文章编号：1006-1355(2018)05-0139-07

近轨低矮声屏障降噪效果影响因素分析

徐圣辉[1]，周 信[2]，陈 辉[1]，肖新标[2]

（1. 西南交通大学 材料科学与工程学院，成都 610031；
2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，成都 610031）

摘 要：针对城轨交通近轨低矮声屏障，为了量化分析其降噪特性和效果，以对称点声源模拟轮轨声源，考虑车体和轨道结构的空间几何构型及声学边界特性，采用声学边界元法，建立城轨列车车外噪声预测分析模型，对有无声屏障以及不同吸声处理方式下的空间声场响应进行对比分析。研究结果表明：对标准评价点（距轨道中心线7.5 m远，距轨面1.2 m高），0.25 m高直立型无吸声声屏障的插入损失为－1.7 dB(A)；若其高度每增加0.25 m，插入损失将增加0.4 dB(A)～2.9 dB(A)；若在1.0 m高直立型无吸声声屏障的屏体内侧以及轨道增设吸声边界条件，插入损失增加6.1 dB(A)；若对 1.0 m高直立型无 吸声声屏障增设Y头型，插入损失将增加2.7 dB(A)。相关研究可为城轨交通减振降噪提供科学指导。

关键词：声学；近轨低矮声屏障；降噪效果；插入损失；频谱特性

中图分类号：TB53；O42；TU112 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2018.05.025

Analysis of the Factors Affecting Noise Reduction of Near-rail Low-height Noise Barriers

XU Shenghui [1], *ZHOU Xin* [2], *CHEN Hui* [1], *XIAO Xinbiao* [2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract : In order to quantitatively analyze the noise reduction characteristics and the effects of near-rail low height noise barriers, the symmetrical point sound sources are used to simulate the wheel-rail sound sources. Considering the spatial geometrical configuration and acoustic boundary characteristics of the vehicle’s body and the track structure, the acoustic boundary element method is used to establish the vehicle’s exterior noise prediction model, and the spatial sound field responses under the conditions of with or without sound barriers and with different sound absorption treatments are compared and analyzed. The results show that the insertion loss of 0.25 m high vertical sound barrier without sound absorption is −1.7 dB(A) at the standard evaluation point (7.5 m away from the track centerline, 1.2 m high from the track surface). Every 0.25 m increase of the height of the sound barrier will cause 0.4 dB(A)-2.9 dB(A) insertion loss. If the sound absorbers are added to the interior side of the 1.0 m high vertical no-absorption barrier as well as to the track structure, the insertion loss will increase by 6.1 dB(A). If the Y-head is added to the 1.0 m high vertical no-absorption sound barrier, the insertion loss will increase by 2.7 dB(A). The related research results can provide a scientific guidance for urban rail transit vibration and noise reduction.

Keywords : acoustics; near-rail low height noise barrier; noise reduction effect; insertion loss; spectral characteristics

城市轨道交通的发展为人们提供了一种方便快捷、舒适安全、清洁节能的出行方式。然而，由于城市轨道交通工程结构的特殊性，其产生的噪声对周边居民的生活造成了一定的影响。因此，对城市轨道交通减振降噪措施的研究越来越受到重视，而声屏障作为隔离噪声最主要的措施之一，能够有效地在噪声的传播过程中将其削弱，因此受到世界各国的广泛使用。

传统声屏障虽然能够有效降低轨道交通产生的噪声，但是其较高的高度遮挡了司机和乘客的视线，影响了城市的美观，并且其制造和维护成本较高，安

收稿日期：2017-11-02
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U1434201，51475390)
作者简介：徐圣辉(1994-)，男，江苏省扬州市人，硕士研究生，目前从事轨道交通振动与噪声研究。
E-mail: shenghui_xu@163.com
通信作者：肖新标，男，副研究员，硕士生导师。
E-mail: xinbiaoxiao@163.com

全性能较低[1]。城市轨道交通的噪声主要为列车运行时的轮轨噪声[2]，而近轨低矮声屏障更加靠近噪声源，因此能够更好地降低噪声[3]。另一方面，声屏障顶部头型的设置能够增加声屏障的等效高度[4]，对低矮声屏障的降噪效果有一定的增益作用。

在捷克共和国，名为BRENS® BARRIER的低矮声屏障已经被应用在两段铁路沿线：第一条于2013年初在布拉格建成使用，它的建成使噪声降低了6.5 dB；第二条于2013年底在布鲁尔投入使用[1]。在瑞典首都斯德哥尔摩，P Čížková等现场测试了低矮吸声声屏障与喷泉分别对公园声场的影响，试验结果表明低矮声屏障对于公园声场的改善效果好于喷泉[5]。在中国上海，刘振鹏等基于低矮声屏障的降噪方案，在上海轨道交通宝山线的上、下行线之间安装了具有双面吸声性能的隔声屏障，并取得了较好的降噪效果[6]。

国内对于轨道交通声屏障的研究与应用多集中于高度不低于2 m的传统声屏障，对低矮声屏障的研究较少。近轨低矮声屏障的高度虽不及传统声屏障，但是因其更加靠近轨道，对于轮轨噪声有更好的降噪效果，并且可以通过增设头型以增加近轨低矮声屏障的等效高度以获得更好的降噪效果，因此近轨低矮声屏障具有很好的研究意义以及应用前景。

为丰富国内对于低矮声屏障的研究，本文以高架上运行的地铁为研究对象，建立了相应的边界元计算模型。通过改变近轨低矮声屏障的高度、顶部头型以及吸声材料设置，研究不同工况对于其降噪效果的影响。此外，本文增设轨道吸声，研究轨道吸声处理对于城市轨道交通噪声的降噪效果。

1 模型介绍

采用二维边界元法计算声屏障插入损失，因为边界元法能够考虑任意截面形状的声屏障、车辆外形、地面条件和吸声系数。假设户外声场为二维模型，对应于三维模型，该计算声场包括无限长声屏障和平行于声屏障的无限长相干线声源，声屏障截面形状及地面条件等要长度方向是均匀一致的。HOTHERSALL[3]和OKUBO[7]认为在对二维和三维模型下声屏障对点声源的降噪效果进行分析是计算误差在可接受范围内；朱彦认为对于噪声不便于测试的高架桥这样大型结构, 边界元方法能够有效预报噪声场, 高架桥两侧声屏障可以取得5 dB～10 dB的隔声效果[16]；MORGAN[18]等仅考虑滚动噪声，认为将声源考虑成单机子或偶极子声源，对声屏障插入损失影响非常小。

1.1 计算参数介绍

预测模型中包括吸声边界条件、声源、轨道几何结构等参数，利用间接边界元法计算声场中的声压。

计算中取空气密度 $\rho = 1.21\ \mathrm{kg/m^3}$，空气中声速 $c = 344\ \mathrm{m/s}$。

对于线性边界元模型，所有单元的长度需小于计算频率的最短波长的六分之一[17]，因本文噪声计算的单元采用线性单元，且计算频段为100 Hz～5 000 Hz，故设置单元长度为0.006 m，满足

$$0.006\ \mathrm{m} < \frac{344\ \mathrm{m/s}}{6 \times 5\,000\ \mathrm{Hz}} \tag{1}$$

1) 吸声边界条件

通用声屏障的吸声系数可以在混响室中测得，然而边界元计算中的吸声特性是通过阻抗来体现的，因此需要将吸声系数转化为阻抗。依据吸声系数定义[9]

$$\alpha_\theta(f) = 1 - \left| \frac{Z\cos(\theta) - \rho_0 c}{Z\cos(\theta) + \rho_0 c} \right| \tag{2}$$

其中：θ为入射角，Z为声阻抗率，$\rho_0 c$为空气特性阻抗。为简化转化过程，将混响吸声系数等同为法向吸声系数，即取$\theta = 0$。

根据Attenborough[10]提出的双参数阻抗模型

$$Z = 0.436(1+i)\sqrt{\frac{\sigma_e}{f}} + 19.74i\frac{\alpha_e}{f} \tag{3}$$

其中：σ_e为材料的特性流阻，α_e为多孔材料孔径变化率，f为频率。

通过调整式中的σ_e和α_e来改变声屏障吸声表面的阻抗的实部和虚部，以获得与混响室测得的吸声系数等效。1/3倍频程中心频率的吸声系数如表1所示。

表1 吸声系数

频率/Hz	吸声系数	频率/Hz	吸声系数
100	0.17	800	0.83
125	0.16	1 000	0.96
160	0.38	1 250	0.86
200	0.41	1 600	0.92
250	0.74	2 000	0.88
315	1.0	2 500	0.85
400	0.88	3 150	0.84
500	0.71	4 000	0.85
630	0.72	5 000	0.90

在本文中，吸声边界条件主要设置在声屏障屏体内侧以及轨道板处，以研究屏体吸声、轨道吸声对于轨道交通噪声的降噪效果。

2) 声源设置

城市轨道交通的低频成分（＜250 Hz）主要由桥体结构振动辐射产生，而轮轨噪声是较高频（250～2 000 Hz）噪声的主要来源[19]。本文主要研究较高频噪声，因此采用时速60 km/h下的轮轨噪声作为噪声源。

轮轨噪声的噪声源可视为位于轨道中心线上方、高出轨面0.25 m的由连续互不相干的偶极子组成的无限长线声源[20]。图1给出了轨道交通在60 km/h运行速度下声暴露级的频谱特型。本文在内外车轮中心外侧（距轨面0.42 m高）均设置一点声源，以模拟轮轨噪声源。

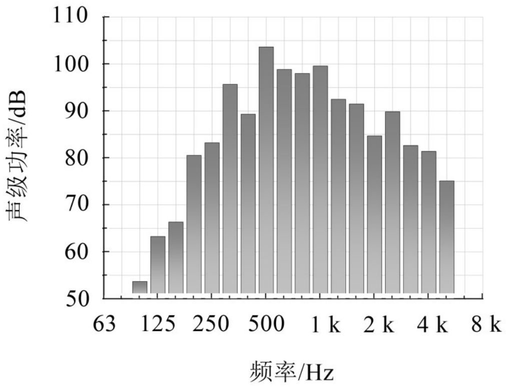


图1 轨道交通声源频谱特性

3) 车辆和轨道几何参数

本文采用某B型地铁列车进行计算，车体外侧最大宽度为2.8 m，车顶距轨面高度为3.8 m，地板面距轨面高度为1.1 m。我国地铁轨道除了隧道之外还有高架桥。计算模型中，桥面宽9.3 m，轨道表面与地面垂直距离为8.5 m，近轨低矮声屏障与轨道中心线水平距离为2.5 m，满足CJJ 96-2003《地铁限界标准》关于B型区间直线地段高架双线建筑限界的要求。为了获得更加精确的计算结果，模型中考虑了轨道对声辐射有影响的结构，且考虑地面为刚性条件。边界元计算几何模型如图2所示。

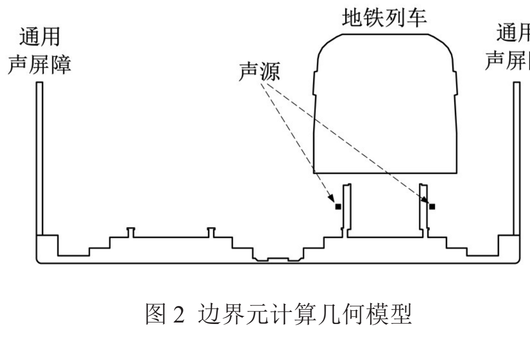


图2 边界元计算几何模型

1.2 评价点设置

根据GB12525-1990《铁路边界噪声限值及其测量方法》和ISO3095《Acoustics-Railway Applications-Measurement of noise emitted by railbound vehicles》等相关标准制定了预测方法。在与轨道线垂直的断面布置了7个评价点，分别标记为M1－M7。评价点具体位置如图3所示。其中评价点M1布置于轨面中心位置，M2、M3、M5评价点根据ISO3095标准布置，评价点M7根据GB12525-1990标准布置。

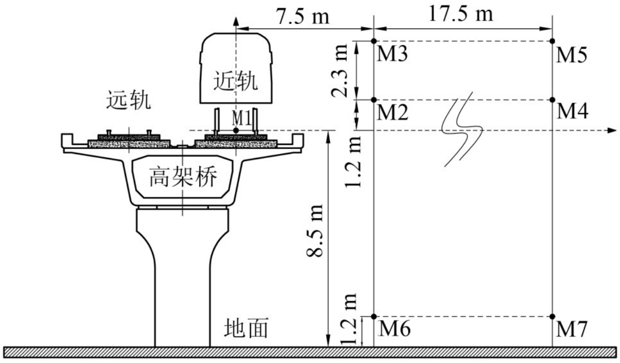


图3 评价点布置示意图

1.3 计算工况

现有研究表明，增加声屏障高度、在顶部设置头型或者设置吸声条件可以有效提高声屏障的降噪效果。利用上文建立的城市轨道交通近轨低矮声屏障降噪效果预测模型，对不同高度、头型以及吸声条件的声屏障进行计算对比，寻找降噪效果优秀的声屏障形式。

针对国内外现有的几种声屏障形式，选取了倒L型、T型和Y型3种声屏障头型，如图4所示。

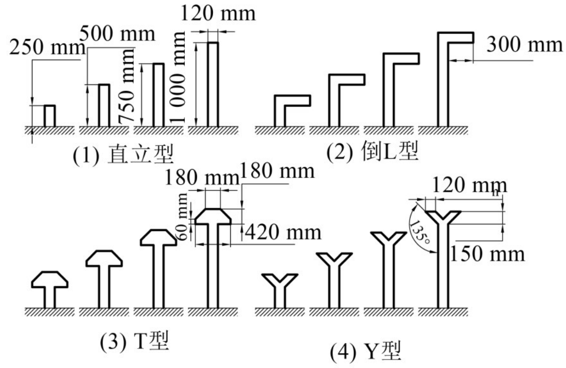


图4 不同声屏障形式

本文主要计算近轨低矮声屏障的降噪效果，分别计算了0.25 m、0.5 m、0.75 m、1.0 m高，有无吸声条件下的插入损失，并与直立型声屏障进行降噪性能对比。对于吸声声屏障，吸声条件施加在朝向轨道的屏体直立部分，不同声屏障的吸声系数均与直立型一致。

此外，本文还将分析增设轨道吸声条件对于降噪效果的影响，轨道位置增设吸声条件如图5所示，其中黑色加粗部分为轨道增设吸声条件的位置。

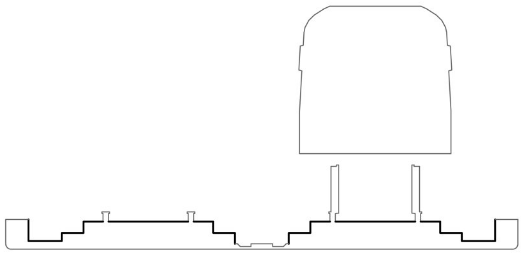


图5 轨道位置设置吸声条件

2 声屏障噪声预测结果与分析

2.1 高度影响分析

声屏障能够有效地在噪声的传播过程中将其削弱，为研究不同高度对声屏障阻隔噪声效果的影响，本部分对不同高度的声屏障进行了分析计算。为避免其他因素的影响，只考虑高度的作用，声屏障采用直立型，无吸声边界条件。表2给出了不同高度直立型无吸声声屏障各评价点的插入损失。

表2 不同高度各评价点插入损失

评价点 工况	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
NO0.25	0.7	−1.7	−1.3	0.3	−1.6	1.0	3.3
NO0.50	−0.3	−1.3	−1.3	0.4	−1.3	4.1	6.0
NO0.75	−4.3	1.6	0.0	1.6	2.0	2.7	6.4
NO1.0	−3.3	2.4	1.4	4.6	3.2	1.9	4.1

将0.25 m、0.50 m、0.75 m、1.0 m高直立型无吸声声屏障（下文以“NO0.25、0.50、0.75、1.0”简化）进行对比，可知：

(1) 评价点M1（轨面中心）在NO0.50、0.75、1.0工况下的插入损失为负值，评价点M2（距轨道中心线7.5 m远，距轨面1.2 m高）、M3（距轨道中心线7.5 m远，距轨面3.5 m高）、M5（距轨道中心线25 m远，距轨面3.5 m高）在NO0.25、0.50工况下的插入损失为负值。

(2) 评价点M2、M3、M4（距轨道中心线25 m远，距轨面1.2 m高）、M5的插入损失随着高度的增加而增大，而评价点M1、M6（距轨道中心线7.5 m远，距地面1.2 m高）、M7（距轨道中心线25 m远，距地面1.2 m高）的插入损失随着高度的增加有减小的趋势。

由表2可知，声屏障高度每增加0.25 m，评价点M1插入损失不升反降，数值降低1.0 dB(A)～4.0 dB(A)，这是由于声屏障的设置导致了车体-轨道-屏体之间声波的多重反射，加剧了屏体内侧的车外噪声。此外，当声屏障高度从0.50 m增至0.75 m时，评价点M6插入损失降低1.5 dB(A)；当声屏障高度从0.75 m增至1.0 m时，评价点M6、M7插入损失分别降低0.8 dB(A)、2.3 dB(A)。

图6给出了不同高度直立型无吸声声屏障评价点M6、7的插入损失频谱特型。

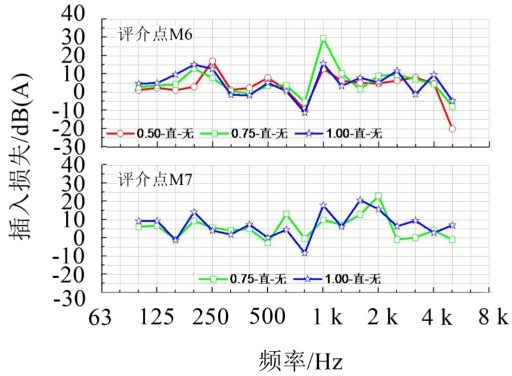


图6 评价点M6/7插入损失频谱特型

从图6中可以看出，对于评价点M6，在中心频率250 Hz、315 Hz、400 Hz、500 Hz、1 600 Hz、3 150 Hz、4 000 Hz处，0.75 m高声屏障插入损失低于0.50 m高声屏障；在中心频率315 Hz、400 Hz、630 Hz、800 Hz、1 000 Hz、1 250 Hz、2 000 Hz、3150 Hz处，1.0 m高声屏障插入损失低于0.75 m高声屏障。对于评价点M7，在中心频率160 Hz、250 Hz、315 Hz、630 Hz、800 Hz、1 250 Hz、2 000 Hz、4 000 Hz处，1.0 m高声屏障插入损失低于0.75 m高声屏障。因此，声屏障高度的增加并不会提升某些特定频率的插入损失，导致插入损失不升反降。

2.2 吸声处理影响分析

吸声材料可以有效吸收入射声波，并抵消刚性声屏障由于多重反射带来的不利影响[14]。为研究不同吸声边界条件对多重反射的抵消作用，本部分对不同吸声边界条件的声屏障进行分析计算。为避免其他因素的影响，只考虑吸声边界条件的作用，高度采用1.0 m，声屏障采用直立型。表3给出了1.0 m高直立型不同吸声边界条件声屏障各评价点的插入损失。

表3 不同吸声边界条件各评价点插入损失

评价点 工况	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
NO1.0	−3.3	2.4	1.4	4.6	3.2	1.9	4.1
NO1.0-1	18.4	3.3	2.1	4.4	3.8	1.6	3.7
NO1.0-2	−0.9	6.0	3.0	7.7	4.7	4.7	5.2
NO1.0-3	15.3	8.5	7.5	11.2	8.0	8.9	10.3

将1.0 m高直立型无吸声/轨道吸声/屏体吸声/轨道+屏体吸声声屏障（下文以“NO1.0、1.0-1、1.0-2、1.0-3”简化）进行对比，可知各评价点的插入损失随

着吸声边界条件的增多而增大。

由表3可知，对1.0 m高直立型无吸声/屏体吸声声屏障增设轨道吸声，评价点M1的插入损失分别增大21.7 dB(A)、16.2 dB(A)，评价点M2、M3、M4、M5、M6、M7的插入损失分别增大–0.5 dB(A)～0.9 dB(A)、2.5 dB(A)～5.2 dB(A)；对1.0 m高直立型无吸声/轨道吸声声屏障增设屏体吸声，评价点M1的插入损失分别增大–3.1 dB(A)～2.4 dB(A)，评价点M2、M3、M4、M5、M6、M7的插入损失分别增大1.1 dB(A)～3.5 dB(A)、4.1 dB(A)～7.4 dB(A)。由此可见，轨道吸声可显著降低轮轨处噪声，屏体吸声可明显削弱屏体外侧噪声。

2.3 顶端设计影响分析

声屏障顶端头型主要对声波绕射、散射和干涉产生影响，改变声传播路径，增加绕射次数和难度，从而降低评价点噪声[15]。为研究不同顶端头型对声屏障降噪效果的影响，本部分对不同顶端头型的声屏障进行了分析计算。为避免其他因素的影响，只考虑头型的作用，高度采用1.0 m，无吸声边界条件。表4给出了1.0 m高不同头型无吸声条件声屏障各评价点的插入损失。

表4 不同头型各评价点插入损失

评价点 工况	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
NO1.0	–3.3	2.4	1.4	4.6	3.2	1.9	4.1
NO1.0-L	0.0	2.5	1.2	4.0	2.5	1.7	3.5
NO1.0-T	4.6	3.1	1.9	4.4	3.1	3.8	7.6
NO1.0-Y	0.0	5.1	3.0	4.9	4.8	3.4	7.0

将1.0 m高直立型、倒L型、T型、Y型无吸声声屏障（下文以“NO1.0、1.0–L、1.0–T、1.0–Y”简化）进行对比。

由表4可知，在1.0 m高直立型无吸声声屏障的基础上增设Y头型，评价点M2、M3、M4、M5、M6、M7的插入损失改变较大，可提高0.3 dB(A)～2.9 dB(A)；倒L与T头型对插入损失的增益效果次之，增量分别为–0.7 dB(A)～0.1 dB(A)和–0.2 dB(A)～3.5 dB(A)。

2.4 最优组合方案分析

通过分析可得，在1.0 m高直立型无吸声声屏障的基础上，增加吸声边界条件和顶端头型均可增大插入损失，其中效果最好的是同时增设屏体和轨道的吸声边界条件并增设Y头型。

(1) 插入损失总值

表5给出了1.0 m高直立型无吸声声屏障和1.0 m高Y型轨道+屏体吸声声屏障各评价点的插入损失，以及后者相对前者的插入损失增量。

由表5可知，对1.0 m高直立型无吸声声屏障增设轨道和屏体吸声以及Y头型，可明显提高声屏障的降噪效果。

表5 各评价点插入损失

评价点 工况	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
NO1.0	–3.3	2.4	1.4	4.6	3.2	1.9	4.1
NO1.0-Y-3	15.3	8.5	9.0	10.6	6.9	7.9	10.2
增量	18.6	6.1	7.7	6.0	3.7	6.1	6.0

① 增设Y头型可提高1.0 m高直立型声屏障的等效高度，并且增加声屏障顶端声波绕射的难度；此外，声屏障屏体内侧增设吸声边界条件可吸收入射声波，同时还可削弱车体-轨道-屏体之间声波的多重反射。这些因素使得屏体外侧评价点M2、M3、M4、M5、M6、M7的插入损失值增加了3.7 dB(A)～7.7 dB(A)。

② 轨道增设吸声边界条件可吸收入射声波，并削弱车体-轨道之间声波的多重反射，使得轨面中心处的评价点M1的插入损失值增加了18.6 dB(A)。

(2) 频谱降噪效果

图7给出了无声屏障时屏体外侧评价点处声压级的频谱特型。定义频率声压级最大值以下10 dB(A)范围内的频率区域为噪声显著频段，对各评价点处噪声进行频谱特性分析。

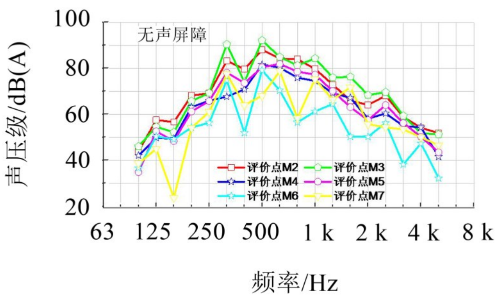


图7 各评价点声压级频谱特型

由图7可知，评价点M2（距轨道中心线7.5 m远，距轨面1.2 m高）处的噪声主要声能集中在315 Hz～1 000 Hz频率范围内，评价点M3（距轨道中心线7.5 m远，距轨面3.5 m高）处的噪声主要声能集中在频率315 Hz以及630 Hz～1 000 Hz频率范围内，评价点M4（距轨道中心线25 m远，距轨面1.2 m高）处的噪声主要声能集中在500 Hz～1 000 Hz频率范围内，评价点M5（距轨道中心线25 m远，距轨面3.5 m高）处的噪声主要声能集中在315 Hz～1 000 Hz频率范围内，评价点M6（距轨道中心线7.5 m远，距地面1.2 m高）处的噪声主要声能集中在频率315 Hz

和500 Hz～630 Hz频率范围内，评价点M7(距轨道中心线25 m远，距地面1.2 m高)处的噪声主要声能集中在频率315 Hz、1 000 Hz、1 600 Hz和500 Hz～630 Hz频率范围内。由此可见，城轨交通车外噪声以中低频噪声为主，频率集中在315 Hz～1 000 Hz内。

由表5可知，1.0 m高Y型轨道+屏体吸声声屏障可明显提高评价点M1(轨面中心)的插入损失。图8给出了1.0 m高Y型轨道+屏体吸声声屏障评价点M1处插入损失频谱特型。

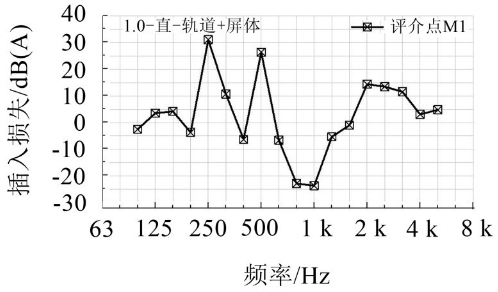


图8 评价点M1插入损失频谱特型

从图8中可以看出，1.0 m高Y型轨道+屏体吸声声屏障在频率100 Hz、200 Hz、400 Hz、630 Hz、800 Hz、1 000 Hz、1 250 Hz、1 600 Hz处，评价点M1处的插入损失为负值，并在频率800 Hz取得最小值，数值为-23.7 dB(A)；在其他频率处，评价点M1处的插入损失均为正值，并在250 Hz取得极大值，数值为31.1 dB(A)。

由此可见，轨道吸声可有效降低评价点M1处的中低频噪声，这是由于速度为60 km/h时的噪声源主要为轮轨滚动噪声，并且轮轨滚动噪声主要以中低频为主。

图9给出了1.0 m高Y型轨道+屏体吸声声屏障评价点M2、M3、M4、M5、M6、M7处插入损失频谱特型。

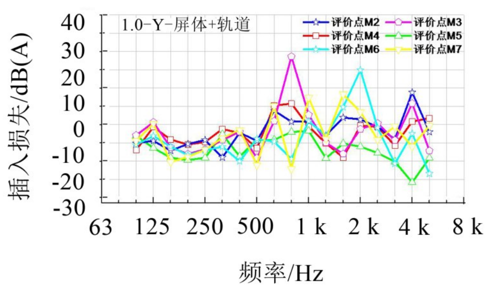


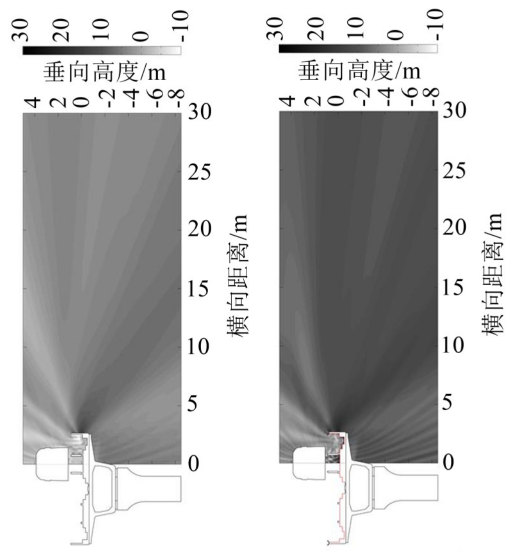
图9 评价点M2/3/4/5/6/7插入损失频谱特型

从图9中可以看出，在频段63 Hz～5 000 Hz内三分之一倍频程的各中心频率，评价点M3在频率3 150 Hz、4 000 Hz处取得最小值-0.3 dB(A)、-8.8 dB(A)，评价点M6在频率400 Hz、3 150 Hz、5 000 Hz处取得最小值-0.1 dB(A)、-1.1 dB(A)、-5.2 dB(A)，评价点M7在频率160 Hz、500 Hz、800 Hz处取得最小值-0.4 dB(A)、-1.6 dB(A)、-3.2 dB(A)，其余评价点在其余中心频率的插入损失均为正值。

由此可见，1.0 m高Y型轨道+屏体吸声声屏障可有效降低评价点M2、M3、M4、M5、M6、M7处各中心频率的噪声。

(3) 插入损失云图

图10给出了1.0 m高直立型无吸声和1.0 m高Y型轨道+屏体吸声声屏障插入损失总值云图。图中，云图颜色越浅，代表插入损失值越小，甚至为负值；反之，云图颜色越深，插入损失值越大。



(a) 1.0-直-无 (b) 1.0-Y-轨道+屏体

图10 插入损失总值云图

由图10可知，对1.0 m高直立型声屏障增设轨道与屏体吸声可有效削弱屏体以及轨道与刚性车体表面之间的多重反射，屏体内侧降噪效果明显改善；增设Y头型可以改变声波的传播路径，增加了声波绕射的次数与难度，有效提升屏体外侧声影区的插入损失。

3 结 语

基于声学边界元理论，建立考虑车体和轨道结构的空间几何构型及声学边界特性的城市轨道交通近轨低矮声屏障降噪效果预测模型，计算无声屏障情况下车外声场特性以及有声屏障的插入损失，并对影响声屏障插入损失的因素进行讨论，得出以下结论：

(1) 近轨低矮声屏障(直立型无吸声)的高度每增加0.25 m，标准评价点(距轨道中心线7.5 m远，距轨面1.2 m高)的插入损失增加0.4 dB(A)～2.9 dB(A)。

（2）增设吸声边界条件可有效提升声屏障（1.0 m高直立型）的降噪效果：增设轨道吸声可使轨面中心评价点的插入损失增加21.7 dB(A)、16.2 dB(A)、标准评价点（距轨道中心线7.5 m远，距轨面1.2 m高）增加0.9 dB(A)、2.5 dB(A)；增设屏体吸声可使标准评价点（距轨道中心线7.5 m远，距轨面1.2 m高）的插入损失增加3.6、dB(A)、5.2 dB(A)；同时增设轨道和屏体吸声可使轨面中心评价点的插入损失增加18.6 dB(A)、标准评价点（距轨道中心线7.5 m远，距轨面1.2 m高）增加6.1 dB(A)。

（3）近轨低矮声屏障（1.0 m高直立型无吸声）增设Y头型对降噪效果的增益效果较优，可使标准评价点（距轨道中心线7.5 m远，距轨面1.2 m高）的插入损失增加2.7 dB(A)；倒L与T头型增益效果效果次之，可使标准评价点（距轨道中心线7.5 m远，距轨面1.2 m高）的插入损失分别增加0.1 dB(A)和0.7 dB(A)。

（4）通过分析可得，在1.0 m高直立型无吸声声屏障的基础上，增设吸声条件和头型均可增大插入损失。其中效果最好的是同时增设屏体和轨道的吸声条件并增设Y头型，可使轨面中心评价点的插入损失增加18.6 dB(A)、标准评价点（距轨道中心线7.5 m远，距轨面1.2 m高）增加6.1 dB(A)。

参考文献：

[1] P ČÍŽKOVÁ. The Acoustic Effectiveness of Low Height Noise Barrier[C]. Proceedings of the Inter-Noise, 2016, 2016.

[2] DITT RICH M G, JANSSENS M H A. Measurement procedures for determining railway noise emission as input to calculation schemes[R]. TNO, TPD, The Netherlands, Sep, 2000.

[3] OGATA Y, NAGAKURA K. Noise reduction effect of low barriers installed adjacent to rails[J]. **Quarterly Report of Rtri**, 2012, 53(3):173-179.

[4] EKICI I, BOUGDAH H. A review of research on environmental noise barriers[J]. **Building Acoustics**, 2003, 10: 289-323.

[5] AXELSSON, ÖSTEN. Effects of a low-height sound absorbent street furniture and a fountain on the soundscape in a Stockholm pocket park[C]. Proceedings of the Inter-Noise, 2016, 2016, 5203-5211.

[6] 刘振鹏，王晨，贺建良，等. 降低轨道交通车站噪声的低矮声屏障技术[C]. 全国振动工程及应用学术会议，2006.

[7] HOTHERSALL D C, CHANDLER-WILDE S N, HAJMIRZAE M N. Efficiency of single noise barriers[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1991, 115(4): 303-322.

[8] OKUBO T, FUJIWARA K. Efficiency of a noise barrier on the ground with an acoustically soft cylindrical edge[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1998, 216(5): 771-790.

[9] 李洪强，吴小萍. 城市轨道交通噪声及其控制研[J]. **噪声与振动控制**，2007，27(5)：78-82.

[10] M E DELANY, E N BAZLEY. Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials[J]. **Applied Acoustics**, 1970, 3: 106-116.

[11] ATTENBOROUGH K. Ground parameter information for propagation modeling[J]. **Journal of the Acoustical Society of America,** 1992, 92: 418-427.

[12] 周信. 高速铁路声屏障降噪效果预测及新型声屏障设计[D]. 成都：西南交通大学，2013.

[13] YANG C, PAN J, CHENG L. Performance analysis of the Wave Trapping Barrier[J]. **Australian Acoustical Society Conference,** 2012: 714-717.

[14] WATTS G R. Acoustic performance of parallel traffic noise barriers[J]. **Applied Acoustics**, 1996, 47(2): 95-119.

[15] 何宾，肖新标，周信，等. 高速铁路声屏障几何形状声学性能数值模拟[J]. **机械工程学报**，2016，52(2)：99-107.

[16] 朱彦，陈光冶，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)：37-41.

[17] 王一干. 城市轨道交通高架桥30 m混凝土简支梁结构噪声研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2015.

[18] MORGAN P A, HOTHERSALL D C, CHANDLER-WILDE S N. Influence of shape and absorbing surface—a numerical study of railway noise barriers[J]. **Journal of Sound & Vibration**, 1998, 217(3): 405-417.

[19] 王小宁，张楠，孙奇. 城市轨道交通桥梁振动及噪声辐射研究[J]. **铁道建筑**，2014(1)：11-15.

[20] 李树虎. 轮轨激励下北京地铁头车车外噪声预测理论研究[D]. 长沙：中南大学，2007.