

## 地铁车辆曲线运行车内噪声影响因素的试验分析

付国平<sup>1</sup> 邢海福<sup>1</sup> 郭正海<sup>1</sup> 吴亮<sup>1</sup> 潘越<sup>1</sup> 潘敏凯<sup>2</sup>

(1. 杭州地铁运营有限公司, 310017, 杭州; 2. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

**摘要** [目的] 针对地铁车辆在曲线线路上运行时车内噪声较大的问题, 需对其影响因素开展深入研究。[方法] 通过对线路上部分直线与曲线区间位置的钢轨以及被试车辆的车轮表面进行粗糙度测试分析, 同时采集曲线轨道位置在钢轨打磨前后相应的车辆转向架区域与车内噪声。[结果及结论] 研究发现车轮粗糙度在某些波长范围超出标准 ISO 3095:2013 *Acoustics—Railway applications—Measurement of noise emitted by railbound vehicles* 约 3 dB(A), 而曲线区间内轨的钢轨粗糙度超出高达 20 dB(A) 以上, 直线段钢轨粗糙度满足标准, 打磨后该地铁转向架区域与车内噪声显著降低。此外, 在两个曲线半径均为 300 m 的“S”形曲线区间, 安装了轨顶摩擦调节装置, 测试对比研究结果表明, 通过该装置改善过曲线时的轮轨表面润滑状态, 使得轮轨振动噪声下降, 地铁车内噪声在一定程度上有所降低, 第二个曲线处车内噪声下降达 3 dB(A)。因而, 在轨道小曲线位置, 综合采取钢轨打磨以及改善轮轨润滑状态策略, 可降低地铁车辆在过曲线时的车内噪声。

**关键词** 地铁车辆; 曲线线路; 曲线半径; 钢轨粗糙度; 车内噪声

**中图分类号** U211.5; U213.2+3; TB533+.2

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.10.029

### Experimental Analysis of Factors Affecting Vehicle Interior Noise during the Curve Operation of Metro Vehicles

FU Guoping<sup>1</sup>, XING Haifu<sup>1</sup>, GUO Zhenghai<sup>1</sup>, WU Liang<sup>1</sup>, PAN Yue<sup>1</sup>, PAN Minkai<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Metro Operation Co., Ltd., 310017, Hangzhou, China; 2. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

**Abstract** [Objective] In view of the high vehicle interior noise problem when running on curved lines, it is necessary to carry out in-depth research on its influencing factors. [Method] Roughness test and analysis of the wheel-rail surface of the tested vehicles in the track straight and curved sections are carried out. At the same time, the corresponding vehicle bogie area noise and vehicle interior noise at the curved track position before and after rail grinding are collected. [Result & Conclu-

sion] The study reveals that the wheel roughness exceeds the standard ISO 3095:2013 *Acoustics—Railway applications—Measurement of noise emitted by railbound vehicles* by approximately 3 dB(A) in certain wavelength ranges, while the roughness of the inner rail of the curved section exceeds by more than 20 dB(A), the rail roughness of the straight section could meet the standard. After grinding, the bogie area noise and vehicle interior noise are significantly reduced. In addition, rail top friction adjustment devices are installed in two S-curve sections with a radius of 300 m. Research results of the comparative tests indicates that the device improves the lubrication conditions between the wheel and rail surfaces when passing the curve, reduces the wheel-rail vibration noise. The vehicle interior noise is also reduced to a certain extent by 3 dB(A) at the second curve. Therefore, in the small curve position of the track, the comprehensive strategy of rail grinding and wheel-rail lubrication state improving can reduce the vehicle interior noise when passing curves.

**Key words** metro vehicle; curved line; curve radius; rail roughness; vehicle interior noise

近年来,我国各城市地铁的运营里程不断增长,然而,在多个城市的地铁车辆实际运营中,经常出现当车辆通过小半径曲线时,车内噪声明显偏高的问题,这极大地影响了乘客的乘坐体验。国内外专家学者针对轨道列车运行噪声的成因进行了大量研究。考虑到我国地铁的最高运行速度通常在 80~120 km/h 之间,轮轨噪声被证实为主要噪声源;特别是在列车的加、减速阶段,由牵引制动系统产生的噪声更是成为主导声源。此外,列车经过曲线时产生的高频曲线啸叫<sup>[1]</sup>等也是地铁车内噪声的重要来源。这些问题亟待解决,以提升乘客的乘车舒适度关于曲线线路对客室噪声的影响,文献[2]指出钢轨粗糙度及车速较高是引起曲线噪声大的主要原因。文献[3]应用 BP(反向传播)神经网络原理,对通过小曲线半径的列车进行噪声预测,并利用试验进行验证,判断了曲线各个因素对车内

噪声的影响程度。文献[4]表明列车通过弯道时摩擦因数越大,车内噪声越大,对摩擦因数与轮轨噪声进行进一步的研究。文献[5]指出车轮的横向蠕滑会引起曲线地段轮轨尖啸声,该啸叫声频率范围在400~800 Hz,并且在轮轨接触区域会产生横向摩擦力。文献[6]表明摩擦下降不是列车通过曲线产生较大啸叫的唯一原因,在恒定摩擦条件下轨道动力学也产生一定的作用。目前,曲线线路上车辆噪声的相关研究,仍主要集中在曲线啸叫问题上。

除上述研究外,轨道条件也对列车的车内外噪声产生重要的影响。文献[7]基于轮轨噪声与车内噪声仿真模型,结合轮轨动态特性及车内声学参数测试,探究了不同类型铁道床型式对地铁车内噪声的影响,并分析了隧道内地铁车内噪声的传递路径。文献[8]探究了轮轨噪声与客室内噪声的相关性。随着运营时间的不断增长,轮轨相互作用使得钢轨与车轮表面形成不同程度的磨耗。钢轨波磨及车轮多边形的产生与发展,会进一步加剧轮轨相互作用,引起车内噪声增大。当前,国内外对钢轨波磨与车轮多边形问题研究已开展了大量的工作<sup>[9-10]</sup>,车辆振动噪声异常问题的解决措施,主要集中在钢轨打磨与车轮镟修。文献[11]对曲线钢轨进行打磨,对比打磨前后列车通过噪声发现,减小曲线处的钢轨粗糙度可以降低车内外的噪声。文献[12]通过试验与仿真的方法,分析了轨道波磨对司机室噪声的影响。

本文针对某地铁车辆,旨在分析车辆在不同曲线半径区间运行时的车内噪声水平,并且找寻异常噪声的曲线区段,分析相关影响因素以及引起异常噪声的主要原因,继而提出改善措施并进行试验验证。

## 1 曲线运行工况对车内噪声影响

### 1.1 车辆噪声测试

针对该条地铁线路曲线区间较多的情况,首先进行线路的车辆噪声测试,基于标准 IS O3381:2021 *Railway applications—Acoustics—Noise measurement inside railbound vehicles* 以及 GB 14892—2006《城市轨道交通列车噪声限值和测量方法》,对地铁车辆车内噪声进行测试。同时,为了分析轮轨噪声对车内噪声的影响,也在转向架处安装了传声器,对车内外噪声同时进行测试对比分析。车辆车内及转向架噪声测点位置如图1所示。



a) 车内噪声测点

b) 转向架噪声测点

图1 车辆车内及转向架噪声测点位置实景图

Fig.1 Location of vehicle interior noise and bogie noise measurement points

### 1.2 车辆噪声与线路曲线半径相关性分析

3个区间车内噪声与线路曲率相关性如图2所示。由图2可见,车内测点噪声随运行速度及线路曲线半径变化而变化。在各个曲线区间,车内噪声均达到峰值,相较于中间的相对较为笔直的区间,即使后者的运行速度高于曲线区间,但曲线区间的噪声仍然高出将近10 dB(A)。该区间包含两个半径仅为300 m的“S”型小半径曲线,当车辆经过这些曲线时,噪声均会显著增大。此外,其余区间内出现的异常噪声峰值也与小半径曲线位置有强的对应关系。

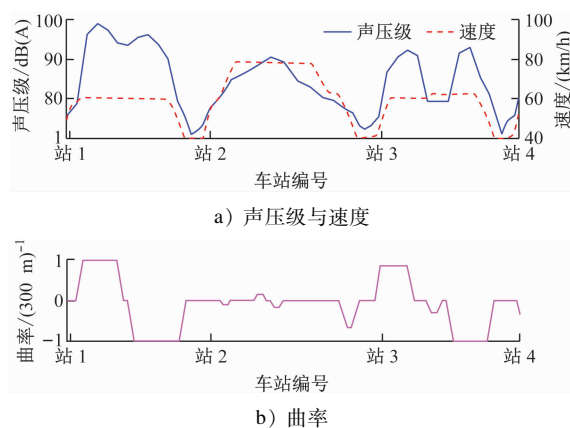


图2 三个区间车内噪声与线路曲率相关性

Fig.2 Correlation between vehicle interior noise and line curvature in three sections

对比上述3个区间的不同位置的车内噪声数据,将不同曲线半径的车内噪声结果整理并列于表1。由表1可知,曲线半径越小,车内噪声越大,车内噪声与车速及曲线半径具有较高的相关性。

## 2 轮轨粗糙度对车辆噪声影响

### 2.1 轮轨表面粗糙度测试

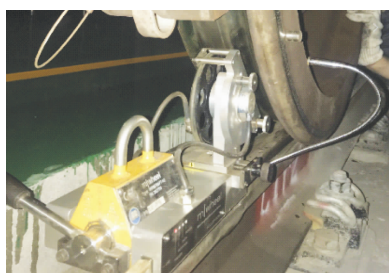
分别对该地铁列车的车轮与部分列车运行的轨道直线与曲线区间,进行轮、轨粗糙度测试,测试

现场实景图如图 3 所示。

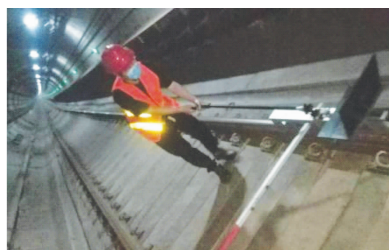
表 1 车内噪声与曲线半径相关性

Tab.1 Correlation between vehicle interior noise and curve radius

区段	线路形式	最大声压级/dB(A)	车速/(km/h)
1	曲线半径 300 m	99.1	60
2	曲线半径 300 m	96.3	60
3	直线	90.5	78
4	曲线半径 350 m	92.4	60
5	曲线半径 1 000 m	79.5	62
6	曲线半径 300 m	93.0	62



a) 车轮



b) 钢轨

图 3 轮轨粗糙度测试现场实景图

Fig. 3 Real scene of wheel-rail roughness test site

## 2.2 车轮表面粗糙度分析

对被试车厢的所有车轮进行表面粗糙度测试, 车轮的不圆度极坐标结果如图 4 所示。由图 4 可见, 部分车轮存在不同程度上的不圆情况, 而有些车轮相对较为光滑, 表面粗糙度不大。

对车轮表面粗糙度进行波长谱测试结果如图 5 所示, 与 ISO 3095:2013 中关于对噪声影响的粗糙度限值曲线进行比较, 由图 5 可见, 在 0.05 ~ 0.10 m 波长范围内, 各个车轮测试所得到的平均值超出标准限值约 3 dB; 在其他波长区间, 车轮粗糙度均低于标准要求, 但存在部分车轮在高于 0.03 m 的波长范围, 超出标准限值。总体来看, 该列车车轮平均粗糙度水平不高, 对车辆噪声不会产生显著的影响。

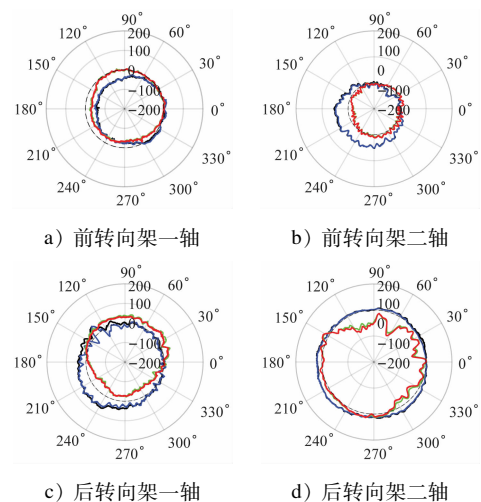


图 4 车轮不圆度极坐标图

Fig. 4 Polar plots of wheel out-of-roundness

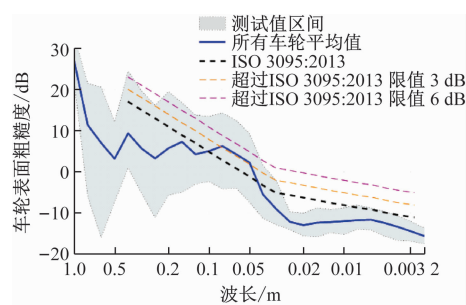


图 5 车轮表面粗糙度波长谱测试结果

Fig. 5 Wavelength spectrum test results of wheel surface roughness

## 2.3 直曲线区间钢轨粗糙度分析

分别对该条地铁线路的部分直线区间与曲线区间上的钢轨, 进行钢轨表面粗糙度测试。图 6 所示为直线区间的钢轨粗糙度测试结果。由图 6 可见: 该直线区间的左轨与右轨粗糙度在全波长范围内均低显著于 ISO 3095:2013 中限值要求, 不会引起轮轨噪声以及列车车内噪声的增大。

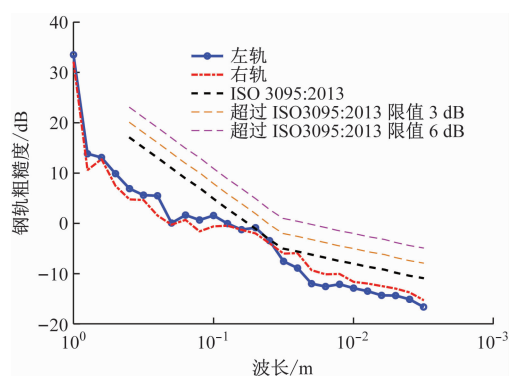


图 6 钢轨粗糙度测试结果(直线段)

Fig. 6 Rail roughness test results (straight line section)



图 7 为打磨前后曲线区间的钢轨粗糙度波长谱结果对比。由图 7 可见:曲线的左、右轨(内、外轨)在不同波长范围内,均存在超标的情况;外轨相对而言超标波长范围较窄,而曲线的内轨在大部分波长范围的粗糙度值均显著超过标准限值要求;其中,最高在 0.025 m 波长处,钢轨粗糙度超出 ISO 3095:2013 指标限值 20 dB(A) 以上,这会引起轮轨噪声的剧烈增长,继而显著增大车内噪声。

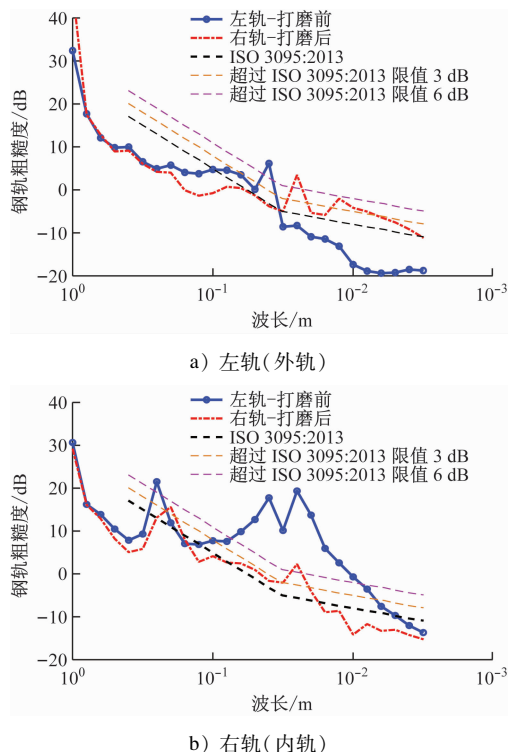


图 7 打磨前后钢轨粗糙度(曲线半径  $R = 300$  m)

Fig. 7 Rail roughness before and after grinding (curve section  $R = 300$  m)

在打磨后,曲线区间的外轨在低于 0.03 m 波长的短波范围内,其钢轨粗糙度值有所增大,而在 0.04 ~ 0.20 m 波长范围的粗糙度有所下降;内轨的钢轨粗糙度,则在全波长范围内显著下降。

#### 2.4 打磨前后车辆噪声对比

图 8 为车内与转向架区域噪声随着路程变化的曲线。对该区间的第一个曲线段进行了打磨,其中黄色部分对应该区间第一段曲线段,对比该位置的打磨前后的转向架区域与车内噪声响应。由图 8 可见,打磨后各测点的噪声均有所下降,车内各测点噪声的下降幅度比车外各测点略大(这是由于打磨前后测试的车辆运行方向不同,车头方向变化,引起车门的密封性变化导致)。

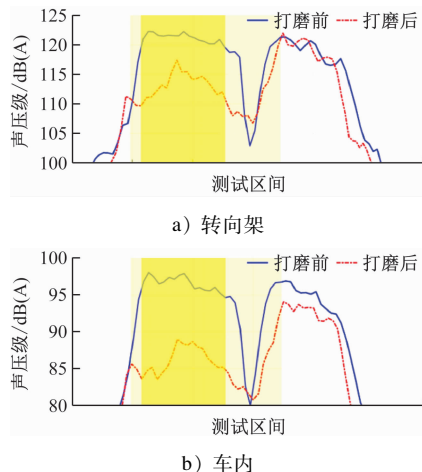


图 8 打磨前后车辆噪声结果对比

Fig. 8 Comparison of vehicle noise results before and after grinding

为了更加直观地反映打磨对于车辆噪声的影响,分别对 ATO 工况与 60 km/h 匀速工况下的车内与转向架区域噪声,进行打磨前后的噪声总值对比,如表 2 所示。在两种运行工况下,车内与转向架区域轮轨噪声下降较为明显。

表 2 打磨前后车辆噪声对比

Tab. 2 Comparison of vehicle noise before and after grinding

位置	工况	打磨前噪声/ dB(A)	打磨后噪声/ dB(A)	差值/ dB(A)
车内	ATO 时	96.7	86.9	9.8
	速度 60 km/h 时	92.9	86.4	6.5
转向架	ATO 时	121.2	114.2	7.0
	速度 60 km/h 时	117.8	113.2	4.6

进行横坐标波长与频率的换算,依据频率与波长及车速关系,频率  $f$  计算公式如下:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

式中:

$\lambda$ ——粗糙度波长,单位为 m;

$v$ ——车速,单位为 m/s。

图 9 为钢轨粗糙度以及车辆转向架区域与车内噪声,在打磨前后的窄带频域结果对比。由图 9 可见,右轨(内轨)粗糙度较高,在 400 Hz、700 Hz 及 1 000 Hz 以上多个频段存在显著峰值,经打磨后高频段的粗糙度激励显著下降。而左轨(外轨)粗糙度相对不高,仅在 400 Hz 左右存在峰值,打磨后 700 Hz 出现峰值,且高频粗糙度增大。

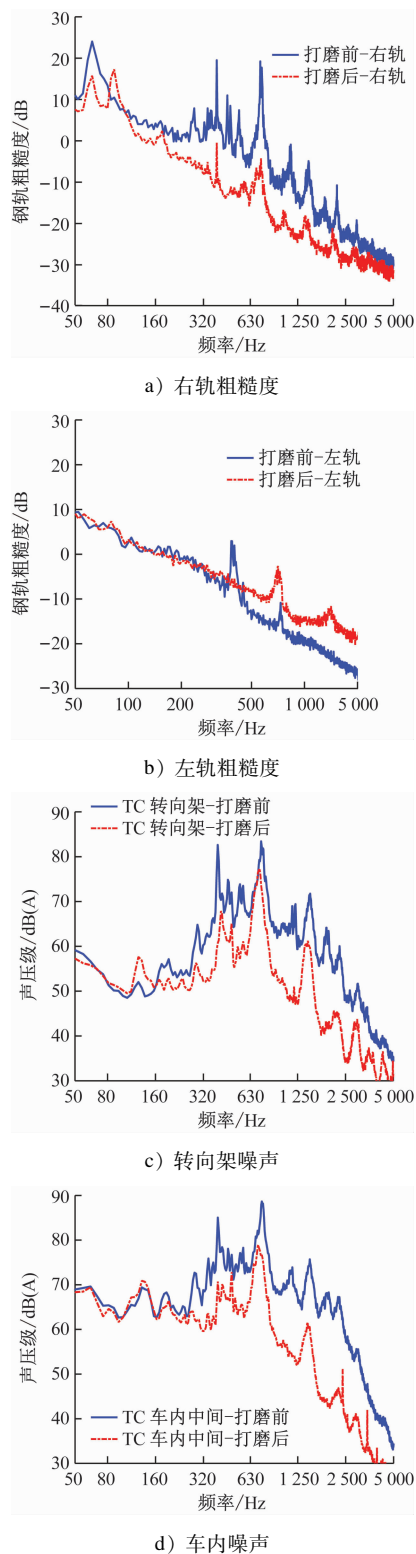


图9 打磨前后曲线段钢轨粗糙度与噪声相关性

Fig. 9 Correlation between rail roughness and noise in curved section before and after grinding

在打磨后,车辆的转向架区域与车内噪声在160 Hz以上的频段均有显著下降,但低频短噪声几

乎无变化。将钢轨粗糙度与噪声结合对比,进行相关性分析可知,打磨前后车辆噪声与粗糙度峰值频率一致,左右钢轨在400 Hz左右的粗糙度值显著下降,对比可见车辆噪声在400 Hz下降较为显著,而左轨在700 Hz的粗糙度增大,使得车辆在该频段噪声下降没有那么显著,综合来看车内噪声在中高频噪声均显著下降。

### 3 曲线润滑对车辆噪声影响

#### 3.1 轨顶摩擦调节装置对噪声影响

当轮轨摩擦因数低于一定数值时,轮轨黏-滑自激振动在一定程度上可以消除,同时也可降低钢轨的波磨,在实际应用中,也可通过控制轮轨摩擦因数来抑制钢轨波磨的发生与发展。近年来,国内外采用轨顶摩擦调节装置,增加轮轨间润滑作用来减小轮轨摩擦因数,作为轨道车辆降噪以及延缓曲线钢轨波磨的一项措施。

本文研究的“S”形小曲线半径区间,在两个曲线位置处分别安装了摩擦调节装置,并进行了安装前后的噪声测试。图10所示为该曲线区间的车内噪声对比结果,黄色区域分别为第一段曲线区间和第二段曲线区间的匀速运行位置。由图10可见,在两个曲线处安装了轨顶摩擦调节装置之后,车内噪声有不同程度的降低。

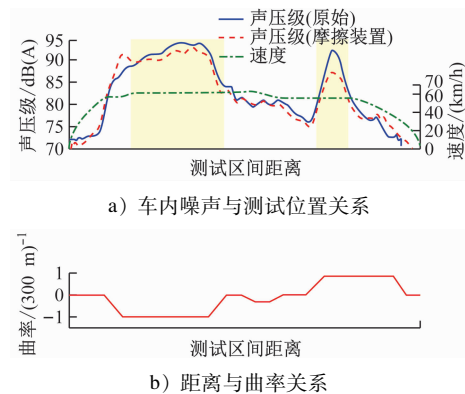


图10 曲线采用摩擦调节装置前后车内噪声对比

Fig. 10 Comparison of vehicle interior noise before and after adoption of the friction adjustment device at curve sections

表3是润滑前后ATO工况下,在曲线位置的总值与噪声差值。由表3可知,润滑后车内与转向架测点的噪声均有所减小。两处曲线位置车内噪声总值均有所下降,并且客室内在第二个曲线处的车内噪声下降更多,达到3 dB(A),在第一曲线处,车

内噪声下降较小为 1.6 dB(A)。

### 3.2 润滑前后车辆噪声频谱分析

在采用摩擦调节装置后及原始 ATO 工况下,车内、外噪声测点在第一段曲线段运行时的 1/3 倍频程噪声频谱如图 11 所示。由图 11 可见:进行轮轨接触时摩擦因数的修改后,在 400 Hz 以上的高频区间,轮轨噪声与车内噪声均有所降低,对低频降噪效果较小。

表 3 采用摩擦调节装置前后车辆过曲线噪声对比

Tab.3 Comparison of vehicle passing-curve noise before and after adoption of the friction adjustment device

位置	工况	原始/ dB(A)	摩擦装置/ dB(A)	差值/ dB(A)
第一 曲线处	车内	91.1	89.6	1.6
	转向架	116.5	115.2	1.3
第二 曲线处	车内	87.4	84.4	3.0
	转向架	113.5	110.5	3.1

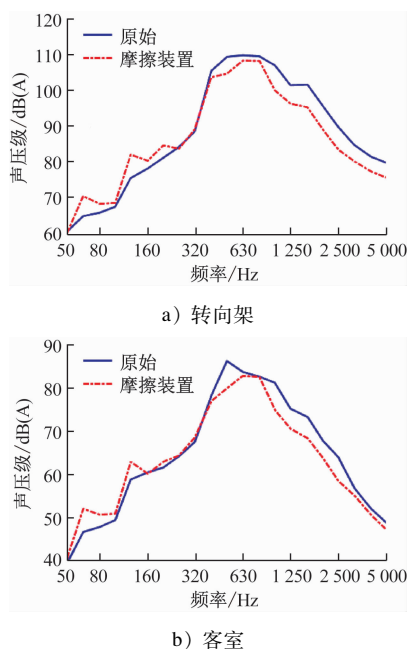


图 11 车内、外噪声测点 1/3 倍频程噪声频谱对比图(第一段曲线段运行)

Fig. 11 Comparison diagram of 1/3 octave noise spectra between vehicle inside and outside noise measurement points (running in the first curve section)

图 12 为第二曲线的圆曲线段运行时,车辆转向架区域与车内的 1/3 倍频程噪声频谱对比图。由图 12 可见:在 500 Hz 以上频段噪声峰值由于使用了轨顶的摩擦调节装置而显著降低,且在第二曲线处

转向架与车内噪声,相对于第一曲线处的降噪效果更好。结合这两处的降噪效果来看,轨顶摩擦调节装置由于改善了曲线段的轮轨润滑,具有降低车辆曲线噪声的效果。

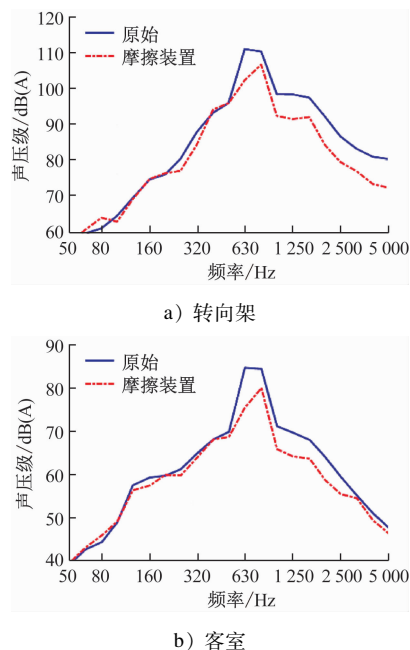


图 12 车辆转向架区域与车内的 1/3 倍频程噪声频谱对比图(第二段曲线段运行)

Fig. 12 Comparison diagram of 1/3 octave noise spectra between the vehicle bogie area and the inside of the vehicle (running in the second curve section)

## 4 结语

本文针对某地铁车辆在曲线区间运行时车内噪声较大的问题,分别对曲线区间钢轨打磨前、后,以及采用轨顶摩擦调节装置前、后,进行轮轨噪声与车内噪声测试的对比分析,研究地铁曲线工况对地铁车内噪声影响的各因素,主要研究结论如下:

1) 本文所研究的地铁车辆表现出:在曲线半径较小的区间运行时,车内噪声显著增大,其与运行速度与曲线半径呈现较高的相关性,且曲线半径越小,噪声越大。

2) 直线上钢轨粗糙度符合标准要求,而曲线上,尤其是内轨,存在显著超出标准的表面粗糙度,是引起车内噪声异常的重要原因,在钢轨打磨后,转向架及车内噪声明显下降。

3) 轨顶摩擦调节装置通过增加轮轨接触时的润滑,来减小摩擦因数,对地铁列车过曲线时车内噪声的降低具有一定的效果。

综上所述,针对地铁过曲线时车内噪声较大的问题,可以结合钢轨打磨与改善轮轨润滑条件两方面来共同解决。

## 参考文献

- [1] THOMPSON D J, SQUICCIARINI G, DING B, et al. A state-of-the-art review of curve squeal noise: phenomena, mechanisms, modelling and mitigation[C]//Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Cham: Springer, 2018: 3.
- [2] 陈卓群. 小半径曲线对地铁车辆客室噪声偏高的影响分析[J]. 机车电传动, 2019(6): 128.  
CHEN Zhuoqun. Analysis of excessive noise in passenger rooms of metro vehicles in small radius curves[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(6): 128.
- [3] 周海洋. 基于 BP 神经网络的地铁小半径曲线地段车内噪声预测分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.  
ZHOU Haiyang. Prediction and analysis of in-car noise in metro area with small radius curve based on BP neural network[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [4] 王金, 杨新文, 练松良. 摩擦因数对轮轨曲线啸叫噪声的影响分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 255.  
WANG Jin, YANG Xinwen, LIAN Songliang. Influence of friction coefficient on wheel-rail curve squeal noise[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 255.
- [5] BRUNEL J F, DUFRÉNOY P, NAÏT M, et al. Transient models for curve squeal noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3/4/5): 758.
- [6] DING B, SQUICCIARINI G, THOMPSON D. Effect of rail dynamics on curve squeal under constant friction conditions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 442: 183.
- [7] 韩颖. 隧道内钢弹簧浮置板轨道地铁车内噪声特性分析[D]. 上海: 同济大学, 2021.  
HAN Ying. Analysis of noise characteristics inside subway vehicles with steel spring floating plate track in tunnels [D]. Shanghai: Tongji University, 2021.
- [8] 迟义浩, 肖宏, 时光明, 等. 80 km/h 速度条件下地铁隧道内轮轨及车内振动噪声关联性研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(12): 32.  
CHI Yihao, XIAO Hong, SHI Guangming, et al. Research on the correlation between wheel-rail and interior vibration and noise under 80 km/h condition in subway tunnels[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(12): 32.
- [9] WU T X, THOMPSON D J. An investigation into rail corrugation due to micro-slip under multiple wheel/rail interactions [J]. Wear, 2005, 258(7/8): 1115.
- [10] NIELSEN J. Out-of-round railway wheels [C]//Wheel-Rail Interface Handbook. Amsterdam: Elsevier, 2009: 245.
- [11] 尧辉明, 沈钢, 崔巍. 曲线钢轨波磨打磨方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 1162.  
YAO Huiming, SHEN Gang, CUI Wei. Grinding method for rail corrugation in curved track [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(8): 1162.
- [12] 郭建强, 朱雷威, 刘晓龙, 等. 地铁司机室噪声与钢轨波磨关系的试验与仿真研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(16): 141.  
GUO Jianqiang, ZHU Leiwei, LIU Xiaolong, et al. Experimental and simulation study on the relationship between interior noise of metro cab and rail corrugation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(16): 141.
- 收稿日期:2023-06-21 修回日期:2023-08-10 出版日期:2024-10-10  
Received:2023-06-21 Revised:2023-08-10 Published:2024-10-10
- 第一作者:付国平,高级工程师,fuguoiping@hzm metro.com  
通信作者:潘敏凯,工程师,panminkai@126.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
- 收稿日期:2022-10-31 修回日期:2023-01-17 出版日期:2024-10-10  
Received:2022-10-31 Revised:2023-01-17 Published:2024-10-10
- 通信作者:郭娇杰,工程师,guojiaojie@tju.edu.cn  
• ©《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

(上接第 169 页)

SHEN Yuliang. Fire protection optimization design of subway stations in underground transportation hubs [J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(8): 1075.

- [13] 侯团增. 某地铁地下岛式车站防排烟系统设计[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(10): 1125.

HOU Tuanzeng. A smoke control system design of a subway station of underground island type[J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(10): 1125.

- [14] 李德辉. 西安地铁二号线特殊车站公共区防排烟设计[J]. 暖通空调, 2012, 42(6): 84.

LI Dehui. Public space smoke control and extraction design for special stations of Xi'an underground railway line 2[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2012, 42(6): 84.