

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.04.009

基于振源控制的上盖开发车辆段 轨道无缝化关键技术研究

张东风¹, 莫修栋², 邵 壮¹, 叶 军¹

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江宁波 315101)

摘要: 针对目前车辆段上盖开发中减振降噪的迫切需求, 归纳车辆段轨道振动噪声的既有控制措施, 提出车辆段车场线钢轨无缝化的必要性, 研究无缝化对于轨枕的需求。经检算, 车辆段在采用臂展式阻力枕并配合其余加强措施的情况下, 能够满足无缝线路的强度和稳定性要求。进一步地, 提出7号可动心轨辙叉无缝道岔技术, 并结合北京地区实际使用条件进行道岔无缝化检算, 得出该道岔及道岔群具备无缝化的条件。在车速为15 km/h的条件下, 进行对比测试, 发现可动心轨辙叉道岔相比于固定型辙叉道岔具有3~5 dB的减振降噪效果。

关键词: 城市轨道交通; 振源控制; 车辆段上盖开发; 可动心; 无缝化; 减振降噪

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)04-0060-05

Key Technologies for Seamless Track Development in Depots Based on Upper Cover Vibration Source Control

ZHANG Dongfeng¹, MO Xiudong², SHAO Zhuang¹, YE Jun¹

(1. China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055;

2. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315101)

Abstract: To address the urgent need for vibration and noise reduction in the development of upper covers, this paper summarizes existing control measures for tracking vibration and noise in depots, emphasizing the necessity of implementing seamless rails in depot lines. We also examine the requirements for sleepers. Our calculations indicate that depots can meet the strength and stability requirements for seamless lines by using arm span resistance pillows in conjunction with other strengthening measures. Additionally, this paper introduces a seamless turnout technology for No.7 movable turnouts and verifies their seamless integration based on actual usage conditions in Beijing. The findings suggest that both the turnouts and the turnout groups are suitable for seamless application. A comparative test conducted at a speed of 15 km/h reveals that the movable turnout reduces vibration and noise by 3–5 dB compared to fixed turnouts.

Keywords: urban rail transit; vibration source control; depot upper-cover development; movable turnouts; seamlessness; vibration noise reduction

城市化进程的加快引起了一系列人口、资源与环境的问题, 而随着城市轨道交通的有序建设, 地铁车

辆段占地面积大的不利条件又与城市紧张的土地资源相矛盾。因此, 开发地铁车辆段上盖物业, 能实现城

收稿日期: 2023-12-24 修回日期: 2024-03-18

第一作者: 张东风, 男, 硕士, 正高级工程师, 从事轨道工程相关研究, zdf8518@163.com

基金项目: 中国城市轨道交通协会科研专项(CAMET-KY-2022092)

引用格式: 张东风, 莫修栋, 邵壮, 等. 基于振源控制的上盖开发车辆段轨道无缝化关键技术研究[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(4): 60–64.

ZHANG Dongfeng, MO Xiudong, SHAO Zhuang, et al. Key technologies for seamless track development in depots based on upper cover vibration source control[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(4): 60–64.

市轨道交通与商业、办公、住宅的有机融合，已成为当前解决上述问题的途径之一^[1]。

车辆段上盖开发虽然解决一部分土地紧张问题，但上述“有机融合”也带来了振动和噪声的问题^[2-3]。盖下车辆运行产生振动和噪声难免影响盖上人们的起居，更严重地，车辆段线路存在大量钢轨接头，咽喉区存在大量固定型辙叉，轮轨冲击产生的振动噪声会加剧这种影响。因此，在车辆段上盖开发中，将振动噪声对盖上居民的影响降到最低，成为了重要的课题。此外，盖下的减振效果^[4]不到位，预测引发盖上振动噪声不达标，即不满足环评要求，也会制约车辆段上盖开发的正常进程。本文从轨道振动噪声控制措施入手，基于振源控制的理念，研究车辆段钢轨无缝化、7号可动心轨辙叉道岔及岔区无缝化技术。

1 车辆段轨道振动噪声既有控制措施及问题

1.1 车辆段库外线轨道振动噪声控制措施

1) 隔离式减振垫。碎石道床^[5]弹性较大，列车通过时振动水平较低，但可应用于碎石道床的减振形式不多。根据已建成或在建的车辆段，库外线减振措施主要采用隔离式减振垫，有效降低列车传递至基础的振动。

2) 减振接头夹板。车辆段库外线钢轨接头位置的轮轨冲击较大，是主要振动噪声来源。减振接头夹板安装在钢轨接头外侧，车轮经过时夹板顶面与钢轨顶面同时接触车轮，车轮平顺过渡以达到减振效果。

3) 阻尼钢轨。阻尼钢轨表面粘贴阻尼材料，阻尼结构由联结板和约束板及两者之间的阻尼层组成，联结板表面形状同钢轨表面形状一致，粘贴于钢轨非工作面。

1.2 车辆段库内线轨道振动噪声控制措施

1) 库内钢轨焊接或冻结。库内线轨道一般为直线，线路条件较好，其减振措施一般采用焊接或冻结方式连接为无缝线路，消除钢轨接头，提高轨道连续性及平顺性，消除接头处轮轨冲击振动。

2) 提升轨下弹性。与库外线碎石道床相比，库内线整体道床的弹性较差，通常车辆段库内采用刚度较低的弹性垫板以提升轨下弹性，进而达到降低轨道振

动的效果。

1.3 既有控制措施存在的问题

库外线控制措施中，隔离式减振垫、减振接头夹板、阻尼钢轨等并未从源头上实现，而库外线轨道的振动噪声主要来源于钢轨接头和固定型辙叉。库内线控制措施中，线路焊接或冻结实现了库内钢轨无缝化，另外，通过提升轨下弹性来实现减振，往往是较普遍的方法。

综上所述，既有控制措施存在以下问题：车辆段库外线路未实现钢轨无缝化，未能实现线路振动源头的减振降噪；固定型辙叉咽喉处的冲击振动无法消除，未能实现道岔区振动源头的减振降噪。

2 车辆段钢轨无缝化研究

2.1 车辆段钢轨无缝化的必要性及难点

1) 车辆段钢轨无缝化的必要性。车辆段车场线内钢轨接头多，在钢轨接头位置，轮轨冲击较大。在国铁，无缝线路具有成熟的设计及运营经验^[6]，目前也广泛用于城市轨道交通正线工程。根据相关研究，在行车速度为40~60 km/h时，焊接长钢轨比普通有缝钢轨可降低轮轨噪声约3~6 dB^[7]。车场线采用有缝线路对于上盖开发的减振降噪是极为不利的，为满足车辆段上盖开发轨道减振降噪需求，有必要开展车辆段应用无缝线路的可行性研究。

2) 车辆段钢轨无缝化的难点。车辆段内部线路股道多，而占地面积有限，往往存在诸多小半径曲线。根据钢轨无缝化的设计理念，小半径曲线对于长钢轨的稳定性极为不利，且由于碎石道床的阻力相对不稳定，钢轨无缝化也较困难。

2.2 无缝化关键之臂展式阻力枕

车辆段钢轨无缝化的首要问题在于长钢轨的稳定性，在轨温变化时不应出现胀轨跑道^[8]。车辆段车场线内最小曲线半径达到150 m，对于无缝线路的稳定性极为不利。因此，提高道床横向阻力对于车辆段钢轨无缝化具有重要作用。

车辆段采用臂展式阻力枕，是车辆段钢轨无缝化的关键措施。臂展式阻力枕着重增强道床横向阻力以提高轨道整体稳定性，轨枕两端局部增大断面尺寸形成“臂展”，以增大纵横向阻力，如图1所示。

根据文献[9]的仿真和试验结果，臂展式阻力枕相对于IIIc型轨枕，能够提高道床横向阻力约23%。



图1 臂展式阻力枕

Figure 1 Arm-spread-type resistance pillows

2.3 小半径曲线地段无缝化方案及检算

在小半径曲线地段进行钢轨无缝化处理, 铺设臂展式阻力枕, 旨在增强小半径曲线地段轨枕与道床之间的联系。本文对II型混凝土枕、III型混凝土枕和臂展式阻力枕3种设计方案进行对比分析, 对轨道强度及稳定性进行检算, 检算工况如表1所示。

表1 钢轨强度及稳定性检算工况

Table 1 Rail strength and stability check conditions

方案	II型 混凝土枕	III型 混凝土枕	臂展式 阻力枕
车型	A型车(轴重16t)		
钢轨类型/(kg/m)	50		
锁定轨温/℃	28±5		
速度/(km/h)	30		
曲线半径/m	150		
轨枕根数/(根/km)	1 440	1 667	1 667
线路纵向阻力/(kN/m)	7.1	15	16.3
等效道床横向阻力/(kN/m)	6.9	11.5	14.1

在轨道稳定性检算中, 根据《铁路无缝线路设计规范》(TB 10015—2012), 有砟轨道允许升温采用“统一无缝线路稳定性计算公式”, 轨道强度及稳定性检算结果如表2所示。

表2 钢轨强度及稳定性检算结果

Table 2 Rail strength and stability check results

方案	II型 混凝土枕	III型 混凝土枕	臂展式 阻力枕
钢轨应力/MPa	261.5	254.1	254.1
钢轨容许应力/MPa	351.5		
钢轨强度检算	通过	通过	通过
等效道床横向阻力/(N/cm)	69	115	141
钢轨允许温度压力/kN	854.4	961.2	1 170
钢轨允许升温/℃	17.9	29.5	40.9
最高轨温/℃	61.9		
最大升温值/℃	38.9		
钢轨稳定性检算	不通过	不通过	通过

经检算, 采用II型枕和III型枕均无法满足无缝线路轨道稳定性的要求, 采用臂展式阻力枕则能够满足无缝线路轨道强度和稳定性的要求。另外, 车辆段盖下轨道没有太阳直射, 钢轨最高轨温普遍低于北京市最高轨温, 因而采用该方案进行无缝化检算的安全系数更高。

2.4 无缝化的其余加强措施

在曲线上, 无缝线路除受温度力作用之外, 还会受到列车横向作用力而发生轨距扩张, 因而在车辆段无缝化的同时, 应同时考虑采取轨道结构加强措施。

1) 安装曲线钢轨固结装置。在小半径曲线段, 安装曲线钢轨固结装置(地锚拉杆等), 可加强轨道框架刚度, 对于车辆段钢轨无缝化中加强轨道稳定性具有积极意义。

2) 增加道床肩宽和堆高。有砟轨道地段道床肩宽一般取200mm, 在小半径曲线地段, 曲线外侧道床肩宽加宽100mm, 无堆高。道床肩宽及堆高对于提高道床横向阻力起重要作用, 因此, 车辆段车场线可在小半径曲线外股将道床肩宽提高至≥400mm, 并设置150mm砟肩堆高, 以提高道床横向阻力, 增强轨道抗失稳能力。

3) 应用挡砟缘石。在曲线地段, 轨道在列车轮的导向力作用下, 有向曲线外侧横移的趋势, 若道床松散, 轨道横移出现塑性变形, 并随着列车运行产生横向累积变形。在小半径曲线道床坡角设置挡砟缘石, 提高道床横向稳定性, 降低道床累积变形, 有利于小半径曲线地段无缝线路状态维持。

3 车辆段7号可动心轨辙叉无缝道岔技术

3.1 应用必要性和难点

1) 应用必要性。固定型辙叉咽喉轨线不连续, 车轮垂向冲击辙叉心轨或翼轨, 形成了显著的振动噪声, 此外, 道岔区轨缝也是产生振动噪声的主要源头。目前, 车辆段主要采用50kg/m钢轨、7号固定型辙叉道岔。根据相关调查, 平均每个地铁车辆段包含40组单开道岔, 每组单开道岔存在10~12个轨缝。车辆段采用有缝的固定型辙叉道岔会产生剧烈且密集的振动噪声, 而采用可动心轨辙叉同时进行道岔无缝化处理则完全避免了该问题, 因此, 车辆段应用7号可动心轨辙叉无缝道岔有极大的必要性。

2) 应用难点。7号可动心轨辙叉无缝道岔在车辆段应用的主要的难点在于道岔无缝化。由于车辆段碎石道床的稳定性较差,岔区长钢轨的稳定性等指标需检算。道岔无缝化需要检算钢轨强度、钢轨稳定性、尖轨位移、间隔铁螺栓强度和断缝值指标,同时还应考虑道岔群内部无缝道岔之间的影响。

3.2 无缝化方案及检算

采用有限元法建立了单开道岔模型及道岔顺接、对接的模型,见图2,并对7号可动心轨辙叉^[10]道岔的无缝化方案进行检算。

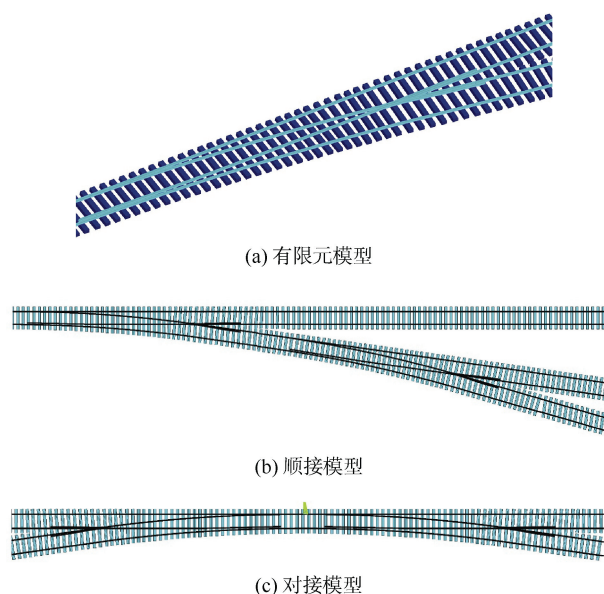


图2 单开道岔检算模型
Figure 2 Turnout check model

根据《铁路无缝线路设计规范》,北京市最高、最低轨温分别为61.9℃、-27.4℃。结合北京既有车辆段工程实践,设计锁定轨温取28±5℃。

道岔轨温最大温升值为38.9℃,最大温降值为60.4℃,经计算,各指标及限值如表3所示。

表3 7号道岔及道岔群无缝化检算结果
Table 3 Seamless test results of No. 7 turnout and turnouts group

检算工况	钢轨强度/MPa	尖轨相对位移/mm	螺栓强度/MPa	钢轨最大温度力/kN	钢轨断缝值/mm
单开道岔	342.9	11.07	151	884	36.4
单开道岔对接	336.9	12.97	186	884	36.4
单开道岔顺接	345.5	11.63	165	884	36.4
限值	351.5	20.00	415	1 049	70.0

经检算,在设计锁定轨温28±5℃的条件下,7号可动心轨辙叉道岔及道岔群具备车辆段无缝线路应用条件。

3.3 减振降噪效果测试

在车辆以10 km/h的速度通过7号固定型辙叉道岔和7号可动心轨辙叉道岔时,实测两种道岔的轨枕振动加速度、轨旁噪声以及距离轨面7.5 m处的环境噪声数据如图3所示。

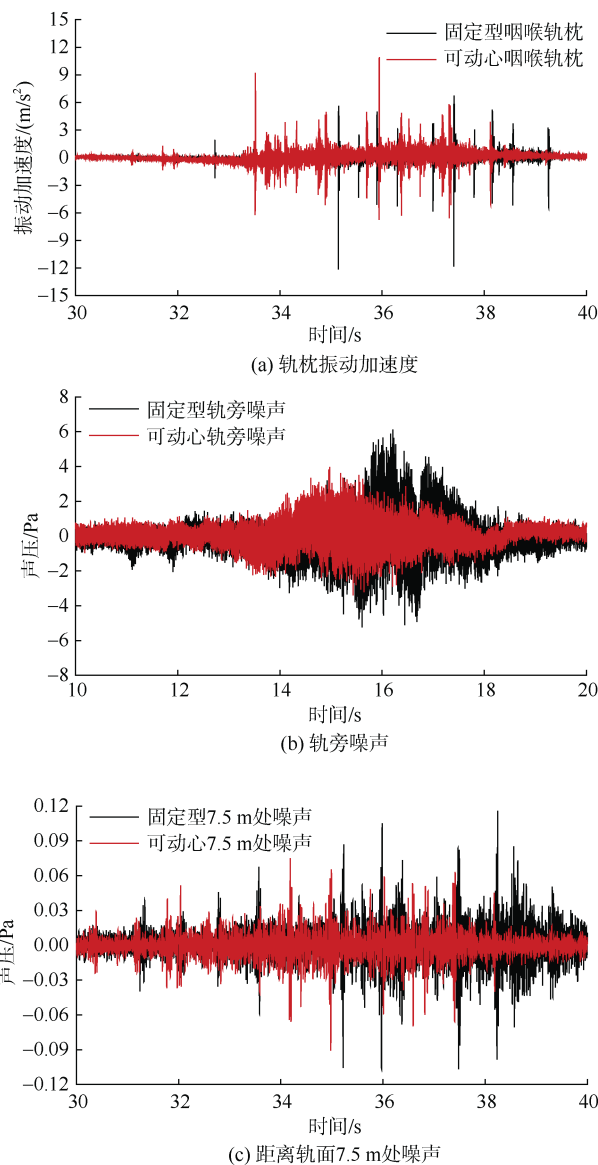


图3 实测7号固定型和可动心道岔振动噪声对比
Figure 3 Measured vibration and noise of No.7 fixed type and movable turnout

在车辆以10 km/h和15 km/h速度通过时,固定型道岔和可动心轨辙叉道岔在辙叉咽喉处的振动对比如表4所示。

表4 固定型和可动心道岔在辙叉咽喉处的振动对比

Table 4 Comparison of the vibration of a fixed and movable turnout at the throat of the fork

车速	道岔类型	最大振级/dB	等效 A 声压级/dB(A)	
		咽喉轨枕	轨旁	轨面 7.5 m
10 km/h	固定型	97.85	88.48	84.67
	可动心	94.82	84.43	79.61
	差值	-3.03	-4.05	-5.06
15 km/h	固定型	98.82	83.73	82.76
	可动心	95.08	79.62	77.73
	差值	-3.74	-4.11	-5.13

在行车速度为 10 km/h 的条件下, 7 号可动心轨辙叉道岔的辙叉咽喉处的轨枕振动降低 3.03 dB, 轨旁噪声降低 4.05 dB, 距离轨面 7.5 m 处的环境噪声降低 5.06 dB。在行车速度为 15 km/h 的条件下, 7 号可动心轨辙叉道岔的辙叉咽喉处的轨枕振动降低 3.74 dB, 轨旁噪声降低 4.11 dB, 距离轨面 7.5 m 处的环境噪声降低 5.13 dB。

根据测试结果可知, 7 号可动心轨辙叉道岔相比于 7 号固定型辙叉道岔, 具备显著的减振降噪效果, 当行车速度提高时, 减振降噪效果更明显。

4 结论

本文提出了车辆段既有减振降噪措施未从振动源头考虑, 研究了钢轨无缝化及 7 号可动心轨辙叉无缝道岔技术, 主要结论如下。

1) 既有车辆段减振降噪措施虽然具备一定的减振降噪能力, 但没有从振动源头考虑, 往往达不到理想的效果。

2) 车场线无缝化对于减振降噪具有重要意义, 是实现基于振源控制减振的重要措施, 需采用臂展式阻力枕及其他加强措施来保障无缝线路稳定性。

3) 7 号可动心轨辙叉道岔实现了车辆段小号码道岔轨线连续, 以北京地区为算例, 该道岔及道岔群具备无缝化条件; 在无缝化方案应用于其他城市时, 应按当地实际气候条件及应用场所进一步检算。

4) 根据现场测试, 在车速为 15 km/h 时, 7 号可动心轨辙叉道岔减振降噪效果达 3~5 dB。

参考文献

[1] 周康, 宋瑞, 彭斌. 城市轨道交通用地综合开发现状及对策[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(2): 20-24.
ZHOU Kang, SONG Rui, PENG Xiao. Current situation and countermeasures of comprehensive land development for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2020, 33(2): 20-24.

[2] 余才高, 杨秀仁, 张伯林, 等. 城市轨道交通地下线振动噪声整治技术研究与应用[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(5): 96-103.
SHE Caigao, YANG Xiuren, ZHANG Bolin, et al. Research and application of vibration and noise treatment technology for underground lines in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(5): 96-103.

[3] 韦明, 朱斌, 罗建海, 等. 提高地铁车辆基地上盖物业开发土地利用效率的规划设计[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(5): 49-55.
WEI Ming, ZHU Bin, LUO Jianhai, et al. Planning and design theory for improving land-use efficiency of property development above Shenzhen metro depot[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(5): 49-55.

[4] 芦睿泉. 青岛地铁轨道减振措施应用研究及展望[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(5): 84-89.
LU Ruiquan. Research and prospects of track vibration reduction measures in the Qingdao subway[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(5): 84-89.

[5] 陈鹏, 谢家乐, 井国庆. 城市轨道交通有砟轨道的应用及养护维修探讨[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(4): 146-153.
CHEN Peng, XIE Jiale, JING Guoqing. Applying and maintaining ballast track for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(4): 146-153.

[6] 潘自立, 王树国, 谢毅, 等. 高原大日温差环境下跨区间无缝线路研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(2): 12-17.
PAN Zili, WANG Shuguo, XIE Yi, et al. Research on the trans-section CWR in the large daily temperature difference environment of the plateau[J]. Journal of railway engineering society, 2023, 40(2): 12-17.

[7] 刘静茹, 马筠, 张海波. 轮轨运行状态对轮轨噪声及振动的影响分析[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2010, 37(3): 168-171.
LIU Jingru, MA Yun, ZHANG Haibo. Analysis of the influence of wheel-rail running state on wheel-rail noise and vibration[J]. Railway occupational safety health & environmental protection, 2010, 37(3): 168-171.

[8] 王欢, 徐田坤, 谷爱军, 等. 基于无缝线路失稳分析的地铁轨温预警限值[J]. 都市轨道交通, 2015, 28(6): 71-75.
WANG Huan, XU Tiankun, GU Aijun, et al. Research of alarming rail temperature threshold of metro based on CWR track stability[J]. Urban rapid rail transit, 2015, 28(6): 71-75.

[9] 邵壮, 孙井林, 陈学振, 等. 新型臂展式轨枕和 III c 型轨枕横向阻力试验和仿真研究[J]. 铁道勘察, 2022, 48(5): 100-103.
SHAO Zhuang, SUN Jinglin, CHEN Xuezhen, et al. Experimental and simulation study on the ballast bed lateral resistance of new arm-spread-type sleeper and standard III c sleeper[J]. Railway investigation and surveying, 2022, 48(5): 100-103.

[10] 田春雨, 赵天运. 地铁 7 号可动心轨道岔动力学仿真研究[J]. 铁道勘察, 2022, 48(2): 114-119.
TIAN Chunyu, ZHAO Tianyun. Dynamic simulation of metro No.7 turnout with movable-point frog[J]. Railway investigation and surveying, 2022, 48(2): 114-119.

(编辑: 傅依萱)