

Research on Virtual Sound Barrier Loudspeaker Placement Direction and Noise Reduction Effect

Xiaojie Zhang

Shanghai Jianke Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai, 200032, China

Abstract

Sound barriers are an important means of managing transportation road noise, and they have good sound absorption and sound insulation effects on middle and high frequency band noise. In order to further improve the noise reduction effect of sound barriers in the middle and low frequency bands, this paper investigates the virtual sound barrier technology that combines the active noise reduction technology with the traditional sound barrier by means of experimental validation, and uses the multi-channel FxLMS algorithm to compare the control effect of the sounding directions of the speakers on the top of the virtual barrier at 0°, 90° and 180°. The experimental results show that the virtual sound barrier has obvious noise reduction effect on low-frequency noise, and when the sounding direction of the loudspeaker is 0°, the virtual sound barrier can achieve better acoustic effect.

Keywords

traffic noise; sound barrier; active noise reduction; low frequency noise; virtual sound barrier

虚拟声屏障扬声器布放方向和降噪效果研究

张晓洁

上海建科环境技术有限公司, 中国·上海 220032

摘要

声屏障是治理交通道路噪声的重要手段, 对中高频段噪声具有较好的吸声和隔声作用。为了进一步提升声屏障在中低频段的降噪效果, 通过试验验证的方法, 研究了将有源降噪技术与传统声屏障结合的虚拟声屏障技术, 并采用多通道FxLMS算法, 比较了虚拟屏障顶部扬声器0°、90°和180°发声方向的控制效果。试验结果表明: 虚拟声屏障对低频噪声具有明显的降噪效果, 当扬声器的发声方向为0°时, 虚拟声屏障可以取得更优的声学效果。

关键词

交通噪声; 声屏障; 有源降噪; 低频噪声; 虚拟声屏障

1 引言

声屏障作为交通噪声控制工作中的重要措施^[1], 可以阻挡交通道路上车辆等产生的直达声, 并使绕射声音衰减。声屏障的基本原理是基于惠更斯-菲涅尔的波动理论, 在声源与受声点之间, 插入一个有足够密度的障碍物, 声波必须通过绕射才能到达受声点, 随着声传播距离增加, 噪声得到进一步衰减。声屏障的形式有多种, 按照结构可以分为直立、弯折、半封闭、全封闭等, 上述结构形式的屏障称为传统声屏障或者被动式声屏障, 只对中高频段噪声有效, 对于低频噪声的控制效果有限^[2]。基于有源降噪技术的虚拟声屏障(Virtual sound barrier, VSB)可以实现低频噪声的有效控制, 目前相关研究工作主要集中在电力、高铁等领域, 用于降低变压器、列车等产生的低频辐射噪声^[3-6]。

设计虚拟声屏障需要考虑有源降噪系统扬声器的布放策略。本文针对虚拟声屏障中扬声器的布放方向开展了试验研究工作, 通过比较扬声器不同发声角度下的降噪效果, 为虚拟声屏障的应用提供技术支撑。

2 有源降噪技术

2.1 有源降噪技术原理

有源降噪技术, 又称主动降噪(Active noise control, ANC), 是通过声波间的相位干涉效应实现目标区域的噪声控制。有源降噪系统通常包括参考麦克风、误差麦克风、控制器、功率放大器和次级声源, 其中功率放大器可集成在控制器中, 次级声源可以选用扬声器。

2.2 有源降噪算法

有源降噪系统需要采集原始噪声得到参考信号 $x(n)$ 。参考信号经过控制器进行相关处理后, 产生控制信号 $y(n)$, 通过功率放大器驱动次级声源产生声波并与原始噪声干涉叠加, 叠加后的声波信号通过误差麦克风进行采集得到误差信

【作者简介】张晓洁(1987-), 女, 中国河南焦作人, 硕士, 工程师, 从事环境声学研究。

号 $e(n)$ ，控制算法根据 $x(n)$ 和 $e(n)$ 迭代更新控制信号 $y(n)$ ，实现误差麦克风位置处的声压最小。如图 1 所示，为有源降噪算法中经典的滤波 -x LMS (Filtered-x least mean square, FxLMS) 算法原理框图。

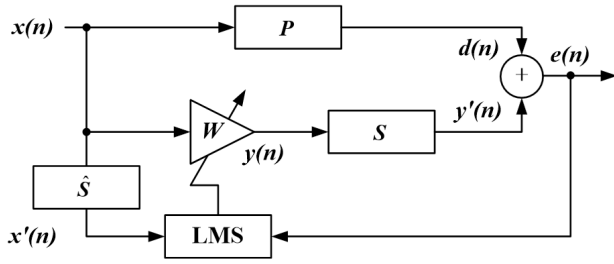


图 1 FxLMS 算法原理框图

图中， P 为噪声源到误差麦克风的初级路径， S 为次级声源到误差麦克风的次级路径， $\hat{s}$ 为估计的次级路径， W 为控制系统权系数。

控制器权系数的迭代公式为：

$$W(n+1) = W(n) + 2\mu e(n) X(n) * \hat{S}(n) \quad (1)$$

式中， n 为时域采样点的编号， μ 为迭代步长。

对于多通道主动降噪系统，设有 I 个参考麦克风， J 个次级声源， K 个误差麦克风，得到控制器的权系数迭代公式为：

$$W(n+1) = W(n) + 2\mu e(n) H_s(n) * x(n) \quad (2)$$

式中， $H_s(n)$ 为 $K \times J$ 阶次级路径矩阵。

3 虚拟声屏障原理

在道路声屏障的顶部布放扬声器和误差传感器阵列，由控制器输出信号至扬声器发声，发出的声波与车辆等声源辐射的噪声发生相消干涉，使得误差传感器监测位置处的声压最小，降低通过声屏障顶部绕射过去的低频噪声。

若扬声器和误差传感器的数量均为 M ，控制后的误差信号为^[7]：

$$e = p + ZQ_c \quad (3)$$

式中， P 为交通声源产生的初级声场声压； Z 为扬声器到误差传感器的次级通路组成的矩阵 $M \times M$ ； Q_c 为扬声器的发声强度。

对于多通道耦合的虚拟声屏障，有源降噪系统的目标函数为：

$$J = e^H e + \beta Q_c^H Q_c \quad (4)$$

式中， β 为有源控制系统约束扬声器发声强度的权系数。

多通道耦合有源降噪系统中每一个扬声器的强度与所有误差传感器拾取的信号均相关，具体为^[8]：

$$Q_c(\infty) = -[Z^H Z + \beta I]^{-1} Z^H P \quad (5)$$

式中， I 为单位对角矩阵。当权系数取 0 时，扬声器的发声强度 $Q_c(\infty) = -Z^{-1}P$ 。

在实际应用时，扬声器的发声强度可以通过时域迭代

得到：

$$[Q_c(n+1) - Q_c(\infty)] = [I - 2\mu(Z^H Z + \beta)] \times [Q_c(n) - Q_c(\infty)] \quad (6)$$

为了保证虚拟声屏障在迭代过程中的收敛性，公式 (6) 等号右侧第一项所有特征值的模均要求小于 1。对于多通道耦合控制系统， $Z^H Z$ 为正的对称矩阵，只要步长足够小， $I - 2\mu(Z^H Z + \beta)$ 小于 1，则有源降噪系统的时域迭代可以实现收敛。

4 虚拟声屏障试验

4.1 试验台架设计

为获得多通道虚拟声屏障不同扬声器角度对降噪效果的影响，设计了一个 T 形声屏障，声屏障的长度为 6m，高度为 2.5m。在声屏障顶部放置 8 组扬声器，扬声器的间距为 0.2m，每组扬声器对应 1 个误差麦克风。在声屏障靠近声源侧放置 1 个参考麦克风，用于拾取噪声源信号。

4.2 噪声源设计

噪声源是试验设计的一项重要内容。为了评估对交通噪声中低频噪声的控制效果。试验中，在声屏障前端放置了一个 10 寸音响，用于模拟噪声源。采用 100Hz、300Hz 频率噪声作为典型低频噪声进行声源激励。

4.3 试验工况设计

试验中，一共设计 3 种工况，对应扬声器的发声方向分别为 0° 、 90° 和 180° ， 0° 表示扬声器发声方向与噪声源传播方向同向； 90° 表示扬声器发声方向与噪声源传播方向正交； 180° 表示扬声器发声方向与噪声源传播方向反向。

4.4 监测点设计

在声屏障降噪效果区域设置了一系列监测点，用于监测有源降噪前后的声压变化情况，如图 2 所示，为声压监测点示意图。

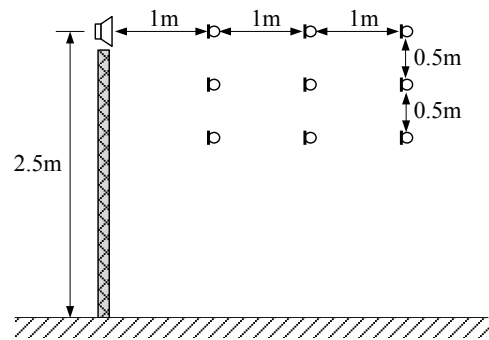


图 2 虚拟声屏障声压监测点示意图

5 试验结果

使用 10 寸音响分别回放 100Hz、300Hz 噪声，记录多通道有源降噪系统开启前后，距离声屏障 1m、2m 和 3m 的各测点声压数据，100Hz、300Hz 频率下扬声器不同发声方向的降噪效果，如图 3 至图 5 所示。

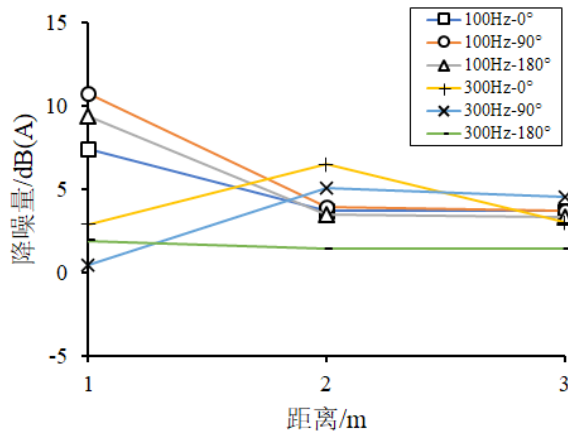


图 3 监测点 2.5m 高度降噪效果

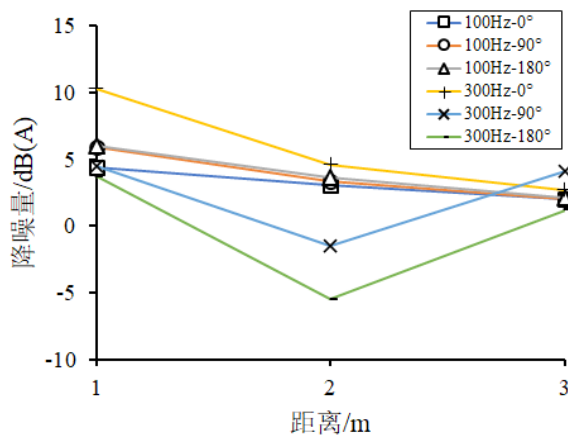


图 4 监测点 2m 高度降噪效果

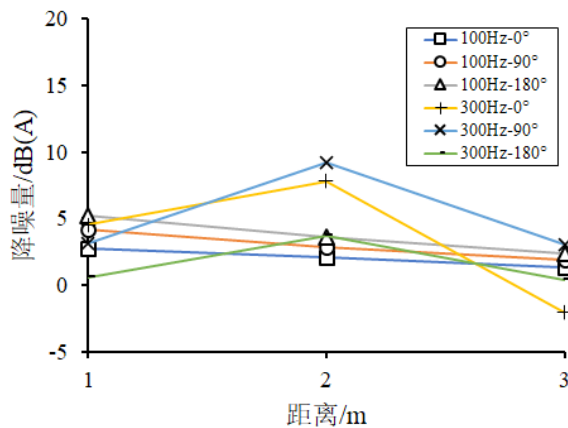


图 5 监测点 1.5m 高度降噪效果

分析对比 100Hz、300Hz 噪声下的降噪量可知：

① 2.5m 高度，100Hz 的控制效果优于 300Hz。对于 100Hz 噪声，扬声器 3 个发声角度的控制效果相近；对于 300Hz 噪声，扬声器 0° 发声方向的控制效果更优；

② 2m 高度，100Hz 的控制效果总体相近，并在大部分角度上优于 300Hz。对于 100Hz 噪声，扬声器 3 个发声角度的控制效果相近；对于 300Hz 噪声，扬声器 0° 发声方向的控制效果更优；

③ 1.5m 高度，300Hz 的控制效果优于 100Hz。对于 100Hz 噪声，扬声器 3 个发声角度的控制效果总体上相近，180° 方向的控制效果较好，90° 方向次之；对于 300Hz 噪声，扬声器 90° 发声方向的控制效果更优。

6 结论

本文研究了多通道虚拟声屏障中扬声器不同发声角度对降噪效果的影响，并开展了有源降噪试验研究。试验结果表明，将虚拟声屏障安装在噪声传递路径上，对于低频噪声具有较好的控制效果；扬声器的发声方向会影响声屏障后方降噪区域的大小和降噪深度；扬声器发声角度为 0° 时，即扬声器的发声方向与噪声源传播方向同向时，整体的降噪效果较优。现有的试验可以显示虚拟声屏障技术对于低频控制效果的提升作用，后续研究工作可以考虑对交通道路中移动噪声源进行有源控制策略，进一步支撑虚拟声屏障技术在工程上应用。

参考文献

- [1] 杨洁,刘强,康钟绪.高架道路声屏障方案降噪效果预测分析[C]//中国环境保护产业协会.第十七届全国噪声与振动控制学术会议暨中国环境保护产业协会噪声与振动控制专业委员会第六届委员大会论文集,2023:5.
- [2] 陈克安.有源噪声控制[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [3] 李志强.高速铁路主动降噪声屏障次级声源位置研究[J].铁路节能环保与安全卫生,2019,9(2):5-11.
- [4] 陶建成,王淑萍,薛金佩,等.虚拟声屏障在电力变压器降噪中的应用[C]//中国声学学会.2016年全国声学学术会议论文集,2016:4.
- [5] 陆昕,周雄.桂林市叠彩区 110kV 变电站虚拟声屏障有源降噪实验[J].中国电机(技术版),2015(10):86-90.
- [6] 叶婷.虚拟声屏障在电力变压器低频降噪中的应用研究[D].华南理工大学,2015.
- [7] Nelson P A, Elliott S J. Active control of sound[M], Elsevier Limited, 1991.
- [8] Tao J C, Wang S P, Qiu X J, Pan J. Performance of an independent planar virtual sound barrier at the opening of a rectangular enclosure. Applied Acoustics, 2016, 105: 215-223.