

# Effect of Rail Support Mode on Wheel/Rail Dynamic Interaction of Metro Lines

Yabo Cao<sup>1</sup>, Liang Ling<sup>2</sup>, Qinghua Guan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Guangzhou Metro Design & Research Institute Co. Ltd., Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Email: caoyabo105@163.com

Received: May 18<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2017; published: Jun. 6<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Rails are discretely supported by uniformly distributed sleepers in traditional tracks. The rail support mode not only affects the constructing cost of metro lines, but also influences the running safety and stability of metro vehicles. This paper presents a study of the wheel/rail dynamic interactions of metro lines with continually and discretely supported rails by using vehicle-track dynamics simulations. Through numerical analysis, it is found that the innovative track with continually supported rails has advantages over the traditional track with discretely supported rails for the potentialities to reduce the dynamic wheel/rail force and the vibration level of rails. For the traditional track with discretely supported rails, a smaller sleeper span results in higher dynamics wheel/rail impact force and rail vibration acceleration due to sleeper passing excitation.

## Keywords

Metro, Track, Continue Support, Discrete Support, Sleeper Span, Wheel/Rail Dynamic

---

# 钢轨支承方式对地铁线路轮轨动力性能的影响

曹亚博<sup>1</sup>, 凌亮<sup>2</sup>, 关庆华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>广州地铁设计研究院有限公司, 广东 广州

<sup>2</sup>西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川 成都

Email: caoyabo105@163.com

收稿日期: 2017年5月18日; 录用日期: 2017年6月3日; 发布日期: 2017年6月6日

## 摘要

传统轨道结构中，钢轨铺设在均匀离散分布的轨枕上。钢轨支承方式不仅关系到轨道线路的建设造价，也对轨道车辆的运行安全与稳定有着重要的影响。本文基于车辆-轨道耦合动力学仿真，对钢轨连续及离散支承情形下地铁线路轮轨动力响应进行比较分析。计算结果表明，新型连续支承轨道结构上地铁车辆的轮轨力及钢轨的振动性能均优于传统的离散支承轨道。对于传统的钢轨离散支承地铁轨道，轨枕间距越小，车轮越过轨枕所引发的轮轨动态作用力和钢轨振动加速度越大。

## 关键词

地铁，轨道，连续支承，离散支承，轨枕间距，轮轨动力性能

Copyright © 2017 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/>

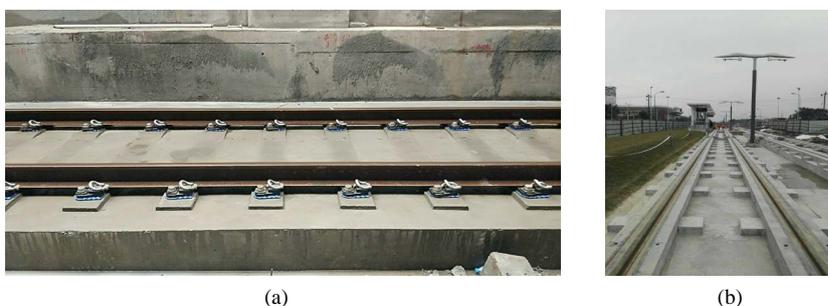


Open Access

## 1. 引言

近年来，我国城市轨道交通发展迅速，截至 2016 年底，全国拥有轨道交通运营线路的城市已达 29 个，累计营业线路里程已达到 3832 公里。地铁以其“客运量大、速度快、安全、准点、保护环境、节约能源和用地”等众多优势而成为城市轨道交通的主力军。然而，地铁在运营过程中面临着运量大、运行密度高、高标准的环境振动控制等难题，这些问题均与地铁线路轨道结构及其性能密切相关。

如图 1(a)所示，传统的轨道结构中钢轨铺设在均匀离散分布的轨枕上方。目前我国地铁轨道结构设计上轨枕的分布密度有 1600 根/km，1680 根/km 和 1760 根/km 三种规格。其中 1760 根/km 这种铺设方式主要应用于大坡度和小半径曲线区段。随着城轨线路减振降噪标准的提高，具有优良减振性能的新型钢轨连续支承轨道结构(图 1(b))逐渐被应用于有轨电车及地铁线路。这种新型轨道的钢轨与道床的连接方式不同于传统的轨道结构中离散的扣件连接方式，它是在混凝土整体道床中设置一个凹槽，钢轨放置在凹槽内，以高分子弹性材料敷设至钢轨的轨头下方将钢轨固定。这种沿纵向连续的支承方式大大降低了由于传统离散支承的不平顺性引起的轨道结构振动，并通过钢轨周围的弹性材料变形耗能，具有减振降噪性能良好，稳定性好，养护维修量少等优点[1] [2] [3]。



**Figure 1.** Rail track structure with discretely and continually supported. (a) Discrete support rail track structure; (b) Rail continuous support track structure

**图 1.** 钢轨离散与连续支承轨道结构。(a)钢轨离散支承轨道结构；(b)钢轨连续支承轨道结构

轨枕的分布间距不仅关系到轨道线路的建设造价,也对轨道车辆的运行安全与稳定有着重要的影响。然而,国内外针对轨枕分布间距及钢轨连续和离散支承方式比较的研究不多。金学松和温泽峰[4][5]的研究表明,传统轨道结构中钢轨的均匀离散支承方式对钢轨波磨的形成有着重要的影响。荆果和尚文军等[6][7]采用脉冲锤击试验研究了轨枕间距对钢轨振动的影响。Ling 等[8]比较分析了现代有轨电车线路中嵌入式钢轨连续支承轨道与传统离散支承板式轨道振动性能的差异。Wu 等[9]研究了不同季节钢轨离散支承刚度变化对高速铁路轮轨动力学性能的影响。凌亮[10]分析了不同轨枕间距下高速列车轮轨稳态响应特征,并提出了轨枕间距与转向架轴距的合理匹配方案。综上所述,以往的研究大多关注传统有砟轨道及高速铁路轨道轨枕均匀离散分布与轮轨异常磨耗形成的相关性,而对于地铁线路整体混凝土道床轨道中轨枕分布间距的研究尚少。本文基于地铁车辆-轨道耦合动力学数值仿真,对我国地铁线路中采用三种典型轨枕间距设计的离散支承轨道与连续支承轨道的轮轨动力学性能及轨道振动性能进行系统比较分析,相关结果可为地铁线路轨道结构的优化设计提供参考。

## 2. 数值模拟

基于车辆-轨道耦合动力学理论[11],建立 A 型地铁车辆-混凝土板式轨道空间耦合动力学模型,如图 2 所示。计算模型中,A 型地铁车辆简化为由一个车体、两个构架、和四个轮对组成的多刚体系统;每个车体、构架和轮对考虑纵向、横向、垂向、侧滚、点头(旋转)和摇头 6 个方向的自由度,整个车辆系统共有 42 个自由度。忽略车辆系统主要部件的弹性变形,仅考虑一、二系悬挂系统的非线性特性建模,如垂向减振器的阻尼非线性和止挡的刚度非线性特性。

整体混凝土道床轨道被视为由钢轨、扣件系统、轨道板及路基组成。其中左右钢轨被视为连续或离散弹性离支支承基础上的 Timoshenko 梁,并考虑钢轨的垂向、横向和扭转振动。基于 Timoshenko 梁理论,钢轨弯曲振动可由平动和截面转动两个偏微分方程表示。对于传统离散支承轨道结构,钢轨的横向、垂向和扭转三个方向的运动方程可表示如(1)~(3)所示[10]。

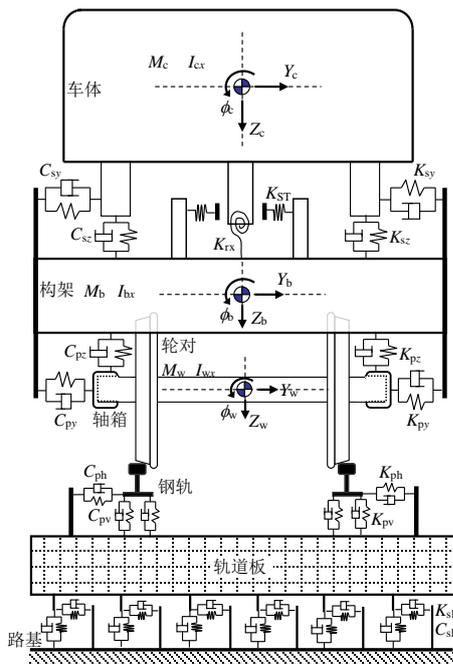


Figure 2. Metro vehicle-track coupling dynamic model

图 2. 地铁车辆-轨道耦合动力学模型

$$\begin{cases} \rho A_r \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \kappa_y GA \left( \frac{\partial \psi_y}{\partial x} - \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = \sum_{i=1}^{N_w} F_{wryi}(t) \delta(x - x_{wi}) - \sum_{j=1}^{N_f} F_{rfyj}(t) \delta(x - x_{fj}) \\ \rho I_z \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial t^2} - EI_z \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x^2} + \kappa_y GA \left( \psi_y - \frac{\partial y}{\partial x} \right) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \rho A \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \kappa_z GA \left( \frac{\partial \psi_z}{\partial x} - \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) = \sum_{i=1}^{N_w} F_{wrzi}(t) \delta(x - x_{wi}) - \sum_{j=1}^{N_f} F_{rfzj}(t) \delta(x - x_{fj}) \\ \rho I_y \frac{\partial^2 \psi_z}{\partial t^2} - EI_y \frac{\partial^2 \psi_z}{\partial x^2} + \kappa_z GA \left( \psi_z - \frac{\partial z}{\partial x} \right) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho I_{r0} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - GK_r \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \sum_{i=1}^{N_w} M_{wri}(t) \delta(x - x_{wi}) - \sum_{j=1}^{N_f} M_{rfj}(t) \delta(x - x_{fj}) \quad (3)$$

而对于新型连续支承轨道结构，钢轨的横向、垂向和扭转三个方向的运动方程[1]可表示如(4)~(6)所示。

$$\begin{cases} \rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + \kappa_y GA \left[ \frac{\partial \psi_y(x,t)}{\partial x} - \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right] + K_{yr} (y(x,t) - y_{sr}(x,t)) \\ + C_{yr} \left( \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial y_{sr}(x,t)}{\partial t} \right) - \sum_{j=1}^{N_w} F_{wryj}(t) \delta(x - x_{wj}) = 0 \\ \rho I_z \frac{\partial^2 \psi_y(x,t)}{\partial t^2} + \kappa_y GA \left[ \psi_y(x,t) - \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \right] - EI_z \frac{\partial^2 \psi_y(x,t)}{\partial x^2} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \rho A \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2} + \kappa_z GA \left[ \frac{\partial \psi_z(x,t)}{\partial x} - \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial x^2} \right] + K_{zr} (z(x,t) - z_{sr}(x,t)) \\ + C_{zr} \left( \frac{\partial z(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial z_{sr}(x,t)}{\partial t} \right) - \sum_{j=1}^{N_w} F_{wrzj}(t) \delta(x - x_{wj}) = 0 \\ \rho I_y \frac{\partial^2 \psi_z(x,t)}{\partial t^2} + \kappa_z GA \left[ \psi_z(x,t) - \frac{\partial z(x,t)}{\partial x} \right] - EI_y \frac{\partial^2 \psi_z(x,t)}{\partial x^2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \rho I_0 \frac{\partial^2 \phi(x,t)}{\partial t^2} - GK_r \frac{\partial^2 \phi(x,t)}{\partial x^2} + K_{\phi r} (\phi(x,t) - \phi_{sr}(x,t)) \\ & + C_{\phi r} \left( \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial \phi_{sr}(x,t)}{\partial t} \right) - \sum_{j=1}^{N_w} M_{Gj}(t) \delta(x - x_{wj}) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式(1)~(6)中， $\rho$ 、 $G$ 、 $E$ 、 $A$ 分别为钢轨的密度、剪切模量、弹性模量及钢轨截面面积； $\kappa_y$ 、 $\kappa_z$ 、 $\kappa_r$ 分别为钢轨横、垂向截面的剪切因子及扭转剪切因子； $I_y$ 、 $I_z$ 、 $I_0$ 分别为钢轨截面对 $y$ 、 $z$ 轴的惯性矩及扭转性矩； $y$ 、 $z$ 和 $\phi$ 分别表示钢轨横向、垂向和扭转位移， $\psi_y$ 、 $\psi_z$ 分别表示钢轨 $z$ 轴和 $y$ 轴的截面转角变形； $F_{wryi}$ 和 $F_{wrzi}$ 分别为第 $i$ 位车轮作用于钢轨的垂向、横向荷载； $F_{rfyj}(t)$ 和 $F_{rfzj}(t)$ 分别为第 $j$ 扣件支点横向、垂向支反力； $M_{wri}$ 和 $M_{rfj}$ 分别为第 $i$ 位车轮作用于钢轨的力矩和第 $j$ 扣件支点处钢轨支反力矩。

整体混凝土道床用三维实体有限元单元模拟，采用模态叠加方法求解其振动响应。扣件系统用三维粘弹性弹簧-阻尼单元模拟，路基支承层简化为均匀分布的弹簧-阻尼单元[10]。

车辆沿轨道运行时, 轮轨空间接触关系起着关键性的作用。本文应用基于任意型面的轮轨接触几何关系数值算法, 考虑实际轮轨型面和动态轮轨状态, 来确定任意时刻的轮轨空间接触几何参数[11]。利用 Hertz 滚动接触理论计算轮轨法向正压力; 轮轨蠕滑力的计算, 首先按 Kalker 线性理论计算, 然后采用沈氏理论(Shen-Hedrick-Elkins 理论)进行非线性修正[12]。

### 3. 计算结果及分析

为调查钢轨支承方式及轨枕间距对地铁线路轮轨动力性能的影响, 利用上述建立的地铁车辆-轨道耦合动力学模型分析采用钢轨连续支承和三种典型离散支承(轨枕间距分布为 0.585 m、0.595 m 和 0.625 m)轨道结构的地铁线路轮轨力及钢轨振动响应。计算中, 车辆参数源自国内某 A 型地铁列车, 车辆定距为 15.7 m, 轴距为 2.5 m, 考虑车体重量为满载状态(AW3), 静轴重约为 16 t, 车轮踏面为 LM; 地铁线路为直线区段, 钢轨型面为 CN60, 轨底坡为 1/40, 轨距为 1435 mm。

钢轨沿纵向均匀离散支撑是传统轨道结构的基本特征, 也是先天性的缺陷。当地铁车辆车轮从一个钢轨支点移动到下一个支点上方时, 钢轨支承刚度的变化使得轮轨间产生小幅的冲击作用力, 如图 3 所示。图 3(a)比较了钢轨离散与连续支承方式对轮轨法向作用力稳态响应结果, 图 3(b)给出了轨枕间距变化对轨跨冲击力的影响规律, 上述计算结果未考虑轨道不平顺的影响, 车速为 120 km/h。由图 3(a)可知, 离散支承轨道结构存在明显的轨跨冲击现象, 而钢轨连续支承轨道结构中轮轨力变化平稳, 无轨跨冲击附加力; 轨枕间距为 0.625 m 的离散支承轨道中, 车辆通过轨跨所引发的轮轨冲击力约为 5 kN。图 3(b)表明, 钢轨离散均匀分布引发的轮轨力波动幅值随着轨枕间距的增大而减小。其原因在于, 轨枕分布越密集, 车辆通过状态下钢轨被激发的振动模态越丰富, 从而导致轮轨作用更强烈, 反之亦然。

图 4(a)比较了钢轨离散与连续支承两种线路条件下钢轨垂向稳态变形, 图 4(b)给出了钢轨稳态变形与轨枕间距变化的关联性, 此工况的计算条件与图 3 中对应工况的仿真条件一致。由图 4(a)可知, 连续支承轨道钢轨垂向变形变化平稳, 而离散支承轨道中钢轨的垂向变形则随着车轮在轨枕上方的位置周期性变化而同样呈现周期性波动。图 4(b)表明, 轨枕间距越大, 钢轨支承刚度波动越大, 使得钢轨垂向变形的波动越显著。值得注意的是, 钢轨离散支承造成的钢轨变形周期性波动会引发与恶化轮轨表面几何不平顺[4] [5] [9]。

图 5~7 进一步给出了轨道几何不平顺作用下轮轨相互作用力和钢轨振动性能的动态响应结果。图中, “sp”表示轨枕间距(m), “sp = 0”为新型连续支承轨道结构。仿真计算中, 轨道不平顺叠加有美国五级谱的长波随机不平顺与现场实测的短波不平顺(波长 1 m 以下); 地铁车辆运行速度为 40~120 km/h。由图 5 可知, 不同钢轨支承方式下轮轨力动态响应的变化规律与图 3 给出的稳态响应结果的变化规律一致: 1) 钢轨连续支承线路条件下轮轨力明显低于钢轨离散支承线路; 2) 三种工况下, 轨枕间距越小, 轮轨动态作用力越大。由此可见, 太小的轨枕间距在某些情况下会增大轮轨冲击力, 恶化地铁轮轨动力学性能。此外, 轮轨动态作用力的最大值随着车辆运行速度的提高而增大, 这与实际情况吻合。

图 6 表明, 轨道不平顺作用下钢轨振动加速度随着地铁车辆运行速度的增大而加大; 钢轨连续支承线路条件下钢轨垂向振动加速度明显低于钢轨离散支承线路。对于钢轨离散支承轨道, 钢轨振动加速度随着轨枕间距的减小而呈增大趋势, 这与动态轮轨力的变化趋势一致。由图 7 可知, 不同钢轨支承方式及轨枕间距条件下钢轨动态垂向位移的变化趋势与图 4 给出的钢轨稳态变形结果变化趋势一致: 1) 连续支承条件下钢轨变形低于离散支承工况; 2) 轨枕间距越小, 钢轨动态垂向位移最大值越小。钢轨垂向位移随着地铁车辆速度的提高同样呈增大趋势。

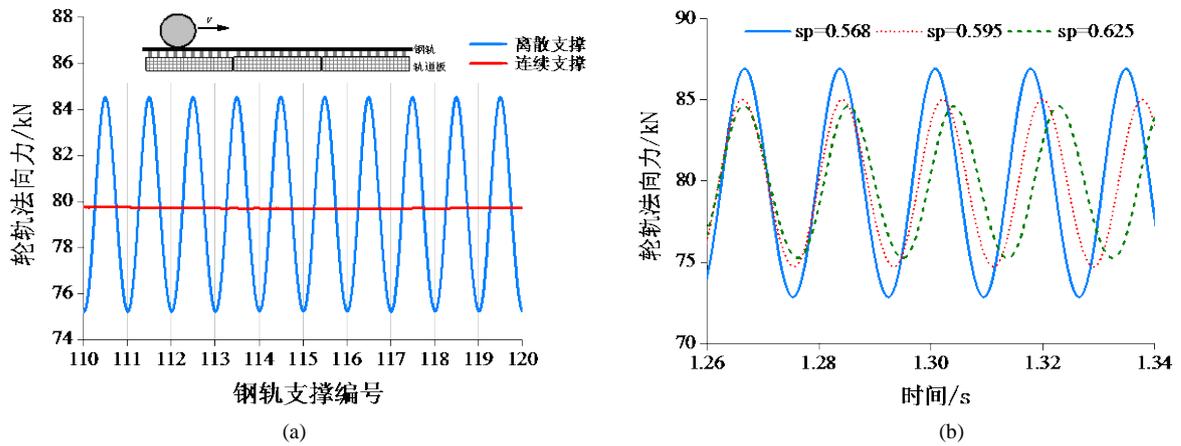


Figure 3. Effect of railsupport on wheel/rail force. (a) Different ways of rail support; (b) Different sleeper spacing  
 图 3. 钢轨支承方式对轮轨作用力的影响。(a)不同钢轨支承方式比较；(b)不同轨枕间距比较

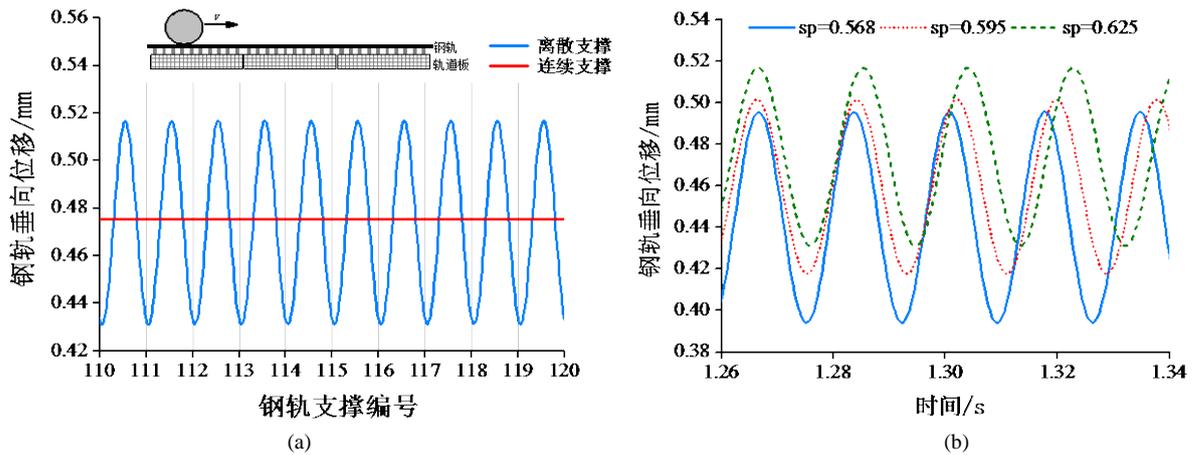


Figure 4. Effect of railsupport on rail deformation. (a) Different ways of rail support; (b) Different sleeper spacing  
 图 4. 钢轨支承方式对轮轨稳态响应的影响。(a)不同钢轨支承方式比较；(b)不同轨枕间距比较

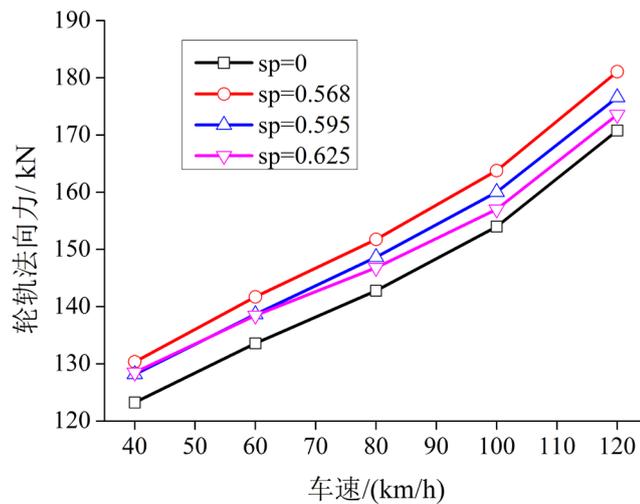
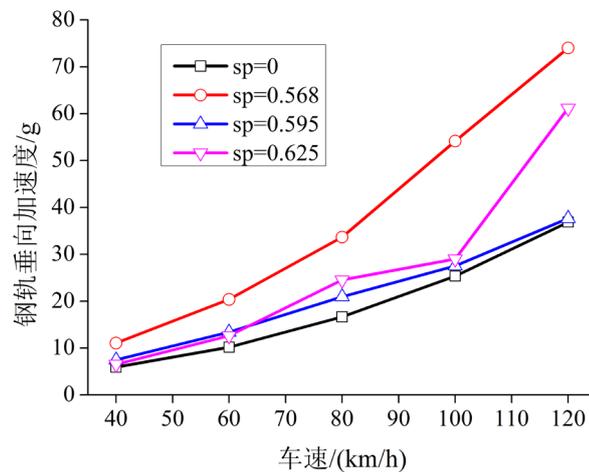
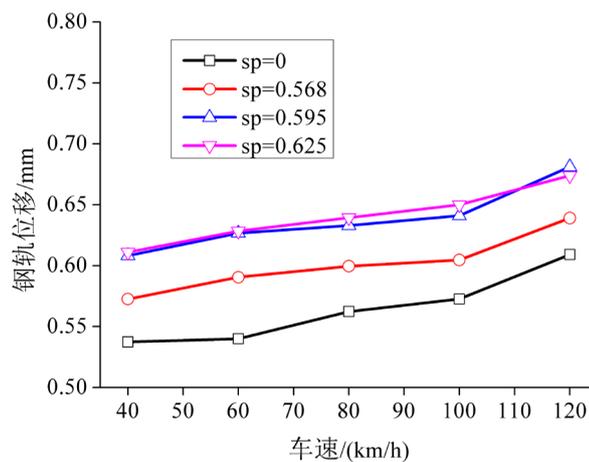


Figure 5. Effect of sleeper span on wheel/rail normal force  
 图 5. 轨枕间距对轮轨法向力的影响



**Figure 6.** Effect of sleeper span on rail vertical acceleration  
**图 6.** 轨枕间距对钢轨垂向振动加速度的影响



**Figure 7.** Effect of sleeper span on rail vertical displacement  
**图 7.** 轨枕间距对钢轨垂向位移的影响

#### 4. 结论

本文基于地铁车辆-轨道耦合动力学仿真,对不同钢轨支承方式及典型轨枕间距条件下地铁线路轮轨动力响应特征与规律进行了系统调查。计算结果表明,钢轨支承方式及轨枕间距均对地铁线路轮轨动力响应有着重要的影响。新型钢轨连续支承轨道结构的轮轨作用性能及轨道振动性能均优于传统离散支承轨道结构,因而在地铁线路轨道结构设计中,钢轨连续支承式轨道可成为振动噪声要求较高地段的轨道结构优先方案之一。对于传统离散支承轨道结构,轨枕间距越小,轨跨冲击引发的轮轨附加力及钢轨振动加速度均越大,即过小的轨枕间距在某些情况下可能会降低轮轨及钢轨的振动性能。

#### 基金项目

中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 2682016CX126)。

#### 参考文献 (References)

- [1] 邓永权. 有轨电车列车-嵌入式轨道动态相互作用研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.

- [2] 罗炯, 陈攀, 秦超红, 李成辉, 胡洋. 有轨电车新型嵌入式轨道钢轨抗倾覆性能分析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(4): 8-12.
- [3] 江小州, 焦洪林, 杨刚, 罗炯, 赵悦, 温泽峰. 嵌入式轨道结构的声振特性参数优化研究[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(3): 10-14.
- [4] 金学松, 王开云, 温泽峰, 李成辉. 钢轨横向不均匀支撑刚度对钢轨波磨的影响[J]. 力学学报, 2005, 37(6): 67-79.
- [5] 温泽峰. 钢轨波浪形磨损研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [6] 荆果, 代齐齐, 徐金辉, 王平. 轨枕间距对钢轨振动的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2011(10): 30-32.
- [7] 尚文军, 张立民, 梅桂明. 轨枕间距对钢轨模态参数影响研究[J]. 噪声与振动控制, 2008(2): 44-46.
- [8] Ling, L., Han, J., Xiao, X., *et al.* (2015) Dynamic Behavior of an Embedded Rail Track Coupled with a Tram Vehicle. *Journal of Vibration and Control*, 1077546315616521. <https://doi.org/10.1177/1077546315616521>
- [9] Wu, X., Cai, W., Chi, M., *et al.* (2015) Investigation of the Effects of Sleeper-Passing Impacts on the High-Speed Train. *Vehicle System Dynamics*, **53**, 1902-1917. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1091085>
- [10] 凌亮. 高速列车 - 轨道三维刚柔耦合动力学研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [11] 翟婉明. 车辆 - 轨道耦合动力学[M]. 第三版. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] Shen, Z.Y., Hedrick, J.K. and Elkins, J.A. (1983) A Comparison of Alternative Creep Force Models for Rail Vehicle Dynamic Analysis. *Vehicle System Dynamics*, **12**, 79-83. <https://doi.org/10.1080/00423118308968725>

**期刊投稿者将享受如下服务:**

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>

期刊邮箱: [ojtt@hanspub.org](mailto:ojtt@hanspub.org)