

纪念《声学技术》创刊 30 周年特邀文章——

# 高架轨道交通噪声的分析与控制技术研究

蒋伟康, 张海滨, 严 莉

(上海交通大学振动、冲击、噪声研究所, 上海 200240)

**摘要:** 轨道交通是大城市公共交通方式的首选, 其产生的噪声可能污染沿线地区的环境, 高架轨道交通噪声的分析、预测和控制成为建造高架轨道交通必须解决的问题。首先用传声器阵列分析了上海轨道交通 9 号线列车噪声级沿高度的指向性, 研究了各 1/3 倍频程对总噪声的贡献量, 归纳了列车等效声功率级与列车速度的关系。然后建立了一套适用于高架轨道交通噪声辐射的预测模型, 将列车视作一个移动的均匀线声源, 采用单极子和偶极子传播模型拟合轻轨列车的通过噪声, 并用高架轨道交通线附近的测量数据, 验证了不同测点情形下模型的适用性, 为预测高架轨道交通线的噪声辐射提供了一种实用方法。最后, 介绍了新开发的道间声屏障和动力吸振阻尼钢轨技术, 以及工程应用效果。

**关键词:** 环境噪声, 轨道交通, 列车噪声, 噪声预测, 噪声控制

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-02-0138-09

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.02.005

## Analysis and reduction techniques for noise of lifted railway transportation

JIANG Wei-kang, ZHANG Hai-bin, YAN Li

(Institute of Vibration, Shock & Noise, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Railway transportation can be considered as the first public transportation system in big cities, but it generates noise that may pollute the environment along railway line. The analysis, prediction and reduction of the noise become key techniques in building urban lifted railway transportation lines. The sound level and radiation pattern of the noise from the trains running on Shanghai No. 9 urban railway are investigated by microphone arrays, and the contribution of each 1/3 octave spectrum is evaluated. The relations of equivalent sound power level with train speed are obtained via analyzing experimental results. A model is suggested to predict the noise radiation from urban lifted railway as the train is considered to be a linear source in uniform motion. The monopole models and dipolar models are employed for analyzing the pass-by noise of urban railway trains. The models are verified by the data measured along the lifted railway area, and the applicability of the model in different cases is studied. It is shown that the model can be used to predict the noise radiated from lifted railway transportation. Finally, a new kind of dynamic absorber damping track and acoustic barriers between tracks are recommended, and with which the effects of noise reduction in engineering are demonstrated.

**Key words:** environment noise; railway transportation; train noise; noise prediction; noise control

## 0 引言

轨道交通是大城市公共交通方式的首选, 但产生的噪声可能污染沿线地区的环境, 轨道交通噪声的分析、预测和控制是市政建设和环境保护必须解决的问题, 也引起了国内外研究者的重视。从最初普通火车产生的噪声<sup>[1-2]</sup>到现今的城市轻型轨道交通噪声问题<sup>[3]</sup>, 积累了一些有益的经验 and 知识。

由于列车噪声辐射的复杂性, 试验研究列车的

噪声的声源特性和辐射特性是必要且有效的, 有学者分析列车噪声垂直和横向两个方向的辐射指向性<sup>[4,5]</sup>, 但只局限于地面铁路噪声。

预测轨道交通噪声就需要数学模型, 各国<sup>[6-10]</sup>各自建立了列车噪声预测模型。轨道交通中的轮轨接触噪声和桥体辐射噪声的研究有一些理论和近似方法, 但目前还没有被普遍认可的适用于城市轨道交通的噪声传播模型。轻轨交通大都穿越市区, 与沿线的建筑物距离较近, 且附近的高层建筑物数量众多, 因此有必要研究市区中轻轨交通的噪声传播模型。本文借鉴前人成果, 建立了一种城市轻轨噪声辐射模型, 并用上海轨道交通 9 号线附近测量大量的数据验证模型的合理性和适用性。

收稿日期: 2011-10-17; 修回日期: 2012-01-27

作者简介: 蒋伟康(1961—), 男, 上海市人, 工学博士, 教授, 研究方向为噪声振动分析与控制。

通讯作者: 蒋伟康, E-mail: wkjiang@sjtu.edu.cn

# 1 高架轨道交通噪声声源的特性研究

## 1.1 试验概况

试验在上海轨道交通 9 号线佘山-洞泾区间进行, 测点距离佘山站约 600 m, 列车经 600 m 加速后速度最快可达 70 km/h 左右。距离轨道中心线 242 cm 处设置了一个线形传声器阵列, 共 30 个传声器, 用 48 通道的 Mueller-BBM PAK 信号采集系统进行采集。传声器按照 15 cm 等间距布置, 最低处的传声器距离桥面 20 cm, 最高处的传声器距离桥面 455 cm。在分析 1/3 倍频程空间分布时, 按照一个波长范围内采集 2 个数据的空间采样率, 15cm 间距的传声器阵列可以精确分析 1133 Hz 以下的噪声成分, 该频段也正是列车噪声中对环境影响最重要的成分。从理论上讲, 分析 1133 Hz 以上频段的声功率分布时, 阵列传声器的分布不够紧密。但是从 1/3 倍频程指向性沿高度缓慢变化的测量结果看, 用间距 15 cm 的传声器阵列分析 1133 Hz 以上的倍频程分布, 也是可以满足工程实用要求的。

列车 6 节编组, 每节列车长 22.8m, 轨面到列车车厢上缘的高度为 3.8 m, 列车车轮直径 0.8 m。为了精确记录列车通过时间, 在轨道边一侧放置了一个激光光学触发器, 又称光靶(Light Barrier), 在另一侧放置了一块用于反射激光的反光片。从光靶发出的激光通过反光片反射回光靶, 当光线受到车轮阻挡时, 光靶会产生一个脉冲信号。通过同步记录脉冲信号和声压信号, 就可以将列车通过线形阵列期间的声压信号提取出来, 同时可以根据已知的列车车轮间距计算出列车的运行速度。测试过程的示意图和实际工作场景参见图 1 和图 2。

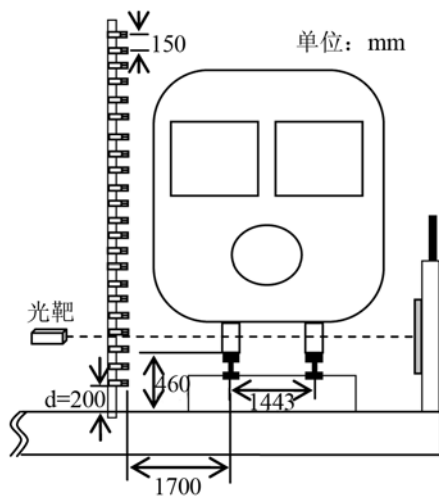


图 1 列车噪声测试示意图  
Fig.1 The testing rig for measuring train noise



图 2 列车噪声测试实景图  
Fig.2 The linear microphone array for measuring pass-by noise

## 1.2 噪声源的频谱分析

试验一共进行了 9 次测试, 每次测试的列车速度均不相同。由于测试地点位于列车加速区间, 经过传声器整列的车头速度和车尾速度不同。但由于列车的通过时间很短, 约 9~14s 内就完全通过, 且本文研究的声功率级和 1/3 倍频程都是列车通过时间段内平均意义上的值, 因此用平均速度作为参考值也是可行的, 并忽略多普勒效应。

根据光靶脉冲信号, 截取出列车通过时间内的声压信号进行处理。处理的主要物理量包括 1/3 倍频程谱和相应的能量贡献度, 列车通过平均声功率级和总辐射声功率级。

图 3 和图 4 是其中一次测试的声压信号和 1/3 倍频程谱, 该次测试的列车平均速度是 69.0 km/h, 选取测点距离桥面高度 2.3 m。由脉冲信号分析列车通过时间截取的声压信号。分析得到的 1/3 倍频程谱显示, 声能量集中在中心频率为 400~1600 Hz 的 1/3 倍频带内, 占到总能量的 85.0%。在低速列车辐射噪声中, 轮轨噪声的能量占主导地位, 从分析数据可发现, 轮轨噪声主要集中在 400~1600 Hz 的 1/3 倍频带内。不同速度下各频带内的声能量贡献率可以参见图 5。声能量贡献率 *Contri* 的定义如下:

$$Contri = \frac{\sum_{f=f_l}^{f=f_u} p^2(f)}{\sum_{f=1}^{\infty} p^2(f)} \times 100\% \quad (1)$$

其中  $f_u$  和  $f_l$  分别是频带的上限和下限频率。

在图 5 中, 630 Hz 和 800 Hz 两个频带的能量是各次试验中贡献能量最多的两个频带, 因此要治理城市轨道交通噪声, 首先要对 630 Hz 和 800 Hz 两个频段采取措施。除了列车平均速度在 40 km/h 以下的两次测试, 以及列车平均速度为 61.1 km/h 的一次试验, 其余六次试验的结果反映出噪声的主要能量集中在中心频率 400~1600 Hz 的 1/3 倍频带内。这六次试验中, 400~1600 Hz 的 1/3 倍频带内贡献

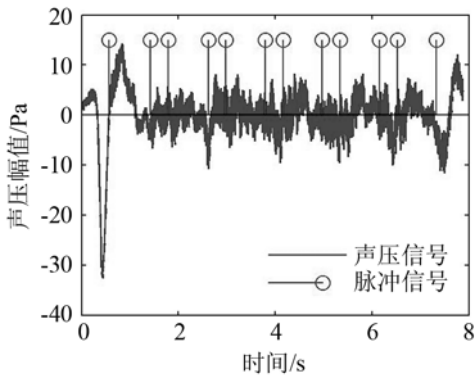


图3 声压时间历程与脉冲信号  
Fig.3 Time history of sound pressure with laser pulse

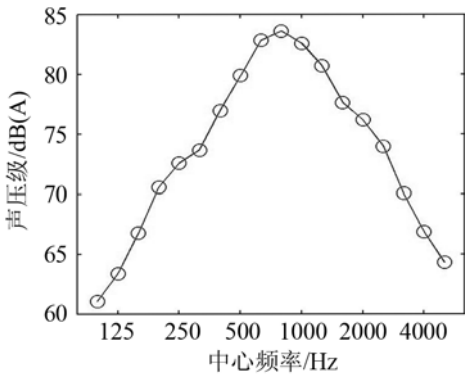


图4 列车噪声的1/3倍频程谱  
Fig.4 One third octave spectrum of vehicle noise

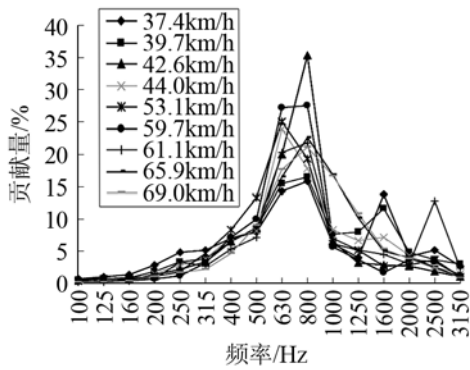


图5 不同车速1/3倍频带声能量贡献率  
Fig.5 The contribution rates of acoustic energy at different 1/3 octave spectrums

的能量大约在 79~85%。虽然平均速度 40km/h 以下的两次测试中，能量的分布更加均匀一些，但是按照能量贡献的多少排列，其主要频带范围也集中在 400~1600 Hz。如果将频带范围扩大到 250~2500 Hz，则 88~95%的能量集中在其中，而低速列车的噪声集中在中低频段。

### 1.3 声功率级分布与指向性

由于车身很高，从轨面到车厢体上缘的高度为 3.8m，声功率级沿高度指向性不同。同样以平均速度 69.0 km/h 的那组测试数据为例，其声功率级以

及 1/3 倍频程谱随测试高度的变化曲线如图 6 所示，图中虚线分别表示轨面和车厢体上缘对应的高度，高度原点选取为轨顶高度，其余 8 次测试的变化趋势类似。从图 6 可以发现，声功率级在高度方向上呈现逐步减弱的趋势，最高点和最低点相差约 9 dB(A)，主要原因为：低速列车以轮轨噪声为主，越接近轮轨噪声的辐射位置声功率级越大，另外，轮轨噪声辐射有指向性，这也是导致声阵列中声功率级从下而上衰减的因素。

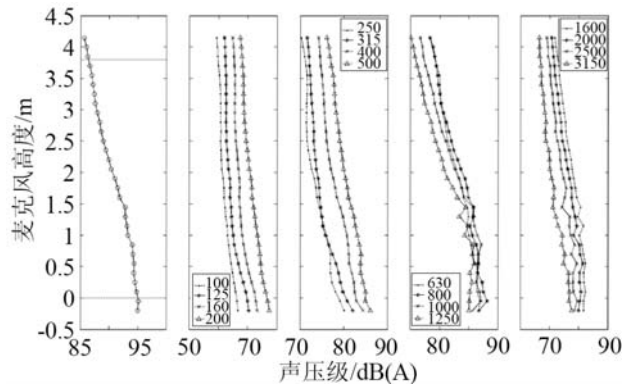


图6 声功率级和1/3倍频程谱随沿高度的变化  
Fig.6 The sound power levels and 1/3 octave spectrums of pass-by noise vs. speeds

### 1.4 速度与辐射声功率级的关系

设  $L_0$  和  $L$  分别是轮轨噪声的源强声功率级和远场声功率级，则两者之间关系可用式(2)表示：

$$L(r, \psi) = L_0 + \Delta L_v^R(\psi) + \Delta L_{geo}(r) \quad (2)$$

其中，轮轨噪声的指向性衰减因子  $\Delta L_v^R(\psi)$  只有一些近似的计算。轮轨噪声的指向性介于单极子和偶极子指向性之间，其指向性可表达为<sup>[6]</sup>：

$$\Delta L_v^R(\psi) = 10 \log [0.15 + 0.85 \cos(\psi)] \quad (3)$$

式中， $\psi$  是观测点到轮轨在竖直方向的仰角。

考虑辐射强度随距离  $r$  衰减的因素  $\Delta L_{geo}(r)$ ，采用澳大利亚和法国 Mithra 预测列车噪声辐射模型中关于辐射强度随距离衰减的公式<sup>[6]</sup>：

$$\Delta L_{geo}(r) = -10 \log [4\pi r^2] \quad (4)$$

由于高架城市轨道交通线上运行的列车轮轨噪声并不一定适合式(3)和(4)，有可能在指向性中偶极子和单极子所占的比例不一定是 0.85 和 0.15；随距离衰减的系数也可能不同，因此需要校核式(3)和(4)对城市轨道交通的精度。首先将式(3)和(4)代入式(2)，用 69km/h 时速下的声阵列采集到的声功率级(30个测试值)入式(2)，得 30个  $L_0$  值，用其均值作为  $L_0$  的估计。将此值重新代入式(2)，计算得到 30个测点的计算值。结果发现，按照以上公式计算的远场声功率级，其与实际测试的 30个声功

率级的平均误差为 1.3 dB, 拟合结果良好。因此中低速高架城市轨道交通列车的声功率级分布可以按照式(2)~(4)计算。式(2)中未考虑列车速度对声功率级的影响, 实际上轮轨噪声的源强声功率级  $L_0$  与速度有关, 应附加速度修正因子  $\Delta L_{speed}(v)$ 。

用曲线拟合方法计算出  $L_0$  的公式(dB/A), 分别用  $V$  和  $\log_{10} V$  作为变量, 得到的公式如下:

$$L_0 = 0.349V + 87.6 \quad (\text{dB/A}) \quad (5)$$

$$L_0 = 41.3 \log_{10} V + 35.3 \quad (\text{dB/A}) \quad (6)$$

用式(5)和(6)计算的源强值  $\bar{L}_0^k$  与实际值的误差的均方根  $\sqrt{\frac{1}{9} \sum_{k=1}^9 (L_0^k - \bar{L}_0^k)^2}$  分别是 1.13 dB(A)和 1.17 dB(A), 两者并没有明显的区别, 用两公式中的任意一个都是合适的。图 7 是用式(5)和(6)拟合数值及实测结果的对比, 曲线表明采用式(5)和(6)都是合理的。为与式(3)和(4)保持一致, 采用速度的对数作为变量, 推荐用式(6)。因此, 计算列车远场声功率级时可以采用式(2)~(4)和式(6)。

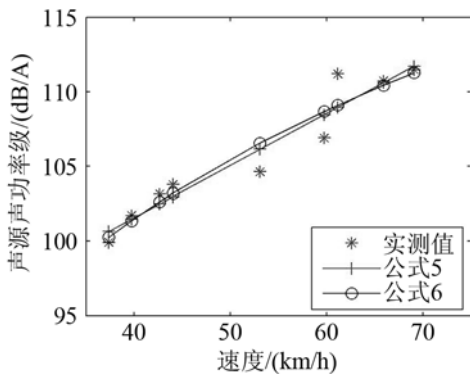


图 7 声源声功率级随速度的变化曲线  
Fig.7 Sound power level of source vs. speed

在阵列测试位置, 列车辐射噪声除了桥面以外没有其它反射面, 因此测试到的都是向外辐射的能量。根据能量守恒, 可以估算出列车辐射噪声的平均声功率级。由于测点不连续, 且只测试了一侧, 因此需要做一些假设才能计算列车的总辐射声功率级。首先假设列车的辐射是对称的; 其次假设车厢上缘未能进行测试的位置处, 其声功率级用式(2)进行计算代替; 然后用这些离散点的声功率级乘以测点间距即可得到总体的辐射声功率级。

### 1.5 轨道交通噪声声源特性小结

通过以上测试分析, 可以得到以下结论: 中低速列车噪声 88~95% 的能量集中在 250~2500Hz 内; 列车噪声声功率级与速度成正比; 且噪声沿高度有指向性, 随高度增加衰减; 对于列车声功率级的测量可以采用本文所用的线形阵列测试, 并可以通过

式(2)估计远场声功率级。

## 2 高架轨道交通噪声预测模型

### 2.1 轨道列车噪声模型概述

测点较远时, 列车可视作一个线声源, 常采用单极子和偶极子模型描述其传播特性。列车辐射的噪声十分复杂, 如逐一考虑各种影响因素, 虽然显得合理, 但由于工程中存在各种不确定因素, 导致了复杂模型并不很精确。

本文不细分噪声辐射的各种成分, 远比欧美模型简单, 便于工程实际应用。只要模型能得到实际数据验证, 模型即具有有效性。同样, 本文将列车噪声综合为一条移动的均匀线声源, 分别采用单极子和偶极子辐射模型预测列车的通过噪声。

如图 8 所示, 列车总长度为  $d$ , 将列车均分为  $N$  小段, 每小段的长度是  $\Delta S$ , 观测点到轻轨的最短水平距离是  $n$ , 观测点  $M$  与轻轨线高架桥面的高度差是  $h$ , 第  $i$  小段的中点到  $A$  的距离是  $x_{si}$ ,  $A$  是观测点到轨道线的垂线  $OA$  和轨道线  $BC$  的交点。

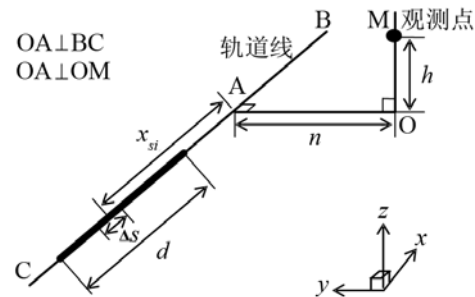


图 8 轨道交通噪声辐射模型示意图  
Fig.8 The model of predicting noise radiation from railway transportation

列车噪声的传播常用的模型有两种, 见图 9。一是单极子辐射模型, 假设列车是一个无指向性线声源, 每一小段声源类似于脉动球模拟; 二是偶极子辐射模型, 每一小段声源的传播用偶极子近似。

### 2.2 单极子模型

假设列车每一小段辐射功率相同, 是具有单极子指向性源, 单位长度的辐射功率记为  $W$ , 观测点  $M$  处的声压均方值可以用式(7)表示:

$$P(r)^2 = \frac{\rho c W}{4\pi} \sum_i \frac{\Delta S}{n^2 + h^2 + x_{si}^2} = \frac{\rho c W}{4\pi} \cdot g(r) \quad (7)$$

式中,  $g(r) = \sum_i \frac{\Delta S}{n^2 + h^2 + x_{si}^2}$ ;  $r$  是车头相对于  $A$  点的位置;  $P$  是声压;  $\rho$ 、 $c$  分别是空气密度和声速。按照式(7), 当列车中点正好通过位置  $A$  时, 观

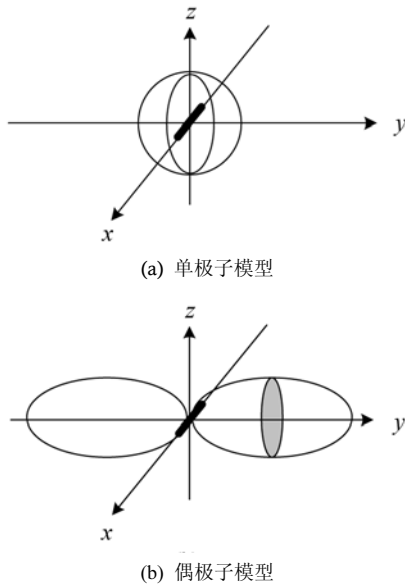


图 9 单位长度线声源辐射指向性图

Fig.9 Radiation pattern of linear source with unit length

测点 M 处测得的声压均方值最大，记为  $P_{\max}^2$ ：

$$P_{\max}^2 = P \left( \frac{d}{2} \right)^2 = \frac{\rho c W}{4\pi} \cdot g \left( \frac{d}{2} \right) \quad (8)$$

就可以得到最大声压级  $L_{\max}$ ，考虑背景噪声对测量的影响，最大声压级的表达式如下：

$$L_{\max} = 10 \log_{10} \frac{P_{\max}^2 + P_b^2}{P_r^2} = 10 \log_{10} \left[ \frac{\rho c W}{4\pi P_r^2} \cdot g(d/2) + 10^{L_b/10} \right] \quad (9)$$

式中： $P_r = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$  是参考声压； $P_b$  和  $L_b$  分别是背景噪声声压和声压级。这样就可以由测得的  $L_b$  和  $L_{\max}$  值，按式(4)计算单位长度辐射功率  $W$ ：

$$W = (10^{L_{\max}/10} - 10^{L_b/10}) \cdot \frac{4\pi P_r^2}{\rho c} \cdot \frac{1}{f(d/2)} \quad (10)$$

然后可以得到观测点处列车通过噪声的声压级关于时间  $t$  的变化关系式(11)：

$$L_p(t) = L_p(r_0 + vt) = 10 \log_{10} \left[ \frac{\rho c W}{4\pi P_r^2} \cdot g \left( \frac{r_0 + vt}{2} \right) + 10^{L_b/10} \right] \quad (11)$$

式中： $r_0$  是列车头相对于 A 的初始位置； $v$  是列车的行驶速度。

### 2.3 偶极子模型

假设列车每一小段是具有偶极子辐射指向特性的声源，在观测点的压力平方值的均值可以用式(12)表示：

$$P(r)^2 = \frac{\rho c W}{4\pi} \sum_i \frac{n^2 \Delta S}{(n^2 + h^2 + x_{si}^2)^2} = \frac{\rho c W}{4\pi} \cdot f(r) \quad (12)$$

其中  $f(r) = \sum_i \frac{n^2 \Delta S}{(n^2 + h^2 + x_{si}^2)^2}$ 。

类似于单极子模型中的推导过程，可以得到列车通过观测点的声压级关于时间变化的公式，只需要用  $f(r)$  代替公式(11)中的  $g(r)$  就可以得到：

$$L_p(t) = L_p(r_0 + vt) = 10 \log_{10} \left[ \frac{\rho c W}{4\pi P_r^2} \cdot f \left( \frac{r_0 + vt}{2} \right) + 10^{L_b/10} \right] \quad (13)$$

### 2.4 预测模型的实验验证

为了检验单极子和偶极子辐射模型对位于不同建筑环境的适用性，进行了大量测试，现选取了上海轨道交通 3 号线的两个具有代表性的测试位置予以分析，每个测试位置设置 4 个不同高度测点，高度位于轻轨下方、水平和上方，具有代表性，见图 10，具体参数如下：

测点 1：某养老院，到轨道 3 号线正横距 19m，桥面高度 9m，2 楼至 5 楼四个楼面的测点距离地面的高度分别是 6.7 m、10 m、13.3 m、16.7 m，背景噪声分别是 72 dB，测试近轨运行的列车噪声；

测点 2：某医院，到轨道 3 号线的正横距 26m，桥面高度 12.9m，3 楼、5 楼、7 楼和 9 楼四个楼面的测点距离地面的高度分别是 10m、16.7m、23.3m、30m，背景噪声为 66 dB，测试远轨运行的列车噪声。

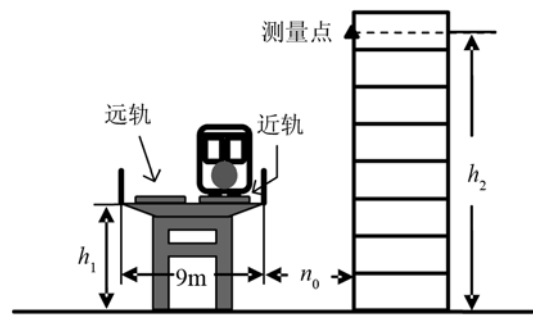
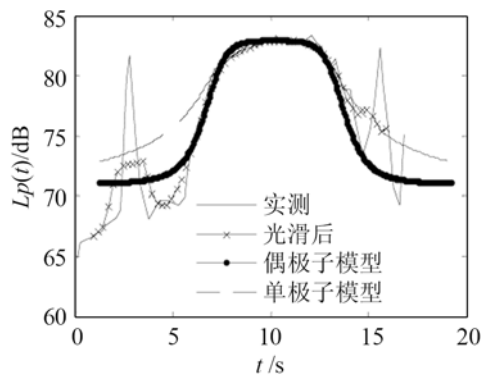


图 10 高架轨道噪声某测点示意图

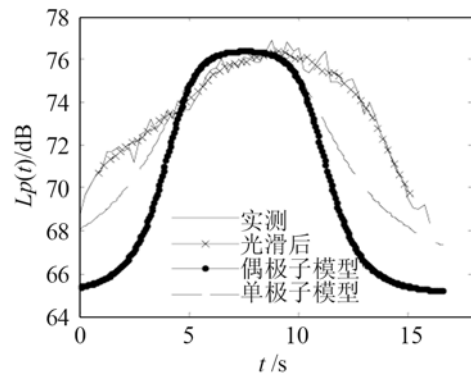
Fig.10 Schematic of measuring noise from lifted railway

本次实验测点区间均安装了声屏障，测点位置可分为声影区和声亮区。在应用式(11)和(13)时，以桥面高度和测点高度之差作为  $h$ ，轨道线的中线作为如图 8 所示的 BC 直线，测点到轨道中线的水平垂线距离作为  $n$ 。预测结果与实测结果的对比见图 11~12。

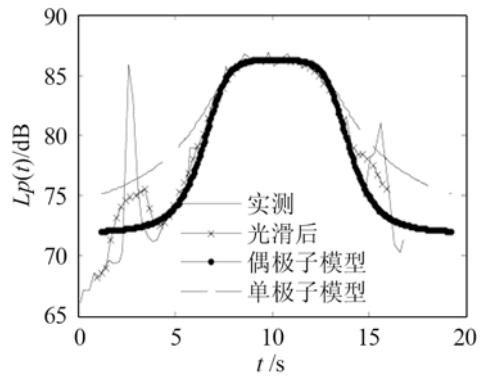
从图 11~12 中可以发现，用 0.25 s 测试时间段内的测量数据计算得到的声压级曲线波动较大，为了减小声压级波动的影响，采用 1.5 s 时间间隔内的测量数据计算声压级，其中 1.25 s 的数据与前一时间段有重叠，每隔 0.25 s 计算一个数值，声压级曲线毛刺大大减小，计算最大通过声压级时采用光滑后的声压级曲线，按照模型计算得到的预测曲线和实测曲线同时绘制在图中。



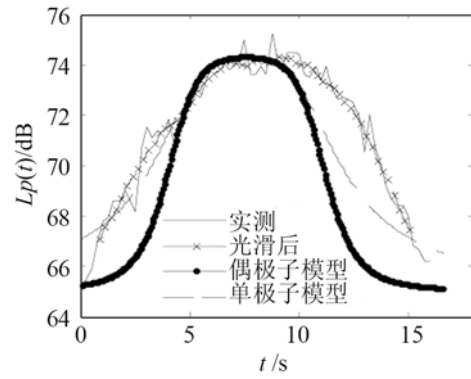
(a) 2楼



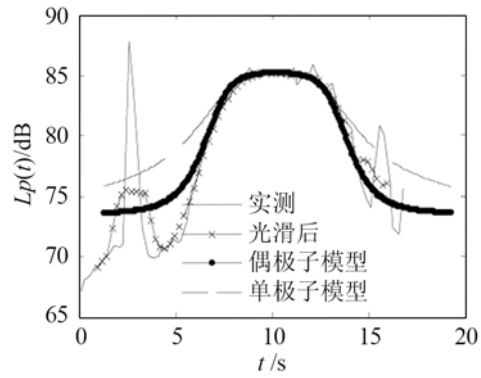
(a) 3楼



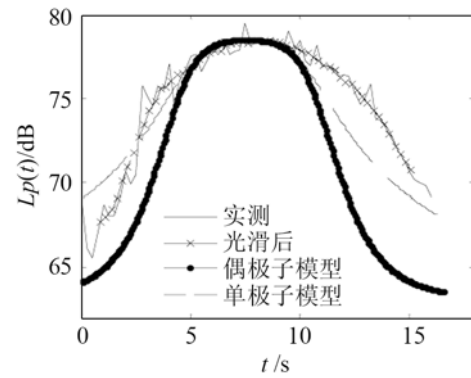
(b) 3楼



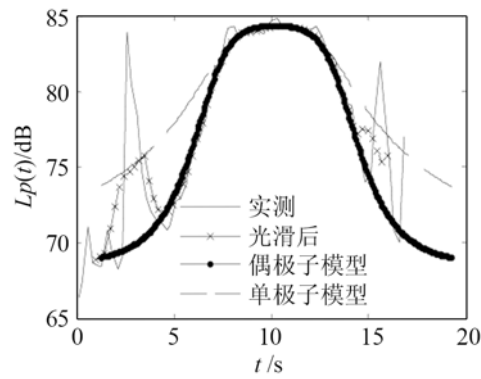
(b) 5楼



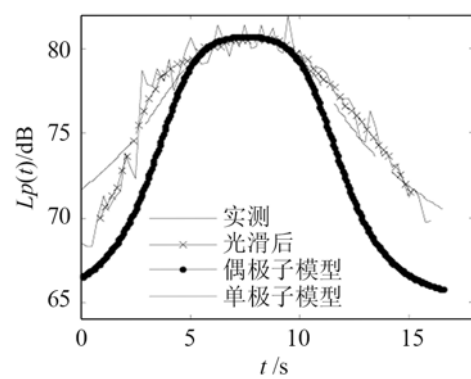
(c) 4楼



(c) 7楼



(d) 5楼



(d) 9楼

图 11 测点 1 声压级时间历程的实测与模型预测对比

Fig.11 Comparison between tested and predicted sound levels of pass-by noise at the measurement point 1

图 12 测点 2 声压级时间历程的实测与模型预测对比

Fig.12 Comparison tested and predicted sound levels of pass-by noise at the measurement point 2

图 11 中, 测试 1 的四个位置均处在声影区, 实测曲线和偶极子模型预测曲线吻合良好。图 12 中, 测点 2 的四个位置中, 3 楼的位置属于声影区, 其余三个位置属于声亮区, 声亮区三个测点的实测声压级曲线和预测曲线中的单极子模型符合良好, 尤其是 7 楼和 9 楼的两个位置, 对于位于声影区的 3 楼测试位置, 得到的实测曲线和单极子模型预测曲线更加接近一些, 这是由于 3 楼位置基本和高架桥面等高, 且列车在远轨运行, 声绕射现象导致中间的声屏障隔音效果差, 接近于声影区和声亮区的过渡带。通过实测和预测模型曲线的比较, 可以认为处于声影区的测点可以用偶极子模型预测, 而处于声亮区的测点可以用单极子模型预测。

### 2.5 噪声预测模型小结

以上研究表明, 将列车噪声综合近似为每小段辐射功率相同的线声源, 用单极子和偶极子辐射模型近似噪声的传播方式是可行的。对处于声影区和声亮区的测点分别建模, 声影区测点的噪声采用偶极子线声源模型, 声亮区测点的噪声采用单极子线声源模型预测。本文模型虽然简单, 但与实验数据吻合很好, 可用于预测轨道两侧的噪声辐射情况。

## 3 高架轨道交通降噪技术

### 3.1 道间声屏障降噪技术

由于受车辆行驶的设备限界制约, 还要考虑到线路养护和车辆临时检修的需求, 降噪装置应当尽可能小型化。在上海轨道交通 3 号线车站实施降噪措施, 安装在上下行线路之间的道间声屏障可以很好地降低轨道交通的噪声<sup>[14,15]</sup>, 所以采用了站台挡墙内侧安装吸声屏体, 上下行线路之间安装低矮的双面吸声屏障的初步方案。

为了实现吸声屏体和双面吸声屏障的高度、位置、吸声系数等参数优化的设计, 首先对不同设计方案进行了降噪效果的预测分析, 计算了各种不同的设计参数, 并比较了采用不同吸声性能材料的效果, 综合考虑了成本和效果的最优。测试结果表明, 轻轨车站噪声的主要成分是 500 Hz 以下的低频噪声, 以及轮轨滑动摩擦啸叫和制动啸叫的高频声。由于声屏障对高频成分的降噪效果通常要优于低频噪声, 所以在工况中选择 100Hz、200Hz、400 Hz、800Hz 四个频率进行计算, 分析轨道低矮声屏障在不同频率下的降噪效果。预计表明可以降低车站内噪声 2~4 dB(A), 最后确定了用低矮声屏障降低车站噪声的设计方案如图 13 所示。

图 13 中的吸声屏体是采用微孔泡沫的轻结构吸声体, 高度为 800mm; 上、下行线之间安装高度 900mm 的双面吸声的隔声屏障, 该高度略超过车轮轮轴的中心高度。

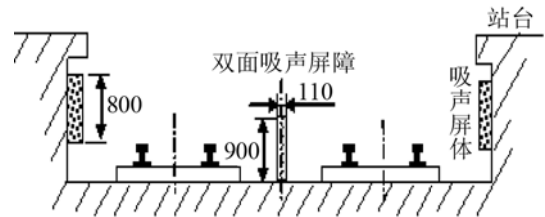


图 13 降低轨道交通车站噪声的低矮声屏障设计  
Fig.13 Short acoustic barriers to reduce the noise on platform

### 3.2 微孔泡沫双面吸声型超薄声屏障

道间声屏障不仅要有很好的隔声性能, 还要双面吸声。为了降低建设费用, 城市轨道交通上、下行线之间的距离通常都十分紧凑, 中间声屏障要距离左右设备限界各 100 mm 以上, 因此, 道间声屏障的厚度要尽可能小。

为了适应车站降噪所需的道间声屏障的要求, 开发了一种微孔泡沫双面吸声型超薄声屏障, 该声屏障没有使用任何纤维材料, 所以声屏障具有寿命长、可再生、环保的优点。声屏障总厚度小于 100 mm, 混响室无规入射吸声系数的频谱如图 14 所示, 其中, 250~2000Hz 频段的平均吸声系数  $a$  为 0.73, 可以满足车站降噪的需要。

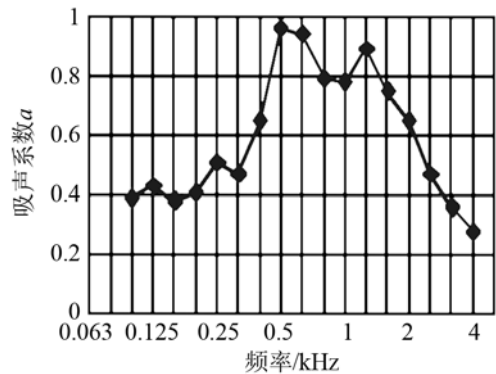


图 14 微孔泡沫双面吸声型超薄声屏障吸声系数  
Fig.14 Absorption coefficient of acoustic barrier with dual absorption surface

为了保证低矮吸声屏障和吸声屏体的制造安装质量, 采用了工厂预制, 到现场安装的方法。工程美观, 与车站的环境协调性好, 对列车安全和养护检修都没有不良影响。部分效果见图 15。

测量表明, 在站台挡墙内侧安装吸声屏体, 并在上下行线之间安装高度 900 mm 的双面吸声屏障后, 两侧站台距离站台边线 3 m, 分别在第一、三和末节车辆中段的对应位置, 距离地面高度 1.2m



图 15 车站内的道间声双面吸声屏障

Fig.15 Short acoustic barrier with duel absorption surface in station

测点的噪声可以降低 2 dB(A)。如果上、下行线的设备限界宽度允许, 能够将道间声屏障的高度增加到 1200 mm, 可以降低站台噪声 4 dB(A)。

### 3.3 动力吸振多层约束阻尼钢轨

阻尼钢轨仅能降低高频噪声, 普通的动力吸振器型可降低频噪声, 但频率选择性很强。我们开发了动力吸振多层约束阻尼钢轨, 采用多层复合结构, 其中高弹性能耗材料层构成动力吸振器的分布弹性元件, 质量层和若干阻尼层和约束层构成动力吸振器的分布质量, 分布弹性元件与分布质量构成一组分布参数的动力吸振器, 吸收钢轨振动的能量, 尤其是低频振动的能量。质量层和阻尼层和约束层构成动力吸振器的分布质量, 同时还能作为多层约束阻尼, 降低分布质量的振动变形, 尤其是中高频振动能量。

实验室测试表明, SJTU-2 型动力吸振多层约束阻尼钢轨有效频率的下限为 300 Hz, 60 kg/m 的钢轨安装 SJTU-2 型动力吸振多层约束阻尼钢轨以后, 可以降低钢轨噪声中的低频噪声 4~10 dB, 可以降低钢轨噪声中的中高频噪声 10~30 dB。

在上海轨交 3、4 号线中山公园站—延安路车站区间对比试验: 先测量该区间列车行驶噪声, 再粘贴 SJTU-2 型动力吸振多层约束阻尼钢轨。在轨道上、下行线之间布置一个 5 个阵元的传声器线阵列, 测量列车通过时的声信号, 见图 16。取 7~11 次测量的平均声级对比降噪效果, 结果见图 17~18。

通过图 17、18 的噪声对比分析, 可得以下结论: 加 SJTU-2 动力吸振多层约束阻尼钢轨后 3 号线列车通过时平均声压级比原来降低 4.4 dB(A), 4 号线列车通过时平均声压级比原来降低 2.4 dB(A)。显然车况对噪声有重要影响。

安装 SJTU-2 动力吸振多层约束阻尼钢轨后, 200 Hz 以上的中高频噪声成分有显著降低, 频率越高, 降噪效果越好。



图 16 SJTU-2 型动力吸振多层约束阻尼钢轨现场照片

Fig.16 SJTU-2 type damping track with dynamic absorber

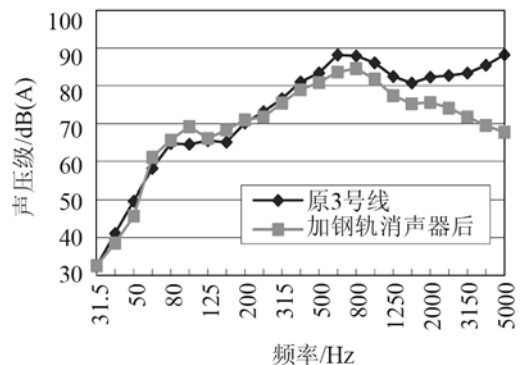


图 17 3 号线列车通过噪声 1/3 倍频程对比

Fig.17 Comparison between 1/3 octave spectrums of pass-by noise for No 3 line with and without SJTU-2 absorbers

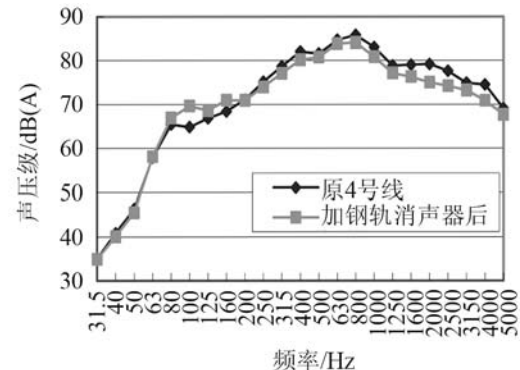


图 18 4 号线列车通过噪声 1/3 倍频程对比

Fig.18 Comparison between 1/3 octave spectrums of pass-by noise for No 4 line with and without SJTU-2 absorbers

## 4 结论

总结以上研究工作, 可以得到以下结论:

- (1) 中低速列车噪声 88%~95%的能量集中在 250~2500 Hz 频带内, 但 25 米以远距离噪声主要声能量在 1000 Hz 以下;
- (2) 列车噪声声功率级与速度成正比, 且噪声沿高度有指向性, 随高度增加衰减;
- (3) 可采用本文所用的线形阵列测量列车声功率级;



(4) 可用公式(2)估计远场声功率级;

(5) 将列车噪声综合近似为每小段辐射功率相同的线声源,用单极子和偶极子辐射模型近似噪声的传播方式是可行的。对处于声影区和声亮区的测点分别建模,声影区测点的噪声采用偶极子线声源模型,声亮区测点的噪声采用单极子线声源模型预测。

(6) 双面吸声道间声屏障有厚度、隔声和吸声性能的严格要求,可以降低噪声 2~4dB(A)。

(7) SJTU-2 动力吸振多层约束阻尼钢轨可显著降低 200Hz 以上的频噪声成分,工程使用中可降低噪声 2~4dB(A)。

致谢: 本文工作得到了上海申通轨道交通建设集团的支持, 特此表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] Rathe E J. Railway noise propagation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1977, **51**(3): 371-388.
- [2] Rufin M, Minoru Y. Railroad Noise in an open space. *Applied Acoustics*, 1996, **49**(4): 291-306.
- [3] Leeuwen H J A. Railway noise prediction models: a comparison[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, **231**(3): 975-987.
- [4] Lui W K, Li K M, Ng P L, Frommer G H. A comparative study of different numerical models for predicting train noise in high-rise cities[J]. *Applied Acoustics*, 2006, **67**(5): 432-449.
- [5] U. S. Department of Transportation, Federal railroad Administration. High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment[R]. Office of railroad development, Washington DC 20590, Report No. 293630-1; 1998
- [6] Thompson D J, Hemsworth B, Vincent N. Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, Part 1: description of the model and method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, **193**(1): 123-135.
- [7] Bewes O G, Thompson D J, Jones C J C, Wang A, calculation of noise from railway bridges and viaducts: experimental validation of a rapid calculation model[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, **293**(3-5), 933-943.
- [8] Chew C H. Vertical directivity of train noise[J]. *Applied Acoustics*, 1997, **51**(2), 157-168
- [9] Zhang X T, Jonasson H G. Directivity of railway noise sources[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, **293**(3-5): 995-1006.
- [10] 彭华, 杨广庆. 城市轨道交通的噪声与振动及其控制措施[J]. *铁道工程学报*, 2001, **72**(4): 38-40.
- [11] Chew C H. Vertical directivity of train noise[J]. *Applied Acoustics*, 1997, **51**(2): 157-168
- [12] Zhang X T, Jonasson H G. Directivity of railway noise sources[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, **293**(3-5): 995-1006.
- [13] Leeuwen H J A. Railway noise prediction models: a comparison. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, **231**(3): 975-987.
- [14] 蒋伟康. 一种防雨尘宽频带阻抗复合式双侧声屏障[J]. 中国, ZL00216246.6[P]. 2000-10-7.
- [15] 蒋伟康. 道间吸声屏障, 中国, ZL00216248.2[P]. 2000-10-7.