

双块式浮置板轨道隔振器刚度及减振效果研究^{*}沈山杉¹ 禹 雷² 黄慧超² 谷呈朋²

(1. 南京地铁建设有限责任公司, 210036, 南京; 2. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 100055, 北京)

摘 要 [目的]为解决目前高等及特殊减振浮置板轨道中存在轨底坡保持精度差、施工精度不足等弊端,引入 CRTS (中国铁路无砟轨道系统)双块式无砟轨道技术至浮置板轨道中,以提高城市轨道交通高等及特殊减振轨道结构的稳定性、平顺性及安全性,减少维修量,提高施工效率。[方法]建立车辆-双块式浮置板轨道竖向动力耦合模型,对合理的隔振器刚度和隔振器布置方案开展研究,并与整体道床轨道进行对比,分析其减振效果和振动传播规律。[结果及结论]两种隔振器布置方案下,不同隔振器刚度的稳定性和安全性指标均能很好地满足限值要求。提出隔振器刚度选取 8 kN/mm,隔振器采取 1.785 m 与 1.190 m 间距交替布置的方案。双块式浮置板轨道拥有优异的隔振效率,采用双块式浮置板轨道后,隧道壁的振动加速度峰值比道床振动加速度峰值降低了 90%。在隧道壁振动加速度频谱分析中,双块式浮置板轨道总体上能减小隧道壁在不同频率下的竖向振动加速度,最大 Z 振级的差值降幅可达 18.3 dB。当距离隧道中心正上方超出 70 m,城市区域环境振动控制标准均满足要求。

关键词 城市轨道交通;双块式浮置板轨道;隔振器刚度;减振效果

中图分类号 U213.2⁺41

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230597

Stiffness and Vibration Reduction Performance of Double-block Floating Slab Track Vibration Isolators

SHEN Shanshan¹, YU Lei², HUANG Huichao², GU Chengpeng²

(1. Nanjing Metro Construction Co., Ltd., 210036, Nanjing, China; 2. China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd., 100055, Beijing, China)

Abstract [Objective] To address the shortcomings currently present in high-performance and special vibration-reducing floating slab track systems, such as poor accuracy in maintaining the rail bottom gradient and insufficient construction precision, the CRTS (China railway track system) double-block ballastless track technology is introduced into floating slab track

structures, to enhance the stability, smoothness, and safety of advanced and special vibration-reducing urban rail transit track structures, reduce maintenance demands, and improve construction efficiency. [Method] A vertical dynamic coupling model of the vehicle and double-block floating slab track system is established to investigate appropriate stiffness values and layout schemes for vibration isolators. Comparative analyses with monolithic track bed systems are conducted to evaluate the vibration reduction performance and vibration propagation characteristics. [Result & Conclusion] Under two different vibration isolator layout schemes, the stability and safety indicators corresponding to various isolator stiffness values effectively met the required limits. A vibration isolator of stiffness 8 kN/mm with the layout scheme involving alternating spacings of 1.785 m and 1.190 m is proposed. The double-block floating slab track system demonstrate excellent vibration isolation efficiency. When adopting this system, the peak vibration acceleration on the tunnel wall is reduced by 90% compared to that of the track bed. Spectral analysis of tunnel wall vibration acceleration shows that the double-block floating slab track system significantly reduce vertical vibration acceleration across various frequencies, with a maximum Z-vibration level reduction of up to 18.3 dB. At a distance of more than 70 meters vertically above the tunnel center, the environmental vibration levels in urban areas complied with all regulatory standards.

Key words urban rail transit; double-block floating slab track; vibration isolator stiffness; vibration reduction performance

随着近年来各大城市轨道交通线网的不断延伸,其运营产生的振动噪声对人口密集的商业区、生活区的影响日益显著^[1-2]。浮置板轨道系统作为一种新型轨道交通减振轨道结构,因其质量大、结构刚度低,固有频率相对较低,具有良好的减振性能^[3],已在多个国家和地区得到广泛使用^[4]。目前,高等及特殊减振浮置板轨道中主流的短枕式、

^{*} 南京地铁集团有限公司、南京地铁建设有限责任公司科研开发项目(JS-D9-XY01-0000-1714)

长枕式等轨道存在轨底坡保持精度较差,易产生钢轨异常波磨,导致振动噪声加剧^[5],或施工调整工作量大、施工精度不够等弊端,已经不能很好满足环评要求^[6]。

CRTS(中国铁路无砟轨道系统)双块式无砟轨道结构是目前高速铁路广泛应用的无砟轨道之一,其铺设精度较高,轨底坡易于保持^[7]。将高速铁路CRTS双块式无砟轨道技术引入城市轨道交通浮置板轨道系统中,开发出适用于城市轨道交通的新型双块式浮置板轨道系统。双块式浮置板道床结构主要包含双块式轨枕、浮置道床板、隔振器、浮置板基底及浮置板间剪力铰等。该结构可改善轮轨受力关系,降低波磨发生的概率,并且带桁架筋的双块式轨枕可以更好地和浮置板有效结合在一起,便于轨排的组装及钢筋网的架设,达到减少施工环节,提高施工效率、施工精度,提升结构耐久性和经济性的效果^[8]。

隔振器参数设计是浮置板系统设计的重要部分。隔振器刚度越大对行车稳定性与安全性越有利,但相应的隔振效果越差^[9]。为达到更好的双块式浮置板轨道的减振效果,隔振器刚度及布置方案应综合考虑进行设计^[10-12]。因此,本文建立车辆-双块式浮置板轨道竖向动力耦合模型,对合理的隔振器刚度和隔振器布置方案开展研究,并与整体道床轨道进行对比,分析其减振效果和振动传播规律。

1 隔振器刚度及布置方案

1.1 模型建立

在研究隔振器刚度及其布置方案对浮置板系统动力特性影响时,须建立车辆-双块式浮置板轨道竖向动力耦合模型。车辆模型选取南京地铁9号线运行的B型车。该车辆系统由车体、转向架、轮对等主要部件组成,通过一系、二系悬挂相互连接。车辆-双块式浮置板轨道竖向动力耦合模型共建立5块浮置板^[13],如图1所示。单块浮置板长25 m,采用弹性薄板单元进行模拟^[14];钢轨采用欧拉梁单元进行模拟;扣件、隔振器与隧道地基均采用弹簧单元模拟。对浮置板板端个别点的位移、转角进行耦合设置以模拟浮置板间的剪力铰^[15-16]。双块式浮置板轨道主要参数如表1所示。隔振器竖向刚度分别为6 kN/mm、8 kN/mm、10 kN/mm及12 kN/mm时,分析车辆-双块式浮置板轨道竖向动力耦合模型在1.785 m与1.190 m间距交替布置和1.190

m等间距布置两种方案下的性能。

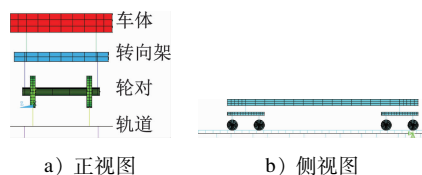


图1 车辆-双块式浮置板轨道竖向动力耦合模型示意图

Fig. 1 Diagram of vehicle-double-block floating slab track vertical dynamic coupling model

表1 双块式浮置板轨道主要参数取值

Tab. 1 Values of main parameters of double-block floating slab track

部件	参数	取值
钢轨	弹性模量/MPa	206 000
	密度/(kg/m ³)	7 800
	泊松比	0.3
浮置板	弹性模量/MPa	32 500
	密度/(kg/m ³)	2 600
	泊松比	0.167
扣件弹簧	竖向刚度/(kN/mm)	40
	横向刚度/(kN/mm)	80
	纵向刚度/(kN/mm)	10
	扣件间距/m	0.625
隧道地基	地基系数/(MPa/m)	1 200

根据线路实际情况,行车速度取80 km/h。选择美国五级谱作为系统的激励,在该模型中加入美国五级谱长波高低不平顺,如图2所示。

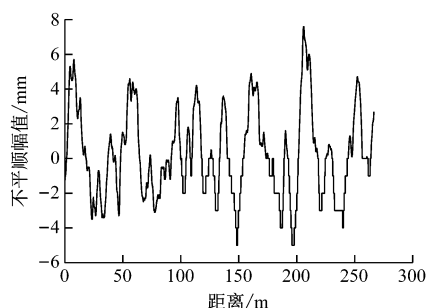


图2 美国五级谱长波高低不平顺

Fig. 2 Long-wave vertical irregularity in the US five-level spectrum

根据TB 10621—2014《高速铁路设计规范》、CJJ/T 191—2012《浮置板轨道技术规范》和GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》中的要求^[17-18],确定行车稳定性和安全性的评判限值,如表2所示。参考国内外资料,评价城市

轨道交通车辆舒适度时,选定竖向振动加速度不高于 $0.15g$ 。

表 2 行车稳定性与安全性指标

Tab. 2 Driving stability and safety indicators

指标	取值
钢轨最大竖向位移/mm	≤ 4
浮置板最大竖向位移/mm	≤ 3
轮重减载率	≤ 0.6
最大轮轨竖向力/kN	≤ 170
车体竖向振动加速度/ g	≤ 0.15

1.2 行车稳定性与安全性分析

为保证新型双块式浮置板的行车稳定性与安全性,分析不同隔振器刚度及布置方案对钢轨与新型双块式浮置板的最大竖向位移、轮轨竖向力与车辆加速度等指标的影响。

图 3 和图 4 为车辆荷载作用下钢轨和双块式浮置板的最大竖向位移。由图 3 可知:随着隔振器刚度增大,两种隔振器布置方案的钢轨最大竖向位移均逐渐减小,且隔振器交替间距布置时的钢轨最大竖向位移始终大于等间距布置时的钢轨最大竖向位移。当隔振器刚度为 6 kN/mm 、隔振器交替间距布置时的钢轨最大竖向位移超出了 4 mm 的限值,隔振器等间距布置时钢轨最大竖向位移接近限值。由图 4 可知:随着隔振器刚度增大,两种方案的双块式浮置板最大竖向位移均逐渐减小,且隔振器交替间距布置时的双块式浮置板最大竖向位移始终大于隔振器等间距布置时的双块式浮置板最大竖向位移。当隔振器刚度为 6 kN/mm 时,两种方案的双块式浮置板最大竖向位移均大于 3 mm ;采用交替间距布置隔振器,隔振器刚度为 8 kN/mm 时,双块式浮置板最大竖向位移也超出 3 mm 。

图 5 和图 6 分别展示了车辆荷载作用下的最大轮轨竖向力和轮重减载率。其中车轮静轮重为 57.8 kN 。由图 5 和图 6 可知:当隔振器交替间距布置时,随着隔振器刚度的变化,轮重减载率和最大轮轨竖向力的变化幅值很小;但当隔振器等间距布置时,随着隔振器刚度的增加,轮重减载率却不断减小,而最大轮轨竖向力则不断增大;轮重减载率始终小于 0.65 ,最大轮轨竖向力均未超出 170 kN ,满足安全运营的要求。此外,隔振器等间距布置时的最大轮轨竖向力始终大于交替间距布置时的最大轮轨竖向力,而轮重减载率始终小于交替间距布置时的。随着隔振器刚度增大,隔振器交替间距布

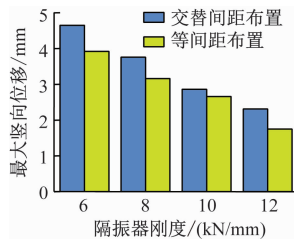


图 3 车辆荷载作用下钢轨最大竖向位移

Fig. 3 Maximum rail vertical displacement under vehicle load action

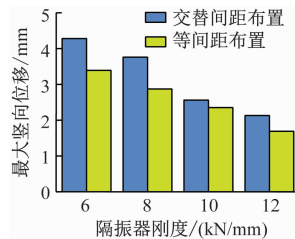


图 4 车辆荷载作用下双块式浮置板最大竖向位移

Fig. 4 Maximum vertical displacement of double-block floating slab track under vehicle load action

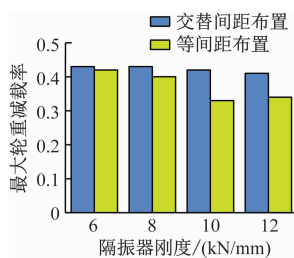


图 5 车辆荷载作用下最大轮重减载率

Fig. 5 Maximum wheel load reduction rate under vehicle load action

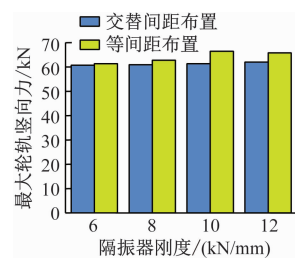


图 6 车辆荷载作用下最大轮轨竖向力

Fig. 6 Maximum wheel-rail vertical force under vehicle load action

置时与等间距布置时轮重减载率和最大轮轨竖向力的差异均有所增大。

图 7 为车辆荷载作用下车体最大竖向振动加速度。由图 7 可知:隔振器等间距布置时的车体最大竖向振动加速度始终大于交替间距布置时的车体最大竖向振动加速度。在隔振器等间距布置方案中,浮置板支承刚度越大,车体最大竖向振动加速度越小,最大差值达到了 $0.09g$ 左右,对车内乘客的舒适度产生一定的影响;但车体的竖向振动加速度均远小于 $0.15g$,车体的竖向振动并不明显。

2 减振效果

2.1 模型建立

为研究双块式浮置板轨道的减振效果,建立隧道-土体有限元分析模型^[19-20],隧道、道床和仰拱均采用实体单元模拟。由于模型具有对称性,仅建立半模型进行分析。轨道结构沿隧道纵向截取两块浮置板(总长 50 m),模型半宽取 60 m ,深度取 48

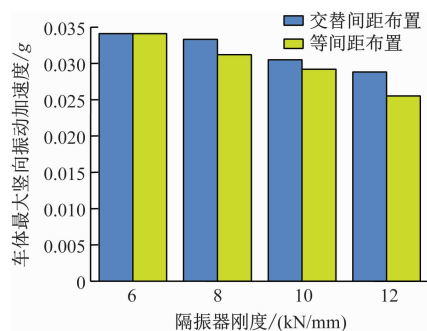


图7 车辆荷载作用下的车体最大竖向振动加速度

Fig. 7 Vehicle carbody maximum vertical vibration acceleration under vehicle load action

m。为消除边界效应,隧道横向和纵向的边界设置长 20 m 的无限单元,无限远端无约束,土体上表面无约束,其余边界均设置对称约束。由于当隔振器刚度小于 8 kN/mm 时,双块式浮置板轨道在地铁车辆荷载作用下的最大竖向位移虽超出规范中的建议值,但超出幅值并不大,且其余各项行车稳定性和安全性指标均未超出限值,表现良好,故隔振器刚度选取为 8 kN/mm,以期得到更好的减振性能。

建立车辆-整体道床轨道竖向耦合动力学计算模型。参照车辆-双块式浮置板轨道竖向耦合动力学计算模型,单块道床板长度为 25 m,宽度为 3.0 m,高度为 0.4 m,模型总长取 125 m。主要材料参数见表 3。当车辆行驶于双块式浮置板轨道上时,提取隔振器受力施加于隧道仰拱上;当车辆行驶于隧道内整体道床上时,提取扣件力直接作用于整体道床上。

表3 整体道床轨道主要参数取值

Tab. 3 Values of main parameters of monolithic track bed

部件	参数	取值
道床	弹性模量/MPa	36 500
	密度/(kg/m ³)	2 400
	泊松比	0.167
隧道地基	地基系数/(MPa/m)	1 200

参照 GB 10070—1988《城市区域环境振动控制标准》,提出城市区域环境振动 Z 振级控制标准。Z 振级振动加速度级 L_{VA} 是以 10^{-6} m/s^2 为基准加速度,通过式(1)进行计算:

$$L_{VA} = 20 \lg \frac{\bar{a}}{a_0} \quad (1)$$

式中:

\bar{a} ——加速度有效值;

a_0 ——基准加速度,取 10^{-6} m/s^2 。

2.2 减振性能

为研究双块式浮置板轨道减振效果,分析城市轨道交通车辆通过双块式浮置板轨道时对周围环境的振动影响,选取盾构隧道壁上源强点的竖向加速度。通过计算结果可知,使用双块式浮置板地段隧道壁振动加速度与整体道床地段隧道壁振动加速度存在量级差异。采用双块式浮置板轨道后,隧道壁的振动加速度峰值比道床振动加速度峰值降低了 90%,可见双块式浮置板轨道拥有较优异的隔振效率。将双块式浮置板地段与整体道床地段隧道壁振动加速度差值进行频谱分析,如图 8 所示。由图 8 可知:不同频率下双块式浮置板基本上都能减小隧道竖向振动加速度;对于频率大于 50 Hz 的隧道竖向振动加速度,减振效果更为明显。通过计算得到双块式浮置板与普通整体道床隧道壁最大 Z 振级的差值 $\Delta V_{Lz, \max}$ 为 18.3 dB。

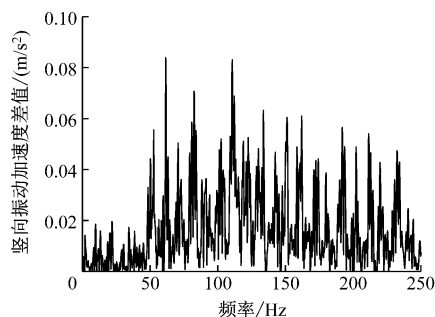


图8 整体道床轨道与双块式浮置板轨道隧道壁竖向振动加速度差值随频率变化曲线

Fig. 8 Curves of tunnel wall vertical vibration acceleration difference between monolithic track bed and double-block floating slab track changing with frequency

2.3 振动传播

以隧道正上方、模型纵向 25 m 处地面为中心,提取横向上距离该中心 0 m、10 m、20 m、30 m、40 m、50 m、60 m、70 m 和 80 m 的地面竖向振动加速度峰值,代入式(1)求得不同荷载条件下沿横向地面振动加速度级,如图 9 所示。由图 9 可知:当地铁车辆处于满载状态,隧道正上方地面振动加速度级均超过 75 dB,超出交通干线两侧限值。横向上距离隧道正上方中心 20 m 范围内,地面振动加速度级随着距离的增加而迅速减小;横向上距离隧道中心超出 20 m 时,无论空车还是满载车,地面竖向振动加速度级均低于 70 dB;横向上距离隧道中心大于

70 m 时,无论是空车还是满载车,地面竖向振动加速度级均低于 65 dB。可见,地面竖向振动加速度级满足城市特殊住宅区对环境振动的要求。

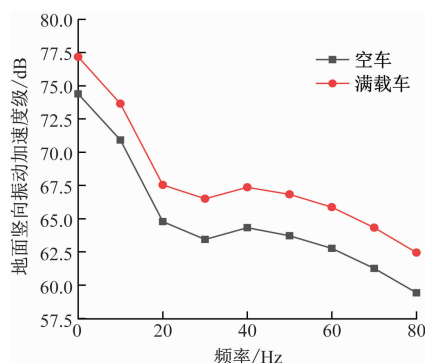


图9 不同车辆荷载条件下沿横向地面竖向振动加速度级
Fig. 9 Ground vertical acceleration vibration level by horizontal impact under different vehicle load conditions

对模型纵向 25 m 处,垂直于隧道前进方向距隧道中心 20 m 处土体,提取其距离地面 0 m、4.5 m、10.0 m、18.0 m、28.0 m 和 48.0 m 的竖向振动加速度作为 \bar{a} ,代入式(1)得到图 10。由图 10 可知:横向上距离隧道中心 20 m 处,无论是空车还是满载车状态,地面竖向振动加速度级均达到峰值,分别为 76.0 dB 和 72.5 dB,其余位置均低于 70.0 dB。这表明,应尽量避免在隧道正上方 20 m 范围内的空间上建造建筑物。

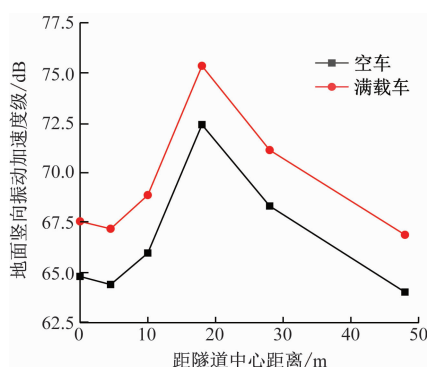


图10 不同车辆荷载条件下沿竖向地面竖向振动加速度级
Fig. 10 Ground vertical acceleration vibration level under different vehicle load conditions

3 结论

1) 随着隔振器刚度增大,两种隔振器布置方案的钢轨最大竖向位移、双块式浮置板最大竖向位移、车体竖向振动加速度和轮重减载率均减小,而最大轮轨竖向力增大。隔振器交替间距布置方案

的钢轨最大竖向位移、双块式浮置板最大竖向位移、车体竖向振动加速度和轮重减载率始终大于等间距布置方案的。

2) 两种隔振器布置方案下,不同隔振器刚度的车体竖向振动加速度、轮重减载率和最大轮轨竖向力均满足限值要求,表现良好。出于经济性考虑,可选择隔振器交替间距布置方案。虽然隔振器刚度小于 8 kN/mm 时,隔振器交替间距布置方案的钢轨最大竖向位移超出规范中的建议值,但超出幅值不大。为获得更好的减振效果,建议隔振器刚度选取为 8 kN/mm。

3) 双块式浮置板轨道结构拥有优异的隔振效率。采用双块式浮置板轨道后,隧道壁的振动加速度峰值比道床振动加速度峰值降低了 90%。在隧道壁振动加速度频谱分析中,双块式浮置板结构总体上能减小隧道壁在不同频率下的竖向振动加速度,其与普通整体道床隧道壁最大 Z 振级的差值 $\Delta V_{Lz,max}$ 可达到 18.3 dB。

4) 车辆行驶时,无论是空车还是满车,隧道中心正上方 0 ~ 40 m 范围内,地面横向振动加速度级总体较大;距离隧道中心正上方 20 m 和 40 m 处分别出现竖向和横向振动加速度局部增大的现象;横向上距离隧道中心正上方超出 70 m 时,城市区域环境振动控制标准均满足要求。

参考文献

- [1] 韩艺琴,贺玉龙,李怀龙. 成都地铁钢弹簧浮置板道床减振性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(1): 136.
HAN Yihui, HE Yulong, LI Huailong. Analysis of the vibration reduction performance of steel spring floating slab track bed of Chengdu Metro[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(1): 136.
- [2] 马蒙,李明航,吴宗臻,等. 地铁列车与定点锤击荷载下浮置板轨道减振效果对比试验研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(5): 28.
MA Meng, LI Minghang, WU Zongzhen, et al. Comparative experimental study on vibration reduction effect of floating slab track under metro train and fixed point hammering loads[J]. China Railway Science, 2019, 40(5): 28.
- [3] 李响,任尊松,徐宁. 地铁小半径曲线段钢弹簧浮置板轨道的钢轨波磨研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(8): 70.
LI Xiang, REN Zunsong, XU Ning. Study on rail corrugation of steel spring floating slab track on subway with small radius curve track[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8): 70.
- [4] 蒋吉清,张佳斌,董北北,等. 剪力铰对地铁列车-劣化浮置

- 板轨道振动的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2978.
- JIANG Jiqing, ZHANG Jiabin, DONG Beibei, et al. Effects of dowel joints on vibrations of metro train-deteriorated floating slab track system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(10): 2978.
- [5] 陆文学, 杨新文, 赵治均. 地铁浮置板轨道系统导纳特性与钢轨波磨关系研究[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(5): 171.
- LU Wenxue, YANG Xinwen, ZHAO Zhijun. Study on the relationship between admittance characteristics of metro floating slab track system and rail corrugation[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(5): 171.
- [6] 耿天霜, 黄慧超, 任树文. 双块式点支撑浮置板环境振动影响研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(2): 75.
- GENG Tianshuang, HUANG Huichao, REN Shuwen. Study on environmental vibration of double block point supported floating slab[J]. Railway Engineering, 2022, 62(2): 75.
- [7] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道结构[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- ZHAO Guotang. High speed railway ballastless track structure [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- [8] 李晓峰, 禹雷, 丁德云, 等. 城市轨道交通新型双块式点支撑浮置板道床结构设计及试验研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(9): 63.
- LI Xiaofeng, YU Lei, DING Deyun, et al. Structural design and experimental study of new double-block sleepers floating slab track structure of urban rail transit[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(9): 63.
- [9] 刘韦, 朱光楠, 杜香刚, 等. 具有高静低动刚度特性的浮置板隔振器设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 1.
- LIU Wei, ZHU Guangnan, DU Xianggang, et al. Study on design method of floating slab vibration isolator with high static and low dynamic stiffness characteristic[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(15): 1.
- [10] 胡志鹏. 基于极限状态法的高铁桥上双块式无砟轨道配筋设计研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(10): 72.
- HU Zhipeng. Research on reinforcement design of double-block ballastless track on high-speed railway bridge based on limit state method[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(10): 72.
- [11] 王澜, 姚明初. 轨道结构随机振动理论及其在轨道结构减振研究中的应用[J]. 中国铁道科学, 1989, 10(2): 41.
- WANG Lan, YAO Mingchu. Random vibration theory of rail track structure and its application in the study of railtrack vibration isolation[J]. China Railway Science, 1989, 10(2): 41.
- [12] 李平, 罗信伟, 朱文海. 市域快线现浇钢弹簧浮置板轨道动力性能研究[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(1): 142.
- LI Ping, LUO Xinwei, ZHU Wenhui. Dynamic performance of cast-in-place steel spring floating slab track in urban express rail transit[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(1): 142.
- [13] 谭盐宾, 郑永杰, 李康, 等. 双块式无砟轨道现浇混凝土的抗裂性能[J]. 铁道建筑, 2021, 61(2): 91.
- TAN Yanbin, ZHENG Yongjie, LI Kang, et al. Crack resistance performance of cast-in-situ concrete for double-block ballastless track[J]. Railway Engineering, 2021, 61(2): 91.
- [14] 栾永平. 现浇双块式无砟轨道板裂缝控制机理和预防措施[J]. 铁道建筑, 2010, 50(1): 21.
- LUAN Yongping. Crack control mechanism and preventive measures of cast-in-place double-block ballastless track slab[J]. Railway Engineering, 2010, 50(1): 21.
- [15] 郝晓成, 蔡小培, 梁延科, 等. 地铁减振板式轨道动力测试与减振特性研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(7): 13.
- HAO Xiaocheng, CAI Xiaopei, LIANG Yanke, et al. Dynamic tests and vibration reduction characteristics of vibration damping slab track in subway[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(7): 13.
- [16] 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, 2013.
- 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, 2013.
- [17] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, 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.
- [18] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准: GB 10070—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China. Standard of environmental vibration in urban area: GB 10070—1988[S]. Beijing: Standards Press of China, 1988.
- [19] 范先知. 城市轨道钢弹簧浮置板隔振器设置方案研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(10): 6.
- FAN Xianzhi. Study on layout scheme of vibration isolator of urban rail steel spring floating slab[J]. Railway Construction Technology, 2022(10): 6.
- [20] 郝晓成, 蔡小培, 梁延科, 等. 地铁减振板式轨道动力测试与减振特性研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(7): 13.
- HAO Xiaocheng, CAI Xiaopei, LIANG Yanke, et al. Dynamic tests and vibration reduction characteristics of vibration damping slab track in subway[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(7): 13.

· 收稿日期:2023-05-29 修回日期:2023-07-28 出版日期:2025-06-10
 Received:2023-05-29 Revised:2023-07-28 Published:2025-06-10
 · 通信作者: 沈山杉, 高级工程师, 48614720@qq.com
 · ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
 © Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license