

修正自适应滤波算法的道路噪声主动控制系统*

张立军¹, 皮雄飞¹, 孟德建¹, 曹 诚², 赵 野², 束 元², 张梦浩²

(1. 同济大学汽车学院 上海, 201804)

(2. 上海大众汽车有限公司 上海, 201804)

摘要 针对车内道路噪声主动控制系统中传感器直流偏量引起的系统失稳问题, 建立了一种新的修正多通道自适应滤波的道路噪声主动控制算法。首先, 以多重相干为综合评价指标, 以实车道路试验下测得的 24 个加速度信号为基础, 选取了 4 个加速度信号作为参考信号; 其次, 以 2 个车载扬声器为次级声源, 驾驶员头枕位置为控制目标, 在 Simulink 环境下搭建 4 个参考信号、2 个扬声器和 1 个麦克风的 多通道车内道路噪声主动控制系统, 并用不同路面 (比利时路面、粗沥青路面) 不同车速下采得的数据进行了仿真实验; 最后, 搭建了基于 dSPACE 的主动控制系统硬件在环试验平台, 以验证不同工况下系统的有效性。结果表明: 仿真结果与试验结果相一致, 在不同工况下都可以取得稳定有效的降噪效果, 验证了修正算法的有效性。

关键词 车内道路噪声主动控制; 自适应滤波算法; 硬件布放优化; 道路试验

中图分类号 TB535⁺.2

引 言

随着汽车动力系统噪声控制技术的提升及汽车电动化进程的加快, 车内道路噪声日渐成为车内主导噪声。噪声主动控制技术具有低频控制效果好的特点, 逐渐成为车内低频结构型道路噪声控制的主流方法^[1-3]。

车内道路噪声主动控制目前主要以 FxLMS 算法为主, 在试验室或单一道路匀速工况下试验。在试验方法上, 刘先锋等^[4]在粗糙沥青路面上以 80 km/h 的速度空挡滑行对道路噪声进行研究, 发现 75 Hz 处的噪声是由车内空腔 2 阶声学模态与后车顶第 6 阶局部大模态耦合导致共振产生。邓海燕^[5]在消声试验室中搭建了快速控制原型试验平台并进行了硬件在环仿真试验。Zafeiropoulos^[6]在其研究中使用激振器对车辆左后轮施加激振力, 模拟了车内道路噪声, 进行道路噪声主动控制, 并将模拟结果与实车测量结果进行对标, 在稳态工况下取得较好的一致性。在硬件布置上, 张频捷等^[7]利用声固耦合边界元方法与多目标遗传算法实现了车内噪声主动控制系统扬声器和麦克风的布放方案优化。王登峰等^[8]在固定麦克风布放方案的基础上, 改变扬声器的位置, 利用试验对比了各种方案的实际降噪效

果, 取得了较优的硬件布放方案。Milani 等^[9]对车内道路噪声控制系统的扬声器和加速度传感器的布放位置进行了优化, 取得较好的控制效果, 但没有考虑加速度传感器的布放数量, 以及信号方向选取对控制效果的影响。

目前, 在硬件布放方面缺少对加速度传感器选取优化的考虑, 道路噪声主动控制道路试验较少且控制效果不好。笔者针对此现状, 首先, 开展数据采集试验, 对参考加速度进行布放优化并对车内道路噪声特性进行分析; 其次, 提出修正算法抑制传感器直流分量, 并通过离线仿真对控制效果进行分析; 最后, 搭建硬件在环试验平台, 进行实车道路试验并将试验结果与仿真结果对比分析, 验证修正算法与参考信号位置选取的准确性。

1 参考信号选取优化

1.1 基于 LMS 数采的数据获取试验

由道路噪声主动控制基本原理可知, 选取与初级噪声高相干度的加速度信号至关重要。笔者在上汽大众试车场进行了道路噪声信号采集试验。搭建了基于 LMS 数采的测试平台, 根据 ISO 5128-80 内部噪声测量标准, 在车身与悬架之间的连接点处布

* 国家自然科学基金资助项目(52072268)

收稿日期: 2020-06-11; 修回日期: 2020-09-22

置了 8 个三向加速度传感器,并且在驾驶员和乘员的耳朵附近布置了声压传感器,传感器和布置位置如图 1 所示。在车速为 60 km/h 的比利时路面条件下,采集悬架与车身连接点的 24 个振动加速度信号和车内 4 个声压信号。

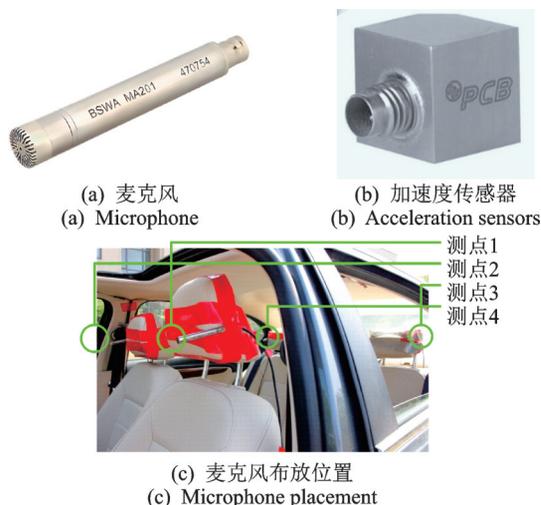


图 1 传感器和布置位置

Fig.1 Sensors and placement

对试验中采集到的声压信号进行分析,得到 4 个座位处的道路噪声 A 计权声压级,麦克风功率谱密度如图 2 所示。由图可见,传入车内的道路噪声声压级较高的频带范围主要集中在 75~130 Hz 的轰鸣声以及 220~240 Hz 的轮胎空腔共鸣噪声。轰鸣声主要由悬架振动引起的车身板件振动产生,轮胎空腔共鸣噪声由轮胎空腔共振经悬架传递到车身引起。对于这 2 种噪声,主要通过采用修改车身或悬架结构^[10-11]、在轮胎内增加吸音棉或修改轮胎和轮辋结构的方式进行被动控制^[12],但是有的控制方式从成本和可靠性方面考虑难以实施和维护^[13],而主动控制可以弥补被动控制方法的不足,是一种重要的道路噪声控制手段。因此,在道路噪声主动控制系统的开发过程中,选择参考信号时应该重点关注这 2 种噪声频段。

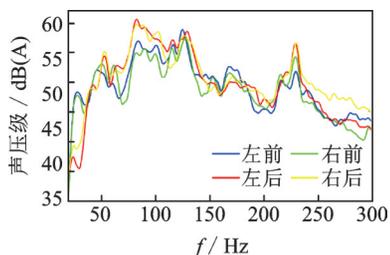


图 2 麦克风功率谱密度

Fig.2 Power spectral density of microphone

1.2 最优加速度位置选取

笔者利用多重相干性作为最佳加速度位置选取的评价指标,选出与驾驶员位置相干性最高的加速度组合。由于试验中的加速度信号较多,直接用穷举法对所有可能的组合计算多相干函数需要耗费大量计算资源。针对此问题,首先,对所有加速度信号进行常相干分析,预先选出常相干函数较大的部分信号;其次,根据需求确定参考信号的数量,再从常相干分析获得的信号中生成可能的参考信号组合,并计算每组信号组合中加速度信号与驾驶员位置的麦克风信号的重相干函数;最后,将 75~130 Hz 和 220~240 Hz 频率范围内重相干函数的均方根值最大的组合确定为参考信号。

计算每个加速度信号和驾驶员处声压信号的常相干函数,如图 3 所示。由图可知,具有高相干性的频带主要是 70~120 Hz 和 220~240 Hz。预选出 10 个在关心频带上与麦克风声压信号常相干较高的加速度信号,其序号如表 1 所示。考虑到控制器通道数量与计算量的限制,选取 4 个加速度信号作为参考信号。因此,本研究的参考信号选取问题简化为从 10 个相干性较高的加速度信号中选取 4 个作为参考信号。对这 10 个加速度信号进行排列组合,共计 210 种组合。

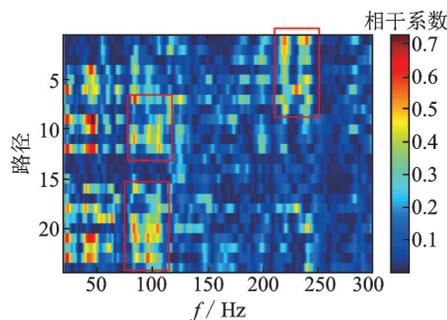


图 3 每个加速度信号与驾驶员处声压信号的常相干函数
Fig.3 Constant coherence function of each acceleration signal and sound pressure signal at the driver's position

表 1 参考加速度序号

Tab.1 Reference acceleration number

信号序号	加速度传感器布置位置及方向
1	前桥减振器与车身左接附点垂向
2	前桥减振器与车身右接附点纵向
3	后桥减振器与车身左接附点垂向
4	后桥减振器与车身右接附点垂向
5	车身、副车架左接附点垂向
6	车身、副车架右接附点垂向
7	车身、扭力梁左接附点垂向
8	车身、扭力梁左接附点纵向
9	车身、扭力梁右接附点垂向
10	车身、扭力梁右接附点纵向

计算210种组合对应的重相干函数(4个加速度信号与1个麦克风信号)的均方根值。得出与驾驶员位置相干性最大的加速度信号组合,对应的4个最优加速度信号编号分别为5,6,8和9,即车身与副车架左连接点垂向、车身与副车架右连接点垂向、车身与扭力梁左连接点纵向、车身与扭力梁右连接点垂向,最优加速度位置如图4所示。

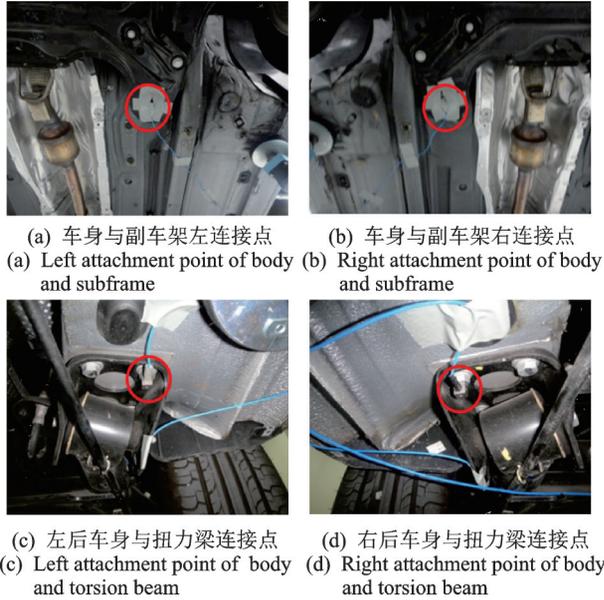


图4 最优加速度位置

Fig.4 The position of the optimal acceleration

选取的参考信号与麦克风信号的最优布放组合重相干函数如图5所示。可以看出,在75~130 Hz和220~240 Hz目标频带内,参考加速度信号组合与麦克风处声压信号的相干度都很高,最高为0.94,因此理论上使用这4个加速度信号作参考信号可以达到很好的降噪效果。下面将通过仿真和试验验证参考信号选取的正确性。

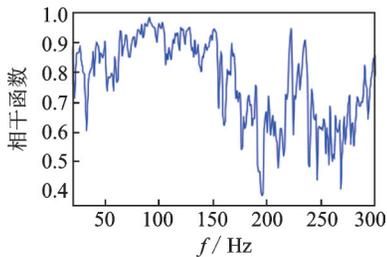


图5 最优布放组合重相干函数

Fig.5 Multicoherence function of optimal placement combination

2 基于修正FxLMS算法的离线仿真

2.1 FxLMS算法

笔者所建立的车内道路噪声主动控制系统模型

包括 J 个参考加速度信号与 M 个次级声源以及 K 个误差麦克风信号。用 $x(n)=[x_1(n) x_2(n) \cdots x_J(n)]^T$ 表示参考信号矢量, $y(n)=[y_1(n) y_2(n) \cdots y_M(n)]^T$ 表示次级声信号。多通道主动控制系统示意图如图6所示。

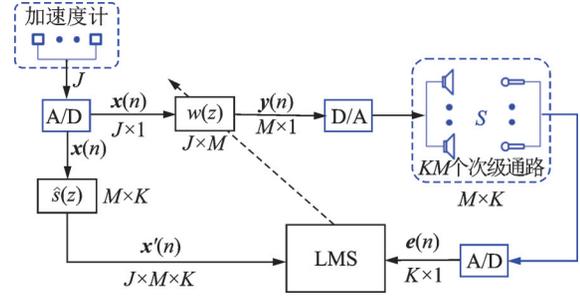


图6 多通道主动控制系统示意图

Fig.6 Schematic diagram of multi-channel active control system

由 J 个参考信号生成 M 个次级声信号输入,权系数的更新公式为 $J \times M$ 的矩阵,即

$$W(n) = \begin{bmatrix} w_{11}(n) & w_{12}(n) & \cdots & w_{1M}(n) \\ w_{12}(n) & w_{22}(n) & \cdots & w_{2M}(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{J1}(n) & w_{J2}(n) & \cdots & w_{JM}(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $w_{jm}(n)=[w_{j,m,1}(n) w_{j,m,2}(n) \cdots w_{j,m,L}(n)]^T$ 为在 n 时刻的 L 阶自适应滤波器的权系数矢量。

得到权系数矢量后,则 M 个次级声源输入信号可以表示为

$$y_m(n) = \sum_{j=1}^J w_{jm}^T(n) x_j(n) \quad (2)$$

其中: $x_j(n)=[x_j(n) x_j(n-1) \cdots x_j(n-L)]^T$ 为第 j 个参考信号矢量。

由于次级通路的存在,以 $d_k(n)$ 表示第 n 时刻在误差麦克风位置的初级道路噪声信号, s_{mk} 表示第 m 个扬声器到第 k 个误差麦克风的单位脉冲响应, $y_k'(n)$ 表示所有次级源输入信号经过次级通路传递到第 k 个误差麦克风位置的声压信号,则

$$y_k'(n) = \sum_{m=1}^M s_{mk} * y_m(n) \quad (3)$$

第 k 个麦克风获得的误差信号可以表示为

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k'(n) \quad (4)$$

误差信号要取得最小值,此时自适应滤波器权系数矢量 $w_{jm}(n)$ 为

$$w_{jm}(n+1) = w_{jm}(n) + 2\mu \sum_{k=1}^K x_{jmk}'(n) e_k(n) \quad (5)$$

2.2 修正算法

在进行噪声主动控制时,发现参考加速度信号与误差麦克风信号都存在一个直流偏量,使得误差信号与加速度信号失真,从而影响控制效果。经过前期的大量试验和研究发现,在模型中加入数字滤波器会给输入信号引入一定的时延,引起控制系统发散。针对此问题,笔者提出了一种不引入时延的去信号直流算法,即

$$y(n) = x(n) - \bar{x}(n) \approx x(n) - \frac{\sum_{i=0}^{f_s-1} x(n-i)}{f_s} \quad (6)$$

其基本算法原理为对参考信号输入时刻的前 1 个采样周期内的信号值求取平均值,用输入信号减去所得平均值得出去直流偏量后的输入信号。根据算法原理建立的去直流算法模型如图 7 所示。

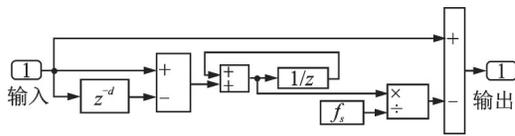


图 7 去直流算法模型

Fig.7 Algorithm model for DC removal

2.3 基于修正 FxLMS 的模型搭建与离线仿真

以驾驶员座位处为控制点,根据修正多通道 FxLMS 算法原理,使用 4 个参考信号和 2 个扬声器,搭建了基于 Matlab/Simulink 的车内噪声主动控制仿真模型。

使用试验测得的比利时滑行工况、粗沥青滑行工况数据进行离线仿真,次级通路采用实测的真实次级通路,采样频率为 2 048 Hz,滤波器阶数为 256 阶,收敛系数为 0.02,2 种路面仿真结果分别如图 8 和图 9 所示。其中:红色曲线为试验测得的真实数据;蓝色曲线为仿真得到的降噪后的数据。由图可见,在目标频带(75~130 Hz 和 220~240 Hz)内,2 种工况均有良好的降噪效果,并且没有出现发散现象;而其他相干性较低的频带的降噪量较低,与上文相干性分析的结果比较一致。在比利时路面滑行工况下,最大降噪量可达 6.5 dB;在粗沥青路面滑行工况下,最大降噪量可达 6 dB。仿真结果表明,笔者建立的车内道路噪声的多通道主动控制模型对 2 种典型路面噪声具有良好的控制效果,验证了加速度信号与麦克风信号的相干性分析及修正算法的正确性。

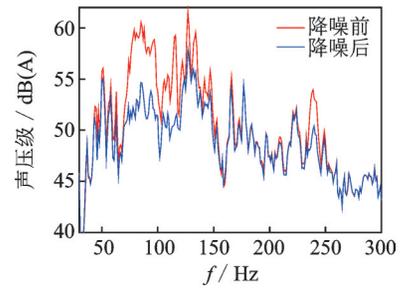


图 8 比利时路面仿真结果

Fig.8 Simulation results of Belgian pavement

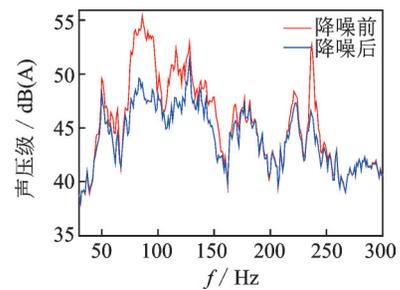


图 9 粗沥青路面仿真结果

Fig.9 Simulation results of rough asphalt pavement

3 基于 dSPACE 的实车道路试验

3.1 硬件在环平台搭建

为了进一步验证参考信号的选择位置及修正算法的正确性,笔者使用 4 个加速度传感器、2 个车载扬声器和 1 个麦克风,搭建了基于 dSPACE 的硬件在环试验平台,进行实车试验。试验仪器与设备如图 10 所示,硬件在环试验平台如图 11 所示。



(a) MicroAutobox 控制器
(a) MicroAutobox controller

(b) 信号调理仪
(b) Signal conditioner



(c) 扬声器
(c) Speaker

(d) 麦克风
(d) Microphone

图 10 试验仪器与设备

Fig.10 Test instruments and equipment

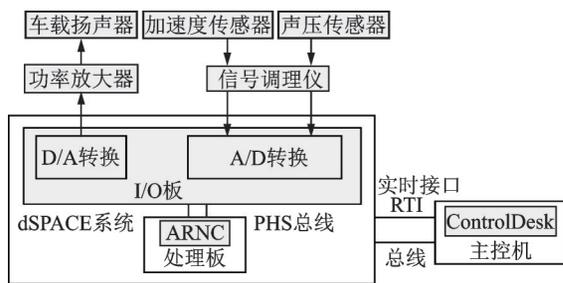


图11 硬件在环试验平台

Fig.11 Hardware-in-the-loop test platform

试验中,声压传感器布置于驾驶员座位处,加速度计布置于选取的4个位置,扬声器使用前排2个车载扬声器。试验中MicroAutobox、信号调理仪、功率放大器以及供电装置均布置在汽车行李舱中。

3.2 试验工况

笔者选择道路噪声比较明显的粗沥青路面与比利时路面作为试验道路,进行道路噪声的主动控制。试验工况如下:

1) 比利时路面,车速为60 km/h滑行,车内乘坐4个乘员,采样频率为2 048 Hz,滤波器阶数为256阶,收敛系数为0.02,功放选用低通滤波挡;

2) 粗沥青路面,车速为60 km/h滑行,其他设置与比利时路面工况一致。

3.3 试验结果

在比利时路面滑行和粗沥青路面滑行2种工况下,控制系统的降噪效果分别如图12和图13所示。由图12可以看出,主动控制系统在比利时滑行工况下,对于70~120 Hz频带内的噪声具有良好的降噪效果,最大降噪量可达5 dB,在240 Hz附近有2 dB的降噪量,在其他相干性较低的频段降噪效果很小。由图13可以看出,道路噪声主动控制在粗沥青路面工况下,车内噪声也具有良好的消噪效果,对于70~120 Hz频带内的最大降噪量可达5 dB,在240 Hz附近有3 dB的降噪量。

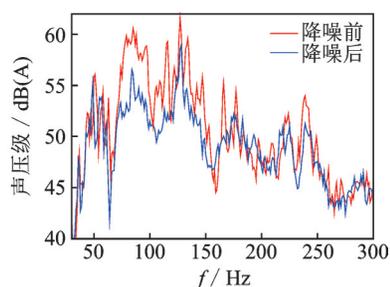


图12 比利时路面降噪效果

Fig.12 Noise reduction effect of Belgian pavement

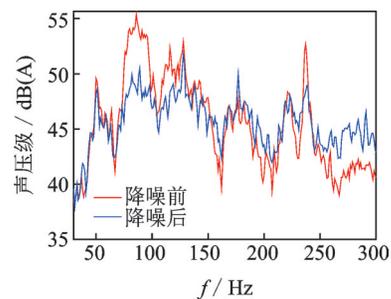


图13 粗沥青路面降噪效果

Fig.13 Noise reduction effect of rough asphalt pavement

虽然实车试验取得了良好的降噪效果,但是与仿真结果相比,试验结果降噪后的整体声压级有一定的偏高,少数频段会出现声压级变高的现象,其主要原因是实车内声场较为复杂,实时性控制要求较高,还有一些车外噪声(风噪等)的干扰,使得降噪量没有仿真的高。此外,在比利时路面工况下,230 Hz附近的频段上,参考信号和噪声信号的相干性很高,但是降噪量却一般,其原因可能是因为此频段的声压级相比于70~120 Hz偏低,在FxLMS算法的主动控制过程中,降噪量会较为弱化。

4 结束语

通过常相干性与重相干性分析相结合的方法对加速度传感器的布放进行了优化,选择了4个加速度信号作为参考信号。针对参考加速度信号与误差麦克风信号的直流偏量问题,提出了一种不引入时延的去信号直流算法。基于此修正的多通道自适应滤波算法搭建了四参考信号、双扬声器及单误差信号的多通道主动控制模型,在选定仿真工况与仿真参数的基础上完成了对比利时滑行工况与粗沥青滑行工况的道路噪声信号的离线仿真。搭建了基于dSPACE的多通道主动控制系统硬件在环试验平台,完成了实际道路工况下的车内噪声主动控制试验,取得了良好的降噪效果,与仿真结果一致,验证了参考信号选取位置和修正FxLMS算法的正确性。

参 考 文 献

- [1] JUNG W, ELLIOTT S J, CHEER J. Local active control of road noise inside a vehicle [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 121: 144-157.
- [2] CHEER J, ELLIOTT S J. Multichannel control

- systems for the attenuation of interior road noise in vehicles[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 60:753-769.
- [3] SAMARA-SINGHE P N, ZHANG W, ABHAY-APALA T D. Recent advances in active noise control inside automobile cabins: toward quieter cars[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2016, 33(6):61-73.
- [4] 刘先锋, 权循宇, 陈建中, 等. 车内低频路面噪声分析与控制[J]. *噪声与振动控制*, 2015, 35(4):89-91. LIU Xianfeng, QUAN Xunyu, CHEN Jianzhong, et al. Analysis and control of low frequency road noise inside a car [J]. *Noise and Vibration Control*, 2015, 35(4):89-91. (in Chinese)
- [5] 邓海燕. 基于自适应陷波滤波器的车内噪声主动控制[D]. 上海:同济大学, 2013.
- [6] ZAFEIROPOULOS N. Active noise control in a luxury vehicle[D]. Manchester: University of Salford, 2015.
- [7] 张频捷, 张立军, 孟德建, 等. 汽车车内噪声主动控制系统扬声器与麦克风布放优化方法[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(5):169-175. ZHANG Pinjie, ZHANG Lijun, MENG Dejian, et al. Vehicle ANC hardware optimal placement using multi-objective genetic algorithm[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(5):169-175. (in Chinese)
- [8] 王登峰, 刘学广, 刘宗巍, 等. 车内自适应有源消声系统次级声源布放试验[J]. *中国公路学报*, 2006, 19(3):122-126. WANG Dengfeng, LIU Xueguang, LIU Zongwei, et al. Layout experiment of secondary sound source for adaptive active noise control system in vehicle interior [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19(3):122-126. (in Chinese)
- [9] MILANI A A, KANNAN G, PANAHI I M S. On maximum achievable noise reduction in ANC systems [C]//*IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*. Spain: IEEE, 2010: 349-352.
- [10] 车勇, 刘浩, 夏祖国, 等. 纯电动汽车车内结构路噪识别[J]. *噪声与振动控制*, 2014, 34(5):74-77, 144. CHE Yong, LIU Hao, XIA Zuguo, et al. Identification of road-induced interior structural noise for battery electric vehicles[J]. *Noise and Vibration Control*, 2014, 34(5):74-77, 144. (in Chinese)
- [11] 赵伟丰, 王文彬, 周浩东. 车内低频路噪问题的分析与控制[J]. *噪声与振动控制*, 2019, 39(3):142-146. ZHAO Weifeng, WANG Wenbin, ZHOU Haodong. Analysis and control of interior low-frequency road noise of a car [J]. *Noise and Vibration Control*, 2019, 39(3):142-146. (in Chinese)
- [12] MOHAMED Z, WANG X. A study of tyre cavity resonance and noise reduction using inner trim[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 50: 498-509.
- [13] MOHAMED Z, WANG X, JAZAR R. A survey of wheel tyre cavity resonance noise[J]. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 2013, 9(3/4): 276-293.



第一作者简介:张立军,男,1972年3月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为汽车振动与噪声分析及控制、汽车系统动力学分析与控制、电动汽车动力总成集成与控制、智能汽车。曾发表《车内噪声主动控制系统鲁棒性分析与优化》(《振动、测试与诊断》2021年第41卷第2期)等论文。

E-mail: tjedu_zhanglijun@tongji.edu.cn

通信作者简介:孟德建,男,1982年3月生,助理教授、硕士生导师。主要研究方向为汽车振动与噪声控制、车辆系统动力学与控制、电动汽车底盘集成与控制。

E-mail: mengdejian@tongji.edu.cn