 8 条铁路线列车引起建筑物的振动影响分析后发现, 在距轨道中心线远近、轨道结构类型、车体类型、车身长度、运行速度和背景振动 6 个主要影响因素中, 距离对振动的影响最大, 背景振动其次, 车速对地面振动的影响相对不明显<sup>[8]</sup>。在我国

收稿日期: 2015-06-13

基金项目: 苏州市轨道交通有限公司基金项目(SZZG06YJ1030009); 苏州市科技局基金项目(SS201519)

作者简介: 张逸静(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为轨道交通引起的环境振动。

通讯作者: 陈甦(1962—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为地基处理。

根据对广州地铁沿线的振动测试提出的针对不同隧道截面形状的地表振动传播公式中,地质条件、列车运行速度、轨道平面曲率半径及测点至隧道侧壁距离为主要影响因素<sup>[9]</sup>。

轨道交通引起的环境振动来自于地层深部的移动振源,列车移动产生的行进波和钢轨振动产生的振动波相叠加,通过隧道结构和地层传播到地表,与在地表诱发的表面波继续叠加后向周围传播<sup>[10]</sup>;因此,振动主要以弹性波的形式从振源向各个方向传播,对于半空间无限土体,传播形式主要是纵波、横波和表面波的组合。日本学者研究表明,对于铁路交通产生的振动,位于地下2 m深处振动加速度幅值仅为地表值的20%~50%,4 m深处为10%~30%<sup>[11-12]</sup>。振动波在传播过程中,振动能量一部分由于弹性波的扩散而减弱,另一部分则被振动介质的阻尼作用削弱。不同土层中,振动波的传播路径、衰减特性以及对邻近建筑物的二次振动影响不同<sup>[13]</sup>。地铁列车振动衰减的程度和规律还与振源类型、传播方向等因素有关。从振源的埋深上看,埋深越浅,建筑物振动越大,反之则相反;从地铁列车运行速度上看,随着地铁列车运行速度的提高,振动有增大的趋势;就地面振动随距离的衰减而言,距轨道中心线越远,地铁列车引起的地面振动就越小,但也有研究<sup>[14]</sup>发现可能由于振源频率与该处土层固有频率相近发生共振现象,或者土层下面存在坚硬的基岩,使得振动波在基岩上反射形成振动放大区而存在振动加速度反弹区;就土的介质类型而言,一般粘弹性系数越大,衰减越快,密度越高,衰减越慢<sup>[15-17]</sup>。由于地铁列车引起的地面水平方向振动在传导过程中的衰减要快于垂直方向,地铁沿线建筑物内垂直方向的振动将大于水平方向,实验结果表明建筑物的水平振动一般约比垂直振动小10 dB<sup>[18]</sup>,因此在评价建筑物受轨道交通环境振动的影响时,可以竖直方向的振动为主。

## 2 研究方法

交通振动对古建筑的影响研究最早可追溯到对1964年捷克砖石结构的古建筑教堂由于交通振动产生的裂缝不断扩大以致倒塌的研究<sup>[19]</sup>,此后,一批欧洲学者纷纷对本国古建筑受交通振动的影响开展了相应研究<sup>[20-21]</sup>。我国关注古建筑振动保护始于20世纪80年代末开展的对焦枝铁路穿越洛阳龙门石窟保护区的振动影响研究<sup>[22]</sup>,目前,国内轨道交通振动对古建筑影响的研究主要针对北京、西安两地的众多古建筑开展的。在北京,以明城墙遗址、京奉铁路正阳门老车站旧址、正阳门和箭楼为古建筑研究对象,通过现场测试和数值模拟,发现古建筑结构在地铁运营下的振动是路面交通的10倍左右,交通振动引起古建筑结构的动力响应随水平距离和竖直距离呈规律改变,且地下结构以竖直方向动力响应为主,建筑物超过一定高度后,地上结构以水平方向动力响应为主,且地上结构的动力响应高于地下结构;地铁交通引起古建筑响应的主要频段是40~90 Hz,路面交通引起古建筑响应的主要频段是10~20 Hz,且路面交通引起的古建筑振动速度在一定范围内出现放大现象<sup>[23-24]</sup>。在西安,以南城墙、钟楼为主要研究对象,发现地铁二号线单线运行通过城墙时,其振动响应均以竖向振动为主,而当地铁二号线双线运行通过时,其振动响应以水平振动为主,就城墙保护的角度来说,地铁列车的运行速度不宜过大或过小<sup>[25]</sup>。在研究地铁2号线对古建筑振动影响的基础上,对6号线3种不同线路方案优化比选,起到降振作用<sup>[26]</sup>。

当前,轨道交通振动对古建筑影响的研究方法可归纳为以下两类:试验和经验法与数值分析法。对于既有轨道交通线路和已建建筑物可采用现场试验的方法研究地铁运行引起环境振动的衰减和分布规律,在大量实验数据的基础上建立经验、半经验公式用于拟建线路或建筑物振动影响的预测。国内外已有大量学者对轨道交通引起的地层和建筑物的振动进行实测,研究振动响应和传播规律<sup>[27-32]</sup>,提出预测公式和评估方法<sup>[33-40]</sup>。通过实测振动对邻近古建筑的振动影响,发现与普通建筑物不同,古建筑结构以水平方向动力响应为主<sup>[23]</sup>,这与《古建筑防工业振动技术规范》<sup>[41]</sup>中按古建筑水平方向的振动速度作为其受振动影响的评价指标是相一致的。在对130多处古建筑结构的动力特性、响应、弹性波传播速度等进行现场实测和分析后,《古建筑防工业振动技术规范》提出了确定古建筑结构速度响应的两种方法:计算法和测试法,规定了古建筑结构的动力特性、响应的计算公式,提出了测试仪器、测试环境以及测试操作的基本要求。在国内,通过按《古建筑防工业振动技术规范》的相应计算公式对古建筑受轨道交通振动影响进行的初步预测分析<sup>[42-43]</sup>,发现由于计算公式中未能充分考虑地铁车辆、运行速度以及文物结构类型等相关因素的影响,因此预测结果

和实际结果可能存在误差,建议进一步加强实测以验证计算公式准确性,使结果更加真实可靠。

由于试验法只能针对现有线路且工作量较大,而经验法又很难全面考虑影响轨道交通振动的诸多因素,数值分析法成为了当前常用的研究方法之一。数值分析法主要借助计算机程序建立的有限元模型来模拟实际工况,模型的合理性直接关系到计算结果的精度,因此模型必须能够反映应力波传播的特征,捕捉介质中的波动效应,准确求解应力波场。在建立数值计算模型时应重点考虑以下问题:由于地铁的振动荷载在土层中产生的应变较小,一般土颗粒间的连接几乎没有遭到破坏,土骨架的变形能够恢复,且土颗粒之间的相互位移所消耗的能量也很小,可以忽略塑性变形,因此认为土体处于理想的粘弹性力学状态,用等效线性模型来处理土体的动力学问题;又因为应变很小时,土体的阻尼接近于零,可以不考虑材料阻尼的影响,将土体视为弹性体;每一层土为均质、各同向性,即每层土性质相同,但土层性质随土层的不同而不同,建模时应考虑土层的成层性;动力作用下,各层土之间、土层与地下结构之间不发生脱离和相对滑动,即界面满足位移协调的条件。国内外已经有许多关于有限元模型建立的模型尺寸<sup>[44-47]</sup>、单元格尺寸<sup>[48-51]</sup>、边界条件<sup>[52-63]</sup>和列车荷载<sup>[64-71]</sup>方面的研究,尽管研究结果不尽相同,但为有限元模型的建立提供了多种思路。

在实际工程中对古建筑进行振动预测时,由于其结构、材料的复杂性,若在数值模型中同时考虑建筑物和地层结构,将不得不对建筑结构进行大量简化,使得预测精度和可靠度降低。因此,国内有学者提出了采用现场实测与数值计算相结合的预测方法,并率先运用到预测城市轨道交通振动对精密仪器的影响<sup>[72-74]</sup>。

### 3 控制措施

根据振动的传播途径,减振隔振措施一般从振源、传播路径和建筑物结构三方面考虑。在振源处,可采取车体轻量化,曲线半径不宜过小,轨道采用无缝长钢轨线路,对钢轨顶面不平顺进行打磨,避免凹凸等措施<sup>[75]</sup>。在传播路径上,我国轨道结构既有振动控制措施主要采用弹性扣件、轨道减振器、浮置板道床等。其中,浮置板道床减振效果最佳<sup>[76]</sup>,可达20~40 dB,有研究表明在50 m范围内浮置板减振效果十分明显<sup>[77]</sup>,其次为轨道减振器,各种弹性扣件减振效果也可达2~9 dB。从国外已采取钢弹簧浮置板道床的地铁运营情况看,被保护建筑均未受地铁列车运营所产生振动的影响<sup>[78]</sup>。土层中的隔振方法主要是设置屏障,对于明沟和填充墙隔振,屏障越深,其有效频率的下限就越低,隔振效果越好;对于多排桩,随着排数的增加,隔振效果加强<sup>[79]</sup>。在数值模拟分析中,采用浮置板减振轨道对列车振动引起的西安钟楼地基角点竖向速度峰值和竖向速度有效值均有明显减少,最大减少量分别达到84.82%和87.25%,而采用隔离桩对地表速度峰值、有效值减少效果并不明显<sup>[80]</sup>。采用浮置板减振轨道对列车振动引起的白云寺区域上部结构顶点水平速度有效值有明显减少,其中木结构最大减少量达到50.0%,砖结构最大减少量达到65.0%<sup>[81]</sup>。直接对建筑物进行基础隔振或于结构上部局部隔振也是经常采取的措施,通常采用在建筑与基础间设置隔振垫的方法<sup>[82]</sup>。例如,香港在葵青剧院的建设中考虑到地铁的影响,采用了隔振弹簧技术。当然,地铁在线路设计上尽量远离敏感区是保护文物古迹最好的方式。

### 4 评价标准

在国外,德国DIN4150-3-1999<sup>[83]</sup>分短期振动和长期振动分别规定了确保建筑整体不发生损坏的振动标准,对振动特别敏感的建筑物和具有一定保护等级的历史性古建筑在1~100 Hz内的短期振动速度限值为3~10 mm·s<sup>-1</sup>,长期振动顶层楼板水平振速限值为2.5 mm·s<sup>-1</sup>。瑞士SN640312~1992<sup>[84]</sup>根据建筑物结构类型将建筑物分为4类,以峰值质点速度分量的最大值作为振动容许控制量,按交通类振动和冲击类振动分别规定了4类建筑物的振动容许速度,其中古建筑对于交通类振源的速度限值为3~5 mm·s<sup>-1</sup>。美国联邦公共交通运输管理局(FTA)制定的《Transit Noise and Vibration Impact Assessment》<sup>[85]</sup>,参照瑞士标准化协会制定的标准,给出了建筑振动损伤标准,古建筑的质点峰值速度为3.05 mm·s<sup>-1</sup>。英国TRRL的Whiffin和Leonard<sup>[86]</sup>对高速公路引起的地面振动进行了大量研究,得出结论:为使古建筑不受损坏,地面振动垂向峰值质点振动速度不得超过2 mm·s<sup>-1</sup>。Rainer<sup>[87]</sup>针对振动对历史建筑的影响进行了回顾,对各国的标准进行了归纳并指

出,由于振动对历史建筑影响的复杂性,关于振动对历史影响方面的知识还不完善,没有评价振动对历史建筑影响的统一方法,需要根据不同国家的标准针对具体情况进行具体分析。

在国内,《机械振动与冲击建筑物的振动 振动测量及其对建筑物影响的评价指南》<sup>[88]</sup>指出,对于交通运输类振源,应将质点速度作为评价量,质点速度结构响应的典型范围为  $0.2\sim 50\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。《机械工业环境保护设计规范》<sup>[89]</sup>根据振源的频率及建筑的类型规定了一些特殊建筑物的振动容许速度,如有保护价值或对振动特别敏感的建筑和古建筑,将建筑物的合速度作为评价量,以地表作为振动控制点,给出有严重开裂及风蚀的古建筑允许振动为  $1.8\sim 3.0\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。《古建筑防工业振动技术规范》<sup>[41]</sup>对古建筑砖石结构、木结构和石窟按照其保护级别分别规定了相应的容许振动标准,将古建筑的水平振动速度作为评价量,根据古建筑的结构类型确定不同的控制点位置,涵盖了殿、堂、楼、阁、塔、石窟古建筑结构类型,振动标准速度限值介于  $0.10\sim 0.75\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

纵观国内外有关古建筑防振的相关规范,我国的《古建筑防工业振动技术规范》是目前国际上同类标准(振动速度)中最严格的,要比国外同类标准低一个数量级,但是存在对需要进行微振动保护的古建筑界定不清、以文物等级主导振动限值制定有待商榷、采用弹性波速划分振动限值区分度太低和未考虑维护加固历史对古建筑的积极影响等问题。因此有学者提出了一种基于《古建筑防工业振动技术规范》研究成果的、考虑修建历史及维护加固历史的降级方法,其目的在于放宽部分古建筑的振动容许值,以接近其真实的承受振动能力<sup>[90]</sup>。

## 5 结束语

城市轨道交通在我国正处于大发展的阶段,如何在现代化进程中保护历史文化遗产成为当前亟需解决的问题之一。目前,尽管关于轨道交通振动对古建筑影响已有初步研究,但还有许多问题需要进一步探讨:

1) 现有相关规范仅对部分古建筑结构类型提出了振动控制标准,尚未能全面考虑古建筑种类,如对古河道、古纤道等,目前规范还没有对此是否需要进一步进行微振动保护作出规定;由于古建筑建造年代、目前状况的不同,即使是同一结构类型,其振动控制标准也应有所区别;

2) 实际的轨道交通线型大部分为曲线和缓和曲线,而当前对振源的研究几乎只考虑竖向振动,很少考虑到横向冲击的振动影响,特别是古建筑又以水平振动速度为评价指标,在数值模拟中需要进一步完善;

3) 国内对古建筑振动保护起步较晚,相关实测数据较少,试验和经验法才初具雏形,而古建筑一般都有损伤或加固维修,数值模拟的可靠性也需进一步验证,有待对古建筑建立长期的监测机制。

## 参考文献:

- [1] 曹艳梅. 列车引起的自由场地及建筑物振动的理论分析和试验研究[D]. 北京:北京交通大学,2005:5-7.
- [2] 辜小安. 我国城市轨道交通环境噪声振动标准与减振降噪对策[J]. 现代城市交通,2004(1):42-45.
- [3] 田春芝. 地铁振动对周围建筑物影响的研究概况[J]. 铁道劳动安全卫生与环保,2000(1):66-69.
- [4] 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[J]. 防灾减灾工程学报,2009,29(3):282-288.
- [5] 闫维明,张祎,任珉,等. 地铁运营诱发振动实测及传播规律[J]. 北京工业大学学报,2006(2):149-154.
- [6] 王田友. 地铁运行所致环境振动与建筑物隔振方法研究[D]. 上海:同济大学,2008:31.
- [7] 董霜,朱元清. 地铁振动环境及对建筑影响的研究概况[J]. 噪声与振动控制,2004(2):1-4.
- [8] 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):263-280.
- [9] 徐忠根,任珉,杨泽群,等. 广州市地铁一号线振动传播对环境影响的测定与分析[J]. 环境技术,2002(4):12-14.
- [10] 贾颖绚. 基于解析的车轨耦合模型及地铁对环境的振动影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2009:2-6.
- [11] VOLBERGG. Propagation of ground vibrations near railway tracks[J]. Journal of Sound and Vibration, 1983, 87(2):371-376.

- [12] FUJIKAKA T. A Prediction method for the Propagation of ground vibration from railway train [J]. Journal of Sound and Vibration, 1986, 111(2):289-297.
- [13] KURZWEIL G. Ground borne noise and vibration from underground rail systems [J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 66(3):363-370.
- [14] 王逢朝,夏禾,吴萱. 列车振动对环境及建筑物的影响分析[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(4):13-17.
- [15] 潘吕实,刘维宁. 隧道列车振动试验与动态分析[J]. 兰州铁道学院学报, 1985, 4(2):1-2.
- [16] 周才宝. 地下铁道整体轨下基础[J]. 地铁与轻轨, 1994(2):29-31.
- [17] 姚谦峰,张晓丹. 城市轨道交通环境振动研究现状及对周边古建筑的影响分析探讨[C]//国际交通技术创新与应用大会暨国际交通基础设施建设与养护技术大会论文集. 北京:人民交通出版社, 2008:546-551.
- [18] KURZE U J. Tools for measuring prediction and reducing the environmental impact from railway noise and vibration [J]. J. S. V. 1996, 193(1):237-251.
- [19] MILOSLAV BATA. Effects on buildings of vibrations caused by traffic[J]. Building Science, 1971(6):221-246.
- [20] PATRICIA ELLIS. Effect of traffic vibration on historic buildings[J]. The Science of the Total Environment, 1987, 59:37-45.
- [21] PAOLO CLEMENTE, DARIO RINALDIS. Protection of a monumental building against traffic-induced vibrations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1998, 17(5):289-296.
- [22] 王宗礼,苏广丰. 焦枝铁路对洛阳龙门石窟的环境影响[J]. 铁道标准设计通讯, 1991(12):35-39.
- [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(1):79-83.
- [24] 贾颖绚,郭猛,刘维宁,等. 列车振动荷载对古建筑的动力影响[J]. 北京交通大学学报:自然科学版, 2009, 33(1):118-122.
- [25] 胡卫兵,王鑫,于海平. 城市轨道交通微幅振动对西安南城墙的影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012(4):88-95.
- [26] 孟昭博. 西安钟楼的交通振动响应分析及评估[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2009:150-157.
- [27] 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.
- [28] 陈建国,夏禾,肖军华,等. 列车运行对周围地面振动影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008(11):3113-3118.
- [29] 陈建国,夏禾,曹艳梅,等. 运行列车对周围建筑物振动影响的试验研究[J]. 振动工程学报, 2008(5):476-481.
- [30] 冯牧. 列车引起建筑物振动分析及其控制[D]. 南昌:华东交通大学, 2009:27-31.
- [31] C MADSHUS, A. M. KAYNIA. High-speed railway lines on soft ground dynamic behaviour at critical train speed [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3):689-701.
- [32] G DEGRANDE, L SCHILLEMANS. Free field vibrations during the passage of analysis high-speed train at variable speed [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 247(1):131-144.
- [33] 雷晓燕. 城市轨道交通环境振动预测与评价[J]. 城市轨道交通研究, 2008(11):12-17.
- [34] 辜小安,刘宪章,张春华. 地铁环境振动预测方法浅析[J]. 环境工程, 1996(5):35-39.
- [35] 闫维明,张祎,任珉,等. 地铁运营诱发振动实测及传播规律[J]. 北京工业大学学报, 2006(2):149-154.
- [36] 魏鹏勃. 城市轨道交通引起的环境振动预测与评估[D]. 北京:北京交通大学, 2009:132-153.
- [37] 孙晓静. 地铁列车振动对环境影响的预测研究及减振措施分析[D]. 北京:北京交通大学, 2008:145-159.
- [38] U. S. FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION. High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment [R]. Washington D. C.: U. S. Department of Transportation, 2005.
- [39] 王另的,张斌,户文成,等. 美国联邦公共管理局的地铁环境振动预测方法及其应用[J]. 城市轨道交通研究, 2013(1):91-96.
- [40] 王另的,张斌,户文成,等. 北京地铁环境振动预测模型[J]. 城市轨道交通研究, 2013(6):101-106.
- [41] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50452-2008 古建筑防工业振动技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [42] 徐洪磊,何吉成,袁平,等. 地铁列车引起的振动对郑州二七塔的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(12):55-58.
- [43] 王之龙. 轨道交通振动对古建筑影响预测与防护措施分析[J]. 建筑遗产, 2013(14):173-174.
- [44] 申跃奎. 地铁激励下振动的传播规律及建筑物隔振减振研究[D]. 上海:同济大学, 2007:69.
- [45] 杨永斌. 高速列车所引致之土壤振动分析[R]. 台湾:台湾大学, 1996:23-50.
- [46] 吕爱钟,蒋斌松,尤春安,等. 位移反分析有限元网格划分范围的研究[J]. 土木工程学报, 1999, 32(1):26-30.
- [47] 张宝才. 浅埋地下工程及相关系统振动控制的工程实践和理论分析[D]. 北京:铁道部科学研究院, 2002:57-69.
- [48] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社, 2007:10.

- [49] ANSYS 帮助文件[CP].
- [50] 韩增尧. 有限元频响分析中网格划分技术研究[J]. 强度与环境, 2003, 30(3): 18-22.
- [51] 孙海涛. 苏州城市轨道交通振动对环境的影响[D]. 苏州: 苏州大学, 2013: 33-34.
- [52] 董国庆. 高速铁路高架桥的振动与场地隔振分析[D]. 湖南: 湖南大学, 2010: 35-37.
- [53] LYSMER J, KULEMEYE R L. Finite dynamic model for infinite media [J]. Journal of Engineering Mechanics Division, 1969, 95: 859-877.
- [54] 王自法, 廖振鹏. 一致边界的精度和离散化准则[J]. 地震工程与工程振动, 1992(3): 33-40.
- [55] DEEK A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(1): 25-42.
- [56] SMITH W. A non-reflecting plane boundary for wave propagation problems [J]. Journal of Computational Physics, 1973(15): 492-503.
- [57] KUNAR R R, MARTI J. A non-reflecting boundary for explicit calculations [J]. Computational Methods for Infinite Domain Media-Structure Interaction, ASME, AMID46, 1981: 183-204.
- [58] CLAYTON R, ENGQUIST B. Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations [J]. Bull Seism Soc Amer, 1977(76): 1529-1540.
- [59] CLAYTON R, ENGQUIST B. Absorbing boundary conditions for wave-equation migration[J]. Geophysics, 1980, 45: 895-904.
- [60] 廖振鹏, 黄孔亮, 杨柏坡, 等. 暂态波透射边界[J]. 中国科学: A 辑, 1984, 26(6): 50-56.
- [61] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1072-1073.
- [62] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报, 1998, 31(3): 55-64.
- [63] 高峰, 马泽宝. 无限地基的数值模拟[J]. 兰州铁道学院学报: 自然科学版, 2002, 21(3): 9-13.
- [64] 夏禾. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [65] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [66] 贾颖绚. 基于解析的车轨耦合模型及地铁对环境的振动影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009: 53-101.
- [67] 汪杰, 宋瑞刚, 袁天辰, 等. 地铁列车荷载的仿真模拟[J]. 上海工程技术大学学报, 2011(3): 213-216.
- [68] 张玉娥, 白宝鸿. 地铁列车振动对隧道结构激振荷载的模拟[J]. 振动与冲击, 2000(3): 70-72+78+96.
- [69] 冯军和, 闫维明. 列车随机激振荷载的数值模拟[J]. 振动与冲击, 2008(2): 49-52+175.
- [70] 刘维宁, 夏禾, 郭文军. 地铁列车振动的环境响应[J]. 岩石力学与工程学报, 1996(S1): 586-593.
- [71] 冯军和, 闫维明, 陈宪表. 不同列车荷载模拟方法的对比分析[J]. 铁道建筑, 2007(10): 79-81.
- [72] MA M, LIU WN, JIN H, et al. Prediction of Environmental Vibrations in Buildings Induced by Subway Trains and Mitigation Measures Analysis [C] //H.Xia, H.Takemiya, Environmental Vibrations Prediction, Monitoring, Mitigation, and Evaluation. Beijing: China Railway Publishing House, 2010: 666-672.
- [73] 北京交通大学轨道减振与控制实验室. 北京地铁 4 号线对北大物理楼影响评估[R]. 北京: 北京交通大学, 2009: 1-50.
- [74] 马蒙, 刘维宁, 金浩, 等. 轨道交通振动对建筑物影响程度的预测方法[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(2): 27-32.
- [75] 彭华, 杨广庆. 城市轨道交通的噪声与振动及其控制措施[J]. 铁道工程学报, 2001(4): 37-39.
- [76] 辜小安, 任京芳, 刘扬, 等. 我国地铁环境振动现状及控制措施[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2003(5): 206-209.
- [77] 耿传智, 廖志军. 地铁振动衰减特性研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009(3): 344-348+368.
- [78] 孙晓静, 刘维宁, 张宝才. 浮置板轨道结构在城市轨道交通减振降噪上的应用[J]. 中国安全科学学报, 2005(8): 65-69+114.
- [79] 崔凯. 北京万松老人塔塔基的地铁振动隔振措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 23-66.
- [80] 马蒙, 刘维宁, 丁德云, 等. 地铁列车引起的振动对西安钟楼的影响[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(4): 88-92.
- [81] 杨华中, 陈锦华. 兰州轨道交通 1 号线对白衣寺影响数值分析[J]. 中国建材科技, 2013(4): 90-91+108.
- [82] 丁浩民, 王田友, 申跃奎, 等. 不同振源影响下土层振动与建筑物隔振的研究现状[J]. 建筑结构, 2006(36): 80-85.
- [83] TECHNICAL COMMITTEE SCHWINGUNGSFRAGEN IN BAUWESEN. DIN4150-3:1999 Structural Vibration. Part3: Effects of Vibration on Structures[S]. Germany: DIM Deutsches Institut, 1986.
- [84] SWISS CONSULTANTS FOR ROAD CONSTRUCTION ASSOCIATION. VSS-SN640-312a Effects of Vibration on Construction [S]. Switzerland: Zurich, 1992.
- [85] FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION, FTA-VA-90-1003-06 Transit Noise and Vibration Impact Assessment[S]. USA: National Technical Information Service, 2006.

- [86] WHIFFEN A C, LEONARD D R. A survey of traffic induced vibrations[R]. UK: Transport and Road Research Labs, 1971.
- [87] J H Rainer, Effect of vibration on historic buildings [J]. The Association for Preservation Technology Bulletin, 1982(1):2-10.
- [88] 北京理工大学, 北京航天医学工程研究所. GB/T14124-2009 机械振动与冲击建筑物的振动 振动测量及其对建筑物影响的评价指南[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.
- [89] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JBJ16-88 机械工业环境保护设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社.1988.
- [90] 马蒙,刘维宁,郑胜蓝,等. 古建筑振动标准分级探讨[J].文物保护与考古科学, 2013, 25(1):54-60.

## Research Review on Influence of Vibration Induced by Urban Rail Transit on Ancient Architecture

Zhang Yijing, Chen Su, Zhou Junjie, Sun Binbin

(School of Urban Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215131, China)

**Abstract:** Influence of vibration induced by urban rail transit on ancient architecture is a hot issue in modern society. Because of ancient architecture's profound historical value and the impossibility for its recovery, the protection standard of ancient architecture is stricter. Aiming at strengthening the vibration-proof protection of ancient architecture, the paper introduced transmission ways of vibration, the influencing mechanism, research methods, control measures and evaluation criteria of reducing ancient architecture's vibration. The research status and progress of this field over the past ten years was summarized, based on which the paper put forward further issues to be studied.

**Key words:** urban rail transit; ancient architecture; vibration

(责任编辑 王建华 李萍)