doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.04.011

# 地铁短轨枕整体道床振动噪声问题分析及治理

刘道通，谭大正，韩朝霞，刘　鑫
（中国铁路设计集团有限公司，天津 300251）

**摘　要：**针对某地铁运营线路地下线短轨枕整体道床沿线振动噪声扰民投诉问题，对地铁和敏感点进行现场调研及振动噪声测试，分析振动噪声问题产生的原因，并针对性地采取更换减振扣件、调整轨底坡和打磨钢轨的治理措施。通过建立车轨耦合解析模型和隧道-地层-建筑物有限元模型对浮轨扣件刚度设计和减振效果进行预测。改造完成后进行振动噪声测试和入户回访，测试结果显示，改造后敏感点室内振动 $VL_{Zmax}$ 昼间降低 6.4 dB，夜间降低 8.3 dB，二次结构噪声等效 A 声压级昼间降低 1.36 dB(A)，夜间降低 1.88 dB(A)，居民反映振动噪声问题明显改善，有效解决了振动噪声投诉问题。研究结果可为国内类似地铁振动噪声扰民投诉问题的解决提供借鉴和参考。

**关键词：**城市轨道交通；运营线路；地下线；短轨枕整体道床；振动噪声治理
**中图分类号：**U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)04-0085-07

# Vibration and Noise Control of Short-Sleeper Monolithic Trackbed in Metro Systems: Analysis and Mitigation

**LIU Daotong, TAN Dazheng, HAN Zhaoxia, LIU Xin**
(China Railway Design Corporation, Tianjin 300251)

**Abstract:** This study addresses public complaints regarding vibration and noise disturbances along an operational metro line with short-sleeper monolithic trackbed. Field investigations and measurements were conducted at both the metro track and sensitive receptor locations to analyze the root causes of these disturbances. Multiple mitigation measures were implemented, including the replacement of vibration-damping fasteners, rail profile adjustment, and rail grinding. The performance of floating rail fasteners was evaluated through vehicle-track coupling analysis and finite element modeling of the tunnel-soil-building system. Post-modification measurements and resident surveys were performed to assess the effectiveness of the implemented solutions. Results showed reductions in indoor vibration levels ($VL_{Zmax}$) of 6.4 dB during daytime and 8.3 dB during nighttime operations, while the equivalent sound pressure levels of structure-borne noise decreased by 1.36 dB(A) and 1.88 dB(A) for daytime and nighttime periods, respectively. Resident feedback confirmed significant improvements in the vibration and noise environment. This case study provides valuable insights for addressing similar vibration and noise issues in Chinese metro systems.
**Keywords:** urban rail transit; operational line; underground line; short-sleeper monolithic trackbed; vibration and noise control

随着城市轨道交通运营线路的逐渐增多、网络化运营阶段的到来，以及人们生活质量的提高，对城市轨道交通振动噪声问题的关注度逐渐增大，城市轨道交通振动噪声投诉问题也日益增多。如何解决既有城

收稿日期：2024-12-04　修回日期：2025-03-11
第一作者：刘道通，男，学士，高级工程师，从事轨道交通轨道及减振降噪设计工作，liudaotong@crdc.com
基金项目：天津市科技计划资助项目(22JCQNJC017710)；中国铁路设计集团有限公司课题(2024 课专–城交–03)
引用格式：刘道通，谭大正，韩朝霞，等. 地铁短轨枕整体道床振动噪声问题分析及治理[J]. 都市快轨交通，2025，38(4)：85–91.
LIU Daotong, TAN Dazheng, HAN Zhaoxia, et al. Vibration and noise control of short–sleeper monolithic trackbed in metro systems: analysis and mitigation[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(4): 85–91.

市轨道交通线路运营引起的振动噪声问题，成为运营面临的主要疑难问题之一。针对既有线振动噪声投诉问题，国内众多学者和单位开展了振动噪声现状测试、投诉分析和车辆、轨道治理措施研究[1-5]。

本文立足既有线改造设计、施工、运营特点，追根溯源。针对早期开通运营的城市轨道交通，特别是2010 年及以前开通运营的地铁线路减振降噪设计不足的问题；同时短轨枕整体道床施工质量差导致的轨底坡超限、轨道几何形位不良，进而加剧轮轨振动噪声[6-7]，以天津地铁某地下线短轨枕整体道床沿线某敏感点振动噪声扰民投诉问题为契机，进行工程分析、振动噪声测试、投诉原因分析和振动噪声治理，解决了沿线振动噪声投诉问题，可为此类既有线振动噪声扰民问题提供借鉴和参考。

## 1 投诉情况调研

本次投诉的敏感点位于天津地铁某线沿线，投诉敏感点为地面沿街 2 层无桩基础医院楼和 4 层无桩基础住宅楼。投诉居民反映地铁列车通过时，室内能明显听到“轰轰声”，影响了居民正常生活和医院环境。

地铁运营公司多次组织相关人员对该敏感点进行入户调研和测试，并组织工务部门加强轨道维护保养。在轨道几何形位满足工务养护维修规范[8]要求下，工务部门开展了钢轨打磨、更换钢轨后，短时间内该区段仍存在振动噪声投诉情况。

敏感点与线路位置关系如图 1 所示，现场情况如图 2 所示。投诉敏感点 1、2 所处地铁工程条件：该区段线路平面为曲线半径 350 m 的圆曲线，线路埋深为 21～23 m；区间结构采用单洞单线盾构，列车运行速度约 70 km/h。轨道采用 DTⅥ2 型扣件短轨枕式整体道床，铺设无缝线路，未采取减振降噪措施。经与运营部门了解运营期间该区段未发生异常波磨。敏感点 1 距离线路最近为 0 m，敏感点 2 距离线路最近约 6.2 m。

## 2 振动噪声测试及分析

根据《城市区域环境振动测量方法》(GB 10071—88)[9]和《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》(JGJ/T 170—2009)[10]，对该区段分别进行隧道内振动测试和敏感点室内振动及二次结构噪声测试。根据振动噪声影响区域分类标准[11]，敏感点 1 和 2 分属“交通干线两侧”，室内振动限值昼间 75 dB、夜间 72 dB；室内二次结构噪声限值为昼间 45 dB(A)、夜间 42 dB(A)。

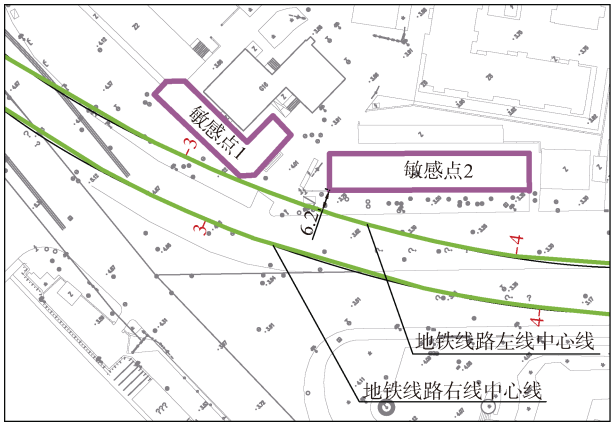



图 1 敏感点与线路位置关系

Figure 1 Spatial distribution of monitoring points relative to track alignment



图 2 改造前轨道现场情况

Figure 2 Track conditions prior to modification

隧道内振动测试：选取靠近敏感点一侧(左线)进行全天钢轨、道床和隧道壁振动加速度测试。

敏感点室内测试：分别对敏感点 1 和 2 开展昼间和夜间的室内振动测试及二次结构噪声测试。

振动测试现场如图 3 所示。

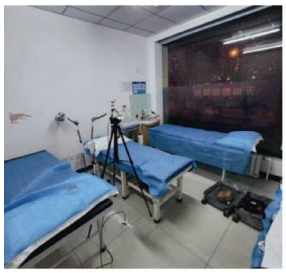
改造前隧道内振动测试结果显示：隧道壁 $VL_{Zmax}$ 为 82.08 dB，道床 $VL_{Zmax}$ 为 89.70 dB，钢轨 $VL_{Zmax}$ 为 124.78 dB。

改造前敏感点室内测试结果显示：分别对左右线过车时的敏感点室内振动噪声数据进行分析，得出敏感点 1 和敏感点 2 室内最大 Z 振级 $VL_{Zmax}$ 和二次结构噪声等效 A 声压级如表 1 所示。

测试数据显示，敏感点 1 在左右线过车时室内振动在昼间和夜间均超标，左线过车时二次结构噪声夜间超标；敏感点 2 在左线过车时室内振动在昼间和夜间超标，右线过车时室内振动不超标，二次结构噪声不超标。



(a) 隧道内振动测试



(b) 敏感点1室内测试



(c) 敏感点2室内测试

图 3　振动测试情况

Figure 3　The situation of the vibration test

**表 1　改造前敏感点测试数据**

**Table 1　Measurement data at monitoring points before track modification**

| 项目 | | 昼间 | | 夜间 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 二次结构噪声/dB(A) | 室内振动 $VL_{Zmax}$/dB | 二次结构噪声/dB(A) | 室内振动 $VL_{Zmax}$/dB |
| 标准值 | | 45 | 75 | 42 | 72 |
| 敏感点 1 | 左线过车 | 42.61 | 78.48 | 43.56 | 79.49 |
| | 右线过车 | 40.40 | 72.61 | 40.25 | 73.19 |
| | 左右线均值 | 41.51 | 75.55 | 42.24 | 76.97 |
| 敏感点 2 | 左线过车 | 42.20 | 77.72 | 39.96 | 76.85 |
| | 右线过车 | 41.62 | 67.65 | 35.34 | 69.73 |
| | 左右线均值 | 41.85 | 73.70 | 37.98 | 73.80 |

改造前隧道壁和敏感点 1 室内分频振动加速度曲线如图 4 所示，可以看出室内振动在 40 Hz 振动达到峰值，隧道壁也在 40 Hz 振动存在峰值，因此，若降低室内振动响应，需重点研究降低 40 Hz 左右的轮轨振动。

## 3　投诉原因及治理措施分析

### 3.1　投诉原因分析

1) 根据隧道内及敏感点室内振动噪声测试结果可以看出，隧道内及室内振动值均较大且室内振动超出规范允许值。工程条件显示，敏感点距离地铁线路较近，且未采取减振降噪措施。分析项目建设及运营过程，主要由于线路建设较早、环评预测和减振设计较保守，导致敏感点所处线路轨道减振措施不足，导致振动噪声扰民。

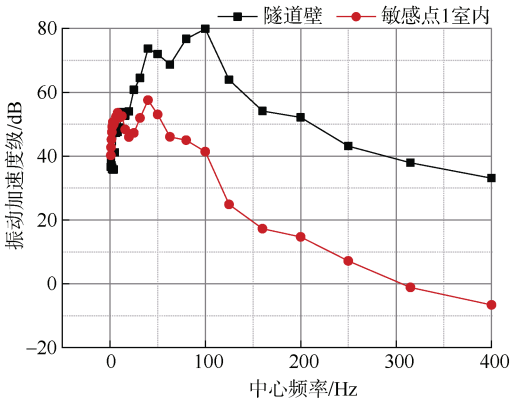



图 4　改造前隧道壁和敏感点 1 室内分频振动加速度曲线

Figure 4　Frequency-divided vibration acceleration curves of the tunnel wall and the interior of Monitoring Point 1 before renovation

2) 隧道内现场调研发现，一方面该区段位于半径为 350 m 的小半径曲线，轮轨接触不良导致的轮轨磨耗严重，加剧了轮轨振动；另一方面，虽然轨道几何形位在规范允许范围内，但是轨道轨底坡存在大量超限情况，经现场测量敏感点及前后 50 m 的左右线轨底坡，轨底坡在 1∶50～1∶30 范围的仅占 38%，一半以上的短轨枕轨底坡存在超限，主要由于短轨枕整体道床施工期间轨排整体性差、轨底坡施工不到位，同时运营阶段无法调整，导致轮轨接触不良加剧了轮轨振动[8, 12]。

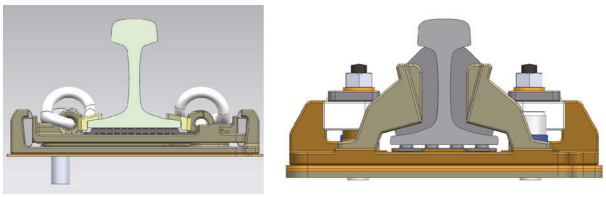
3) 现场踏勘投诉敏感点为无桩基础的 2～5 层砖混结构，建设时间长、结构薄弱、自重轻，受地铁振动影响较大[12]，也是引起振动噪声扰民的原因之一。

### 3.2　治理措施分析

1) 既有线增加减振降噪措施。根据测试分析和投诉原因分析结果，本区段投诉主要原因为减振设计不足。敏感点室内振动超标最大为 7.49 dB，二次结构噪声最大超标 1.56 dB(A)，室内振动在 12 Hz 和 40 Hz 时出现峰值，道床类减振措施(如钢弹簧浮置板和减振垫浮置板道床)可以起到更好的减振降噪效果，但是在不影响线路正常运营的条件下，改造难度较大、风险高。从改造的实施性出发，推荐在钢轨、扣件部位采取相应的减振降噪措施。

根据测试结果，左线过车时振动最大超标 7.50 dB，右线过车时振动最大超标 1.19 dB，因此推荐左线采用

高等减振扣件(防松脱浮轨式扣件)，如图 5(a)所示，右线采用中等减振扣件(双层非线性减振扣件)，如图 5(b)所示，为提高扣件横向力、保证扣件高度与既有线扣件高度一致，双层非线性减振扣件采用低高度带挡肩双层非线性减振扣件。



(a) 低高度带挡肩双层非线性减振扣件　　(b) 防松脱浮轨式扣件

图 5　减振扣件示意

Figure 5　Schematic of vibration-damping fasteners

2) 轨底坡调整。根据现场调研，由于原道床施工原因导致部分地段轨底坡不是 1∶40，轨底坡超出 1∶50～1∶30 范围的占 62%，甚至存在轨底坡方向设置相反情况。针对轨底坡超限情况，既有扣件和双层非线性减振扣件通过铁垫板承轨槽设置不同坡度，扣件其他零部件不变，将钢轨轨底坡调整在 1∶50～1∶30 范围[12]。浮轨扣件因钢轨悬浮于铁垫板承轨槽上，因此通过铁垫板下设置不同坡度的楔形垫板，将钢轨轨底坡调整在 1∶50～1∶30 范围。

以上轨底坡调整可在更换减振扣件的同时，对扣件进行轨底坡超限反向设计，进而在不改变道床和轨枕的情况下调整钢轨的轨底坡，且通过该方法调整轨底坡对扣件受力和养护维修影响较小，有效改善轨道几何形位。

3) 提高轨道平顺性，更换扣件期间进行钢轨打磨和轨道几何形位调整等。

## 4　仿真分析

建立车轨耦合解析模型(见图 6)和隧道-地层-建筑物有限元模型(见图 7)，对投诉敏感点近轨侧的浮轨式减振扣件进行刚度设计，并对其减振效果进行预评估。

利用由图 6 所示的周期性车辆-轨道耦合解析模型计算得到扣件反力，并将其时程作为激励添加到图 7 道床板表面对应扣件位置处，列车为普通地铁 B 型车，总长 116.6 m，计算时以 6 辆编组进行车辆模拟，车速约 70 km/h，车辆参数见表 2。

计算中轨道不平顺按照美国轨道不平顺 5 级谱进行模拟，其功率谱密度函数具体如下：

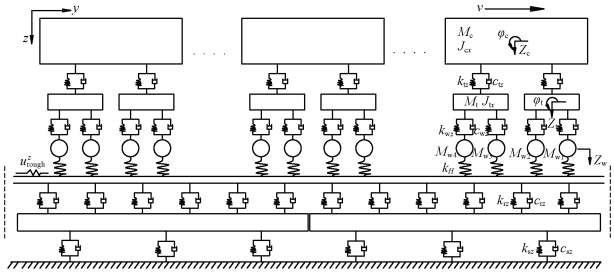
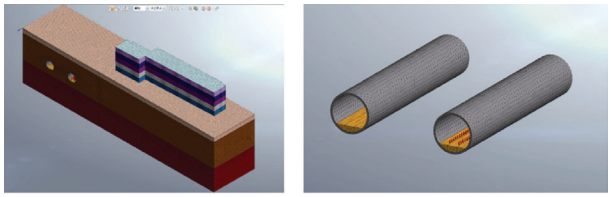


图 6　车轨系统力学模型

Figure 6　Mechanical model of the vehicle-track system



(a) 模型整体　　(b) 隧道部分

图 7　隧道-地层-建筑物有限元模型

Figure 7　Finite element model of tunnel-stratum-building

**表 2　车辆参数**

**Table 2　Vehicle parameters**

| 参数类别 | 取值 | 参数类别 | 取值 |
|---|---|---|---|
| 车体质量 $M_c$/kg | $4.3\times10^4$ | 二系悬挂刚度 $k_t$/(N/m) | $5.8\times10^5$ |
| 转向架质量 $M_t$/kg | $3.6\times10^3$ | 二系悬挂阻尼 $c_t$/(N·s/m) | $1.6\times10^5$ |
| 轮对质量 $M_w$/kg | $1.7\times10^3$ | 一系悬挂刚度 $k_w$/(N/m) | $1.4\times10^6$ |
| 车体质量惯性矩 $J_c$/(kg·m$^2$) | $1.7\times10^6$ | 一系悬挂阻尼 $c_w$/(N·s/m) | $5\times10^4$ |
| 转向架质量惯性矩 $J_t$/(kg·m$^2$) | $9.62\times10^3$ | 半定距 $b$/m | 6.3 |
| 轮轨接触常数 $G$/(m/N$^{2/3}$) | $5.147\times10^{-8}$ | 半轴距 $a$/m | 1.1 |
| 车长 $l$/m | 19 | 静轮轨力 $P_0$/N | $7\times10^4$ |

$$S(\Omega)=\frac{kA_v\Omega_c^2}{\Omega^2(\Omega^2+\Omega_c^2)}[\mathrm{cm}^2/(\mathrm{rad/m})]$$

其中，$k=0.25, A_v=0.209\,5, \Omega_c=0.824\,5$

计算中不平顺的采样点数 $N_R$=256。由此可以获得扣件作用在道床板上的力的时程与频谱，图 8 给出某典型扣件作用在道床板上的力的时程与频谱，其他扣件类似，此处不再给出。激励力作用点为道床上每个扣件作用反力处。

隧道埋深为 23 m，盾构管片为混凝土管片。盾构隧道断面内径为 2.7 m，衬砌厚度为 0.3 m。混凝土衬砌的杨氏模量 $E$=35 000 MPa，泊松比 $\upsilon$=0.25，密度 $\rho$=2 500 kg/m$^3$。隧道仰拱处灌注混凝土道床，基底回填及道床板动弹性模量 $E$=4.2×10$^{10}$ Pa，泊松比 $\upsilon$=0.3，密度 $\rho$=2 500 kg/m$^3$。模型范围为 $x$×$y$×$z$：60 m×40 m×

30 m。网格尺寸：基底和隧道采用 0.15 m，土体由近场到远场采用 0.6 m-0.9 m-1.2 m 的过渡网格。

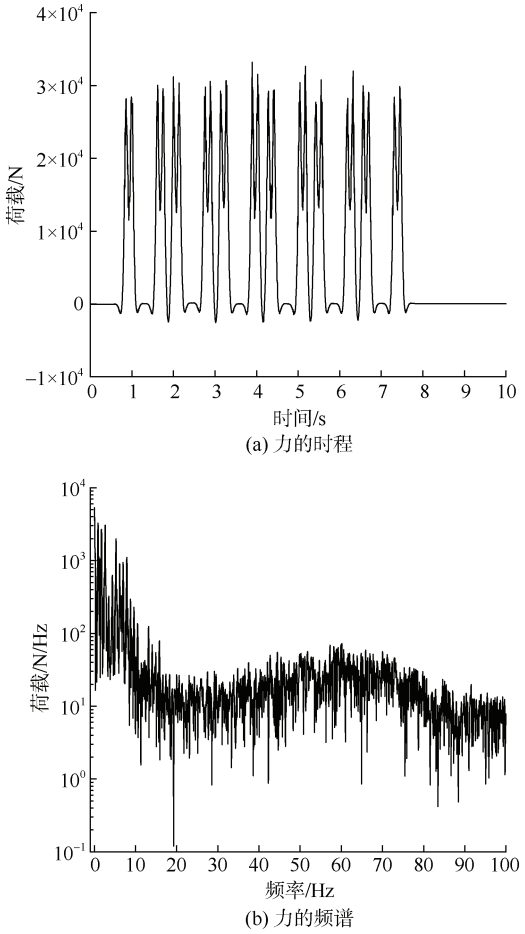



图 8　荷载时程与频谱

Figure 8　Load time history and frequency spectrum

为消除边界效应，计算模型在边界处设置弹簧-阻尼吸收边界，表 3 给出弹簧阻尼系数在该模型中的具体取值情况。

**表 3　边界刚度系数及阻尼系数**

**Table 3　Boundary stiffness coefficient and damping coefficien**

| 地层编号 | 弹簧刚度系数 | | | 阻尼系数 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $k_x$ (kN/m³) | $k_y$ (kN/m³) | $k_z$ (kN/m³) | $c_p$(压缩波) (kN·s/m) | $c_s$(剪切波) (kN·s/m) |
| 1 | 44 051 | 33 968 | — | 2 064 | 259 |
| 2 | 57 868 | 44 622 | — | 2 832 | 630 |
| 3 | 255 901 | 197 327 | 100 781 | 4 123 | 950 |

利用实测数据对模型进行校核后，通过模型分析不同刚度下浮轨扣件的减振效果，如图 9 所示。模型计算结果显示：采用不同刚度的浮轨扣件，室内楼板振动响应规律基本一致，在全频段内基本呈现浮轨扣件刚度越小，室内振动响应越小的趋势，但三种刚度浮轨扣件的效果差异较小。浮轨扣件能够较为明显地降低室内振动响应，最大 Z 振级可降低 7 dB；在关注频段 30～80 Hz 范围内的减振效果较为明显。

推荐改造工程采用刚度 $k$=10 kN/mm 的浮轨扣件。

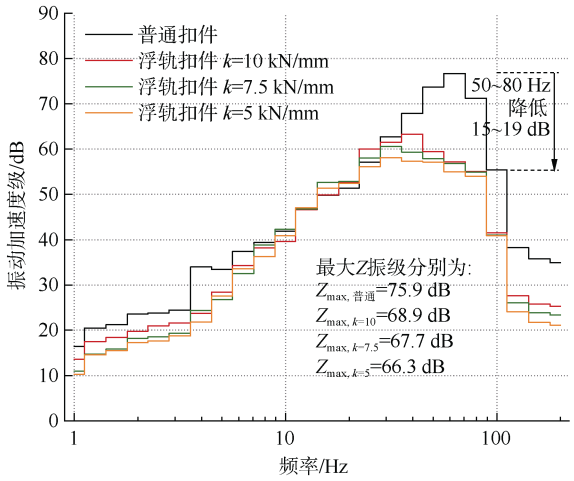



图 9　浮轨扣件计算结果

Figure 9　Calculation results of floating rail fasteners

## 5　治理及效果测试

本次振动噪声投诉治理的实施方案为：1) 对投诉敏感点及前后 50 m 的左线将普通扣件更换为浮轨扣件，右线将普通扣件更换为双层非线性减振扣件；2) 更换减振扣件范围的轨底坡调整为 1∶30～1∶50 范围；3) 钢轨打磨。

改造施工完成后 2 个月，对改造后隧道内振动、敏感点室内振动和二次结构噪声进行了对比测试。改造后现场如图 10 所示。



(a) 低高度带挡肩双层非线性减振扣件　(b) 防松脱浮轨式扣件

图 10　改造完成情况

Figure 10　The completion status of the renovation

根据改造前后的钢轨、隧道壁和敏感点的分频振动加速度级对比(见图 11)，改造后隧道壁和敏感点室内振动均降低，但是由于采用扣件减振措施，钢轨振

动在小于 75 dB 和大于 135 dB 振动增大，建议运营部门后期关注钢轨磨耗的发展。

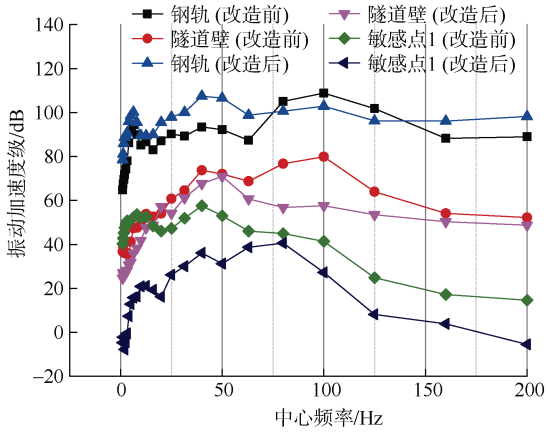



图 11　振动改造前后对比

Figure 11　Comparison before and after vibration renovation

通过数据分析，左线隧道内振动测试显示：隧道壁 $VL_{Zmax}$ 为 76.13 dB，比改造前降低 5.95 dB。

敏感点 1 室内振动测试显示，室内振动 $VL_{Zmax}$ 昼间为 69.14 dB，降低 6.4 dB，夜间为 68.68 dB，降低 8.3 dB；二次结构噪声等效 A 声压级昼间为 40.15 dB(A)，降低 1.36 dB(A)，夜间为 40.36 dB(A)，降低 1.88dB(A)。基本达到仿真预测值。振动和二次结构噪声测试值满足规范要求。

敏感点 2 投诉居民反馈，改造完成后振动噪声问题明显改善，达到居民可接受范围，无需进行振动噪声测试。

根据运营部门反馈，改造完成后该区段未再接收到振动噪声投诉问题。

# 6　结论与建议

## 6.1　结论

本文针对早期地铁短轨枕整体道床振动噪声投诉问题进行现场调研、振动噪声测试、原因分析和理论计算，针对其问题进行既有线减振降噪改造，并验证了其改造效果，结论如下。

1) 通过现场调研、隧道内振动测试及投诉敏感点室内振动噪声测试分析，基于早期地铁线路振动噪声投诉情况，线路建设较早、轨道减振设计不足，线路条件差、短轨枕整体道床施工质量差导致的轨底坡超限、轨道平顺性差，敏感点自身抗振动能力弱等是引起该居民振动噪声投诉的主要原因。

2) 根据投诉原因分析，通过增设中等及高等减振扣件、调整线路轨底坡、打磨钢轨等既有线改造措施，本文研究工况下，改造后隧道壁振动 $VL_{Zmax}$ 降低 5.95 dB，敏感点室内振动 $VL_{Zmax}$ 昼间降低 6.4 dB，夜间降低 8.3 dB；二次结构噪声等效 A 声压级昼间降低 1.36 dB(A)，夜间降低 1.88 dB(A)。同时居民反映振动噪声问题明显改善，有效解决了振动噪声投诉问题。可为国内地铁振动噪声扰民投诉问题的解决提供借鉴和参考。

## 6.2　建议

浮轨式减振扣件为既有线改造中切实可行的高等减振措施，且在国内多条改造线路中应用。考虑其在我国地铁线路服役中出现过钢轨短波长波磨耗，同时当轮轨匹配不良时容易引起轮轨共振，进而产生钢轨异常磨耗。因此，建议在应用该类扣件后，加强轨道不平顺及钢轨波磨的监测，及时打磨钢轨，保证轨道不平顺在可接受的范围内。

## 参考文献

[1] 段玉振, 段海滨, 刘鹏辉, 等. 地铁振动噪声扰民投诉问题原因分析及整治技术研究[J]. 现代城市轨道交通, 2023(1): 84-89.
DUAN Yuzhen, DUAN Haibin, LIU Penghui, et al. Research on the causes of metro vibration and noise complaints and its treatment technologies[J]. Modern urban transit, 2023(1): 84-89.

[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]. 都市快轨交通, 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] 吴俊. 城市轨道交通轨道减振升级改造方法研究[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(4): 93-98.
WU Jun. Method for upgrading vibration reduction for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(4): 93-98.

[4] 杨广武, 郭建平, 彭华, 等. 地铁基础减振地段钢轨异常波磨治理方案研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(4): 75-81.
YANG Guangwu, GUO Jianping, PENG Hua, et al. Management of abnormal rail corrugation in underground foundation vibration reduction section[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(4): 75-81.

[5] 吴赛甲, 倪昊, 薛佳鑫, 等. 单自由度钢轨谐振器在钢轨波磨治理中的应用研究[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(1): 101-106.

WU Saijia, NI Hao, XUE Jiaxin, et al. Application of single degree of freedom rail resonator in rail wave grinding treatment[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 101-106.

[6] 姚学东, 李伟, 周志军, 等. 柔性轮对作用下浮轨式扣件轨道动力特性分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(24): 42-50.
YAO Xuedong, LI Wei, ZHOU Zhijun, et al. Analysis on dynamic characteristics of track with floating fasteners considering loading of flexible wheelsets[J]. Journal of vibration and shock, 2023, 42(24): 42-50.

[7] 周光辉, 赵磊, 方树薇, 等. 地铁轨底坡超差对钢轨磨耗的影响及调整设计[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(5): 93-99.
ZHOU Guanghui, ZHAO Lei, FANG Shuwei, et al. Influence of subway rail cant deviation on rail corrugation and its adjustment[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(5): 93-99.

[8] 中国铁路总公司, 普速铁路线路修理规则: TG/GW 102—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2019.
China State Railway Group Co., Ltd., Normal-speed railway line repair rules: TG/GW 102—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2019.

[9] 国家环境保护局, 城市区域环境振动测量方法: GB 10071—88[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
National Environmental Protection Agency. Measurement method of environmental vibration in urban area: GB 10071—88[S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准: JGJ/T 170—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for limit and measuring method of building vibration and secondary noise caused by urban rail transit: JGJ/T 170—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

[11] 国家环境保护局, 城市区域环境振动标准: GB 10070—88[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
National Environmental Protection Agency. Standard of environmental vibration in urban area: GB 10070—88[S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.

[12] 魏运, 陈炎, 赵华伟, 等. 城市轨道交通既有线改造技术标准研究[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(1): 28-35.
WEI Yun, CHEN Yan, ZHAO Huawei, et al. Developing technical standards for renovating urban rail transit lines in China[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 28-35.

（编辑：傅依萱）

（上接第 52 页）

[7] 钱七虎, 郭东军, 陈志龙. 关于缓解北京交通拥堵问题的探讨——城市地下物流系统[J]. 现代隧道技术, 2004, (增刊): 10-15.
QIAN qihu, GUO dongjun, CHEN zhilong. Discussion on alleviating Beijing traffic congestion: Urban underground logistics system[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, (S1): 10-15.

[8] 赵娆, 李彩. 基于太原地铁的城市地下物流系统可行性分析[J]. 企业科技与发展, 2020(9): 56-58.
ZHAO Rao, LI Cai. Feasibility analysis of urban underground logistics system based on Taiyuan subway[J]. Sci-tech & development of enterprise, 2020(9): 56-58.

[9] OZTURK O, PATRICK J. An optimization model for freight transport using urban rail transit[J]. European journal of operational research, 2018, 267(3): 1110-1121.

[10] LI Zhujun, SHALABY A, ROORDA M J, et al. Urban rail service design for collaborative passenger and freight transport[J]. Transportation research part E: logistics and transportation review, 2021, 147: 102205.

[11] BEHIRI W, BELMOKHTAR-BERRAF S, CHU Chengbin. Urban freight transport using passenger rail network: Scientific issues and quantitative analysis[J]. Transportation research part E: logistics and transportation review, 2018, 115: 227-245.

[12] ZUO Tong, LI Bozhi, ZHANG Fan, et al. Analysis of a collaborative transport model mixing passengers with freights in metro system[J]. Journal of rail transport planning & management, 2023, 25: 100358.

[13] DI Zhen, YANG Lixing, SHI Jungang, et al. Joint optimization of carriage arrangement and flow control in a metro-based underground logistics system[J]. Transportation research part B: methodological, 2022, 159: 1-23.

[14] 戚建国, 周厚盛, 杨立兴, 等. 灵活编组条件下轨道交通客货协同运输方案优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 197-205.
QI Jianguo, ZHOU Housheng, YANG Lixing, et al. Optimization methods of combined passenger and freight transportation based on flexible train composition mode[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2022, 22(2): 197-205.

[15] LI Siqiao, ZHU Xiaoning, SHANG Pan, et al. Scheduling shared passenger and freight transport for an underground logistics system[J]. Transportation research part B: methodological, 2024, 183: 102907.

（编辑：王艳菊）