

市域快轨梯形轨枕无砟轨道 在线实测及分析

申琼玉¹, 韩冬东¹, 董振升², 俞泉瑜¹, 徐飞虎¹

(1. 安境迹(上海)科技有限公司, 上海 200030; 2. 铁科检测有限公司, 北京 100081)

摘要: 总结分析 2023 年在国家铁道试验中心环线完成的最高时速 220 km/h 条件下, 市域快轨梯形轨枕无砟轨道相对于普通有砟轨道的安全性、平稳性及减振效果等测试方案及测试结果。测试列车为 8 辆编组 CRH380AJ 综合检测车, 测试指标包括: 脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力等安全性及稳定性指标, 钢轨及轨枕垂、横向动态位移等变形指标, 钢轨垂、横向振动加速度等振动特性指标, 以及距线路中心线 3.5 m 处路基表面的减振效果等。测试结果表明: 市域快轨梯形轨枕无砟轨道的各项指标均低于相关规范标准限值, 且与有砟轨道相近, 表明市域快轨梯形轨枕在安全性、稳定性及钢轨振动特性方面可满足 220 km/h 速度级应用要求; 市域快轨梯形轨枕无砟轨道相对于普通有砟轨道的减振效果按不同计权方式分别为 3.3~5.1 dB、4.4~6.8 dB。本次测试成果可为市域快轨及城际铁路轨道减振技术应用提供借鉴与参考。

关键词: 市域快轨; 梯形轨枕; 安全性; 稳定性; 减振效果

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)01-0114-06

Field Test of Safety, Stability, and Vibration Reduction of Ladder-Sleeper Track in Urban Rapid Rail Transit

SHEN Qiongyu¹, HAN Dongdong¹, DONG Zhensheng², YU Quanyu¹, XU Feihu¹

(1. Angel (Shanghai)Technology Co., Ltd., Shanghai 200030; 2. Railway Engineering Inspection Co., Ltd., Beijing, 100081)

Abstract: This study comprehensively summarizes the testing scheme and results of a ladder-sleeper ballastless track in urban rapid rail transit for safety, stability, and vibration reduction performance compared with an ordinary ballasted track at a maximum speed of 220 km/h on the National Railway Test Center Circular Line in 2023. The test used eight CRH380AJ comprehensive inspection units, including the safety and stability of the wheelset derailment coefficient, wheel load reduction rate, wheel-rail lateral force, vertical and lateral dynamic displacement indicators of the rail and sleeper, vertical and lateral vibration characteristics of the rail, and vibration reduction performance of the roadbed surface at a distance of 3.5 m from the centerline of the line. The test results for these indices were lower than the limits of the corresponding standards and close to those for the existing ballasted track. The test results show that the safety, stability, and wheel-rail vibration characteristics of the ladder-sleeper ballastless track in urban rapid rail transit can satisfy the requirements of the line at a speed of 220 km/h. According to different weighting methods, the average vibration reduction of the ladder-sleeper ballastless track compared with an ordinary ballasted track in urban rapid rail transit can reach 3.3–5.1 dB and 4.4–6.8 dB. The test results provide a reference for urban rapid rail transit and intercity railway track vibration reduction technologies.

Keywords: urban rapid rail; ladder-sleeper; safety; stability; vibration reduction

收稿日期: 2023-07-10 修回日期: 2023-12-01

第一作者: 申琼玉, 男, 硕士, 工程师, 主要从事城市轨道交通减振降噪工作, 469576565@qq.com

基金项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司基金(2022YJ280)

引用格式: 申琼玉, 韩冬东, 董振升, 等. 市域快轨梯形轨枕无砟轨道在线实测及分析[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 114–119.

SHEN Qiongyu, HAN Dongdong, DONG Zhensheng, et al. Field test of safety, stability, and vibration reduction of ladder-sleeper track in urban rapid rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 114–119.

1 研究背景

我国自2005年开始引进的城市轨道交通高等减振轨道结构——梯形轨枕，在经过引进、消化、吸收、再创新等一系列过程后，在北京、上海、广州、深圳、南京、西安、郑州等20多个城市的轨道交通中已有数百千米的成功应用，运营线路最高速度达到120 km/h，减振效果及运营状态良好^[1]。

2017年，国家铁道试验中心环形线铺设了360 m梯形轨枕无砟轨道，进行了多次安全性、平稳性、钢轨振动特性及减振效果等测试，最高测试速度达到176 km/h，测试结果良好^[2]。该段线路自2017年正常使用至2022年底，因环形线全面提速改造而拆除。我国2022年新投运的1 085.17 km城市轨道交通运营线路中，市域快轨线路占比19.57%，呈上升趋势^[3]。截至2022年底，超过22座城市开通运营市域铁路，其中最高时速达220 km/h^[4]。

为适应市域快轨建设提速的减振需求^[5]，研究梯形轨枕在更高速度条件下的运行状况及振动特性，2022年底全面提速改造的国家铁道试验中心环形线铺设了针对市域快轨设计梯形轨枕无砟轨道试验段共计264 m，试验段两端衔接普通有砟轨道，梯形轨枕无砟轨道与普通有砟轨道之间的过渡段长度为30 m(含在试验段内)^[6]。本文针对梯形轨枕无砟轨道在更高速度下的安全性、稳定性及减振效果是否满足相关规范标准限值要求的问题，对梯形轨枕无砟轨道与普通有砟轨道做了详细的测试方案并进行相关指标的对比分析。

2 试验段线路条件及轨道结构方案要点

2.1 线路条件

梯形轨枕无砟轨道试验段位于环形线国铁大环的西南角(见图1)，大环线的线路及轨道条件如下。

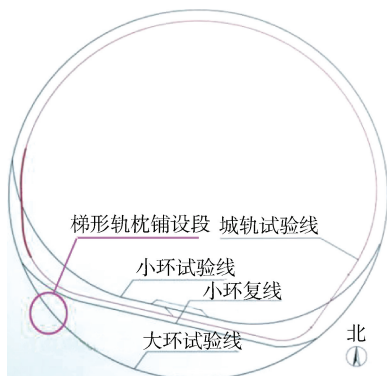


图1 环形线梯形轨枕无砟轨道试验段位置示意

Figure 1 Diagram of ladder-sleeper ballastless track test section on Circular Line

1) 曲线半径1 432.39 m，线路坡度0.3‰。

2) 曲线超高220 mm(包括梯形轨枕轨道在内的大环南段)，理论平衡速度为163.4 km/h，最高试验速度220 km/h时，对应的欠超高达到178.7 mm。为确保测试列车的安全性，整个环形线曲线内轨均设置了防脱护轨。

3) 60 kg/m钢轨，无缝线路，梯形轨枕无砟轨道采用WJ-8A型扣件，扣件间距0.6 m；普通有砟轨道段采用弹条II型扣件及III型预应力轨枕，道砟最小厚度350 mm，曲线外侧砟肩设堆高(见图2)。

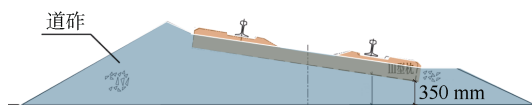


图2 普通有砟轨道断面

Figure 2 Cross of ordinary ballasted track in the section

2.2 市域快轨梯形轨枕及配套无砟轨道结构

根据环形线最高速度220 km/h的要求，梯形轨枕进行了针对性设计。

1) 外形尺寸。梯形轨枕主体结构由左右预应力混凝土纵梁及3根联结钢管组成，铺设长度6 m，实际枕长5.8 m，相邻枕之间设0.2 m枕缝。为适应WJ-8A扣件的安装要求，梯形轨枕单侧纵梁宽设计为680 mm，左右纵梁外侧各设一个沿纵梁方向长400 mm、横向宽200 mm的限位凸台，包括限位凸台在内的梯形轨枕总宽2 600 mm。根据轨道结构高度条件，纵梁厚设为220 mm。市域快轨单块梯形轨枕自重约4.5 t(见图3)。

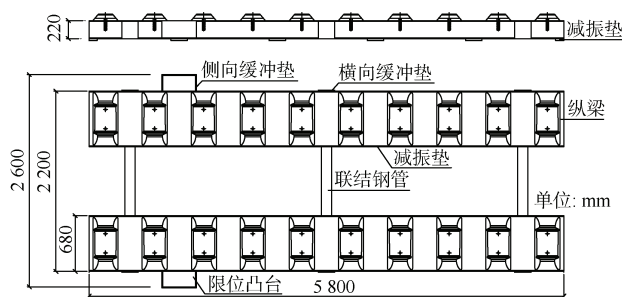


图3 市域快轨梯形轨枕构造

Figure 3 Structure of ladder-sleeper on Circular Line

2) 减振垫刚度。梯形轨枕每侧纵梁下均匀布置6块聚氨酯减振垫，为控制市域快轨钢轨垂向动态位移不大于2.5 mm，中部及两端减振垫刚度分别为18 kN/mm和9 kN/mm。试验段两端与普通有砟轨道之间的过渡段包含5块梯形轨枕，设置了3级过渡刚度。

环形线市域快轨梯形轨枕无砟轨道断面如图4所示。

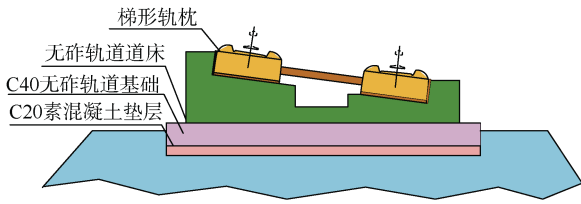


图4 环行线市域快轨梯形轨枕无砟轨道断面
Figure 4 Cross of ladder-sleeper track in the section

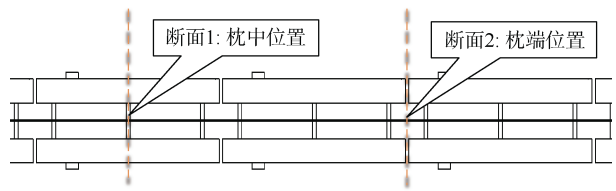


图5 梯形轨枕枕中、枕端断面位置
Figure 5 Cross of ladder-sleeper track in the section

表1 市域快轨梯形轨枕与地铁梯形轨枕的主要对比
Table 1 Comparison of ladder-sleeper track in urban rapid rail transit and subway

系统制式	扣件类型	单侧纵梁宽/mm	纵梁厚/mm	单块枕重/t	减振垫刚度/(kN/mm)	过渡段刚度
地铁	地铁扣件	580	170/185	3.5/3.8	15/7.5	1~2级
市域快轨	WJ-8A扣件	680	220	4.5	18/9	3级

3 测试方案

3.1 试验列车类型、速度级及测试指标

试验列车为8节编组CRH380AJ-2818高速综合检测车,长度为203 m,轴重14 t。试验速度40~220 km/h,速度级差为20 km/h,共10个速度级,为节省篇幅,本文仅给出120~220 km/h的数据。

测试指标包括安全性和稳定性、轨道位移、振动加速度及减振效果等,参考规范及限值见表2。

表2 测试项目、参考规范及限值

Table 2 Test list, evaluation standards, and limit values

测试项目		限值	参考规范
安全性及稳定性	脱轨系数	0.8	GB 5599—2019 TB 10461—2019
	轮重减载率	0.65/0.8	
	轮轴横向力/kN	56.7	
轨道结构位移/mm	垂向位移	有砟 2.5	T/SHJX 0015—2020 T/SHJX045—2022
		无砟 2.0/4.0	
	横向位移	钢轨 2.0	TB 10461—2019
		梯枕 2.0	
钢轨振动加速度/(m/s ²)	垂向	有砟 3 000	TB 10461—2019
	横向	无砟 5 000	
3.5 m路基减振效果/dB	(1~80 Hz) ΔVL_{zmax}	—	GB 10071—88
	(1~200 Hz) ΔVL_{za}	—	CJJ/T 191—2012

3.2 测试断面及测点布置

整个大环线的线路条件均一致,故选取3个典型断面进行对比测试,其中梯形轨枕无砟轨道枕中和枕端位置断面各1个,普通有砟轨道断面1个(见图5~6)。



图6 梯形轨枕无砟轨道与普通有砟轨道现场
Figure 6 Site photos of ladder-sleeper ballastless track and ordinary ballasted track

4 测试结果及分析

4.1 列车运行安全性和稳定性

列车运行安全性及稳定性指标根据测得的轮轨垂、横向力计算而得,测试断面安全性指标最大值如表3所示,梯形轨枕轨道脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力均远小于相关评判标准限值,且与有砟轨道相比基本持平^[3]。

表3 各测试断面安全性指标最大值

Table 3 Maximum safety index value in each section

速度级/(km/h)	脱轨系数				轮重减载率		轮轴横向力/kN	
	外轨		内轨		梯形轨枕	有砟轨道	梯形轨枕	有砟轨道
	梯形轨枕	有砟轨道	梯形轨枕	有砟轨道				
120	0.04	0.03	0.28	0.13	0.03	0.06	-22.24	-10.12
140	0.05	0.05	0.18	0.10	0.16	0.01	-8.37	-5.09
160	0.08	0.12	0.19	0.10	0.22	0.13	-6.43	0.46
180	0.13	0.16	0.17	0.09	0.28	0.25	2.96	5.42
200	0.13	0.18	0.06	0.03	0.32	0.32	9.50	11.27
220	0.20	0.26	0.09	0.10	0.35	0.51	14.99	19.57

本次测试在试验专用轨道进行,因轨道条件限制,曲线欠超高178.7 mm高于设计规范限值,并且设置了防脱护轨,试验顺利完成且各测试指标数值均满足标准限值。实际工程中考虑到风险,应按设计规范限值设置。

4.2 轨道结构位移

各测试断面钢轨位移最大值如表 4 所示, 梯形轨枕无砟轨道内外轨横向位移均不大于 1 mm, 动态轨距扩大量最大值不大于 1 mm, 因梯形轨枕无砟轨道减振需求, 其钢轨垂向位移大于有砟轨道, 其他指标基本

持平, 但均小于相关评判标准限值。

梯形轨枕位移最大值如表 5 所示, 梯形轨枕无砟轨道枕中和枕端位置纵梁垂向位移、横向位移均在规范限值以内。

表 4 各测试断面钢轨位移最大值

Table 4 Maximum rail displacement value in each section

mm

速度级/ (km/h)	垂向位移									横向位移						轨距扩大量		
	外轨			内轨			内外轨平均			外轨			内轨					
	梯枕		有砟 轨道	梯枕		有砟 轨道	梯枕		有砟 轨道	梯枕		有砟 轨道	梯枕		有砟 轨道	梯枕		有砟 轨道
	枕中	枕端		枕中	枕端		枕中	枕端		枕中	枕端		枕中	枕端		枕中	枕端	
120	1.78	1.41	0.41	2.31	2.52	0.64	2.05	1.96	0.53	0.73	0.57	0.38	0.94	0.82	0.61	0.83	0.99	0.41
140	1.92	1.43	0.45	2.22	2.40	0.57	2.07	1.92	0.51	0.67	—	0.32	0.78	—	0.51	0.62	—	0.37
160	1.98	1.61	0.54	2.13	2.34	0.43	2.06	1.98	0.49	0.62	0.56	0.29	0.69	0.57	0.38	0.50	0.68	0.36
180	2.31	1.72	0.63	2.00	2.20	0.35	2.16	1.96	0.49	0.59	0.56	0.42	0.64	0.62	0.25	0.45	0.75	0.36
200	2.44	2.05	0.68	1.93	2.24	0.34	2.19	2.15	0.51	0.56	0.58	0.51	0.67	0.65	0.25	0.47	0.79	0.37
220	2.45	2.06	0.82	1.84	2.24	0.30	2.15	2.15	0.56	0.52	0.61	0.70	0.71	0.67	0.37	0.49	0.84	0.48

注: 表中“/”栏为未采集到有效数据的情况。

表 5 梯形轨枕位移最大值

Table 5 Maximum displacement value in ladder-sleeper

速度级/ (km/h)	垂向位移/mm				横向位移/mm	
	外侧		内侧			
	枕中	枕端	枕中	枕端	枕中	枕端
120	0.80	1.16	1.38	1.06	0.44	0.20
140	0.90	1.19	1.37	1.05	0.41	0.20
160	1.02	1.39	0.99	0.83	0.41	0.23
180	1.19	1.59	0.98	0.76	0.39	0.22
200	1.32	1.67	0.76	0.69	0.38	0.22
220	1.35	1.66	0.71	0.67	0.37	0.22

4.3 钢轨振动加速度

各测试断面钢轨振动加速度最大值如表 6 所示, 数据中的最大值远小于梯形轨枕无砟轨道枕中和枕端位置钢轨垂向加速度、横向加速度最大值参考《客货共线铁路工程动态验收技术规范》(TB 10461—2019)中规定的最大值 5 000 m/s², 且与有砟轨道相比, 互有高低, 总体基本持平。

4.4 距线路中心线 3.5 m 路基表面的减振效果

从图 7 所示的振动加速度频谱特征对比图可知, 梯形轨枕无砟轨道在距线路中心线 3.5 m 处路基表面的垂向加速度级明显小于有砟轨道。

梯形轨枕无砟轨道与有砟轨道减振效果对比如表 7 所示, 市域快轨梯形轨枕无砟轨道相对于有砟

表 6 各测试断面钢轨振动加速度最大值

Table 6 Maximum rail acceleration value in each section

m/s²

速度级/ (km/h)	垂向加速度						横向加速度					
	内轨			外轨			内轨			外轨		
	梯枕		有砟 轨道	梯枕		有砟 轨道	梯枕		有砟 轨道	梯枕		有砟 轨道
	枕中	枕端		枕中	枕端		枕中	枕端		枕中	枕端	
120	67.9	128.2	222.6	103.6	195.9	292.9	236.9	73.5	133.7	200.4	144.5	165.0
140	93.1	154.8	430.5	116.5	214.7	182.5	224.6	77.3	129.8	258.9	248.3	167.8
160	126.2	105.3	466.2	120.4	265.3	270.8	186.6	85.6	138.8	394.8	329.4	140.5
180	213.3	119.0	463.3	140.0	386.6	300.7	268.2	125.9	165.4	363.9	388.5	147.9
200	194.2	159.4	589.5	107.3	225.0	376.0	230.6	246.9	183.3	579.0	612.7	187.1
220	179.6	106.5	786.1	149.6	322.3	270.3	348.9	236.0	213.4	611.0	567.1	147.0

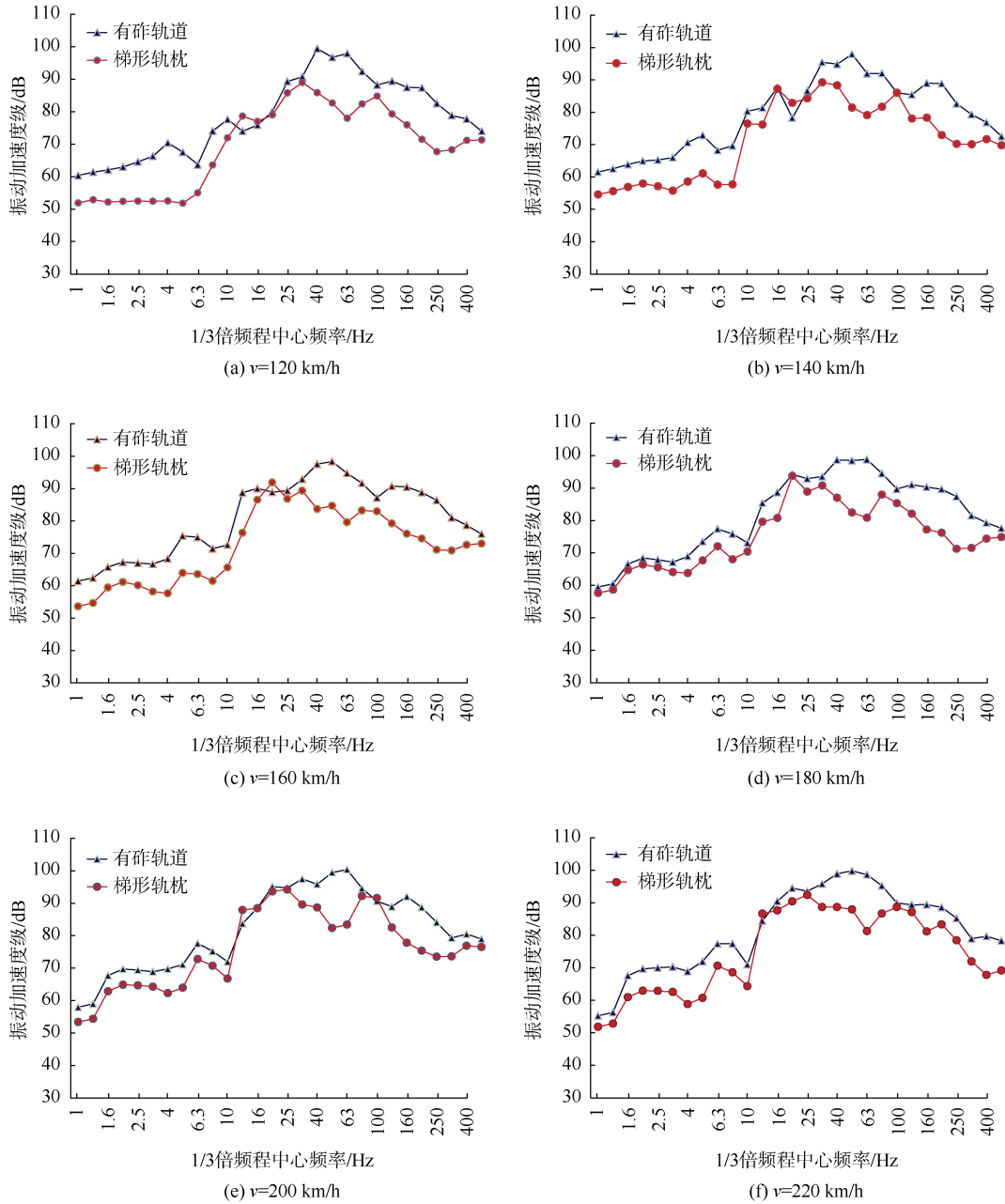


图 7 梯形轨枕无砟轨道和有砟轨道 3.5 m 处路基垂向加速度频谱

Figure 7 Comparison of vertical vibration acceleration of ladder-sleeper track and ballast track at 3.5 m

表 7 梯形轨枕无砟轨道相对比有砟轨道的减振效果

Table 7 Vibration reduction of ladder-sleeper track and ballast track

dB

速度级/ (km/h)	梯形轨枕		有砟轨道		减振效果(插入损失)	
	1 ~ 80 Hz VL_{zmax}	1 ~ 200 Hz VL_{za}	1 ~ 80 Hz VL_{zmax}	1 ~ 200 Hz VL_{za}	1 ~ 80 Hz ΔVL_{zmax}	1 ~ 200 Hz ΔVL_{za}
120	86.7	86.3	90.8	93.1	4.1	6.8
140	87.8	88.0	91.7	93.2	3.9	5.2
160	89.6	90.8	93.5	95.2	3.9	4.4
180	89.3	91.1	94.4	96.3	5.1	5.2
200	91.6	92.9	95.1	98.1	3.5	5.2
220	91.8	92.8	95.1	98.1	3.3	5.3

轨道减振效果, 1~80 Hz 频段 Z 计权振级的最大差值 $\Delta VL_{z_{\max}}$ 为 3.3~5.1 dB; 1~200 Hz 频段 Z 计权振级的均方根的差值 ΔVL_{z_a} 为 4.4~6.8 dB, 平均插入损失(减振效果)分别为 4.0 dB 和 5.4 dB。

5 结论

对国家铁道试验中心环行线最高 220 km/h 条件下, 市域快轨梯形轨枕无砟轨道及普通有砟轨道的安全性、平稳性、钢轨振动特性及减振效果等实测结果进行分析, 得到结论如下。

1) 列车以最高速度 220 km/h 通过梯形轨枕无砟轨道时, 脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力和轮轨垂向力等安全性和稳定性指标远小于相关评判标准限值, 与普通有砟轨道相比持平或略低。

2) 梯形轨枕无砟轨道因减振特性而引起的钢轨垂向位移相对于有砟轨道增加较多; 测得梯形轨枕的内轨低速条件、外轨高速条件下的垂向位移因曲线未平衡超高过大而相对较大, 最大值达到 2.24~2.45 mm, 但内外轨垂向位移平均最大值为 2.19 mm, 仍满足相关标准限值。

3) 市域快轨梯形轨枕无砟轨道的钢轨横向位移中, 内外轨横向位移均小于 1 mm, 动态轨距扩大大量最大值 0.99 mm, 虽然相对于有砟轨道动态轨距扩大大量最大值 0.48 mm 增加了一倍, 但绝对值仍处在较低水平。

4) 市域快轨梯形轨枕中和枕端钢轨垂向加速度值远小于限值 5 000 m/s², 与普通有砟轨道相比, 互有高低, 总体基本持平, 表明梯形轨枕无砟轨道的钢轨振动抑制能力良好。

5) 在距离线路中心线 3.5 m 处的路基位置, 市域快轨梯形轨枕无砟轨道相对于有砟轨道减振效果, 1~80 Hz 频段 Z 计权 $\Delta VL_{z_{\max}}$ 为 3.3~5.1 dB; 1~200 Hz 计权 ΔVL_{z_a} 为 4.4~6.8 dB, 考虑到普通有砟轨道相对于普通无砟轨道已具有 5 dB 或以上的减振效果^[9], 可认为按市域快轨相关技术标准设计的梯形轨枕无砟轨道相对于普通无砟轨道的减振效果可望达到 10 dB 左右, 这也与相关研究^[10-12]的结论相吻合。

本次国家铁道试验中心环行线的测试成果, 可为市域快轨及城际铁路新线设计时的轨道减振技术应用提供借鉴与参考, 也有待未来实际应用线路更多的验证。

参考文献

[1] 木东升, 尹华拓, 黄国庆. 市域快线停车场轨道减振降噪方案设计[J]. 铁道勘察, 2022, 48(2): 82-86.
MU Dongsheng, YIN Huatuo, HUANG Guoqing. Design of track vibration and noise reduction scheme for suburban express line depot[J]. Railway investigation and surveying,

2022, 48(2): 82-86.
[2] 中国铁道科学研究院集团有限公司城市轨道交通中心. 时速 176 公里无砟道床梯形轨枕轨道动力学性能测试报告[R]. 北京, 2021.
[3] 侯秀芳, 冯晨, 左超, 等. 2022 年中国内地城市轨道交通线路概况[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 9-13.
HOU Xiufang, FENG Chen, ZUO Chao, et al. Statistical analysis of urban rail transit in Chinese mainland in 2022[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 9-13.
[4] 韩宝明, 习喆, 孙亚洁, 等. 2022 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 1-8.
HAN Baoming, XI Zhe, SUN Yajie, et al. Statistical analysis of urban rail transit operation in the world in 2022: a review[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 1-8.
[5] 秦永平. 我国市郊铁路规划和建设中的主要问题与建议[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(3): 6-13.
QIN Yongping. Main problems and proposals for suburban railway planning and construction in some Chinese cities[J]. Journal of railway engineering society, 2014, 31(3): 6-13.
[6] 樊卿, 江万红, 蔡成标. 地铁列车高速行驶时梯形轨枕轨道动力性能分析[J]. 铁道建筑, 2021, 61(1): 114-118.
FAN Qing, JIANG Wanhong, CAI Chengbiao. Dynamic performance analysis of trapezoidal sleeper track of metro train running with high speed[J]. Railway engineering, 2021, 61(1): 114-118.
[7] 丁德云, 马蒙, 王文斌, 等. 市域快轨钢弹簧浮置板轨道行车安全试验[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(3): 33-38.
DING Deyun, MA Meng, WANG Wenbin, et al. Experimental study of train running safety on steel spring floating slab track used in inner-city rapid rail transit[J]. Journal of railway engineering society, 2023, 40(3): 33-38.
[8] 铁科检测有限公司. 国家铁道试验中心环行线 220 km/h 梯形轨枕无砟轨道安全性、稳定性及减振效果检测报告[R]. 北京, 2023.
[9] 孙家麒. 城市轨道交通振动和噪声控制简明手册[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 64-70.
SUN Jiaqi. Concise handbook on vibration and noise control of urban rail transit[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2002: 64-70.
[10] 中铁上海设计院集团有限公司等. 设计速度 160 km/h 市域铁路减振轨道结构形式专题研究报告[R]. 上海, 2019, 04: 126.
[11] 曾向荣, 高志升, 徐飞虎, 等. 160 km/h 梯形轨枕轨道安全性、平稳性及轮轨振动特性在线实测[J]. 都市快轨交通, 2018, 31(3): 93-98.
ZENG Xiangrong, GAO Zhisheng, XU Feihu, et al. Field testing of safety, stability and wheel-rail vibration characteristics of the ladder-sleeper track at the speed of 160 km/h[J]. Urban rapid rail transit, 2018, 31(3): 93-98.
[12] 刘力, 张胜龙, 王文斌, 等. 时速 80 km/h 地铁地下线梯形轨枕轨道现场测试分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4878-4883.
LIU Li, ZHANG Shenglong, WANG Wenbin, et al. Test and analysis of ladder sleeper ballast in subway with speed of 80 km/h metro[J]. Science technology and engineering, 2020, 20(12): 4878-4883.

(编辑: 傅依萱)