

DOI:10.11918/202010104

有源声屏障对地铁轮轨噪声的消减性能

臧传臻, 魏庆朝

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 为降低轮轨噪声对地面沿线的危害,在临近地铁线路的位置布设有源声屏障,使噪声的低频段和高频段可分别被有源消声系统和声屏障显著消减,为了科学指导有源声屏障的设计,研究由次级源参数变化所导致的声场变化规律。基于边界元理论,建立考虑了列车、声屏障、轨道的半自由场模型,将计算结果同北京地铁13号线实测信息进行对比验证,进而在模型中增设沿轨道纵向等间距排列的次级源,经仿真分析确定次级源最合理位置、消声频段、消声区界线、消声量;构建关于次级声和噪声干涉相消的数学模型,通过理论推导验证了仿真结论的合理性。研究结果表明:次级源最合理位置与轨道对称轴间隔一个声波长度、和声源等高、具有短于半个声波长度的纵向间隔;次级声对150~320 Hz轮轨噪声消减显著,消声区面积与频率呈正相关;在列车左右两侧对称布设次级源纵列的消声效果优于在列车一侧布设的效果;在声屏障的基础上布置次级源纵列,能令声影区内总声压级普遍降低3~12 dB,且令声影区外的放大值基本不超过3 dB,并且确保列车内声场变化不大。

关键词: 城市轨道交通;轮轨噪声;边界元;有源消声;声屏障

中图分类号: U239.5;X593

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)03-0114-08

Noise reduction performance of active noise barrier for metro wheel-rail noise

ZANG Chuazhen, WEI Qingchao

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To reduce the influence of wheel-rail noise on the area along the metro railway on the ground, active noise barriers were arranged near the metro track. The low-frequency noise could be significantly reduced by the active silencing system, and the high-frequency noise could be significantly reduced by the noise barrier. To guide the design of active noise barrier, the influence of secondary source parameters on metro noise field was studied. Based on the boundary element theory, a semi-free field model consisting of train, noise barrier and track was established. The correctness of the model was verified based on the measured data of Beijing Metro Line 13. The secondary sources were then arranged in the model along the longitudinal direction of the track with equidistance. By analyzing the numerical results, the most reasonable position of secondary sources, the silencing frequency, the silencing area boundary, and the silencing quantity were determined. A mathematical model of secondary sound interfering with noise was constructed to verify the rationality of the simulation conclusions. Results show that the most reasonable position of the secondary sources and the track axis were separated by a noise wave length. The height of the most reasonable position of the secondary sources was equal to that of the noise source. The most reasonable position of the secondary sources had a longitudinal interval shorter than half the noise wave length. Secondary sound could significantly reduce the wheel-rail noise of 150–320 Hz, and there was a positive correlation between silencing area and frequency. The silencing effect of bilateral secondary source array arranged on left and right sides of the train was better than that of unilateral sources arranged on one side. Setting secondary source arrays on the basis of noise barriers could generally decrease the total sound pressure level (SPL) in the sound shadow area by 3–12 dB, and the amplification value outside the sound shadow area basically did not exceed 3 dB, and the sound field in the train had little change.

Keywords: urban rail transit; wheel-rail noise; boundary element; active noise control; noise barrier

轮轨噪声是地铁噪声的主体部分,它同时包含低频分量和高频分量。因为低频声在传播时的衰减

速率较慢,且容易透射或绕射过传播路径上的阻挡结构,所以只依靠布设声屏障难以将其消减。对于声影区内的剩余轮轨噪声,因为其经历了声屏障的消减作用,所以其中低频声的占比很高。因为低频次级声能消减噪声的低频分量,并且不会干扰声屏障消减高频声,所以本文令有源消声系统只释放低频声波,并将该系统和声屏障相结合,可见该有源声

收稿日期: 2020-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(51578054);交通运输部建设科技项目(20113183151400);北京市自然科学基金(8182041)

作者简介: 臧传臻(1990—),男,博士研究生;

魏庆朝(1957—),男,教授,博士生导师

通信作者: 臧传臻,maozhu369@126.com

屏障的总声压级插入损失比传统声屏障的强。

目前铁路声屏障降噪方面已有大量研究。文献[1]对比了吸声边界引起的T形、圆形、Y形声屏障降噪量变化;文献[2]研究了改变T型声屏障顶端宽、声屏障位置、声屏障高、受声点位置引起的顶端降噪量变化;文献[3]分析了声屏障降噪量变化机理;文献[4]比较了不同轨下基础情况下的降噪量。相关成果主要为改变频率、吸声系数、形状尺寸所引起的降噪量变化,而极少研究有源声屏障的消声规律。文献[5]分析了传感器位置对消声的影响;文献[6]模拟了室内环境下有源声屏障对低频声的消减;文献[7]分析了有源声屏障对电厂低频声的消减效果。相关成果均是针对单频点声源进行消声,很少有针对轮轨声源的研究。由于地铁声源主要集中在轮轨处,故能在声源附近设次级源,以确保消声显著[8]。

本文将理论分析同仿真结合,研究次级源最合理位置、消声频段、消声区界线、消声量、有源声屏障降噪区界线、有源声屏障降噪量,从而为有源声屏障设计提供参考。

1 声学仿真模型建立

采用间接边界元法,来计算考虑车身透射的半自由场。轮轨声源为两条具有指向性的、与列车等长的线声源,无指向性的次级源沿轨道纵向等间距分布。由列车附近全部次级源的辐射声和噪声叠加,即可计算出瞬时声场。通过实测信息设置声源及完成模型验证。

1.1 间接边界元法

间接边界元法既适于计算半自由场,又可模拟车体的透射作用。本文通过构建多个声学网格面,来实现对列车、声屏障、轨道、大地的模拟。每个节点内外侧之间速度差 σ_i 和声压差 μ_i 由系数矩阵 B 、 C 、 D 及系数向量 f_σ 、 f_μ 来确定,即

$$\begin{bmatrix} B & C \\ C^T & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_i \\ \mu_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_\sigma \\ f_\mu \end{bmatrix} \quad (1)$$

各单元内部的速度差 σ_j 和声压差 μ_j ,由网格上所有节点的 σ_i 、 μ_i 及其全局形函数 N_{σ_i} 、 N_{μ_i} 来确定,即

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^n N_{\sigma_i} \sigma_i \quad (2)$$

$$\mu_j = \sum_{i=1}^n N_{\mu_i} \mu_i \quad (3)$$

由全部节点的 σ_i 、 μ_i 及其系数 A_{σ_i} 、 A_{μ_i} 计算出声场内的各处声压 p_i ,即

$$p_i = \{A_{\sigma_i}\}^T \{\sigma_i\} + \{A_{\mu_i}\}^T \{\mu_i\} \quad (4)$$

1.2 边界元模型参数

基于规范[9]令声场仿真区域的面积取 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,见图1。由于仿真波长需大于6倍的最大网格边长以保证结果准确,而本文仿真声频段为 $50 \sim 5\,000\text{ Hz}$,故令 10 mm 作为网格边长限值。

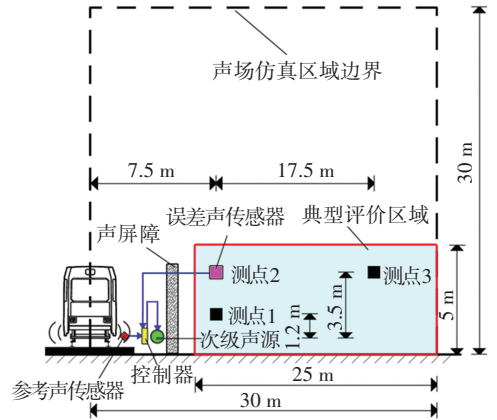


图1 模型示意

Fig.1 Schematic diagram of simulation model

模型中的主体结构(见图2)为6节B型车及纵连式整体道床。其具体尺寸:列车长度取 116 m ,车体宽度取 2.8 m ,车内净高取 2.1 m ,车地板距轨面高度取 1.1 m ,车顶距轨面高度取 3.6 m ,转向架长度取 2.995 m ,转向架宽度取 2.635 m ,位于同节车辆上的两个转向架之间的距离取 12.6 m ,位于同一转向架上的两个轮轴之间的距离取 2.2 m ,位于同个轮轴上的两个车轮之间的内侧距取 1.353 m ,车轮直径取 0.84 m ,轨枕长度取 2.4 m ,轨枕宽度取 0.297 m ,轨枕超过道床高度取 0.02 m ,道床厚度取 0.3 m ,道床宽度取 2.8 m 。

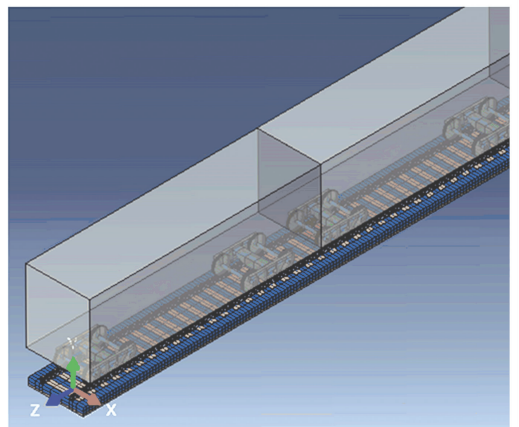


图2 声学模型中的主体结构

Fig.2 Main structure in acoustic model

在声场仿真区域内构建平面坐标系,其竖轴为轨道竖向对称轴,其横轴为地面线,轨道轴线同大地

相交处为坐标原点。采用 1.5 节中的现场声屏障布设尺寸,声屏障高 4 m,其安装位置离轨道竖向对称轴(以下简称“对称轴”)3 m。声速取 344 m/s,传播介质密度取 1.21 kg/m³。

1.3 噪声源的设置

令线声源位于轨顶面处,并和列车等长,其所引起的声压 P 与角频 ω 、声速 c 之间的关系为

$$\nabla^2 P + \frac{\omega^2 P}{c^2} = 0 \tag{5}$$

当辐射方向和地面间夹角 φ 确定后,可确定此角度上的声压级折减量 C_φ [10]。

当 $-10^\circ \leq \varphi \leq 21.5^\circ$ 时,

$$C_\varphi = -0.02 (21.5^\circ - \varphi)^{1.5} \tag{6}$$

当 $21.5^\circ < \varphi \leq 50^\circ$ 时,

$$C_\varphi = -0.0165 (\varphi - 21.5^\circ)^{1.5} \tag{7}$$

当 $\varphi < -10^\circ$ 时,按照 φ 为 -10° 来确定 C_φ ; 当 $\varphi > 50^\circ$ 时,按照 φ 为 50° 来确定 C_φ 。

1.4 有源消声系统的设置

噪声场会随列车行驶而移动,为使次级声波只出现在临近列车的区域,令有源消声模块沿纵向等间隔排列。如图 1 所示,单个独立模块由 1 个次级源、1 个参考传声器、1 个误差传声器、1 个控制器组成,其运行规则:1) 临近轨道的参考传声器将接收到的轮轨声波数据实时传给控制器;2) 只有等足够的轮轨信号传至控制器时,其才会产生并传递消声信号;3) 次级源基于消声信号进行声波辐射;4) 误差传声器(根据文献[10]确定其位置)将收到的干涉声波数据传至控制器;5) 控制器获得两传声器传来数据后,由自适应算法形成消声信号。

确定消声信号的依据是使误差传声器处声能达最小,评价指标为

$$J = (\mathbf{Z}_{pe} \mathbf{q}_p + \mathbf{Z}_{se} \mathbf{q}_s)^H (\mathbf{Z}_{pe} \mathbf{q}_p + \mathbf{Z}_{se} \mathbf{q}_s) \tag{8}$$

式中: J 是声压的平方; \mathbf{Z}_{pe} 、 \mathbf{Z}_{se} 分别是声源、次级源至场点的传递函数; \mathbf{q}_p 、 \mathbf{q}_s 分别是声源、次级源的强度。

1.5 现场实测及模型验证

在北京地铁 13 号线路基段沿线采集声信息,周围区域空旷,当列车抵达测点所在横断面时开始采集声波,当列车离开测点所在横断面时结束采集声波,基于规范[9]将所得频谱中的各个 A 计权声压级进行背景噪声折减。

令测点与轨顶等高,且其同轨道轴线相隔 1.5 m [11]。采集车速达 70 km/h 时的声源频谱,横轴采用三分之一倍频程频率,见图 3,从而确定仿真所需声源强度。

当列车以 70 km/h 速度驶过设有地面声屏障的区段时,基于相关规范 [11-12] 布设测点见图 1。近场

的噪声采集位置为测点 1、测点 2,远场的噪声采集位置为测点 3,基于这 3 处位置的噪声信息进行模型验证。针对三分之一倍频程频谱,比较数值计算与实测结果,由图 4 可知,计算误差普遍未超过 3 dB,其极值为 6.75 dB,可见模型计算合理。

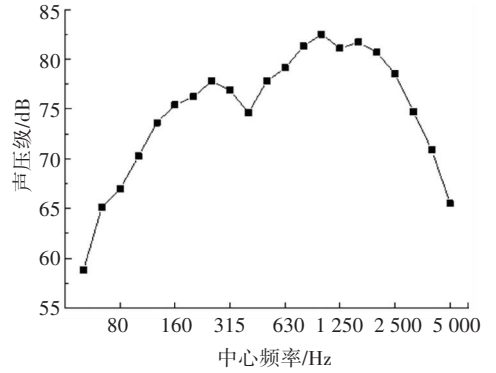
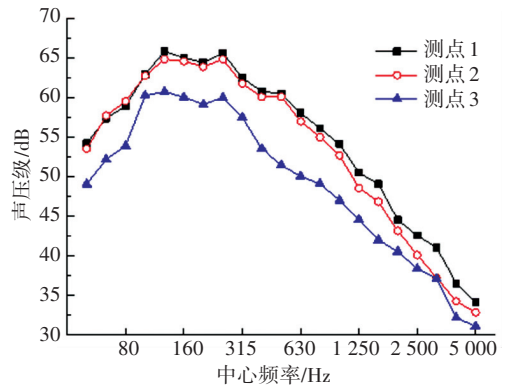
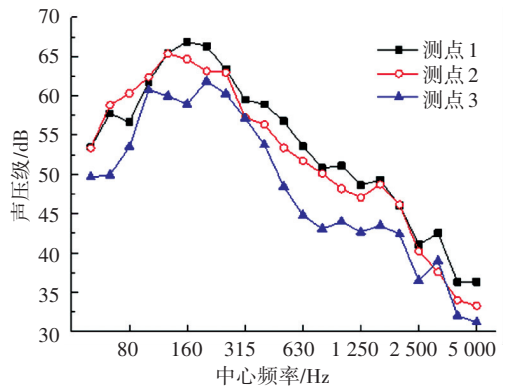


图 3 声源频谱

Fig.3 Sound source spectrum



(a) 设置声屏障区段的实测结果



(b) 设置声屏障区段的仿真结果

图 4 现场实测和仿真数据对比

Fig.4 Comparison between measurement and simulation data

1.6 轮轨噪声超限区

轮轨噪声总声压级场见图 5,由规范 [13] 可知地铁沿线噪声限值为 70 dB,且由图 5 可知超限区基本位于本文的声场仿真区域以内,所以 1.2 节中所设置的计算范围是合理的。

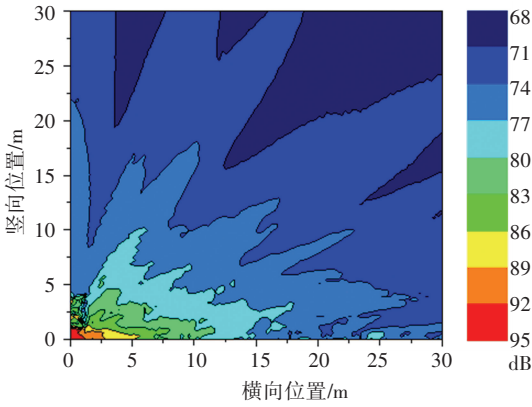
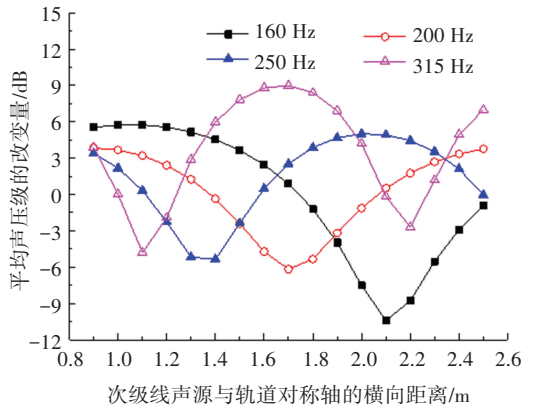


图5 总声压级云图

Fig.5 Total SPL nephogram



(a) 次级源横向位置对消声量的影响

2 确定次级源的合理布设参数

基于仿真模拟和理论推导,确定出有源消声效果达最强时的次级源布设参数。为了同时实现消减效果的显著性和稳定性,本文构建只能在某频率范围内产生广域消声的系统。令次级声和采样声具有相同初相位。

2.1 基于仿真模拟的次级源消声特性研究

确定出消声频率范围,以及令消声评价指标达极值情况下次级源布设地点。

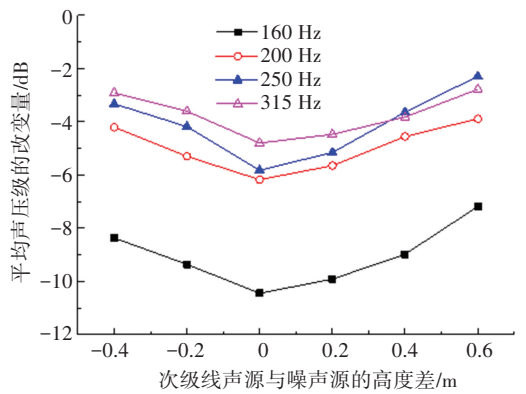
2.1.1 基于平均声压级改变量进行评价

经仿真发现,消声区形状与声影区相似,且临近地面区域的降噪效果相对更好,故依据规范测点^[11-12]设置“典型评价区”,见图1。因为单个受声点处的降噪量无法代表区域的整体降噪效果,故基于能量等效提出式(9),可将评价区中全部节点声压级进行等效平均。在原声场基础上增加次级源,会使“平均声压级值”产生变化。当该平均声压级增大时表明次级源引起增噪效果,当该平均声压级减小时表明次级源引起消声效果。

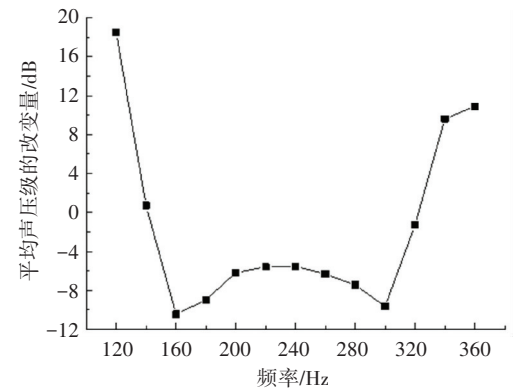
$$L_{Aeq} = 10 \lg \left[\frac{1}{m_1} \sum_{i=1}^{m_1} 10^{0.1L_{ji}} \right] \quad (9)$$

式中: L_{Aeq} 为平均声压级, dB; L_{ji} 为区域中某节点声压级, dB; m_1 为区域中节点数。

暂且忽略次级点源纵距,布设单侧次级线源。当次级源的竖向位置坐标值等于声源高度时,次级源横向位置对消声量的影响规律见图6(a);当次级源的横向位置坐标值等于声波长度时,次级源竖向位置对消声量的影响规律见图6(b);当次级源位于最合理布设位置时,次级源频率对消声量的影响规律见图6(c)。由图6(a)、6(b)可知,其最合理位置和对称轴间隔一个声波长度,且和声源等高;由图6(c)可知,次级声对150~320 Hz 噪声消减显著。当车两侧均布设次级线源时,所得结论同上。



(b) 次级源竖向位置对消声量的影响



(c) 次级源频率对消声量的影响

图6 不同次级源参数下的消声量变化曲线

Fig.6 Variation curve of silencing quantity under different secondary source parameters

有源消声系统必须处在地铁限界以外,且由图6(b)可知,其与轮轨声源等高,故由相关规范^[14]可知,其与对称轴间隔不能小于1.04 m。由图6(a)可知,令频率取160 Hz或200 Hz,则当次级源位置与其最合理位置之间的距离小于0.1 m时,消声显著;令频率取250 Hz或315 Hz,则当次级源位置与其最合理位置之间的距离小于0.05 m时,消声显著。所以应同时布设9条次级线源,具体参数见表1,以消减150~320 Hz 噪声。

表 1 次级线源最合理参数

Tab.1 The most reasonable parameters of secondary line sources

声源编号	与对称轴间隔/m	与声源高差/m	声波频率/Hz
1	2.2	0	[150,160]
2	2.05	0	(160,170)
3	1.9	0	[170,190]
4	1.7	0	(190,210)
5	1.55	0	[210,230]
6	1.4	0	(230,250)
7	1.3	0	[250,270]
8	1.2	0	(270,290)
9	1.1	0	[290,320]

以次级点源列代替次级线源,使其处在最合理位置。由图 7 可知,当纵向间隔达到半个声波长以下时,消声效果尤为显著(类似次级线源的效果)。这与文献[8]中所介绍的单点噪声源情况下次级源最佳纵距一致。由于本文系统可消减 150~320 Hz 噪声,故后文模型中的纵距均被设置成 0.5 m。

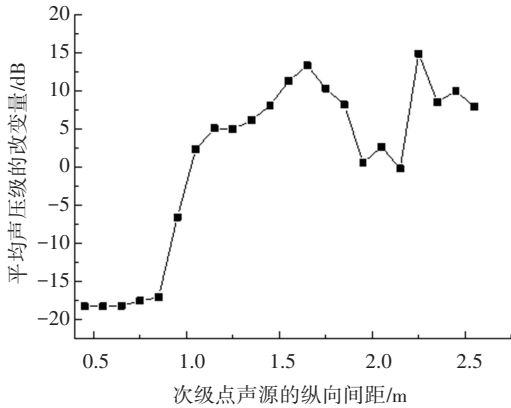


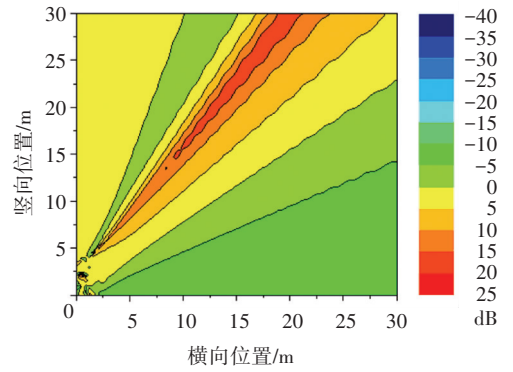
图 7 双侧次级源纵列对 200 Hz 声的消声量变化曲线

Fig.7 Variation curve of silencing quantity of 200 Hz noise by bilateral secondary source

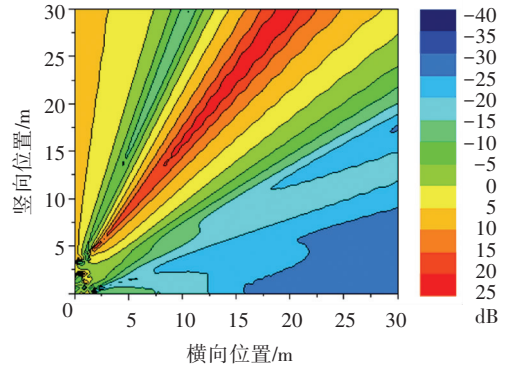
2.1.2 基于最高边界点高度进行评价

当次级源处在最合理位置时,在车两侧会出现消声区,见图 8。消声区形似以本文坐标原点为顶点的三角形。

由图 8 可知,采用对称布设方式能引起更大的消声面积和消声量。针对本文仿真所得消声区,存在离地最高的边界点。将最高边界点高度简写成“边界高”。当次级源的竖向位置坐标值等于声源高度时,次级源横向位置对边界高的影响规律见图 9(a)。当次级源的横向位置坐标值等于声波长度时,次级源竖向位置对边界高的影响规律见图 9(b)。通过图 9 所得的次级源最合理位置和通过图 6 所得的一致。



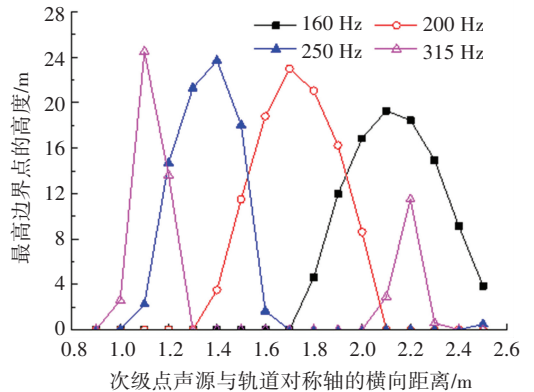
(a) 单侧次级源纵列



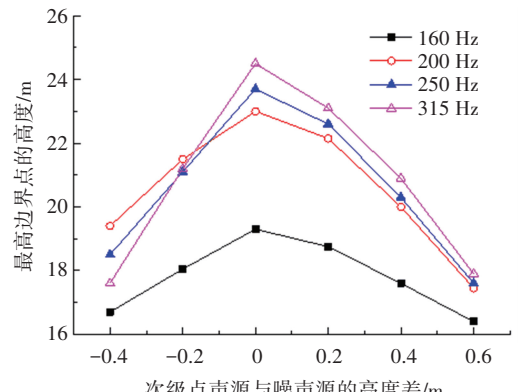
(b) 双侧次级源纵列

图 8 200 Hz 噪声下声压级改变量云图

Fig.8 Nephogram of SPL change with 200 Hz noise



(a) 次级源横向位置对边界高的影响



(b) 次级源竖向位置对边界高的影响

图 9 单侧次级源纵列位置对消声范围的影响

Fig.9 Silencing range influenced by the position of single-side secondary source array

2.2 基于理论推导的次级源消声特性研究

次级源纵列释放的声波,会与线声源释放的低频声波形成干涉。因为低频声具有较大波长,故近似认为声场不随纵向改变,从而推导计算二维场。分析次级源合理参数和消声边界特性,从而验证相应仿真结论是否合理。

2.2.1 双侧布设次级源

令两个轮轨声源、两个次级源分别关于轨道轴线对称。并令所有点源所处的高度、频率一致。首先建立单点声源辐射声压模型^[15],即

$$p = \frac{A}{r_1} e^{j(\omega t - \frac{\omega r_1}{c})} \quad (10)$$

式中: p 为任意场点声压,Pa; r_1 为场点与声源间隔,m; A 为声源振幅; t 为时间,s; ω 为角频率,rad/s; c 为声速,m/s。

相距 l 的两点声源辐射声压模型为

$$p = \frac{A}{r_1} e^{j(\omega t - \frac{\omega r_1}{c})} + \frac{A}{r_2} e^{j(\omega t - \frac{\omega r_2}{c})} \quad (11)$$

式中 r_2 为场点与声源间隔,m。

如图10所示,对于 $r \gg l$ 的远场点,将 r_1, r_2 分别简化为 $r + 0.5l \sin \theta, r - 0.5l \sin \theta$ 。

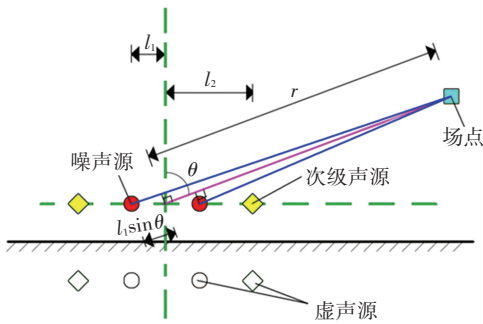


图10 点声源和场点间位置关系

Fig.10 Position relationship between point acoustic source and sound receiving point

故可将式(11)简化为

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - \frac{\omega r}{c})} \left[e^{-\frac{j\omega l \sin \theta}{2c}} + e^{\frac{j\omega l \sin \theta}{2c}} \right] = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - \frac{\omega r}{c})} \cdot 2 \cos\left(\frac{\omega l \sin \theta}{2c}\right) \quad (12)$$

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - \frac{\omega r}{c})} \cdot 2 \cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) + \frac{\alpha A}{r - l_2 \sin \theta} e^{j(\omega t - \frac{\omega r}{c})} \cdot e^{\frac{j\omega l_2 \sin \theta}{c}} = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - \frac{\omega r}{c})} \left[2 \cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) + \frac{\alpha r}{r - l_2 \sin \theta} e^{\frac{j\omega l_2 \sin \theta}{c}} \right] = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - \frac{\omega r}{c})} \left\{ 2 \cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) + \frac{\alpha r}{r - l_2 \sin \theta} \left[\cos\left(\frac{\omega l_2 \sin \theta}{c}\right) + \sin\left(\frac{\omega l_2 \sin \theta}{c}\right) j \right] \right\} \quad (14)$$

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - \frac{\omega r}{c})} \left[2 \cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) + \frac{\alpha r}{r + l_2 \sin \theta} e^{-\frac{j\omega l_2 \sin \theta}{c}} \right] = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - \frac{\omega r}{c})} \left\{ 2 \cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) + \frac{\alpha r}{r + l_2 \sin \theta} \left[\cos\left(\frac{\omega l_2 \sin \theta}{c}\right) - \sin\left(\frac{\omega l_2 \sin \theta}{c}\right) j \right] \right\} \quad (15)$$

由式(12)推导出关于次级声和噪声干涉相消的数学模型,即

$$p = \frac{2A}{r} e^{j(\omega t - \frac{\omega r}{c})} \left[\cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) + \alpha \cos\left(\frac{\omega l_2 \sin \theta}{c}\right) \right] = \frac{2A}{r} e^{j(\omega t - \frac{\omega r}{c})} \left[\cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) + \alpha - 2\alpha \sin^2\left(\frac{\omega l_2 \sin \theta}{2c}\right) \right] \quad (13)$$

式中: l_1 为轨头半距, $l_1 = 0.75$ m; l_2 为次级源与对称轴间隔,m; α 为次级源与声源振幅比。

对于式(13),由于临近地面场点可使 $\sin \theta$ 近似等于1,则得到如下规律:1)当声频取150~320 Hz时, $\cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) < 0$ 。为实现最佳消声效果,需令 $\alpha \cos\left(\frac{\omega l_2 \sin \theta}{c}\right) = \alpha$,则 l_2 必须等于波长,此规律符合图6(a)中的结论。2)令 α 取1, l_2 等于波长,则 $\alpha \cos\left(\frac{\omega l_2 \sin \theta}{c}\right) = 1$ 。为实现消声效果,需令

干涉相消后的声压低于噪声压,即 $\cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) + 1 < \left| \cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) \right|$,则声频应取151~302 Hz,该频率范围与图6(c)中的消声频率范围相近。3)对于消声边界上的场点,需令干涉相消后的声压等于噪声压,即 $\alpha \cos\left(\frac{\omega l_2 \sin \theta}{c}\right) = 0$ 。令声频取150~320 Hz, l_2 等于波长。故当 $\sin \theta = 0.75$ 时的场点线即是消声边界,其倾角较固定。

通过镜像原理实现大地反射,在每个声源的正下方且关于地面对称的位置增设1个虚源,虚源的频率、初相位及振幅与其所对应声源的一致,参考式(13)的建立和分析思路,则其消声规律和式(13)的一致。

2.2.2 单侧布设次级源

同理,只在两个噪声源的单侧布设1个次级源,则噪声源两侧的干涉模型分别为

同式(13)的分析思路,使 $\sin \theta$ 近似等于 1,则得到如下规律: 1) 当声频取 150 ~ 320 Hz 时, $2\cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) < 0$ 。为实现最佳消声效果,需令 $\alpha\cos\left(\frac{\omega l_2 \sin \theta}{c}\right) = \alpha$, 则 l_2 必须等于波长。2) 令 α 取 1, l_2 等于波长。对于消声边界上的场点,需令干涉相消后的声压等于噪声压,即满足 $2\cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) + 1 = \left|2\cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right)\right|$ 。故当 $\cos\left(\frac{\omega l_1 \sin \theta}{c}\right) = -0.25$ 时的场点线即是消声边界,其倾角和频率呈正相关。3) 当声频取 150 ~ 320 Hz 时,单侧布设次级源情况下的消声边界倾角小于双侧布设次级源情况。

3 分析有源声屏障的降噪效果

由于吸声系数和插入损失之间关系的规律已知^[15],故将该因素忽略。经数值模拟,确定了布置声屏障并不影响次级源最合理参数值。当次级源处在最合理位置时,研究有源声屏障与次级源或声屏障相比的优越性。

3.1 有源声屏障与次级源的低频消减能力比较

比较不同布设方式的消减量,如图 11 所示。发现双侧布设有源声屏障比单侧优越,有源声屏障比次级源优越。

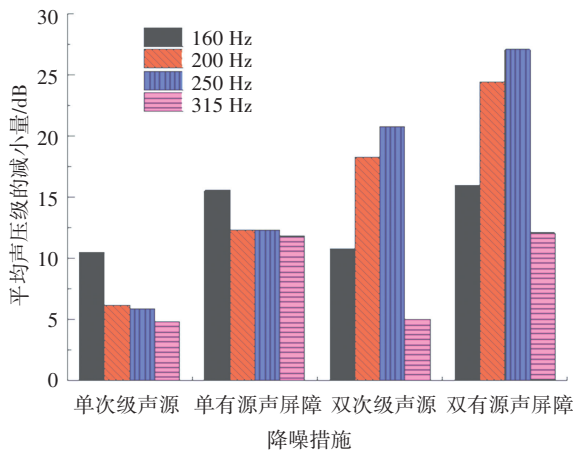


图 11 不同布设方式引起的消减量
Fig.11 Noise reduction under different noise reduction methods

比较各布设方式所产生的降噪区面积。由数值模拟确定,双侧布设次级源情况下的边界高与双侧布设有源声屏障情况类似。如图 12 所示,双侧布设次级源所引起边界线倾角随频率改变而变化不显著,符合式(13)的相应结论。单侧布设次级源所引起边界线倾角和频率呈正相关,符合式(14)的相应结论。双侧布设有源声屏障所引起边界线倾角大于

单侧布设情况;单侧布设有源声屏障所引起边界线倾角大于单侧布设次级源情况。

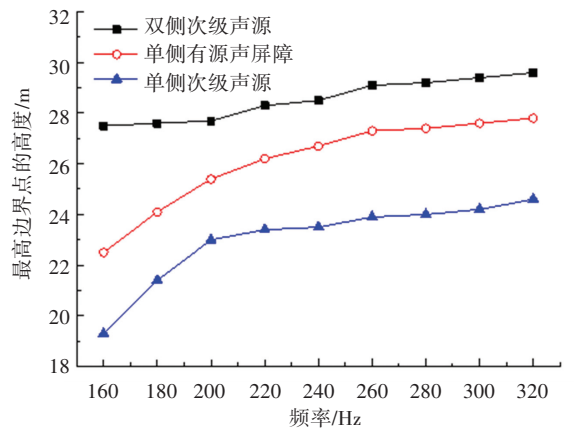


图 12 各频率下最高边界点高度
Fig.12 Height of the highest boundary point at each frequency

3.2 有源声屏障与声屏障的总声级消减能力比较

仿真声频取 50 ~ 5 000 Hz,步长取 5 Hz,布设双侧有源声屏障,按表 1 中参数设置次级源纵列。人耳易识别高于 3 dB 的声压级变化^[16],如图 13 所示,在声屏障的基础上布置次级源纵列,能令声影区内总声压级普遍降低 3 ~ 12 dB,且令声影区外的放大值基本不超过 3 dB,并且可确保列车内声场变化不大。

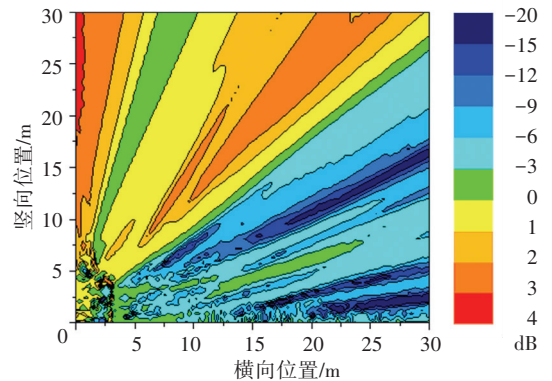


图 13 次级源纵列产生的总声压级改变量
Fig.13 Total SPL change by secondary source arrays

4 结 论

1) 本文构建了用于消减地铁轮轨噪声的有源声屏障模型。有源消声系统针对低频分量,声屏障主要针对高频分量。

2) 次级声对 150 ~ 320 Hz 噪声消减显著。消声区面积和频率呈正相关。

3) 在列车左右两侧对称布设次级源纵列的消声效果优于在列车一侧布设的效果。次级源最合理位置与轨道对称轴间隔一个声波长,与声源等高,具有短于半个波波长的纵向间隔。

4) 在声屏障的基础上布置次级源纵列,能令声影区内总声压级普遍降低 3~12 dB,且令声影区外的放大值基本不超过 3 dB,并且可确保列车内声场变化不大。

参考文献

- [1] ISHIZUKA T, FUJIWARA K. Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions [J]. *Applied Acoustics*, 2004, 65(2): 125. DOI: 10.1016/j.apacoust.2003.08.006
- [2] OLDHAM D J, EGAN C A. A parametric investigation of the performance of T-profiled highway noise barriers and the identification of a potential predictive approach [J]. *Applied Acoustics*, 2011, 72(11): 803. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.04.012
- [3] 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
HE Bin, XIAO Xinbiao, ZHOU Xin, et al. Numerical study on acoustic performance of high-speed railway noise barriers with different geometric shape [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(2): 99. DOI: 10.3901/JME.2016.02.099
- [4] 陈建国,夏禾,蔡超勋,等.高速列车引起的环境噪声及声屏障测试分析[J]. *振动工程学报*, 2011, 24(3): 229
CHEN Jianguo, XIA He, CAI Chaoxun, et al. Test and analysis of high-speed trains induced environmental noise and sound barriers [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2011, 24(3): 229. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4523.2011.03.002
- [5] HART C R, LAU S K. Active noise control with linear control source and sensor arrays for a noise barrier [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(1): 15. DOI: 10.1016/j.jsv.2011.08.016
- [6] HUANG X, ZOU H, QIU X. A preliminary study on the performance of indoor active noise barriers based on 2D simulations [J]. *Building and Environment*, 2015, 94(6): 891. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.06.034
- [7] BORCHI F, CARFAGNI M, MARTELLI L, et al. Design and experimental tests of active control barriers for low-frequency stationary noise reduction in urban outdoor environment [J]. *Applied Acoustics*, 2016, 114(7): 125. DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.07.020
- [8] OMOTO A, FUJIWARA K. A study of an actively controlled noise barrier [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, 94(4): 2173. DOI: 10.1121/1.407488
- [9] 中华人民共和国铁道部. 铁路沿线环境噪声测量技术规定: TB/T 3050—2002[S]. 北京:中国铁道出版社, 2002
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Technical regulations of measuring environmental noise along the railway line: TB/T 3050—2002 [S]. Beijing: China Railway Press, 2002
- [10] 中华人民共和国生态环境部. 环境影响评价技术导则 城市轨道交通: HJ 453—2018[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2018
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for environmental impact assessment—urban rail transit: HJ 453—2018 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018
- [11] International Organization for Standardization. Railway applications—acoustics—measurement of noise emitted by railbound vehicles: ISO 3095—2005 [S]. Geneva: ISO Copyright Office, 2005
- [12] 中国科学院. 声学轨道机车车辆发射噪声测量: GB/T 5111—2011[S]. 北京:中国标准出版社, 2011
Chinese Academy of Sciences. Acoustics—measurement of noise emitted by railbound vehicle: GB/T 5111—2011 [S]. Beijing: China Standards Press, 2011
- [13] 中华人民共和国环境保护部. 声环境质量标准: GB 3096—2008 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 2008
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environmental quality standard for noise: GB 3096—2008 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014
- [15] BELINGARD P, POISSON F, BELLAJ S. Experimental study of noise barriers for high-speed trains [C]//Proceedings of the 10th International Workshop on Railway Noise. Berlin: Springer-Verlag, 2012: 495
- [16] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础[M]. 3版. 南京:南京大学出版社, 2012: 211
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufen. Fundamentals of acoustics[M]. 3rd ed. Nanjing: Nanjing University Press, 2012: 211

(编辑 魏希柱)