

基于车-轨-浮置板耦合模型的隔振器减振性能研究^{*}

廖英英¹ 刘亚静^{1**} 刘永强²

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 050043, 石家庄; 2. 石家庄铁道大学机械工程学院, 050043, 石家庄//第一作者, 副教授)

摘 要 基于新型可便捷检修和更换的城市轨道交通橡胶浮置板隔振器, 利用 ADAMA-Matlab 联合仿真方法, 考虑了隔振器的滞后非线性, 建立了车-轨-浮置板耦合模型。研究了车辆载荷工况、隔振器布置数量和支撑失效情况对隔振器减振性能的影响。仿真研究发现: 满载工况下隔振器变形是空载时的 2 倍多, 但仍满足行业规范要求; 4 个隔振器足以承载列车在满载和空载工况下的列车运行; 浮置板在隔振器职责失效位置及周边位置的位移虽仍在规定的限值内, 但已明显增大, 因此当发生支撑失效时, 要及时更换隔振器。

关键词 城市轨道交通; 浮置板; 橡胶隔振器; 减振性能; 刚柔耦合模型

中图分类号 U211.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.08.004

Vibration Damping Performance of Vibration Isolator Based on Vehicle-Track-Floating Slab Coupling Model

LIAO Yingying, LIU Yajing, LIU Yongqiang

Abstract Based on a new type of vibration isolator with convenient maintenance and replacement, a coupling model of vehicle-railway-floating slab is established by using the ADAMA Matlab joint simulation method and putting the hysteretic non-linearity of the isolator into consideration. Then, the effect of vehicle load condition, number of vibration isolator arrangement and performance failure condition on the vibration isolation performance is studied. It is found that the isolator deformation in full load of train operation is twice more than that in no load condition, but it still meets the requirements of the industry specification. Since 4 vibration isolators are enough to carry the train operation under full load and no load conditions, the floating slab is significantly increased even when the slab displacement at the failure position or the surrounding positions is still within the specified limit. So, when the support failure occurs, isolators should be replaced in time.

Key words urban rail transit; floating slab; rubber isolator;

vibration damping performance; rigid-flexible coupling model

First-author's address School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, 050043, Shijiazhuang, China

浮置板为一种新型的轨道减振结构, 采用了典型的弹簧质量体系。其对减振起着关键性作用的部件是板下隔振器^[1]。研究浮置板隔振器的动力学性能和影响具有重要的理论意义和应用价值。

在浮置板隔振器减振性能研究方面, 文献[2]评价了浮置板轨道系统的减振性能, 肯定了浮置板的减振降噪性能。文献[3]对新型橡胶隔振器的非线性恢复力模型进行参数识别, 并对隔振器进行了动力性能研究。文献[4]建立了有限元模型并加载移动荷载进行动力学仿真, 研究了弹簧支撑数量对钢轨动态位移变化的影响。文献[5]在建立仿真有限元模型的基础上, 研究了隔振器间距和刚度对浮置板位移的影响。

城市轨道交通新型浮置板用减振器的橡胶元件, 具有很大的纵横向刚度, 其最大的优势在于安装和更换方便, 可不再使用限位器。文献[6]对此隔振器进行了相关的试验及参数识别。本文参考文献[6]进行建模, 对实际列车过程中的多种工况进行仿真, 进而研究橡胶隔振器对浮置板减振性能的影响, 为浮置板轨道橡胶隔振器的改进提供新方法和新思路。

1 车-轨-浮置板耦合模型的建立

1.1 车辆模型

基于广州地铁所用的 A 型车, 利用 ADAMS/RAIL 多体动力学软件建立了车辆模型。其主要参数如表 1 所示。为了方便计算, 所有的悬挂元件均

^{*} 国家自然科学基金项目(11790282, 11802184, 11902205); 河北省自然科学基金项目(A2016210099); 河北省人才工程培养经费资助科研项目(A2016002036); ^{**} 通信作者

考虑为线性,轮轨接触算法采用基于 Hertz 接触的快速查表法,轮轨激励不考虑轨道不平顺的影响。

表 1 车辆模型主要参数表

参数	取值	参数	取值
轴重/t	9.05	一系垂向阻尼/(N·s/m)	5 000
车体质量/kg	21 920	一系垂向刚度/(N/m)	1.7e6
车体侧滚转动惯量/(kg·m ²)	14 890	一系纵向刚度/(N/m)	6.6e6
车体摇头转动惯量/(kg·m ²)	617 310	一系横向刚度/(N/m)	10.4e6
构架质量/kg	2 550	二系垂向阻尼/(N·s/m)	30 000
构架侧滚转动惯量/(kg·m ²)	1 050	二系横向阻尼/(N·s/m)	30 000
构架点头转动惯量/(kg·m ²)	1 750	二系垂向刚度/(N/m)	275 000
构架摇头转动惯量/(kg·m ²)	1 980	二系横向刚度/(N/m)	300 000
轮对质量/kg	1 420	二系回转刚度/(N·m/rad)	213 900
轮对摇头转动惯量/(kg·m ²)	985	轴距/m	2.2

根据表 1 建立车体模型和转向架模型,如图 1 及图 2 所示。

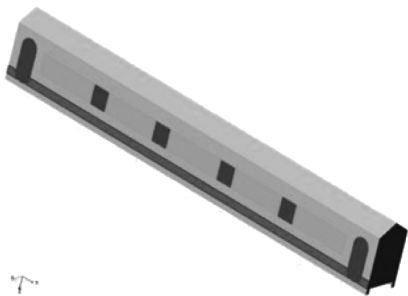


图 1 车体模型

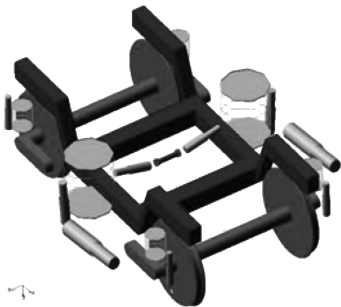


图 2 转向架模型

1.2 轨道模型

钢轨及钢轨以下的轨道结构用 ADAMS/RAIL 软件构建。柔性轨道使用 ADAMS/RAIL 的 Flextrack 模块模拟,钢轨用分段的 beam 梁单元模拟。

橡胶浮置板轨道系统的主要参数如表 2 所示。柔性轨道模型如图 3 所示。

表 2 模型中钢轨的主要参数

参数	取值
单位质量/(kg/m)	60.64
高度/m	0.176
截面面积/m ²	8.0×10 ⁻³
截面系数	0.342
截面惯性矩/m ⁴	3.217×10 ⁻⁵
弹性模量/(N/m ²)	2.06×10 ¹¹
转动惯量/(kg·m ²)	0.25
剪切弹性模量/Pa	7.73×10 ¹⁰

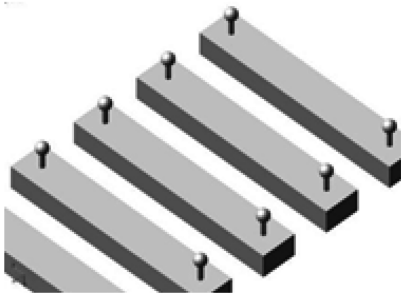


图 3 柔性轨道模型

1.3 浮置板模型

本文以某地铁的短型浮置板为原型建立浮置板模型,尺寸为 3.0 m(长)×3.0 m(宽)×0.3 m(厚)。浮置板板部采用 SOLID45 单元,密度为 2500 kg/m³。网格划分为映射划分,每一个小单元的长宽高之比和原浮置板尺寸之比一致^[7-9],以方便与 ADAMS/RAIL 软件建立的柔性轨道模型共同组装成完整的浮置模型。浮置板板部模型如图 4 所示。

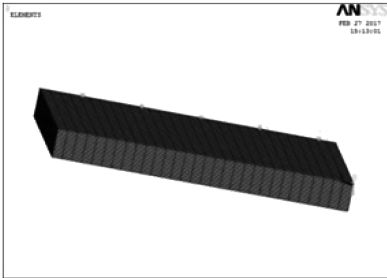


图 4 ANSYS 浮置板板部模型

利用 ADAMS/VIEW 中的力元模型来模拟建立橡胶隔振器模型。力元模型利用参数模型进行输入^[10]。文献[8]利用 GA-PS(改进遗传算法)参数识别法得到可模拟橡胶隔振器的 Bouc-Wen 滞回模型,如图 5 所示。

将振动频率为 8Hz、振动幅值为 1.6mm 的原始数据代入 Bouc-Wen 模型,得到仿真滞回曲线和试验滞回曲线如图 6 所示。由图 6 可见,试验曲线与

仿真曲线基本重合,拟合度较高。所以本文用 Bouc-Wen 模型来代替橡胶隔振器进行仿真计算。

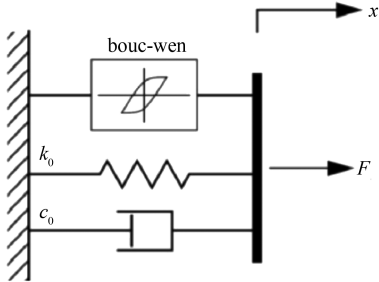


图 5 Bouc-Wen 模型

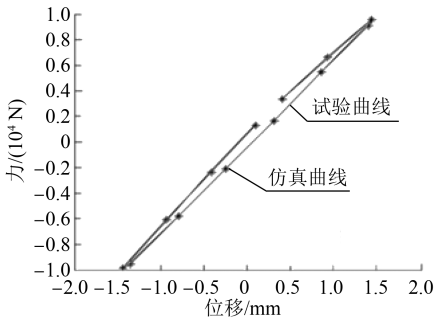


图 6 力-位移滞回曲线

1.4 联合仿真模型的验证

ADAMS-Matlab 联合仿真借助了 Matlab 软件的强大计算功能,得到的结果更具有说明力。ADAMS/RAIL 软件在仿真结束后,就会输出联合仿真文件。输出的程序只要对应于 Matlab 即可。Matlab 软件能自动识别力元模型并进行导入,从而加快了仿真速度,提高了仿真精准性。

对建立好的联合仿真模型还要进行模型正确性验证。

模型正确性验证的仿真工况为:橡胶减振器的水平间距为 1.435 m,纵向间距为 0.6 m;仿真步长为 0.005 s;列车运行速度为 100 km/h;不考虑轨道不平顺的影响。仿真结果中,1[#]和 2[#]橡胶隔振器位移图如图 7 所示。其余隔振器的位移曲线与之类似。

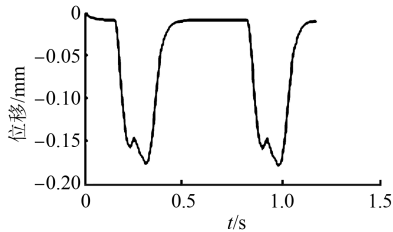
由图 7 可知,橡胶隔振器的最大位移均为 0.18 mm 左右,远远小于城市轨道交通行业规定值(3.00 mm),满足要求。

2 动力学仿真分析

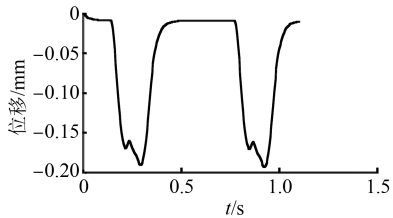
2.1 列车载重对轨道动力学性能的影响

近年来,城市轨道交通成为很多城市居民出行

的首选方式。在高峰时段,列车都会出现爆满超重的情况。因此仅研究空载列车的动力学性能已远远不能满足现实的需求。本文按列车满载时人数为 310 人及 50 kg/人计算,预计将增加 15.5 t 的乘客质量。这些质量按照均布载荷的形式施加。



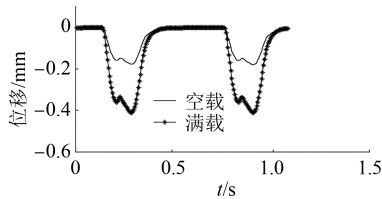
a) 1[#]隔振器



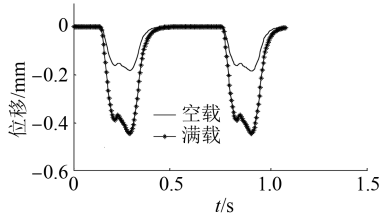
b) 2[#]隔振器

图 7 隔振器位移仿真曲线

在列车空载和满载工况下,轨道下方 1[#]~2[#]隔振器的位移如图 8 所示,其余隔振器的位移曲线情况与之类似。



a) 1[#]隔振器



b) 2[#]隔振器

图 8 不同载重工况下的隔振器位移仿真曲线

由图 8 可知,在空载和满载工况下,隔振器的位移变化明显。满载工况下的隔振器最大位移均约为 0.41 mm 左右,是空载工况隔振器位移的 2.3 倍。由此可知,列车满载运行对轨道的变形影响较大。然而,满载工况时的隔振器最大位移仍低于相关规范要求,可以满足高峰时段的列车运营需要。

2.2 橡胶隔振器个数对轨道动力学性能的影响

假设 1 块浮置板下布置 4 个隔振器,则不同载荷工况下各隔振器的仿真位移如图 9 所示。

由图 9 可知:所有橡胶隔振器的位移变化值均在安全范围内,说明在所建模型中 1 块浮置板下布置 4 个橡胶隔振器足以承载满载和空载列车的运行位移变化。实际运营经验也证明,在 1 块 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 长的浮置板下布置 4 个橡胶隔振器完全能够满足要求。布置过多的橡胶隔振器不仅会造成资源上的浪费,还有可能减少隔振层整体的刚度,影响列车运行安全性。

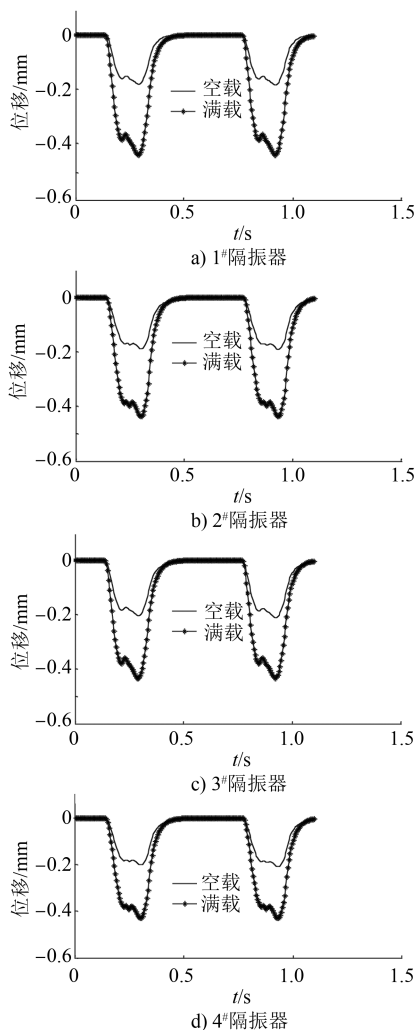


图 9 不同载荷工况下各隔振器的位移仿真

2.3 橡胶隔振器支撑失效对轨道动力学性能的影响

受作用环境或动力学行为的影响,橡胶隔振器有可能出现不同程度的塑形变形。橡胶隔振器一旦损坏,会给浮置板轨道结构带来很大的危害。

支撑失效的仿真工况:支撑块数量为 4 个,间距为 0.6 m;对 2[#]橡胶隔振器进行失效处理,并按空载和满载两种工况对隔振器位移进行仿真分析。仿真分析结果如图 10 所示。

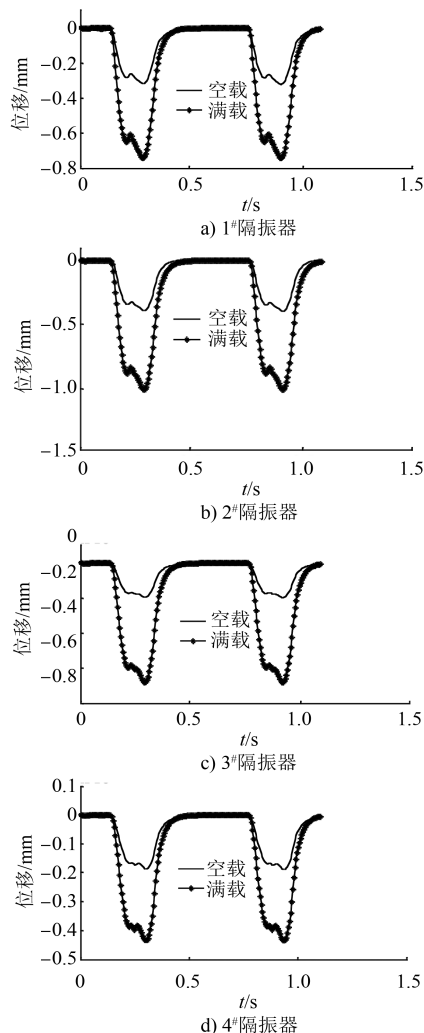


图 10 不同载荷工况下部分支撑失效时隔振器位移仿真

由图 10 可见,浮置板在隔振器失效位置及周边位置的位移虽仍在规范限值内变化,但位移明显增大。因此,发生支撑失效时,及时更换隔振器可以抑制隔振器周边位置的位移变化量。此外,从安全性的角度出发,应考虑尽量减少浮置板内部应力。

3 结语

城市轨道交通的振动问题广受关注。采用浮置板轨道结构是目前城市轨道交通中减振效果最好的措施之一。本文针对一种新型城市轨道交通橡胶浮置板隔振器,通过仿真分析车辆载荷工况、

(下转第 22 页)

3.3.4 小结

综上所述,大盾构采用的 5.2 m 线间距可以满足盾构机具、车辆设备限界、其他设备安装、中隔墙设置及防火门安装等要求,并预留了 0.10~0.15 m 的施工误差富裕量。可见该设计是合理的。

4 施工线设计

根据直曲一致设计,施工线依据左线或右线设置,位于左右线的中间位置,距离左右线均为 2.6 m。具体如图 6 所示。

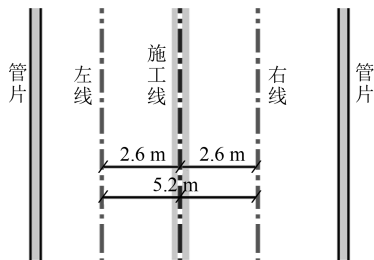


图 6 施工线的位置示意图

5 结语

大盾构施工线路采用三线设计,明显区别于传统盾构施工。在曲线段,通过加宽左右线线间距来满足车辆转弯要求。从设计角度来看,三线平面设计建议采用直曲一致设计,其设计比较简单。

对于左右线的线间距,本文从车辆设备限界、

疏散平台、中隔墙、防火门、大盾构施工等角度进行论证。论证结论表明:左、右线线间距采用 5.2 m 是合适的;施工线位于左右线的中间,与左、右线的线间距均为 2.6 m。

参考文献

- [1] 梁锋. 大盾构超深中间风井的设计与施工[J]. 山西建筑, 2013(19): 151.
- [2] 王建, 叶宇航, 刘加福, 等. 软土地基大直径地铁盾构隧道运营期衬砌结构受力特性现场测试研究[J]. 隧道建设, 2017(7): 781.
- [3] 徐秀峰, 黄爱军, 王春凯, 等. 地面超载软土大直径地铁盾构隧道结构变形预测[J]. 城市轨道交通研究, 2018(1): 57.
- [4] 陈卫军. 大直径盾构在轨道交通中的应用前景分析[J]. 现代城市轨道交通, 2017(4): 39.
- [5] 广州地铁设计研究院股份有限公司. 广州市城市轨道交通四号线工程区间结构施工图[R]. 广州: 广州地铁设计研究院股份有限公司, 2016.
- [6] 李宏安. 大直径盾构建造地铁区间及扩挖车站工程实践及应用前景分析[J]. 现代隧道技术, 2015(5): 16.
- [7] 刘延晨, 刘国祥. 南京地铁机场线高架 U 梁段同心圆设计[J]. 城市轨道交通研究, 2014(8): 62.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [9] 中华人民共和国建设部. 地铁限界标准: GJJ 96—2003[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [10] 李睿, 杨作刚, 欧阳全裕. 地铁线路最小线间距与加宽计算研讨[J]. 城市轨道交通研究, 2018(4): 53.

(收稿日期: 2019-12-07)

(上接第 18 页)

隔振器布置数量和支撑失效等情况对隔振器动力学性能的影响。研究结果表明: 浮置板轨道橡胶隔振器减振性能能够满足要求, 对城市轨道交通减振降噪作用显著。

参考文献

- [1] 陈新华. 轨道减振器性能参数系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [2] SCHILLEMANS L. Impact of sound and vibration of the North-South high-speed railway connection through the city of Antwerp Belgium [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003(3): 637.
- [3] 王丹, 张亚红, 白长青, 等. 新型橡胶隔振器参数辨识及动力学特性研究[J]. 应用力学学报, 2017(3): 410.
- [4] 耿传智, 刘在庆. 城市轨道交通弹簧浮置板轨道过渡段设计

分析[J]. 城市轨道交通研究, 2011(2): 39.

- [5] 姚纯洁, 郑玄东, 肖安鑫. 弹簧浮置板轨道结构静力学分析[J]. 城市轨道交通研究, 2012(2): 104.
- [6] 刘伟栋, 廖英英, 刘永强. 基于 GA-PS 的轨道橡胶隔振器滞回模型参数识别[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017(4): 46.
- [7] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [8] 王新敏, 李义强, 许宏强. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [9] 王新敏. ANSYS 结构动力分析与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [10] 陈志伟, 董月亮. MSC Adams 多体动力学仿真基础与实例解析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

(收稿日期: 2018-10-23)