

廊道悬浮声屏障噪声预测及控制方案研究

阮学云¹, 魏玥¹, 高艳², 李达¹, 王相¹

(1. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001;
2. 中国科学院 声学研究所噪声与振动重点实验室, 北京 100190)

摘要: 廊道作为燃煤输送的主要通道, 其噪声对附近居民影响较大。布置声屏障是目前主要的治理方案, 但工程噪声预测软件不能准确模拟计算廊道带下方挑檐悬浮声屏障的噪声, 从而无法综合评估各常用类型声屏障在廊道噪声控制方案中的治理效果。以 Cadna/A 预测软件几何建模为基础, 利用几何位置关系将声屏障下挑檐绕射转化成可计算的上挑檐绕射, 并通过理论计算验证该方法的可行性。应用该方法对某电厂廊道进行噪声预测建模, 对上下挑檐声屏障、更换低噪声托辊、低噪声托辊配合上下挑檐声屏障三种噪声控制方案进行模拟计算, 结果表明: 三种方案均可在不同工程量情况下达到声环境质量 2 类标准。进一步通过经济性分析, 更换低噪声托辊性价比最佳。采用的噪声预测建模策略可实现各类悬浮声屏障的噪声预测, 各控制方案对比分析也可同为同类型廊道噪声治理提供科学依据, 具有较大的应用价值。

关键词: 廊道噪声; 悬浮声屏障; 低噪声托辊; 下挑檐; Cadna/A; 噪声控制方案

中图分类号: TU112; X839

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2022) 03-062-05

Study on Noise Prediction and Control Scheme of Corridor Suspension Noise Barrier

RUAN Xueyun¹, WEI Yue¹, GAO Yan², LI Da¹, WANG Xiang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
2. Key Laboratory of Noise and Vibration, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The corridor is the main channel for coal transportation, but the noise generated has a large impact on nearby residents. Deploying noise barriers is the main scheme at present, but noise prediction softwares cannot accurately simulate and calculate the noise of the corridor with lower eave suspension noise barriers, thus cannot comprehensively evaluate common used noise barriers in corridor noise control schemes. Based on the geometric modeling of Cadna/A prediction software, the geometric position relationship was used to transform the lower eave bypass of the noise barrier into a calculable upper eave bypass, and the feasibility of the method was verified by theoretical calculation. This method was applied to establish a noise prediction model of a power plant corridor, and three noise control schemes were simulated: upper and lower eave noise barriers, replacement of low-noise rollers, and low-noise rollers with upper and lower eave noise barriers. The results showed that all three schemes can achieve class II environmental quality standard for noise with different workloads. Further economic analysis showed that the replacement of low-noise rollers was the most cost-effective. The noise prediction modeling strategy adopted in this paper can predict the noise of various types of suspension noise barriers, and the comparative analysis of each control scheme provides a scientific basis for the noise control of the same type of corridors, presenting a high application value.

Keywords: corridor noise; suspension noise barrier; low noise roller; lower eaves; Cadna/A; noise control scheme

收稿日期: 2021-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11774378)

作者简介: 阮学云 (1978-), 男, 教授, 博士, 研究方向: 低噪声设计、机械系统动力学。E-mail: ruanxueyun@163.com

廊道作为电厂燃煤、水泥厂石灰石等输送的主要通道,往往距离地面一定高度且布置于企业厂界外。由于其工作时间长、噪声范围广、中低频段传播距离远,对附近居民生活影响较大,是主要的投诉对象。廊道噪声以托辊^[1]、带式输送机^[2]等噪声源为主,治理方案主要是针对廊道整体进行声屏障包围^[3-4]或整体更换低噪声托辊。根据经验确定控制方案,无科学依据。目前 Cadna/A 等噪声预测工程软件模拟悬浮声屏障只考虑上方绕射路径,对廊道底部增加声屏障等各组合方案无法进行准确的噪声预测,影响了模型预测计算准确性,从而无法得到科学的噪声控制方案。

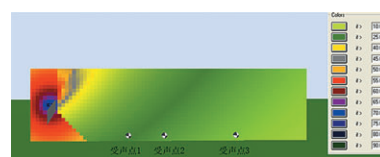
国外对声屏障降噪的研究自 20 世纪 60 年代开始,国内对声屏障降噪的研究起步相对较晚。Mackawa^[3]研究出二维声屏障的插入损失计算公式;Zaplaic 等^[4]提出一种计算模型避免对运送水泥原料的传送带附近噪声评估时的背景噪声干扰;徐圣辉等^[5]利用边界元对近轨不同型式上挑檐进行对比研究;王金瑞等^[6]运用 ISO9613-2 标准对两种类型的道路声屏障消声效果进行计算与对比;郭萍等^[7]在二维声屏障声压计算方法的基础上给出了三维有限长声屏障声压简化算法。以上研究均针对廊道上挑檐运用有限元或边界元算法^[8-10],计算复杂、耗时长,不适合工程应用。基于 Cadna/A 等工程预测软件对声屏障效果的预测多针对道路等交通噪声^[11-13],较少有针对悬浮声源下挑檐绕射声进行相关研究。

针对以上情况,基于 Cadna/A 预测软件为建模工具,通过声学元素几何变化方式,实现廊道各类型悬浮声屏障噪声控制方案计算,为科学选择噪声控制方案提供理论依据。

1 实现廊道下挑檐绕射声计算方法

1.1 当前 Cadna/A 软件下挑檐计算

Cadna/A 软件依据 ISO9613-2 标准对环境噪声进行模拟与预测,并获得国家认证^[14]。根据廊道声源特性,以点声源为例建立测试模型,验证目前噪声预测模型针对悬浮屏障下挑檐的计算结果准确性。其中:声源声功率级 80 dB,声源高度 10 m,声屏障宽度均为 3 m,在垂直声屏障竖面建立高 20 m 的垂直声场,观察单侧声屏障与下挑檐声屏障的声场分布,如图 1 所示。



(a) 单侧声屏障垂直声场分布



(b) 单侧带下挑檐模型垂直声场分布

图 1 单侧及下挑檐声屏障声场分布图

测试结果表明,设置下挑檐模型与单侧声屏障声影区声场分布一致,并经过单点计算,计算声源水平距离 20 m、30 m、50 m 及高 1.5 m 处噪声值,整理结果如表 1 所示。

表 1 Cadna/A 软件计算受声点噪声值 (单位: dB/A)

声屏障型式	受声点 1	受声点 2	受声点 3
单侧	25.4	23.2	19.9
下挑檐	25.4	23.2	19.9

由图 1 和表 1 可知, Cadna/A 软件计算中,虽可以设置下挑檐型式,但因其软件计算模块对方绕射声忽略考虑,声影区受声点的数值均没有发生变化,其下挑檐实际不起作用。因此, Cadna/A 预测软件对下挑檐绕射声计算不精确。

1.2 实现声屏障下挑檐绕射声模型建立及验证

考虑预测软件可计算上挑檐绕射声,为将下挑檐计算转化为上挑檐计算,建模时可通过保证声源与受声点声程差不变的情况下转换绕射声路径。根据几何关系,可转换为上绕射进行等效计算,示意图如图 2 所示。

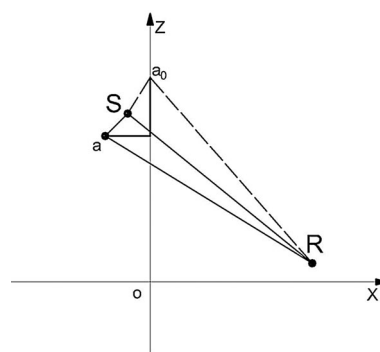


图 2 下挑檐路径转换示意图

以声源与受声点的水平连线设置为 X 轴,垂直于地面的单侧声屏障为 Z 轴建立坐标系,声源 S (s_x, s_y, s_z), 受声点 R (r_x, r_y, r_z), 声屏障下挑檐绕射点 a ($a_x, 0, a_z$), 保持 S 和 R 的位置不变, 在 XOZ 坐标面经过几何关系转换成上挑檐后, 保证几何变换后声程差 z 不变:

$$z = [(d_{sa} + d_{ar})^2 + b^2]^{1/2} - d_{SR} \quad (1)$$

式中: b 为声源与受声点之间的距离平行于屏障上边界的分量, m;

d_{sa} 为声源至下挑檐绕射路程, m;

d_{ar} 为受声点至下挑檐绕射路程, m;

d_{SR} 为声源至受声点的路程, m。

声屏障绕射路径之和:

$$d_{sa} + d_{ar} = d_{sao} + d_{aor} \quad (2)$$

经过路径的距离计算得出:

$$\begin{aligned} & \sqrt{s_x^2 + (a_{z0} - s_z)^2} + \sqrt{r_x^2 + (r_z - a_{z0})^2} \\ &= \sqrt{(a_x - s_x)^2 + (a_z - s_z)^2} + \sqrt{(r_x - a_x)^2 + (r_z - a_z)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

根据公式 (3) 及 S, R 和 a 点坐标计算出新的绕射点 a_0 ($a_{x0}, 0, a_{z0}$)。

根据 ISO9613-2 标准^[10], 屏障绕射声衰减计算公式为:

$$D_z = \lg \left[3 + \left(\frac{C_2}{\lambda} \right) C_3 z K_{met} \right] \quad (4)$$

式中: $C_2 = 40$ 不考虑地面反射影响;

对于单绕射: $C_3 = 1$;

λ 为标称频带中心频率的声波波长;

K_{met} 为气象影响修正因子:

$$K_{met} = \exp \left[- \left(\frac{1}{2000} \right) \sqrt{d_{ss} d_{sr} \frac{d}{2z}} \right] \quad (5)$$

式中: d_{ss} 为声源到第一绕射边的距离;

d_{sr} 为第二绕射边到接收点的距离;

d 为声源到受声点的距离;

z 为声程差;

增设声屏障后受声点声压级:

$$L_{IT}(DW) = L_W + D_C - A \quad (6)$$

L_W 为声源产生的声功率级;

D_C 为指向性校正;

A 为声源至接收点倍频带衰减;

其中:

$$A = A_d + A_a + A_g + A_b + A_m \quad (7)$$

A_d 为几何发散引起的衰减;

A_a 为大气吸收引起的衰减;

A_g 为地面效应引起的衰减;

A_b 为加屏障引起的衰减;

为其他多方面效应引起的衰减;

根据上述式 (1) - (7) 计算出声波经过下挑檐后受声点处声压级, 并利用几何关系通过 Cadna/A 进行等效计算, 计算结果如表 2。

表 2 下挑檐软件计算与理论计算 (单位: dB/A)

计算方式	受声点		
	20 m	30 m	50 m
理论计算	22.15	18.92	14.65
软件计算	22.0	18.8	14.6

根据上述理论计算与软件计算结果对比, 误差均在 0.5 dB 以内, 因此该等效建模方法可实现 Cadna/A 软件中下挑檐绕射声的预测计算。

2 廊道噪声治理前预测模型

根据前节提供的方法, 对安徽某电厂廊道进行噪声计算, 并根据常见的噪声控制方案进行噪声预测分析, 给出科学治理方案。该廊道沿途经过一处居民区, 如图 3 所示, 受影响居民较多, 为了改善该居民区声环境质量, 通过新的几何建模方法, 基于 Cadna/A 建立廊道周边区域的噪声预测模型, 分别计算廊道声屏障的上、下绕射路径, 预测声屏障及低噪声托辊对居民区的降噪效果, 给出合理可行的降噪措施。

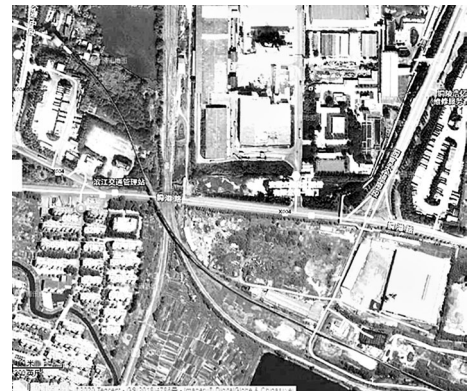


图 3 廊道卫星地图

2.1 建立廊道噪声预测模型

廊道的主要噪声来源皮带输送机呈圆柱形,距地面高度 11 m,横截面直径约 1 m;居民区距声源水平距离约 100 m,在此例中将廊道噪声源等效为线声源。廊道全程 2 200 m,居民区受声点高度 1.5 m。廊道声源频谱采用廊道近距离实测频谱。

2.2 治理前模型计算与对比

以廊道西边居民区为研究对象,使用 Cadna/A 软件对该区域进行预测计算,治理前噪声网格示意图如图 4 所示。

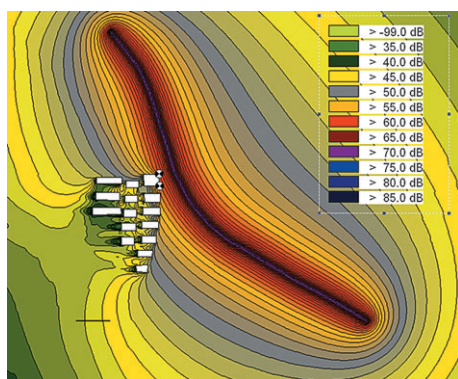


图4 廊道及居民区治理前噪声网格地图

根据噪声网格地图整理出各敏感点噪声值如表 3。

表3 治理前各位置噪声值 (单位: dB/A)

位置	治理前预测值	治理前实测值	误差
敏感点 1	59.1	59.5	0.4
敏感点 2	58.0	58.7	0.7

治理前选择居民区距离廊道最近的两处敏感点进行实测,误差均在 1 dB 之内,表明了该预测模型的可靠性。

根据治理前预测结果,显示小区内部噪声值基本达标,小区东北角区域噪声值最大可达到 59.5 (dB/A),根据声环境质量执行《声环境质量标准》(GB12348-2008) 2 类标准^[15],夜间要求限值 50 (dB/A),该处敏感点超标。

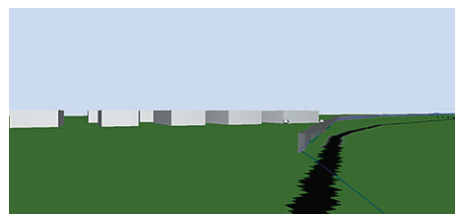
3 降噪措施及效果

根据治理前 Cadna/A 软件预测结果显示,对敏感点进行治理,建立预测模型,分析三种治理方案的效果及经济性。

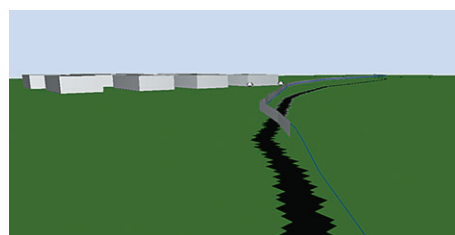
3.1 各控制方案

方案 1: 上下挑檐声屏障

设置声屏障宽度、上挑檐声屏障宽度、下挑檐声屏障宽度,均取 3 m。根据上文方法选择式 (2) 和 (3) 计算出下挑檐几何变化后的声屏障高度,建立模型如图 5 所示。



(a) 上挑檐几何模型建立



(b) 几何变换后下挑檐几何模型建立

图5 上下挑檐声屏障几何模型建立

在选择设置声屏障区域利用 Cadna/A 分别计算出无声屏障、带上挑檐声屏障、下挑檐声屏障在敏感点处声压级 L_{p1} 、 L_{p2} 、 L_{p3} , 根据式 (6) 和 (7) 可知:

$$L_{p1} = L_w + D_c - A' \quad (8)$$

$$L_{p2} = L_w + D_c - A_{b1} - A' \quad (9)$$

$$L_{p3} = L_w + D_c - A_{b2} - A' \quad (10)$$

其中:

$$A' = A_d + A_a + A_g + A_m \quad (11)$$

A_{b1} 为上挑檐引起的衰减;

A_{b2} 为下挑檐引起的衰减;

根据式 (8) - (11) 得出上下挑檐声屏障在敏感点处的总声压级 L_p 为:

$$L_p = 10 \times \log(10^{0.1L_{p2}} + 10^{0.1L_{p3}} + 10^{0.1L_{p1}}) \quad (12)$$

方案 2: 更换低噪声托辊

低噪声托辊直径较普通托辊更大,且托辊支架厚度更厚,低噪声托辊的寿命是普通托辊的两倍。根据低噪声托辊厂家提供参数,低噪声托辊较普通

托辊降低 10~15 dB 左右,降噪量按照 12 dB 进行设置,更换低噪声托辊。几何示意图如图 6 所示。

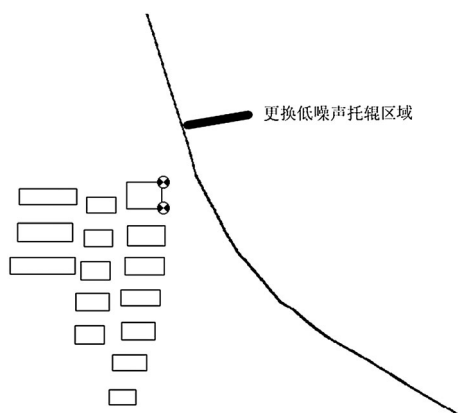


图 6 更换低噪声托辊二维模型

方案 3:低噪声托辊配合上下挑檐声屏障

为进一步探究低噪声托辊及上下挑檐声屏障治理效果,运用上文计算方法,对更换低噪声托辊区域增设上下挑檐声屏障,计算其治理效果。几何示意图如图 7 所示。

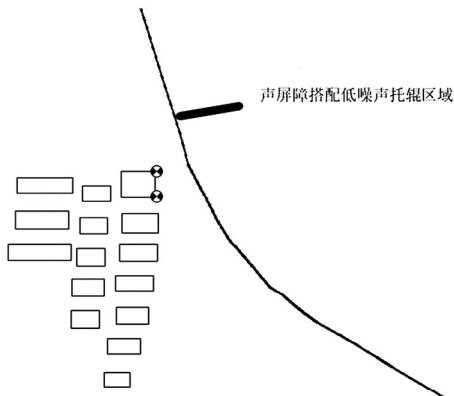


图 7 声屏障搭配低噪声托辊二维模型

3.2 各方案对比分析

根据以上三种治理方案进行计算,运用 Cadna/A 进行计算,整理结果如表 4 所示。

表 4 三种方案治理效果 (单位:dB/A)

位置	治理方案		
	700 m 声屏障	1 000 m 低噪声托辊	低噪声托辊 500 m + 声屏障 500 m
敏感点 1	49.83	49.9	49.6
敏感点 2	49.10	48.5	48.9

根据计算结果可知三种方案均可在一定范围内使敏感点达到治理标准。

3.3 工程量对比计算

根据市场调查静音低噪声托辊的价格大约 300 元,每 100 m 更换低噪声托辊的价格大约 20 万元,安装费大约 1 万元,共计 21 万元每百米;增加声屏障每 100 米材料费约 45 万元,安装费约 1 万元,共计 46 万元每百米。结合治理达标工程整理出预计达标成本,如表 5 所示。

表 5 廊道噪声治理预计达标成本 (单位:万元)

位置	预计达标成本(万元)		
	700 m 声屏障	1 000 m 低噪声托辊	低噪声托辊 500 m + 声屏障 500 m
敏感点	322	210	335

根据达标成本结果显示,更换低噪声托辊治理廊道噪声,在达标的情况下,其成本最低,噪声预测地图如图 8 所示,可作为推荐方案。

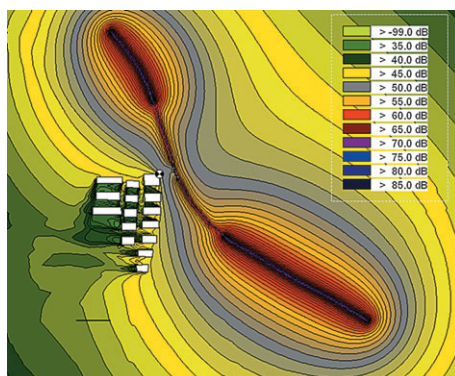


图 8 更换低噪声托辊后噪声网格地图

3.4 实验验证

针对安徽某电厂廊道噪声对周围居民区影响较大,应用上述方法对该居民区进行噪声治理,实施现场如图 9 所示。



图 9 更换低噪声托辊实物图

根据上述方案分析,更换 1 000 m 静音托辊后
(下转第 82 页)

- 的草图图像检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(6): 847–854.
- [9] Chen Y T, Chen T S, Chen J. A LeNet based convolution neural network for image steganalysis on multiclass classification[J]. DEStech Transactions on Computer Science and Engineering, 2019 (ccme): 234–238.
- [10] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6): 84–90.
- [11] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[EB/OL]. 2014: arXiv: 1409.1556[cs.CV]. <https://arxiv.org/abs/1409.1556>
- [12] 姬子恒, 王斌. 基于深度学习的草图检索方法研究进展[J]. 计算机工程与科学, 2021, 43(12): 2190–2205.
- [13] 于邓, 刘玉杰, 邢敏敏, 等. 包含跨域建模和深度融合网络的手绘草图检索[J]. 软件学报, 2019, 30(11): 3567–3577.
- [14] 邹利华. 基于 PCA 降维的舰船图像检索方法[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(24): 97–99.

(上接第 66 页)

对敏感点进行噪声数据采集, 测试结果如下表 6。

表 6 治理后各位置噪声值 (单位: dB/A)

位置	治理前实测值	治理后实测值
敏感点 1	59.5	50.0
敏感点 2	58.7	49.1

根据表 6 可以看出, 治理效果达到预期值, 说明输送廊道噪声治理方案选择合理。

4 结论与建议

利用几何关系将声屏障下挑檐绕射声进行几何转化, 通过新的几何建模方法, 实现了 Cadna/A 准确计算各类型屏障绕射声计算。应用该方法对某电厂廊道建立噪声预测模型, 对各方案计算结果进行技术与经济性对比分析, 并给出了相关结论, 为廊道噪声方案提供了科学依据, 其结论也可同为同类型输送廊道噪声方案提供参考。

参考文献:

- [1] 张承森. 带式输送机噪声来源分析及降噪方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(S2): 101–103.
- [2] 周利东, 贾志鹏, 白纯刚, 等. 托辊噪声机理分析及降噪方法[J]. 煤矿机械, 2021, 42(4): 80–83.
- [3] Sun L J, Zhao Y C, Zhang J, et al. Research and application of noise barriers in highway construction[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 233: 01087.
- [4] Redondo J, Peiró-Torres M P, Llinares C, et al. Correlation between objective and subjective assessment of noise barriers[J]. Applied Acoustics, 2021, 172: 107640.
- [5] Maekawa Z. Noise reduction by screens[J]. Applied Acoustics, 1968, 1(3): 157–173.
- [6] Zaplaic, Toma (SC Cepstra Grup SRL, Bucharest, Romania), et al. Assessment of Noise Levels Generated by the Operation of a Conveyor Belt[J]. UPB Scientific Bulletin, 2020, 82(1): 31–42.
- [7] 徐圣辉, 周信, 陈辉, 等. 近轨低矮声屏障降噪效果影响因素分析[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(5): 139–145.
- [8] 王金瑞, 李舜酩, 韩宝坤. 不同顶端结构声屏障绕射声衰减量模拟分析[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(1): 125–128, 132.
- [9] 郭萍, 文桂林, 王艳广, 等. 三维有限长声屏障声压简化算法[J]. 公路交通科技, 2012, 29(8): 153–158.
- [10] Grubeša S, Suhanek M, Djurek I, et al. Combination of boundary element method and genetic algorithm for optimization of T-shape noise barrier[J]. Tehnicki Vjesnik—Technical Gazette, 2021, 28: 77–81.
- [11] 杨忠平. 基于 Cadna/A 的高速铁路单侧高层住宅声屏障降噪效果研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(10): 153–156.
- [12] 刘珊珊, 陈郁, 郑洪波, 等. 基于 Cadna/A 软件的城市道路噪声模拟[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(6): 2095–2101.
- [13] 范静, 张捷, 杨妍, 等. 城际列车 C 型近轨声屏障降噪效果预测分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(2): 188–193, 206.
- [14] 国家环保总局. 关于德国 Cadna/A 环境噪声模拟软件系统鉴定意见[Z]. 北京: 国家环保总局, 2001.
- [15] 国家技术监督局. 声学 户外声传播的衰减 第 2 部分: 一般计算方法: GB/T 17247.2—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.