

# 新型橡胶浮筏板轨道减振系统的仿真及试验研究<sup>\*</sup>

张 彬<sup>1</sup> 张世荣<sup>2</sup> 王韶枫<sup>3</sup> 朱金晏<sup>1</sup>

(1. 中国船舶重工集团公司第七一一研究所, 201108, 上海; 2. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 530021, 南宁;

3. 无锡齐耀华东隔振科技有限公司, 214024, 无锡//第一作者, 研究员)

**摘 要** 介绍了新型橡胶浮筏板轨道减振系统的功能及组成。该减振系统采用橡胶隔振器作为弹性支撑元件, 具有体积小、自带阻尼、三向刚度可调及造价低等优点。通过数值仿真计算和室内模型试验对该减振系统进行了对比分析。分析结果表明, 新型橡胶浮筏板轨道减振系统在安全性和减振性能方面满足城市轨道交通的相关要求, 可作为城市轨道交通高等或特殊减振手段。

**关键词** 城市轨道交通; 轨道; 减振; 橡胶隔振器; 浮筏板  
**中图分类号** U213.2<sup>+</sup>42

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2020.06.012

## Simulation and Experimental Study on A New Rubber Floating Slab Track System

ZHANG Bin, ZHANG Shirong, WANG Shaofeng, ZHU Jinyanfang

**Abstract** The function and composition of a new rubber floating slab track system were introduced, in which rubber isolator is used as the elastic support element, owning the advantages such as small volume, self-damping, three-direction adjustable stiffness and low cost. Through numerical simulation calculation and laboratory model experiment, comparative analysis was carried out towards the vibration reduction system. The results have shown that the new rubber floating slab track system can satisfy the relative requirements in urban rail transit in terms of safety and vibration reduction performance, feasible for being used as advanced or special vibration reduction method in urban rail transit.

**Key words** urban rail transit; track; vibration reduction; rubber isolator; floating slab

**First-author's address** Shang Marine Diesel Engine Research Institute, 201108, Shanghai, China

随着城市轨道交通的快速发展, 轨道结构的振动噪声问题也日益凸显。通常的减振措施一般可分为一般减振、中等减振、高等或特殊减振<sup>[1]</sup>。目

前, 在特殊减振措施中, 减振效果最理想的是钢弹簧浮置板减振系统。然而, 随着该减振系统的大规模使用, 钢弹簧浮置板存在的问题也显现出来, 比如阻尼液泄露锈蚀、横向刚度低、刚度调整困难等, 而且虽然已经国产化但造价仍居高不下。为解决这些问题, 新型橡胶浮筏板减振系统应运而生, 该减振系统利用橡胶材料在耐锈蚀、高阻尼、高可塑性及低成本等方面所具有的优势<sup>[2]</sup>, 采用橡胶隔振器作为弹性支撑元件衰减振动传递。

本文介绍了新型橡胶浮筏板轨道减振系统的功能和组成, 并通过对橡胶浮筏板轨道减振系统进行静力学和减振效果数值仿真分析、实物样段室内试验验证的方法, 对比分析橡胶浮筏板轨道减振系统在行车安全和减振效果方面的性能。

## 1 橡胶浮筏板轨道减振系统功能及组成

### 1.1 系统功能

橡胶浮筏板轨道减振系统采用橡胶隔振器作为弹性支承元件安装于道床板底部, 在承受上部车辆系统和轨道系统载荷的同时, 能够大幅衰减轮轨振动向周边基础的传递, 其减振效果能够满足城市轨道交通特殊减振地段的振动控制要求, 适用于城市轨道交通地下线及高架线。

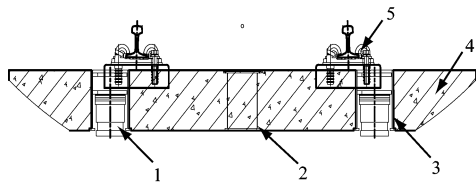
### 1.2 系统组成

橡胶浮筏板轨道减振系统主要由钢轨扣件、混凝土道床板、内置式橡胶隔振器、隔振器外套筒等组成, 如图1所示。

### 1.3 内置式橡胶隔振器

内置式橡胶隔振器采用金属与橡胶硫化为一整体的结构方式, 该方式可以保证隔振器承载均匀; 采用圆锥形结构设计, 承受载荷时发生压缩剪切变形, 隔振效果理想, 同时提供较大的横向刚度,

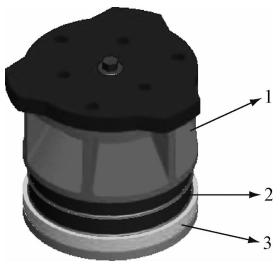
<sup>\*</sup> 广西省重大科技专项(桂科 AA16380046)



注:1——内置式橡胶隔振器;2——观察筒;3——外套筒;4——混凝土道床板;5——钢轨扣件

图1 橡胶浮筏板轨道减振系统组成示意图

提高横向稳定性,无需设置横向限位;材料本身具有阻尼特性,无需另外串联阻尼器,可通过调整橡胶配方改变产品性能,满足使用需要<sup>[3]</sup>。内置式橡胶隔振器结构示意图如图2所示。



注:1——上铁件;2——橡胶件;3——下铁件

图2 内置式橡胶隔振器结构示意图

内置式橡胶隔振器的性能参数为:静刚度  $7 (1 \pm 15\%) \text{ kN/mm}$ , 动静比  $\leq 1.2$ ; 500 万次疲劳试验永久变形不大于  $1 \text{ mm}$ , 刚度变化率不大于  $15\%$ ; 橡胶材料拉伸强度  $\geq 18 \text{ MPa}$ , 扯断伸长率  $\geq 500\%$ , 高温压缩 ( $70^\circ\text{C}$ ,  $22 \text{ h}$ ) 永久变形  $\leq 15\%$ 。

## 2 橡胶浮筏板轨道减振系统数值仿真分析

利用有限元软件建立钢轨-扣件-浮筏板-橡胶隔振器的三维模型,对浮筏板轨道进行静力学仿真分析。建立车辆-轨道-橡胶浮筏板耦合动力学模型,对浮筏板轨道结构的减振性能进行评估。

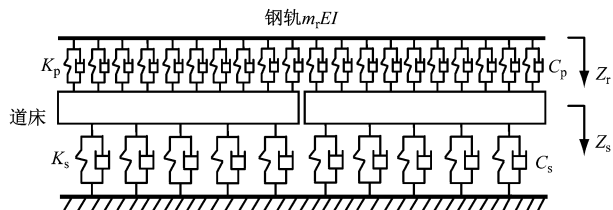
### 2.1 静力学仿真计算分析

#### 2.1.1 计算模型及参数

通过计算在列车载荷作用下轨道板的静变形和应力,从静力学角度对浮筏板轨道结构的强度进行研究。建立橡胶浮筏板轨道减振系统力学模型<sup>[4]</sup>,如图3所示。

扣件和橡胶隔振器采用线性弹簧模拟<sup>[5]</sup>,浮筏板采用弹性薄板进行模拟。建立梁板有限元模型,如图4所示。

列车车辆为B型车,轴重  $14 \text{ t}$ ,设计垂向静轮载为  $70 \text{ kN}$ ,横向静轮载为  $56 \text{ kN}$ (取值为垂向静轮载



注: $Z_r$ ——钢轨的位移; $Z_s$ ——浮筏板的位移; $m_r$ ——钢轨质量; $E$ ——钢轨的弹性模量; $I$ ——截面模量; $K_p$ 、 $C_p$ ——分别为扣件刚度和阻尼; $K_s$ 、 $C_s$ ——分别为下层隔振器刚度和阻尼。

图3 橡胶浮筏板轨道减振系统力学模型

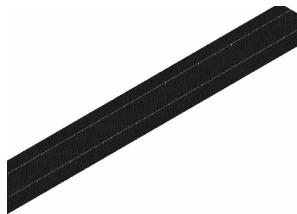


图4 浮筏板有限元模型

的  $0.8$  倍)。在板中位置加单个转向架垂向、横向荷载进行计算。

#### 2.1.2 计算结果及分析

浮筏板在单个转向架垂向和横向静载作用下的变形和受力云图如图5所示。浮筏板的最大垂向和横向变形数值为:最大垂向变形  $4.28 \text{ mm}$ , 最大横向变形  $0.64 \text{ mm}$ , 最大垂向压应力  $2.76 \text{ MPa}$ , 最大横向压应力  $0.82 \text{ MPa}$ 。

根据使用实际情况,为保证行车安全,列车静载荷作用下浮筏板最大变形应不超过  $5 \text{ mm}$ 。由计算结果可知,橡胶浮筏板轨道减振系统在轨道变形方面可以满足行车安全的要求。轨道板的最大压垂向应力也满足混凝土道床板的强度要求。

### 2.2 隔振效果仿真计算分析

为分析橡胶浮筏板轨道减振系统的减振效果,通过联合仿真建立车辆-轨道耦合动力学模型,计算橡胶浮筏板道床和普通道床隧道壁位置的振动加速度级,通过对比得到插入损失。

#### 2.2.1 计算模型及参数

本计算车辆为单节车模型,车体、转向架、轮对和一系、二系悬挂均在模型中。各基本部件之间通过弹性或刚性约束来限制车辆结构中各部件间的相对运动。钢轨为弹性体,采用欧拉梁模型。轨道结构的支承为弹性离散点支承,扣件、橡胶隔振器均为弹簧-阻尼系统。道床板为板壳结构。

在垂向平面内,轮轨接触可简化为赫兹接触,其理论计算公式为<sup>[6]</sup>:

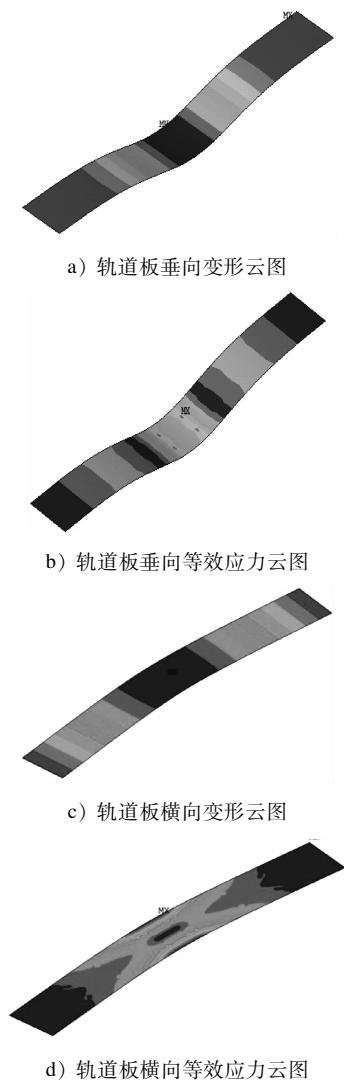


图5 单个转向架载荷下轨道结构变形及应力图

$$p(t) = [\delta_{z(t)} / G]^{3/2} \quad (1)$$

式中:

$p(t)$ ——轮轨力;

$t$ ——时间;

$G$ ——轮轨接触常数;

$\delta_{z(t)}$ ——轮轨间的弹性压缩量。

因轮轨接触弹簧大多数情况只起到联系、耦合车辆系统和轨道结构两个振动子系统的作用,所以轮轨接触弹簧刚度存在的误差并不会显著影响动力计算的结果。并且非线性赫兹接触弹簧会大大增加动力分析的难度,计算较繁琐,尤其是直接进行系统振动的频域分析时,采用非线性弹簧几乎是不可能的。因此在本文的模型中,可考虑对轮轨接触弹簧进行线性化处理,线性化的轮轨赫兹接触弹簧刚度计算公式推导过程为:

根据赫兹非线性接触理论公式可得:

$$\delta = Gp^{2/3} \quad (2)$$

式中:

$p$ ——轮轨力;

$\delta$ ——轮轨间的弹性压缩量。

进而得到轮轨非线性接触刚度  $K_c$  为:

$$K_c = \frac{dp}{d\delta} \quad (3)$$

对轮轨接触刚度进行线性化处理,即考虑轮轨压缩量与轮轨力之间是线性关系。假设等效线性化的接触刚度  $K_h$ ,以在静轮载  $p_0$  作用下的静压缩量  $\delta_0$  为基准,以轮轨力常见最大值  $p_1$  下的静压缩量  $\delta_1$  为边界,推导出轮轨接触的线性刚度为:

$$K_h = \frac{\Delta p}{\Delta \delta} = \frac{p_1 - p_0}{\delta_1 - \delta_0} \quad (4)$$

式中:

$\Delta p$ ——轮轨力的变化量;

$\Delta \delta$ ——与轮轨力对应的压缩量的变化量。

将式(2)带入式(4)得到轮轨接触的线性刚度表达式为:

$$K_h = \frac{p_1 - p_0}{G(p_1^{2/3} - p_0^{2/3})} \quad (5)$$

借助多体动力学软件 SIMPACK 计算车辆运行时产生的轮轨力。轨道模型总长度为 150 m,车辆参数参照地铁 B 型车设置,采用美国六级谱作为轨道不平顺谱。SIMPACK 软件模型如图 6 所示。

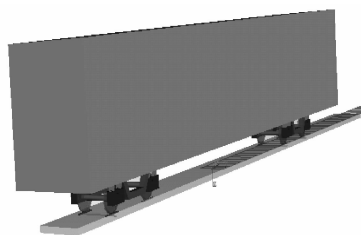


图6 SIMPACK 软件计算模型

使用有限元软件 ABAQUS 建立轨道-隧道-土体模型,扣件和橡胶隔振器采用线性弹簧模拟。为模拟隧道壁外部土层的无限性,将土层边界单元设置为 ABAQUS 无限元。具体模型如图 7 所示。

### 2.2.2 计算结果及分析

选取隧道中部某断面,在两侧隧道壁距离轨面上方 1.25 m 处选取 2 个点,分别得到浮筏板和普通道床对应的隧道壁 1/3 倍频加速度振级,再分别进行 Z 计权,结果如图 8 所示。

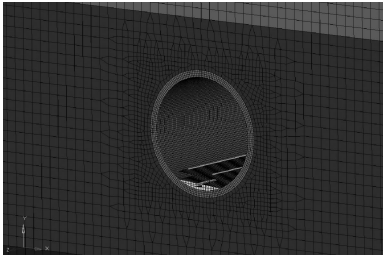


图7 轨道-隧道-土体模型

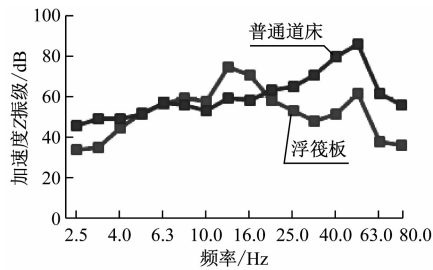


图8 浮筏板和普通道床的隧道壁加速度Z计权振级图

由计算结果可见,在 2.5 ~ 80.0 Hz 频率范围内,橡胶浮筏板的隧道壁振动比普通道床明显降低。计算 Z 计权加速度总振级,浮筏板道床为 78.9 dB,普通道床为 89.1 dB,两者的插入损失为 10.2 dB。橡胶浮筏板轨道减振系统的减振效果满足特殊减振措施的要求。

3 橡胶浮筏板轨道减振系统室内组装试验

为了验证橡胶浮筏板轨道减振系统的实际性能,预制了一块 3.60 m × 2.40 m × 0.34 m 的道床板,安装 6 只内置式橡胶隔振器,对橡胶浮筏板轨道结构的静变形和隔振效果进行室内测试,分析验证设计参数和仿真计算的准确性。

3.1 静态特性试验分析

在静荷载作用下,测试浮筏板垂向和横向位移,并以此计算浮筏板垂向和横向静刚度。

3.1.1 垂向位移测试

测试时,在浮筏板中部和两端位置 3 个断面两侧共布置 6 个位移计,在板中心两侧设置加载点,进行垂向加载。试验荷载范围为 0 ~ 180 kN,加载步长为 30 kN。不同荷载作用下的浮筏板垂向位移如图 9 所示。由图 9 可知,浮筏板垂向位移随着荷载的增大而增大,且线性极强。

不同荷载作用下的垂向静刚度如表 1 所示。

单个橡胶隔振器设计刚度为 10 kN/mm,则试验浮筏板设计刚度为 60 kN/mm,由表 1 可知,浮筏板垂向静刚度平均值为 59.6 kN/mm,试验数据与

设计参数相符合。由于浮筏板垂向刚度已知,因此可以推算得出加载单个转向架静载时,浮筏板变形量为 4.69 mm,满足道床板对变形量的控制要求。

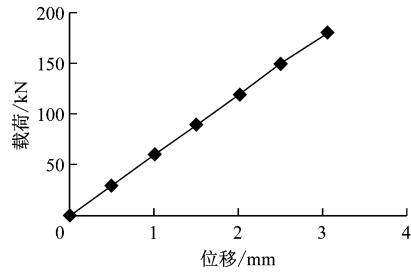


图9 不同荷载作用下的浮筏板垂向位移曲线

表 1 不同荷载作用下浮筏板垂向静刚度

荷载/kN	垂向静刚度/ (kN/mm)	荷载/kN	垂向静刚度/ (kN/mm)
30	59.6	120	59.6
60	59.9	150	60.0
90	59.7	180	59.1

3.1.2 横向位移测试

测试时,在浮筏板中部和两端共 3 个断面的一侧布置 3 个位移计,在另一侧的中心位置加载。在浮筏板顶部施加 160 kN 的垂向荷载,横向加载试验荷载范围为 0 ~ 50 kN,加载步长为 5 kN。不同荷载作用下的浮筏板横向位移如图 10 所示。不同荷载作用下的横向静刚度如表 2 所示。

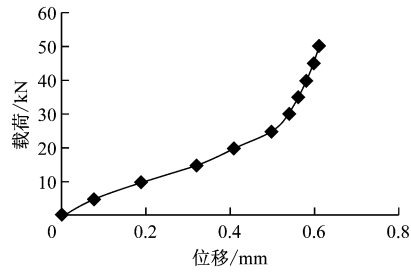


图10 不同荷载作用下的浮筏板横向位移曲线

表 2 不同荷载作用下浮筏板横向静刚度

荷载/kN	横向静刚度/ (kN/mm)	荷载/kN	横向静刚度/ (kN/mm)
5	64.10	30	139.8
10	42.78	35	217.9
15	41.59	40	227.9
20	51.02	45	328.5
25	55.76	50	328.5

由试验结果可知:浮筏板横向静刚度与载荷呈

非线性关系,随着载荷增加静刚度迅速增大,这表明浮筏板轨道减振系统具有可靠的横向稳定性。根据横向静变形曲线变化趋势,可推测在单个转向架横向载荷作用下,浮筏板横向静变形约为0.7 mm。

3.2 振动特性试验分析

采用落轴激振,对橡胶浮筏板的隔振性能进行测试。在刚性安装和浮置安装两种状态下,测试试验台的垂向振动加速度。通过对比两种状态下的测试结果分析橡胶浮筏板的减振性能。

3.2.1 试验内容

试验台上布置6个振动加速度测点。各测点传感器用于拾取落轴高度为10 mm的标准轮对冲击下的加速度时域信号,采集10组以上有效振动数据。

3.2.2 试验结果分析

对两种状态下的试验台振动加速度级进行Z计权后,结果如图11所示。

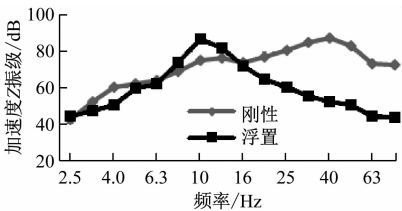


图11 刚性和浮置状态下试验台Z计权振级图

由计算可知,橡胶浮筏板较刚性安装状态下,试验台Z振级插入损失为9.3 dB。

4 计算及试验结果对比分析

将橡胶浮筏板静态性能和隔振性能的计算和室内试验结果对比如表3所示。

表3 橡胶浮筏板静态性能和隔振性能仿真与试验结果对比

项目	静变形/mm		隔振效果(Z计权)/dB
	垂向	横向	
仿真计算结果	4.28	0.64	10.2
室内试验结果	4.69	0.70	9.30

注:两者的垂向静变形偏差为9.58%,横向静变形偏差为9.38%,隔振效果偏差为8.82%

由表3可知,橡胶浮筏板静态性能和隔振性能的仿真与试验结果具有较好的吻合性,偏差在可接受范围内。计算结果可以较真实地反映实际情况,计算模型和参数可用于橡胶浮筏板安全性和减振

性能的预测评估。

5 结论

1) 仿真计算结果表明,浮筏板轨道在单个转向架静载作用下轨道板最大垂向位移为4.28 mm,最大横向位移为0.64 mm。在轨道变形方面可以满足行车安全性的要求。橡胶浮筏板道床相对于普通道床在隧道壁位置的Z计权插入损失为10.2 dB。隔振效果达到了轨道交通特殊减振措施的要求。

2) 室内组装试验结果表明,橡胶浮筏板垂向静变形与载荷呈明显的线性关系,垂向静刚度随载荷的增大基本保持不变。在单个转向架载荷下轨道板的垂向变形为4.69 mm,满足轨道板变形量的控制要求。浮筏板横向静变形与载荷呈现非线性关系,横向刚度随载荷增加迅速增大,确保其具有可靠的横向稳定性。橡胶浮筏板相对于刚性状态的试验台Z振级插入损失为9.3 dB。试验结果表明其满足减振效果的要求。

3) 橡胶浮筏板静态性能和隔振性能的仿真与试验结果具有较好的吻合性,计算模型和参数可用于橡胶浮筏板安全性和减振性能的预测评估。

综上,橡胶浮筏板轨道减振系统具有体积小、自带阻尼、三向刚度可调及造价低的优点,可以弥补同类产品的不足;在安全性和减振性能方面可以满足城市轨道交通的相关要求,可作为城市轨道交通高等或特殊减振的控制措施之一。

参考文献

[1] 刘维宁,马蒙. 地铁列车振动环境影响的预测、评估与控制[M]. 北京:科学出版社,2014.

[2] PARK S W. Analytical modeling of viscoelastic dampers for structural and vibration control[J]. Solids and Structures,2001,38:8 065.

[3] 杨宜谦,王澜,孙宁. 城市轨道交通中浮置板式轨道结构的设计[J]. 工程建设与设计,2005(4):14.

[4] 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,2005,24(6):109.

[5] OLSSON A K. Finite element procedures in modeling the dynamic properties of rubber[D]. Sweden:Lund University,2007.

[6] HUSSEIN M F M,HUNT H E M. A numerical model for calculating vibration due to a harmonic moving load on a floating-slab track with discontinuous slabs in an underground railway tunnel[J]. Journal of sound and vibration,2009,321: 363.

(收稿日期:2018-07-06)