

# 减振垫浮置道床加嵌套式减振扣件的组合减振应用研究

孙大新<sup>1,2,3</sup> 李现博<sup>1,2,3</sup> 刘铁旭<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京; 2. 北京市轨道结构工程技术研究中心, 100037, 北京;  
3. 城市轨道交通绿色与安全建造技术国家工程实验室, 100037, 北京 // 第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 某工程因土建施工偏差较大, 出现了轨道铺设空间严重不足、无法铺设钢弹簧浮置板的情况。提出了在减振垫浮置道床的基础上铺设嵌套式减振扣件的减振组合方案。通过建立车辆-轨道-结构耦合模型, 进行动力仿真计算, 分析得出其行车安全性、平稳性指标均合格; 并组织了实车减振效果测试, 测试表明减振组合方案减振效果良好, 可减振 16 dB 以上。

**关键词** 城市轨道交通; 浮置板轨道; 嵌套式减振扣件; 减振垫

**中图分类号** U211.3; U213.2<sup>+</sup>42

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2021.06.050

## Application of Combination of Nested Damping Fastener and Rubber Floating Slab Track

SUN Daxin, LI Xianbo, LIU Tiexu

**Abstract** Due to the large deviation of a project tunnel in construction, the space for track laying is seriously insufficient, and the steel spring floating slab track cannot be laid. A vibration damping combination scheme proposes to lay a nested damping fastener on rubber floating slab track. By establishing vehicle-track-structure coupling model, the dynamic simulation calculation is carried out. The results show that the vehicle safety and stability indexes are all qualified. The vibration reduction test shows that the damping combination scheme has good damping effect and can reduce vibration by more than 16 dB.

**Key words** urban rail transit; floating slab track; nested damping fastener; rubber

**First-author's address** Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100037, Beijing, China

减振设计是城市轨道交通轨道专业的关键工作之一。由于受城市规划及线路周边条件的制约较大, 城市轨道交通往往具有曲线数量多、曲线半径小和减振地段多等特点。

随着城市轨道交通的迅速发展, 近几年的轨道

减振技术, 已经基本形成中等减振、高等减振和特殊减振的分级减振格局<sup>[1]</sup>。在特殊减振领域, 钢弹簧浮置板轨道减振效果优异<sup>[2-5]</sup>, 但其占用轨道结构高度较大, 对土建施工偏差的适应性较差, 当地铁隧道出现较大施工偏差时, 无法铺设钢弹簧浮置板轨道。此种情况下, 通常是采用降低减振等级、铺设高等减振如减振垫道床的方案进行替代, 但减振效果将降低 4~6 dB; 若遇线路下穿居民楼等减振要求高的地段, 则仍无法满足环境要求。本文结合在实际工程中遇到的轨道结构高度不足的情况, 采用了减振垫浮置道床加嵌套式减振扣件的组合减振方案。经仿真计算及实际测试, 其减振效果达到 16 dB, 已基本达到特殊减振措施的减振要求。

## 1 工程概况

某地铁工程的区间隧道敏感点距离线路 9.7 m, 环评报告预测振动超标 5.8 dB, 二次结构噪声超标 7.0 dB(A)<sup>[6]</sup>, 要求铺设钢弹簧浮置板。但在盾构施工过程中, 该范围内有长 55 m 的线路出现较大线型偏差; 经调线调坡后, 轨道实际铺设高度为 599 mm, 中线水平偏差 60 mm (见图 1)。敏感点区域的其他基本情况见表 1。

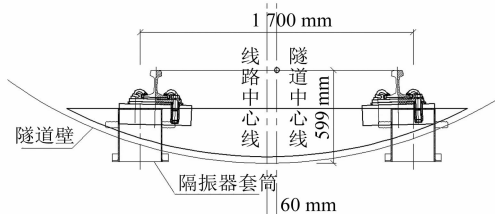


图 1 土建偏差后轨道相对位置关系

由图 1 可看出, 即使将隔振器横向间距缩小到 1 700 mm, 隔振器与隧道壁仍有明显的冲突, 因此无法铺设钢弹簧浮置板。

表 1 某地铁区间隧道敏感点区域基本情况

项目	取值或说明
设计速度/(km/h)	80
线路平面	直线+半径 300 m 曲线
车辆制式	地铁标准 B <sub>2</sub> 型车
供电制式	架空接触网
隧道内径/mm	5 400
浮置板轨道设计高度/mm	860
实际轨道高度/mm	599
水平中线偏差/mm	60

2 替代方案

在无法铺设钢弹簧浮置板的条件下,如何选择替代方案成为本工程的重点。替代方案除可适应本工程的铺设条件外,减振效果也应尽量接近钢弹簧浮置板。

从减振效果的角度来看,仅次于钢弹簧浮置板的高等减振措施是隔离式减振垫浮置板道床。而减振垫浮置板的减振能力一般为 10~12 dB,钢弹簧浮置板减振能力一般不小于 16 dB 的要求,因此,本

工程采用减振垫浮置道床加嵌套式减振扣件的组合减振方案来弥补减振能力的差距。

2.1 组合减振方案

组合减振方案替代了原设计采用的钢弹簧浮置板和普通扣件,其减振垫铺设于基底层与混凝土道床之间。该地基的静力弹性模量为 0.010 N/mm<sup>3</sup>。

嵌套式减振扣件是一种新型的减振扣件,采用子、母铁垫板分体扣压,使板下弹性垫板不受预压,弹性不受损失。扣件竖向静刚度为 11~15 kN/mm,动静比不大于 1.35。与同类型其他减振扣件相比,其主要特点是扣件高度、钉孔距和普通扣件完全相同,可与普通扣件实现通用互换;其较小的扣件高度使其在本工程条件下具有其他扣件所不具备的优势。

对于水平偏差及轨道结构高度较小等问题,根据需要可适当减薄道床与基底厚度,以及采用薄型短轨枕、增设道心配重凸台等措施进行处理(详见图 2)。

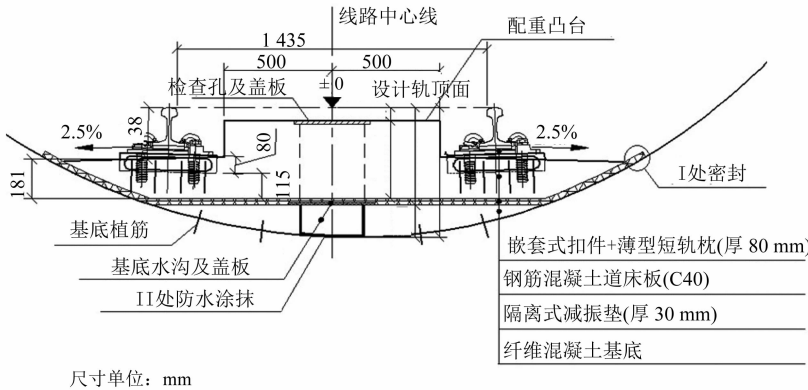


图 2 组合减振方案的道床设计断面

2.2 组合减振方案的道床动力学仿真计算

采用大型有限元软件建立车辆-轨道-隧道空间耦合模型(见图 3),分析组合减振方案的动力学指标及减振效果。

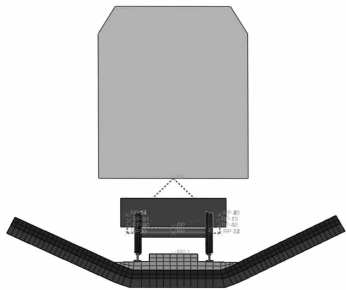


图 3 车辆-轨道-隧道空间耦合模型

1) 车体竖向加速度。图 4 为车体竖向加速度时程曲线。从图 4 可以看到,车体振动加速度最大值  $A_{\max}$  为 0.936 m/s<sup>2</sup>,满足车体振动加速度限值为 1.0 m/s<sup>2</sup>(即 0.1 g, g 为重力加速度)<sup>[8]</sup> 的要求。

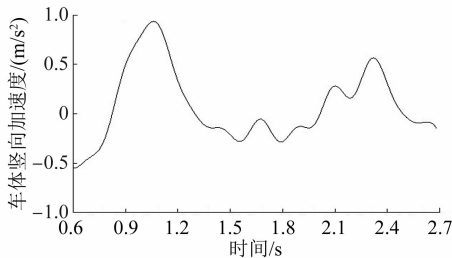


图 4 车体竖向加速度时程曲线

2) 轮轨垂向力。由仿真计算结果可知,轮轨垂

向力为 60~80 kN。由静态垂向力为 70 kN 可以得出,其垂向力冲击系数较小,为 1.08 左右。

3) 脱轨系数。由仿真计算结果可知,轮轨横向力最大值为 29.38 kN,最大脱轨系数为 0.379(见图 5)。该脱轨系数小于 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定与试验鉴定规范》规定的 0.8<sup>[9]</sup> 的限值要求。

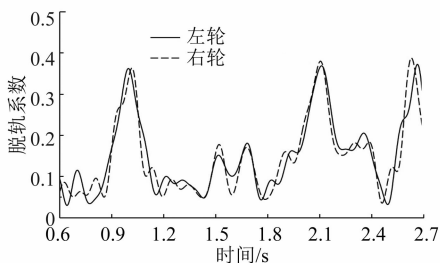


图5 脱轨系数时程曲线

4) 轮重减载率。由图 6 可知,轮重减载率最大为 0.059,满足 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定与试验鉴定规范》规定的 0.6 的限值要求。

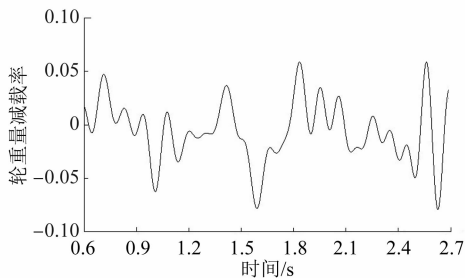


图6 轮重减载率时程曲线

5) 振动加速度及减振效果。在减振垫道床和短轨枕基础上铺设嵌套式减振扣件或普通扣件的钢轨和隧道壁的振动加速度级对比如图 7 和图 8 所示。通过频域分析可见,钢轨振动加速度在 160 Hz 时有较明显的振动峰值,嵌套减振扣件与普通扣件的峰值频率基本相同。但在实车振动测试中,在 400 Hz 以下并未发现钢轨有明显的振动峰值。与

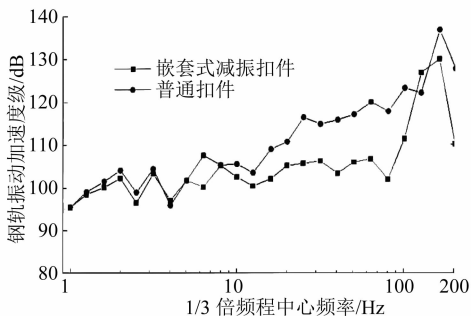


图7 钢轨振动加速度级对比

铺设普通扣件的橡胶减振垫相比,组合减振方案减振效果在 6.07 dB 左右。

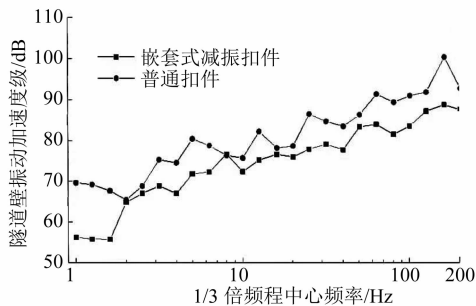


图8 隧道壁振动加速度级对比

### 3 实车减振效果测试

为进一步验证组合减振方案的减振效果,进行了实车测试<sup>[10]</sup>,主要测试不同断面钢轨、道床和隧道壁的竖向振动加速度。测试中选择了3处分别铺设减振垫浮置道床、橡胶减振垫道床和普通道床地段进行同条件对比。这3处地段的线路条件和车速基本相同,全部位于半径为 350 m 的曲线上,实际车速为 60 km/h。其中,隧道壁竖向振动加速度测试结果如图 9 所示。

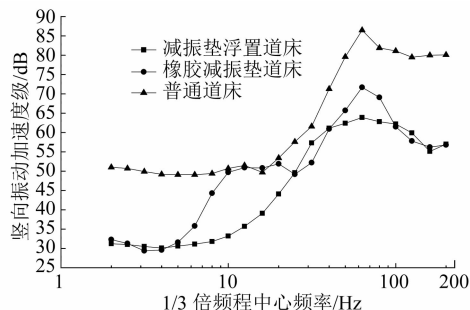


图9 实测隧道壁竖向振动加速度级对比

经对测试结果进行换算,与普通道床相比,橡胶减振垫道床可减振 12.8 dB(Z 振级);采用嵌套式减振扣件的减振垫浮置道床可减振 16.9 dB(Z 振级)。实车测试时车辆在小半径曲线的车速偏低,对减振效果稍有影响。

### 4 结语

本文通过仿真分析,对某地铁工程采用嵌套式减振扣件与减振垫相匹配的组合减振方案进行了行车安全性和稳定性等多项指标的计算;仿真计算结果中各项指标均可满足规范要求。

通过实车测试,采用嵌套式减振扣件的组合减振方案的隧道壁处减振效果可达 16.9 dB(Z 振级)。

关于轮轨力及安全性指标的实车测试目前尚未进行,与仿真计算结果的符合程度尚有待验证。但本工程从试运行到通车至今,已实际运营超过 2 年,采用组合减振地段的行车平稳,未见轮轨异常磨损以及居民因环境振动而投诉。这基本可以说明,采用组合减振方案的效果良好。

20 世纪 90 年代,国内某地铁曾发生过减振扣件和弹性短轨枕两种减振措施组合使用而导致振动增加的情况,因此行业内一般认为 2 种不同形式的减振措施不宜组合在一起使用。但本工程的组合减振方案,采用的是两种不同原理和不同等级减振措施的组合,其中减振扣件主要靠扣件弹性进行减振,其固有频率一般在 31.5~40.0 Hz,主要降低高频振动;橡胶减振垫主要是靠弹性进行隔振,其固有频率一般在 14 Hz 左右,主要降低低频振动。本工程组合减振方案中 2 种措施的固有频率相差较多,相互之间可起到补偿作用,不易引起振动叠加。类似措施在香港地铁马鞍山线上已有良好的应用。本工程作为国内近些年实施的首例组合减振项目,对减振组合进行了初步的尝试,可为后续处理类似问题提供思路。

此外,本文重点对竖向动力学指标做了一些仿真计算和测试,但对横向位移、横向刚度匹配和适

应性等未进行深入探讨,后续将陆续开展这方面的对比研究。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] 张宏亮,谷爱军,张丁盛. 钢弹簧浮置板轨道结构在不同频段的隔振效率[J]. 都市轨道交通,2008(3): 41.
- [3] 姚京川,杨宜谦,王澜. 浮置板式轨道结构隔振效果分析[J]. 振动与冲击,2005(6): 108.
- [4] 任静. 城市铁路西直门车站钢弹簧浮置板道床的应用与设计[J]. 地铁与轻轨,2003(1): 30.
- [5] 杨秀仁. 城市轨道交通轨道工程技术与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2016: 37.
- [6] 安徽省四维环境工程有限公司. 合肥市轨道交通 1 号线一期工程部分路段减振措施变更环境影响报告[R]. 合肥:安徽省四维环境工程有限公司,2016.
- [7] 北京铁科工程检测中心. 杭州地铁 1 号线钢弹簧浮置板和减振垫浮置板减振效果检测报告[R]. 北京:北京铁科工程检测中心,2012.
- [8] 中华人民共和国铁道部. 铁路线路修理规则:铁运[2006]146 号[S]. 北京:中国铁道出版社,2006.
- [9] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范:GB/T 5599—2019[S]. 北京:中国标准质检出版社,2019.
- [10] 北京铁科工程检测中心. 合肥地铁 1 号线减振轨道减振效果现场检测报告[R]. 北京:北京铁科工程检测中心,2017.

(收稿日期:2019-08-26)

## Commentary

# Establish Standardized Urban Rail Transit Cloud and Big Data Platform

LI Zhonghao

(Deputy Director of China Association of Metros Expert and Academic Committee, Director of  
Former Ministry of Railways Information Technology Center)

In view of the differences in launching time and current stage of urban rail transit construction in cities nationwide, especially of the differences in the cognition level of "urban rail transit+informatization" and standards of informatization across regions, the informatization progress and implementation level is not universally organized across the cities. Meanwhile, with the rapid development of new information technologies such as cloud computing, big data, Internet of Things, artificial intelligence and 5G, the construction of urban rail transit informatization, intelligent equipment, smart urban rail accelerates. For this circumstance, with the responsibility of "Transportation Power Lies in Urban Rail", China Association of Metros has devised China Urban Rail Transit Smart Urban Rail Development Outline (referred to as "Outline" in the following context) for the healthy development of urban rail industry informatization in China. Outline directs and encourages every city to advance the informatization and smart urban rail systematically, following the principle of "Localization, Innovation, Exploration, Experimentation".

In this sense, what is the relationship between urban rail informatization and smart urban rail? Essentially, smart urban rail is the formation from using new information technology to integrate all systems and services in urban rail, the epitomized demonstration of how informatization construction in urban rail field is entering a new stage. Informatization construction is the core and foun-