

# 带有上盖物业的地铁车辆基地试车线不同轨道结构对邻近建筑物振动影响分析

董光辉

(天津市地下铁道集团有限公司,300392,天津//高级工程师)

**摘 要** 对带有上盖物业的地铁车辆基地试车线采用不同轨道结构的情况下,列车通过时所引起的振动对邻近建筑物的影响进行有限元仿真分析。结果表明,与普通碎石道床相比,所提出的浮置板结构碎石道床,能够明显降低试车线对邻近建筑物的振动影响。因此地铁车辆基地上盖物业开发时,在开发初期,须分析列车运行对开发项目的振动噪声影响,并在轨道结构中采取相应的减振措施以减少影响。

**关键词** 地铁;车辆基地;上盖物业;浮置板结构碎石道床

**中图分类号** U211.3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.10.017

**Vibration Influence of Different Track Structures on Adjacent Buildings for the Test Line of Metro Vehicle Base with Cover Property**

DONG Guanghui

**Abstract** In the condition when different track structures are adopted by the test line of metro vehicle base with cover property, the vibration influence on adjacent buildings caused by train passing is simulated by finite element analysis. The results show that compared to the ordinary ballast bed, the proposed floating slab ballast bed can significantly reduce the vibration impact of the test line on adjacent buildings. At the initial stage of metro vehicle base cover property construction, it is necessary to analyze the vibration and noise impact of train operation on the project to be developed, corresponding vibration reduction measures should be taken in the track structure to reduce the impact.

**Key words** metro; vehicle base; cover property; floating slab ballast bed

**Author's address** Tianjin Metro Group Co., Ltd., 300392, Tianjin, China

近年来,城市轨道交通车辆基地上盖开发成为一种趋势。列车运行会给车辆基地上盖物业及邻近建筑物带来振动噪声干扰,因此,在项目建设初期,需对其进行振动影响预测,并设计合理的减振

措施以减少列车运行时带来的振动噪声影响。

本文对带有上盖物业的地铁车辆基地试车线不同轨道结构对邻近建筑物的振动影响进行有限元仿真分析。设计了一种碎石道床浮置板轨道减振结构,并与普通碎石道床对比分析其减振效果。

## 1 仿真荷载和工况

本文采用车辆轨道耦合动力学模型,仿真模拟动态轮轨荷载施加在三维有限元仿真模型钢轨节点上的情况,并进行瞬态动力学仿真计算,分析其对邻近建筑物的振动响应。

### 1.1 仿真荷载

地铁列车采用 6 节编组(4 动 2 拖)A 型车,列车运行速度为 60 km/h。轨道结构采用无缝线路、60 kg/m 钢轨、弹条 I 型扣件和碎石道床。通过轮轨耦合动力学解析模型计算轮轨荷载<sup>[5-8]</sup>,如图 1 所示。计算所得的轮轨力如图 2 所示。

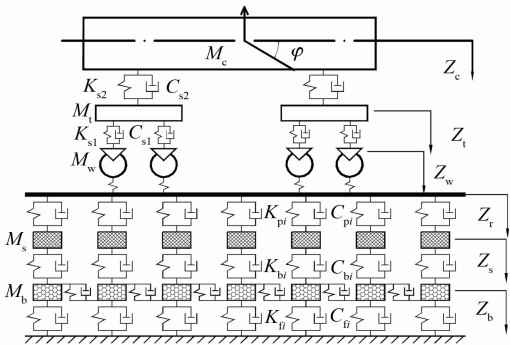


图 1 轮轨耦合动力学解析模型

### 1.2 减振措施

本文采用一种碎石道床浮置板轨道结构,上部为普通碎石道床结构,中部为现浇或预制浮置板,下部为弹性基础。其设计方案如图 3 所示。通过整体结构设计,在满足结构安全的前提下,通过改变系统自振频率达到系统隔振效果。

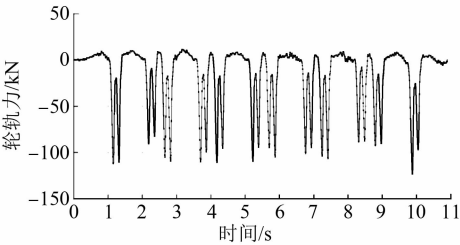


图2 轮轨荷载

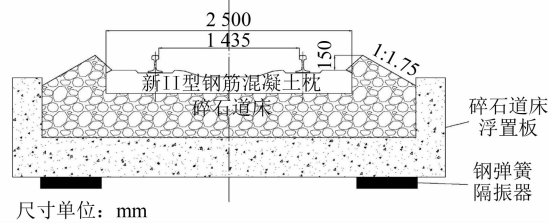


图3 碎石道床浮置板轨道结构设计方案

1.3 仿真工况

列车通过试车线时,对普通碎石道床与不同刚度支座的浮置板结构碎石道床对邻近建筑物不同楼层的振动响应进行对比分析。支座刚度分别为 6 kN/mm、8 kN/mm、10 kN/mm、13 kN/mm、15 kN/mm、18 kN/mm。

2 有限元仿真分析

2.1 仿真分析模型

结合带有上盖物业的地铁车辆基地试车线及邻近建筑物的实际情况,建立有限元仿真分析模型。邻近建筑物为混凝土框架结构,高度为 120 m,共有 27 层,距离试车线中心距离为 10 m。依照建筑图纸和地基勘察资料建立有限元三维分层地基土体和相应的黏弹性边界单元,且包含建筑结构的三维有限元仿真模型。

由于三维模型尺寸较大,网格尺寸不宜过小,否则会造成有限元模型过大,增加计算时间。建立的有限元模型局部图如图 4 所示。有限元模型包括邻近建筑物、地下连续墙、分层地基以及分层地基

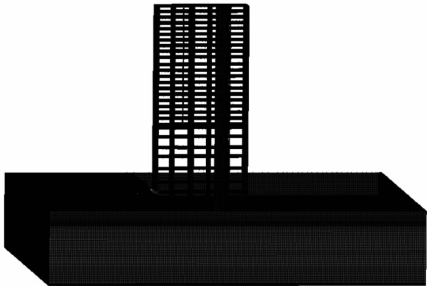


图4 邻近建筑有限元模型

对应的黏弹性边界单元,分层地基用不同的颜色代表。地基土体网格尺寸为 1 m,建筑物网格尺寸为 0.3 m。在有限元仿真分析模型中分别建立碎石道床和碎石道床浮置板轨道有限元模型,如图 5 所示。

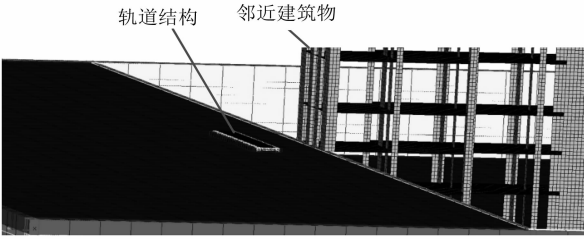


图5 仿真分析有限元模型

2.2 仿真分析计算公式

将通过轮轨耦合模型计算所得到的轮轨力施加在三维有限元模型的钢轨上。将轮轨力垂向荷载施加在每个扣件节点之上,然后按照距离和车速计算出滞后时间,再将该滞后时间添加在每个扣件节点力上的荷载步之前。计算如式(1)、式(2)所示。

$$T_{Fi} = T + \Delta t i \tag{1}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v} \tag{2}$$

式中:

$T_{Fi}$ ——第  $i$  个扣件节点上时间荷载的开始时间;

$\Delta s$ ——扣件间距;

$v$ ——列车运行速度。

2.3 观察点布置

对不同支座刚度下建筑物各楼层不同位置处的振动响应进行分析。观察点布置示意图如图 6 所示。观察点 1 和观察点 3 位于邻近建筑物 1 层的框架剪力墙位置处,观察点 2 位于邻近建筑物 1 层的楼板中部。

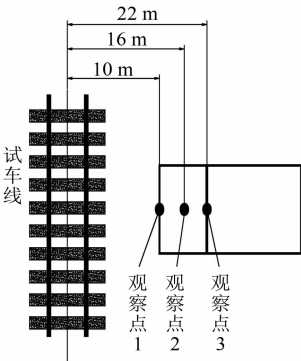


图6 观察点布置平面示意图

2.4 时域频谱分析

图 7~10 为列车通过时观察点 1 处邻近建筑物 1 层楼板端部的时域曲线和频域曲线。由图 7 可见,位于试车线近侧的楼板端部(观察点 1)振动较大,加速度峰值接近  $0.05\text{ m/s}^2$ 。由图 8 可见,该处在  $80\text{ Hz}$  范围内均有较大振动,同时在  $20\text{ Hz}$  处振动最大,该处剪力墙与地下连续墙为一体结构。

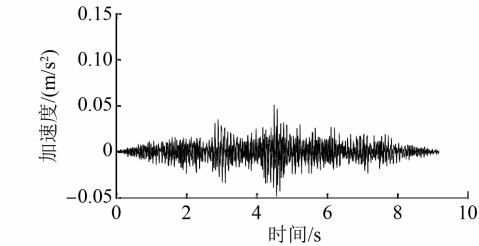


图 7 观察点 1 处临近建筑物楼板端部时域曲线

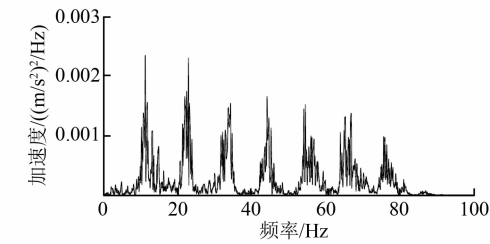


图 8 观察点 1 处临近建筑物楼板端部频域曲线

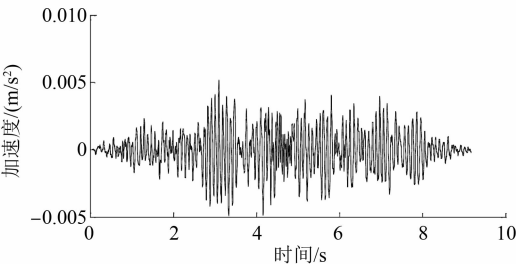


图 9 支座刚度为  $6\text{ kN/mm}$  时邻近建筑物楼板端部时域曲线

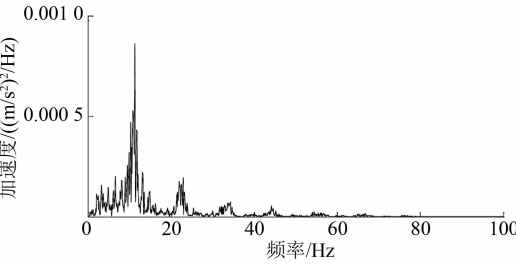


图 10 观察点 1 处支座刚度为  $6\text{ kN/mm}$  时邻近建筑物  
楼板端部频域曲线

2.5 倍频程振级分析

图 11、图 12 分别为列车通过时,观察点 1 和观察

点 2 处碎石道床邻近建筑物不同楼层的  $1/3$  倍程曲线。由图 11、图 12 可见:对于碎石道床,列车通过试车线时,邻近建筑物不同楼层的振动在  $10\text{ Hz}$  时达到最大值;观察点 1 和观察点 2 处的振级在  $80\text{ dB}$  以内;观察点 1 处 27 层的分频振级最大;在  $16\sim 80\text{ Hz}$  范围内,19 层及 27 层的振级小于 1 层及 10 层。

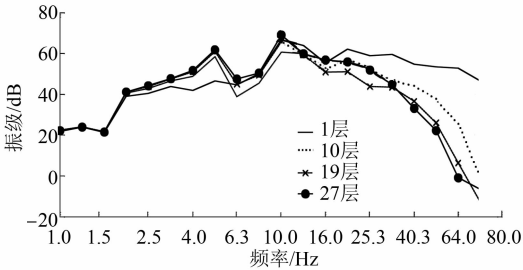


图 11 观察点 1 处碎石道床邻近建筑物分频振级

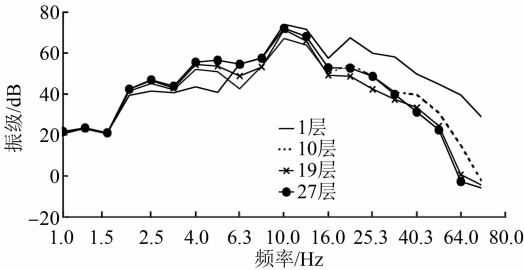


图 12 观察点 2 处碎石道床邻近建筑物分频振级

图 13、图 14 分别为列车通过时,观察点 1 和观察点 2 处不同支座刚度浮置板结构碎石道床邻近建筑物 1 层的  $1/3$  倍程曲线。从图 13、图 14 可见:对于不同支座刚度浮置板结构碎石道床,列车通过试车线时,邻近建筑物 1 层的振动在  $10\text{ Hz}$  时达到最大值;楼板中部(观察点 2)处振动大于楼板端部(观察点 1)处振动;随着支座刚度的增大,邻近建筑物的振级不断增大;支座刚度为  $12\text{ kN/mm}$ 、 $15\text{ kN/mm}$ 、 $18\text{ kN/mm}$  时,邻近建筑物的振级相差不大。

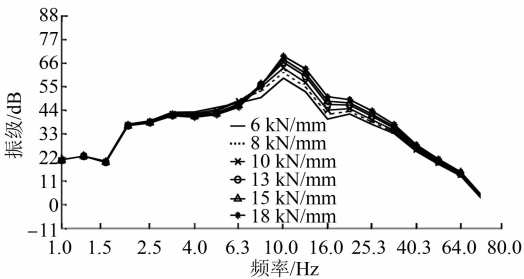


图 13 观察点 1 处不同支座刚度浮置板结构碎石道  
床邻近建筑物 1 层的分频振级

2.6 振级分析

为了分析邻近建筑物的振动水平,以及邻近建

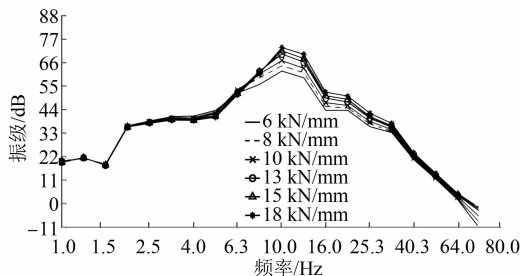


图 14 观察点 2 处不同支座刚度浮置板结构碎石道床邻近建筑物 1 层的分频振级

筑物不同楼层的振动变化规律。依照 GB 10070—1988《城市区域环境振动标准》所规定的环境振动评价分析方法,对试车线邻近建筑物在不同工况下的振动响应进行铅垂向 Z 振级分析,结果如图 15~18 所示。

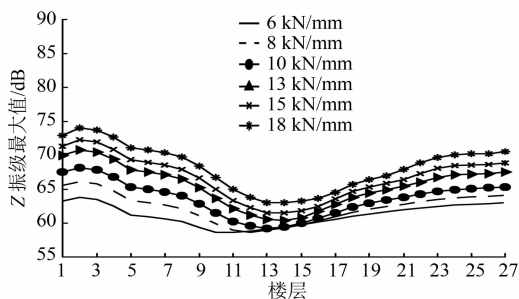


图 15 观察点 1 处不同支座刚度浮置板结构碎石道床邻近建筑物各楼层的铅垂向 Z 振级最大值

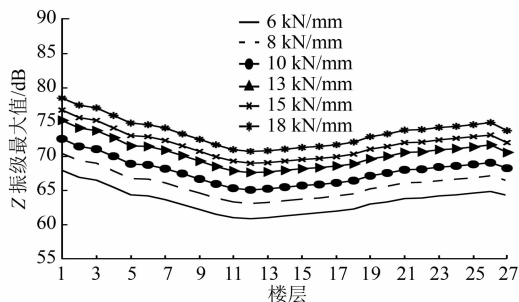


图 16 观察点 2 处不同支座刚度浮置板结构碎石道床邻近建筑物各楼层的铅垂向 Z 振级最大值

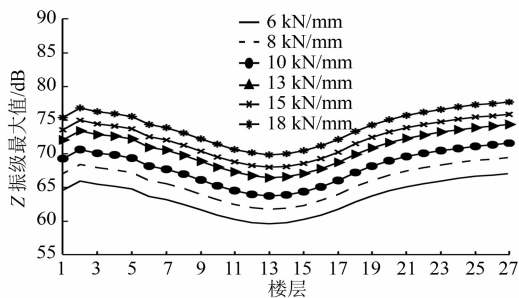


图 17 观察点 3 处不同支座刚度浮置板结构碎石道床邻近建筑物各楼层的铅垂向 Z 振级最大值

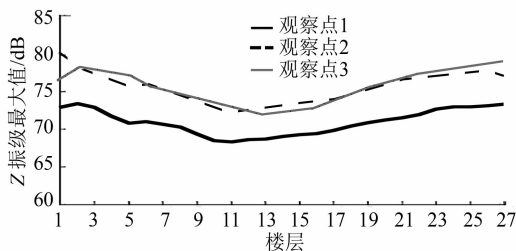


图 18 碎石道床邻近建筑物各楼层铅垂向 Z 振级最大值

对于浮置板结构碎石道床,由图 15~17 可见:随着楼层增高,各楼层振级先减小后增大,楼层楼板中部(观察点 2)处振动大于楼板端部(观察点 1)处振动;随着支座刚度的增大,不同楼层振动逐渐增大。支座刚度为 6 kN/mm 时,各楼层振级平均值最小,楼板端部振级的平均值为 61.24 dB,楼板中部振级的平均值为 63.50 dB。

对于碎石道床,由图 18 可见:楼层楼板中部(观察点 2)处振动大于楼板端部(观察点 1)处振动,同时,邻近建筑结构振动较大;1 层楼板中部的振动值最大,达到 80.23 dB;随着楼层增高,振动先减小后增大,总体上变化不大。楼板端部振级的平均值为 71.87 dB,楼板中部振级的平均值为 76.65 dB。

### 3 结论

本文采用车辆轨道耦合动力学模型,结合有限元仿真分析的方法,对带有上盖物业的地铁车辆基地试车线对邻近建筑物的振动响应进行了预测分析,得出以下结论:

1) 列车通过试车线时,所引起的邻近建筑物不同楼层的振动,随着楼层的增加先减小后增大,总体变化不大,同时楼板中部振动大于楼板端部振动。

2) 带有上盖物业的地铁车辆基地试车线采用碎石道床时,列车通过试车线对邻近建筑物的振动影响较大,楼板中部振动在 75 dB 以上,需采用相应的减振措施。

3) 带有上盖物业的地铁车辆基地试车线采用浮置板结构碎石道床时,在保证上部碎石道床轨道结构形式的基础上,能够提供很好的隔振效果。采用低刚度支座时,其隔振效果最好;支座刚度采用 6 kN/mm 时,楼板中部振级平均值为 63.5 dB;随着支座刚度增加,隔振效果有所减少。

(下转第 74 页)

式进行调查。例如:被试者认为意象图与产品方案非常匹配,则选 9;如果认为意象图与产品方案非常不匹配,则选 1。试验样本选取了 3 种阿布贾地铁方案和 1 种其他城市地铁车辆设计方案进行对比验证。征集了 24 名不同职业的志愿者(男性 15 名,女性 9 名)参与本次试验,被试者年龄为 19~40 岁。试验结果见表 1。结果表明,所选择的 3 款阿布贾地铁车辆方案样本(样本 2、样本 3 和样本 4)的满意度均值分别为 7.000 0、7.291 7、6.916 7,高于样本 1(非阿布贾方案),说明三款阿布贾地铁车辆设计方案与尼日利亚地域符号具有较高的意象契合度。这也说明:将具有地域特色的文化符号与仿生特征应用在地铁车辆设计上,能够被高度认同;将本文所述的方法应用在地铁车辆工业设计中是可行的。

表 1 样本意象满意度评价结果

方案样本	满意度评价分数		
	平均值	标准差	方差
样本 1	5.666 7	1.007 2	1.014
样本 2	7.000 0	1.103 4	1.217
样本 3	7.291 7	0.954 6	0.911
样本 4	6.916 7	1.501 2	2.254

最终选取评价分数最高的样本 3 作为最终实施方案。该方案实车于 2019 年 12 月 20 日正式下线,是中车大连机车车辆有限公司首次研制的动力分散型内燃动车组(见图 4)。

5 结语

综上所述,结合地域文化与仿生意象进行的地铁车辆造型设计不仅是对标志性文化建筑、文化传承符号的概括和提取,而且能极大地反映当地的文化内涵,让当地人民对产品具有认同感的同时,也向外界展示了当地的地域文化。而辅以仿生设计



图 4 阿布贾地铁车辆样车

时,将生物进化过程中形成的适应高速运动的形态特征融入地铁车辆产品设计中,不但能够体现该地域的地理生态特色,也与产品的气动性能契合,这也使地铁车辆造型的构建更具有科学性。

参考文献

[1] 向泽锐,徐伯初,支锦亦.中国高速列车工业设计研究综述与展望[J].铁道学报,2013(12):9.

[2] NAGAMACHI M. Kansei engineering as a powerful consumer-oriented technology for product development[J]. Applied Ergonomics,2002,33(3):289.

[3] 祝莹,曹建中,韦艳丽.汽车造型设计中的形态仿生研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2010(10):1458.

[4] 赵剑波.管理意象引领战略变革:海尔“人单合一”双赢模式案例研究[J].南京大学学报(哲学·人文科学·社会科学),2014(4):78.

[5] 秦凯琦.轻轨车辆造型设计中的地域文化浅析[J].设计,2017(2):120.

[6] 任陆军.徽州地域文化在轨道交通工具造型设计中的应用研究[J].工业设计,2019(8):66.

[7] 鲁红雷.基于重庆地域文化的轨道交通工具设计研究[D].重庆:重庆大学,2014.

[8] 张传英,张继业.基于仿生形态的高速列车气动性能研究[J].机械,2019(4):42.

(收稿日期:2020-03-10)

(上接第 70 页)

参考文献

[1] 刘玮,李克飞,张东风.北京新机场线车辆段上盖物业开发轨道减振降噪设计[J].铁道勘察,2020(3):104.

[2] 冉蕾,马佳骏,孙井林,等.上盖开发车辆段库内轨道高等级减振扣件研发及应用[J].铁道勘察,2020(3):146.

[3] 伍永胜,农兴中.地铁车辆段上盖高层建筑结构体系研究与应用[J].建筑结构,2020(10):90.

[4] 谢伟平,袁葵,孙亮明.地铁车辆段上盖建筑车致振动试验[J].建筑科学与工程学报,2020(3):99.

[5] 杜林林.地铁列车曲线运行车轨耦合解析模型及振源特性研究[D].北京:北京交通大学,2018.

[6] 凌亮.高速列车—轨道三维刚柔耦合动力学研究[D].成都:西南交通大学,2015.

[7] 娄会彬.重载车辆作用下无砟轨道结构力学分析[D].成都:西南交通大学,2014.

[8] 凌亮.考虑多节车的高速列车/轨道耦合动力学研究[D].成都:西南交通大学,2012.

(收稿日期:2020-03-20)