

城市轨道交通车辆段或停车场线路用 减振扣件刚度参数研究*

孙建树 和振兴 石广田 包能能 张小安

(兰州交通大学机电工程学院, 730070, 兰州//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 既有城市轨道交通车辆段或停车场减振扣件的刚度均基于正线 80 km/h 及以上列车运行速度进行设计, 一般为 15 kN/mm。而在车辆段或停车场内列车的运行速度远低于正线的运行速度。为了探索与车辆段或停车场行车速度相匹配的减振扣件的刚度, 基于车辆-轨道耦合动力学理论, 建立了三维动力学仿真模型, 研究了降低减振扣件的刚度值对车辆系统、轨道系统动力学响应及减振效果的影响。结果表明: 随着减振扣件刚度的减小, 钢轨垂向位移、轨下基础部分振动的变化显著; 在列车运行速度小于 30 km/h 的车场线使用减振扣件时, 其垂向刚度取值可以远低于既有的 15 kN/mm, 但是不宜低于 4 kN/mm; 若减振扣件垂向刚度取 4 kN/mm, 轨道的减振能力可提高 7.18 dB, 且车辆轨道系统的动力学响应仍低于正线 80 km/h 行车速度下既有减振扣件对应的动力学响应。

关键词 城市轨道交通; 场段线路; 减振扣件; 刚度

中图分类号 U231.2; U213.5⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.005

Study on Parameters of Line Vibration Damping Fastener Stiffness in Urban Rail Transit Depot or Parking Lot

SUN Jianshu, HE Zhenxing, SHI Guangtian, BAO Nengneng, ZHANG Xiao'an

Abstract Based on the main line of driving speed of more than 80 km/h, the stiffness of the vibration damping fastener in existing urban rail transit depot or parking lot is generally designed to be 15 kN/mm. Trains in the depot or parking lot are operating at much lower speed than on the main line. To explore the stiffness of vibration damping fastener that match the driving speed at depot or parking lot, based on the theory of vehicle-track coupling dynamics, a three-dimensional dynamic simulation model is established, and the influence of reducing damping fastener stiffness on the dynamic response and vibra-

tion damping effect of vehicle system and track system is studied. Results show that with the reduction of vibration damping fastener stiffness, the change of rail vertical displacement and track ground vibration is significant. When using vibration damping fasteners for depot lines with driving speed of less than 30 km/h, the vertical stiffness value can be much lower than the current 15 kN/mm, but should not be less than 4 kN/mm. If the vertical stiffness of damping fastener takes 4 kN/mm, the vibration damping capacity of the track can be increased by 7.18 dB, and the dynamic response of vehicle track system is still lower than that of the existing damping fastener on main line with driving speed of 80 km/h.

Key words urban rail transit; depot route; vibration damping fastener; stiffness

Author's address School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 730070, Lanzhou, China

车辆段或停车场(以下简称“场段”)结合上盖物业开发是城市轨道交通综合建设的趋势。为了降低或消除列车出入场段时引起的振动、噪声对上盖物业的影响,不同类型的减振降噪措施在城市轨道交通场段内得以广泛采用^[1-2],这其中也包括了造价较低、便于更换的扣件类减振措施。

文献[3-4]通过有限元方式建立车辆-轨道系统动力分析模型后发现,合理降低扣件刚度可以减小轮轨动力冲击,提高减振效果。文献[5]借助通用大型有限元动力学分析软件 ANSYS/LS-DYNA,建立了车辆-线路垂向全车耦合模型,分析了车辆、钢轨的动力特性,研究了在不同的列车行车速度下城际铁路线路扣件刚度的合理取值。文献[6]通过将轨道系统简化为离散支撑的欧拉梁,分析了扣件刚度对轨道振动位移和加速度响应的影响。文献[7]

* 国家自然科学基金重大项目(11790280);国家自然科学基金项目(51868037);牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL1902);甘肃省高等学校科技成果转化项目(2018D-09)

采用三维车辆-轨道耦合动力学计算模型,研究了减振扣件与弹性道床垫组合下减振轨道关键动力学参数变化对车辆系统、轨道系统动力学性能及减振性能的影响规律。但是,上述研究都是在正线 80 km/h 及以上行车速度下进行的。

目前城市轨道交通场段内减振扣件的刚度均基于正线 80 km/h 及以上行车速度进行设计,而列车在场段内的行车速度一般不超过 30 km/h,远低于在正线上的行车速度。根据工程经验,在列车运行速度较低的情况下,减振轨道可以采用较低的刚度,但目前缺乏此方面相关的理论研究。因此,本文在考虑车辆系统和轨道系统综合作用及相互影响的基础上,通过建立三维车辆-轨道耦合动力学仿真模型,得出车辆系统和轨道系统随减振扣件刚度变化的规律,以及城市轨道交通场段用减振扣件刚度的合理取值范围。

1 构建三维车辆-轨道耦合动力学仿真模型

本文基于车辆-轨道耦合动力学理论,建立了三维车辆-轨道耦合动力学仿真模型^[8],用以研究减振扣件刚度的合理取值范围。该模型包括车辆子系统模型、轨道子系统模型及轮轨动态耦合关系。综合考虑车辆参数、非线性轮轨蠕滑和轨道参数等因素,将模型进行求解后,可得到车辆系统和轨道系统随减振扣件刚度变化的规律。

1.1 车辆子系统模型

在车辆子系统模型中,转向架中央悬挂装置提供垂向、横向和纵向 3 个方向的刚度和阻尼,横向减振器、垂向减振器及抗蛇行减振器提供阻尼;轴箱悬挂装置提供 3 个方向的刚度,轴箱定位装置提供水平刚度,一系垂向减振器提供一系垂向阻尼。将车辆模型中每节车的车体(1 个)、构架(2 个)、轮对(4 个)均视为刚体,每个刚体均具有横移、沉浮、侧滚、摇头、点头等 5 个方向的自由度,因此,整个车辆子系统共有 35 个自由度^[8]。

1.2 轨道子系统模型

减振轨道主要包括钢轨、减振扣件、轨道基础等。轨道子系统模型中,将左右两股钢轨均视为连续弹性离散点支撑基础上的无限长 Euler 梁,具有垂向、横向及扭转运动 3 个自由度;减振扣件在垂向和横向两个方向上均采用线性节点弹簧和黏性阻尼表示;为了反映轨道基础的弹性,获得通过减振扣件传给轨道基础的振动加速度,本文将轨道基础

考虑为质量弹簧阻尼系统。轨道子系统模型如图 1 所示。

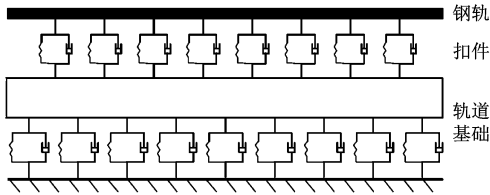


图 1 轨道子系统模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of orbital subsystem model

1.3 轮轨动态耦合关系

轮轨动态耦合关系是车辆子系统和轨道子系统之间连接的纽带,两个子系统之间的动态耦合和反馈作用都是通过这一环节实现的。轮轨动态耦合关系考虑了钢轨弹性变形对轮轨接触几何关系和轮轨动作用力的影响。轮轨的几何计算可采用迹线法。轮轨间的法向力可采用著名的赫兹非线性弹性接触理论,其计算式为:

$$p(t) = \left[\frac{1}{G} \delta Z(t) \right]^{\frac{3}{2}} \tag{1}$$

式中:

- G ——轮轨接触常数;
- $\delta Z(t)$ ——轮轨间的弹性压缩量。

轮轨间的蠕滑力先按 Kalker 线性理论进行计算。考虑到在列车运行过程中轮轨间的蠕滑有可能达到饱和,所以采用 Shen-Hedrick-Elkins 理论进行非线性修正。

2 模型的计算参数及动力学响应

动力学模型选用地铁 A 型车的动力学参数,只考虑列车自重,具体参数取值参照文献[9]。一般情况下,列车正线上的最大运行速度为 80 km/h、车场线上的最大运行速度不超过 30 km/h,故选取 80 km/h 和 30 km/h 两种速度工况来进行模型计算。轨道子系统模型中,钢轨型号选用 50 kg/m,其具体参数如表 1 所示。

表 1 轨道子系统模型的参数取值

Tab.1 Orbital subsystem model parameters values	
参数	取值
钢轨弹性模量 $E_r/(\text{N/m}^2)$	2.06×10^{11}
钢轨截面惯量 I_r/m^4	2.025×10^{-5}
单位长度质量 $m_r/(\text{kg/m})$	51.514
钢轨泊松比 ν_r	0.3

目前减振扣件的垂向刚度一般为 15 kN/mm。

为了研究场段内列车以不超过 30 km/h 的速度运行时减振扣件垂向刚度的合理取值,在本模型的计算中,减振扣件垂向刚度的取值范围为 4 ~ 15 kN/mm,阻尼取 7.5×10^4 Ns/m。

由于目前对城市轨道交通的轨道不平顺谱尚处于研究阶段,本文参考文献[9],选择属于中低速轨道不平顺谱的美国六级轨道不平顺谱作为轨道随机不平顺激励。选取轮轨垂向力、轮轨横向力、车体垂向加速度、轨道动态变形、轨道结构振动作

为车辆和轨道系统的动力学响应评价指标。图 2 为基于上述动力学模型、列车以 80 m/h 的速度通过减振轨道(减振扣件垂向刚度为 15 kN/mm,阻尼为 7.5×10^4 Ns/m)时,在美国六级轨道不平顺谱激励下的动力学响应,分别为轮轨垂向力、轮轨横向力、钢轨垂向位移、钢轨垂向振动加速度、车体垂向振动加速度、轨道基础垂向加速度的响应曲线。图 2 中各动力学指标的响应峰值均满足标准和规定^[10-11]的要求。

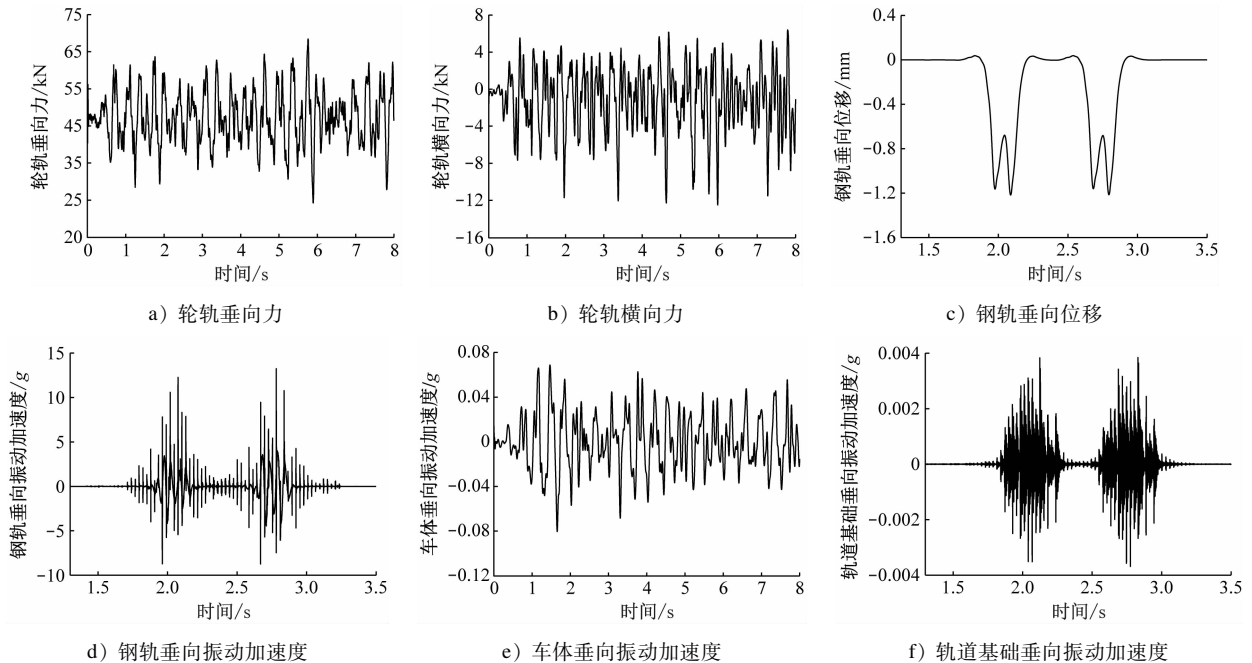


图 2 列车以 80 km/h 的速度通过减振轨道时的动力学响应

Fig. 2 Dynamic response of a train passing damping track at 80 km/h

3 减振扣件刚度对车辆、轨道系统的影响

为了研究车场线减振扣件垂向刚度在 4 ~ 15 kN/mm 范围内变化时对车辆系统、轨道系统的影响,本文对 80 km/h(正线区段)和 30 km/h(车场线区段)两种速度工况下、减振扣件垂向刚度在 4 ~ 15 kN/mm 范围内变化时车辆和轨道系统的动力学响应进行对比分析。考虑到列车在车场线上均为空车运行,列车质量按自重考虑。

3.1 减振扣件刚度对轮轨接触力的影响

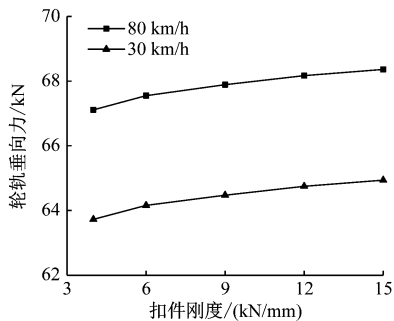
列车在车场线上空车运行时,车辆系统和轨道系统受轨道随机不平顺激励。图 3 对比了 80 km/h 和 30 km/h 两种速度工况下轮轨接触力随减振扣件刚度的变化趋势。

图 3 表明:在 80 km/h 和 30 km/h 两种速度工

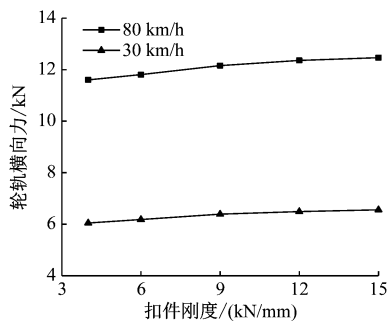
况下,随着减振扣件刚度的降低,轮轨横向力和垂向力均呈下降趋势;30 km/h 工况下的轮轨横向力和轮轨垂向力远低于 80 km/h 工况下的轮轨横向力和轮轨垂向力。当减振扣件垂向刚度为 4 kN/mm 时,30 km/h 工况下的轮轨横向力和轮轨垂向力较 80 km/h 工况下分别减小了 47.9% 和 5.05%,这说明了列车在车场线上运行时轮轨间的冲击作用不大,提高轨道扣件的弹性有利于进一步降低轮轨间的冲击力。

3.2 减振扣件刚度对车辆系统的影响

车体振动加速度是评估车辆系统动力学响应最重要的指标。对 80 km/h 和 30 km/h 两种速度工况下、减振扣件垂向刚度在 4 ~ 15 kN/mm 范围内变化时车体垂向振动加速度的变化趋势进行对比,结果如图 4 所示。



a) 轮轨垂向力随扣件刚度的变化趋势



b) 轮轨横向力随扣件刚度的变化趋势

图3 轮轨接触力随扣件刚度的变化趋势对比

Fig.3 Comparison of the trend of wheel-rail contact force changing with fastener stiffness

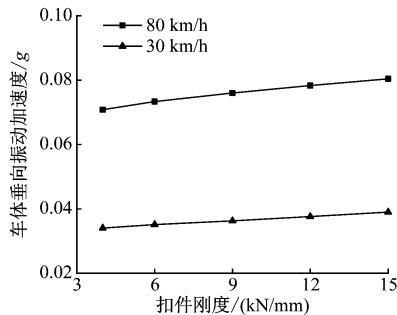


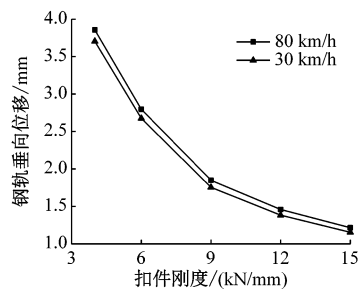
图4 车体垂向振动加速度随扣件刚度变化趋势对比

Fig.4 Comparison of the trend of vehicle body vertical vibration acceleration changing with fastener stiffness

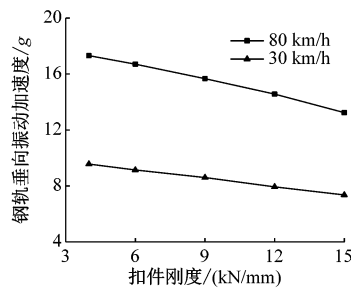
图4中,当列车分别以80 km/h和30 km/h的速度运行在减振轨道上时,减振扣件垂向刚度从15 kN/mm降低到4 kN/mm后,车体垂向振动加速度分别减小了0.005 0 g和0.004 9 g,变化幅度不大;80 km/h工况下的车体垂向振动加速度远大于30 km/h工况下的车体垂向振动加速度。当减振扣件垂向刚度降低到4 kN/mm时,30 km/h工况下对应的车体垂向振动加速度较80 km/h工况下对应的车体垂向振动加速度降低了52%。这表明了减振扣件刚度的降低对车辆系统影响不大,车辆系统受列车运行速度影响较大。

3.3 减振扣件刚度对轨道系统的影响

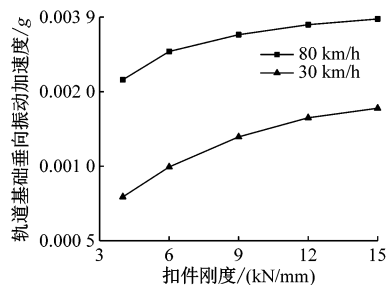
过大的钢轨垂向变形将增大线路的几何不平顺,增加轮轨之间的磨耗,甚至会导致列车脱轨掉道,因此有必要限制钢轨的垂向变形。线路不平顺会使列车在运行过程中产生一定程度的冲击,而这种冲击作用在轨道上时钢轨产生的振动非常明显,因此,钢轨振动加速度是钢轨受冲击作用时对轨道结构振动响应的综合反应,可用于评价轨道的振动特性。此外,列车运行产生的冲击作用会向下传递,引起轨下部分产生振动。图5是80 km/h和30 km/h两种速度工况下轨道系统关键动力学指标随扣件刚度的变化情况。图6为车场线用减振扣件时的轨道系统动力学响应时域对比情况。



a) 钢轨垂向位移随扣件刚度的变化趋势



b) 钢轨垂向振动加速度随扣件刚度的变化趋势



c) 轨道基础垂向振动加速度随扣件刚度的变化趋势

图5 轨道系统关键动力学指标随扣件刚度变化趋势对比
Fig.5 Comparison of the trend of track system key dynamics indicators changing with fastener stiffness

由图5 a)中,随着减振扣件刚度的减小,两种速度工况下的钢轨垂向位移均呈现增大趋势,且钢轨垂向位移的增大以指数形式予以增长;30 km/h

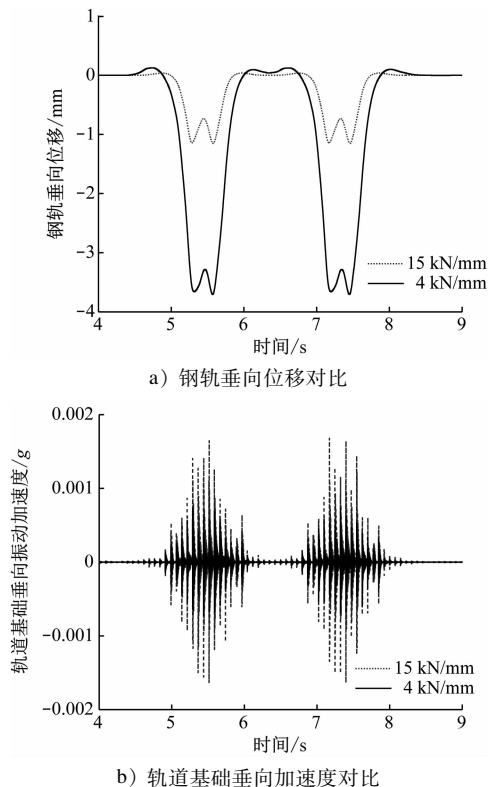


图6 车场线用减振扣件的轨道系统动力学响应时域对比

Fig. 6 Time domain comparison of track system dynamic response with vibration damping fasteners used on depot lines

工况下的钢轨垂向位移略小于 80 km/h 的工况下的钢轨垂向位移,这说明钢轨垂向位移受列车运行速度的影响不大。在减振扣件垂向刚度为 4 kN/mm 时,钢轨垂向位移接近 4 mm,其在 30 km/h 工况下的时域对比如图 6 a) 所示。根据 CJJ/T 191—2012《浮置板轨道技术规范》^[11]中“钢轨的最大垂向位移不应大于 4 mm,轨道基础的最大垂向位移不应大于 3 mm”的规定,车场线路内减振扣件的垂向刚度取值应不低于 4 kN/mm。

由图 5 b) 可看出,随着减振扣件刚度的降低,两种速度工况下的钢轨垂向振动加速度均呈上升趋势;30 km/h 工况下的钢轨加速度较 80 km/h 工况下的钢轨加速度降低了 45%,且在 30 km/h 工况下、减振扣件垂向刚度为 4 kN/mm 时的钢轨垂向振动加速度远低于 80 km/h 工况下、减振扣件垂向刚度为 15 kN/mm 时的钢轨垂向振动加速度。

由图 5 c) 表明:30 km/h 工况下轨道基础垂向振动加速度远小于 80 km/h 工况下的轨道基础垂向振动加速度。当垂向刚度降低到 4 kN/mm 时,

30 km/h 工况下轨道基础垂向振动加速度较 80 km/h 工况下轨道基础垂向振动加速度减小了 61.3%。随着减振扣件垂向刚度的减小,两种速度工况下的轨道基础垂向振动加速度均呈下降趋势。在 30 km/h 工况下当减振扣件垂向刚度从 15 kN/mm 降至 4 kN/mm 时,轨道基础垂向振动加速度从 0.001 68 g 减小至 0.000 73 g,其时域对比如图 6 b) 所示。将其转换为振动加速度级,则从 84.50 dB 下降至 77.32 dB,降低了 7.18 dB。这表明在车场线内使用更低刚度的减振扣件,可以降低车辆走行部及其基础引起的振动。该措施取得了良好的减振效果,可降低对场段上盖物业开发的不利影响。

4 结语

本文建立了三维车辆-轨道耦合动力学模型,研究了场段内使用更低刚度的减振扣件对车辆系统、轨道系统的动力学性能及轨道减振性能的影响规律,给出了场段用减振扣件刚度的合理取值范围。主要结论如下:

1) 相同刚度的减振扣件用于正线(列车运行速度为 80 km/h)和车场线(列车运行速度为 30 km/h)时,车辆系统和轨道系统的主要动力学响应指标存在显著差异。

2) 车场线减振扣件的刚度取值可以比正线更低。当减振扣件刚度由 15 kN/mm 降至 4 kN/mm 时,轮轨力、车体振动加速度、轨道基础加速度呈减小趋势,钢轨垂向位移和钢轨垂向振动加速度呈增大趋势。其中,钢轨垂向位移接近《浮置板轨道技术规范》所规定的钢轨位移上限,但车场线的钢轨垂向振动加速度小于正线。所以,车场线内减振扣件刚度的取值不宜低于 4 kN/mm。

3) 降低车场线减振扣件的刚度,有利于减小传给轨下基础的振动。若减振扣件的垂向刚度从 15 kN/mm 降至 4 kN/mm,所对应的减振效果比既有的减振扣件提高 7.18 dB,减振效果较为显著。

4) 车场线减振扣件刚度对车辆系统的振动加速度影响不大,减振扣件垂向刚度从 15 kN/mm 降至 4 kN/mm,车体振动加速度仅减小了 0.004 9 g。从车辆系统角度来说,降低车场线减振扣件的刚度是可行的。

5) 应根据场段内列车运行速度条件,设计、开发比正线扣件更低(不低于 4 kN/mm)的减振扣件。

参考文献

- [1] 谢伟平,王政印,孙亮明. 地铁车辆段新型隔振支座的减振效果研究[J]. 振动与冲击, 2018 (10): 63.
- XIE Weiping, WANG Zhengyin, SUN Liangming. Vibration reduction effect of a new isolation bearing for a metro depot[J]. Journal for Vibration and Shock, 2018 (10): 63.
- [2] 郑辉. 减振沟技术在地铁车辆段上盖开发中的研究及设计应用[J]. 铁道标准设计, 2018 (11): 150.
- ZHENG Hui. Research and design application of vibration damping ditch technology in metro depot with upper property development [J]. Railway Standard Design, 2018 (11): 150.
- [3] 耿传智,余庆. 地铁轨道结构减振性能的仿真分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011 (1): 85.
- GENG Chuanzhi, YU Qing. Shock absorption analysis of subway rail track structure[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011 (1): 85.
- [4] 耿传智,董国宪,朱剑月. 弹性钢轨扣件轨道的轮轨作用力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2007(4): 20.
- GENG Chuanzhi, DONG Guoxian, ZHU Jianyue. Analysis of wheel-track force with elastic rail fastener[J]. Urban Mass Transit, 2007(4): 20.
- [5] 段玉振,张丽平,杨荣山. 城际高铁各种行车速度下扣件刚度的选取研究[J]. 铁道建筑, 2012(3): 103.
- DUAN Yuzhen, ZHANG Liping, YANG Rongshan. Study on the selection of fastener stiffness for intercity high-speed railway at various speeds[J]. Railway Engineering, 2012(3): 103.
- [6] 王玉. 扣件刚度对轨道及饱和地基振动响应的影响[J]. 铁道工程学报, 2018 (4): 43.
- WANG Yu. The influence of rail fastenings stiffness on track-ground system vibration[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018 (4): 43.
- [7] 和振兴,陈磬超,周华龙,等. 减振扣件与弹性道床垫组合减振关键参数研究[J]. 铁道工程学报, 2019 (6): 38.
- HE Zhenxing, CHEN Qingchao, ZHOU Hualong, et al. Theoretical research on the key dynamic parameters of the fastener-matress combined vibration damping track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019 (6): 38.
- [8] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学:上册[M]. 4版. 北京:科学出版社, 2015: 20.
- ZHAI Wanning. Vehicle-track coupled dynamics volume 1[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015: 20.
- [9] 周华龙,蒋建政,周昌盛,等. 减振轨道对地铁车辆动力学性能的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2019 (12): 53.
- ZHOU Hualong, JIANG Jianzheng, ZHOU Changsheng, et al. Effect of different vibration damping tracks on dynamic performance of metro vehicles[J]. Railway Standard Design, 2019 (12): 53.
- [10] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 机车车辆动力学性能评定和试验鉴定规范: GB/T 5599—2019[S]. 北京:中国标准出版社, 2019: 8.
- National Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019: 8.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 浮置板轨道技术规范: CJJ/T 191—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012: 5.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for floating slab track: CJJ/T 191—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 5.
- (收稿日期: 2020-05-27)
-
- (上接第 23 页)
- XIA Runhe. Analysis of metro tunnel collapse accident based on accident mechanism and responsibility and its prevention strategy [J]. Tunnel Construction, 2019(10): 1601.
- [6] 李菲菲,董慧. 大数据时代下城市治理的伦理诉求[J]. 城市发展研究, 2020(5): 65.
- LI Feifei, DONG Hui. Ethical demands of urban governance in the era of big data[J]. Urban Development Studies, 2020(5): 65.
- [7] 曹策俊,李从东,王玉,等. 大数据时代城市公共安全风险治理模式研究[J]. 城市发展研究, 2017(11): 76.
- CAO Cejun, LI Congdong, WANG Yu, et al. Governance mode of urban public safety risk in big data era[J]. Urban Development Studies, 2017(11): 76.
- [8] 夏一雪,韦凡,郭其云. 面向智慧城市的公共安全治理模式研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016(4): 100.
- XIA Yixue, WEI Fan, GUO Qiyun. Research on public safety governance mode oriented to smart city[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016(4): 100.
- [9] 孙粤文. 大数据:现代城市公共安全治理的新策略[J]. 城市发展研究, 2017(2): 79.
- SUN Yuewen. Big data: new strategy of public security governance in modern cities[J]. Urban Development Studies, 2017(2): 79.
- (收稿日期: 2021-04-21)