

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2024.02.013

车内单座椅局部区域有源噪声控制研究

于 洋, 李 航, 邹海山*, 林志斌

(南京大学声学研究所, 近代声学教育部重点实验室, 南京, 210093)

摘要:目前, 汽车局部区域降噪主要通过有源降噪头枕来降低人耳处的噪声, 但乘客的移动会影响降噪效果. 结合人头跟踪系统可解决这一问题, 代价是增加系统的复杂性和成本. 以车门扬声器为次级声源, 在副驾驶位置乘客头部周围较大的区域进行局部降噪, 并优化误差传感策略提升其降噪性能. 首先, 建立轻度阻尼边界的闭空间声场有限元模型; 然后, 基于该模型研究了某一局部区域内取得 3 dB 降噪效果的频率上限、误差点数量和位置对降噪效果的影响以及误差点布放的优化问题; 最后, 在典型城市道路上进行不同车速下的有源噪声控制实验. 结果表明, 车速为 50, 60 和 80 km·h⁻¹ 时, 副驾驶头部区域内 (0.4 m × 0.4 m × 0.2 m) 3 dB 降噪的频率上限约为 370 Hz, 误差点位置对降噪效果有较大影响. 采用遗传算法优化误差点选择可提高降噪性能, 使用 12 个优选误差点即可达到使用 75 个均匀布放误差点的降噪效果.

关键词:有源噪声控制, 局部区域降噪, 汽车路噪, 误差传感策略

中图分类号: O429

文献标志码: A

Research on active noise control in a specific area of a single seat in car cabins

Yu Yang, Li Hang, Zou Haishan*, Lin Zhibin

(Key Laboratory of Modern Acoustics, Ministry of Education, Institute of Acoustics of Nanjing University, Nanjing, 210093, China)

Abstract: The current method for local noise control in automobiles primarily involves active headrests to reduce the noise around the passengers' ears. However, passengers' movement deteriorates the noise reduction performance. To address this issue, a head-tracking system has been combined with the active noise control system at the cost of increased complexity and expenses. Therefore, this paper investigates local noise control in a larger area around the passengers' head in the front passenger seat using the door speakers as secondary sources, and optimizes error sensing strategy to improve the noise reduction performance. Firstly, a finite element model of the lightly damped enclosure is established. Then based on this model, the upper limit frequency of 3 dB noise reduction in the target area is investigated, and the influence of the number and positions of error sensors on the noise reduction performance is also discussed, as well as the optimization of the arrangement of error sensors is carried out. Finally, real vehicle experiments are conducted on a typical urban road at different vehicle speeds. It is shown that, the upper frequency limit of 3 dB noise reduction in the passengers' head region (0.4 m × 0.4 m × 0.2 m) at the front seat is approximately 370 Hz at speeds of 50, 60, and 80 km·h⁻¹. The placement of error sensors has a large impact on noise reduction performance, and using a genetic algorithm to optimize the arrangement of error sensors improves the noise reduction performance. Using 12 optimized error sensors can achieve the same noise reduction performance as using 75 uniformly distributed error sensors.

Key words: active noise control, local control, road noise, error sensing strategy

基金项目: 国家自然科学基金(11874218)

收稿日期: 2023-12-10

* 通讯联系人, E-mail: hszou@nju.edu.cn

汽车座舱内的有源噪声控制(Active Noise Control, ANC)研究已有30多年历史^[1],随着汽车智能化的发展,近年来该技术受到广泛关注。车内噪声主要分为动力总成噪声、轮胎-路面噪声和空气动力噪声^[2]。汽车动力总成噪声以低频谐波为主,有源控制系统使用较少的次级声源如四个车门扬声器即可实现座舱的全空间降噪,目前已应用于许多量产车。轮胎-路面噪声为随机宽带噪声,难以实现全局控制,通常采用局部控制策略,如在座椅处安装有源降噪头枕^[3]或利用车辆自身音响系统^[4]在乘客人耳附近产生局部安静区域,这也是目前有源控制领域的研究热点。当车辆高速行驶时,空气动力噪声是车内噪声的主要组成部分,对此类噪声的有源控制研究较少^[1]。

使用头枕扬声器和车门扬声器在人耳附近产生的静区大小十分有限。例如,研究表明扩散场中单次级源在远场产生的降噪量超过10 dB的静区半径不超过1/10波长^[5];同时,控制某点的声压和质点速度,可获得更大的静区^[6]。在扩散场中,若误差点附近存在散射体,则有源静区的范围将略有增大,其大小与散射体的大小有关,其形状与散射体到误差点的距离有关^[7]。由于静区大小有限,误差传声器应尽量靠近人耳以获得较好的降噪效果,然而误差传声器会妨碍人头移动。虚拟传声器技术可解决这一问题^[8],它使用远离人耳的物理传声器来预测人耳处的噪声,从而将静区“投影”到人耳处,如同人耳处有虚拟的传声器一样。该技术的本质是声场预测,人头移动引起的声场变化会降低虚拟误差信号的估计精度,进而影响降噪效果和系统稳定性。Jung et al^[9]将基于视觉的头部追踪技术引入有源降噪头枕系统中,可追踪人耳位置并有效控制人耳处的噪声,克服静区过小和头部移动造成的性能下降问题。韩荣等^[10]将有源降噪头枕的代价函数改进为取多个位置的均方声压和来计算最优维纳滤波器,并结合基于红外测距的头部跟踪系统,在头部平移或旋转时实现了对宽带噪声的有效控制。虽然使用头部跟踪系统可以提升有源降噪头枕的性能,然而该系统较复杂,且需要事先大量测量和存储声场传递函数;此外,使用时环境参数的变化及用户的不同,系统性能会受到影响,鲁棒性较差。

虚拟声屏障使用次级声源阵列与误差传声器阵列包围目标区域,阻挡来自各个方向的噪声,在目标区域内形成较大静区,人头可以在静区内自由移动^[11]。然而,虚拟声屏障所需次级声源数量较多,系统复杂度和成本较高,在座舱内难以使用。鉴于此,本文一方面使用车门扬声器作为次级声源,降低系统复杂度和成本;另一方面将降噪范围设在包围乘客头部的一个较大的区域,使头部能自由活动并保持一定的降噪效果,避免使用复杂的头部跟踪系统,但这一系统的可行性及其降噪性能如降噪的频率上限有待研究。实际应用时,有源控制系统若使用固定滤波器即非自适应的方案,可以通过在目标区域布置传声器阵列进行测量,将预先优化的控制滤波器固化于控制系统,则在使用时无须误差传声器;若使用自适应系统,在目标区域布放大量误差传声器是不现实的,只能使用少量误差传声器,此时有必要针对具体的应用场景进行误差传感策略优化^[12-15],以获得较好的降噪效果。

本文针对车内局部区域有源降噪以及降噪系统误差点优选问题展开研究,首先建立物理模型仿真分析车内局部区域有源降噪的频率上限,分析降噪前、后车内声场的变化,然后通过遗传算法优化误差传感策略,最后实验验证仿真结论。

1 数值模型与理论

轮胎-路面噪声由多个轮胎激励产生,经由车辆的结构路径、空气路径到达人耳,由声场的相关性分析可知其等效噪声源众多^[16]。此外,座舱几何形状不规则且声学边界复杂,导致车内声场非常复杂,无法得到解析解。有限元方法可用于室内声学中低频声场的模拟^[17],而汽车座舱的轮胎-路面噪声低频成分较多,可采用该方法进行模拟。

本研究将座舱假设为矩形空间,使用商用有限元软件COMSOL Multiphysics 6.0进行仿真^[18]。由于汽车内部的地板、车顶内衬和仪表台的声吸收系数较小,因此假设矩形空间的六个壁面均为轻度阻尼的,吸声系数设为0.2^[19]。初级声场由矩形空间内沿壁面分布的许多点声源产生,其源强和相位均满足随机分布。次级源与壁面略

微有些距离,以符合实际情况.

矩形空间模型如图 1a 所示,尺寸为 $1.9 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$,沿边界以 0.17 m (约为 1000 Hz 声波波长的 $1/2$) 的间距设置源强和相位均随机的点声源作为初级声源,用来模拟汽车内的复杂声场.四个车门扬声器的位置如图 1b 所示,以座舱的左前的下底角为原点,次级源坐标分别为: $(0.4, 0.1, 0.3) \text{ m}$, $(1.4, 0.1, 0.3) \text{ m}$, $(0.4, 1.4, 0.3) \text{ m}$ 和 $(1.4, 1.4, 0.3) \text{ m}$. 本文关注副驾驶位置头部附近区域,定义为“局部区域”,尺寸为 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$. 作为对比,还关注包含所有乘员头部的“全区域”,尺寸为 $1.4 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$. 具体地,评价降噪效果的评价点位于 $z=$

$0.6 \sim 0.8 \text{ m}$ 、垂直间距为 0.05 m 的五层水平面上,其高度基本覆盖了乘员耳朵的移动范围,在每一层水平面上相邻评价点的间距也为 0.05 m (小于 1000 Hz 声波波长的 $1/6$). 局部区域的评价点在 x 轴的 $0.2 \sim 0.6 \text{ m}$, y 轴的 $0.9 \sim 1.3 \text{ m}$ 范围内,如图 1b 的蓝色点线边框矩形空间所示;全区域则如图 1b 中的红色虚线边框矩形空间所示,在 x 轴的 $0.2 \sim 1.6 \text{ m}$, y 轴的 $0.3 \sim 1.3 \text{ m}$ 范围内. 使用上述模型计算车内的初级声场以及次级声源到各个位置的频域传递函数,频率的扫描范围设为 $40 \sim 1000 \text{ Hz}$,步长为 40 Hz ,每一频点使用不同的初级声场进行 20 次仿真.

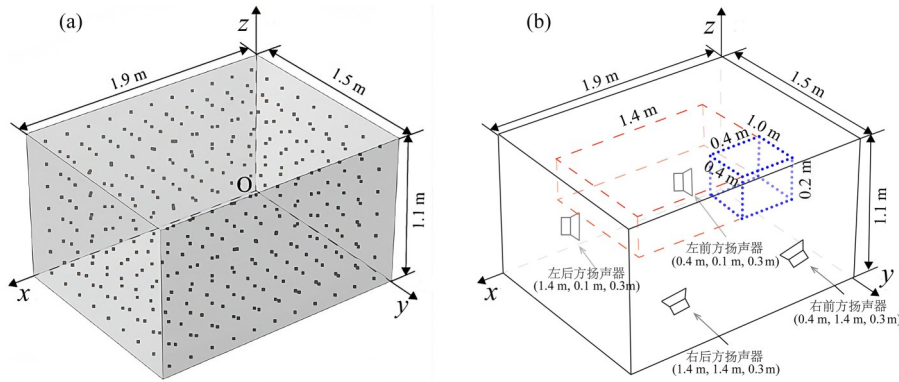


图 1 有限元模型示意图:(a)初级声源分布;(b)车门扬声器位置 and 评价区域

Fig.1 Schematic diagram of the finite element model:

(a) distribution of primary sources, (b) door speaker locations and evaluation areas

设座舱内的初级声场在 r 处的声压为 $p_p(r)$,在点 r 处由 N_c 个次级源产生的声压为 $p_c(r)$,则总声场 p_t 可表示为:

$$p_t(r) = p_p(r) + p_c(r) = p_p(r) + Z_{cc}(r)q_c \quad (1)$$

其中, q_c 为次级源源强向量, Z_{cc} 表示次级源到误差点的传递函数矩阵.

代价函数 J_p 选为误差点的声压幅值平方和^[20]:

$$J_p = \sum_{n=1}^{N_e} |p_t(r_n^e)|^2 + \beta q_c^H q_c \quad (2)$$

其中, r_n^e 代表第 n 个误差点的位置,上标 H 表示共轭转置,正实数 β 为约束次级源源强的正则化因子, N_e 表示误差点的数量.

J_p 取最小值时,次级源的最优解为^[5]:

$$q_c = -(Z_{cc}^H Z_{cc} + \beta I)^{-1} Z_{cc}^H P_p \quad (3)$$

系统的降噪性能定义为控制区间内所有评价点控制前后声压平方和的比值(Noise Reduction, NR),即:

$$NR = 10 \lg \left[\frac{|p_p(r_i)|^2}{\sum_{i=1}^{N_e} |p_t(r_i)|^2} \right] \quad (4)$$

其中, N_e 为评价点的数目. NR 越大,系统的降噪效果越好.

2 仿真

2.1 有效降噪的频率上限 对确定尺寸的目标区域考察有效降噪的频率上限^[21],其中有效降噪表示目标区域降噪 3 dB 以上^[22-23]. 图 2 分别给出了局部区域、局部区域外、全区域降噪前后的平均

声压级(Sound Pressure Level, SPL),图3为这三类区域的平均降噪量,其中初级声场通过20组378个幅度和相位均随机的初级声源计算得到.图2中曲线的误差条表示不同初级声场的影响,图3中的红色水平点线表示3 dB降噪量.需要注意的是,对于局部区域,误差点均匀地分布在局部区域内;对于全区域,误差点均匀地分布在全区域中.在两类区域中,误差点间距均为0.05 m.由图2和图3可见,两类区域的降噪量随频率升高而减小,局部区域的3 dB降噪上限频率在580 Hz左右,全区域的3 dB降噪上限频率在300 Hz左右.这是因为当次级源数量和位置相同时,控制区域越大,降噪性能越差.局部区域外的噪声在150 Hz以上频段上不降反升,即若频率较低,则降低副驾驶区域噪声的同时也会降低全区域的噪声.当频率升高到一定值时,降低目标区域噪声会导致车内其他区域噪声升高.这是因为低频段座舱内有源降噪机理为抑制空间内的声模态,降噪效果与误差点位置有关,由于误差点集中于副驾驶位置的水平面,和全局控制将误差点布放于整个座舱的水平面相比,不能有效控制所有声模态,因此降噪效果下降.在中高频段座舱内有源降噪机理为声反射,在目标区域降噪的同时,声能量被反射到其他区域,因此其他位置噪声不降反升.考虑到车内轮胎-路面噪声能量主要在500 Hz以下,且局部区域的3 dB降噪上限为580 Hz

左右,因此,后续讨论将关注500 Hz以下频段.

2.2 误差点数量的影响 为了探讨降噪极限,2.1设置误差点间距与评价点间距一致,小于最大频率的1/6波长^[21].实际应用中误差点数量应尽可能少,因此需讨论误差点数量对降噪效果的影响.图4为局部区域(即副驾驶头部区域)评价点和误差点分布情况,其中评价点均匀分布,间距为0.1 m,小于500 Hz的1/6波长.此时,评价点在三层水平面上,误差点在各个水平面均匀分布,数量分别取2,4,12和27,其中2个和4个误差点仅在中间层均匀分布,12个和27个误差点则在每一层均匀分布.图4中所有点均为评价点,其中红色空心圆环为误差点,所有75个评价点即代表目标区域.

图5a为采用不同数量误差点时,目标区域降噪前后在40~500 Hz频段的平均声压级,图5b为相应的降噪量.由图可见,降噪性能随误差点数量的增加而提升,但选择27个均匀分布的误差点的降噪效果已与选择全部75个误差点的降噪效果几乎一致.因此,下文误差点位置优化的讨论仅针对2,4和12个误差点的情况展开.

2.3 误差点位置优化 对于前文所述的虚拟声屏障,误差点在目标区域的边界,这有利于实际应用.因此,本文也将边界相对均匀分布误差点的情况列入对比讨论,其误差点分布如图6所示,红色圆圈为误差点.

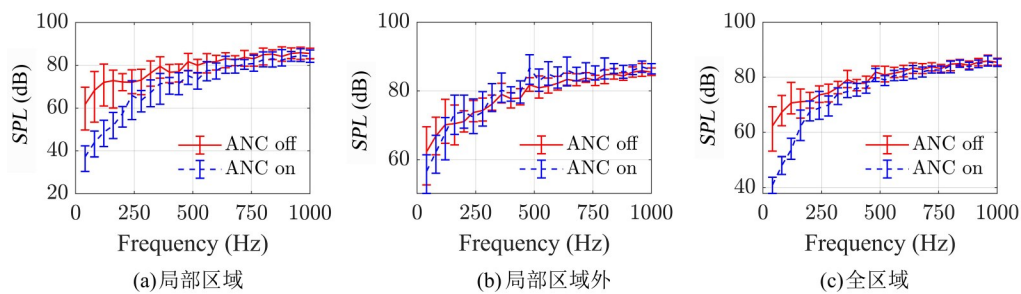


图2 有源降噪前后平均声压级

Fig.2 The average sound pressure level with and without ANC

以本文要考虑的从75个待选点中选取12个误差点为例,若用穷举的方式选择则需要计算 $C_{75}^{12} = 2.6124 \times 10^{13}$ 个结果,这显然是不现实的.遗传算法通用、高效、鲁棒性强,具有很强的全局搜索能力,因此本文使用遗传算法对误差点位置

进行优选.遗传算法是一种元启发式算法,通过模拟生物种群的进化过程,在一定程度上进行全局搜索并找出最优解^[24].个体的染色体编码、根据适应度函数选择个体、交叉个体间的染色体以及染色体的变异是遗传算法的组成部分,其中适

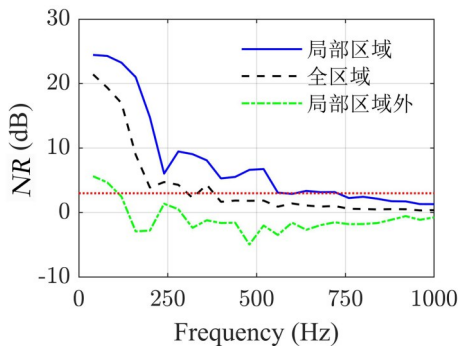


图3 局部区域、局部区域外和全区域的平均降噪量

Fig. 3 The average NR in the local area, outside the local area, and over the whole area

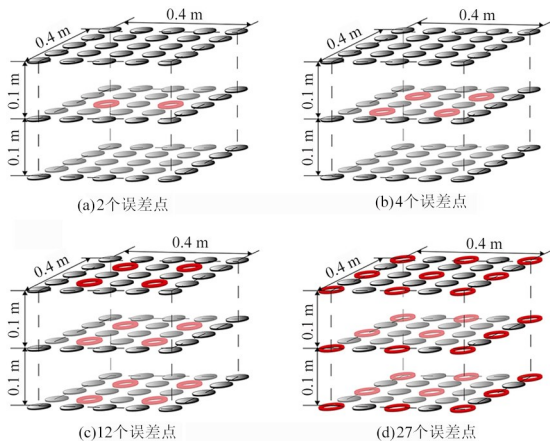


图4 均匀分布的误差点位置

Fig.4 Positions of evenly distributed error points

应度函数是遗传算法的关键要素^[25]. 适应函数设置为降噪后 100~500 Hz 目标区域 75 个评价点的声压平方和, 适应度函数的输入是误差点的数目和位置. 优化所得最优误差点分布见图 7, 可见有以下规律: 优化后的两个误差点都在中间层, 优化后的四个误差点大多在中间层, 而优化后的 12 个误差点趋向于在每层平均分布, 每层 3~5 个.

图 8a~c 分别显示了误差点数量为 12, 4 和 2 时, 不同布放方式对降噪效果的影响. 由图可见, 误差点数量相同时, 均匀分布误差点的降噪效果

优于边界均匀分布误差点, 采取最优误差点分布的降噪效果最优. 表 1 给出了不同误差点分布的平均降噪量, 由 75 个评价点的降噪量平均而得. 由表可见, 采用两个优化误差点, 和选择两个均匀分布的误差点相比, 降噪效果提高了 1.7 dB, 与边界均匀布放相比提高了 2.1 dB; 采用四个优化误差点与均匀分布误差点和边界分布误差点相比, 降噪效果分别提升了 0.7 dB 和 2.0 dB; 采用 12 个优化后的误差点, 提升值分别为 0.6 dB 和 2.4 dB, 此时降噪效果与使用 27 个均匀分布的误差点仅相差 0.1 dB.

2.4 讨论 图 9 为频率为 200 Hz 时, 误差点位置优化后局部区域的降噪效果分布图. 图 9a~g 分别对应未降噪、使用 2 个优化误差点降噪、使用 4 个优化误差点降噪、使用 12 个优化误差点降噪、使用 12 个均匀误差点降噪、使用 27 个均匀误差点降噪和使用全部 75 个均匀误差点降噪的结果, 从左向右分别对应着三层评价点的第一层、第二层和第三层. 图中“*”标记了误差点位置. 图 9 表明, 随着误差点数目增加, 降噪后的残余声场与使用全部 75 个误差点的残余声场越来越接近, 降噪效果越好.

因为使用全部 75 个误差点在第二层的降噪量较大且范围较广, 所以在使用较少误差点时也应第二层产生类似的降噪分布, 这导致在使用两个和四个误差点的情况下, 遗传算法优选的误差点主要分布于该层, 然而此时误差点数量较小, 无法产生足够匹配初级声场的次级声场, 因此残余声场与使用 75 个误差点的理想残余声场并不相像. 对于 12 个优化误差点, 因为第二层的三个误差点已经足够使该层获得范围广且降噪大的静区, 因此该层的误差点数量并不明显比其他层多, 此时误差点数量足够, 残余声场与理想残余声场较一致. 与其他分布相比, 采用遗传算法优选的

表 1 不同误差点分布情况的平均降噪量(单位: dB)

Table 1 Average noise reduction for different error point distributions (unit: dB)

| 分布方式 | 2 个误差点 | 4 个误差点 | 12 个误差点 | 27 个误差点 | 75 个误差点 |
|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 均匀分布 | 6.5 | 8.1 | 11.7 | 12.4 | 12.5 |
| 优化分布 | 7.7 | 8.8 | 12.3 | — | — |
| 边界均匀分布 | 5.6 | 6.1 | 9.9 | — | — |

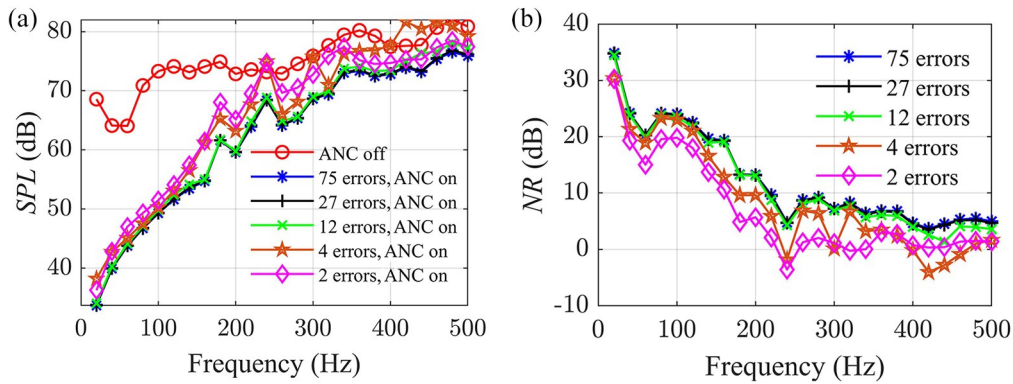


图5 误差点均匀分布的有源降噪性能

Fig.5 Active noise reduction performance with uniformly distributed error points

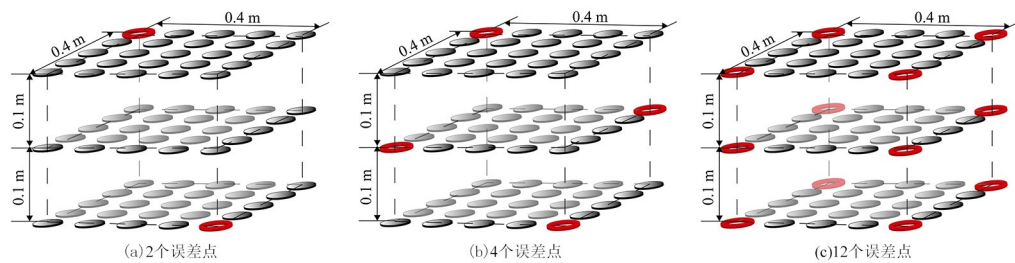


图6 误差点在边界相对均匀分布

Fig.6 Error points are relatively uniformly distributed in the boundary

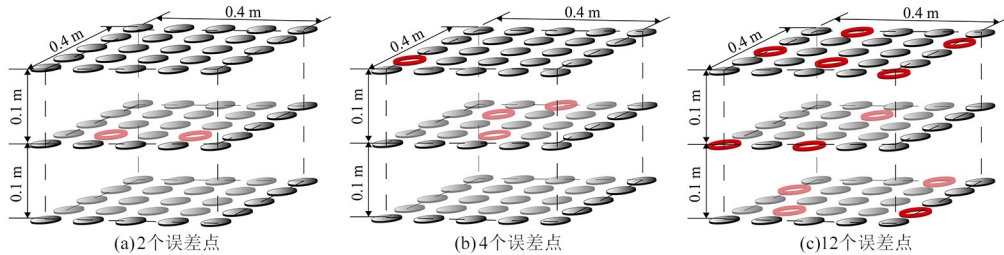


图7 基于遗传算法的最优误差点分布

Fig.7 Optimal distribution of error points obtained with the genetic algorithm

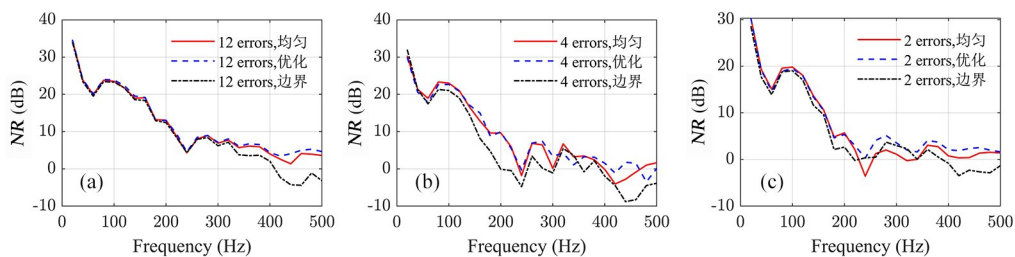


图8 不同误差点分布的降噪量

Fig.8 NRs of different error point distributions

误差点分布的效果更好,因为其能够用较少的误差点形成比较接近理想情况(使用全部75个误差点)的声场分布。

3 实验

3.1 实验说明 使用某商用电动轿车在典型的

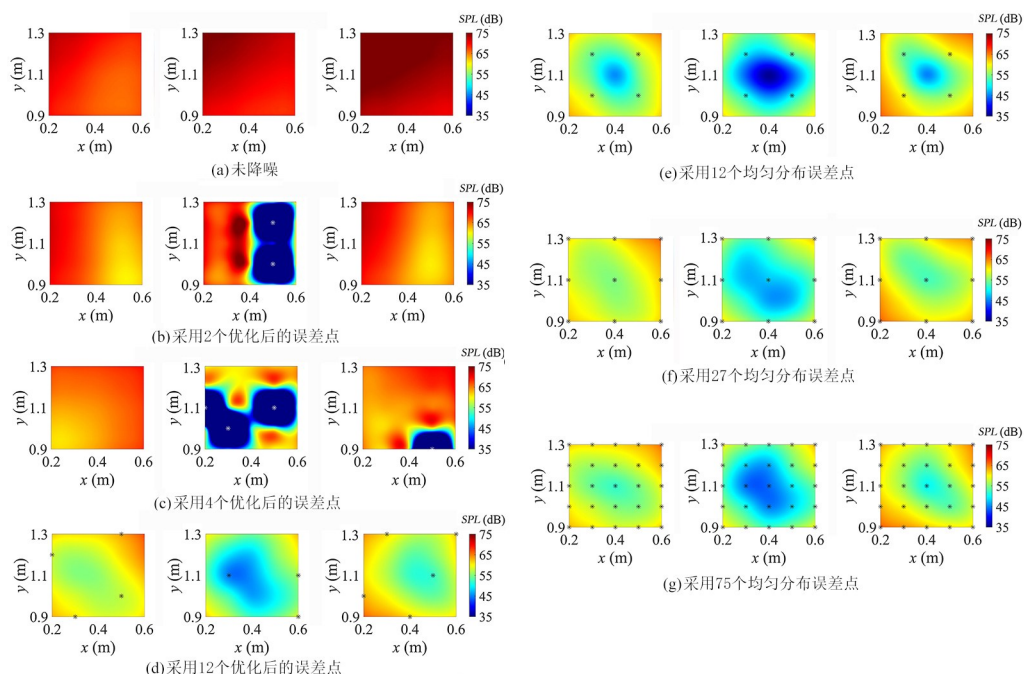


图9 频率为 200 Hz 时,不同误差点分布的残余声场声压级分布图

Fig.9 Sound pressure level distribution of the residual sound field at 200 Hz with different error point distributions

城市路面(南京市天一大街)进行实验,该路段地处偏僻,测量时周围无其他车辆影响.全区域(所有乘客的头部活动区域)的测量传声器分布如图10所示,误差传声器由此优选而得.全区域为 $1.4\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 的矩形区域,局部区域即右上角副驾驶位头部活动区域,为降噪目标区域,尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.2\text{ m}$.局部区域均匀布放测量传声器,数量为 $25 \times 3 = 75$ 个,间距为 0.1 m ,对应图中的蓝色圆环,局部区域外的测点水平间距为 0.2 m ,对应图中的灰色点.为了清晰显示图中的测点,图中坐标轴的比例尺不一致.

电动车的四个6.5寸车门扬声器为次级源,分别位于矩形区域的左前方、左后方、右前方、右后方,且在该区域的下方(图11).局部区域的75个测量传声器安装于金属支架上,照片见图12.前馈控制系统的16路振动参考信号来自位于车辆底盘的加速度计,这些信号由同步采集的58路振动信号优选而得^[26].有源控制器基于TI公司TMS320C6678F型号的DSP芯片,共八个核,主频为 1.0 GHz .加速度计和传声器拾取的信号经信号调理器输入给控制器,控制器输出信号经功率放大器后驱动车门扬声器.

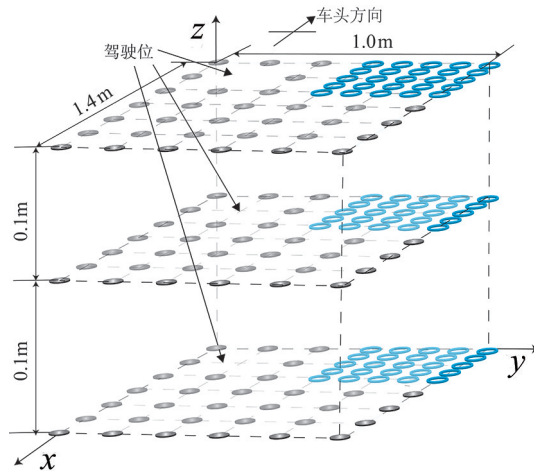


图10 测量传声器位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the positions of measurement microphones

采用固定滤波器进行实时控制,滤波器系数由维纳滤波算法离线计算得出.计算步骤如下:

(1) 车辆静止时,测量四个车门扬声器至误差传声器的次级路径传递函数,时长为 30 s ;

(2) 车辆以 $50\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 匀速行驶,测量加速度计信号与误差传声器信号,时长约为 50 s ,计算初级路径传递函数;

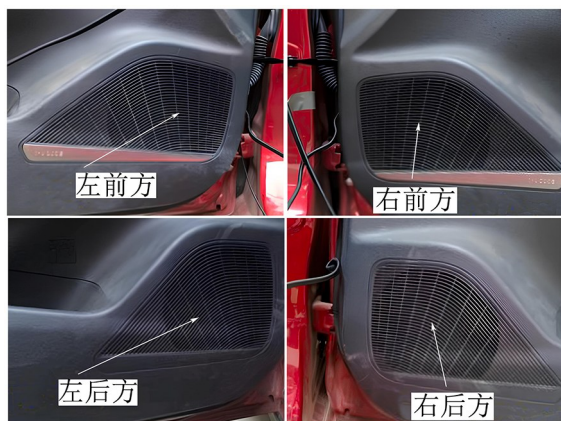


图 11 车门扬声器照片

Fig.11 The picture of the 4 door loudspeakers

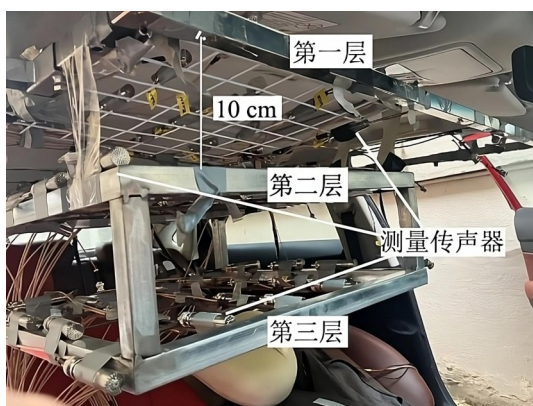


图 12 副驾驶位测量传声器照片

Fig. 12 The photo of measurement microphones at the front passenger seat

(3)将上述传递函数卷积相应的电子系统的传递路径(含信号调理器、功率放大器、控制器),使用维纳滤波计算控制器中的滤波器系数;

(4)改变车速为 60 和 80 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,重复步骤(1)至步骤(3)得到不同车速的滤波器系数.

将某一车速的控制滤波器写入控制器,实验车辆以同一车速在同一路段匀速行驶,测量有源系统开启和关闭时 75 个测量传声器的信号,计算目标区域的降噪量.

3.2 实验结果 图 13 显示了车速为 60 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时选择所有误差点的降噪量频谱,即纵轴为副驾驶头部区域包含所有 75 个测点的平均降噪量.图 13 中的蓝色点线为 3 dB 降噪量,可见局部区域的 3 dB 降噪频率上限大致在 370 Hz 左右,在 120~320 Hz 范围内大部分频段降噪量超过 5 dB.

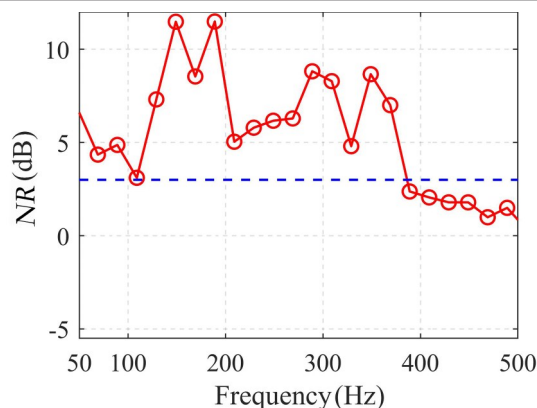


图 13 副驾驶区域包含所有 75 个测点的平均降噪量

Fig. 13 The average noise reduction level of all 75 measurement points at the front passenger seat

图 14a 为均匀分布误差点的数量分别为 2, 4, 12, 27 和 75 时的降噪结果,其中误差点的位置见图 4. 图 14b~d 为选用 12, 4 和 2 个误差点时,不同布放方式对降噪效果的影响,其中“优化”表示基于实测数据采用遗传算法优化误差点,适应度函数的设置和有限元仿真中的相同.需要说明的是,由于仿真与实验情况条件不一致,优选误差点的位置与图 7 不完全一致,但和仿真时优选误差点的分布规律类似.图 14a 的实验结果与仿真结果类似,对于同一种布放方式,误差点数量越多降噪效果越好,不同的是选择 27 个均匀分布的误差点与使用全部 75 个误差点的降噪效果的差异比仿真略大.从图 14b~d 可见,数量相同的误差点,其布放方式影响降噪效果,在各个频段差异并不相同,总体来说,均匀选取误差点的降噪效果比在目标区域外层布放误差点要好,使用遗传算法优化选取误差点,可进一步提升系统的降噪性能.车速为 50 和 80 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 也有相似的结果,由于篇幅限制不展示相关图.表 2 汇总了三种速度下各种误差点配置的目标区域平均降噪结果,可得出外层均匀布放误差点降噪效果最差,而遗传算法优化选取误差点降噪效果最优这一结论.

图 15 是 60 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 车速下选取不同误差点时目标区域的降噪效果分布图,数值代表了 50~500 Hz 频段的平均降噪量.图 15a 是未降噪前的声场分布,图 15b~f 是均匀选取 2, 4, 12, 27, 75 个误差点的降噪后声场分布,图 15g 是选取优选后 12 个误差点的降噪情况,各行从左到右对应评价

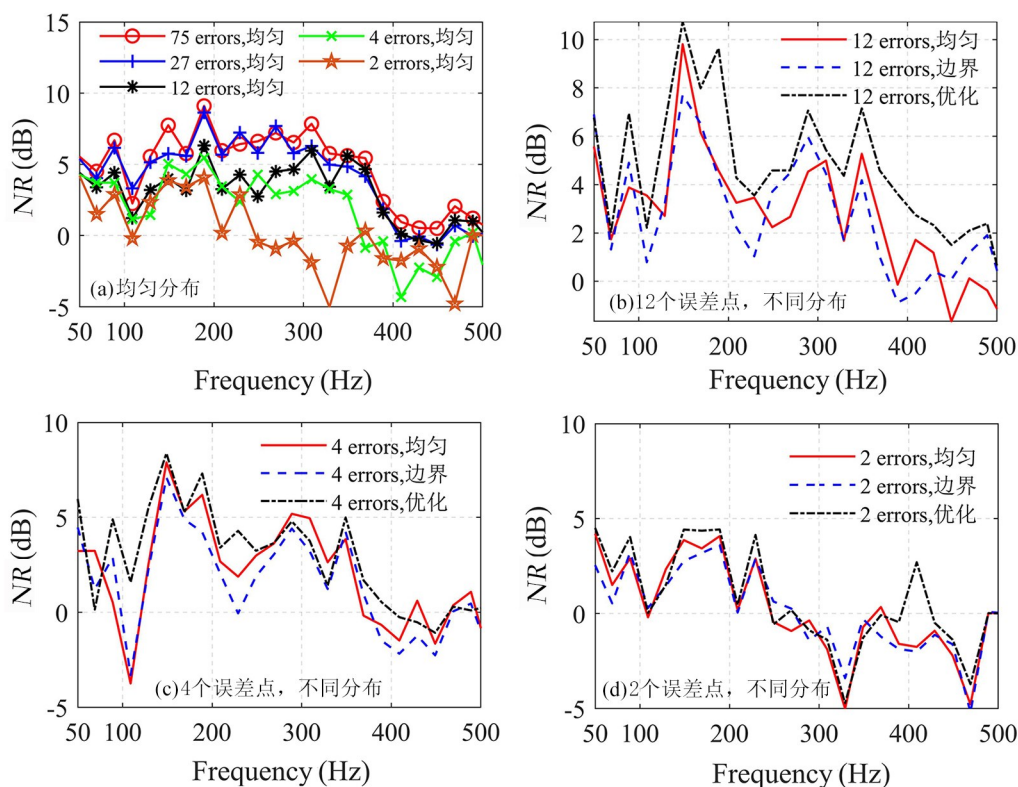
图 14 车速 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时采用不同误差点配置的降噪结果Fig.14 Noise reduction with different error point configurations at a vehicle speed of $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

表 2 不同速度下各种误差点配置的副驾驶区域的平均降噪量(单位: dB)

Table 2 Average noise reduction in the passenger area for various error point configurations at different speeds (unit: dB)

| 放置方式 | 均匀分布 | | | | | 外层均匀分布 | | | 优选 | | | |
|-------------------------|------|-----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 误差点个数 | 2 | 4 | 12 | 27 | 75 | 2 | 4 | 12 | 2 | 4 | 12 | |
| 速度(km•h ⁻¹) | 50 | 2.1 | 2.9 | 3.9 | 5.4 | 5.6 | 1.8 | 2.3 | 3.5 | 2.5 | 3.5 | 4.1 |
| | 60 | 2.5 | 2.6 | 4.8 | 6.0 | 6.1 | 2.4 | 3.0 | 4.4 | 2.8 | 3.9 | 5.6 |
| | 80 | 1.9 | 3.6 | 4.2 | 5.8 | 5.9 | 1.8 | 2.6 | 3.6 | 2.5 | 3.8 | 4.5 |

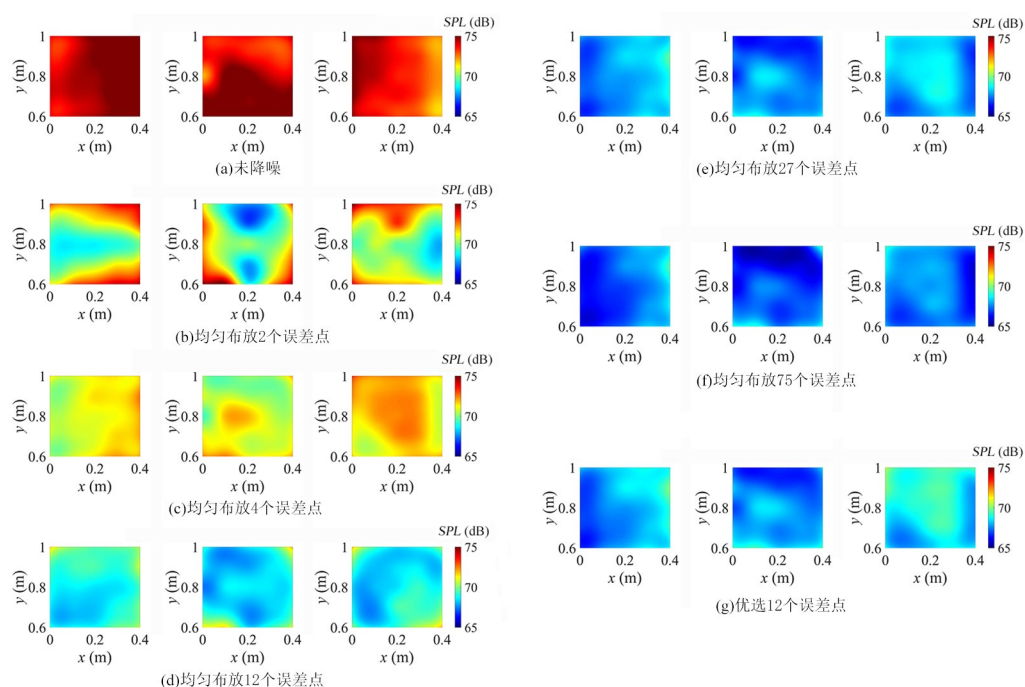
点的第一、二、三层. 由图可见, 随着误差点的数目增加, 降噪后声场分布越来越接近使用全部 75 个误差点时的情况, 优选 12 个误差点的降噪效果已经很接近全部 75 个误差点时的降噪效果. 与仿真结果一样, 证明了通过优选可用更少的误差点数量达到较好的降噪效果, 降低系统复杂度和成本.

实车实验与有限元仿真结果存在差异, 主要原因包括: (1) 仿真中仅考虑初级声场与次级路径传递函数的频域计算, 未涉及参考信号, 而实车实验受参考信号与期望信号相干性、系统因果性的影响; (2) 实车测试时优化控制滤波器与测量降

噪效果是同一段路同一个工况的两次不同实验, 测试完传递函数后计算滤波器系数需一定时间, 因此两次实验工况有差异, 计算得到的前馈控制滤波器是该次测试的最优控制器, 但不是第二次测试的最优滤波器.

4 结论

本文以车门扬声器为次级声源, 将低频的轮胎-路面噪声作为研究对象, 针对副驾驶位置乘客头部周围的较大区域进行局部降噪, 研究其降噪频率上限并优化误差传感策略提升其降噪性能. 通过轻度阻尼边界的闭空间声场有限元模型进行

图15 车速为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 目标区域降噪前后的声场分布Fig.15 The distribution of the sound pressure level in the target area before and after control at a speed of $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

仿真分析,结果表明目标区域有源降噪的3 dB降噪频率上限为580 Hz,高于全区域的300 Hz,代价是非目标区域的降噪效果下降甚至噪声不降反升.在误差点数量相同的情况下,使用遗传算法优化误差传感策略,可提升局部区域的降噪性能.在城市典型道路上的实车实验结果表明,车速为50,60和 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,副驾驶头部区域 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 内的3 dB降噪频率上限为370 Hz.比较使用不同数量和分布的误差传感器的有源降噪性能发现,对于同一种布放方式,误差点数量越多降噪效果越好;对于同样数量的误差点,误差点在目标区域边界均匀分布时性能不如在目标区域内均匀分布,使用遗传算法优化误差点位置可进一步提升降噪性能,12个优选误差点即可达到使用75个误差点的理想降噪效果.后续工作包括:考虑人头的散射与移动对降噪性能的影响以及在实际应用中研究和优化类似虚拟传声器技术等非接触式的误差传感技术.

致谢 对帮助该论文顺利完成的邱小军老师、王淑萍老师和石黎同学表示诚挚的感谢!

参考文献

- [1] Samarasinghe P N, Zhang W, Abhayapala T D. Recent advances in active noise control inside automobile cabins; Toward quieter cars. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2016, 33(6): 61—73.
- [2] Qatu M S, Abdelhamid M K, Pang J, et al. Overview of automotive noise and vibration. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 2009, 5(1—2): 1—35.
- [3] Rafaely B, Elliott S J, Garcia-Bonito J. Broadband performance of an active headrest. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, 106(2): 787—793.
- [4] Nelson P A, Elliott S J. *Active control of sound*. London, UK: Academic Press, 1992, 354—355.
- [5] Elliott S J, Joseph P, Bullmore A J, et al. Active cancellation at a point in a pure tone diffuse sound field. *Journal of Sound and Vibration*, 1988, 120(1): 183—189.
- [6] Garcia-Bonito J, Elliott S J. Local active control of diffracted diffuse sound fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, 98(2): 1017—1024.
- [7] Garcia-Bonito J, Elliott S J, Bonilha M. Active cancellation of pressure at a point in a pure tone diffracted diffuse sound field. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 201(1): 43—65.

- [8] Liu L C, Kuo S M, Zhou M C. Virtual sensing techniques and their applications//2009 International Conference on Networking, Sensing and Control. Okayama, Japan: IEEE, 2009: 31—36.
- [9] Jung W, Elliott S J, Cheer J. Local active control of road noise inside a vehicle. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 121: 144—157.
- [10] Han R, Wu M, Gong C, et al. Combination of robust algorithm and head-tracking for a feedforward active headrest. *Applied Sciences*, 2019, 9(9): 1760.
- [11] 邹海山, 邱小军. 复杂声学环境中人耳附近空间有源降噪研究综述. *物理学报*, 2019, 68(5): 054301. (Zou H S, Qiu X J. A review of research on active noise control near human ear in complex sound field. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(5): 054301.)
- [12] Montazeri A, Poshtan J, Kahaei M H. Optimal placement of loudspeakers and microphones in an enclosure using genetic algorithm//Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 2003. Istanbul, Turkey: IEEE, 2003: 135—139.
- [13] Diamantis Z G, Tsahalis D T, Borchers I. Optimization of an active noise control system inside an aircraft, based on the simultaneous optimal positioning of microphones and speakers, with the use of a genetic algorithm. *Computational Optimization and Applications*, 2002, 23(1): 65—76.
- [14] Kochan K, Sachau D, Breitbach H. Robust active noise control in the loadmaster area of a military transport aircraft. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, 129(5): 3011—3019.
- [15] Montazeri A, Poshtan J. GA-based optimization of a MIMO ANC system considering coupling of secondary sources in a telephone kiosk. *Applied Acoustics*, 2009, 70(7): 945—953.
- [16] 张鹏举. 远程误差系统中物理和虚拟信号的相干性研究及应用. 硕士学位论文. 南京: 南京大学, 2022. (Zhang P J. Research and application of the coherence between physical and virtual signals in the remote error sensing systems. Master Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 2022.)
- [17] Aretz M, Vorländer M. Combined wave and ray based room acoustic simulations of audio systems in car passenger compartments, Part II: Comparison of simulations and measurements. *Applied Acoustics*, 2014, 76: 52—65.
- [18] Wang S P, Li H, Zhang P J, et al. An experimental study on the upper limit frequency of global active noise control in car cabins. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 201: 110672.
- [19] Aretz M, Vorländer M. Combined wave and ray based room acoustic simulations of audio systems in car passenger compartments, Part I: Boundary and source data. *Applied Acoustics*, 2014, 76: 82—99.
- [20] 邹海山, 邱小军. 虚拟声屏障代价函数的比较. *声学技术*, 2008, 27(6): 789—795. (Zou H S, Qiu X J. A comparison of cost functions for the virtual sound barrier system. *Technical Acoustics*, 2008, 27(6): 789—795.)
- [21] 邹海山, 邱小军, 牛锋, 等. 虚拟声屏障的数值及实验分析. *声学学报*, 2007, 32(1): 26—33. (Zou H S, Qiu X J, Niu F, et al. A numerical and experimental study on virtual sound barrier. *Acta Acoustica*, 2007, 32(1): 26—33.)
- [22] Fusaro G, Kang J, Asdrubali F, et al. Assessment of acoustic metawindow unit through psychoacoustic analysis and human perception. *Applied Acoustics*, 2022, 196: 108885.
- [23] Long M. *Architectural acoustics*. Amsterdam: Elsevier, 2005, 91.
- [24] Holland J H. *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Cambridge, MA, USA: The MIT Press, 1992, 18—19.
- [25] Katoch S, Chauhan S S, Kumar V. A review on genetic algorithm: Past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80(5): 8091—8126.
- [26] Yang Z Y, Wang Y F, Zhong X, et al. A database for active control of road noise in automobile cabins//Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics. Gyeongju, Korea, 2022. https://www.ica2022korea.org/data/Proceedings_A01.pdf.

(责任编辑 杨贞)