

# 考虑声源非相干性的城市轨道交通 全封闭声屏障降噪预测

李秋彤<sup>1,2</sup>, 刘 艳<sup>1,2</sup>, 罗雁云<sup>3</sup>

(1. 上海材料研究所, 上海 200437; 2. 上海消能减震工程技术研究中心, 上海 200437;

3. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

**摘要:** 以某轨道交通全封闭声屏障为研究对象, 考虑简化线声源的非相干性, 建立 2.5 维边界元衍射声场模型; 通过现场沿线环境噪声测试, 验证了该模型的准确性, 并与相干源衍射声场预测结果比较; 最后预测了在近场高层建筑附近, 全封闭声屏障对近轨或远轨车辆噪声的降噪效果。研究结果表明, 非相干线声源更符合城市轨道交通噪声源特性; 对于轮轨噪声(315~1 000 Hz), 全封闭声屏障在高层住宅建筑区域有显著的降噪效果, 1/3 倍频程插入损失最大为 30.0 dB。对于低频噪声(50~250 Hz), 全封闭声屏障会加重高层住宅建筑区域的声压级, 使插入损失出现负值。针对高层建筑附近场点, 全封闭声屏障的顶端拱形透光板对远轨车辆噪声有更为显著的附加降噪效果, 大部分场点附加插入损失均高于 5.0 dB。

**关键词:** 城市轨道交通; 声屏障; 降噪预测; 边界元; 插入损失

中图分类号: U239.5; TB535+.1

文献标志码: A

## Noise Reduction Prediction of a Fully-Enclosed Sound Barrier in Urban Rail Transit Systems Considering Incoherence of Sources

LI Qiutong<sup>1,2</sup>, LIU Yan<sup>1,2</sup>, LUO Yanyun<sup>3</sup>

(1. Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Earthquake Energy Dissipation, Shanghai 200437, China; 3. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai, 201804, China)

**Abstract:** A 2.5-dimensional boundary element method (BEM) diffraction sound field model was established, by taking a rail transit fully-enclosed sound barrier as the research object and considering the incoherence of the simplified linear sound source. The accuracy of the model

was verified by field noise tests along an urban line, and the prediction results were compared with those of the coherent source diffraction sound field. Finally, at the positions of the high-rise buildings along the line, the noise reduction effects of the fully-enclosed sound barrier on the passing noise of near or far rail vehicles were predicted. The results show that the incoherent line sources are more in accordance with the characteristics of urban rail transit noise sources. The prediction results of their diffraction sound field are more consistent with the measured results. For wheel-rail noise (315 to 1 000 Hz), the fully-enclosed barrier has a considerable reduction effect at the area of the high-rise buildings, with the maximum 1/3 octave band insertion loss of 30.0 dB. For low-frequency noise (50 to 250 Hz), the fully-enclosed barrier enhances the sound pressure levels at the area of the high-rise buildings, leading to negative values of the insertion losses. For the receivers near high-rise buildings, the top-arched transparent panels of the fully enclosed sound barrier have a more significant additional noise reduction effect on the passing noise of far rail vehicles, and the additional insertion losses at most receivers are higher than 5.0 dB.

**Key words:** urban rail transit; noise barrier; noise reduction prediction; boundary element method; insertion loss

城市轨道交通的快速发展与建设运营, 在加速我国城市化发展进程的同时, 还会带来严重的沿线振动噪声污染问题。通常, 城市轨道交通列车运行速度约 50~70 km·h<sup>-1</sup>, 辐射噪声以轮轨噪声为主<sup>[1-6]</sup>。

收稿日期: 2021-10-08

基金项目: 上海市浦江人才计划(20PJ1417300); 上海张江国家自主创新示范区专项发展资金(ZJ2021-ZD-006)

第一作者: 李秋彤(1991—), 女, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通减振降噪。

E-mail: lqt910818@163.com

通信作者: 刘 艳(1985—), 女, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为轨道结构。E-mail: 15000600002@163.com



论文  
拓展  
介绍

王晨<sup>[7]</sup>在预测城市轨道交通高架线路噪声中建立简化模型,将轮轨辐射噪声简化为非相干的有限长偶极子声源;王奕然等<sup>[8]</sup>将轮轨噪声假设为有限长的非相干线声源,并认为其在近场中可近似为无限长的非相干线声源;Peters<sup>[9]</sup>采用非相干偶极子声源模拟轮轨噪声,发现其预测结果与实测结果具有很好的一致性;Hohenwarter<sup>[10]</sup>针对多种行驶中的轨道车辆进行近场测量,发现轮轨噪声具有非相干的偶极子声源特性。上述分析可以发现,城市轨道交通轮轨噪声具有非相干特征。

声屏障作为最重要的降噪措施之一,能够有效降低城市轨道交通噪声。为在有限时间内预测出声屏障的降噪效果,通常建立 2 维边界元声学分析模型,用于研究声屏障的降噪性能<sup>[11-20]</sup>。前期研究<sup>[21-22]</sup>通过缩尺模型试验验证,发现相干声场插入损失显著高于非相干声场结果。因此,线声源是否具有相干特征,直接影响对声屏障实际降噪性能的预测与评价。被认为降噪效果最优的全封闭声屏障,在有限的实际工程应用<sup>[23-26]</sup>中体现了其不俗的降噪效果。本文以某轨道交通全封闭声屏障为研究对象,考虑简化线声源的非相干性,建立 2.5 维边界元衍射声场模型;通过现场沿线场点测试,验证该模型的准确性;进而与相干声场预测结果比较,分频探究声源是否具有相干特征对评价城市轨道交通声屏障降噪效果的影响;最后预测在近场高层建筑附近,全封闭声屏障对近轨或远轨车辆通过噪声的降噪效果。

## 1 声屏障衍射声场

### 1.1 相干线声源辐射声场

首先定义二维声衍射问题,设声源坐标  $h(x_h, y_h)$ ,场点坐标  $b(x_b, y_b)$ ,将两者距离定义为  $r=|b-h|$ 。在均匀静止的介质中,声场区域  $D$  中(除声源  $h$ )给定场点  $b$  处的声压  $p(r)$  满足亥姆霍兹方程,即

$$\Delta p(r) + k^2 p(r) = 0 \quad (1)$$

式中: $k$  为波数,  $k=\omega/c$ ,  $\omega$  为角频率,  $c$  为声速。为完成问题的定义,必须给定边界条件,离散二维边界  $\partial D$ 。当边界不含吸声特性,为完全反射边界时,其边界声压法向导数为零,即

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (2)$$

式中: $n$  为法向单位向量。当边界条件包含吸声特性时,其声阻抗边界条件为

$$\frac{\partial p}{\partial n} + i k \beta_s p = 0 \quad (3)$$

式中: $\beta_s$  为表面  $s$  的声导纳比。

$$\beta_s(h, f) := \frac{Z_0}{Z_s(x, f)} \quad (4)$$

式中:若噪声在空气中传播,则  $Z_0$  为空气特性阻抗; $Z_s(b, f)$  为位于  $b$  处的边界表面  $s$  的声阻抗,是关于声波频率  $f$  的函数。在无穷远处,能量是从声源传播到无穷远位置,满足 Sommerfeld 条件,即

$$\frac{\partial p}{\partial r} - i k p = o\left(\frac{1}{r^{\frac{1}{2}}}\right) \quad (5)$$

二维实波数和虚波数的声源辐射声场则分别采用二维格林函数和其法向导数定义,单位幅值;全反射地面则采用虚源法<sup>[27]</sup>定义。

### 1.2 非相干线声源辐射声场

计算非相干线声源辐射声场,首先将声源定位于与声屏障长度方向( $z$  轴)平行的一条直线上,并假设为一组紧密排列互不相干的点声源,  $(x, y, z)$  为场点位置  $b$  的三维坐标,则该声源的声压幅值  $\gamma(z)$  可以用互相关函数表示为一个随机过程<sup>[14]</sup>,即

$$E(\gamma(z)\gamma^*(z+\epsilon)) = \eta(z)\delta(\epsilon) \quad (6)$$

式中: $\epsilon$  为随机位置的  $z$  轴坐标; $\eta(z)$  为互相关声压幅值,  $\eta(z) \geq 0$ ;  $\delta(\epsilon)$  为互相关相位差。位于  $h=(x_h, y_h, 0)$  的非相干线声源在自由声场中给定场点  $b=(x_b, y_b, z)$  处的声压表示为

$$p(b, h) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{ikr(z)}}{4\pi r(z)} \gamma(z) dz \quad (7)$$

式中: $r(z)=|b-h|$ 。声能密度的期望则可以表示为

$$W = E\left(\frac{|p(b)|^2}{4\rho c^2}\right) = \frac{1}{4\rho c^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\eta(z)}{(4\pi r(z))^2} dz \quad (8)$$

式中: $\rho$  为空气密度。采用 2.5 维边界元法计算包含吸声边界的边界元模型,需要将声导纳比针对目标频率逐一转换,即

$$\beta_s^* = \beta_s \sqrt{\frac{k^2}{k^2 - k_z^2}} \quad (9)$$

式中: $k$  为目标频率对应波数; $\sqrt{k^2 - k_z^2}$  为二维解复波数。假设  $\eta$  为常数,则非相干线声源经吸声型声屏障顶端衍射的场点声能密度,可通过逆傅里叶变换积分<sup>[14]</sup>得到场点声压为

$$W = \frac{\eta}{8\pi\rho c^2} \int_{-\infty}^{+\infty} |q(x, y, \sqrt{k^2 - k_z^2}, \beta_s^*)|^2 dk_z \quad (10)$$

式中: $q$ 为二维场点声压解; $\sqrt{k^2 - k_z^2}$ 为二维场点声压解的复波数。

## 2 全封闭声屏障衍射声场模型

### 2.1 辐射声源类型

以某城市轨道交通高架段全封闭声屏障为研究对象,在全封闭声屏障衍射声场模型中,考虑声源的非相干特征,在轮轨相互作用处,定义两条互不相干的非相干线声源,如图1圆圈所示,用以模拟轮轨噪声源。幅值为单位幅值,暂不考虑实测轮轨噪声源的频谱特性。若预测另一侧车辆通过的噪声辐射声场,则将非相干线声源确定在另一侧轮轨相互作用处,如图1三角所示。模型中仅考虑了轮轨噪声源,未考虑车致振动引起的桥梁结构及全封闭屏障结构二次辐射噪声。

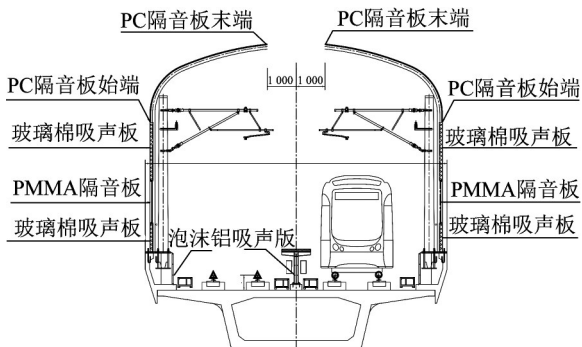


图1 某城市轨道交通高架段全封闭声屏障截面图(单位: mm)

Fig.1 Cross section of enclosed barrier in an urban rail transit (unit:mm)

### 2.2 声学边界条件

依据2.5维边界元法基本假设,假设桥梁结构和声屏障几何形态沿轨道长度方向不变,仅对截面外表面进行网格划分,如图2所示。在该边界元模

型中,考虑以下关键声学部件,依照表1,对它们进行简化处理。

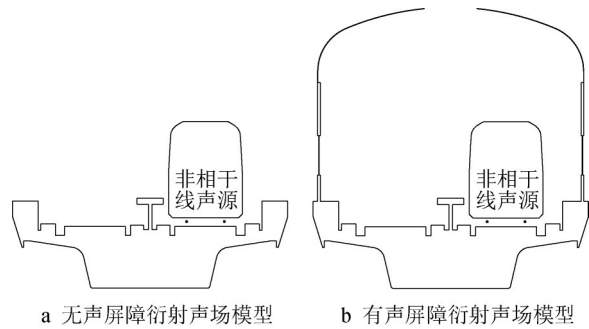


图2 衍射声场模型

Fig.2 Diffraction sound field models

### 2.3 降噪评价指标

假设实际隔声板分频隔声量均高于顶端衍射衰减量10 dB以上,不考虑透射声对声屏障插入损失的影响,则声屏障的插入损失 $L$ 定义为声屏障插入前后的声压级差值,即

$$L = 10 \lg \left| \frac{p_{w0}}{p_w} \right|^2 = 10 \lg \frac{W_{w0}}{W_w} \quad (11)$$

式中: $p_w$ 和 $p_{w0}$ 分别为非相干线声源辐射声场中有、无声屏障声学分析模型在给定场点处的声压级, $W_w$ 和 $W_{w0}$ 分别为非相干线声源辐射声场中有、无声屏障声学分析模型在给定场点处的声能密度,由公式(10)给出。

由于衍射声场模型中包含两条互不相干的非相干线声源,故计算插入损失时,需将两种线声源衍射声场的场点声压级叠加,即

$$L_{\text{tot}}(f) = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^N |p_{w0}(f, z_{si})|^2}{\sum_{i=1}^N |p_w(f, z_{si})|^2} \quad (12)$$

式中: $L_{\text{tot}}(f)$ 为叠加后的总插入损失; $p_w(f, z_{si})$ 和 $p_{w0}(f, z_{si})$ 分别为在有、无声屏障断面,位于 $z_{si}$ 的第 $i$

表1 边界材料构成及边界条件

Tab.1 Material compositions of boundaries and boundary conditions of boundaries

边界类型	边界构成	边界条件
开孔泡沫铝吸声板	4.0 mm 开孔泡沫铝板+50.0 mm 空腔+1.5 mm 背板	Zwikker-Kosten 微观结构模型+传递矩阵法 <sup>[28]</sup>
PMMA 透光隔声板	厚度 15.0 mm	全反射边界(纽曼条件)
PC 透光隔声板	厚度 6.5 mm	全反射边界(纽曼条件)
玻璃棉吸声板	厚度 60.0 mm, 内部填充 48 kgm <sup>-3</sup> 玻璃棉	Delany-Bazley 经验公式 <sup>[29]</sup>
桥梁结构	混凝土	全反射边界(纽曼条件)
车体结构	铝型材	全反射边界(纽曼条件)
地面	沥青	虚源法



个非相干线声源 $s_i$ 辐射声波至给定场点处 $z_{s_i}$ 的声压,即2.5维边界元数值解; $N$ 为非相干点声源数目,这里取2。

## 2.4 仿真预测结果与实测数据比较

图3展示了现场测试场点布置情况。测试传声器采用B&K4189,用支架固定在指定位置,采样频率为51.2 kHz。测试有、无声屏障断面的天气均为晴天,两次测量的气象条件没有显著差异。现场测试时,每组声压测量信号均重复10次以上,保证样本具有统计学代表性。

对比实测结果与非相干源衍射声场模型的预测结果发现,由图4可知,在50~63 Hz频段,实测插入损失

略高于计算的插入损失,且二者差值随距箱梁底板距离的减小而增大<sup>[30]</sup>,与上述分析相符;而80~125 Hz频段,低频实测插入损失近似等于甚至低于计算插入损失,可能是由于车致振动<sup>[31]</sup>引起的屏障结构辐射噪声过高,削弱了实际降噪量。由图4还可知,160~315 Hz频段,计算插入损失高于实测结果,是因顶部透光板厚度不足,隔声材料PC在该频段内的实际隔声量与屏障顶端绕射衰减量相当所致;400~800 Hz频段,计算插入损失与实测结果基本一致;1 000~2 000 Hz频段,计算插入损失高于实测结果,是由于侧面透光板在该频段内发生吻合效应所致;3 150~5 000 Hz频段,计算插入损失与实测结果基本一致。

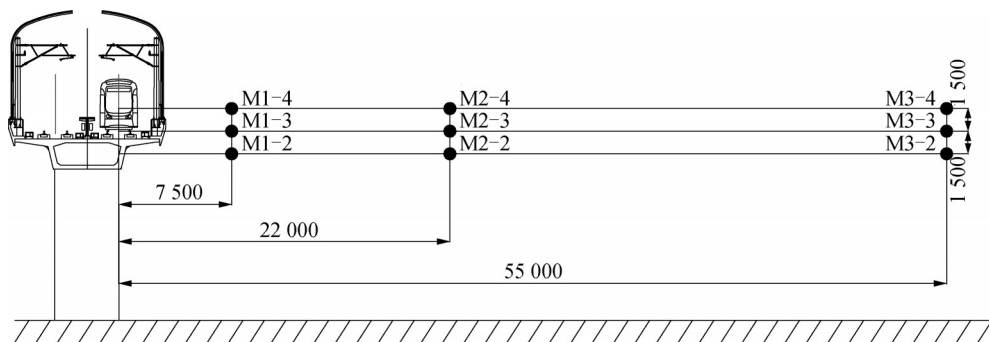


图3 现场测试场点位置(单位:mm)

Fig.3 Locations of receivers in in-situ measurement (unit: mm)

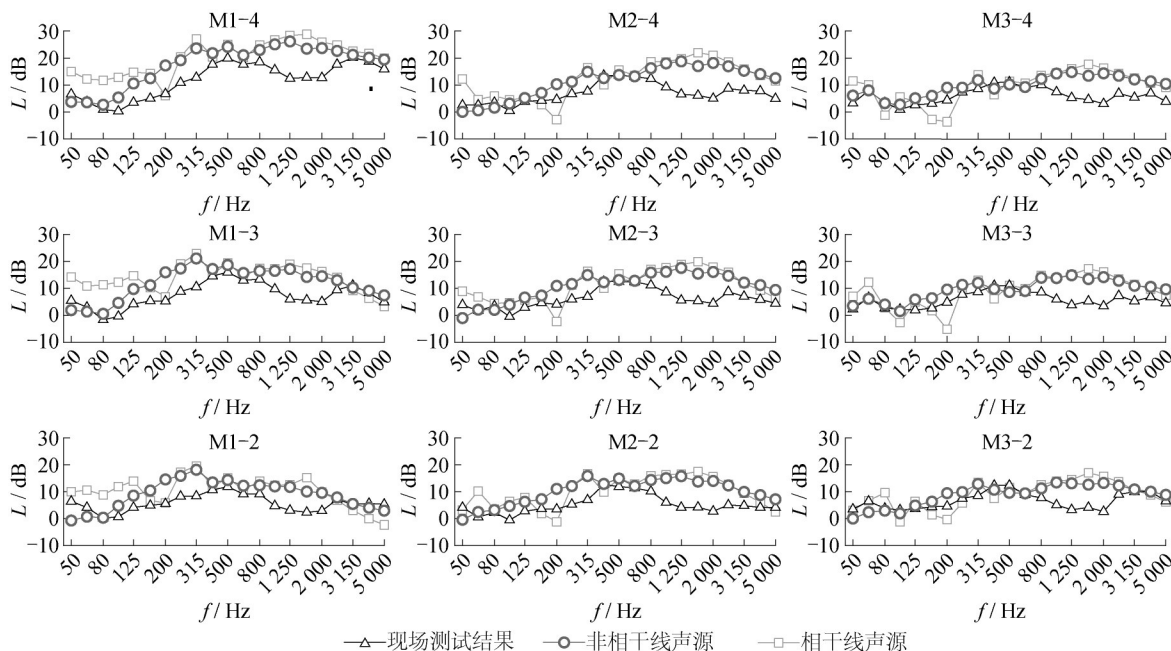


图4 非相干源衍射声场模型、相干源衍射声场模型的预测结果及现场测试结果比较

Fig.4 Comparison of in-situ results and numerical results simulated by the model for incoherent line sources and coherent line sources

由图4还可发现,在靠近声源区域,200 Hz以下低频段的计算插入损失显著高于实测结果10 dB左

右,与上述分析严重不符,无法有效模拟城市轨道交通声屏障的降噪效果;此外,相干源衍射声场预测结

果随频率变化波动很大,与实测较为平缓的频谱结果差异显著。

综上,相干线声源衍射声场模型无法准确有效模拟城市轨道交通声屏障的降噪效果;非相干线声源更符合城市轨道交通噪声源特性,其衍射声场模型可以更加合理有效地预测城市轨道交通声屏障的降噪效果,可推广到一般城市轨道交通声屏障降噪效果的研究中。

### 3 降噪效果预测

#### 3.1 预测工况的确定

城市轨道交通线路多建造在高层住宅建筑附近<sup>[32-35]</sup>,为了解全封闭声屏障对城高层住宅建筑的降噪效果,以层高3 m的高层建筑为例,确定场点位于

6~20层,距近轨线路中心线7.5、12.5和25.0 m,如图5所示。又因城市轨道交通高架桥型多为双线桥,故本文基于上述实验验证的非相干源衍射声场模型,改变车体结构边界及声源位置,分别预测全封闭声屏障对近轨及远轨车辆噪声的降噪效果。

#### 3.2 近轨车辆降噪效果预测

针对50~250 Hz低频噪声,由图6所见,较高的插入损失出现在200~250 Hz频段内,位于6~7层的插入损失高于15.0 dB,高于7层的插入损失在5.0~15.0 dB之间。虽然声屏障的主要设计作用频段在中高频,但该声屏障为全封闭构型,可使较长波长的低频区段在屏障内部多重反射而消耗声能量,可类比于二维亥姆霍兹共振腔,有效吸收低频噪声,故其低频降噪效果比较理想。

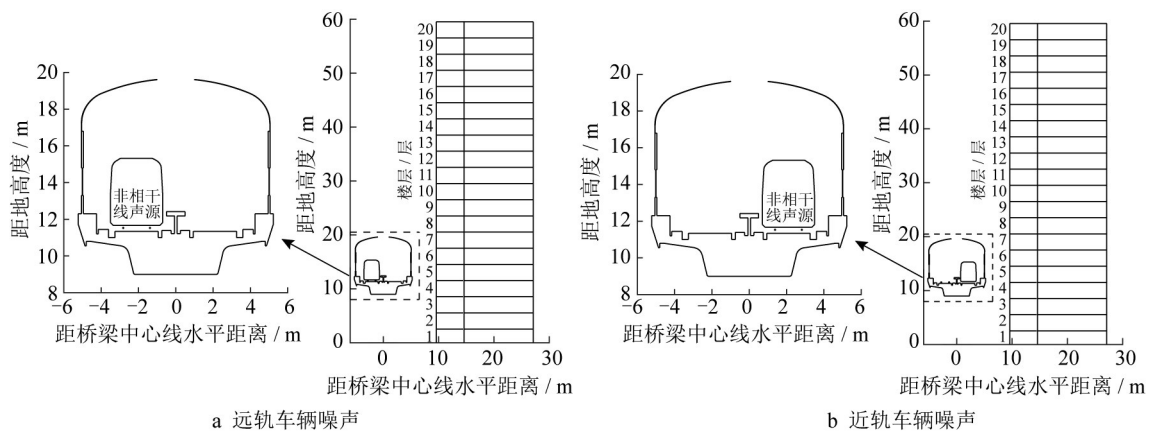


图5 预测工况的确定

Fig.5 Determination of predictive conditions

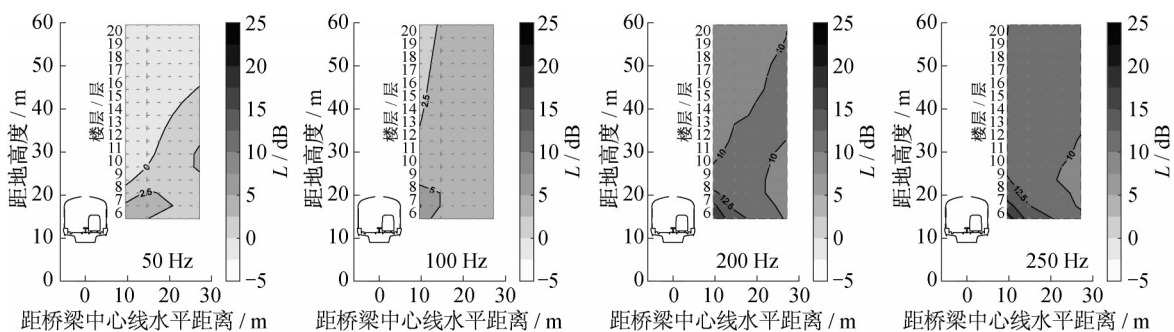


图6 高层建筑附近场点低频段(50~250 Hz)插入损失(近轨车辆噪声)

Fig.6 Insertion-losses of rail transit noise in low-frequency range (50 to 250 Hz) at receivers near high-rise buildings (near-vehicle noise)

针对315~1 000 Hz主要频段噪声,由图7所见,对于靠近线路的高层场点(6~7层),插入损失随频率增加而显著升高,其值高于20.0 dB。最大插入损失出现在1 000 Hz频段内,插入损失为30.0 dB。

由图8a可知,全封闭声屏障在靠近轨道交通的6~7层降噪效果显著,全频段(50~5 000 Hz)插入损失均高于15.0 dB,最高20.0 dB;高于7层的大部分场点位置,全封闭声屏障的降噪效果在5.0~15.0

dB之间。去掉顶部PC透光板后,屏障的插入损失没有显著降低,在6~7层的降噪效果也均高于12.5 dB(图8b),在高于7层的大部分场点位置也有2.5~10.0 dB的降噪量。通过计算有无顶部PC板的屏障

插入损失差值可知(图8c),顶端拱形PC透光板仅在靠近轨道的6~8层有2.5~5.0 dB的附加降噪效果,对于更高层场点位置的附加降噪效果并不显著,甚至在更高更远处出现负的附加降噪效果。

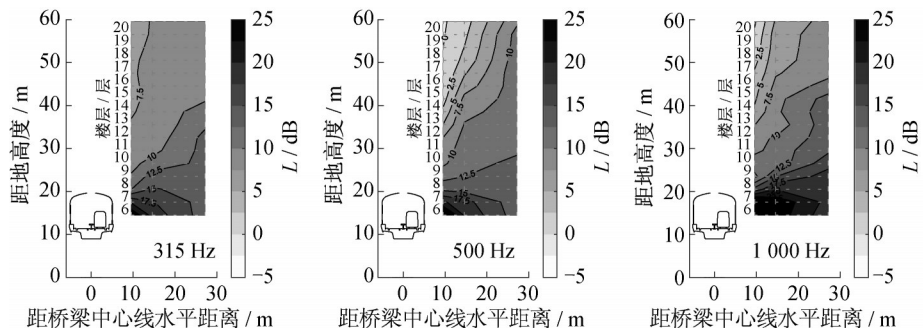


图7 高层建筑轮轨噪声主要频段(315~1 000 Hz)插入损失(近轨车辆噪声)

Fig.7 Insertion-losses of rail transit noise in predominant range (315 to 1 000 Hz) at receivers near high-rise buildings (near-vehicle noise)

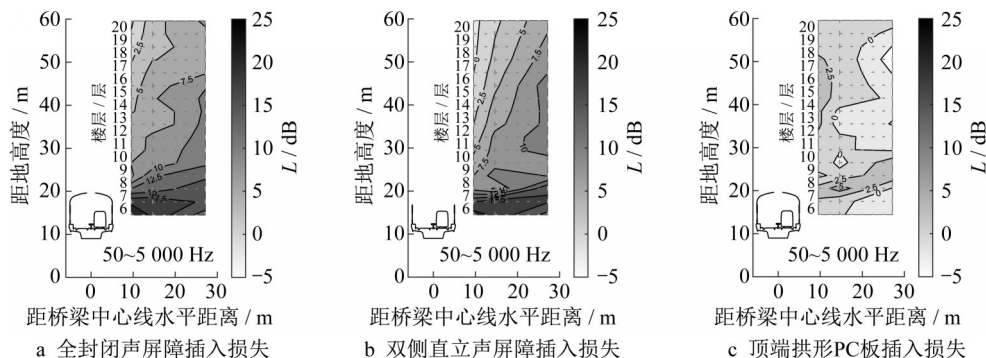


图8 高层建筑附近场点全频段(50~5 000 Hz)插入损失(近轨车辆噪声)

Fig.8 Insertion-losses of rail transit noise in whole range (50 to 5 000 Hz) at receivers near high-rise buildings (near-vehicle noise)

### 3.3 远轨车辆降噪效果预测

针对50~250 Hz低频噪声,由图9可知,全封闭声屏障并没有很好的降噪效果,反而会加重高层建筑处的低频噪声声压级。这是因为这一工况中的噪声源为远轨车辆噪声,靠近噪声源一侧的声屏障会

引起远轨车辆噪声多次反射,经由顶端开口向高层建筑一侧辐射,显著削弱低频插入损失。

针对315~1 000 Hz主要频段噪声,由图10可知,较高的插入损失出现在靠近线路的6~7层场点位置,为10.0~20.0 dB,值随频率增加而升高,最高

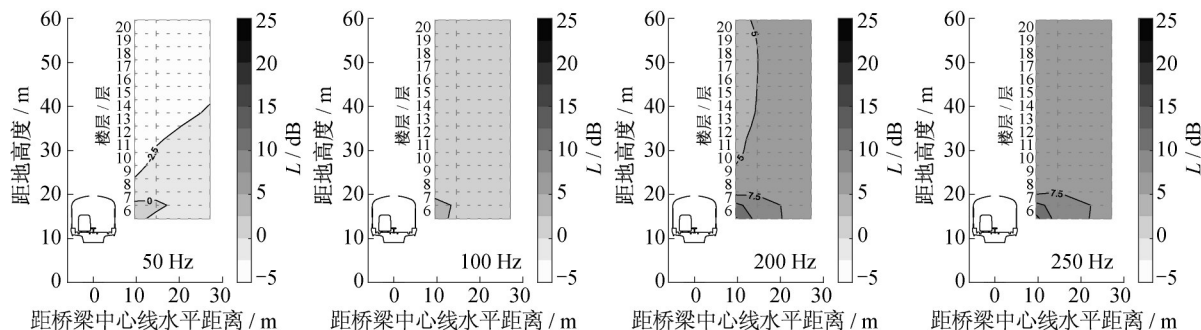


图9 高层建筑附近场点低频段(50~250 Hz)插入损失(远轨车辆噪声)

Fig.9 Insertion-losses of rail transit noise in low-frequency range (50 to 250 Hz) at receivers near high-rise buildings (far-vehicle noise)



插入损失出现在1 000 Hz频段。

由图11a可知,全封闭声屏障在靠近轨道交通的6~7层降噪效果显著,全频段(50~5 000 Hz)均高于10.0 dB;9~14层出现一个低于5.0 dB的插入损失带,是因远轨车辆噪声易通过顶端开口直达声场点所致;除该低插入损失带外,7层以上场点处的插入损失均在5.0 dB左右。去掉顶部PC透光板后,屏障的插入损失在6~7层的降噪效果没有显著变化,

但在7层以上所有场点处的降噪效果均有不同程度上的降低,大部分场点处出现负的插入损失(图11b)。通过计算有、无顶部PC板的屏障插入损失差值可知(图11c),顶端拱形PC透光板在全部高层建筑附近场点有显著的附加降噪效果,特别是在双侧直立屏障较差降噪效果的场点处(图11b 7层以上),大部分场点附加插入损失均高于5.0 dB。

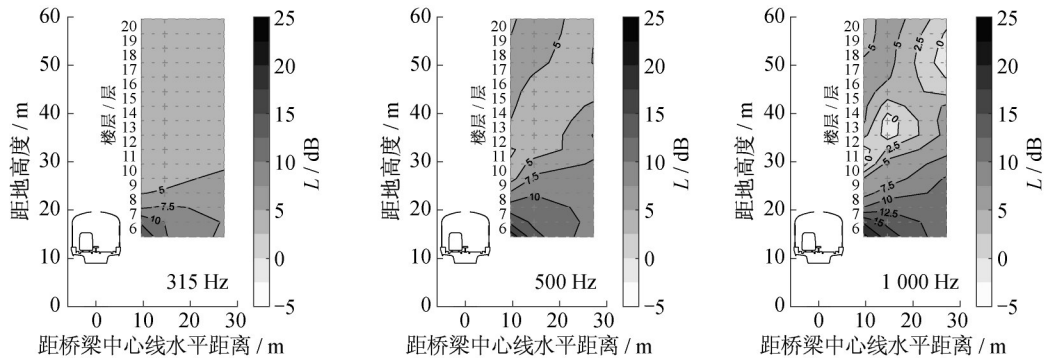


图10 高层建筑轮轨噪声主要频段(315~1 000 Hz)插入损失(远轨车辆噪声)

Fig.10 Insertion-losses of rail transit noise in predominant range (315 to 1 000 Hz) at receivers near high-rise buildings (far-vehicle noise)

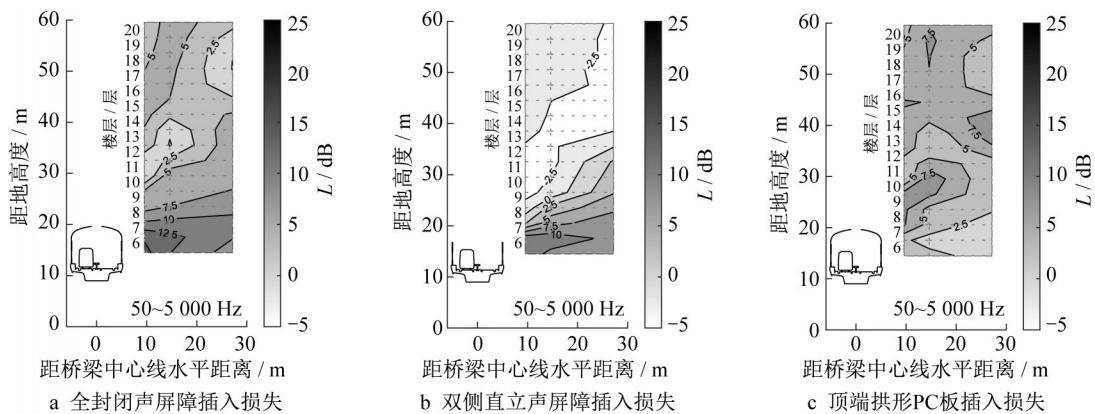


图11 高层建筑附近场点全频段(50~5 000 Hz)插入损失(远轨车辆噪声)

Fig.11 Insertion-losses of rail transit noise in whole range (50~5 000 Hz) at receivers near high-rise buildings (far-vehicle noise)

## 4 结论

(1)相干线声源衍射声场模型无法准确有效模拟城市轨道交通声屏障的降噪效果;非相干线声源更符合城市轨道交通噪声源特性,其衍射声场模型可以更加合理有效地预测城市轨道交通声屏障的降噪效果,可推广到一般城市轨道交通声屏障降噪效果的研究中。

(2)对于轮轨噪声(315~1 000 Hz),全封闭声屏

障在高层住宅建筑区域有显著的降噪效果,最大1/3倍频程插入损失为30.0 dB。对于低频噪声(50~250 Hz),全封闭声屏障会加重高层住宅建筑区域的声压级,使插入损失出现负值。为此,可通过优化设计构型,改善吸隔声板的吸隔声性能,提高其低频降噪能力。

(3)针对高层建筑附近场点,相较于无顶端拱形PC板的双侧直立屏障结构,全封闭声屏障的顶端拱形PC板对近轨车辆噪声的附加降噪效果并不显著,

但对远轨车辆噪声有显著的附加降噪效果,大部分场点附加插入损失均高于 5.0 dB。由此表明,在声屏障设计中,应综合考虑多种辐射噪声工况的降噪效果。

#### 作者贡献声明:

李秋彤:研究概念生成,数据整理与管理,试验数据分析,试验方法设计,软件开发与程序设计,论文初稿撰写,论文审阅与修订。

刘 艳:研究项目管理。

罗雁云:研究课题监管与指导

#### 参考文献:

- [1] ZHANG X. The directivity of railway noise at different speeds [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010. DOI: 10.1016/j.jsv.2010.07.003.
- [2] THOMPSON D J. Wheel-rail noise generation, part I: introduction and interaction model [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1993. DOI:10.1006/jsvi.1993.1082.
- [3] 刘扬, 温志伟, 程明昆. 城市轨道交通噪声预测模式的研究及其应用[J]. *都市快轨交通*, 1998, 4:32.  
LIU Yang, WEN Zhiwei, CHENG Mingkun. Research and application of prediction model of urban rail transit noise [J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 1998, 4:32.
- [4] 翟国庆, 张邦俊, 过春燕. 城市高架轨道交通沿线声场分布计算模型[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(3):320.  
ZHAI Guoqing, ZHANG Bangjun, GUO Chunyan. The calculating model of sound field distribution along the urban elevated railway [J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(3):320.
- [5] 朱彦, 陈光治, 林常明. 城市高架轨道桥辐射噪声的计算与分析[J]. *噪声与振动控制*, 2005, 25(3):37.  
ZHU Yan, CHEN Guangye, LIN Changming. Numerical prediction and analysis of radiated noise from viaduct of city [J]. *Noise and Vibration Control*, 2005, 25(3):37.
- [6] 刘鹏辉, 杨宜谦. 城市轨道交通微穿孔板式声屏障的设计 [C]//*噪声与振动控制*. 北海:中国声学学会, 2009:320 - 324.  
LIU Penghui, YANG Yiqian. Design of sound barrier based on micro-perforated panel absorber for urban transit [C]//*Prediction and Control of Transportation Noise*. Beihai: The Acoustical Society of China, 2009: 320 - 324.
- [7] 王晨. 城市轨道交通高架线路噪声预测简化模型的建立及验证[J]. *城市轨道交通研究*, 2019, 8:153  
WANG Chen. Establishment and validation of simplified noise prediction model for urban rail transit elevated line [J]. *Urban Mass Transit*, 2019, 8: 153.
- [8] 王奕然, 孙京健. 北京地铁 5 号线声屏障工程的设计与研究 [J]. *铁道标准设计*, 2007 (10):26.  
WANG Yiran, SUN Jingjian. Design and research of the sound barrier project of Beijing metro line 5 [J]. *Railway Standard Design*, 2007 (10):26.
- [9] PETERS S. The prediction of railway noise profiles [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1974, 32(1): 87.
- [10] HOHENWARTER D. Railway noise propagation models [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, 141(1): 17.
- [11] 何宾. 高速铁路声屏障声学设计、优化及试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.  
HE Bin. Acoustic design, optimization and experimental study of high-speed railway sound barrier [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [12] MURADALI A, FYFE K R. A study of 2D and 3D barrier insertion loss using improved diffraction-based methods [J]. *Applied Acoustics*, 1998. DOI: 10.1016/s0003-682x (97) 00040-6.
- [13] SEZNEC R. Diffraction of sound around barriers: use of the boundary elements technique [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1980. DOI:10.1016/0022-460X(80)90689-6.
- [14] DUHAMEL D. Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996. DOI:10.1006/jsvi.1996.0548.
- [15] KOUSSA F, DEFRANCE J, JEAN P, *et al.* Acoustic performance of gabions noise barriers: numerical and experimental approaches [J]. *Applied Acoustics*, 2013. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.07.009.
- [16] FORSSÉN J, ESTÉVEZ-MAURIZ L, TOREHAMMAR C *et al.* A low-height acoustic screen in a setting with an urban road: measured and predicted insertion loss [C]//*Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future*. Hamburg: Institute of Noise Control Engineering, 2016:3858-4854.
- [17] HIROE M, KOBAYASHI T, ISHIKAWA S. 2.5-dimensional finite-difference time-domain analysis for propagation of conventional railway noise: application to propagation of sound from surface railway and its verification by scale model experiments [J]. *Acoustical Science and Technology*, 2017. DOI:10.1250/ast.38.42.
- [18] ISHIZUKA T, FUJIWARA K. Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions [J]. *Applied Acoustics*, 2004. DOI:10.1016/j.apacoust.2003.08.006.
- [19] BAULAC M, DEFRANCE J, JEAN P, *et al.* Efficiency of noise protections in urban areas: predictions and scale model measurements [J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2006, 92(4):530.
- [20] HOTHERSALL D C, CROMBIE D H, CHANDLER-WILDE S N. The performance of t-profile and associated noise barriers [J]. *Applied Acoustics*, 1991. DOI: 10.1016/0003-682X(91)90075-P.
- [21] LI Q, DUHAMEL D, YIN H, *et al.* Comparative analysis of different types of sources on the performance of rigid noise barriers on rigid ground using analytical formulae, a 2.5-D BEM method and scale modelling tests [J]. *Acta Acustica*



- United with Acustica*, 2019. DOI:10.3813/AAA.919380.
- [22] LI Qitong, DUHAMEL Denis, LUO Yanyun, *et al.* Analysing the acoustic performance of a nearly-enclosed noise barrier using scale model experiments and a 2.5-D BEM approach[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 158: 107079.1
- [23] 李建平, 何金龙. 北京市轨道交通房山线声屏障设计的声学模拟[J]. *铁道标准设计*, 2011 (1):1.  
LI Jianping, HE Jinlong. Acoustic simulation of sound barrier design of Fangshan line of Beijing rail transit [J]. *Railway Standard Design*, 2011 (1):1.
- [24] 沈彬. 某轨道交通声屏障工程深化设计方案[J]. *城市道桥与防洪*, 2019(4):214.  
SHEN Bin. The deepening design of a rail transit sound barrier project [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2019 (4):214.
- [25] 马娜. 上海轨道交通6号线全封闭声屏障工程设计[J]. *现代城市轨道交通*, 2010 (5):38.  
MA Na. Design of fully enclosed sound barrier for Shanghai rail transit line 6[J]. *Modern Urban Transit*, 2010 (5):38.
- [26] 马娜. 上海轨道交通明珠线二期全封闭声屏障工程设计[J]. *现代城市轨道交通*, 2005 (3): 41.  
MA Na. Design of fully enclosed sound barrier for Shanghai Mingzhu line[J]. *Modern Urban Transit*, 2005 (3): 41.
- [27] LI K M, WONG H Y. A review of commonly used analytical and empirical formulae for predicting sound diffracted by a thin screen [J]. *Applied Acoustics*, 2005. DOI: 10.1016/j.apacoust.2004.06.004.
- [28] 张江涛. 泡沫金属吸声性能的优化研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013.  
ZHANG Jiangtao. Optimization on sound absorption behavior of metal foam [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [29] DELANY M E, BAZLEY E N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials [J]. *Applied Acoustics*, 1970, 3 (2):105.
- [30] 李小珍, 聂骏, 郭镇, 等. 钢弹簧浮置板轨道对箱梁振动声辐射的影响研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(13):34.  
LI Xiaozhen, NIE Jun, GUO Zhen, *et al.* Effects of steel spring floating slab track on vibration and sound radiation of a box-girder [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38 (13):34.
- [31] 张小安, 翟婉明, 石广田, 等. 城市轨道交通直壁式声屏障车致振动噪声研究[J]. *兰州交通大学学报*, 2019, 38(1):78.  
ZHANG Xiaoan, ZHAI Wanming, SHI Guangtian, *et al.* Structure noise of straight-wall noise barrier in urban rail transit [J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2019, 38(1):78.
- [32] 孙涛. 城市交通噪声对高层建筑的影响及声屏障优化设计研究[J]. *环境科学与管理*, 2015 (8):62.  
SUN Tao. Study on impact of traffic noise and optimization design of sound barrier for high-rise buildings [J]. *Environmental Science and Management*, 2015 (8):62.
- [33] 栗健. 城际铁路单侧高层建筑物声屏障形式设计研究[J]. *铁道标准设计*, 2014, 58(7): 153.  
LI Jian. Design study on the type of sound barrier for protecting high-rise buildings along single side of intercity railway [J]. *Railway Standard Design*, 2014, 58(7): 153.
- [34] 蒋鑫. 高铁城市范围单侧高层建筑特殊声屏障声学研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.  
JIANG Xin. Acoustic research on special sound barriers for unilateral high-rise buildings along high-speed railways in urban area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [35] 李杰. 交通噪声对城市高层住宅声环境影响研究[D]. 西安:长安大学, 2009.  
LI Jie. Study of the traffic noise impact on urban high-rise residential acoustic environmental [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.