

# The Vibration Reduction Characteristics of Steel Spring Floating Slab Track Used in Metro Based on Frequency-Domain Method

Yuanpeng He\*, Jian Han, Kaiyun Wang, Xiaozhen Sheng

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan  
Email: \*674954626@qq.com

Received: Jun. 10<sup>th</sup>, 2016; accepted: Jun. 27<sup>th</sup>, 2016; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Steel spring floating slab track is one of the common tracks of vibration reduction used in metro. The steel spring separates track structure and its foundation, which makes the slab instate of suspension to isolate vibration. In this paper, the finite element model of steel spring floating slab track and the traditional ballastless track of metro is established. In the model, the tunnel and ground are considered, and the visco-elasticartificial boundaries are used to simulate the infinite characteristic of the ground. In the excitation of wheel-rail roughness, the vibration characteristic of steel spring floating lab track is analyzed, and vibration reduction effect of steel spring floating slab track is compared to that of the traditional ballastless track of metro.

## Keywords

Steel Spring Floating Slab Track, Vibration Reduction, The Visco-Elasticartificial Boundary, The Wheel-Rail Roughness

---

# 基于频域法的地铁钢弹簧浮置板轨道结构减振特性分析

何远鹏\*, 韩 健, 王开云, 圣小珍

\*通讯作者。

西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川 成都  
Email: 674954626@qq.com

收稿日期: 2016年6月10日; 录用日期: 2016年6月27日; 发布日期: 2016年6月30日

## 摘要

钢弹簧浮置板轨道是地铁中常用的减振轨道结构之一, 该种轨道结构利用螺旋钢弹簧把轨道结构与基础分开, 使轨道板处于悬浮状态, 将轨道板振动隔离。本文建立钢弹簧浮置板轨道板有限元模型与传统地铁无砟轨道有限元模型; 在该模型中考虑了隧道以及大地的影响, 同时使用粘弹性人工边界条件来模拟大地的无限长特性, 在轮轨粗糙度激励下, 对比分析了钢弹簧浮置板轨道结构和传统地铁无砟轨道结构的振动特性以及钢弹簧浮置板的减振效果。

## 关键词

钢弹簧浮置板轨道, 减振, 粘弹性边界条件, 轮轨粗糙度激励

## 1. 引言

随着近年来地铁在国内大中型城市的高速发展, 地铁引起的振动问题也受到越来越广泛的关注。特别是沿线的高层建筑、古代建筑以及一些对振动要求较高的实验室仪器室等对振动敏感的区域。现在世界上以及有很多国家出现由于列车的振动和噪声引起的建筑物的破坏、沿线居民对振动噪声影响的投诉[1]。钢弹簧浮置板轨道作为一种地铁减振轨道可以较好的抑制环境振动, 但其造价昂贵, 因此多作为特殊地段的减振措施。目前, 国内外已经有 20 多个城市地铁使用了钢弹簧浮置板轨道, 其在抑制环境振动方面取得了较好的效果[2]-[5]。2000 年, 新加坡学者 F. Cui 等[2] [6]利用简谐载荷研究了浮置板轨道和普通整体轨道对大地的减振效果, 并未考虑轮轨力的真实作用。2006 年, G. Lombaert 等[2] [7]建立了三维数值模型对浮置板轨道诱发的大地自由场的振动效果进行了预测。台湾学者 Chen-Ming Kuo 利用车轮和轨道耦合系统方程, 研究了浮置板的振动性能[8], 使用的是动力学方程求解并没有考虑振动在大地等的传播特性。2007 年, 上海交通大学吴天行研究了轨道减震器与浮置板轨道组合的隔振性能, 对浮置板的柔度计算以及隔振性能进行了详细的研究[9]。

本文建立了完整的地铁减振模型, 模型中考虑了轨道结构、隧道以及大地, 并通过粘弹性人工边界条件模拟大地无限大的效果。同时模型考虑了更为真实的轮轨粗糙度激励作为输入条件, 对比分析了钢弹簧浮置板轨道结构和传统地铁无砟轨道结构的振动特性以及钢弹簧浮置板的减振效果。

## 2. 模型介绍

### 2.1. 有限元模型

图 1 给出了地铁钢弹簧浮置板三维实体有限元模型。由图 1 可见, 模型中考虑了钢轨、轨道板、弹簧、地基、隧道和大地等, 模型为对称建模。大地四周采用粘弹性人工边界条件。

### 2.2. 粘弹性人工边界

为了使有限长度的有限元模型产生的剪切波和压缩波能传出去, 模型中使用了粘弹性人工边界[10] [11]。人工边界条件通过弹簧阻尼单元来模拟, 相关计算公式如下[11]:

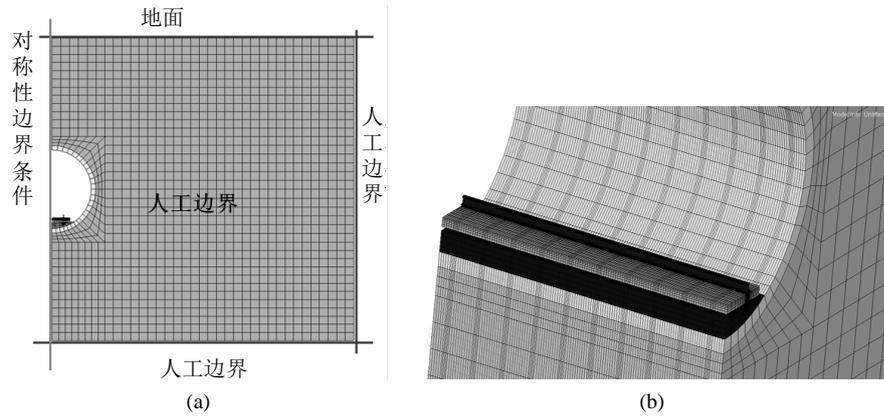


Figure 1. The finite element model of steel spring floating slab  
图 1. 钢弹簧浮置板有限元模型

$$\begin{cases} K_n = \frac{G\Delta A}{R} \\ C_n = \rho c_p \Delta A \\ K_t = \frac{0.5G\Delta A}{R} \\ C_t = \rho c_s \Delta A \end{cases} \quad (1)$$

式中： $K_n$ 为法向刚度； $C_t$ 为法向阻尼； $K_t$ 为切向刚度； $C_t$ 为切向阻尼； $G$ 为剪切模量； $\rho$ 为密度； $\Delta l$ 为最小单元尺寸； $R$ 为激励点到界面距离。

### 2.3. 接触刚度

为了模拟车轮在平直轨道上的轮轨接触关系，仅考虑钢轨的垂向接触刚度[12] [13]，公式如下：

$$F = \left( \frac{3}{2\xi} \right)^3 \sqrt{\left( \frac{4}{3} \frac{E}{1-\mu^2} \right)^2 P_0 \frac{4R_w R_R}{R_w + R_R}} \quad (2)$$

式中： $R_R$ 为轨顶面曲率半径； $R_w$ 为名义滚动圆处车轮半径； $P_0$ 为轮重； $\xi$ 为与接触半径相关的无量纲常数； $E$ 为车轮和钢轨的弹性模量； $\mu$ 为车轮和钢轨的泊松比。

### 2.4. 接触滤波

接触滤波是车轮粗糙度中波长小于或者等于轮轨接触斑长、短半轴的波长，其激发轮轨系统振动作用被减弱的现象[14] [15]。圆形接触滤波估计公式如下[14] [15]：

$$|H(k)| = \left( \frac{4}{a(kb)^2} \right) \int_0^{\arctan \alpha} [J_1(kb \sec x)]^2 dx \quad (3)$$

式中： $k$ 为粗糙度波数； $b$ 为接触椭圆长半轴与短半轴的算数平方根值； $J_1(x)$ 为第一类一阶贝塞尔函数； $\alpha$ 为轮轨表面粗糙度相关系数。

### 2.5. 轮轨相互作用力

轮轨间相互作用力与车轮导纳、钢轨导纳、接触刚度以及车轮钢轨联合粗糙度等有关，具体公式如下[14]-[16]：

$$F = \frac{-r}{\alpha_c + \alpha_r + \alpha_w} \quad (4)$$

式中,  $r$  是轮轨表面联合粗糙度,  $\alpha_c$  为轮轨接触导纳,  $\alpha_r$  为钢轨导纳,  $\alpha_w$  为车轮导纳。其中,  $\alpha_c = 1/k_H$ ,  $k_H$  为轮轨接触刚度。

## 2.6. 计算参数及取点

本文中取钢弹簧支撑部件刚度为 5.76 kN/mm [1] [2], 阻尼为 13.2 (kN·s)/m [1] [2]; 扣件刚度 20 kN/mm, 阻尼 1.0 (kN·s)/m, 其他计算参数如表 1 所示。

本文在计算轮轨力时, 使用的的轮重为 4.5 吨, 车轮名义滚动圆半径为 0.42 m, 列车运行速度为 60 km/h; 传统地铁无砟轨道和浮置板轨道使用相同的轨道粗糙度谱。

图 2 给出了轨头、轨道板、底座板、隧道以及大地的振动取点图。

## 3. 轮轨力作用下的浮置板轨道减振特性分析

图 3 给出了浮置板轨道与传统地铁无砟轨道的轨头激励点处振动加速度。

由图 3 中可见, 在相同轮轨粗糙度谱下, 浮置板轨道与传统地铁无砟轨道的轨头激励点处的振动加速度基本一致, 表明浮置板轨道并不能降低钢轨的振动。

根据城市区域环境振动标准 GB\_10071-88, 使用振动加速度级作为评价地铁轨道振动特性的重要指标, 具体公式如下:

$$Val = 20 \log \frac{a}{a_0} \text{ (dB)} \quad (5)$$

式中:  $a$ ——表示观察点振动加速度;

$a_0$ ——表示基准加速度。

当基准加速度  $a_0 = 1.0$  时, 可以得到浮置板轨道和传统地铁无砟轨道轨头激励点处的振动加速度级均为 46.6 dB, 在钢轨处两者的加速度级基本一致。

根据 GB\_10071-88, 为了表征轨道的减振特性, 使用钢轨的振动加速度级减去隧道、大地观察点的振动加速度级, 得到其减振级如表 2 所示:

根据北京地方标准 DB11/T838—2011, 标准测量点即隧道壁 S0 点处, 浮置板轨道减振级相对于传统无砟轨道降低了 18 dB。依据标准中评判减振措施等级的指标范围, 浮置板轨道在隧道壁减振级处在 [15, 20] dB 之间, 属于高级减振措施。

由表 2 中还可以得出:

1) 从钢轨到隧道壁(S0)振动衰减量最大, 传统轨道为 49.5 dB, 浮置板轨道为 67.8 dB。从隧道到大地传统无砟轨道减少 10~20 dB, 而浮置板轨道从隧道到大地减少 20~30 dB;

2) 当地面沿着水平方向达到 GD1 点后, 水平距离对浮置板和传统地铁无砟轨道减振水平的影响不再显著;

3) 在隧道壁处, 浮置板轨道比传统无砟轨道减振效果好 18 dB; 在地表面, 浮置板轨道比传统轨道减振效果好 16 dB 以上。

为了深入分析浮置板轨道的隔振原理, 图 4 给出了浮置板轨道和传统无砟轨道底座板的振动加速度频谱。图 5 给出了在 340 Hz 时, 浮置板与传统地铁砟轨道的隧道壁加速度云图。图 6 给出了在 340 Hz 时, 浮置板与传统地铁砟轨道的地表加速度云图。

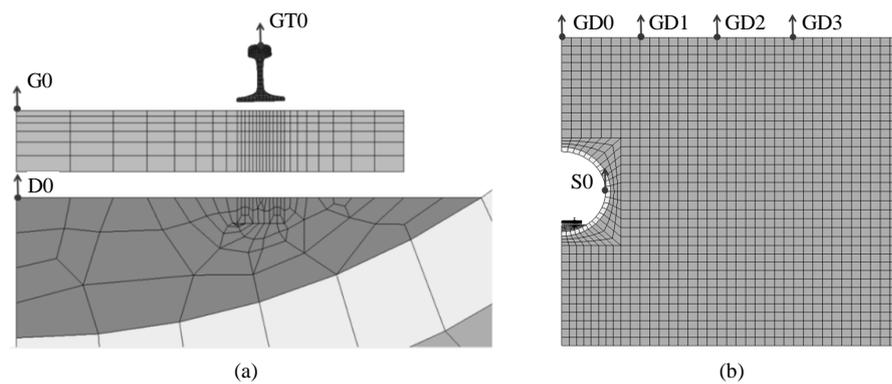
由图 4 可见, 浮置板轨道与传统地铁无砟轨道相比, 在大部分频率区域, 浮置板的隔振效果好。根

**Table 1.** The material parameters of steel spring floating slab  
**表 1.** 钢弹簧浮置板材料参数

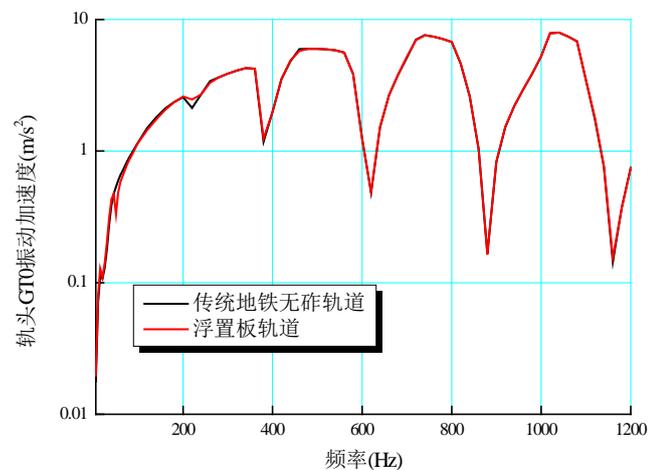
材料	弹性模量(Pa)	泊松比	密度(kg/m <sup>3</sup> )	阻尼损耗因子
钢轨	2.1e11	0.3	7850	-
轨道板	3.6e10	0.2	2400	-
底座板	3.25e10	0.2	2400	-
自密实混凝土层	3.25e10	0.2	2400	0.15
隧道[17]	50e9	0.3	2500	0.002
土壤[17]	141e6	0.33	1900	0.02

**Table 2.** Tunnel, ground observation point of vibration reduction (unit: dB)  
**表 2.** 隧道、大地观察点减振级(单位: dB)

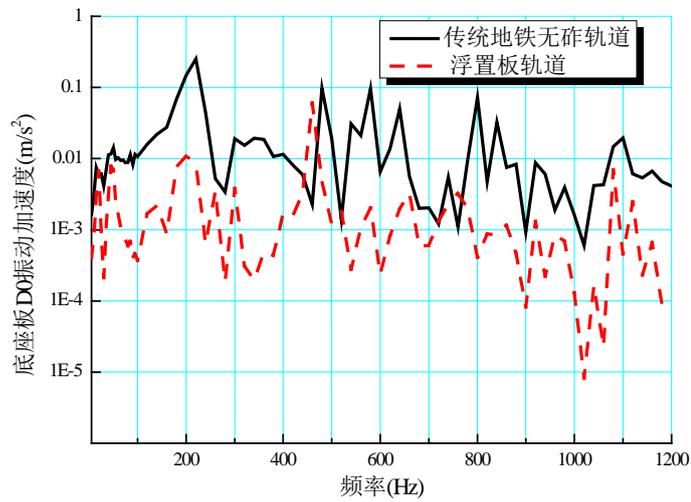
观察点	S0	GD0	GD1	GD2	GD3
浮置板轨道减振级	67.8	79.8	80.4	80.8	80.8
传统轨道减振级	49.5	61.5	65.8	67	67



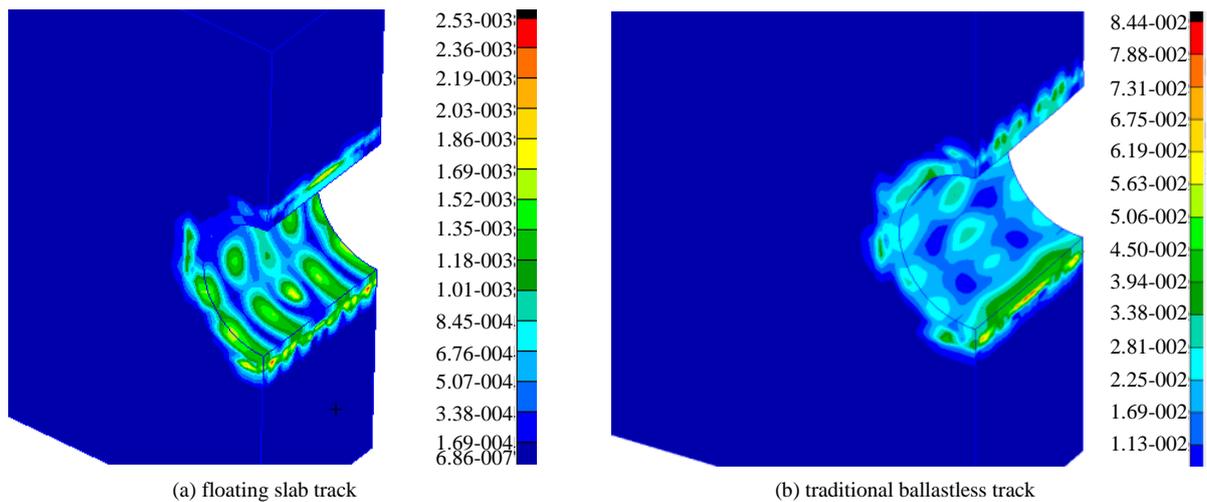
**Figure 2.** The point drawing of vibration  
**图 2.** 振动取点图



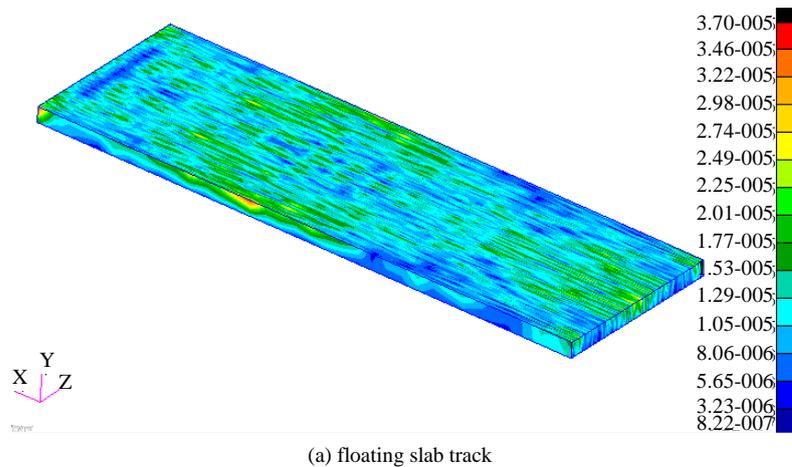
**Figure 3.** The rail head vibration of floating slab track with traditional ballastless track  
**图 3.** 浮置板轨道与传统无砟轨道轨头振动



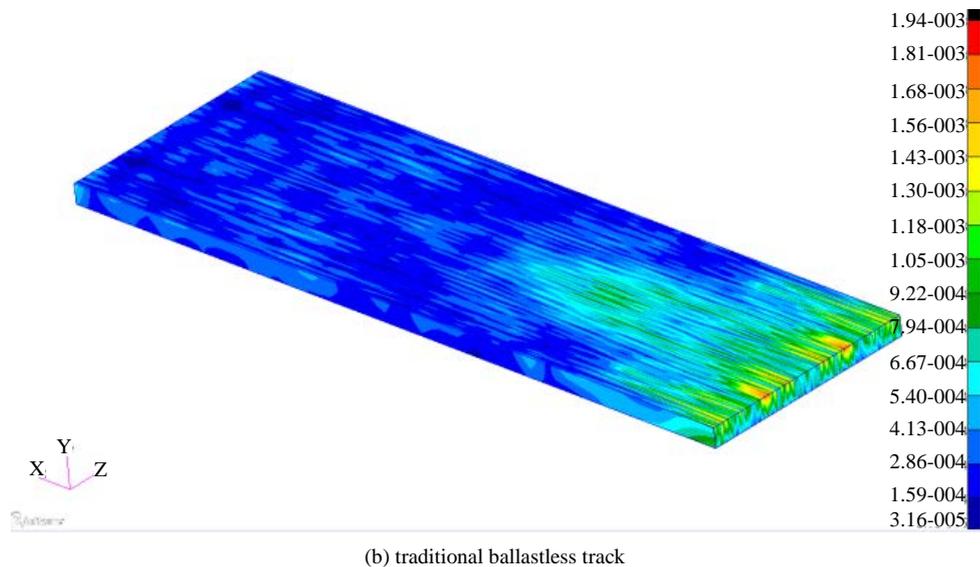
**Figure 4.** A comparison of the vibration acceleration of floating slab track and traditional ballastless track in the base plate  
**图 4.** 浮置板轨道与传统无砟轨道底座板振动加速度



**Figure 5.** Vibration acceleration map of tunnel on 340 Hz  
**图 5.** 在 340 Hz 附近的隧道壁振动加速度云图



(a) floating slab track



**Figure 6.** Vibration acceleration map of ground on 340 Hz

**图 6.** 在 340 Hz 附近的地表振动加速度云图

据标准 GBT13441.1-2007，主要关注的频率在 400 Hz 以下(高频经过大地后会大幅衰减)，从图中可以看出在 20~400 Hz 范围内浮置板隔振效果最高可达 99% (340 Hz 附近)。由图 5 可见，在 340 Hz 时，传统地铁无砟轨道的振动加速要比浮置板轨道的振动加速度大一个数量级，可以看出嵌入式轨道的减振效果非常明显；由图 6 可见，在 340 Hz 时，传统地铁无砟轨道的振动加速要比浮置板轨道的振动加速度大两个数量级，浮置板轨道对地表环境振动具有很好的抑制效果。由图 4 可见，在 20 Hz 以下浮置板轨道的隔振效果并不明显，这与浮置板轨道的固有频率以及其隔振原理有关[1] [2]，本文浮置板的固有频率为 19.6 Hz。

由此可见，浮置板轨道对周围环境振动具有很好的抑制效果，然而，该轨道对轨道板自身及以上部分的振动并没有抑制效果，甚至会放大轨道板的振动，如图 7 所示，振动的放大，有可能带来轨道伤损、列车运行舒适性差等问题。

由图 7 中可见，浮置板轨道的轨道板振动高于传统地铁无砟轨道的轨道板振动，这跟浮置板轨道的支撑刚度有关，支撑刚度大有利于振动的传递减小自身振动，支撑刚度小有利于减小振动的传递但自身振动就会增加。从能量角度讲，浮置板轨道结构有效的实现了轨道板到隧道、大地的隔振，但导致轨道板自身振动的加强，也有一些文献为了解决轨道板自身振动强的问题而使用减振器等[9]。

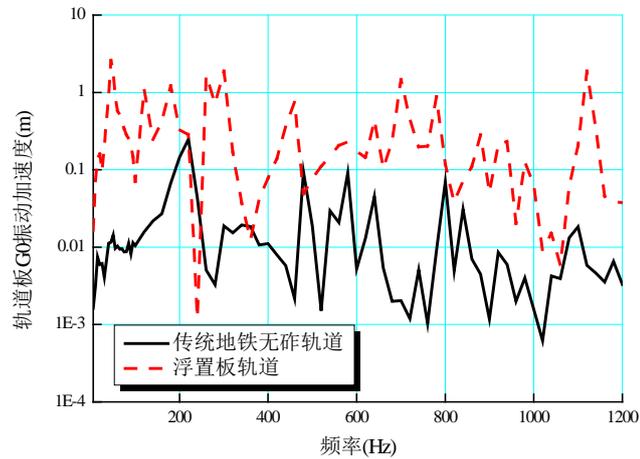
图 8 分别给出了传统无砟轨道与浮置板轨道的振动传递特性。

由图 8(a)可以得出：

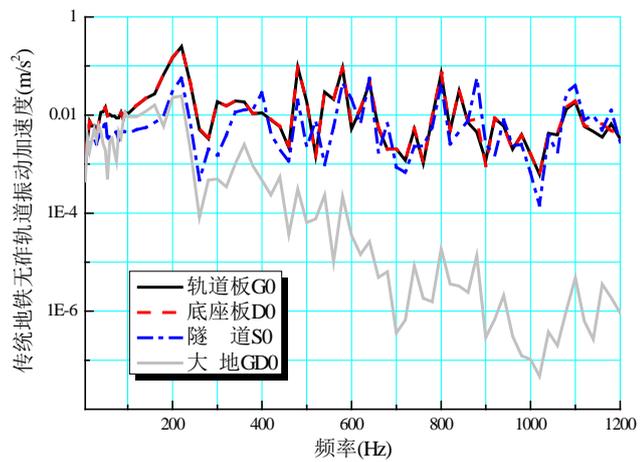
- 1) 从轨道板到底座板的振动加速度曲线基本重合，可以看出对于传统无砟轨道，轨道板到底座板的减振效果有限，仅由砂浆层或自密实混凝土等填充层提供减振；
- 2) 从底座板到隧道的振动加速度曲线可以看出在低频(400 Hz 以下)振动加速度有所减少，但是高频(400 Hz 以上)振动加速度几乎没有减少；
- 3) 从隧道到大地，低频振动加速度较大，占主导地位，大地对高频振动加速度衰减非常显著。

由图 8(b)可以得出：

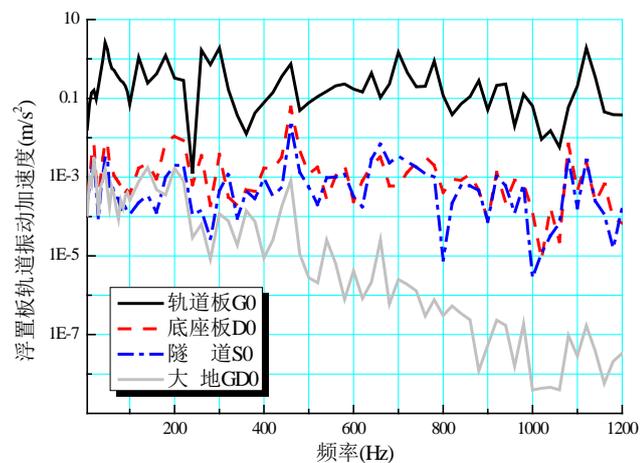
- 1) 轨道板到底座板的振动加速度均有较大衰减，可以看出钢弹簧浮置板轨道结构有利于减少轨道板到底座板的振动传递；



**Figure 7.** A comparison of the vibration acceleration of floating slab track and traditional ballastless track on the track slab  
**图 7.** 浮置板轨道与传统无砟轨道板振动



(a) traditional ballastless track



(b) floating slab track

**Figure 8.** The vibration transfer characteristics of floating slab track and traditional ballastless track  
**图 8.** 浮置板轨道与传统无砟轨道振动传递特性

2) 从底座板到隧道、隧道到大地振动传递规律与普通地铁轨道相近。

通过对比图 8(a)和图 8(b)可见, 两者最大的差异在于轨道板到底座板的振动传递, 浮置板轨道有良好的隔振效果使轨道板到底座板的振动衰减显著, 而传统地铁无砟轨道在轨道板到底座板之间振动衰减效果并不明显。

#### 4. 结论

本文建立了包含轨道结构、隧道、大地等的传统地铁无砟轨道和钢弹簧浮置板轨道有限元模型, 并考虑了粘弹性人工边界条件以模拟大地无限大的特性, 在频域轮轨粗糙度激励作用下, 分析了浮置板轨道的减振特性, 可以得到如下结论:

1) 浮置板轨道对钢轨振动几乎没有影响;

2) 浮置板轨道可以有效的降低底座板、隧道、大地的振动; 主要通过抑制轨道板到底座板之间振动的传递实现减振, 特别是高于其固有频率范围的振动传递;

3) 浮置板轨道在减振的同时也使轨道板振动加强, 可能引发轨道自身伤损问题以及列车运行舒适度下降等问题, 可以通过在轨道板上进一步采取其他减振措施来衰减其振动。

#### 基金项目

本文的研究得到教育部博士点基金(20130184110005)和牵引动力国家重点实验室自主课题(2015TPL\_T01)的资助。

#### 参考文献 (References)

- [1] 孙晓静. 钢弹簧浮置板轨道结构减振性能和地铁振动传播规律的研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2012.
- [2] 吴磊. 地铁车辆-钢弹簧浮置板轨道耦合动态行为的研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [3] Nelson, J.T. (1996) Recent Developments in Ground-Borne Noise and Vibration Control. *Journal of Sound and Vibration*, **193**, 367-376. <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1996.0277>
- [4] Grootenhuis, P. (1977) Floating Tracks Lab Isolation for Railways. *Journal of Sound and Vibration*, **51**, 443-448. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X\(77\)80087-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X(77)80087-4)
- [5] Forrest, J.A. (1999) Modeling of Ground Vibration from Underground Railways. University of Cambridge, Cambridge.
- [6] Cui, F. and Chew, C.H. (2000) The Effectiveness of Floating Slab Track System—Part I. Receptance Methods. *Applied Acoustics*, **61**, 441-453. [http://dx.doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00014-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00014-1)
- [7] Lombaert, G., Degrande, G., Vanhauwere, B., et al. (2006) The Control of Ground-Borne Vibrations from Railway Traffic by Means of Continuous Floating Slabs. *Journal of Sound and Vibration*, **297**, 946-961. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2006.05.013>
- [8] Kuo, C.M., Huang, C.H. and Chen, Y.Y. (2008) Vibration Characteristics of Floating Slab Track. *Journal of Sound and Vibration*, **317**, 1017-1034. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2008.03.051>
- [9] 吴天行. 轨道减振器与弹性支承块或浮置板轨道组合的隔振性能分析[J]. 振动工程学报, 2007, 20(5): 489-493.
- [10] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46-51.
- [11] Han, J., Zhao, G.T., Sheng, X.Z. and Jin, X.S. (2015) Study on the Subgrade Deformation under High-Speed Train Loading and Water-Soil Interaction. *Acta Mechanica Sinica*, **32**, 233-243. <http://dx.doi.org/10.1007/s10409-015-0522-6>
- [12] 韩健, 肖新标, 金学松, 等. 城市轨道交通车轮振动声辐射特性[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 115-121.
- [13] 孙翔. 确定轮轨接触椭圆的直接方法[J]. 西南交通大学学报, 1985(4): 8-21.
- [14] Remington, P.J. (1987) Wheel/Rail Rolling Noise I: Theoretical Analysis. *Journal of the Acoustical Society of America*, **81**, 1805-1823. <http://dx.doi.org/10.1121/1.394746>

- 
- [15] Verheijen, E. and Van Beek, A. (2003) Definition of Track Influence, Roughness in Rolling Noise. Harmonoise Report Edited by AEAT-BV.
- [16] Thompson, D.J. (2009) Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modeling and Means of Control. Elsevier, Nederland.
- [17] Lopes, P., Costa, P.A., Ferraz, M., *et al.* (2014) Numerical Modeling of Vibrations Induced by Railway Traffic in Tunnels: From the Source to the Nearby Buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **61**, 269-285.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.02.013>

**再次投稿您将享受以下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>