

文章编号:1006-1355(2016)06-0101-05+110

# 轨道交通振动传播规律与减振措施研究进展

黄微波, 杨 阳, 冯艳珠, 张晓丽, 吕 平

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘 要:**城市轨道交通引起的环境振动与噪声问题日益严重,越来越受到人们的重视。综述振动传播规律和常用减振降噪措施,总结当前研究存在的问题并提出相关建议。地铁诱发的地面振动存在一个振动放大区和一个主要响应频带,对建筑物的影响主要是低频振动且以竖向振动为主。从源头采取减振措施是最直接最有效的方法,主要是在车辆和钢轨两方面采取措施。目前研究最多的是从振动传播途径采取措施,包括各种扣件减振、道床和轨道减振、隧道结构减振以及各种隔振技术。对于特殊的建筑和仪器,可以采取受振对象保护措施,包括设置隔振基础、阻尼器、隔振基座和减隔振元件等。只有运用多种减振措施,才能起到综合减振的目的,从而减轻振动对环境的影响。

**关键词:**振动与波;轨道交通;减振降噪;综合减振

**中图分类号:**U213;U270.1\*6

**文献标识码:**A

**DOI编码:**10.3969/j.issn.1006-1355.2016.06.020

## Research Advances of Vibration Propagation Law and Vibration Reduction Measures of Rail Transit

HUANG Wei-bo, YANG Yang, FENG Yan-zhu,  
ZHANG Xiao-li, LYU Ping

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong China)

**Abstract :** Environmental vibration and noise induced by urban rail transit are becoming more and more serious problems. In this paper, the rules of vibration propagation and the commonly used measures for vibration attenuation and noise reduction are reviewed. Some problems in the current research are summarized and the corresponding suggestions are put forward. There is a vibration amplifying zone and a main response frequency band of ground vibration induced by subway. The building is mainly influenced by vertical low frequency vibration. Using the vibration reduction measures for the vibration source in the aspects of vehicle and rail is the most direct and effective way. Measures of vibration reduction for the vibration transmission path are mostly studied at present, including all kinds of fasteners, damping tracks, vibration reduction of tunnel structures and various isolation techniques. For special buildings and instruments, some protection measures are usually taken, including the installation of vibration isolation foundation, dampers, vibration isolation base, vibration reduction components and so on. Only by using various vibration reduction measures, can the purpose of comprehensive vibration reduction be reached, so as to reduce the impact of vibration on the environment.

**Key words :** vibration and wave; rail transit; vibration and noise reduction; comprehensive vibration reduction

自1863年第一条地铁在伦敦通车开始,城市轨道交通不断发展,现已经成为城市居民出行的重要交通方式。轨道交通方便了人们日常出行,同时振动与噪声问题也越来越得到重视。当列车运行时,振动与噪声给周围建筑物和居民带来影响,其中地面线路和高架线路以噪声污染为主,而地下线路主

要以振动和二次结构噪声为主。统计数据表明,除工厂作业和建筑施工,公众反映最为强烈的振动污染是城市交通引起的环境振动<sup>[1]</sup>。轨道交通引起的环境振动与噪声能够对人体健康、工作效率、周围建筑结构以及对精密仪器等产生影响。为了减少振动对环境的影响,人们不断深入研究振动的传播与衰减特性,并采取有效的减振措施,轨道交通减振降噪已成为当前研究的热点。

### 1 振动的传播规律

振动在传播过程中由于阻尼作用能量不断衰减,主要包括辐射阻尼和材料阻尼,前者主要是振动波向四周传播时产生的能量损失;后者则是振动传

收稿日期:2016-07-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578298)

作者简介:黄微波(1963—),男,山东省青岛市人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为黏弹性阻尼材料和轨道交通减振降噪。

通信作者:杨阳,男,硕士研究生。

E-mail: 15588666683@163.com

播时,能量被介质耗散导致振动衰减。

对于振动的传播特性,国内外学者借助数值计算和现场试验等方法进行了众多研究工作。

利用2.5维有限元方法对地铁进行建模仿真,研究振动波的传播衰减与结构响应,可以得到与实际工程类似的规律。Yang等利用数值仿真方法研究列车以超临界波速和低于临界波速两种速度在钢轨上行驶时,振动在土层中的传播特性<sup>[2]</sup>。发现两种车速引发的地面振动响应会随着土层剪切波速的增加而减小,而增大土层的阻尼比只能减弱超临界波速列车引发的地面响应。谢伟平等利用这种方法分析隧道—土系统的动力特点,得到振动沿轨道和垂直轨道截面两个方向的传播特性,并且发现振动加速度受频率影响较大<sup>[3]</sup>。

轨道交通引发的地面振动响应并不是随距离的增大而一直减小,而是存在一个振动放大区和一个主要的振动响应频带。刘维宁<sup>[4]</sup>、闫维明等<sup>[5-7]</sup>通过数学模型和现场实测数据得出:地铁引发的地面振动频率主要分布在60 Hz~80 Hz,测点到振源的水平距离决定了地面振动响应的大小;但地表振动响应不是随距离单调下降,而是在离轨道一定距离以外有所放大,主要是小于10 Hz的低频振动;另外,地面存在一个主要的响应频带,若地面建筑物自振频率处在响应频带范围内,能与地面形成共振,从而受到过往车辆的影响。

轨道交通引发的地面振动的传播特性与地震动类似。潘昌实等对北京地铁崇文门至前门段进行现场测试,结合有限元法研究隧道和土体的动力特性,结果表明:高频振动在传播过程中比低频衰减迅速<sup>[8]</sup>。董霜对上海地铁振动响应进行了实测,得到了相同的结论,并且测得的地面振动频率主要集中在50 Hz~80 Hz<sup>[9]</sup>。另外,轨道交通引发的地面振动对建筑物影响存在方向性。陶连金、张丁盛采用二维仿真模型对隧道衬砌—地层系统进行了动力响应分析,发现地铁隧道正上方竖向振动在车辆交汇时出现最大值,而此时水平方向振动则最小,即列车导致的竖直方向的地面振动较水平方向更为明显<sup>[10]</sup>。

## 2 减振措施

轨道交通产生振动的原因是车辆—轨道系统相互作用,轮轨相互作用产生的振动通过隧道/桥墩传至地基,最后又传到建筑物。

振动和噪声从原理上都属于振动,只是传播媒介不同,振动通过轨道—基础等固体媒介传播,而噪声传播则是通过空气媒介。结合振动的发生原理、

传播特性以及影响因素,可以从振动源头、传播途径、受振对象三方面进行控制。相应地,减振措施有振源主动减振,切断振动传播途径和受振对象被动隔振等三大类。

### 2.1 振源控制

对于城市轨道交通,振源减振是最直接最有效的方法。从振动发生的机理出发,考虑其影响因素,可以从以下几个方面采取措施:

(1) 车辆。车辆轻型化、合理配置车轴、采用减振弹簧系统、采用盘式制动、车轮平滑、研制新型车辆等是车辆减振的常用措施。通过控制车辆行驶速度、打磨车轮、采用弹性车轮和阻尼车轮等,可从源头减弱振动。近几年工程应用的直线电机驱动地铁车辆,具有廉价安全、振动噪声低、能耗污染小等优点,是未来发展的重点。

日本学者研究了车辆轻型化对振动的影响,得出车辆轻型化能够降低列车导致的环境振动级值<sup>[11]</sup>。若以车辆轴重表述减振效果,其关系式为

$$\Delta L = 20 \cdot \lg\left(\frac{W_1}{W_2}\right) \quad (1)$$

式中  $W_1$  是轻型化后的车辆轴重,  $W_2$  是轻型化前的标准车辆轴重。

(2) 钢轨。采用无缝线路、重型钢轨、定期打磨并涂油以及对钢轨进行阻尼处理。钢轨接头处的振动是非接头的3倍,当前轨道一般地段均采用无缝钢轨,能有效减少车轮对钢轨接头的冲击,振动强度可降低5 dB左右<sup>[12]</sup>;重型钢轨由于竖向刚度较大,所以受列车冲击后产生的振动较小,研究表明,当把钢轨由50 kg/m改为60 kg/m时,钢轨振动降低了10%<sup>[13]</sup>;定期打磨钢轨能减少轨顶的不平顺,有效减小轮轨的相互作用,尤其是打磨石和打磨车运动方向一致时,起到的减振效果最好<sup>[14]</sup>。国外的地铁现场测试数据表明:钢轨和车轮打磨后尖啸声降低2 dB~5 dB,滚动噪声减小2 dB~6 dB,100 Hz以上的地面振动减弱10 dB<sup>[1]</sup>。另外,采用新型轨道结构也是振源减振的有效方法之一。

添加约束阻尼和动力吸振器能够增大钢轨阻尼,有效地耗散振动能量,国内外学者对此都进行了研究。Wilson研究的钢轨动力吸振器,能够在宽频域内起到阻尼作用,使钢轨振动速度级降低7 dB~10 dB<sup>[15]</sup>。在国内,蒋伟康等在前人研究的基础上,成功研制SJTU-2型钢轨吸振器,通过测试,发现列车通过时平均振动声级降低约4 dB(A)<sup>[16]</sup>。崔日新等借助有限元和边界元法分析了阻尼材料和结构参数对钢轨减振性能的影响,研究发现钢轨减振性能随着阻尼材料阻尼性能的提高或厚度的增加而增

加,并且受阻尼材料的敷设位置影响,在轨腰及钢轨处的减振效果较好<sup>[17]</sup>。

## 2.2 振动传播途径控制

通过研究振动传播特性和影响因素,采取相应的措施,可以降低振动的影响。常可从以下几方面采取措施:

### (1) 扣件

目前城市轨道交通的轨道结构通常都会采用减振扣件进行减振,扣件能够固定钢轨位置,阻止其发生位移和倾翻,并且可以提供一定的弹性,耗散一部分能量,最终起到降低振动作用。按照弹性大小,扣件可以分为一般弹性扣件和高弹性扣件。常用国产扣件包括DT系列橡胶扣件、轨道减振器扣件、WJ型小阻力扣件,国外的主要包括Lord扣件、先锋扣件、英国的Pandrol公司生产的系列扣件。

对扣件减振效果的研究可通过理论分析、数值模拟和实测的办法。通过建立有限元模型,耿传智等人研究了不同类型的扣件在落轴冲击作用下不同的结构动力响应特点以及扣件质量和刚度对减振性能的影响,从而为扣件设计提供依据<sup>[18]</sup>。朱剑月运用车轨耦合理论,研究了扣件失去作用后轨道系统的动态响应,结果表明,扣件失效使轨道支承遭到破坏,导致轮轨相互作用加大,并且对前后毗邻轨道动力特性产生影响<sup>[19]</sup>。王书卫通过建立钢轨扣件减振橡胶的动态力学模型,研究了不同类型扣件橡胶的阻尼性能,发现压缩型扣件的橡胶阻尼性能要优于剪切型扣件,但前者的隔振性能不如后者,从而为钢轨扣件设计提供了方法<sup>[20]</sup>。李克飞等在北京地铁5号线不同减振地段进行测试,对比分析了普通扣件、Ⅲ型轨道减振器扣件和钢弹簧浮置板轨道的减振效果,发现在工作频率范围内,Ⅲ型轨道减振器扣件减振效果比普通扣件好,浮置板轨道的整体减振效果要优于两种扣件<sup>[21]</sup>。

### (2) 道床和轨道减振

对于城市轨道交通,道床“整体化”、采用减振效果良好的轨道系统是工程中常用减振措施。道床“整体化”可以降低道床和路基的振动加速度,提高轨枕横向阻力,从而降低道床的变形,改善轨道的不平顺,最终减轻列车的振动与噪声。在道碴层中放置软木、橡胶垫层等,可增大道床的阻尼耗能作用,减小列车运行引起的低频振动。在钢轨、枕木下方设置弹性层是轨道减振通常采取的方法。典型的减振轨道有弹性支承块无砟轨道、梯形轨枕轨道、浮置板轨道、埋入式轨道等。

地铁中常用的浮置板轨道利用浮置板惯性平衡列车运行引起的动荷载,从而达到减轻振动的目

的。Cui等通过仿真模型,将列车荷载模拟为简谐荷载,研究了浮置板轨道和普通板式轨道的动力特性,发现浮置板轨道能有效减弱高于15 Hz的振动<sup>[22]</sup>。梯形轨道是轻量化轨道系统,能够有效减少振动的传递,适用于城市轨道交通减振。杨新文等利用车辆-轨道耦合动力学理论,研究了梯形轨道系统振动特性,证明梯形轨道具有良好的减振性能,同时可以减小基础的动反力<sup>[23]</sup>。王文斌等则利用锤击法研究了梯形轨道的模态特性与传递损失,发现梯形轨道低阶模态比较密集且阻尼比较大,在小于1 000 Hz频段范围内,具有较大的减振作用,传递损失高达45 dB<sup>[24]</sup>。埋入式轨道则是利用Corklast的弹性体将钢轨固定于混凝土道床内,通过弹性体的变形耗散能量,从而起到减振的作用,多用于地铁减振。该轨道沿纵向连续支撑,减少了离散支撑的不平顺,能有效减少波磨现象的发生<sup>[25-26]</sup>。弹性支承块无砟轨道通过在轨下、支承块下设置弹性垫层使高频振动成分得到较大衰减,蔡成标等对弹性支承块无砟轨道结构参数进行了优化研究,通过建立耦合模型得到轨下刚度与块下刚度的合理取值范围<sup>[27]</sup>。

### (3) 隧道

地铁采用的隧道结构形式、断面大小、埋置深度和隧道质量都会影响振动响应大小。表1给出了不同结构形式的隧道对振动的影响。隧道断面增大,振动效应就会增加;隧道埋置深度和隧道壁厚增加,振动影响减小,研究表明,在其他条件相同的情况下,若隧道厚度变为原来的2倍,可使隧道壁振动减弱5 dB~8 dB。现在地铁线路设计时广泛采用“高站位,低区间”的形式,增大了行车区间隧道的埋深,从而减小对处于其上方的建筑物的影响<sup>[28]</sup>。

表1 隧道结构形式对振动的影响<sup>[1]</sup>

地铁隧道结构形式	相对振动级 $L_p/\text{dB}$
铸铁或钢质单洞隧道结构	+4
混凝土单洞隧道结构	+2
双洞隧道结构	0
三洞隧道结构	-2
站台结构	-4

当前,我国隧道结构设计中常用的形式包括矩形、马蹄形及圆形3种。当地质条件相同时,由于矩形隧道结构边角存在折射效应,导致振动比其他两种结构形式略大2 dB~4 dB,因此应结合实际工程情况选取适当的结构形式。

### (4) 隔振技术

为阻止城市轨道交通引发的振动波的传播,可采取空沟、连续墙、波阻块(WIB)、排桩和孔列等措



施,此即为屏障隔振技术。屏障隔振分近场主动隔振和远场被动隔振,前者属于水平非均匀地基上基础振动问题,后者相当于屏障导致的 Rayleigh 波散射问题<sup>[29]</sup>。隔振措施用于振源附近可衰减体波和 Rayleigh 波,用于受振对象附近则只衰减瑞利波,而体波在传播过程中快速衰减。

### ① 空沟和填充沟

空沟因为能够隔断波的传播路径,能够对所有振动进行隔振,同时给需要隔振的物体提供了屏蔽区。总的来说,空沟和填充沟越深,对振动波越能起到隔断作用,从而减振效果就越好。Woods 最先研究了空沟的隔振作用,提出振幅衰减系数概念并用其衡量隔振效果,得出在距离振源越远的地方需要采用更深的空沟,才能得到同样的减振效果<sup>[30]</sup>。Andersen 等研究发现不论是低频振动还是高频振动,空沟比填充沟隔振效果要好,对于竖直荷载作用,空沟是最有效的隔振方法<sup>[31]</sup>;邓亚虹等则研究了隔振沟的影响因素,证明隔振沟的隔振效果受深度影响最大,其次是位置和宽度,并且沟深与 Rayleigh 波长的比值决定了隔振沟的效果<sup>[32]</sup>。

### ② 排桩和孔列

Woods、Liao 等研究了孔列和排桩隔振的作用,并首先提出隔振设计准则和波阻抗比的概念<sup>[33]</sup>。在国内,杨先健、高广运等首次阐述了连续和非连续屏障隔振的概念,并突破了 Woods 等提出的单体直径必须大于被屏障的波长的 1/6 的结论<sup>[34]</sup>。通过理论和实验分析,发现对于非连续排桩,其散射效应决定隔振效果,而衍射效应决定其影响范围,并且证明了圆形截面排桩相比其他形状有更好的隔振作用。邱畅等研究了屏障隔振的主要影响因素,指出柔性屏障更容易出现入射波的全透射现象,所以实际中应优先选用刚性屏障<sup>[35]</sup>。李志毅等首次运用三维方法研究了多排桩的隔振作用,得到的结论是桩的排数决定了其隔振效果,而桩截面尺寸对隔振效果影响较小,实际工程中,尽量使桩间距足够小,以获得较好的隔振效果<sup>[36]</sup>。孙苗苗则研究了多排非连续屏障对弹性波的多重散射问题,发现桩数相同时,双排刚性桩的隔振效果优于单排桩,并且梅花型布置的多排桩由于加强了散射波互相干涉的作用,其减振作用要优于矩形排列桩<sup>[37]</sup>。

### ③ 波阻块(WIB)

Schmid 首先提出其概念,即建筑结构基础下面的“人工基岩”,只有满足一定频率的波才能从中透过,从而其可起到隔振的作用,这种人工刚性层称为波阻块(wave impeding block),简称 WIB<sup>[38]</sup>。A. T. PePlow 等研究表明,对重载地面列车,WIB 对低频

振动能够起到有效的隔振作用<sup>[39]</sup>。对于基础和地表振动,WIB 有很好的减振效果,但由于 WIB 自振作用,所以不能完全隔断振动的传播。Hirokazu Takemiya 在台湾新干线工程中采用了一种新型蜂窝状 WIB,并在蜂窝中间填充了吸振材料,测试结果表明在有影响的 3 Hz~5 Hz 范围内,减振效果至少为 10 dB<sup>[41]</sup>。然而,Anderson 的研究结果表明:在竖向移动荷载作用下,明沟的隔振效果要优于 WIB<sup>[31]</sup>。国内高广运等研究了耦合激振作用下波阻块的隔振作用,同样发现地基层物理参数和其不均匀特性对 WIB 的隔振效果有较大影响,上硬下软地基的隔振效果要优于上软下硬的分层情况,工程中设计时应给予足够重视<sup>[40]</sup>。

## 2.3 受振对象的保护

轨道交通对地面建筑的振动影响与其基础类型和采用的结构形式密切相关。质量大、基础形式好的建筑结构能够对振动产生较大的衰减作用,所以受振动影响比较小;反之,建筑物受振动影响比较大。另外,质量较好的地面,如水泥地面也能起到减振作用。

采用隔振基础是降低振动对建筑物影响的一种常用方法,即在建筑物和基础间设置弹性层,减小地面振动的传播,从而起到保护建筑物的作用。研究表明由于建筑物底部隔震层的存在,建筑结构在地震作用下的反应较小,可以认为上部结构在水平地震作用下始终处于弹性阶段。对于竖向地震作用,因为隔震层竖向刚度与柱子相当,约为水平刚度的 1 000~2 000 倍,所以建筑物隔震层并不能减弱竖向地震作用<sup>[41-42]</sup>。鉴于地铁振动以竖向振动为主,所以采用隔振基础保护受振对象时,应考虑其不利影响。建筑物除采用整体隔振外,还可以通过设计合理的建筑构件获得减振效果,常用的方法包括增大楼板刚度、安装质量阻尼器和设置楼板隔振系统等等。

对于减振要求较高的仪器设备,应根据实际情况采取特殊的保护措施,常用的被动减振措施包括使用隔振基座或通过大型的减振元件将实验设备浮置。

## 3 当前研究中存在的问题与解决对策

(1) 列车运行对周围建筑物和人的影响的评价标准不规范。例如居民楼、学校和医院,通常用 Z 振级( $VL_z$ )为振动评价指标,同时多采用整个频段的总响应量作为结果;对精密仪器、设备,振动评价量是振动加速度、速度和位移,并且对各频段的能量分布

有具体要求,而对结构物、古建筑物则是速度指标。为了定量地评价振动对环境的影响,相关的城市环境部门应制定出较准确的振动与噪声控制、评价标准,对预测评估和设计工作起指导作用。

(2) 在振动的控制措施方面,当前研究主要集中在高频振动的影响,常规的减振隔振措施能有效降低 20 Hz 以上频率的振动,但低频振动的控制仍未解决。未来可以加大对这方面的研究,采用一些规范化的新材料、新技术,减少低频振动造成的影响。

(3) 地铁振动衰减特性、传播规律与影响因素研究方面,大都是通过实测和有限元等数值解法,各参数之间的关系没有精确表达式,振动预测大部分也是靠经验。因此可以借助系统论和统计学,在大量研究和工程实践的基础上建立一种简便实用的、考虑诸多因素的统计公式,预测结构的振动级和二次噪声,来满足将来的工程和研究需要。

(4) 目前轨道减振降噪产品较多,尤其是近几年又引进一些新技术、新产品,存在的问题是产品性能表述不规范,产品的研究、应用效果评估缺乏统一、科学的评价标准。另外,随着人们对振动控制要求的提高,有些地方过度追求轨道减振,加剧了轮轨相互作用,产生一定程度的钢轨波浪磨耗<sup>[43~44]</sup>。要逐步建立其专项管理制度,尽快出台相应的规范标准,加强新产品、新技术的审查工作,深入贯彻地铁综合减振理念,在保证安全与经济的前提下实现减振降噪的目标。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] YANG Y B, HUNG H H, CHANG D W. Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, 23(4): 263-278.
- [3] 谢伟平,孙洪刚. 地铁运行时引起的土的波动分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(7): 1180-1184.
- [4] 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, 15(1): 586-593.
- [5] 闫维明,聂晗,任珉,等. 地铁交通引起地面振动的实测与分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2006, 3(2): 1-5.
- [6] 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.
- [7] 闫维明,聂晗,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, 32(2): 149-154.
- [8] 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.
- [9] 董霜. 大城市地下轨道交通振动与强地面运动观测的研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2004.
- [10] 陶连金,张丁盛. 地铁诱发地面运动的衰减规律的研究分析[J]. *世界地震工程*, 2003, 19(1): 83-87.
- [11] 赵悦,肖新标,关庆华,等. 铁路及城市轨道交通减振措施研究综述[J]. *Open Journal of Acoustics and Vibration*, 2013, 1(3): 20-31.
- [12] LAKUŠIĆ S, AHAC M. Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas[J]. *Technical Gazette*, 2012, 19(2): 427-435.
- [13] 许国平. 高速铁路轨道减振降噪技术对策[J]. *铁道工程学报*, 2004(2): 26-30.
- [14] BRACCIALI A, PIPPERT M, CERVELLO S. Railway noise: The contribution of wheels, Basics, The legal frame, Lucchini RS products[M]. Lucchini, 2009.
- [15] HO W, WONG B, ENGLAND D. Tuned mass damper for rail noise control[M]. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*. Springer Japan, 2012: 89-96.
- [16] 蒋伟康,万泉. 轨道交通的约束阻尼钢轨吸振器技术研究与应用[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(10): 78-80.
- [17] 崔日新,高亮,蔡小培. 高速铁路阻尼钢轨减振降噪特性研究[J]. *铁道学报*, 2015, 37(2): 78-84.
- [18] 耿传智,王伟鹏. 地铁弹性扣件减振性能的落轴冲击仿真分析[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(3): 113-117.
- [19] 朱剑月. 轨下扣件支承失效对轨道结构动力性能的影响[J]. *振动工程学报*, 2011, 24(2): 158-163.
- [20] 王书卫. 钢轨扣件减振橡胶阻尼耗能特性分析[J]. *铁道标准设计*, 2015, 59(1): 37-41.
- [21] 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[J]. *铁道学报*, 2011, 33(4): 112-118.
- [22] CUI F, CHEW C H. The effectiveness of floating slab track system - Part I. Receptance methods[J]. *Applied Acoustics*, 2000, 61(4): 441-453.
- [23] 杨新文,和振兴. 梯形枕轨轨道振动特性研究[J]. *振动工程学报*, 2012, 25(4): 388-393.
- [24] 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[J]. *中国铁道科学*, 2010, 31(2): 24-28.
- [25] Bracciali A, Pippert M, Cervello S. Railway noise: The contribution of wheels, Basics, the legal frame, Lucchini RS Products[M]. Lucchini, 2009.
- [26] Dipl.-Ing. agr. Hendrikje Schreiter. Green tram tracks[R]. Final Conference Urban Track, 2010 June, 24: 5-6.
- [27] 蔡成标,徐鹏. 弹性支承块式无砟轨道结构参数动力学优化设计[J]. *铁道学报*, 2011(1): 69-75.
- [28] 谭燕. 铁路交通引发场地振动的传播规律与隔振措施研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [29] 邱畅. 连续屏障和非连续屏障远场被动隔振三维分析[D]. 上海:同济大学,2003.