

复合 QRD 型轨道交通声屏障的设计及性能分析

刘宏伟, 韩 西, 杨徐平, 陆海天

(重庆交通大学, 重庆 404100)

摘要: 低频噪声绕射问题是目前声屏障设计亟需解决的难题, 随着数论扩散体的应用, 出现了在声屏障上使用二次余数扩散体(Quadratic Residue Diffusers, QRD)的尝试。但是, 由于环境的影响, 其工程适用性并不强。以声学传播特性为基础, 结合数论扩散体原理并考虑材料使用量提出了一种新型声屏障。用 Lms.virtual.lab 软件, 采用自动匹配层(Automatic Matched Layer, AML)有限元方法并考虑声振耦合, 验证了其应用于轨道交通时优于扩散体复合 T 型声屏障及传统倒 L 声屏障的降噪性能, 尤其在低频段降噪效果明显, 有较高的工程适用性和现实意义。

关键词: 轨道交通; 声屏障; 数论扩散吸声体

中图分类号: TB535+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-06-0675-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.06.013

Design and performance analysis of composite QRD rail transit sound barrier

LIU Hong-wei, HAN Xi, YANG Xu-ping, LU Hai-tian

(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 404100, China)

Abstract: The problem of low-frequency noise diffraction is a difficult problem that needs to be solved in the current design of sound barriers. With the application of number theory diffusers, the attempts using quadratic residue diffusers (QRD) in sound barriers have been suggested. However, due to the influence of the environment, its engineering applicability is not strong. Based on the acoustic propagation characteristics, combining the principle of number theory diffuser and considering the amount of materials used, a new type of sound barrier is proposed in this paper. By using Lms.virtual.lab software and AML finite element method and considering acoustic-vibration coupling, it is verified that the noise reduction performance of applying the proposed sound barrier in rail transit is superior to applying diffuser composite T-barrier and traditional L-noise barrier, especially the effect at low frequencies is obvious. So, it has high engineering applicability and practical significance.

Key words: rail transit; sound barrier; number theory diffusion sound absorber

0 引言

随着轨道交通的发展, 如何降低轨道交通噪声成为人们迫切需要解决的问题。增设声屏障是目前最常用的方法, 然而简单的直立声屏障效果不尽人意, 尤其是对低频噪声的作用效果较差。德国科学家施罗德提出的数论扩散体, 具有优秀的扩散性能, 被广泛使用。扩散体结构最早应用厅堂的设计中, 用来增加瞬态声衰减及上升均匀性、连续声空间分布的均匀性和语言与音乐的自然质量。在其不断的应用过程中, 国内外众多学者已经研究^[1-3]并试验证明了二次余数扩散体(Quadratic Residue Diffusers, QRD)结构在低频范围有良好的吸声性能,

在低频段降噪效果显著。目前得到认可的高效降噪结构是二次余数扩散体与 T 型声屏障复合^[4]的屏障, 如图 1 所示。

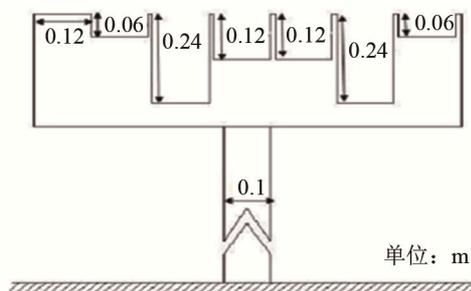


图 1 二次余数复合 T 型声屏障

Fig.1 Quadratic residue composite T-type sound barrier

图 1 所示的结构面临着一个严峻的问题: 声屏障是沿着线路连续设计, 扩散体结构对设计频率的共振吸声作用依赖于相邻槽体结构的完整性, 这种四周封闭顶端开口结构在多雨的城市形成了一组蓄水槽。雨水的蓄积会改变扩散结构的耦合声阻

收稿日期: 2018-06-16; 修回日期: 2018-08-10

作者简介: 刘宏伟(1993—), 男, 内蒙古自治区呼和浩特人, 硕士研究生, 研究方向为结构动力学。

通讯作者: 刘宏伟, E-mail: 2505913396@qq.com

抗,降低共振吸声效果。在轨道交通高架段,由于侧向风荷载的作用增加了屏障所受到的力偶作用,不利于结构的使用及安全。本文提出了一种新的基于数论扩散体的声屏障,并将其应用于轨道交通中,进行仿真模拟分析。

1 建立模型

1.1 研究频率及源强设置

轨道交通高架段声屏障有效隔声降噪的对象主要是轮轨噪声。轮轨噪声主要是由钢轨的不平整度激励车轨耦合振动引起的,其值的大小与车轮和钢轨表面的粗糙程度有关。轮轨噪声的频率特性是:频带较宽,以中低频为主,频率范围为 125~2 000 Hz。当车速为 50~160 km·h⁻¹时,轮轨的噪声和峰值频率与车速成正相关,峰值频率一般为 600~800 Hz^[5]。本文以 ISO 226^[6]为标准,确认低频噪声频段范围为 20~250 Hz^[7]。可见轮轨噪声主要集中在中频段,但也不可忽视低频段。

噪声源强度设置为 89 dB^[8],研究频率范围为 20 Hz~1 250 Hz。为了保证仿真的真实性,采用线声源模拟轮轨噪声。

建立如下坐标系:以声屏障与桥面的连接处为原点;纵桥向为 x 轴,以车辆前进方向为正;横桥向为 y 轴,以车辆前进方向右侧为正;垂直方向为 z 轴,竖直向上为正。声源位置为: (0, -3 000, 750), 单位为 mm。

1.2 声屏障材料选择

从环境兼容性的角度出发^[9],采用透明的亚克力板(Polymethyl Methacrylate, PMMA)为材料,通过“透景”的手法恢复沿线视景的整体性。PMMA 材料特性参数如表 1 所示。

表 1 PMMA 材料特性
Table 1 PMMA material properties

材料	密度/(kg·m ⁻³)	杨氏模量/(N·m ⁻²)	泊松比
PMMA	1 180	5.35×10 ¹⁰	0.35

1.3 测点

依据文献[10]中实测梁侧噪声的分布特点:中频噪声分布接近轨面,沿横向衰减较快,测点设置在轨面高度,具体点位设置为: $R_1(0, 7 500, 750)$, $R_2(0, 9 000, 750)$, $R_3(0, 10 500, 750)$, 单位为 mm。

1.4 二次余数扩散吸声体及声屏障设计

当周期为 7 时,二次余数序列 S_n 为 {0, 1, 4, 2, 2, 4, 1, 0}, 空气中声速为 340 m·s⁻¹。得到一组

槽深 d_n 为: {0, 0.060 7, 0.242 9, 0.121 4, 0.121 4, 0.242 9, 0.060 7}, 单位为 mm, 扩散吸声体结构及设计声屏障结构如图 2、3 所示。

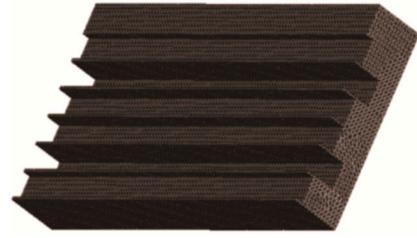


图 2 扩散吸声体
Fig.2 Diffusion absorber

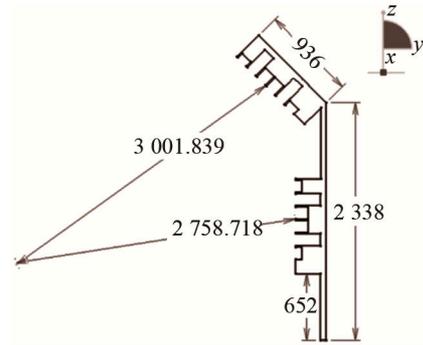


图 3 新型声屏障几何尺寸图(mm)
Fig.3 Geometric dimension of the new acoustic barrier

如图 3 所示,声源到设计声屏障 2 组扩体结构的声程差接近峰值频率 630~800 Hz 的半波长奇数倍,在扩散体结构设计频率产生的良好扩散效应作用下,反射声波会有有效的干涉减弱效应。对比图 2 和图 3,不难发现设计结构由于倾斜及上部对下部的保护,使得雨水及尘埃不容易影响结构性能。

在 Lms.virtual.lab 软件中建立相同高度的新型声屏障、二次余数复合 T 型声屏障和倒 L 型声屏障。为了叙述的方便,将 3 种声屏障分别称为 A 型、B 型和 C 型。为保证仿真的真实性,使用 AML 有限元方法分析声屏障在声场与结构声振耦合作用下屏后声压级分布特点。在保证最小波长内有 6 个声学网络的条件下建立声学包络网格,用全反射面模拟桥面,并进行声场与结构耦合振动分析。

2 A 型与 B 型声屏障对比分析

2.1 中频率对比

为了提高对比的真实性和客观性,将对比组云图的上下限设置为相同,由于中频时候声屏障作用效果较为明显,声学场点网格涉及范围内声压级差距较大,所以这里将云图显示的上下限设置为 89 dB 和 8 dB。以 630、800 和 1 000 Hz 作为研究对象进行对比,结果如图 4~9 所示。

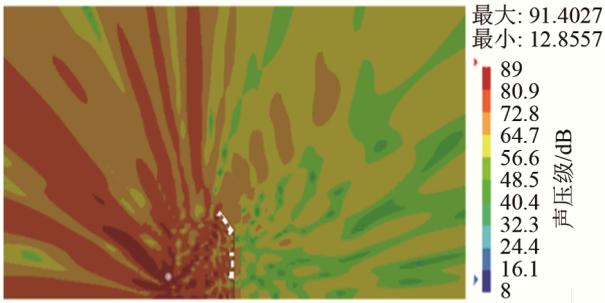


图 4 A 型声屏障 630 Hz 声压级云图
Fig.4 The pressure level nephogram of A-type sound barrier at 630 Hz

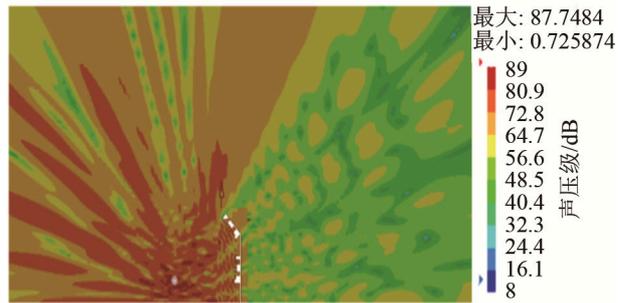


图 8 A 型声屏障 1 000 Hz 声压级云图
Fig.8 The pressure level nephogram of A-type sound barrier at 1 000 Hz

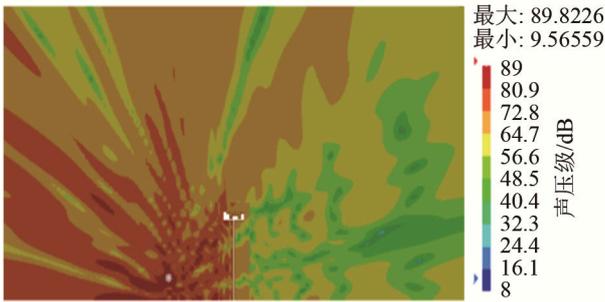


图 5 B 型声屏障 630 Hz 声压级云图
Fig.5 The pressure level nephogram of B-type sound barrier at 630 Hz

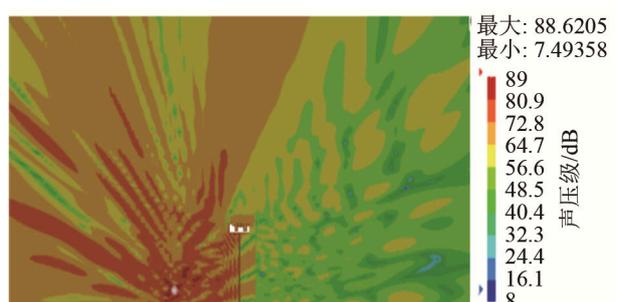


图 9 B 型声屏障 1 000 Hz 声压级云图
Fig.9 The pressure level nephogram of B-type sound barrier at 1 000 Hz

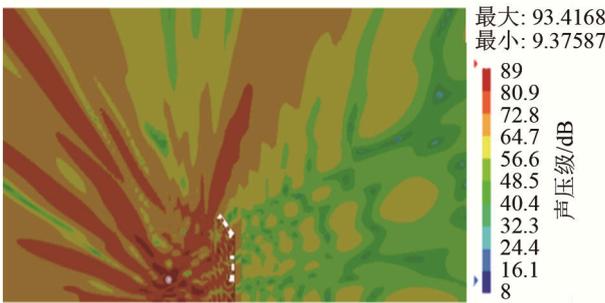


图 6 A 型声屏障 800 Hz 声压级云图
Fig.6 The pressure level nephogram of A-type sound barrier at 800 Hz

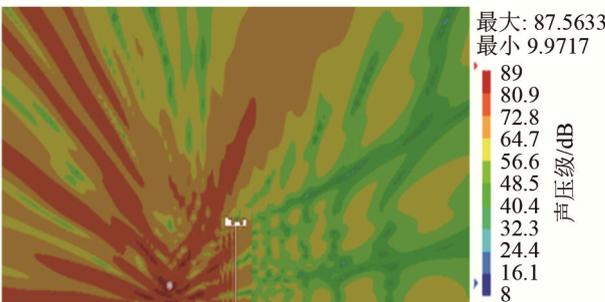


图 7 B 型声屏障 800 Hz 声压级云图
Fig.7 The pressure level nephogram of B-type sound barrier at 800 Hz

整体上看，随着频率的提升，A 型与 B 型的降噪效果都逐渐提高，声屏障对波长较短、频率较高的噪声作用效果较强，这与客观现实相符，表明了仿真的真实性。在 630 Hz 相应云图，虽然 A 型较 B

型屏后 32.3~56.6 dB 声压级面积少，但是高声压级 64.7~72.8 dB 对应的面积也少，A 型声屏障屏后最高声压级低于 B 型。对比 800 Hz 和 1 000 Hz 两组声压级云图，A 型屏后 32.3~56.6 dB 声压级面积较 B 型多，声场网络显示的最低声压级都是 A 型低于 B 型，可以直观地看出 A 型声屏障降噪效果优于 B 型。

2.2 低频率对比

同样为了对比的真实性和客观性，统一对比云图的显示上下限。由于低频噪音的波长较长，绕射明显，声屏障作用效果降低，这里将上下限设置为 89 dB 和 40 dB。以 160、200 和 250 Hz 作为研究对象进行对比，如图 10~15 所示。

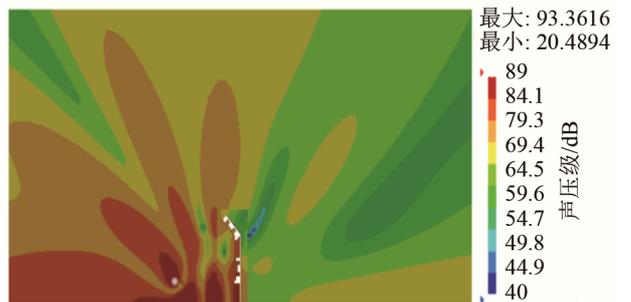


图 10 A 型声屏障 160 Hz 声压级云图
Fig.10 The pressure level nephogram of A-type sound barrier at 160 Hz

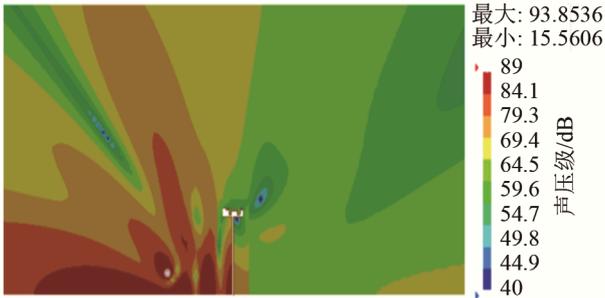


图 11 B 型声屏障 160 Hz 声压级云图
Fig.11 The pressure level nephogram of B-type sound barrier at 160 Hz

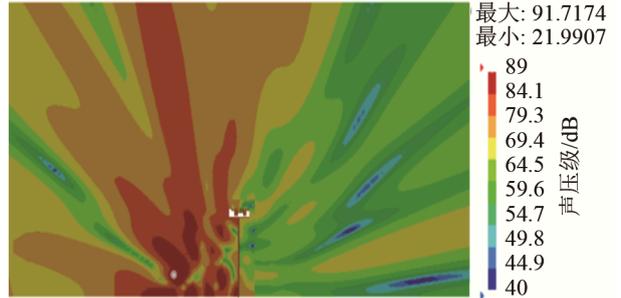


图 15 B 型声屏障 250 Hz 声压级云图
Fig.15 The pressure level nephogram of B-type sound barrier at 250 Hz

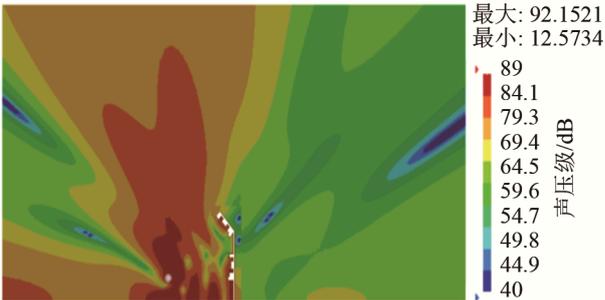


图 12 A 型声屏障 200 Hz 声压级云图
Fig.12 The pressure level nephogram of A-type sound barrier at 200 Hz

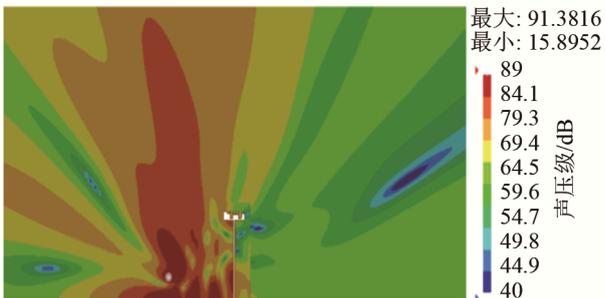


图 13 B 型声屏障 200 Hz 声压级云图
Fig.13 The pressure level nephogram of B-type sound barrier at 200 Hz

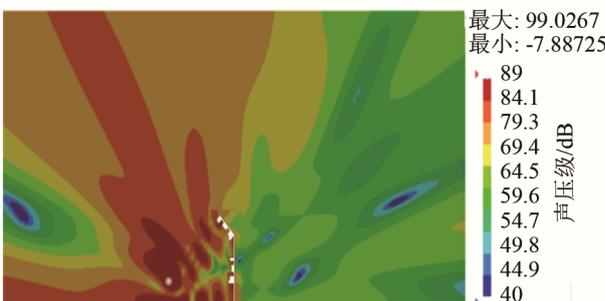


图 14 A 型声屏障 250 Hz 声压级云图
Fig.14 The pressure level nephogram of A-type sound barrier at 250 Hz

对比三组云图，可以直观地看出，A 型声屏障较 B 型声屏障有较大范围的 54.7~59.6 dB 声压级分布，A 型声屏障降噪效果较 B 型好。这表明 A 型声屏障不但很好地保留了扩散吸声体的低频吸声性

能，而且在吸声能力上较 B 型强。

2.3 测点数据对比

从 Lms.virtual.lab 中获得测点 R_1 、 R_2 和 R_3 的 1/3 倍频程数值，将 A 型声屏障与 B 型声屏障测点 A 计权声压级作差，得到的结果如图 16 所示。

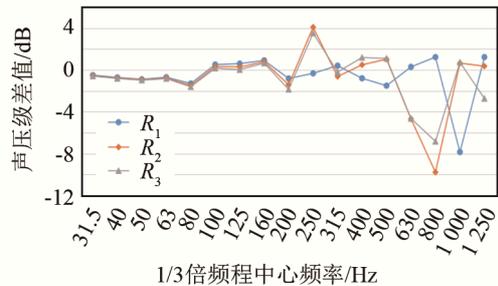


图 16 在测点 R_1 、 R_2 和 R_3 处的声压级差值
Fig.16 Measured sound pressure level differences at the measuring point R_1 , R_2 and R_3

由图 16 可以看出，低频段时候测点声压级差值接近，并且以负值为主，部分频率对应的声压级差值接近 -2 dB，A 型表现出更好的降噪效果。在中频段由于噪声传播受干扰程度加大，测点声压级差值区别加大，部分点位出现正值，但正值较小。整体上看，声压级差值以负值为主，在测点点位，A 型声屏障有更好的降噪效果。

综上所述，无论是低频噪声还是中频噪声，A 型声屏障的降噪性能都较 B 型强，仿真云图直观地表现出新型声屏障结构的有效性和优越性。从经济角度来看，相同高度的情况下，B 型有更长的直立屏壁材料消耗，这与 A 型多采用的 1 组扩散吸声体结构消耗材料量相抵消，在材料使用较为相近的情况下，A 型声屏障克服了雨水、尘埃等对扩散吸声体的负面作用，并且表现出优于 B 型的降噪性能，在工程实践方面有更高的可行性。

同样，对于 A 型与 C 型声屏障做相同的对比分析，结果发现：无论低频还是中频，A 型降噪性能均优于 C 型，这里不再赘述。

3 A 型与 C 型声屏障插入损失对比

目前,我国工程上主要用的是直立和倒 L 型声屏障,为了定量地分析 A 型声屏障的降噪性能,先建立没有声屏障只有声源的声场,记录测点计算得到的声压级,然后在相同条件下建立三种不同的声屏障,通过仿真计算获得加入声屏障后测点的声压级,用两者的差值来计算获得插入损失,用插入损失作为评价声屏障性能的指标。笔者针对 A 型与 B、C 型都做了对比分析,但仅以 A 型和 C 型对比作为示例在文中呈现,结果如图 17、18 所示。

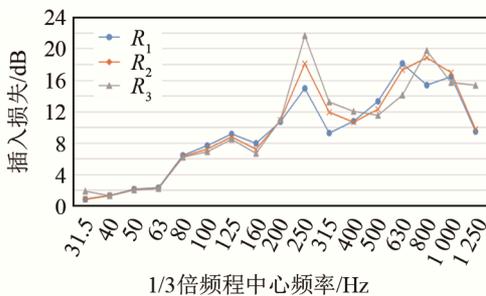


图 17 A 型声屏障测点插入损失

Fig.17 The insertion loss of A-type sound barrier measured at Point R_1 , R_2 and R_3

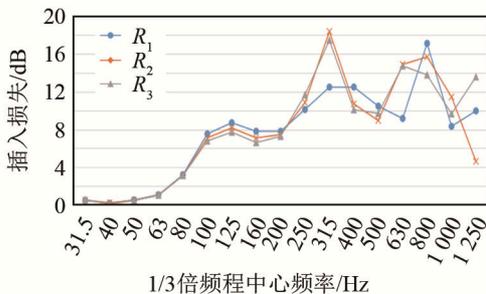


图 18 C 型声屏障测点插入损失

Fig.18 The insertion loss of C-type sound barrier measured at Point R_1 , R_2 and R_3

对比图 17 和图 18, 两图呈现了较为相近的曲线变化趋势, 低频前段插入损失较低, 后段开始提升并出现峰值, 然后在中频段出现另一个峰值。但是不难发现, A 型声屏障的第一个峰值前移, 出现在低频 250 Hz, 这表明 A 型声屏障有良好的低频吸声性能, 与前面云图分析的结果相一致。对比两图的中频段数值, 在轨道交通噪声峰值频率范围, A 型声屏障的插入损失普遍高于 B 型, 呈现更好的降噪性能。对于目前声屏障建设使用中出现的低频噪声控制较难的问题, A 型声屏障的建设及推广有较高的现实意义。

4 结论

在材料使用量相近的情况下, A 型声屏障在研究频率范围内都有接近甚至超越 B 型的降噪效果。由于几何结构的优越性, A 型声屏障避免了雨水、尘埃对顶部扩散体结构的影响, 增加了扩散吸声体结构应用于声屏障的工程可行性。A 型声屏障很好地发挥了扩散吸声体的低频吸声性能, 部分频率增加近 2 dB 的插入损失, 有利于解决低频噪声绕射严重的问题, 其设计及使用有较高的现实意义。

参 考 文 献

- [1] FUJIWARA K, MIYAJIMA T. Absorption characteristics of a practically constructed Schroeder diffuser of quadratic-residue type[J]. *Applied Acoustics*, 1992, **35**(2): 149-152.
- [2] 盛胜我, 赵松龄. 伪随机扩散体的吸声性能的理论分析[J]. *声学学报*, 1996, **21**(4): 555-564.
SHENG Shengwu, ZHAO Songling. Theoretical analysis of sound absorption performance of pseudo-random diffuser[J]. *Chinese Journal of Acoustics*, 1996, **21**(4): 555-564.
- [3] 关家振. 平方余数序列扩散体于声屏障的应用[C]//第十届全国噪声与振动控制工程学术会议论文集, 2005: 293-296.
GUAN Jiazhen. Application of square-remainder series diffuser to sound barrier[C]//Proceedings of the 10th National Conference on Noise and Vibration Control Engineering, 2005: 293-296.
- [4] MONAZZAM M R, LAM Y W. Performance of profiled single noise barriers covered with quadratic residue diffusers[J]. *Archives of Acoustics*, 2010, **35**(4): 565-578.
- [5] 李洪鲁, 冯裕钊, 孙荣基, 等. 城市高架轨道交通噪声预测研究进展[J]. *噪声与振动控制*, 2015, **35**(6): 7-12.
LI Honglu, FENG Yuzhao, SUN Rongji, et al. Research progress on noise prediction of urban elevated rail transit[J]. *Noise and Vibration Control*, 2015, **35**(6): 7-12.
- [6] DINISO226-2006, standard isocratic curve[S]. Germany: German Institute for Standardization (DE-DIN), 2006-04.
- [7] 韩江龙, 吴定俊, 李奇. 城市轨道交通高架结构噪声研究进展[J]. *城市轨道交通研究*, 2012, **15**(3): 109-112.
HAN Jianglong, WU Dingjun, LI Qi. Research progress on elevated structure noise of urban rail transit[J]. *Urban Rail Transit Research*, 2012, **15**(3): 109-112.
- [8] 辜小安, 伍向阳, 刘兰华. 轨道交通动车组噪声源强取值研析[J]. *环境影响评价*, 2017, **39**(5): 39-42.
GU Xiaoan, WU Xiangyang, LIU Lanhua. Study on the value of noise source strength of rail transit EMUs[J]. *Environmental Impact Assessment*, 2017, **39**(5): 39-42.
- [9] 晓春, 陆化普. 公路声屏障的视觉审美因素与景观补偿设计方法研究[J]. *中国园林*, 2015, **31**(1): 106-109.
XIAO Chun, LU Huapu. Study on visual aesthetic factors of highway sound barriers and design methods of landscape compensation[J]. *Chinese Garden*, 2015, **31**(1): 106-109.
- [10] 张迅. 轨道交通桥梁结构噪声预测与控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
ZHANG Xun. Research on prediction and control of rail transit bridge structure noise[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.