

# 车内道路噪声有源控制的虚拟参考信号 分组构建方法

张立军, 宁友博, 孟德建, 张 帅

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 针对道路噪声有源控制系统参考信号数量较多导致系统运算负担较大,而直接构建的虚拟参考信号与车内目标噪声相干度不高的问题,提出了一种虚拟参考信号的分组构建方法。首先进行整车道路试验,选取4个车轮位置附近采集到的和车内噪声相干性较高的振动加速度信号作为原始信号,基于奇异值分析法确定构建的虚拟参考信号数量。然后基于车轮位置将关联度较高的原始信号分为一组,对每组原始信号通过奇异值分解法构建转换矩阵,分组构建虚拟参考信号。最后搭建基于归一化参考信号滤波最小均方误差(NFXLMS)算法的道路噪声有源控制模型,分析分组构建的虚拟参考信号在降低计算复杂度与降噪效果方面的表现。与原有虚拟参考信号构建方法相比,该方法在降低计算复杂度和提高降噪效果方面均有较大改善,验证了该方法的有效性。

**关键词:** 道路噪声有源控制;虚拟参考信号;计算复杂度;分组构建方法

中图分类号: TB535

文献标志码: A

## Method of Constructing Virtual Reference Signals Utilizing Grouping for Active Road Noise Control in Vehicles

ZHANG Lijun, NING Youbo, MENG Dejian,  
ZHANG Shuai

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Aimed at the problem that the large number of reference signals for the road noise active control system leads to a heavy computational burden, and the directly constructed virtual reference signals are not highly coherent with the target noise in the vehicle, a method

for constructing virtual reference signals utilizing grouping is proposed. First, the vehicle road test is conducted, the vibration acceleration signals collected near the four-wheel positions are selected as the original signals, and the number of virtual reference signals is determined based on the singular value analysis. Then, the original signals with high correlations are divided into a group based on the wheel position, the conversion matrix is constructed by the singular value decomposition for each group of original signals, and the virtual reference signals are constructed utilizing grouping. Finally, a road noise active control model based on the normalized filtered-x least mean square (NFXLMS) algorithm is built to analyze the performance of the virtual reference signals constructed utilizing group in reducing computational complexity and noise reduction. Compared with the original virtual reference signal construction method, this method has greatly reduced the computation complexity and improved the noise reduction effect, which verifies the effectiveness of the method.

**Key words:** active road noise control; virtual reference signal; computation complexity; monstruction method utilizing grouping

当下,汽车行业正逐渐由燃油动力向电动力方向转变,同时汽车内部良好的声音品质越来越被重视。对于纯电动汽车,由于车内声环境中缺乏发动机噪声的掩蔽效应,使得道路噪声越来越突出。道路噪声是由轮胎与路面相互作用引起轮胎沟槽气泵现象和胎壁振动而产生的噪声,通常在城市道路上,车内因胎壁振动引起的道路噪声十分突出,并通过

收稿日期: 2020-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(52072268)

第一作者: 张立军(1972—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为汽车振动与噪声控制。

E-mail: tjedu\_zhanglijun@tongji.edu.cn

通信作者: 孟德建(1982—),男,副教授,工学博士,主要研究方向为汽车振动与噪声控制。

E-mail: mdj0218@163.com



论文  
拓展  
介绍

悬架和车身等结构传递到车内<sup>[1-2]</sup>。研究表明,针对这种低频结构噪声,仅通过隔声、吸声等被动式方法控制,效果甚微,采用基于声波叠加原理的有源道路噪声控制(active road noise control, ARNC)方法来治理效果更佳<sup>[3]</sup>。

有源控制方法主要包括反馈式、前馈式和混合式结构。考虑到车内乘员对车内声音环境的感知效应,前馈式 ARNC 结构比较适合车内的应用<sup>[4]</sup>。根据车内道路噪声的传递路径特征,通常选取悬架上的振动信号作为 ARNC 系统参考信号<sup>[5-6]</sup>。如果参考信号数量较多,可以使得参考信号与车内目标噪声之间具有较好的相干性,但会造成传感器的硬件成本高昂,而且会带来非常大的计算复杂度;如果参考信号数量减少,可以明显降低计算复杂度,但参考信号与车内目标噪声信号之间的相干性会受到严重影响。Zafeiropoulos<sup>[7]</sup>通过在悬架的4个车轮位置布置16个三向加速度传感器,从而使参考信号与车内噪声的相干性达到90%以上。为降低系统复杂度, Park 等<sup>[8]</sup>发现,至少需要在车身与悬架连接点处布置6个传感器才能将相干度平均控制在80%左右,但这只能勉强满足 ARNC 系统的基本工作要求,且系统不稳定。由此可见,如何化解参考信号数量和控制效果之间的矛盾,是 ARNC 系统能够成熟应用所面临的重要问题。

实际上,众多参考信号包含的振动信息是互相关联和重叠的,但是加速度传感器的数量应不少于结构独立振动源的数量<sup>[9]</sup>。为此, Akiho 等<sup>[10]</sup>基于奇异值分解法将一组可以产生高相干性的加速度信号合成一组数量较少的虚拟参考信号,减少了输入通道的数量。之后 Dehandschutter 等<sup>[11]</sup>发现文献<sup>[10]</sup>的研究只能适应单一工况,又提出了可以实时更新的虚拟参考信号构建方法。进一步, Nygren<sup>[12]</sup>详细对比了不同虚拟参考信号合成方法的差异,认为虚拟参考信号的方法确实可以保留原始参考信号中的大部分信息,但对瞬态变化系统的跟踪性较差。综上所述,虚拟参考信号构建方法可以减少参考信号输入数量,具有一定的可行性。然而,从这些研究中发现,直接利用整车采集到的多个原始信号构建的虚拟参考信号用于 ARNC 系统时控制效果不佳,原因在于所构建的虚拟参考信号与目标噪声的相干性有待改善。

针对这一问题,本文提出了一种针对虚拟参考信号的分组构建方法,并对其有效性进行了验证。首先进行车内道路噪声采集试验,采集悬架不同位

置振动加速度信号和头枕处的声压信号,基于相干分析筛选出较为重要的原始振动加速度信号,并通过奇异值分析确定虚拟参考信号的数量。然后通过所提出的分组构建法构建了虚拟参考信号,并与原有方法构建的虚拟参考信号进行相干性对比。最后基于归一化参考信号滤波最小均方误差(normalized filtered-x least mean square, NFXLMS)算法搭建了道路噪声有源控制系统仿真模型,对所构建的参考信号计算复杂度进行分析,并验证了其降噪效果。

## 1 原始信号采集与分析

虚拟参考信号是由多个原始加速度信号经过预处理合成的,原始振动加速度信号与目标噪声的相干性对所构建的虚拟参考信号的质量具有至关重要的影响。因此,筛选出具有较高相干性的原始振动加速度信号是构建虚拟参考信号的第一步。以道路试验为基础,进行车内噪声传递路径相干分析,是目前进行高相干性参考信号位置筛选较为有效的方法<sup>[13]</sup>。为此,本文以某国产 A 级两厢车为平台,进行车内道路噪声采集试验并进行分析。

### 1.1 信号采集

参照 GB/T 18697—2002 声学汽车车内噪声测量方法标准<sup>[14]</sup>,在各乘员头枕左右耳侧位置布置2个麦克风传感器,共采集8个位置的车内噪声信号。分别在前悬架附近的转向节、副车架与车身前连接点与后连接点、减震器上端位置左右共布置8个三向加速度传感器,可以采集到24个加速度信号;同时在后悬架附近减震器上端、扭力梁与车身连接处左右共布置4个三向加速度传感器,可以采集到12个加速度信号。试验中选用的麦克风均为 PCB Piezotronics 公司的 MP231 麦克风,搭配 MA231 前置放大器,灵敏度为  $40 \text{ mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$ 。选用的振动加速度传感器为 PCB Piezotronics 公司的 356A15 三向加速度传感器,灵敏度为  $100 \text{ mV} \cdot \text{g}^{-1}$ 。试验中加速度传感器(以前悬架转向节处和后悬架扭力梁与车身连接处为例)和麦克风(以前排为例)的实车布置位置分别如图1和图2所示。

试验路面为干燥平直的粗沥青路面。试验时天气晴朗无风,路面无积水,车窗为关闭状态。驾驶试验车辆在试验路面上以  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的初速度空挡滑行减速至  $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,可以认为此时的车内噪声主要为路面激励引起的道路噪声。

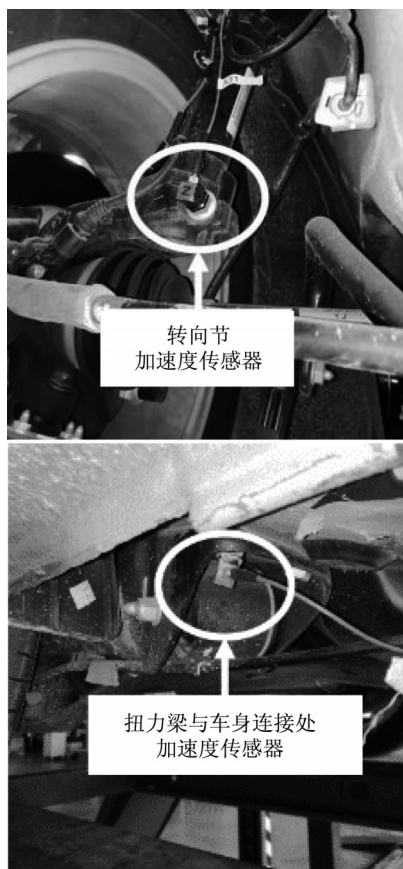


图1 前悬架转向节处和后悬架扭力梁与车身连接处传感器布放

Fig. 1 Accelerometers at front suspension steering knuckle and rear suspension torque beam-body



图2 前排头枕处麦克风布放

Fig. 2 Microphones at front headrest

## 1.2 信号分析

对采集到的麦克风信号进行频域分析,得到车内噪声声压级(sound pressure level, SPL)信号如图3所示。从图3可以看出,车内道路噪声较为突出,频段集中于75~120 Hz,表现为轰鸣声,其主要振动源为悬架振动引起的车身板件振动以及车身板件与车内声腔的相互耦合<sup>[2]</sup>。因此在基于相干分析筛选

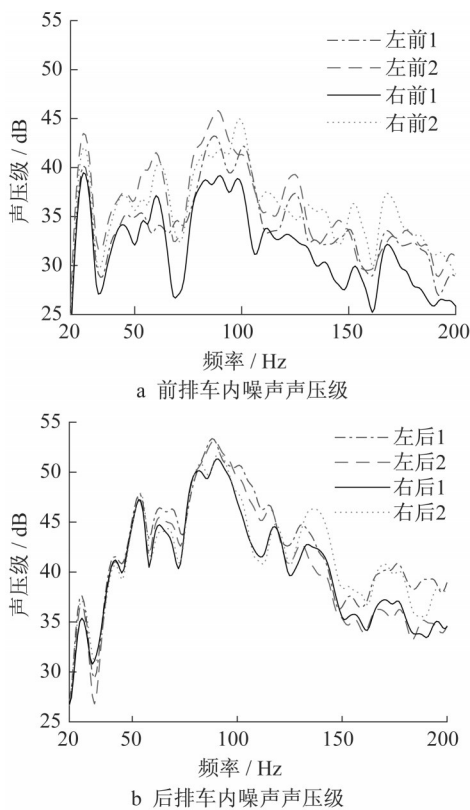


图3 车内道路噪声声压级

Fig. 3 Road noise SPL in the vehicle

原始振动加速度信号时,应选取在该频段与车内噪声相干度较高的信号。

对采集到的数据,分别计算前悬架上采集到的24个加速度信号和后悬架上采集到的12个加速度信号与8个麦克风信号的常相干函数,分别如图4、图5所示(以后排左侧乘员耳旁麦克风为例)。从图4可以看出,对于前悬架附近的加速度信号,副车架与车身的前连接点处振动对车内道路噪声(左后乘员右耳处)的贡献度很大,其中副车架与车身的左侧前连接点处X向加速度信号在目标频段与车内噪声相干度大于0.7。从图5可以看出,对于后悬架附近的加速度信号,扭力梁与车身连接点处振动对车内道路噪声(左后乘员右耳处)的贡献度很大,其中扭力梁与车身左侧连接点处Z向加速度信号在目标频段与车内噪声的相干度大于0.7。综合来看,副车架与车身后连接点处和扭力梁与车身连接点处是道路噪声传递路径上最重要的节点,因此选择此4个位置共计12个加速度信号作为筛选后的原始加速度信号。

在筛选出的原始加速度信号基础上,进一步分析确定所构建的虚拟参考信号的数量。理论上,虚拟参考信号的数量应不少于原始加速度信号较大奇



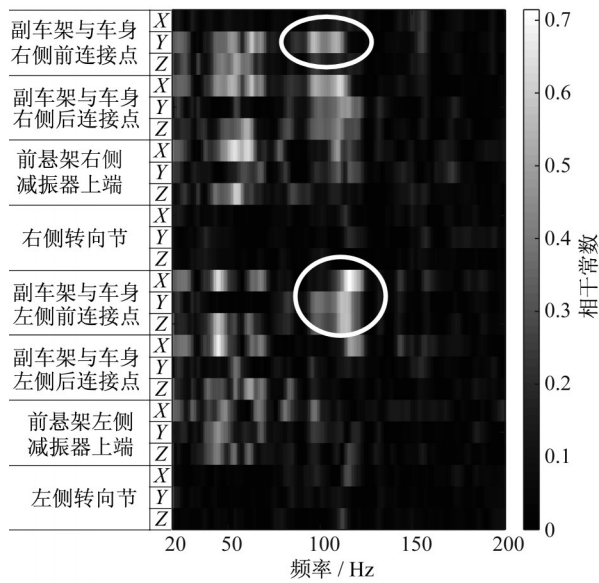


图4 前悬架加速度信号与麦克风信号(左后乘员右耳)常相干函数

Fig. 4 Front suspension accelerometers-left rear microphone (right) coherence map

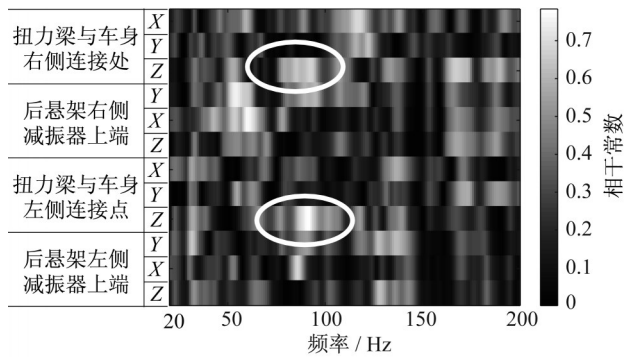


图5 后悬架加速度信号与麦克风信号(左后乘员左耳)常相干函数

Fig. 5 Rear suspension accelerometers-left rear microphone (left) coherence map

异值的数量<sup>[13]</sup>,由此对筛选出的12个的原始加速度信号进行奇异值分解,结果如图6所示。采用奇异值衰减率来确定非零奇异值的个数,即从最大的奇异值 $\sigma_1$ 往下数,认为低于 $\sigma_1$  20 dB以内的值均是较大奇异值<sup>[15]</sup>,表征信号的全部独立成分。由图6可以看出,其中较大的奇异值数量为4个,说明虚拟参考信号的数量应不少于4个。由此确定本文所构建虚拟参考信号的数量为4个。

## 2 虚拟参考信号构建

虚拟参考信号的构建方法是由 Akiho 等<sup>[10]</sup>为解

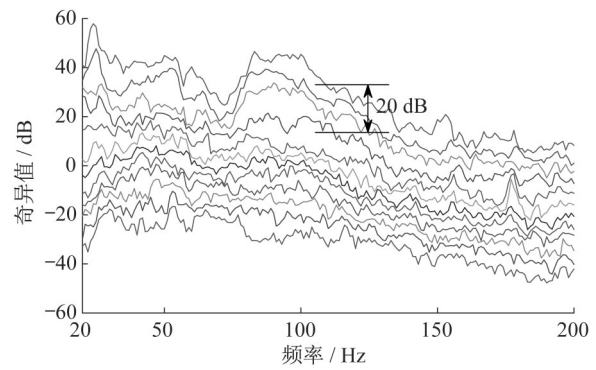


图6 原始加速度信号奇异值分析

Fig. 6 Singular value of original acceleration signals

决 ARNC 系统中多个参考信号输入带来的过高运算复杂度而提出的,具体方法是将不同车轮处的多个振动加速度信号合成一组,对其功率谱矩阵进行奇异值分解,构建出一个转换矩阵,利用此转换矩阵求出虚拟参考信号,以减少输入参考信号的数量。但是原方法是对原始信号直接进行奇异值分解,由于在悬架不同车轮位置处采集到的振动信号之间相关性不高,会使得所选取的奇异值无法很好地表征原始振动信号中的内容。考虑到实际车辆在道路上的行驶状态,车内道路噪声通常表现为4个车轮的独立振动复合作用的结果,若先将原始信号根据车轮位置分为不同组,便能提高每组信号中的信号关联度,再分别对每组信号构建转换矩阵,求出的虚拟信号可以保留更多原始信号中的振动信息。由此,本节提出了一种虚拟参考信号的分组构建方法。

### 2.1 分组构建法

所提出的分组构建方法的流程如图7所示。对于整车采集筛选得到的 $k$ 个原始加速度信号,按其信号来源位置将其分为4组,分别为左前轮加速度信号、左后轮加速度信号、右前轮加速度信号、右后轮加速度信号。假定每组加速度信号的数量为 $n$ ,首先计算其自功率谱和互功率谱,得到原始加速度信号的功率谱矩阵 $S_m$ ,然后对功率谱矩阵进行奇异值分解(singular value decomposition, SVD),得到频域的变换矩阵 $U^T$ ,再将频域的变换矩阵经过快速傅里叶逆变换(inverse fast fourier transform, IFFT)得到脉冲响应函数,最后计算原始加速度信号和该脉冲响应函数的卷积得到 $m$ 个虚拟参考信号( $m < n$ )。

具体计算流程如下:

对于每一组原始加速度信号 $X_n$ ,矢量形式为

$$X_n = [X_1 \ X_2 \ \cdots \ X_n]^T \quad (1)$$

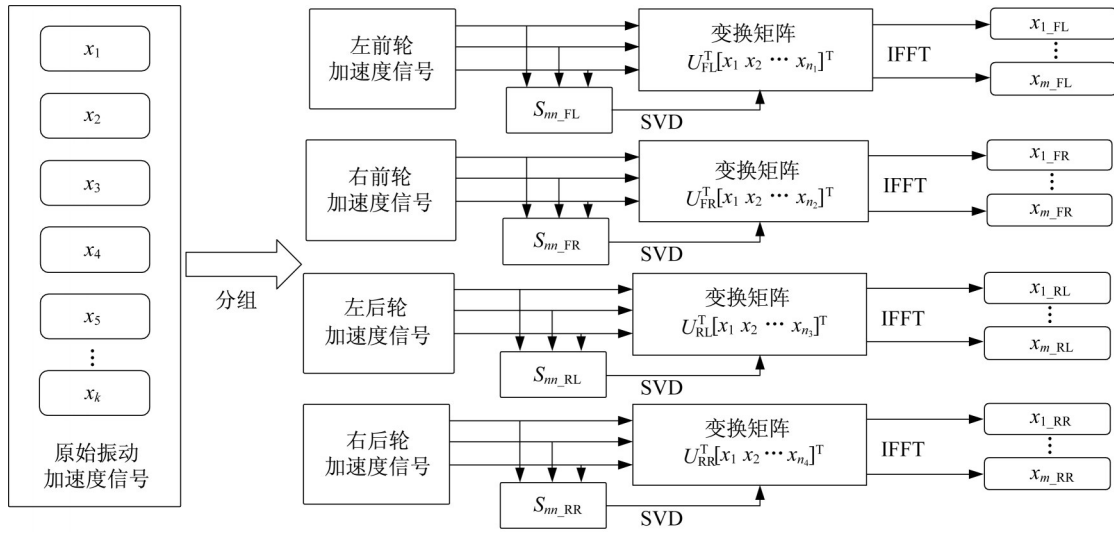


图7 虚拟参考信号分组构建法流程

Fig. 7 Block diagram of construction of virtual reference signals utilizing grouping

则加速度信号的功率谱矩阵  $S_m$  为

$$S_m = X_n X_n^H \quad (2)$$

式中:  $X_n^H$  为  $X_n$  的埃尔米特矩阵。将  $S_m$  写成矩阵形式, 即

$$S_m = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $S_{ij}$  为第  $i$  个加速度信号  $X_i$  和第  $j$  个加速度信号  $X_j$  之间的互功率谱, 对角线元素为每个加速度信号的自功率谱。

合成的虚拟参考信号的功率谱矩阵可以表示为

$$N_m = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & \cdots & N_{1n} \\ N_{21} & N_{22} & \cdots & N_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{n1} & N_{n2} & \cdots & N_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $N_{ij}$  为合成的第  $i$  个虚拟参考信号  $Y_i$  和第  $j$  个虚拟参考信号  $Y_j$  之间的互功率谱。

设有频率响应函数矩阵为  $H_m$ , 其元素  $H_{ij}$  表示输入的原始加速度信号  $X_i$  到输出虚拟参考信号  $Y_j$  的频率响应函数, 维度为  $n \times n$ 。则  $N_m$  可以表示为

$$N_m = H_m S_m H_m^H \quad (5)$$

对  $S_m$  进行奇异值分解, 得到

$$S_m = U_m \Sigma V_m^H \quad (6)$$

式中:  $U_m$  矩阵的列向量为  $S_m^H S_m$  的特征向量;  $V_m$  矩阵的列向量为  $S_m S_m^H$  的行向量;  $\Sigma$  为一个  $n \times n$  的对角矩阵, 包含  $l$  个正实数元素, 定义如下

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1 \ \sigma_2 \ \cdots \ \sigma_l \ 0 \ \cdots \ 0) \quad (7)$$

式中:  $\sigma$  按照  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_l > 0$  ( $l \leq n$ ) 的顺序排序。

由于  $S_m$  对角线元素是每个加速度信号的自功率谱, 其他元素是各个加速度信号之间的互功率谱, 则有  $S_m = S_m^H$ , 进一步可得

$$U_m = V_m \quad (8)$$

将式(6)重写得到  $\Sigma$  的表达式为

$$\Sigma = U_m^H S_m (U_m^H)^H \quad (9)$$

对比式(9)和式(5), 可以将  $U_m$  视为可以求出输出虚拟参考信号互功率谱元素的传递函数矩阵。定义  $U_m^H = Q_m$ , 则式(9)可以改写为

$$\Sigma = Q_m S_m Q_m^H = Q_m X_n (Q_m X_n)^H = \Lambda_n \Lambda_n^H \quad (10)$$

由此可得

$$\Lambda_n = Q_m X_n \quad (11)$$

式中:  $\Lambda_n$  为虚拟参考信号矢量;  $X_n$  为原始加速度信号矢量。

为了将输出虚拟参考信号用于 ARNC 控制系统, 还需要将其转化到时域上。通常来说, 传递函数矩阵  $U_m^H = Q_m$  是非最小相位的。然而, 为了使生成信号的时延最小化, 并保持控制系统的因果性, 若使用非最小相位滤波器合成参考信号, 则不适用于 ANC 系统。可以证明, 使用最小相位系统替代非最小相位系统是可行的<sup>[10]</sup>。本文使用最小相位滤波器合成参考信号。

对式(11)进行快速傅里叶逆变换, 写为离散形式得

$$\lambda_m = q_{m1} * x_1 + q_{m2} * x_2 + \cdots + q_{mn} * x_n \quad (12)$$

式中:  $\lambda_m$  为第  $m$  个虚拟参考信号;  $q_{mn}$  是第  $n$  个原始加速度信号到第  $m$  个输出虚拟参考信号的脉冲响应函

数; $x_n$ 是第 $n$ 个加速度信号的时间序列; $*$ 为卷积运算。整个过程可以通过设计的最小相位滤波器实现。

## 2.2 构建结果分析

基于分组构建方法,并结合确定的虚拟参考信号数量,将筛选出的12个原始振动加速度信号按照车轮位置分为4组,即将每个车轮位置处的三向加速度信号构建1个虚拟参考信号,所得结果的频谱如图8所示。为进行对比,本文亦采用原有的虚拟参考信号构建方法<sup>[10]</sup>对筛选出的12个振动加速度直接合成4个参考信号,结果如图9所示。

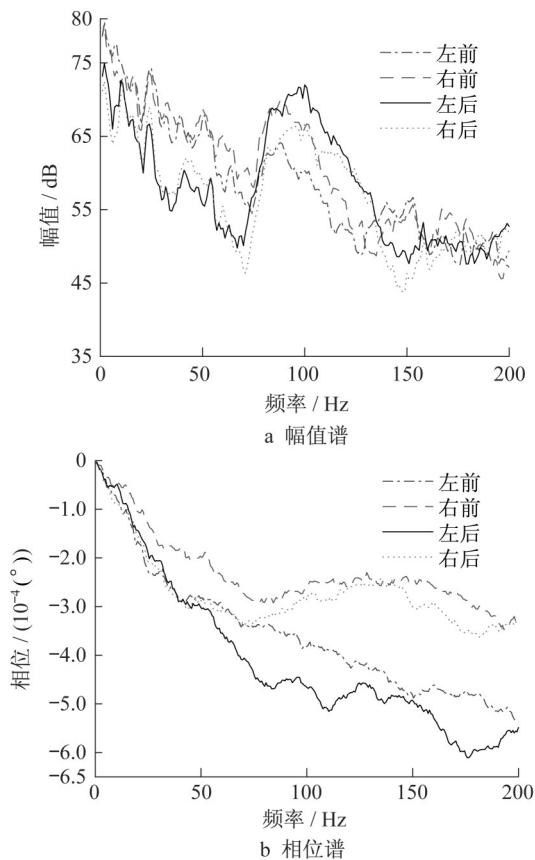


图8 分组构建的虚拟参考信号频谱

Fig. 8 Spectrum of virtual reference signals constructed utilizing grouping

计算不同方法构建的虚拟参考信号与麦克风信号的多重相干函数,并和原始加速度信号与麦克风的多重相干函数对比,以副驾驶位置左耳处为例,如图10所示。可以看出,原有方法构建的虚拟参考信号在轰鸣声频段,多相干函数具有较大的损失,这是由于直接合成方法分解的奇异值差别较小,除前4个奇异值之外的其他奇异值也包含较多振动信息,将其舍去必然会造成振动信息损失。

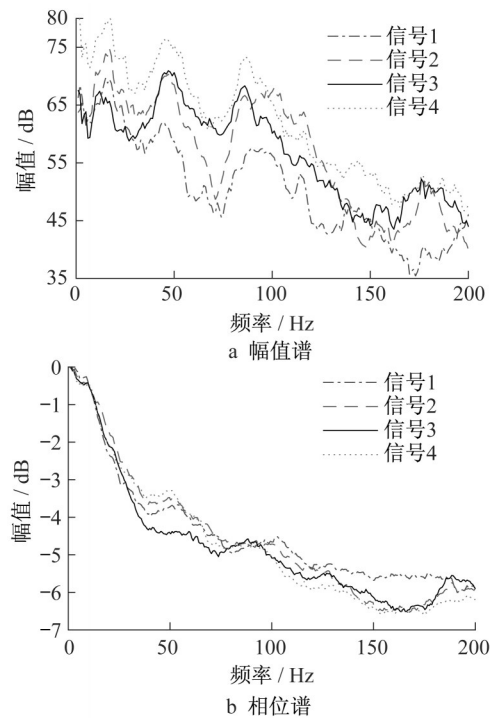


图9 原有方法构建的虚拟参考信号频谱

Fig. 9 Spectrum of virtual reference signals constructed utilizing original method

显然,分组构建的方法可以避免这一问题,根据信号来源位置对原始加速度信号进行分组后,由于同一位置处的加速度信号相关性较高,对每一组参考信号进行奇异值分解,每组提取的一个奇异值可以保留更多的同组的原始加速度信号信息。结果表明,分组构建的虚拟参考信号在轰鸣声频段的相干函数可以达到0.9左右,相干性得到明显提高。

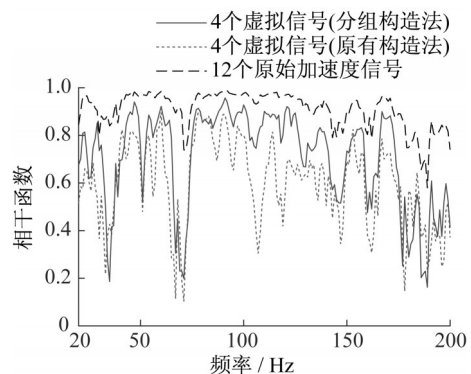


图10 原始信号和虚拟信号与麦克风信号的多相干函数对比(副驾驶左耳处)

Fig. 10 Multiple coherence between front right microphone (left) and 12 original acceleration signals and 4 virtual reference signals from different methods



### 3 效果验证与分析

为评估所构建的虚拟参考信号在降低计算复杂度以及提高降噪效果方面的效果,本文搭建了道路噪声有源控制模型。分别以12个原始加速度信号、原有方法构建的虚拟参考信号、分组构建的虚拟参考信号作为输入,对比不同输入在计算复杂度、仿真时间、降噪效果方面的表现,对所提出的构建方法的有效性进行验证。

#### 3.1 控制系统模型搭建

NFXLMS算法是为了克服参考信号滤波最小化均方误差(filter-x least mean square, FXLMS)算法中收敛系数对输入信号的功率依赖性问题而提出的,可以使算法权系数迭代过程中收敛系数随输入信号功率进行自适应调节,具有更好的鲁棒性和工况适应性<sup>[6]</sup>。基于所提出的分组构建法和NFXLMS算法,搭建了道路噪声有源控制模型,如图11所示。假定输入的参考信号数量为 $I$ ,用 $x(n)$ 表示参考信号矢量,用 $M$ 个车内扬声器作为次级源,记次级声信号为 $y(n)$ ,用 $K$ 个麦克风获取误差信号,记误差信号为 $e(n)$ , $\hat{S}(z)$ 表示次级通路的传递函数。

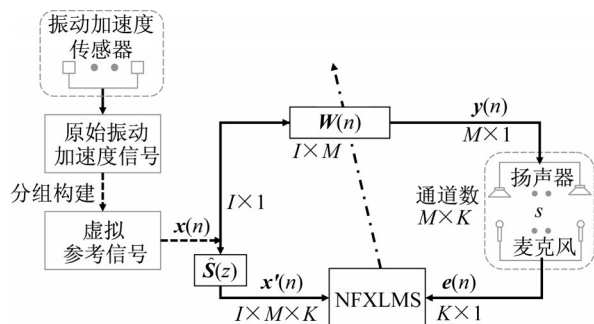


图11 基于NFXLMS算法和分组构建法的道路噪声有源控制系统

Fig. 11 Active road noise control system based on NFXLMS algorithm and reference signals constructed utilizing grouping

对应地由 $I$ 个参考信号生成 $M$ 个次级声输入信号需要 $I \times M$ 个输出滤波器,记为

$$W(n) = \begin{bmatrix} w_{11}(n) & w_{12}(n) & \cdots & w_{1M}(n) \\ w_{21}(n) & w_{22}(n) & \cdots & w_{2M}(n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{I1}(n) & w_{I2}(n) & \cdots & w_{IM}(n) \end{bmatrix} \quad (13)$$

用 $w_{im}(n) = [w_{im,1}(n) w_{im,2}(n) \cdots w_{im,L}(n)]^T$ 表示在第 $n$ 时刻的 $L$ 阶自适应滤波器的权系数矢量,通过NFXLMS算法更新。对应的 $M$ 个次级声输入

信号可以表示为

$$y_m(n) = \sum_{i=1}^I w_{im}^T(n) x_i(n) \quad (14)$$

式中: $x_i(n) = [x_i(n) x_i(n-1) \cdots x_i(n-L)]^T$ 表示第 $i$ 个虚拟参考信号矢量。

#### 3.2 计算复杂度分析

将图12所示的控制系统利用Simulink进行仿真,假定输入原始信号数量为 $I$ ,扬声器数量为 $M$ ,麦克风数量为 $K$ 。为便于结果对比,将原始的12个振动加速度信号和原有方法构建的4个虚拟参考信号也分别作为参考信号输入系统进行仿真,分析不同输入的系统计算复杂度。

整个系统的计算量分为两部分:一是控制器算法本身的计算量,二是构建虚拟参考信号的计算量。对于控制器算法部分,NFXLMS算法的浮点加法计算量为 $MI[(2K+1)(L-1)+L+2]$ ,浮点乘法计算量为 $MI(2KL+K+L+4)$ ,其中 $L$ 为滤波器的阶数<sup>[6]</sup>。对于虚拟参考信号构建部分,主要计算量在于式(12)利用快速傅里叶逆变换求出的脉冲响应函数与原始信号的卷积运算过程,此过程使用MATLAB中的一维滤波函数filter构建的IIR(infinite impulse response)滤波器实现,如图12所示。而图7中基于奇异值分解求解变换矩阵,并利用参数化建模法求出滤波器系数这一步骤通常离线计算,因此可不考虑这部分计算量。

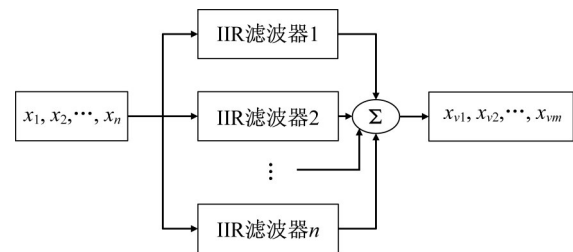


图12 利用IIR滤波器计算虚拟参考信号时间序列

Fig. 12 Calculation of time series of virtual reference signal utilizing IIR filter

假定IIR滤波器有 $(a+b)$ 个系数,对于原有构建法,虚拟参考信号构建过程带来的浮点加法计算量为 $IN(a+b-1)$ ,浮点乘法计算量为 $IN(a+b)$ , $N$ 为虚拟参考的信号的数量。对于分组构建法,将原始信号分为4组,虚拟参考信号构建过程带来的浮点加法计算量为 $I(a+b-1)$ ,浮点乘法计算量为 $I(a+b)$ 。

由此,在上述基于NFXLMS算法的控制系统中,原有构建法的浮点加法计算量为

$$MN[(2K+1)(L-1)+L+2]+IN(a+b-1) \quad (15)$$

浮点乘法计算量为

$$MN(2KL+K+L+4)+IN(a+b) \quad (16)$$

分组构建法的浮点加法计算量为

$$MN[(2K+1)(L-1)+L+2]+I(a+b-1) \quad (17)$$

浮点乘法计算量为

$$MN(2KL+K+L+4)+I(a+b) \quad (18)$$

在本文中,原始加速度信号数目 $I=12$ ,虚拟参考信号数目 $N=4$ ,扬声器数目 $M=1$ ,麦克风数目 $K=1$ ,滤波器阶次 $L=384$ ,IIR滤波器系数数目 $a=1$ , $b=80$ ,各种方法的运算复杂度如表1所示。

表1 不同构建方法计算复杂度对比

Tab. 1 Computation complexity of different signal construction methods

构建方法	仿真时间/s	计算量/次	
		浮点加法	浮点乘法
12个原始加速度信号	19.264	18 420	13 884
原方法构建的4个虚拟信号	9.233	9 980	8 516
分组法构建的4个虚拟信号	6.979	7 100	5 600

从比较耗时的浮点乘法计算量来看,12个原始加速度信号作为参考信号的计算量远高于虚拟参考信号的计算量,且仿真时间较长。相比12个原始加速度信号作为参考信号的方法,虚拟参考信号的方法降低了34%~60%的计算量,其中分组构建的虚拟参考信号比原有方法构建的虚拟参考信号仿真时间降低了24.4%,表明分组构建虚拟参考信号的方法比原有方法对降低系统运算量具有更显著的效果,验证了分组构建的虚拟参考信号对降低系统复杂度的有效性。

### 3.3 降噪效果分析

为进一步验证分组构建的虚拟参考信号在降噪效果方面的表现,将原有方法构建得到的4个虚拟信号、分组构建得到的4个虚拟信号作为仿真模型的输入,进行车内道路噪声有源控制仿真。仿真中以前排右侧乘员右耳位置为目标降噪位置,以原车前排右侧扬声器作为次级声源。仿真数据由前文所述的实车道路试验获得,次级通路传递函数基于前期研究基础由实车离线测试得到<sup>[16]</sup>。

本文定义降噪量为降噪前后声压级的差值,声压级由该频段声压的均方根值计算得到,表示这个频段内的总有效值<sup>[17]</sup>。不同参考信号输入仿真模型

后在副驾驶右耳旁降噪前后声压级对比如图13所示。由图13可以看出,对于车辆在实际道路上行驶时采集到的噪声,原有方法构建的虚拟参考信号降噪效果一般,在75~120 Hz频段内的轰鸣声降噪量仅能达到1.4 dB(A),这正是由于原方法构建的虚拟参考信号相干性低造成的。而分组构建的4个虚拟参考信号可以很好地保留大部分原始信号中的振动信息,在整个轰鸣声频段的降噪量可达4.48 dB(A),且该频段内降噪后的声压级幅值可以保持在较为稳定的状态,表明所提出方法在该频段上具有良好的降噪效果。

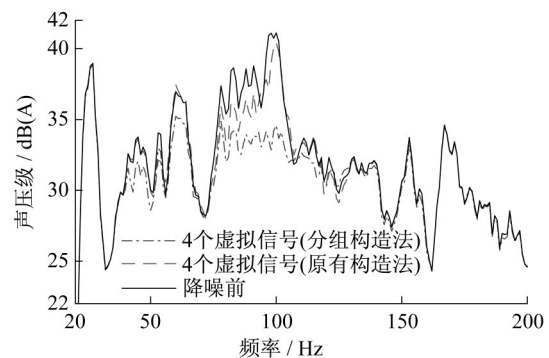


图13 不同构建方法的虚拟参考信号降噪前后对比

Fig. 13 Noise reduction of different virtual signal construction methods

## 4 结论

本文提出了一种用于车内道路噪声有源控制系统的虚拟参考信号分组构建方法,并进行了有效性验证,主要结论如下:

(1)进行了车内道路噪声采集试验和分析,确定副车架与车身后连接点、扭力梁与车身连接点是最重要的道路噪声传递路径,相应位置的振动加速度信号可以作为原始信号构建虚拟参考信号。进一步通过奇异值确定构建的虚拟参考信号数量为4个。

(2)基于理论推导建立了车内道路噪声有源控制系统的虚拟参考信号分组构建方法。通过多重相干分析得出,分组构建的虚拟参考信号与车内目标噪声的相干性比原有方法有明显提高,在轰鸣声频段的相干函数可以达0.9左右。

(3)通过搭建道路噪声有源控制系统模型进行仿真,对分组构建法的计算复杂度和降噪效果进行分析。与原有方法相比,所提出方法的计算复杂度降低约24.4%。且在轰鸣声频段降噪量可达4.48 dB(A),具有良好的降噪效果。



## 作者贡献说明:

张立军:项目监督与管理。

宁友博:论文初稿,试验采集,数据处理与分析。

孟德建:方法提出。

张 帅:方法验证,论文修改。

## 参考文献:

- [1] JHA S K. Identification of road/tyre induced noise transmission paths in a vehicle[J]. International Journal of Vehicle Design, 1984, 5(1/2): 143.
- [2] 庞剑. 汽车车身噪声与振动控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- PENG Jian. Vehicle body noise and vibration control [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [3] SAMARASINGHE P N, ZHANG W, ABHAYAPALA T D. Recent advances in active noise control inside automobile cabins: toward quieter cars [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2016, 33(6):61.
- [4] GÄBEL G, MILLITZER J, ATZRODT H, *et al.* Development and implementation of a multi-channel active control system for the reduction of road induced vehicle interior noise[J].Actuators, 2018, 7(3): 52.
- [5] OH S H, KIM H S, PARK Y. Active control of road booming noise in automotive interiors [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111(1):180.
- [6] 张立军, 张希玉, 孟德建. 基于NFXLMS算法的车内道路噪声主动控制系统[J]. 振动与冲击, 2020, 39(21): 173.
- ZHANG Lijun, ZHANG Xiyu, MENG Dejian. Active control system of vehicle interior road noise based on NFXLMS algorithm [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(21): 173.
- [7] ZAFEIROPOULOS N. Active noise control in a luxury vehicle [D]. Manchester: University of Salford, 2015.
- [8] PARK C G, FULLER C R, CARNEAL J P, *et al.* On-road demonstration of noise control in a passenger automobile: part 2 [C]// INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. New York: Institute of Noise Control Engineering, 2004(9): 184-195.
- [9] SUTTON T J, ELLIOTT S J, MCDONALD A M, *et al.* Active control of road noise inside vehicles [J]. Noise Control Engineering Journal, 1994, 42(4): 137.
- [10] AKIHO M, HASEYAMA M, KITAJIMA H. Virtual reference signals for active noise cancellation system [J]. Journal of the Acoustical Society of Japan (E), 1998, 19(2): 95.
- [11] DEHANDSCHUTTER W, HERBRUGGEN J V, SWEVERS J, *et al.* Real-time enhancement of reference signals for feedforward control of random noise due to multiple uncorrelated sources [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(1):59.
- [12] NYGREN J. Active noise control with virtual reference signals in an fxlms algorithm[D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2018.
- [13] ZAFEIROPOULOS N, BALLATORE M, MOORHOUSE A, *et al.* Active control of structure-borne road noise based on the separation of front and rear structural road noise related dynamics [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2015, 8: 886.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 声学—汽车车内噪声测量方法: GB/T 18697—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Acoustics — measurement of noise inside motor vehicles: GB/T 18697—2002[S]. Beijing: China Standard Press, 2002.
- [15] 仲典, 蒋伟康. 工况传递路径分析用于辨识车内噪声源[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(3):110.
- ZHONG Dian, JIANG Weikang. Identification of vehicle's interior noise sources by using operational transfer path analysis [J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(3):110.
- [16] 张希玉, 张立军, 孟德建. 面向车内噪声控制的次级通路建模与验证[J]. 汽车工程, 2019, 41(10):1204.
- ZHANG Xiyu, ZHANG Lijun, MENG Dejian. Secondary path modeling and validation for vehicle interior noise control [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(10):1204.
- [17] 谭祥军. 从这里学NVH: 噪声、振动、模态分析的入门与进阶 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- TAN Xiangjun. Learn NVH from here: ntroduction and advancement of noise, vibration, and modal analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2018.