

# 有轨电车线路钢轨包覆材料在合建结构条件下的减振降噪效果分析

刘士煜<sup>1,2</sup> 王世烨<sup>3,4</sup> 苗彩霞<sup>1,2</sup> 周 宇<sup>3,4</sup>

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 200125, 上海; 2. 上海有轨电车工程技术中心, 200125, 上海;

3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

4. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 建立有轨电车-钢轨及包覆材料-轨道-沿线结构模型, 分析钢轨柔性包裹材料条件下, 有轨电车线路及其沿线结构的振动噪声特征。研究发现, 地下小半径线路条件下, 安装柔性包裹材料后, 钢轨垂向振动加速度级约降低 7.4 dB, 合建结构的垂向振动加速度级减小约 0.9~2.0 dB, 主要减小频段为 15.0~40.0 Hz; 曲线内外侧噪声峰值降低约 3.5~9.2 dB(A), 合建结构的噪声峰值降低幅度不超过 1.0 dB(A)。地面小半径线路条件下, 安装柔性包裹材料的钢轨垂向振动加速度级约降低 7.6 dB, 传播至沿线整体结构的垂向振动加速度级约减小 1.5~3.8 dB, 主要减小频段为 14.0~18.0 Hz; 沿线噪声峰值降低约 2.0~5.8 dB(A)。

**关键词** 有轨电车; 钢轨; 包覆材料; 减振降噪

**中图分类号** TB533<sup>+</sup>.2; U482.104

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.050

## Analysis on Vibration and Noise Reduction of Tram Rail Covering Material Under the Condition of Integrated Structure

LIU Shiyu, WANG Shiye, MIAO Caixia, ZHOU Yu

**Abstract** Models of tram-rail with coating material-track-integrated structures along the line are established. The vibration and noise characteristics of tram lines and structures along the line under the situation considering flexible coating material of rail are analyzed. Research shows that for underground sharp radius line, after installation of flexible coating material, rail vertical acceleration level (VAL) will be reduced by about 7.4 dB. The VAL of integrated structure is reduced by about 0.9–2.0 dB, with the main reduction frequency band of 15.0–40.0 Hz. Moreover, it would reduce the peak value of noise inside and outside the curve by about 3.5–9.2 dB(A). The noise reduction in the integrated structure is less than 1.0 dB(A). Under the condition of ground line with sharp radius curve, the installation of flexible coating material on the rail reduces the rail VAL by about 7.6 dB, and

VAL of the overall structure along the tram is reduced by about 1.5–3.8 dB, and the main reduction frequency band by 14.0–18.0 Hz. The noise peak along the tram line is reduced by about 2.0–5.8 dB(A).

**Key words** tram; rail; covering material; vibration and noise reduction

**First-author's address** Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., 200125, Shanghai, China

有轨电车的轮轨接触特性会引发振动和噪声, 特别对由轨道-建筑形成的合建结构会产生明显的影响。既有研究认为, 由有轨电车运行诱发的建筑物振动以竖向振动为主<sup>[1]</sup>。在钢轨上设置减振和阻尼材料是改善有轨电车竖向振动和噪声的有效方式之一。采用柔性包覆材料包裹钢轨, 可使其引起的噪声和振动小于传统结构的轨道<sup>[2-3]</sup>。因此, 有必要对小半径、无超高线路条件下的该种钢轨-建筑形成的合建结构进行量化研究。

本文结合北京冬奥会崇礼奥运赛区太子城小镇有轨电车项目, 基于线路轨道结构、线型和沿线结构, 选择振动噪声敏感地段, 建立有轨电车-钢轨及包覆材料-轨道-沿线结构模型, 对比该线路在安装钢轨柔性包裹材料前后的振动噪声情况, 为有轨电车轨道减振降噪措施的设计和选型提供参考。

## 1 实际工况建模

### 1.1 确定振动噪声敏感点

该线路分别穿过会展地块和文创地块, 其振动噪声敏感点如图 1 所示。其中: 1-1 截面的轨道为浮置板轨道结构, 有轨电车轨行区线路位于地下一

层,最小曲线半径为 40.0 m,线路距离相邻报告厅的水平距离为 16.0 m; 2-2 截面为整体道床,有轨电车走行于地面一层,沿线为商铺和餐厅,线路距离商铺和餐厅的最小距离为 17.4 m,最小曲线半径为 53.0 m。



图 1 有轨电车沿线敏感点

Fig. 1 Sensitive locations along the tram line

上述线路中,曲线路段的最高运行速度为 20 km/h。钢轨为 60R2 槽型轨,其两侧安装有橡胶柔性包覆材料(长期使用下,橡胶材料的特性会产生非线性变化,这里仅考虑新建线路材料性能良好的工况),与钢轨形成埋入式结构,如图 2 所示。

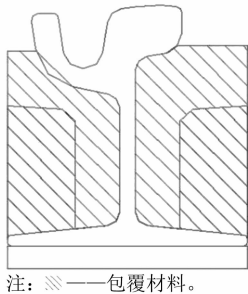


图 2 柔性包覆材料与钢轨的关系

Fig. 2 Relationship between flexible covering material and rail

### 1.2 构建模型

沿线建筑均为大型空间结构,其横截面基本为全等截面,故采用有限元法建立有轨电车-轨道-结构的二维模型。根据现有研究结论<sup>[4]</sup>,合建结构需考虑线路两侧各两个大厅的宽度范围,而敞开段结

构需考虑线路两侧 20.0 m 范围,以兼顾仿真结果的准确性及其计算效率。

在上下行线路设置 4 个激励点,模拟有轨电车上下行均有列车并以最高运行速度会车时的情景。激励源为轮轨力,施加点为钢轨上的轮轨接触作用点,并以有轨电车轴距和车速确定激励点的作用位置。

基于图 1 中的振动噪声敏感断面,建立有轨电车轨道合建结构模型,如图 3 所示。其中:有轨电车地下段模型由埋入式钢轨(含包覆材料)、浮置板、基础和两侧合建结构组成;有轨电车地面段模型由埋入式钢轨、普通轨道板和沿线整体结构组成。包覆材料的弹性模量为 3.5 MPa,泊松比为 0.5。分别对钢轨两侧设置有、无柔性包覆材料两种工况建模(见图 4)。

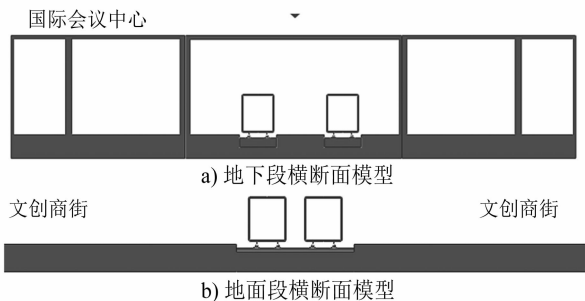


图 3 有轨电车轨道合建结构模型

Fig. 3 Models of tram track integrated structures

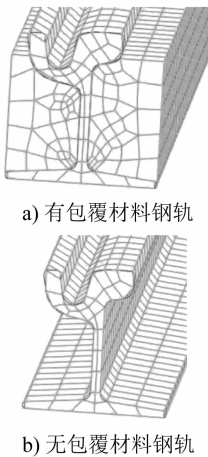


图 4 包覆材料建模

Fig. 4 Covering material modeling

### 1.3 轮轨激励源

根据有轨电车和实际线路条件建立有轨电车-轨道多体动力学模型。其中:列车速度为通过曲线路段的最高速度,曲线半径选取两个路段区域中的

最小曲线半径。由于有轨电车轨道几何不平顺谱尚未形成,这里引入轨道几何不平顺功率谱密度函数进行频域描述。设功率谱密度函数为 $S_x(\omega)$ ,其中 $\omega$ 为采样频率,则轨道几何不平顺可由下式进行模拟:

$$x(d)=\sum_{k=1}^NA_k\cos(\omega_kd+\varphi_k)\tag{1}$$

式中:

- $d$ ——沿里程 $x$ 方向的位移;
- $x(d)$ ——轨道几何不平顺空间样本序列;
- $k$ ——取样点;
- $N$ ——取样点总数;
- $A_k$ ——取样点 $k$ 处的不平顺幅值;
- $\omega_k$ ——取样点 $k$ 处的采样频率;
- $\varphi_k$ ——取样点 $k$ 处的相位,这里取 $[0,\pi]$ 上均匀分布的相互独立变量。

当上、下截止频率为 $\omega_u$ 和 $\omega_l$ 时,对于给定的功率谱密度 $S_x(\omega)$ ,满足以下关系式:

$$A_k^2=4S_x(\omega_k)\Delta\omega\tag{2}$$

其中:

$$\omega_k=\omega_l+\left(k-\frac{1}{2}\right)\Delta\omega$$
$$\Delta\omega=\frac{\omega_u-\omega_l}{N}$$

由此可以生成轨道沿列车运行方向的高低不平顺和左右方向偏差、左右股钢轨水平偏差以及轨距等随机轨道几何不平顺参数<sup>[5]</sup>。由计算获得的轮轨力如图 5 所示。将此轮轨激励作为输入的荷载条件,导入有限元模型中,计算结构振动及噪声情况。两个敏感点的轮轨力最大值如表 1 所示。

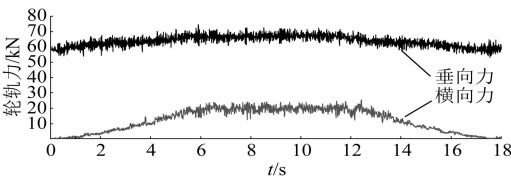


图 5 曲线外轨轮轨力

Fig. 5 Wheel-rail force of outer rail on curve line

表 1 敏感点轮轨力  
Tab. 1 Wheel-rail force at sensitive locations

工况截面	钢轨	曲线 全长/m	曲线 半径/m	超高/mm	仿真 长度/m	车速/(km/h)	轮轨 摩擦系数	垂向力极值/kN		横向力极值/kN	
								外轨	内轨	外轨	内轨
地下段	60R2 槽型轨	38.7	40.0	0	200.0	20	0.3	74.57	52.31	25.39	14.95
地面段	60R2 槽型轨	53.5	53.8	0	200.0	20	0.3	70.28	47.11	23.64	16.22

2 结果分析

2.1 地下段振动噪声

2.1.1 振动预测结果

1) 钢轨振动。通过计算获得的钢轨头部(以下简称“轨头”)垂向振动加速度级(以下简称“垂向加速度级”)  $L_a$  可以表示为:

$$L_a=20\lg(a/a_0)\tag{3}$$

式中:

- $a$ ——加速度有效值;
- $a_0$ ——基准加速度,  $a_0=1\times10^6\text{ m/s}^2$ 。

采用式(3)计算获得相应的垂向加速度级,地下段钢轨和轨头的垂向加速度级如图 6 所示。由图 6 可知,地下段钢轨安装柔性包覆材料前后,轨头垂向加速度级最大值分别出现在峰值频率为 231.5 Hz 和 221.6 Hz 处,其对应的峰值大小分别为 138.1 dB 和 145.5 dB,两者相差 7.4 dB,其分布规律变化不明显,这与包裹材料的有限弹性效果有关。两种工况下,其峰值频率均集中在 40.0~50.0 Hz 以及 200.0~

300.0 Hz 区间,并有多处峰值。

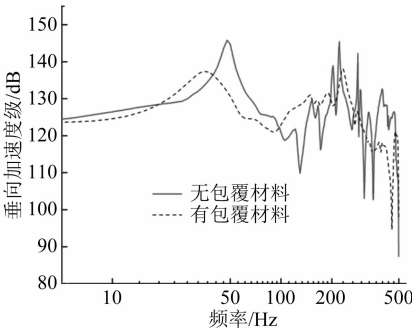


图 6 地下段钢轨垂向加速度级

Fig. 6 Rail vertical acceleration level in underground section

2) 合建结构振动。进一步提取由轮轨动荷载引起的合建结构振动,选取合建结构房间地面中点作为振动加速度采集点,每个房间各取 1 个点,如图 7 所示。两个建筑物的地面垂向加速度级频谱、垂向加速度最大峰值及其对应的频率如图 8 所示。

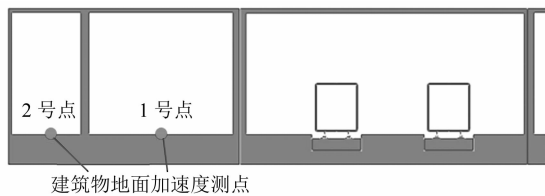


图7 地下段相邻房间地面加速度采集点

Fig. 7 Ground acceleration sampling locations of adjacent structures in underground section

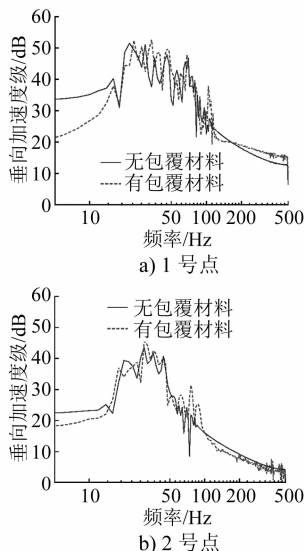


图8 地下段邻近建筑的地面垂向加速度级

Fig. 8 Ground vertical acceleration level of adjacent structures in underground section

由图8可知,地下段钢轨安装柔性包覆材料前后,合建结构垂向加速度级在采集点的分布规律变化不明显,靠近线路建筑物内(1号点)加速度级峰值频率为15.0~40.0 Hz,并有多处峰值。钢轨安装柔性包裹材料可以降低20.0~40.0 Hz频段的地面垂向加速度级,此时地面垂向加速度级最大值在峰值频率22.0 Hz处约为51.5 dB,相比于无柔性包裹材料时,浮置板加速度级最大值在峰值频率24.0 Hz处约为52.4 dB,峰值降低约0.9 dB。远离线路建筑物内(2号点)加速度级峰值频率也主要集中在15.0~40.0 Hz低频区间,并有多处峰值,在有、无柔性包裹材料情况下,钢轨地面垂向加速度级最大值出现在峰值频率22.9 Hz处,分别约为43.5 dB和45.5 dB,峰值降低约2.0 dB。

根据GB 10070—1988《城市区域环境振动标准》,混合区、商业中心区昼间垂向加速度级限值要求为75.0 dB,采用钢轨包覆材料后,两侧建筑物内垂向加速度级最大值为51.5 dB,符合要求。

由此可见,合建结构地面垂向加速度级随结构与振动源的距离增大而减小,振动频域分布在15.0~40.0 Hz;本线路条件下,钢轨安装柔性材料可以在一定程度上减小传播至合建结构的垂向加速度级(0.9~2.0 dB),主要集中在20.0~40.0 Hz频段。

### 2.1.2 噪声预测结果

1) 乘客站立位置噪声。考虑有轨电车沿线旁有乘客,其站立位置及高度作为噪声敏感点,即距离声源水平距离为2.5 m、垂向距离为1.6 m位置作为噪声数据采集点,如图9所示。

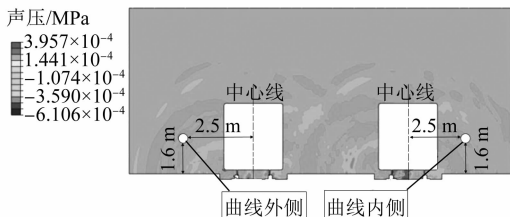


图9 地下段沿线噪声采集点和噪声分布

Fig. 9 Noise sampling locations and distribution along the underground section

提取噪声采集点位置的声压变化时程数据,转换为1/3倍频程并进行A计权修正,可以获得各工况下该点的SPL(声压级)分布,如图10所示。

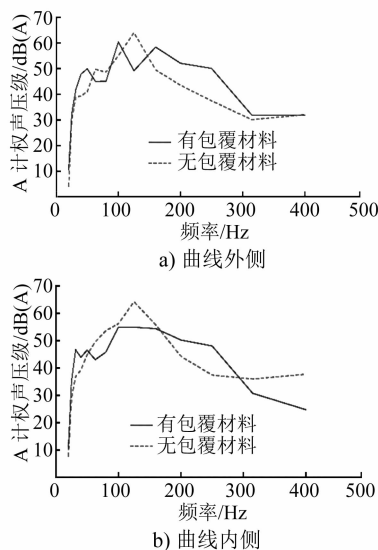


图10 曲线沿线噪声采集点的A计权声压级

Fig. 10 A-weighted SPL of noise sampling locations along the curve

由图10可知,地下段钢轨安装柔性包覆材料前后,轮轨噪声在乘客站立的噪声敏感位置分布规律不明显,主要峰值在1/3倍频程的100.0~125.0 Hz频段。本文线路条件下,安装柔性包覆材料可以降低

低 75.0~150.0 Hz 频段的噪声,曲线外侧和内侧的 A 计权声压级峰值分别较无柔性包裹材料时减小 3.5 dB(A)和 9.2 dB(A)。

根据 GB/T 14227—2006《城市轨道交通车站站台声学要求和测量方法》,限制等级为一级时,其限值为 80.0 dB(A),采用钢轨包覆材料后,该位置最大噪声为 60.4 dB(A),符合限值要求。

2) 合建结构内噪声。根据 JGJ/T 170—2009《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》,合建结构中声压采集点为每个房间中部,距离各自地面距离为 1.2 m,如图 11 所示。所获得的各工况下合建结构内的噪声分布如图 12 所示。

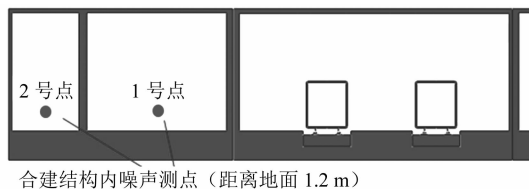


图 11 合建结构内噪声采集点

Fig. 11 Noise sampling locations in the integrated structures

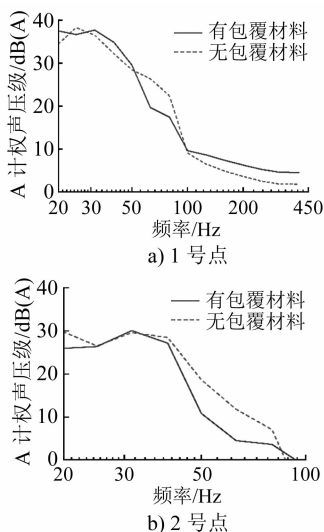


图 12 邻近线路建筑物内的 A 计权声压级

Fig. 12 A-weighted SPL in the buildings adjacent to the line

由图 12 可知,本文线路条件下,地下段钢轨安装柔性包覆材料前后,轮轨噪声在建筑物内声压采集点的分布规律未见明显区别,主要峰值在 1/3 倍频程的 25.0~31.5 Hz。有柔性包覆材料时,1 号点 A 计权声压级峰值较无柔性包覆材料时的最大值降低约 0.6 dB(A);2 号点 A 计权声压级峰值最大值较无柔性包覆材料时的峰值最大值增加

约 0.6 dB(A)。

根据 GB 3096—2008《声环境质量标准》,2 类区(混合区、商业中心区)昼间限值要求为 60.0 dB(A),采用钢轨包覆材料后,两侧建筑物内噪声最大值为 37.7 dB(A),符合规范要求。

综上所述,A 计权声压级随结构与振动源的距离增大而减小,噪声频域分布规律变化不明显。本文线路条件下,钢轨安装柔性包覆材料可以在一定程度上降低轮轨噪声传播(降低值小于 1.0 dB),主要降低 150.0 Hz 以下及 300.0 Hz 以上频段的噪声。

## 2.2 地面段振动噪声

### 2.2.1 振动预测结果

1) 钢轨振动。钢轨垂向振动加速度频谱、垂向加速度级的最大峰值及其对应的频率如图 13 所示。

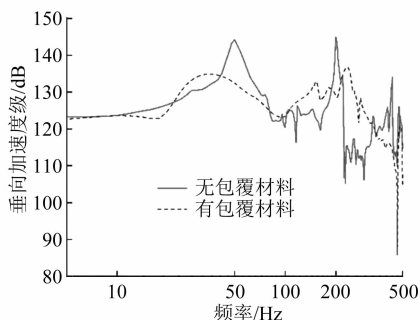


图 13 地面段轨头垂向加速度级

Fig. 13 Vertical acceleration level of rail head in ground section

由图 13 可知,地面段钢轨安装柔性包覆材料前后,轨头垂向加速度级分布规律变化不明显。有、无柔性包覆材料情况下,轨头垂向加速度级的最大值分别出现在峰值频率为 233.5 Hz 和 201.6 Hz 处,分别为 136.8 dB 和 144.4 dB,相差 7.6 dB,两种工况下的峰值频率均集中在 40.0~60.0 Hz 和 150.0~250.0 Hz 区间,并有多处峰值。

2) 沿线地面振动。选取距离有轨电车振动源横向水平距离分别为 5.0 m 和 10.0 m 的两个点,作为振动加速度采集点,如图 14 所示。

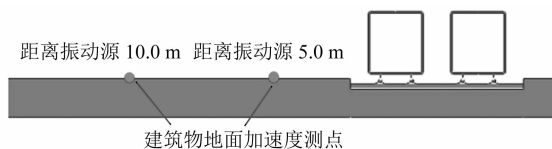


图 14 地面段的加速度采集点

Fig. 14 Ground acceleration sampling locations in ground section

由图 15 的地面段沿线横向一定距离的地面垂向加速度级可知,地面段钢轨安装柔性包覆材料前后,有轨电车沿线地面的垂向加速度级分布规律未见明显区别。距离振动源 5.0 m 的地面垂向加速度级峰值频率在 14.0~80.0 Hz 频段,并有多处峰值。有柔性包覆材料情况下,距离振动源 5.0 m 的地面垂向加速度级的最大值为 57.9 dB;无柔性包覆材料情况下,该位置地面垂向加速度级的最大值为 59.4 dB,两者峰值相差 1.5 dB。距离振动源 10.0 m 的地面垂向加速度级峰值频率也在 14.0~80.0 Hz 低频区间,并有多处峰值。有柔性包覆材料情况下,地面垂向加速度级的最大值为 46.2 dB;无柔性包裹材料情况下,浮置板垂向加速度级的最大值为 50.0 dB,两者峰值相差 3.8 dB。

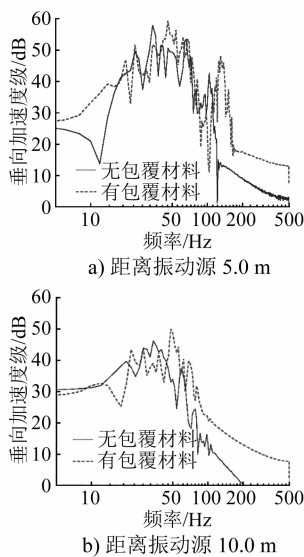


图 15 地面段沿线横向一定距离的地面垂向加速度级

Fig. 15 Ground vertical acceleration level with a certain lateral distance in ground section

根据 GB 10070—1988《城市区域环境振动标准》,混合区、商业中心区昼间振动加速度级限值要求为 75.0 dB,钢轨有柔性包覆材料情况下,线路两侧地面加速度级的最大值为 59.4 dB,符合要求。

### 2.2.2 噪声预测结果

考虑乘客站立位置作为噪声敏感点,即距离声源水平距离分别为 2.5 m 和 5.0 m、垂向高度为 1.6 m 位置,作为噪声数据采集点,如图 16 所示。

分别提取采集点位置(见图 16)的声压变化时程数据,转换为 1/3 倍频程并进行 A 计权修正,可以获得各工况下采集点的噪声分布,如图 17 所示。



乘客噪声敏感位置(距离振动源垂向 1.6 m)

图 16 地面段噪声采集点和噪声分布

Fig. 16 Noise sampling locations and distribution in ground section

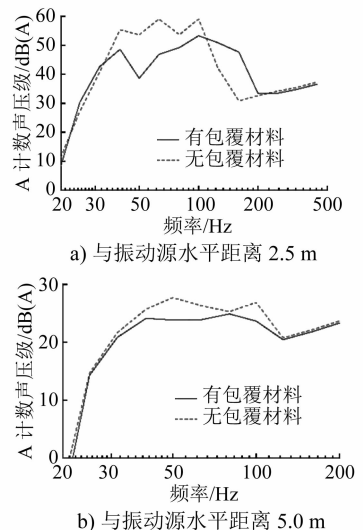


图 17 噪声采集点的 A 计权声压级

Fig. 17 A-weighted SPL at noise sampling locations

由图 17 可知,地面段钢轨安装柔性包覆材料前后,轮轨噪声在乘客站立的噪声敏感位置的分布规律无明显变化,主要峰值在 1/3 倍频程的 80.0~125.0 Hz,随着与振动源距离的增大而减小;有柔性包裹材料时,与振动源水平距离 2.5 m 采样点的 A 计权声压级峰值较无柔性包覆材料时减小 5.8 dB(A),水平距离 5.0 m 采样点的 A 计权声压级峰值较无柔性包覆材料时减小 2.0 dB(A)。

根据 GB/T 14227—2006《城市轨道交通车站站台声学要求和测量方法》要求,一级噪声限值为 80.0 dB(A),该位置最大噪声为 53.3 dB(A),符合限值要求。

## 4 结语

1) 地下小半径线路条件下,钢轨安装柔性包覆材料时,钢轨垂向加速度级降低约 7.4 dB,对轨道板和合建结构的振动分布规律影响较小,传播至合建结构的垂向振动加速度级降低约 0.9~2.0 dB,主要集中在 15.0~40.0 Hz 频段;减小曲线内外侧 A 计权

声压级峰值约 3.5~9.2 dB(A);对合建结构的噪声降低小于 1.0 dB(A)。

2) 地面小半径线路条件下,钢轨安装柔性包覆材料时,钢轨垂向加速度级降低约 7.6 dB,传播至沿线整体结构的垂向加速度级减小约 1.5~3.8 dB,主要集中在 14.0~18.0 Hz 频段;降低沿线噪声峰值约 2.0~5.8 dB(A)。

3) 安装钢轨柔性包覆材料前后,该线路振动噪声敏感点的垂向加速度级和声压级均符合规范限值要求。

本文研究仅限于包覆材料的性能参数,仅分析了新建线路中包覆材料良好情况下的有轨电车线路及其沿线结构的振动噪声特征。后续研究将对相应包裹材料和振动特性进行长期观测和实测,进而完善钢轨柔性包覆材料的效果评价,以进一步指导相关有轨电车线路的养护维修。

## 参考文献

- [1] 王平山,张善莉. 地铁运行引起的建筑室内振动研究及减振扣件性能评价[J]. 建筑结构,2013(13):1.

WANG Pingshan, ZHANG Shanli. Research on the subway-induced building vibration and evaluation on the performance of the damping fastener[J]. Building Structure,2013(13): 1.

- [2] MORIDPOUR S, HESAMI R. Degradation and performance specification of Melbourne tram tracks [C] // The 3rd International Conference on Transportation Information and Safety. New York: IEEE,2015:270.

- [3] 谢发明. 新型有轨电车嵌入式轨道力学性能分析[D]. 南昌: 华东交通大学,2018.

XIE Faming. Analysis of the mechanical properties of the new embedded track of tram [D]. Nanchang: Huadong Jiaotong University,2018.

- [4] 张田,杜飞,杨刚. 有轨电车引起的环境振动试验研究[J]. 噪声与振动控制,2018(增刊1): 541.

ZHANG Tian, DU Fei, YANG Gang. Experimental study on environmental vibration induced by streetcars [J]. Noise and Vibration Control,2018(S1): 541.

- [5] 韩义涛. 考虑轨道刚度不平顺时轮轨系统的动力特性分析[D]. 成都:西南交通大学,2006.

HAN Yitao. Dynamic analysis of wheel/rail system considering track stiffness irregularity [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2006.

(收稿日期:2022-03-23)

(上接第 244 页)

轨道的平顺度,还是路基的沉降控制,都完全达到了预期效果,乘客乘车的舒适度较高。

## 4 结语

本文从嵌入式连续支撑轨道、轨道路基一体化结构和装配式轨道与路基结构等 3 个方面,对有轨电车轨道路基结构近年来的快速化建造技术方案、特点和效果进行了阐述,分析了有轨电车的结构特点带来的技术新难点。现阶段的城市发展对快速性施工、绿色环保建造等提出了更高的施工要求,需在轨道路基结构设计与施工中不断探索,以减少施工对周边环境的影响,提高城市生活品质。

## 参考文献

- [1] 徐正和. 现代有轨电车的崛起与探索[J]. 现代城市轨道交通,2005(2):12.

XU Zhenghe. The emergence and exploration of modern trams [J]. Modern Urban Rail Transit,2005(2):12.

- [2] 薛美根,杨立峰,程杰. 现代有轨电车主要特征与国内外发展研究[J]. 城市交通,2008(6):88.

XUE Meigen, YANG Lifeng, CHENG Jie. Modern trams;

characteristic & development both at home and abroad[J]. Urban Transport of China,2008(6):88.

- [3] 王浩川,郭志方,方力,等. 对我国城市有轨电车技术发展的思考[J]. 城市轨道交通研究,2000(1):17.

WANG Haochuan, GUO Zhifang, FANG Li, et al. How to develop tramcar technology for Chinese cities[J]. Urban Mass Transit,2000(1):17.

- [4] 秦晓光. 现代有轨电车线路深厚软土地基一体化桩板结构沉降控制研究[J]. 城市轨道交通研究,2019(6):80.

QIN Xiaoguang. Settlement control of modern tram integrated pile-slab structure in deep soft soil foundation[J]. Urban Mass Transit,2019(6):80.

- [5] 黄爱军,王浩然. 深厚软土地区有轨电车轨下基础设计探讨[J]. 地下工程与隧道,2016(4):40.

HUANG Aijun, WANG Haoran. Discussion on foundation design of tramway in deep soft soil area [J]. Underground Engineering and Tunnels,2016(4):40.

- [6] 王浩然,张中杰. 有轨电车轨道与路基一体化结构板设计优化研究[J]. 城市轨道交通研究 2021(增刊2):33.

WANG Haoran, ZHANG Zhongjie. Optimal design on integrated structural plate of tram track subgrade [J]. Urban Mass Transit,2021(S2):33.

(收稿日期:2021-06-24)