◇ 研究报告 ◇

高速公路组合式声屏障结构设计与多目标优化*

崔洪军1 孙胜强1 姚 胜27 朱敏清2

(1 河北工业大学土木与交通学院 天津 300401)(2 河北工业大学建筑与艺术设计学院 天津 300130)

摘要:高速公路大型车辆较多,其产生的交通噪声多集中在低频,现有声屏障对低频噪声吸收效果不佳,并且 建设成本过高。为提高声屏障的降噪性能,将多种吸声结构应用于声屏障设计中,提出了一种集吸声复合板、 多重锥形吸声结构、透明隔声结构以及二次余数扩散体复合结构于一体的组合式声屏障。采用传递矩阵法计 算分析了各结构的声阻抗和吸声系数;以降噪性、安全性和经济性为目标,建立了声屏障多目标优化模型;选 用遗传算法进行求解,并进行 TOPSIS 决策,从非劣解集中选出最优解;最后,将优化结果与荣乌高速涉县路 段已安装的挤压成型混凝土声屏障进行比较。结果表明,优化后的组合式声屏障插入损失提高了 6.3 dB(A), 提升 40.9%,其中吸声附加值为 5.8 dB(A);声屏障建设成本减少了 5.9%;立柱顶端位移减少了 96.2%,满足标 准最大安全控制位移。研究结果可为高速公路声屏障设计提供参考。

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.06.004

文章编号: 1000-310X(2024)06-1219-11

Design and multi-objective optimization of composite noise barrier structure for freeway

CUI Hongjun¹ SUN Shengqiang¹ YAO Sheng² ZHU Minqing²

School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)
 School of Architecture & Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The traffic noise generated by the large number of heavy vehicles on freeway is mostly concentrated in low-frequency, while the existing noise barriers have poor absorption effect on low-frequency noise and the construction cost is too high. To improve the noise reduction performance of noise barriers, various sound absorption structures were applied to the design of noise barriers. A composite noise barrier that integrates sound absorption composite plates, multiple conical sound absorption structures, transparent sound insulation structures, and quadratic residue diffuser composite structures was proposed. The transfer matrix method is used to calculate and analyze the acoustic impedance and absorption coefficient of each structure; A multiobjective optimization model for noise barriers was established with the objectives of noise reduction, safety, and economy; Using genetic algorithm for solving and making TOPSIS decisions to select the optimal solution from a set of non-inferior solutions; Finally, the optimal solution was compared with the installed extruded

²⁰²³⁻⁰⁷⁻⁰⁶ 收稿; 2023-10-14 定稿

^{*}国家自然科学基金项目 (52372302), 河北高速公路集团有限公司科技创新项目 (HJ2206)

作者简介: 崔洪军 (1974-), 男, 河北定州人, 博士, 研究方向: 绿色交通设施。

[†]通信作者 E-mail: yaosheng@tju.edu.cn

concrete sound barrier on the Shexian section of the Rongwu freeway. The results show that the insertion loss of the optimized composite noise barrier is increased by 6.3 dB (A), 40.9%, of which the added value of sound absorption is 5.8 dB(A); The construction cost of noise barrier has been reduced by 5.9%; The column top displacement has been reduced by 96.2%, meeting the standard maximum safety control displacement. The research results can provide reference for the design of noise barriers on freeway.

Keywords: Freeway; Composite noise barrier; Multi-objective optimization; Transfer matrix method

0 引言

我国高速公路在20万以上人口城市的覆盖率 超过98%,极大提高了沿线居民的生活质量与经济 发展,但因此产生的交通噪声污染已逐渐成为人们 最为关注的环境污染问题之一。

在高速公路路侧建设声屏障是控制道路交通 噪声最有效的方法之一。邓友生等[1]基于遗传算法 与边界元理论对声屏障的组合结构形式进行了优 化,结果表明优化后的复合型声屏障插入损失比吸 声型声屏障高2 dB(A)。卢洋^[2]利用边界元法研究 了声屏障屏体吸声部分与隔声部分所占比例对声 屏障插入损失的影响。郑聪等[3]针对吸声材料布局 对声屏障降噪效果的影响进行了研究,发现上部屏 体吸声布局对高频噪声影响较大,中部屏体吸声布 局对中频噪声影响较大,下部屏体吸声布局对低频 噪声的插入损失影响较大。在声屏障设计中,为了 追求更好的降噪效果和更宽的有效作用频带,往往 需要组合多种吸声结构与吸声材料。杨菲等[4]针对 变参数分空腔单层微穿孔板结构参数进行了优化, 得到了不同目标范围频率下的最优设计参数。吴佳 康等^[5]和王飞萌等^[6]将微穿孔板吸声结构与多孔 材料复合,得到了在中低频吸声性能较好的声学结 构。吴越等[7]将单一泡沫铝多孔板与二次余数扩散 体 (Quadratic residue diffuser, QRD) 复合, 得到了 在低频吸声性能较好且具有宽带吸声特点的吸声 结构。同时为了减少行车压抑感,往往将声屏障屏 体中部设置为透明隔声结构。

现有声屏障设计多为各种吸声结构或材料与 隔声结构的组合,为获取最优的组合形式,学者已进 行了部分优化研究。赵文畅等^[8]采用边界元法和移 动渐近线优化算法对声屏障表面吸声材料的分布 进行优化设计。Toledo等利用对偶边界元法和进化 算法对声屏障的形状进行了优化^[9],并考虑噪声衰 减的最大化和材料的最小化对薄声屏障进行了形 状优化^[10]。阮学云等^[11]基于已有声衰减模型,以 声屏障综合成本最小为目标进行了优化,优化后的 声屏障降噪效果与优化前相差不大,但综合成本降 低。吴小萍等^[12]将声屏障插入损失和最大有效风 压作为目标函数对声屏障建设高度进行了双目标 优化。Grubeša等^[13-14]利用边界元法和遗传算法 对声屏障经济可行系数和插入损失两个目标进行 了优化。

综上所述,全隔声声屏障的降噪效果有限,而 组合式声屏障较其有较大优势。因此,提出新型组 合式声屏障,同时将声屏障的降噪性、安全性和经 济性三个目标进行组合优化。本文以高速公路声 屏障的插入损失、建设成本和立柱顶端位移作为目 标函数,以声屏障不同吸声结构的高度作为设计变 量,采用NSGA-II算法,得到Pareto前端分布优化 解集,以得到声屏障不同结构的优化高度。研究成 果可为实际工程中声屏障优化设计提供参考。

1 组合式声屏障结构设计及性能分析

1.1 组合式声屏障结构设计

目前高速公路声屏障多采用百叶式吸声板、金 属隔声板或混凝土单元板,其形式单一,降噪效果 有限。因此,考虑到高速公路大型车辆较多、产生的 交通噪声能量集中在低频段的特点,设计了一种集 吸声复合板、多重锥形吸声结构、透明隔声结构以 及QRD复合结构于一体的组合式声屏障(如图1所 示),主要吸声结构参数如表1所示。其中,吸声复合 板为吸声材料与空腔的组合,能够有效吸收低频噪 声;多重锥形吸声结构为微穿孔板、吸声材料及空 腔的组合,且将微穿孔板设置在凸起部分的底部,可 以增加空腔厚度以提高低频吸声能力,也可以防止 雨雪进入单元板结构内部影响其吸声效果与使用 寿命;透明隔声结构由双层中空亚克力板构成,其 隔声量优于相同厚度的单层亚克力板,同时亚克力 板是一种透明材料,将其设置在声屏障屏体中部可 以提高道路内的采光与视觉效果;QRD复合结构为 QRD 与微穿孔板的组合,相当于多个微穿孔板共振



图1 组合式声屏障组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of composite sound barrier composition

表1 组合式声屏障主要吸声结构 Table 1 Main sound absorption structure of composite noise barrier

结构名称	参数
吸声复合板结构	20 mm 吸声材料 +70 mm 空腔
多重锥形吸声结构	多重锥形吸声面板 + 渐变空腔 +20 mm 吸声材料 +40 mm 空腔
QRD 复合结构	QRD+ 微穿孔板

1.2 组合式声屏障性能分析

由于组合式声屏障为隔声结构与吸声结构的 组合,其插入损失主要由声绕射引起的衰减 ΔL_d 以 及吸声结构对声能的吸声附加值 d_a 决定,后者由 声屏障整体吸声系数 α_i 决定。吸声系数与声阻抗 直接相关。组合式声屏障整体的声阻抗z由吸声复 合板的声阻抗 z_1 、多重锥形吸声结构的声阻抗 z_2 、 QRD 复合结构的声阻抗 z_3 和透明隔声结构的声阻 抗 z_4 并联得到,其等效电路图如图2所示,其中 R_i 为声阻, M_i 为声质量, Z_{D_i} 为声容^[15]。

由组合式声屏障结构等效电路图可得声屏障 整体的声阻抗z为

$$z = \left(\frac{\Phi_1}{z_1} + \frac{\Phi_2}{z_2} + \frac{\Phi_3}{z_3} + \frac{\Phi_4}{z_4}\right)^{-1}, \qquad (1)$$

式(1)中: Φ_i 为声屏障相应结构横向面积占总体结构面积的比值; z_i 为各结构的声阻抗。



图 2 组合式声屏障声阻抗等效电路图 Fig. 2 Equivalent circuit diagram of composite

sound barrier acoustic impedance

由于声屏障各部分的长度一样,因此各部分结 构横向面积占总体结构横向面积的比值实际上就 是高度比,即

$$\Phi_i = h_i / \sum_{i=1}^4 h_i, \tag{2}$$

式(2)中:hi为各结构的高度。

使用传递矩阵法^[16]对声屏障各部分结构的声阻抗*z_i*进行理论计算,首先得到各吸声结构的传递矩阵[*T_i*]。计算频率设置为10~4000 Hz,声屏障吸声结构微穿孔板、多重锥形吸声面板以及QRD相关参数分别如表2、表3与表4所示。

表2 微穿孔板参数取值

Table 2Parameter values of microperfo-
rated plates

参数	d/mm	t/mm	$\sigma/\%$
取值	0.5	0.5	2

表3 多重锥形吸声面板参数取值

Table 3 Parameter values of multiple con-ical sound-absorbing panels

参数	凸起高度 h_0/mm	凸起宽度 w_0/mm
取值	190	100

表4 QRD 参数取值 Table 4 Parameter values of QRD

参数	d_0/mm	d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	d_4/mm	d_5/mm	d_6/mm
取值	300	60	240	120	120	240	60

1.2.1 吸声复合板

吸声复合板采用吸声材料后设置空腔的结构 型式,如图3所示。通过将吸声材料传递矩阵和空 腔传递矩阵按设置顺序相乘可得到吸声复合板结 构的传递矩阵和声阻抗。



图3 吸声复合板

Fig. 3 sound-absorbing composite panel

对应的吸声材料的传递矩阵 [
$$\mathbf{T}_{a}$$
] 为
$$[\mathbf{T}_{a}] = \begin{bmatrix} \cos(k_{a}t_{a}) & \sin(k_{a}t_{a})Z_{a}j \\ \\ \frac{\sin(k_{a}t_{a})}{Z_{a}}j & \cos(k_{a}t_{a}) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式(3)中: t_a 为吸声材料厚度; k_a 为传播常数; Z_a 为特征阻抗。

吸 声 材 料 模 型 采 用 Delany-Bazley(D-B) 模 型^[17],特征阻抗 Z_a 和传播常数 k_a 如式 (4)、式 (5) 所示:

$$Z_{\rm a} = \rho_0 c_0 \Big[1 + 0.0571 \left(\rho_0 f/R \right)^{-0.754} - j0.087 \left(\rho_0 f/R \right)^{-0.732} \Big], \tag{4}$$

$$k_{\rm a} = \frac{\omega}{c_0} \Big[1 + 0.0978 \left(\rho_0 f/R \right)^{-0.7} - \mathrm{j}0.189 \left(\rho_0 f/R \right)^{-0.595} \Big], \tag{5}$$

其中: ρ_0 为空气密度; c_0 为声速; ω 为角频率;f为噪 声频率;R为材料流阻率,此处取 49300 Pa·s/m²。

对应空腔部分的传递矩阵[T_c]为

$$[\mathbf{T}_{c}] = \begin{bmatrix} \cos(kt_{c}) & \sin(kt_{c})\rho_{0}c_{0}j\\ \frac{\sin(kt_{c})}{\rho_{0}c_{0}}j & \cos(kt_{c}) \end{bmatrix}, \qquad (6)$$

式(6)中:*t*_c为空腔厚度;*k*为波数。 则吸声复合板的传递矩阵[**T**₁]和声阻抗*z*₁为

$$[\boldsymbol{T}_1] = [\boldsymbol{T}_a] [\boldsymbol{T}_c], \qquad (7)$$

$$z_1 = \frac{T_{1_{11}}}{T_{1_{21}}\rho_0 c_0}.$$
 (8)

相应的吸声复合板吸声系数 α 为

$$\alpha = \frac{4 \text{Re}(z)}{\left[1 + 4 \text{Re}(z)\right]^2 + \left[\text{Im}(z)\right]^2},$$
(9)

式(9)中:Re、Im分别代表实部和虚部。

1.2.2 多重锥形吸声结构

多重锥形吸声结构采用多重锥形凸起面板与 背板结合的结构型式,内部设置一定厚度的吸声材 料,其余为空腔,如图4所示。将微穿孔板传递矩阵、 吸声材料传递矩阵和空腔传递矩阵按设置顺序相 乘即可得到多重锥形凸起复合结构的传递矩阵和 声阻抗。



图4 多重锥形吸声结构

Fig. 4 Multiple conical sound absorption structure

微穿孔板的相对声阻抗率 z_s 的计算采用马大 ${}^{[18]}$ 提出的理论方法,单层微穿孔板的传递矩阵 $[T_s]$ 为

$$[\mathbf{T}_{\mathrm{s}}] = \begin{bmatrix} 1 \ z_{\mathrm{s}}\rho_0 c_0 \\ 0 \ 1 \end{bmatrix}.$$
(10)

多重锥形吸声结构的面板由多个锥形凸起构 成,凸起斜边密实,底边为微穿孔结构。声波在多 重锥形吸声结构的一个凸起内的传播路径如图5(a) 所示,可以看出,声波首先垂直通过微穿孔板入射, 到达斜边面板时发生全反射,此时声波继续向前入 射,最后斜入射到吸声材料和其背后的空腔。考虑 到此结构的空腔是不规则的,因此采用微分的思想 把微穿孔板离散成 N 个小段,如图5(b)所示,则第 *i*个空腔长度即声波的传播路径由入射段和反射段 两部分组成。因反射后的声波入射到吸声材料时存 在一个夹角β,该夹角β与凸起斜边和竖直方向的 夹角θ有关,因此吸声材料和其后面的规则空腔应 考虑夹角β对吸声系数的影响。

第*i*个阻抗复合结构的传递矩阵[**T**_{2_i}]见式(11)~(13):

$$[\boldsymbol{T}_{2_i}] = [\boldsymbol{T}_{s}] [\boldsymbol{T}_{c_i}] [\boldsymbol{T}_{a}] [\boldsymbol{T}_{c}], \qquad (11)$$

$$D_i = l - \frac{\Delta h_1}{\tan \theta} i + \frac{\Delta h_1 i + h}{\cos \beta}, \qquad (12)$$

$$\beta = \pi/2 - 2\theta, \tag{13}$$

其中, D_i 为第i个不规则空腔传递矩阵[T_{c_i}]的空腔 厚度,声阻抗 z_{2_i} 的计算见式(8)。



图5 多重锥形吸声结构凸起

Fig. 5 Multiple conical sound absorption structure protrusions

此结构的总声阻抗 z₂ 为 N 个阻抗复合结构通 过并联得到,见式 (14):

$$z_2 = \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{N z_{2_i}}\right)^{-1},\tag{14}$$

进一步可根据式(9)计算得到其吸声系数值。

1.2.3 QRD 复合结构

QRD 复合结构采用 QRD 与微穿孔板复合的 结构型式,其不同厚度的空腔与微穿孔板组合,构成 了多个微穿孔板共振结构,如图6所示。其中,QRD 最底部凹槽厚度为0,即为刚性面,将其并入透明隔 声结构声阻抗z4的计算中。通过将微穿孔板传递矩 阵和空腔传递矩阵按设置顺序相乘获得不同空腔 厚度微穿孔板共振结构的传递矩阵和声阻抗,最后 得到QRD 复合结构的总声阻抗。

第*i*个微穿孔板共振结构的传递矩阵[**T**_{q_i}]可由式(15)计算得到:

$$[\boldsymbol{T}_{q_i}] = [\boldsymbol{T}_s] [\boldsymbol{T}_c], \qquad (15)$$

其中, 声阻抗 z_{qi} 见式 (8)。QRD 复合结构总声阻抗 z₃ 由式 (16) 计算得到:

$$z_3 = \left(\sum_{i=1}^6 \frac{1}{6z_{\mathbf{q}_i}}\right)^{-1},\tag{16}$$

进而可通过式(9)计算得到其吸声系数值。



图 6 QRD 复合结构 Fig. 6 Composite structure of QRD

1.2.4 透明隔声结构

透明隔声结构采用双层亚克力板的结构型式, 如图7所示,其阻抗为密度与声速的乘积,其中亚克 力板的声阻抗z4远大于空气的特征阻抗,可以视为 无穷大,即可以看作刚性边界。



图 7 双层中空亚克力板 Fig. 7 Double layer hollow acrylic panel

1.2.5 组合式声屏障

图8为各吸声结构吸声系数曲线汇总图,从 中可以看出:吸声复合板结构在280~1860 Hz和 2095~4000 Hz的吸声效果较好,其吸声系数在0.60 以上,且在2570 Hz处吸声峰值达到0.97,因此,吸 声复合板无论是在低频还是在中高频均有不错的 吸声性能;多重锥形吸声结构具有较宽的吸声频带 和多个吸声峰值,在180~605 Hz和820~2060 Hz 范围内的吸声系数高于0.60,且在930 Hz处达到 峰值,吸声峰值为0.95;QRD复合结构具有多个 吸声峰值,在300~800 Hz频率范围内吸声系数均 高于0.90,具有宽频吸声的特点,在高频1565 Hz、 1670 Hz、2230 Hz、2925 Hz和3000 Hz处均达到 吸声峰值,这些吸声峰值分别对应QRD各空腔厚 度构成的微穿孔板共振结构的吸声峰,可见将不 同厚度空腔组成的微穿孔板共振结构并联可以得 到多个吸声峰,以实现宽频吸声。对比来看,在 265~900 Hz、1525~1760 Hz 和 2215~2255 Hz 范围 内,QRD 吸声系数最高,均高于 0.90,可见 QRD 复 合结构对于中低频和部分高频的噪声吸声效果很 好;在 900~1140 Hz 和 1770~2070 Hz 范围内,多重 锥形吸声结构吸声效果最好,吸声峰值达到 0.93;而 在 1155~1525 Hz 和 2255~3000 Hz 范围内,吸声复 合板吸声效果最好,吸声峰值达到 0.97。显然,不同 吸声结构吸声效果最好的频率范围各不相同,因此 如果将不同吸声结构在声屏障上合理布局,便可以 获得全频率范围内吸声综合最优的效果,从而提高 声屏障的插入损失。





Fig. 8 Comparison of sound absorption coefficients of different sound absorption structures

2 声屏障优化模型建立

为更好地提高声屏障的降噪效果,同时降低立 柱的顶端位移和声屏障建设成本,需要不同作用频 带的隔声结构与吸声结构进行组合优化。由于不同 吸声结构的吸声性能存在差异,生产成本也不相同, 因此需要通过优化确定各吸声结构的面积,也就是 设计高度,进而确定组合式声屏障整体声阻抗和吸 声系数。

2.1 优化目标函数构建

2.1.1 考虑吸声附加值的声屏障插入损失

目前声屏障插入损失的计算首先通过计算声 程差得到无量纲菲涅尔数,再代入相应的计算公式 得出插入损失,这种方法简单方便,但忽略了不同 结构形式声屏障的特点,在计算一些添加吸声材料 或结构以及更加复杂型式的声屏障插入损失时就 会产生较大的误差,无法较客观的评价其降噪性能。 因此,将考虑吸声作用的插入损失作为声屏障降 噪性能评价指标。目前插入损失的计算采用HJ/T 90-2004《声屏障声学设计和测量规范》^[19]中的方 法,其值近似的等于绕射声衰减。计算公式为

$$\Delta L_{d_i} = \begin{cases} 10 \lg \left(\frac{3 \times \pi \times \sqrt{1 - t^2}}{4 \times \arctan \frac{\sqrt{1 - t}}{\sqrt{1 + t}}} \right), & t \le 1, \\ 10 \lg \left(\frac{3 \times \pi \times \sqrt{t^2 - 1}}{2 \times \ln \left(t + \sqrt{t^2 - 1} \right)} \right), & t > 1, \end{cases}$$

$$(17)$$

式 (17) 中: $t = \frac{40\delta}{3\lambda}$; δ 为声程差, $\delta = a + b - c$; λ 为 波长。

由于组合式声屏障整体结构形式为倒L型,因 此在计算声程差δ时,声屏障的高度应考虑其等效 高度,如图9所示。



图9 等效高度计算示意图

Fig. 9 Schematic diagram of equivalent height calculation

因顶部弯折而增加的高度 h 为

 \bar{h}

$$= h_0 \sin \varphi \frac{h + h_0 \cos \varphi - h_1}{L_1 - h_0 \sin \varphi}, \qquad (18)$$

式(18)中: h_0 为顶端延伸长度; φ 为顶端与声屏障 屏体竖直方向延长线的夹角; h_1 为声源高度; L_1 为 声源距声屏障屏体的水平距离。

则声屏障的等效高度 he 为

$$h_{\rm e} = h + h_0 \cos \varphi + \bar{h}. \tag{19}$$

声屏障安装后接收点的声压级*L*_a为1/3倍频 带中心频率(125~2500 Hz)处各个频率接收点声压 级的叠加:

$$L_{\rm a} = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^{n} 10^{0.1 \left(L_{\rm b_i} - \Delta L_{\rm d_i} \right)} \right], \qquad (20)$$

式(20)中,L_{bi}为声屏障安装前接受点各个频率处的声压级,为高速公路噪声实测值L_i计算得到。

吸声型声屏障的吸声附加值[20]为

$$d_{\rm a} = -10 \lg \left[1 - \sum_{i=1}^{n} \alpha_i 10^{0.1(L_i - L_{\rm t})} \right], \qquad (21)$$

式 (21) 中: L_i 为高速公路噪声实测值; L_t 为噪声实测值总值; α_i 为声屏障的吸声系数。

因此吸声型声屏障实际插入损失为

$$f_1 = L_{\rm IL} = L_{\rm b} - L_{\rm a} + d_{\rm a},$$
 (22)

式(22)中,*L*_b为声屏障安装前接受点各个频率处的 声压级*L*_b,的叠加值。

2.1.2 声屏障立柱顶端位移

目前已经建设的声屏障大多为插板式,即将声 屏障单元板依次插入间隔一定距离设置的H型钢 立柱内。声屏障立柱可简化为悬臂梁,其最大位移 发生在自由端即顶部。声屏障的建设高度决定了钢 立柱的高度,如果声屏障过高,则立柱相应地增高, 在风荷载的作用下,其顶部产生位移随之增大,位移 过大会引发安全隐患。GB/T 51335-2018《声屏障 结构技术标准》^[21]规定声屏障顶部最大安全控制 位移为*H*/200,即顶端位移值不能超过声屏障高度 的1/200。因此,声屏障的力学性能选择以立柱顶端 位移作为目标函数,力学性能计算参数取值如表5 所示。立柱顶端位移的计算公式为

$$f_2 = \frac{q \times H^4}{8E \times I},\tag{23}$$

式(23)中:q为竖向均布荷载;H为声屏障的高度; E为立柱材料的弹性模量;I为立柱底部截面的惯 性矩。

表 5 力学性能计算参数取值 Table 5 Parameter values for mechanical performance calculation

参数	风荷载/	竖向均布荷载/	弹性模量/	H型钢截面
	(kN·m ⁻²)	(kN·m ⁻¹)	MPa	惯性矩/mm ⁴
取值	0.93	2.79	2.1×10^5	1.01×10^{8}

2.1.3 声屏障建设成本

声屏障的建设成本由其建设高度、长度和具体 结构型式决定,同时包括基础设施的建设成本,计算 声屏障长度取3m(一跨)。考虑到高速公路采光的 要求,将透明隔声结构设置在声屏障屏体中部,根据 工程经验将其高度设置为1m,因此声屏障屏体中 部的高度及设置位置是固定的;进而屏体下部的扩 散体复合结构位置也随之确定,同时扩散体复合结 构每一个凹槽的宽度需要依据高速公路噪声频谱 特点设计为12 cm,因此屏体下部的高度也随之确 定。声屏障建设成本目标函数可表示为

$$f_3 = (c_1h_1 + c_2h_2 + c_3h_3 + c_4h_4)(1+\varepsilon), \quad (24)$$

式(24)中: h_1 为声屏障顶端的高度; h_2 为声屏障屏体上部的高度; h_3 为声屏障屏体中部的高度,取值 1m; h_4 为声屏障屏体下部的高度,取值0.856m; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 为不同结构的单位高度成本,单位为元/m; ε 为声屏障成本与声屏障基础连接及安装等费用之 比,取0.75。

2.2 多目标优化模型建立

由于声屏障屏体中部和下部的高度及位置已 经确定,因此分别选择声屏障顶端延伸长度x1、顶 端与竖直屏体的夹角x2和声屏障屏体上部高度x3 作为该多目标优化问题的设计变量。由于算法中求 解的目标函数均需要取最小值,因此优化中考虑吸 声降噪量的插入损失取其相反数。综上,得到组合 式声屏障设计参数多目标优化模型:

$$\begin{cases} \min f_1 = -L_{\rm IL}, \\ \min f_2 = \frac{q \left[x_1 \cos \left(x_2 \right) + x_3 + 1.856 \right]^4}{8EI}, \\ \min f_3 = \left(c_1 x_1 + c_2 x_3 + c_3 + 0.856 \times c_4 \right) \\ \times \left(1 + 0.75 \right), \\ 0 \leqslant x_1 \leqslant 1, \ 0 \leqslant x_2 \leqslant \frac{\pi}{2}, \ 0 \leqslant x_3 \leqslant 3. \end{cases}$$
(25)

3 声屏障优化结果分析

高速公路组合式声屏障各结构高度多目标优 化求解的目的是得到不同吸声结构的合理高度值, 使声屏障既满足降噪需求,又可以符合声屏障建 设安全性的要求,同时具有较好的经济性。针对考 虑吸声附加值的插入损失、声屏障立柱顶端位移 和建设成本的三目标约束优化问题进行求解获得 Pareto优化解集,为决策者提供合适的非劣解。采 用非支配排序遗传算法NSGA-II来解决高速公路 组合式声屏障子结构高度的多目标优化问题,该算 法是目前应用最广泛的多目标优化算法之一。

3.1 非劣解集分析

通过优化计算,得到声屏障Pareto非劣解集, 如图10所示。从图中可以看出,随着声屏障插入损 失的增大,声屏障的建设高度和立柱顶端位移呈增 大的趋势。当声屏障顶端延伸长度以及屏体上部高 度均为0时,组合式声屏障的插入损失、建设成本和 立柱顶端位移值均为最小,对应图10中最低点;当 各设计变量均取约束上限值时,三个目标函数值均 取得最大值,对应图10中最高点。在约束范围内,插 入损失值变化幅度在10 dB(A)、建设成本变化幅度 约20000元、立柱顶端位移变化幅度达到16 mm。

声屏障插入损失增大,其高度往往会增加,相 应吸声结构的高度也就越大,但由于声屏障高度增 加,立柱顶端位移会相应变大,同时建设成本提高。 因此,声屏障的插入损失与立柱顶端位移及建设成 本无法同时达到最优。



图 10 三目标优化 Pareto 前沿图

Fig. 10 Pareto frontier diagrams of three objectives optimization

3.2 最优设计方案

采用TOPSIS决策方法从Pareto前沿非劣解 集中选择出最优解。首先对非劣解集进行欧氏无 量纲化,Pareto前沿上各个点构成的目标矩阵用 f_{ij} 表示,其中*i*表示位于Pareto前沿上的每个点,*j*代 表目标空间的维数。因此,无量纲化的目标矩阵 定义为

$$f'_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} f_{ij}^2}}, \quad i = 1, \cdots, n; \quad j = 1, 2, 3,$$
(26)

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^3 \left(\max\left(f_{ij}'\right) - f_{ij}'\right)^2},$$
(27)

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^3 \left(\min\left(f_{ij}'\right) - f_{ij}' \right)^2},$$
 (28)

其中, f_{ij} 为目标解集中第i个解的第j个目标函数 值, f'_{ij} 为目标解集无量纲化矩阵, D^+_i 为Pareto前 沿上的点到理想点的距离, D^-_i 为Pareto前沿上的 点到非理想点的距离。

相对贴近度由式(29)而得:

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}.$$
 (29)

使得 S_i 为最大值的解即为最优解:

$$i_o = i \in \max(S_i), \quad i = 1, \cdots, n.$$

$$(30)$$

将多目标优化得到的非劣解目标函数进行正向化处理,选择需要进行正向化处理的指标列序 号并选择指标类型为极小型,最后得到的最优解见 表6。

采用遗传算法对多目标优化模型进行求解,得 到非劣解集,通过分析可以看出三个目标无法同时 最优,因此选择TOPSIS方法进行决策,同时针对三 个目标采用相同的权重,以获得一个综合最优的解。 在实际工程中,决策者可以根据需求赋予各个目标 不同的权重,以选择最优的设计方案。

为了评价优化后的组合式声屏障的降噪性、安 全性和经济性,选择已经安装声屏障的高速公路进 行交通噪声监测以对比分析。选择荣乌高速涉县段

表 6 多目标优化最优解 Table 6 Multi-objective optimization optimal solution

参数值	设计变量			目标函数		
	x_1/m	x_2/rad	x_3/m	建设成本/元	插入损失/dB(A)	顶端位移/mm
组合式优化后	0.63	0.60	0.76	14222.4	21.7	1.6

高速公路进行交通噪声监测,该公路段位于晋冀 边界,车流量较大,且道路车辆组成中大型车占 比较高,产生了较大的道路交通噪声,严重影响了 附近居民的生活。选择车流量较大的断面按照 GB 3096-2008《声环境质量标准》^[22]要求,将声级计固 定在三脚架上,高度为1.5 m,距道路中心线8.0 m。 利用声级计对该路段交通噪声频谱进行监测,连续 测量 3 次取平均值,每次监测的时间为20 min,监测 结果见表7。

表7 高速公路噪声监测结果 Table 7 Freeway noise monitoring results

频率/Hz	125	160	200	250	315	400	500
$L_i/\mathrm{dB}(\mathbf{A})$	55.3	55.8	59.1	63.3	62.6	62.3	63.7
频率/Hz	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
$L_i/\mathrm{dB}(\mathbf{A})$	66.2	66.5	66.9	65.4	63.5	62.1	59.8

此高速公路部分路段已安装挤压式混凝土声 屏障(ECP声屏障),整体型式为直立型,高4.5 m, 如图11和图12所示。



图 11 ECP 声屏障 Fig. 11 ECP noise barrier



图 12 ECP 板 Fig. 12 ECP panel

采用间接法^[19]对工程路段已安装的声屏障进 行插入损失监测,分别在有声屏障后方和无声屏障 后方利用声级计进行测量,其中无声屏障后方点位 所在断面与声屏障边缘所在断面沿道路方向的水 平距离为50 m,参考点距声屏障顶端1.6 m,具体 测点布置情况见图13和图14。连续监测3次取平均 值,每次测量20 min,监测结果由式(31)计算得到:

$$L_{\rm IL} = (L_{\rm ref,a} - L_{\rm ref,b}) - (L_{\rm r,a} - L_{\rm r,b}),$$
 (31)

式(31)中: *L*_{ref,a}为参考点处安装声屏障后的声压 级,dB(A); *L*_{ref,b}为等效场所参考点处安装声屏障 前的声压级,dB(A); *L*_{r,a}为受声点处安装声屏障后 的声压级,dB(A); *L*_{r,b}为等效场所受声点处安装声 屏障前的声压级,dB(A)。结果为15.4 dB(A)。



图 13 插入损失测量点位侧视图

Fig. 13 Side view of insertion loss measurement points



图 14 插入损失测量点位俯视图

Fig. 14 Top view of insertion loss measurement points

如表8所示,相较于工程路段已安装的挤压成 型混凝土声屏障,优化后的组合式声屏障插入损失 提高了6.3 dB(A),提升比为40.9%,其中吸声附加 值为5.8 dB(A);声屏障建设成本减少了5.9%,经济 性能也得到改善;立柱顶端位移减少了96.2%,满 足标准最大安全控制位移。可见优化后的组合式声 屏障相较于挤压成型混凝土声屏障不仅降噪效果 更好,建设成本和声屏障立柱顶端的位移也得到了 降低。

表 8	优化后的组合式声	F屏障与 ECP	声屏障対比
		·// ·+ -) LOI	1 1111+111

Table 8 Comparison between optimized composite noise barrier and ECP noise barrier

会粉店	设计变量			目标函数		
参 奴 阻	x_1/m	x_2 /rad	x_3/m	建设成本/元 插入损失/dB(A	A) 顶端位移/mm	
ECP 板				15120.0 15.4	42.6	
组合式优化后	0.63	0.60	0.76	14222.4 21.7	1.6	
对比				5.9% 40.9%	96.2%	

优化后的组合式声屏障整体吸声性能见图15, 平均吸声系数 ā达到0.60。在200~500 Hz 频率范围 内,组合式声屏障整体吸声系数高于0.80,在295 Hz 达到吸声峰值0.99。因此,优化后的组合式声屏障 对于低频噪声具有更好的吸声效果,而如果声屏障 能够更好地吸收低频噪声,那么降噪效果将大大提 高。在200~1000 Hz 频率范围内,组合式声屏障整 体吸声系数高于0.70,并且从图15中可以看出组合 式声屏障具有多个吸声峰值,实现了宽频吸声。





4 结论

本文设计了一种组合式声屏障,吸声结构包括 吸声复合板、多重锥形吸声结构和QRD复合结构, 隔声结构为双层亚克力板。以降噪性、安全性和经 济性为目标进行多目标优化。主要结论如下:

(1) 在 265~900 Hz、 1525~1760 Hz 和 2215~2255 Hz 范围内,QRD 吸声系数最高,均 高于 0.90,对于中低频和部分高频的噪声吸声效果 很好;在 900~1140 Hz 和 1770~2070 Hz 范围内,多 重锥形吸声结构吸声效果最好,吸声峰值达到 0.93; 在 1155~1525 Hz 和 2255~3000 Hz 范围内,吸声复 合板吸声效果最好,吸声峰值达到 0.97。

(2) 优化后的组合式声屏障插入损失提高 了 6.3 dB(A),提升 40.9%,其中吸声附加值为 5.8 dB(A);声屏障建设成本减少了 5.9%;立柱 顶端位移减少了 96.2%,满足标准最大安全控制位 移;整体平均吸声系数达到 0.60。在实际工程中,可 以根据设计偏好对 3 个目标选取不同的权重通过 TOPSIS 决策得到最优设计方案。

参考文献

 邓友生,段邦政,叶万军,等.基于遗传算法与边界元理论的 声屏障优化 [J]. 铁道学报, 2019, 41(6): 115-123.
 Deng Yousheng, Duan Bangzheng, Ye Wanjun, et al. Op-

timization of noise barrier based on genetic algorithm and boundary element theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(6): 115–123.

- [2] 卢洋. 屏体吸声性能布局对声屏障插入损失的影响 [J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(6): 121–125.
 Lu Yang. Influence of arrangement of sound absorptive surface on insertion loss of noise barriers[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(6): 121–125.
- [3] 郑聪, 江理超, 罗锟, 等. 吸声材料布局对铁路声屏障降噪效 果影响研究 [J]. 铁道标准设计, 2023, 67(1): 197-202.
 Zheng Cong, Jiang Lichao, Luo Kun, et al. Study on the noise reduction effect of railway sound barrier with sound absorbing materials layout[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(1): 197-202.
- [4] 杨菲, 沈新民, 王强, 等. 变参数分空腔单层微穿孔板低频 降噪性能研究 [J]. 振动测试与诊断, 2022, 42(5): 952–957, 1036–1037.

Yang Fei, Shen Xinmin, Wang Qiang, et al. Research on low-frequency noise reduction performance of single-layer microperforated panel structure with variable parameters and separated cavities[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(5): 952–957, 1036–1037.

[5] 吴佳康, 柳政卿, 王秋成. 复合微穿孔板吸声结构声学性能预测 [J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(3): 203-208.
Wu Jiakang, Liu Zhengqing, Wang Qiucheng. Prediction of acoustic properties of sound-absorbing structures with

composite micro-perforated panels[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(3): 203–208.

[6] 王飞萌,王良模,王陶,等.微穿孔板三聚氰胺吸音海绵-空腔 复合结构声学性能优化设计 [J].北京化工大学学报 (自然科学 版), 2022, 49(1): 113–121.

Wang Feimeng, Wang Liangmo, Wang Tao, et al. Optimization of the acoustic performance of micro-perforated panel-melamine sound-absorbing sponge-cavity composite structures[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2022, 49(1): 113–121.

[7] 吴越,张林,柯艺波,等.泡沫铝板-二次余数扩散体(QRD)
 复合吸声体的吸声特性分析[J].振动与冲击,2021,40(13):
 263-270.

Wu Yue, Zhang Lin, Ke Yibo, et al. Sound absorption characteristics analysis of aluminum foam platequadratic residue diffuser (QRD) composite sound absorber[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13): 263–270.

- [8] 赵文畅, 刘程, 陈海波.基于拓扑优化的二维声屏障吸声材料 分布设计 [J].中国科技论文, 2017, 12(17): 1930–1936.
 Zhao Wenchang, Liu Cheng, Chen Haibo. Design of absorbing material distribution for 2D sound barrier based on topology optimization[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(17): 1930–1936.
- [9] Toledo R, Aznárez J J, Maeso O, et al. Optimization of thin noise barrier designs using evolutionary algorithms and a dual BEM formulation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 334: 219–238.
- [10] Toledo R, Aznárez J J, Greiner D, et al. A methodology for the multi-objective shape optimization of thin noise barriers[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 50: 656–675.

[11] 阮学云, 邵良友, 章林柯, 等. 工程中三维有限长声屏障的优化设计及应用 [J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(1): 255-259, 270.

Ruan Xueyun, Shao Liangyou, Zhang Linke, et al. Opti-

mal design and application of 3D finite length sound barriers in engineering[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(1): 255–259, 270.

[12] 吴小萍,段贤伟,杜鹏程,等. 基于NSGA-II 算法的高速铁路声屏障高度多目标优化 [J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1369–1374.

Wu Xiaoping, Duan Xianwei, Du Pengcheng, et al. Multiobjective optimization of noise barrier height for highspeed railway based on NSGA-II algorithm[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1369–1374.

- [13] Grubeša S, Jambrošić K, Domitrović H. Noise barriers with varying cross-section optimized by genetic algorithms[J]. Applied Acoustics, 2012, 73(11): 1129–1137.
- [14] Grubeša S, Suhanek M, Đurek I, et al. Combined acoustical and economical noise barrier optimization using genetic algorithms[J]. Gradevinar, 2019, 71(3): 177–185.
- [15] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础 [M] 南京:南京大学出版 社, 2012: 126-132.
- [16] Lee D H, Kwon Y P. Estimation of the absorption performance of multiple layer perforated panel systems by transfer matrix method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 278(4–5): 847–860.
- [17] 梁李斯,郭文龙,马洪月,等.多孔吸声材料的吸声性能预测及吸声模型研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36(23): 89–96.
 Liang Lisi, Guo Wenlong, Ma Hongyue, et al. Research progress of sound absorption performance prediction and sound absorption model of porous sound-absorbing materials[J]. Materials Reports, 2022, 36(23): 89–96.
- [18] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计 [J]. 中国科学, 1975(1): 38-50.

Ma Dayou. Theory and design of micro-perforated panel absorber[J]. Science China, 1975, 18(1): 38–50.

- [19] 声屏障声学设计和测量规范: HJ/T 90-2004[S].
- [20] 蒋康. 公路声屏障优化研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [21] 声屏障结构技术标准: GB/T 51335-2018[S].
- [22] 声环境质量标准: GB 3096-2008[S].