

不同减振轨道上地铁车辆动力学性能对比分析*

张 涛^{1,2} 展旭和² 金泰木² 姜培斌¹ 凌 亮¹ 王开云¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都;

2. 国家高速列车青岛技术创新中心, 266111, 青岛//第一作者, 博士研究生)

摘 要 为研究地铁车辆在不同减振轨道结构上的动力学性能, 基于车辆-轨道耦合动力学理论, 建立考虑不同类型减振轨道的地铁车辆-减振轨道耦合动力学模型。基于动力学仿真, 对比分析地铁车辆在 4 种常用减振轨道上的横向稳定性, 以及直线和曲线段的轮轨动力学性能。结果表明: 减振轨道结构参数对地铁车辆横向稳定性有很大影响, 弹性扣件减振轨道上车辆的轮轨安全性指标略小于其他 3 种减振轨道。

关键词 地铁车辆; 减振轨道; 车辆-轨道耦合模型; 动力学性能

中图分类号 U270.1⁺1; U213.2⁺44

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.017

Comparative Analysis of Metro Vehicle Dynamic Performance on Different Vibration-attenuating Tracks

ZHANG Tao, ZHAN Xuhe, JIN Taimu, JIANG Peibin, LING Liang, WANG Kaiyun

Abstract To study the dynamics performance of metro vehicles on different vibration-attenuating tracks, based on the vehicle-track coupling dynamics, a series of metro vehicle-track coupling dynamic models considering different types of vibration-attenuating tracks are established. Then, based on dynamic simulation, the lateral stability of metro vehicles on 4 conventional vibration-attenuating tracks, and the wheel-rail dynamic performance on straight and curved lines are compared and analyzed. The results show that the structural parameters of vibration-attenuating track have a great influence on the lateral stability of metro vehicles, while the wheel-rail safety indexes of vehicle on the elastic fastener damping track are lower than those on other kinds of vibration-attenuating slab tracks.

Key words metro vehicle; vibration-attenuating track; vehicle-track coupling model; dynamic performance

First-author's address State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu,

China

目前,城市轨道交通领域广泛采用减振轨道结构,以减轻地铁列车产生的振动对沿线环境的影响。近年来,许多学者对地铁减振轨道的相关问题进行了大量研究。文献[1-2]对车辆与不同类型减振轨道的相互作用开展了研究。文献[3]通过进行轨道静态锤击试验以及振动测试,研究了地铁轨道减振垫的减振性能。文献[4]对浮置板轨道结构的减振性能进行了落轴试验研究。

现有文献主要针对各种弹性减振轨道的减振隔振性能进行了研究,但对于减振轨道上车辆的动力学性能研究较少。本文建立了地铁车辆-减振轨道耦合动力学模型,对比分析了地铁车辆在弹性扣件减振轨道、弹性支承块轨道、钢弹簧浮置板轨道及梯形轨枕轨道上的横向稳定性、轮轨安全性等关键动力学性能,探究地铁车辆在不同减振轨道结构上动力学性能的差异。

1 地铁车辆-轨道耦合动力学模型

为研究地铁车辆在不同减振轨道结构上的动力学性能,基于车辆-轨道耦合动力学理论^[5],建立了地铁车辆与常用的减振轨道相互作用的空间耦合动力学模型(见图1)。

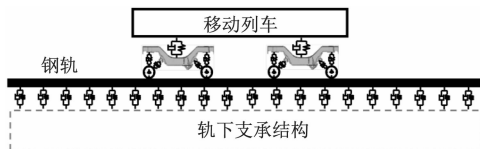


图1 地铁车辆-轨道耦合动力学模型

Fig.1 The vehicle-track coupling dynamics model

图1中,车辆系统由车体、构架、轮对及两系悬挂系统组成;每个车体、构架和轮对均考虑纵向、横

* 国家自然科学基金项目(51735012,51805452,52072317)

向、垂向、侧滚、点头(旋转)和摇头 6 个自由度,整个车辆子系统共计 42 个自由度。

车辆系统所有部件的弹性变形均不考虑。具体车辆系统运动方程的建立及系统部件的受力推导详见文献[1-2,5]。

轨道系统考虑了弹性扣件减振轨道、弹性支承块轨道、钢弹簧浮置板轨道及梯形轨枕轨道等 4 种常用减振轨道,并建立了不同减振轨道动力学模型(见图 2)。轨道系统动力学方程推导见文献[1]。

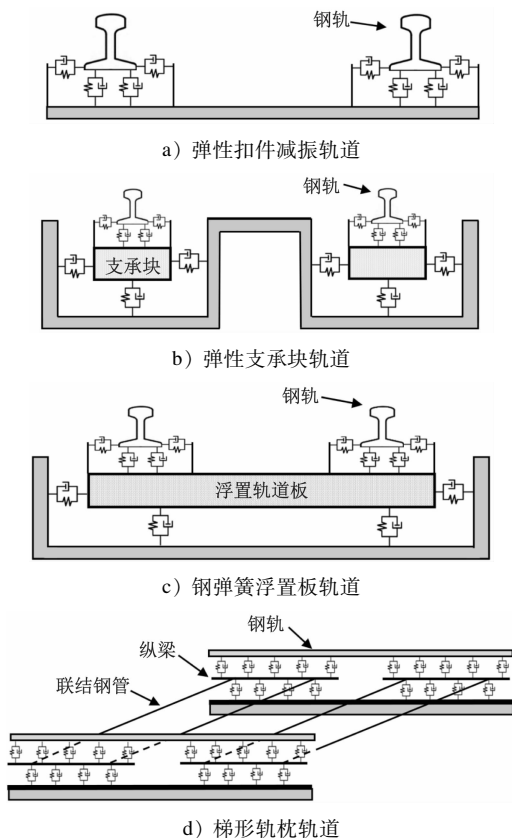


图 2 不同减振轨道动力学模型

Fig. 2 Dynamics models of different vibration-attenuating tracks

本文中轮轨空间接触几何的计算采用迹线法^[5];轮轨法向力采用 Hertz 非线性弹性接触理论进行求解;关于轮轨蠕滑力,首先以 Kalker 线性蠕滑理论计算,轮轨间蠕滑达到饱和后,采用 Shen-Hedrick-Elkins 理论进行非线性修正。

2 不同减振轨道结构上车辆横向稳定性比较

基于建立的地铁车辆-减振轨道耦合动力学模型,对地铁车辆在不同轨道结构上的横向稳定性开展研究。仿真分析中,不同减振轨道的具体参数详

见文献[2]。

图 3 给出了地铁车辆在不同减振轨道上动车和拖车非线性临界速度的统计结果。由图 3 可知,减振轨道结构参数对车辆的临界速度有很大影响,地铁车辆中拖车的横向稳定性强于动车;而 AW0(空载)状态下车辆的稳定性弱于 AW3(超载)状态;地铁车辆在弹性扣件减振轨道上的非线性临界速度最低,这是由于在 4 种减振轨道中弹性扣件减振轨道的横向刚度最低;梯形轨枕轨道上车辆的临界速度最高,究其原因在于梯形轨枕轨道的总体横向刚度最大。

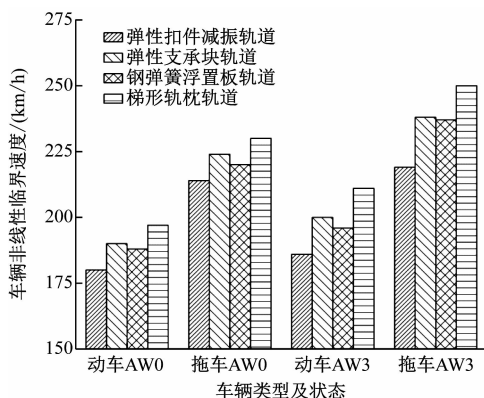


图 3 地铁车辆在不同减振轨道上的非线性临界速度

Fig. 3 Nonlinear critical speeds of metro vehicles on different vibration-attenuating tracks

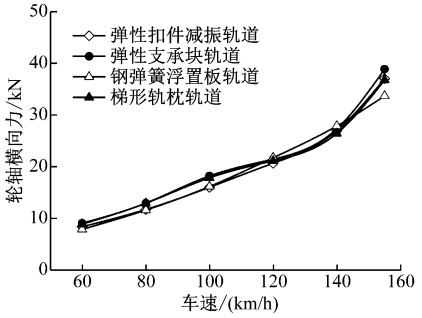
3 不同减振轨道结构上地铁车辆动力学性能分析

基于建立的地铁车辆-减振轨道耦合动力学模型,分别对地铁车辆在 4 种常用减振轨道,以及直线和曲线段上的动力学性能开展研究。考虑到动车 AW0 状态下车辆的临界速度最低,故此处仅对 AW0 状态下动车的动力学性能进行研究。

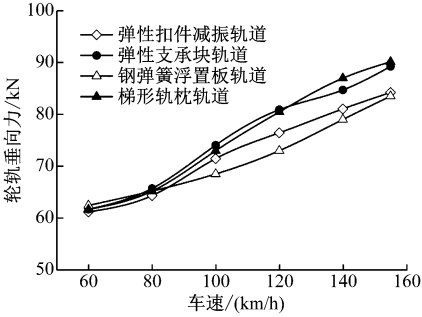
3.1 直线段减振轨道上地铁车辆动力学性能分析

图 4 给出了动车在直线段,以及不同减振轨道上的动力学指标随车速的变化情况。由图 4 可知:4 种常见地铁减振轨道上,动车的轮轴横向力相差不大;当车速大于 80 km/h 时,钢弹簧浮置板轨道的轮轨垂向力小于其他 3 种减振轨道,说明钢弹簧浮置板轨道采用的质量式减振方式及其整体较低的垂向支承刚度能较好地吸收轮轨冲击作用能量,降低轮轨垂向作用力;弹性扣件减振轨道的脱轨系数和轮重减载率略小于其他 3 种减振轨道,说明弹性扣件较小的横向支承刚度能够有效降低轮轨横向

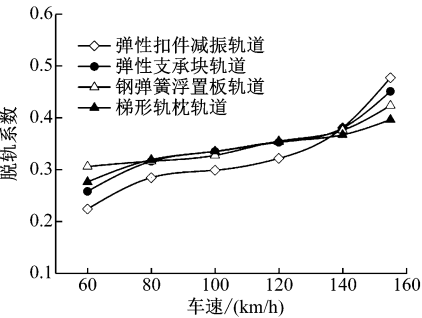
作用力,同时具有较好的稳定性。



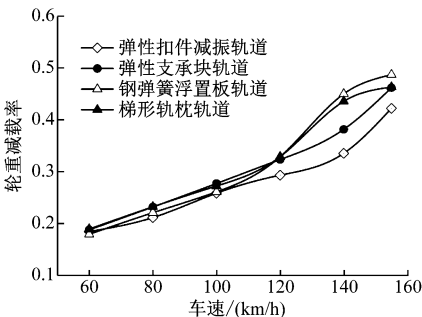
a) 轮轴横向力



b) 轮轨垂向力



c) 脱轨系数



d) 轮重减载率

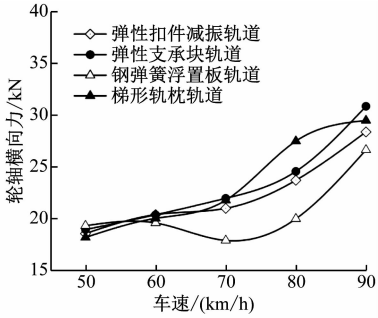
图4 直线段车辆动力学指标随车速的变化曲线

Fig.4 Variation curves of dynamic index with vehicle speed on different vibration-attenuating tracks

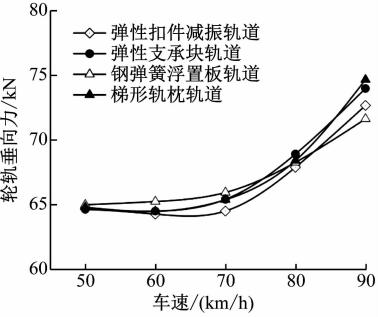
3.2 曲线段减振轨道上地铁车辆动力学性能分析

3.2.1 半径为 600 m 的曲线段

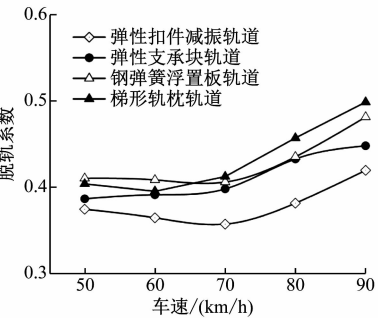
图 5 给出了动车在半径为 600 m 的曲线段,以



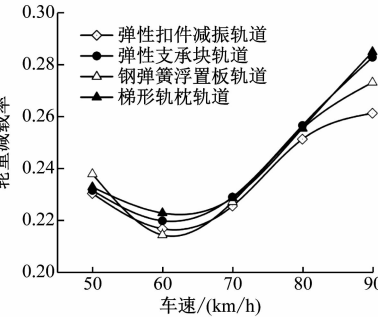
a) 轮轴横向力



b) 轮轨垂向力



c) 脱轨系数



d) 轮重减载率

图5 半径为 600 m 的曲线段车辆动力学指标随车速的变化曲线

Fig.5 Variation of dynamic index with vehicle speed on the curve section with radius of 600 m

及不同减振轨道上的动力学指标随车速的变化情况。由图 5 可知:

1) 当车速大于 60 km/h 时,钢弹簧浮置板轨道上车辆的轮轴横向力明显小于其他 3 种减振轨道;

2) 对于轮轨垂向力,4 种减振轨道相差不大,究其原因是在较小半径的曲线上,由于外轨超高的存在,使得钢弹簧浮置板轨道在横向上也能较好地吸收轮轨冲击作用能量,降低轮轨横向作用力;

3) 弹性扣件减振轨道的脱轨系数和轮重减载率略小于其他 3 种减振轨道,说明具有较小横向支承刚度的弹性扣件在曲线半径较小的线路上仍然能够有效缓解轮轨横向相互作用,同时具有较好的稳定性。

3.2.2 半径为 1 500 m 的曲线段

图 6 给出了在半径为 1 500 m 的曲线段,不同减振轨道上车辆的动力学指标随车速的变化情况。由图 6 可知:

1) 当车速小于 100 km/h 时,弹性扣件减振轨道和钢弹簧浮置板轨道的轮轴横向力均小于其他两种减振轨道。对于弹性扣件减振轨道,是因为弹性扣件较小的横向支承刚度能够有效缓解轮轨横向相互作用;对于钢弹簧浮置板轨道,是因为其在曲线上也能较好地吸收横向冲击作用能量。

2) 钢弹簧浮置板轨道上车辆的轮轨垂向力小于其他 3 种减振轨道。类似于直线段,在较大半径的曲线上以及在垂向上,钢弹簧浮置板轨道都能够较好地吸收轮轨垂向冲击作用能量,进而降低轮轨垂向作用力。

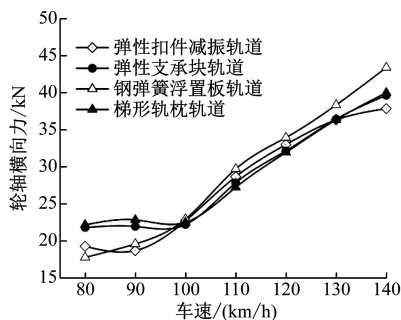
3) 弹性扣件减振轨道上动车的脱轨系数和轮重减载率均小于其他 3 种减振轨道,说明类似于直线线路,在较大半径的曲线上弹性扣件减振轨道仍然具有较好的稳定性。

4 结论

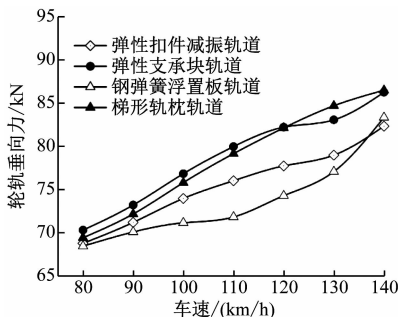
1) 减振轨道结构参数对地铁车辆的临界速度有很大影响。地铁车辆在弹性扣件减振轨道上的非线性临界速度最低,而在梯形轨枕轨道上的临界速度最高;增加减振轨道系统扣件的横向刚度及基础支承刚度能提高车辆的临界速度。

2) 不同车辆结构参数对地铁车辆的临界速度亦有很大影响。本文建立的模型中地铁拖车的横向稳定性好于动车,而 AW0 状态下车辆的稳定性弱于 AW3 状态下车辆的稳定性。

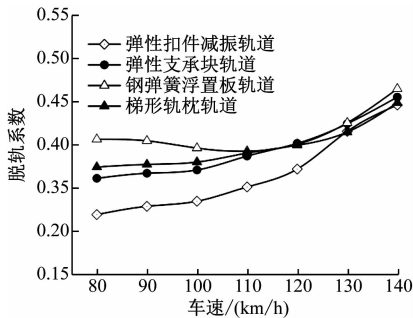
3) 在直线段,车辆在钢弹簧浮置板轨道上具有较小的轮轨垂向力;在弹性扣件减振轨道上,车辆的轮轨安全性指标略小于其他 3 种减振轨道。



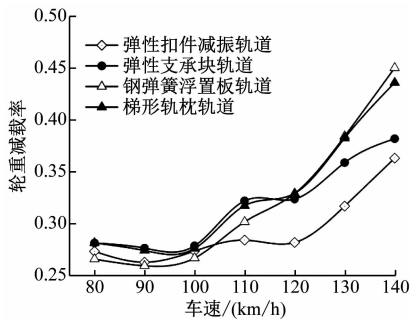
a) 轮轴横向力



b) 轮轨垂向力



c) 脱轨系数



d) 轮重减载率

图 6 半径为 1 500 m 的曲线段车辆动力学指标随车速的变化曲线

Fig. 6 Variation of dynamic index with speed of vehicle on the curve section with radius of 1 500 m

4) 在曲线段,当曲线半径较小时,车辆在钢弹簧浮置板轨道上具有较小的轮轴横向力;当曲线半

(下转第 95 页)

荐下主筋直径 8 mm、连接筋直径 8 mm、连接筋波长 180 mm,作为市域快线双块式轨枕钢筋桁架结构参数方案。此方案下的力学性能和钢筋用量均优于铁路钢筋桁架方案。

3) 通过试验发现,运输和承载后的轨枕波纹筋波峰处焊点完好,无焊点开裂、脱焊等现象,满足双块式轨枕的预制、储存、运输和使用的要求。

参考文献

- [1] 崔国庆. 双块式无砟轨道道床板裂缝控制研究[J]. 铁道标准设计,2010(1):66.
CUI Guoqing. Study on track bed slab track control of double block ballastless track[J]. Railway Standard Design, 2010(1): 66.
- [2] 王仁杰. 高速铁路双块式轨枕横向极限抗力研究[J]. 建筑安全,2019(4):13.
WANG Renjie. Study on lateral ultimate resistance of double block sleepers for high-speed railway[J]. Building Security, 2019(4): 13.
- [3] 王正寿. 高速铁路双块式轨枕制造关键技术研究[J]. 山西建筑,2010(18):252.
WANG Zhengshou. Research on key technologies of high-speed railway double block sleeper manufacturing[J]. Shanxi Architecture, 2010(18): 252.
- [4] 孙立,陈秀方. 双块式无砟轨道轨枕的优化设计研究[J]. 铁道建筑技术,2008(5):1.
SUN Li, CHEN Xiufang. Study on optimal design of double block ballastless track sleeper[J]. Railway Construction Technology, 2008(5): 1.
- [5] 林红松,赵坪锐,刘学毅. 客运专线双块式轨枕堆放受力简化算法[J]. 路基工程,2010(5):36.
LIN Hongsong, ZHAO Pingrui, LIU Xueyi. Simplified calculation method of stacking stress of double block sleepers for passenger dedicated line[J]. Subgrade Engineering, 2010(5): 36.

- [6] 吴军. 双块式轨枕吊装堆放受力分析[J]. 铁道工程学报, 2010(11):43.
WU Jun. Stress analysis of hoisting and stacking of double block sleepers[J]. Journal of Railway Engineering, 2010(11): 43.
- [7] 邵银秀. 铁路客运专线双块式轨枕钢筋桁架制作研究[J]. 工程技术,2008(5):21.
SHAO Yinxu. Research on fabrication of double block sleeper reinforcement truss for passenger dedicated railway[J]. Engineering Technology, 2008(5): 21.
- [8] 杨斌. 大温差地区路基上双块式无砟轨道结构优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
YANG Bin. Study on structural optimization of double block ballastless track on subgrade in large temperature difference area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [9] 褚卫松. 干旱风沙地区高速铁路双块式轨枕设计研究[J]. 铁道标准设计,2014(11):41.
CHU Weisong. Design of double block sleepers for high-speed railway in arid and sandy areas[J]. Railway Standard Design, 2014(11): 41.
- [10] 朱玉明. 客货共线铁路双块式无砟轨道动力响应测试分析[J]. 铁道建筑,2013(7):127.
ZHU Yuming. Dynamic response test and analysis of double block ballastless track of mixed passenger and freight railway[J]. Railway Architecture, 2013(7): 127.
- [11] 高增增. 桥梁地段 CRTS I 型双块式无砟轨道结构受力分析[J]. 中国铁路,2014(8):71.
GAO Zengzheng. Stress analysis of CRTS I double block ballastless track structure in bridge section[J]. China Railway, 2014(8): 71.

(收稿日期:2019-11-18)

(上接第 89 页)

径较大时,车辆在钢弹簧浮置板轨道上具有较小的轮轨垂向力。弹性扣件减振轨道上车辆的轮轨安全性指标略小于其他 3 种减振轨道。

参考文献

- [1] LING L, JIANG P B, WANG K Y, et al. Dynamic interaction between rail vehicles and vibration-attenuating slab tracks[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258:119545.
- [2] LING L, JIANG P B, WANG K Y, et al. Nonlinear stability of rail vehicles traveling on vibration-attenuating slab tracks[J]. ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2020, 15(7):071005.
- [3] 王志强,王安斌,徐宁,等. 地铁轨道道床减振垫减振性能研究

- [J]. 城市轨道交通研究, 2016(7):70.
- WANG Zhiqiang, WANG Anbin, XU Ning, et al. Vibration damping performance of roadbed damping pad applied in Zhengzhou metro[J]. Urban Mass Transit, 2016(7): 70.
- [4] 王金,高志升,张鸿飞,等. 浮置板轨道结构减振性能的落轴试验[J]. 城市轨道交通研究, 2016(10):37.
- WANG Jin, GAO Zhisheng, ZHANG Hongfei, et al. Test on vibration reduction performance of different floating slab track structure[J]. Urban Mass Transit, 2016(10): 37.
- [5] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2015.
- ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupled Dynamics [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.

(收稿日期:2020-10-23)