

# 地铁减振垫轨道结构对车致环境振动的影响分析

臧景超<sup>1</sup> 杨新文<sup>1</sup> 祁正海<sup>2</sup> 马晓云<sup>1</sup>

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 兰州市轨道交通有限公司, 730015, 兰州//第一作者, 硕士研究生)

**摘要** 减振垫轨道是城市轨道交通高等减振措施中常用的一种轨道结构。为了研究减振垫轨道结构对车致环境振动的影响, 首先对减振垫轨道的模态进行分析, 其次建立了地铁列车-减振垫轨道-隧道-土体-建筑物系统模型。该系统模型分为两个子模型, 将子模型 1 中的竖向轮轨力作为子模型 2 的外加激励, 计算分析了轨道板、隧道壁、地面和楼层的车致振动加速度特性与振级特性。研究结果表明: 由列车运营引起的振动在传递途径中, 竖向振动加速度由轨道板到隧道壁的衰减量远大于由隧道壁到地面的衰减量, 楼层和地面的竖向振动加速度水平基本相当; 轨道板、隧道壁、地面和楼层的 1/3 倍频程加速度级两个峰值对应的中心频率 31.5 Hz、80 Hz 与轨道板第 5 阶、第 10 阶主振型的固有频率有关; 减振垫轨道的中心频率介于 3.15 Hz 和 8 Hz 之间的减振效果较好; 隧道埋深大于 11 m, 以及采用减振垫轨道结构的情况下, 隧道正上方地面和楼层的 Z 振级最大值均小于 70 dB, 能够满足环评标准的要求。

**关键词** 城市轨道交通; 减振垫轨道结构; 模态分析; 环境振动

**中图分类号** U213.2<sup>+</sup>12; X820.3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.03.021

## Effect Analysis of Damping Track Structure on Environmental Vibration Induced by Vehicle

ZANG Jingchao, YANG Xinwen, QI Zhenghai, MA Xiaoyun

**Abstract** Damping track is a kind of track structure commonly used on higher vibration reduction in urban rail transit. To study the effect of it on environmental vibration induced by vehicle, the damping track modal is analyzed firstly. Then, a model of subway train-damping track-tunnel-soil-building system is established, which is further divided into two sub-models. The vertical wheel/rail force in sub-model 1 is taken as the external excitation of sub-model 2, the vibration acceleration characteristics and vibration level characteristics of track slab, tunnel wall, ground and floor induced by vehicle are calculated and analyzed. Research results show that in the transmission

route of vibration induced by train operation, the vibration decrement of track slab to tunnel wall is much greater than that of tunnel wall to ground, while the vertical vibration acceleration level of floor and ground is basically the same; the 31.5 Hz and 80 Hz center frequencies of two peaks corresponding to the 1/3 octave acceleration level of the track plate, tunnel wall, ground and floor are related to the natural frequencies of the fifth and the tenth main modes of the track slabs; when the center frequency is between 3.15 Hz and 8 Hz, the vibration damping effect is better; when the burial depth of tunnels is deeper than 11 meters and the damping track is used to reduce the vibration, the maximum value of the vibration level Z on the ground floor above tunnel and the building is less than 70 dB, which can meet the environmental assessment criteria.

**Key words** urban rail transit; damping track; model analysis; environment vibration

**First-author's address** State Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China

环境振动问题目前已经成为影响城市地铁新线建设的瓶颈因素。地铁工程沿线环境敏感区段采取的减振类型主要包括特殊减振、高等减振和中等减振等 3 类。特殊减振一般采用钢弹簧浮置板轨道, 高等减振一般采用梯形轨枕轨道或减振垫轨道, 中等减振一般采用弹性扣件与压缩型扣件。本文主要对减振垫轨道的减振性能进行研究。国内外关于减振垫轨道的研究方法主要有理论分析、数值模拟和实验测试。文献[1]建立了地铁列车-板式减振垫轨道-下部基础有限元模型, 对不同减振垫刚度下板式轨道的振动模态和动力响应进行了分析, 并研究了隔振效果。文献[2]对隔离式橡胶浮置板轨道在不同工况下的固有频率、动力响应以及减振性能进行了分析。文献[3]对设置减振垫层的双块式无砟轨道分块长度进行了静力学分析。文献[4]建立了轨道-桥梁二维平面模型, 并对桥梁上

部减振垫轨道的减振性能进行了分析。文献[5]采用模态分析、谐响应分析法就不同道床板长度橡胶减振垫整体道床结构的固有频率、振型及传递函数等特性进行了研究。文献[6]采用数值计算方法对不同铺设方式的减振垫对橡胶浮置板轨道减振性能的影响进行了研究。

以上对减振垫轨道的研究大多集中于减振垫的刚度和减振垫的铺设方式等方面,而针对减振垫轨道结构对车致环境振动影响方面的研究还不够深入。因此,本文首先对减振垫轨道进行了模态分析,其次建立了地铁列车-减振垫轨道-隧道-土体-建筑物耦合系统有限元模型,计算分析了列车运行时道床板、隧道壁、地面和楼层的加速度水平和振级特性。研究结论可为地铁减振降噪设计提供一定的理论参考。

## 1 数值分析模型

### 1.1 模型建立

建立了地铁列车-减振垫轨道-隧道-土层-建筑物耦合系统数值模型,该模型的简化程度与计算结果的精确度和计算效率是矛盾的。为解决这些矛盾,将数值分析模型分为2个子模型。

(1) 子模型1为地铁列车-减振垫轨道模型,利用该模型计算得到列车在减振垫轨道上运行时的竖向轮轨力,并将该力作为子模型二的外界激励。

(2) 子模型2为减振垫轨道-隧道-土层-建筑物模型,通过该模型计算得到轨道板、隧道壁、地面和楼层的振动响应。

#### 1.1.1 地铁列车-减振垫轨道模型

文献[7]基于车辆-轨道耦合动力学理论,建立了地铁列车-减振垫轨道耦合动力学数值模型,如图1所示。根据弹性力学势能原理,可求出系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和荷载向量。当地铁列车以速度 $v$ 运行时,地铁车辆的动态平衡方程为:

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{z}}_v(t) + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{z}}_v(t) + \mathbf{K}_v \mathbf{z}_v(t) = \mathbf{Q}_v(t) \quad (1)$$

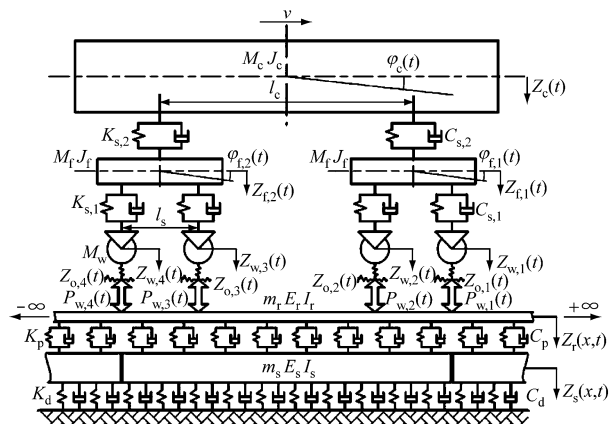
式中:

$\mathbf{M}_v$ ,  $\mathbf{C}_v$ ,  $\mathbf{K}_v$ ——分别表示车辆系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;

$\mathbf{z}_v(t)$ ,  $\dot{\mathbf{z}}_v(t)$ 和 $\ddot{\mathbf{z}}_v(t)$ ——分别表示车辆系统的位移矩阵、速度矩阵和加速度矩阵;

$\mathbf{Q}_v(t)$ ——由轨道不平顺产生的动态荷载向量。

减振垫轨道的动态平衡方程在此不再赘述。在计算轮轨力时,该模型采用8节编组车辆。图2所示为竖向轮轨力计算结果。



注: $M_c$ 、 $M_f$ 、 $M_w$ 分别代表车体、构架和轮对质量; $J_c$ 和 $J_f$ 分别代表车体和构架的转动惯量; $K_{s,1}$ 和 $K_{s,2}$ 分别代表一系悬挂和二系悬挂竖向刚度; $C_{s,1}$ 和 $C_{s,2}$ 分别代表一系悬挂和二系悬挂阻尼系数; $Z_c(t)$ 、 $Z_f(t)$ 、 $Z_w(t)$ 分别代表车体、构架和轮对的竖向位移; $\varphi_c(t)$ 和 $\varphi_f(t)$ 分别代表车体和构架的摇头角; $P_{w,1}(t)$ 、 $P_{w,2}(t)$ 、 $P_{w,3}(t)$ 和 $P_{w,4}(t)$ 均代表竖向轮轨力; $Z_{o,1}(t)$ 、 $Z_{o,2}(t)$ 、 $Z_{o,3}(t)$ 和 $Z_{o,4}(t)$ 均代表轨道竖向不平顺; $l_c$ 和 $l_s$ 分别代表车辆定距和轴距; $E_r$ 和 $E_s$ 分别代表钢轨和轨道板的弹性模量; $I_r$ 和 $I_s$ 分别代表钢轨和轨道板的惯性矩; $m_r$ 和 $m_s$ 分别代表钢轨和轨道板的单位质量; $K_p$ 和 $K_d$ 分别代表扣件和CA砂浆的刚度; $C_p$ 和 $C_d$ 分别代表扣件和CA砂浆的阻尼; $Z_r(x,t)$ 和 $Z_s(x,t)$ 分别代表钢轨和轨道板的竖向位移

图1 地铁列车-减振垫轨道耦合动力学数值模型

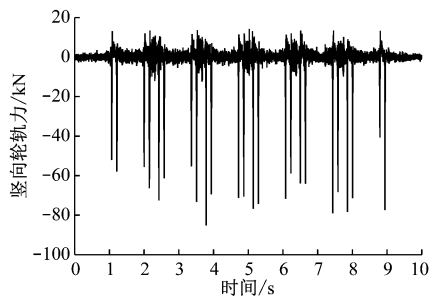


图2 竖向轮轨力时程曲线

#### 1.1.2 减振垫轨道-隧道-土层-建筑物模型

采用ANSYS有限元软件建立减振垫轨道-隧道-土体-建筑物耦合系统有限元模型,如图3所示。

该隧道周围的地质情况参考了兰州市轨道交通1号线地勘资料,隧道周围土层模型有4层,从上到下依次为素填土、黄土状土、卵石土以及砂岩。该模型土层总厚度为40 m,宽度为40 m,纵向长度为25 m。模型中,楼房建筑结构为6层,每层高度

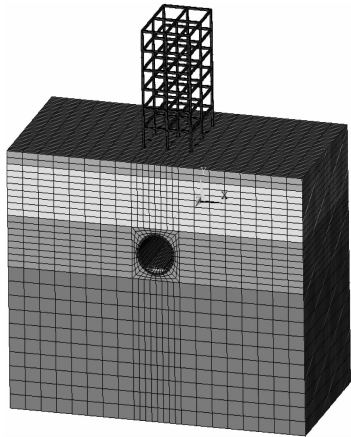


图3 减振垫轨道-隧道-土体-建筑物耦合模型

为3 m,下部桩基础中桩的长度为10 m,桩底与持力较好的卵石层接触。模型中,轨道板、隧道仰拱、衬砌以及周围土体均采用8节点实体单元 solid 45 模拟,减振垫采用弹簧阻尼单元 combin 14 模拟,钢轨以及楼房的桩、梁、柱结构均采用梁单元 beam 4 模拟。

1.2 模型参数

子模型1中地铁车辆各部件计算参数均根据A型车进行选取,车辆轴重为160 kN,车辆定距为15.7 m,固定轴距为2.5 m。减振垫轨道结构中扣件刚度为 $4.0 \times 10^7$  N/m,阻尼为 $7.5 \times 10^4$  N·s/m;减振垫刚度为 $6.6 \times 10^7$  N/m,阻尼为 $10 \times 10^4$  N·s/m;轨道板的长度、宽度和厚度分别为25 m、3.25 m和0.35 m。子模型2中隧道衬砌厚度为0.5 m。土层的物理力学参数如表1所示。

表1 土层的物理力学参数表

土层	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	厚度/m
素填土	30	0.39	1.42	2
黄土状土	40	0.29	1.57	8
卵石	60	0.23	2.33	8
强风化砂岩	300	0.22	2.03	22

2 减振垫轨道板模态分析

轨道板模态分析是识别轨道板振动特性参数的重要方法。该方法被广泛应用于城市轨道交通领域。对兰州市轨道交通1号线使用的25 m长的减振垫轨道板进行模态分析。模型中,钢轨采用梁单元 beam 4 模拟,轨道板采用实体单元 solid 45 模拟,扣件和减振垫采用弹簧阻尼单元 combin 14 模拟,弹簧阻尼单元下部采用全约束边界条件。

提取减振垫轨道板的前10阶振型,如图4所示。

示。由图4可知,减振垫轨道板第1阶和第2阶振型分别为轨道板的1阶弯曲和1阶扭转,第3阶和第4阶振型分别为轨道板的2阶弯曲和2阶扭转,第5~10阶如上所述,具有同样的规律。

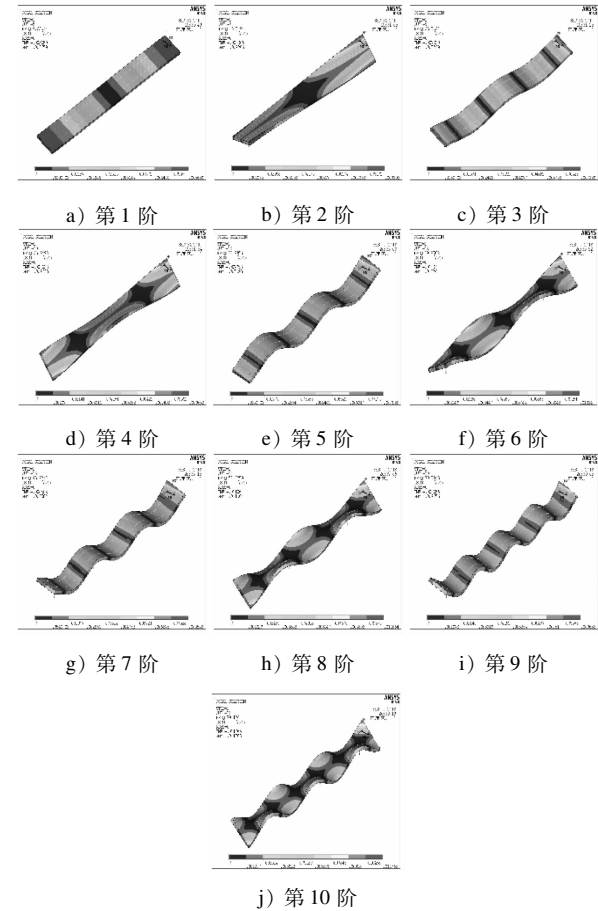


图4 减振垫轨道板振型图

表2为减振垫轨道板前10阶振型的固有频率。由表2可知,25 m长的减振垫轨道板的前10阶振型的固有频率均小于80 Hz。

表2 减振垫轨道板前10阶固有频率表

模态阶数	固有频率/Hz
1	9.64
2	15.72
3	23.70
4	26.95
5	32.99
6	39.25
7	43.93
8	52.04
9	70.78
10	79.12

3 车致环境振动分析

根据本文建立的数值分析模型,提取轨道板板

顶、隧道壁、地面和楼层等结构计算点的竖向加速度(见图5),并通过 Matlab 软件编制程序求出各计算点的1/3倍频程加速度级(见图6),以及加速度Z振级最大值(见图7)。

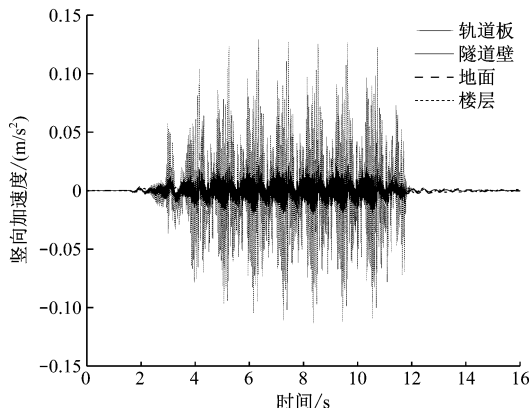


图5 不同计算点的竖向加速度时程曲线

由图5中轨道板加速度时域波形图波峰数目可明显看出,8节编组列车通过的振动变化规律,即列车通过计算点断面时轨道板、隧道壁、地面和楼层均从振动微弱开始,到出现32个振动峰值,最终振动减弱为0。而在同一断面处竖向加速度的大小由轨道板到隧道壁的衰减量远大于由隧道壁到地面的衰减量,这说明了减振垫轨道的减振作用主要体现在轨道结构上;隧道正上方地面和楼层的竖向加速度大小基本相等,这与文献[8]中得出的结论是一致的。

由图6可知,轨道板、隧道壁、地面和楼层的1/3倍频程加速度级整体变化趋势基本一致,均随中心频率呈先增大后减小、再增大再减小的特点;隧道内轨道板1/3倍频程加速度级比隧道壁大8~25 dB,隧道外中心频率小于50 Hz时地面和楼层的1/3倍频程加速度级相差基本处于10 dB以内。当

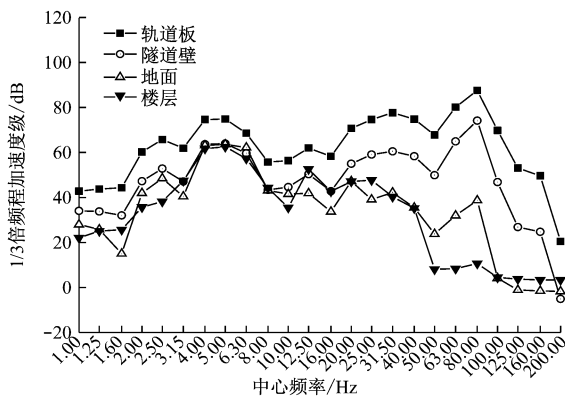


图6 不同计算点的1/3倍频程加速度级曲线

中心频率为4 Hz、31.5 Hz和80 Hz时,各计算点的1/3倍频程加速度级变化曲线中出现3个明显的峰值。中心频率为31.5 Hz和80 Hz时出现的这两个峰值分别和减振垫轨道板的第5阶和第10阶振型的固有频率有关;中心频率为4 Hz时出现的这个峰值和整个系统模型的振型主频有关;中心频率超过31.5 Hz时,楼层和地面的1/3倍频程加速度级基本都小于40 dB。

由图7可知,轨道板、隧道壁、地面和楼层的加速度Z振级呈依次减小的趋势,且轨道板与隧道壁加速度Z振级的差值大于隧道壁与地面的差值。地面的Z振级最大值为69.51 dB,楼层的Z振级最大值为69.36 dB,均小于70 dB,符合文献[9]的要求。

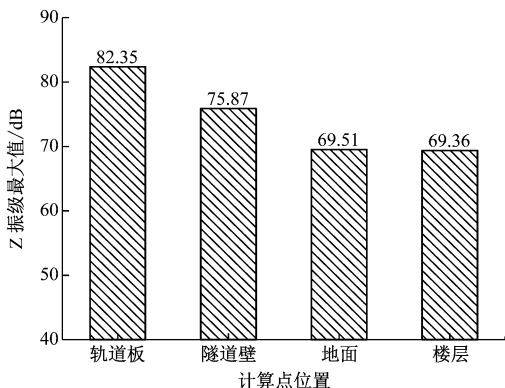


图7 模型结构中不同计算点的Z振级最大值

由于兰州市轨道交通1号线尚未开通,暂时无法通过现场试验来验证本文所建立的数值模型计算结果的精确度,现将本文的计算结果同已有文献中所选取的隧道埋深、建筑物避让距离及楼层数等现场条件与本文较类似的北京地铁15号线某建筑物内Z振级最大值的测试结果<sup>[10]</sup>进行对比,结果表明,文献[10]中测试的楼层Z振级最大值约为65 dB,这与本文计算结果(69.36 dB)的差值小于5 dB,由此可知,模型中计算结果的精确度是可以接受的。

## 4 结论

通过上述振动分析,得出以下结论:

(1)25 m长的减振垫轨道板的振型主要包括1阶弯曲、1阶扭转,2阶弯曲、2阶扭转以及多阶弯曲、多阶扭转,且前10阶固有频率均小于80 Hz。

(2)轨道板、隧道壁、地面和楼层的1/3倍频程

(下转第165页)

采用 Vampire 软件对车辆进行了动力学性能分析计算,且分别对用户合同中规定的 11 种工况进行了计算分析,计算内容包括车辆高速稳定性、运行安全性、侧风倾覆、静态轮重减载及动态轮重减载、乘坐舒适性能以及小曲线通过性能等。

为了确保计算结果的准确性及有效性,采用轨道检测设备对已经磨耗到限的轨道进行了正线和车厂线的轨道测试,根据测试结果形成真实的轨道谱,并将真实的轨道谱输入到计算模型中。另外,对不同运营公里的车轮进行了踏面外形测试,并绘制出磨耗踏面外形。结合轨廓测试及磨耗轮踏面外形测试,动力学计算考虑了新轮/新轨,新轮/磨耗轨,磨耗轮/新轨,磨耗轮/磨耗轨 4 种轮轨匹配关系,并逐一对其动力学性能进行计算分析。结果表明,车辆的动力学性能完全满足用户合同要求。

### 3 结 语

轴箱内置式地铁转向架完全是长客股份自主

研发的产品,同时也是长客股份及国内其它轨道车辆企业首次为美国地铁提供转向架产品。该类型的转向架通过结构设计、计算及试验验证,证明转向架性能完全满足用户合同及规范使用要求。

### 参考文献

- [1] 严隽毫. 车辆工程[M]. 3 版. 北京:中国铁道出版社,2007.
- [2] 孙天助,梁树林,傅茂海,等. 内侧轴箱式转向架曲线通过性能研究[J]. 铁道车辆,2008,46(12):1.
- [3] 梁树林,傅茂海. 内侧悬挂转向架在城轨车辆中的应用研究[J]. 铁道车辆,2006,44(4):4.
- [4] 许小强,赵洪伦,沈钢. 内轴箱式轻轨转向架的设计研究[J]. 铁道车辆,2000,38(增刊1):113.
- [5] UNZICKER T. Truck frame and bolster structural performance FEA report[R]. Atchison; Bradken, 2016.
- [6] TITUS S. Truck frame and bolster test report[R]. Buchanan; Clark, 2017.
- [7] LIU Y. Vehicle dynamics simulation report[R]. Springfield: ENSCO, 2017.

(收稿日期:2018-09-05)

(上接第 93 页)

加速度级曲线中出现的两个峰值对应的中心频率 31.5 Hz 和 80 Hz 与轨道板第 5 阶、第 10 阶主振型的固有频率有关,减振垫轨道的中心频率介于 3.15 Hz 和 8 Hz 之间时的减振效果较好。

(3)隧道埋深大于 11 m,以及采用减振垫轨道结构的情况下,隧道正上方地面和楼层的 Z 振级最大值均小于 70 dB,能够满足环评标准的要求。

(4)对比类似现场试验结果可知,本文所建立的数值模型可以较好地预测列车运营所致环境振动,在土层厚度和土质参数改变的情况下亦可作进一步推广应用。

### 参考文献

- [1] 于鹏,蔡向辉,蔡小培,等. 不同减振垫刚度下板式轨道减振特性研究[J]. 铁道标准设计,2017(4):1.
- [2] 曹宇泽,田苗盛,杨其振. 隔离式橡胶浮置板减振性能分析

[J]. 铁道工程学报,2013(2):34.

- [3] 张娅敏. 设置减振垫层的双块式无砟轨道分块长度静力学分析研究[J]. 铁道建筑技术,2014(12):51.
- [4] 赵才友,王平. 桥上无砟轨道橡胶减振垫减振性能试验研究[J]. 中国铁道科学,2013(4):8.
- [5] 付琪璋. 道床板长度对减振垫轨道结构振动性能影响分析[J]. 铁道标准设计,2016(6):5.
- [6] 金浩,刘维宁,周顺华. 板下减振垫对橡胶浮置板轨道减振性能的影响[J]. 铁道科学与工程学报,2016(2):245.
- [7] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4 版. 北京:科学出版社,2015.
- [8] 和振兴. 板式无砟轨道交通引起的环境振动研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
- [9] 中华人民共和国环保部. 城市区域环境噪声标准:GB3096—1993[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
- [10] 张胜龙. 地铁列车引起的周围建筑物振动及二次噪声预测研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.

(收稿日期:2018-02-01)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com