

车内路噪主动控制系统参考传感器布放方法*

贺岩松¹, 刘亚琪¹, 夏子恒¹, 张志飞¹, 周桃²

(1. 重庆大学机械与运载工程学院 重庆, 400030) (2. 重庆市埃库特科技责任有限公司 重庆, 400000)

摘要 由于合理布放参考传感器是车内路噪主动控制(road noise cancellation, 简称 RNC)系统的关键, 提出了基于多重相干分析(multiple coherence analysis, 简称 MCA)法的参考传感器布放方法, 结合多通道归一化滤波 x 最小均方(normalized filter-x least mean square, 简称 NFxLMS)算法, 建立基于 MCA 的参考信号选取数学模型, 选取具有最大多重相干系数的布放位置, 采用截断奇异值分解法提高多重相干系数的计算精度, 并使用遗传算法进行多重相干法布放结果寻优。针对某电动汽车进行了车内路噪主动控制的仿真分析和实车道路试验。结果表明, 所提出的参考信号布放方法有利于提升车内路噪主动控制系统的降噪效果。

关键词 路噪主动控制; 参考信号; 多重相干法; 遗传算法

中图分类号 TB535; TH771.5

引言

电动汽车因缺少发动机噪声的掩蔽效应, 使车内路噪问题尤为凸显。车内路噪主动控制作为解决路噪问题的一种新方案, 学者们开展了一系列研究^[1-5]。前馈式路噪主动噪声控制系统需要布置参考传感器, 为控制器提供与车内噪声相干的参考信号^[5]。为避免次级声反馈现象^[6], 参考信号通常选取底盘上的振动加速度信号^[1-5]。参考信号的质量直接影响系统的降噪效果, 选取合适的参考信号布放位置是 RNC 系统开发的关键。

RNC 系统参考信号的选取是为了找到乘客耳旁接收到的路面噪声贡献量较大的一组振动信号。路面噪声贡献量分析方法有传递路径分析(transfer path analysis, 简称 TPA)法^[7-9]和相干分析法^[10-11]。TPA 法包含传统 TPA、运行工况传递路径分析(operational transfer path analysis, 简称 OTPA)、扩展工况传递路径分析及多级 TPA 等。传统 TPA 需要将振动源拆除, 过程繁琐^[8], OTPA 用激励参考信号代替 TPA 中的载荷激励信号, 只考虑激励参考点和响应点之间的传递率特性, 操作较为简便^[9]。相干分析法包括常相干法、偏相干法和多重相干法等。常相干法只适用于不相干源的贡献分析; 偏相干法将输入信号中的相干部分去掉, 再计算剩余信号对输出的影响; 多重相干法将测量信号分成若干相干

性小的组, 计算该组输入的贡献量^[10-11]。目前, 学者大多使用多重相干分析法作为参考信号的选取准则, 通过枚举对比法或穷举法进行不同传感器组合的仿真和试验对比。Jia 等^[5]依次选取具有最大多重相干系数的参考信号集合, 逐个锁定并寻找下一个, 通过仿真确定参考信号的数目, 最终从 36 个参考信号中选出排序靠前的前 10 路信号。Heatwole 等^[12]分析了不同组合参考信号对系统收敛速度的影响, 选取自相关矩阵条件数最大的一组参考信号作为终选结果。Zafeiropoulos^[13]针对某轿车建立了 RNC 仿真和硬件在环系统, 分析了不同位置和方向的加速度传感器组合对降噪效果的影响。Duan 等^[14]通过枚举法罗列了所有符合要求的参考信号组合, 最后选择车内噪声多重相干系数最大的参考信号组合作为终选结果。

以上参考信号选取方法难以获得具有最大多重相干系数的最优解, 且使用穷举法进行选取时, 计算量会随着初选点数量的增加而急剧增大。为了提高开发效率, 有学者提出使用遗传算法^[15]和模拟退火法^[16]等解决主动噪声控制系统次级声源和误差麦克风的优化布局, 但鲜有使用优化算法进行参考传感器优化布局的研究。

笔者提出基于多重相干法的参考传感器布放方法, 利用截断奇异值分解法提高多重相干系数的计算精度, 并使用遗传算法进行多重相干计算结果寻

* 国家自然科学基金资助项目(51275540)

收稿日期: 2021-06-29; 修回日期: 2021-09-25

优。针对某电动汽车进行了车内路噪主动控制的仿真分析和实车道路试验,验证了所提出方法的有效性。

1 车内路噪主动控制算法

图1为典型的 $I \times J \times K$ 多通道车内路噪主动控制系统框图。图1中: $x(n)=[x_1(n), x_2(n), \dots, x_I(n)]^T$ 为由 I 个加速度传感器采集的参考信号; n 表示第 n 时刻; $y(n)=[y_1(n), y_2(n), \dots, y_J(n)]^T$ 为 J 个车内扬声器发出的次级声信号; $d(n)=[d_1(n), d_2(n), \dots, d_K(n)]^T$ 为 K 个误差传感器处的噪声期望信号; $e(n)=[e_1(n), e_2(n), \dots, e_K(n)]^T$ 为 K 个误差麦克风信号; $G(z)$ 为 $J \times K$ 个次级通道的传递函数,次级通道 $G(z)$ 可用长度为 M 的有限冲激响应(finite impulse response,简称FIR)滤波器表示; z 为 Z 变换后的复频域变量; $\hat{G}(z)$ 为对应的次级通道的估计; $P(z)$ 为初级通道,实际中不需要采集; $x'(n)$ 为 $x(n)$ 经过 $\hat{G}(z)$ 滤波后的信号; $y'(n)$ 为 $y(n)$ 经过真实的次级通道 $G(z)$ 滤波后,控制器接收到的真实次级声信号; $W(z)$ 为 $I \times J$ 个FIR滤波器信号。

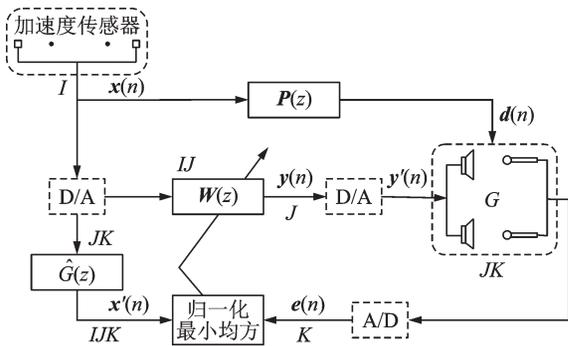


图1 车内路噪主动控制系统框图

Fig.1 Multi-channel active road noise control system

假设滤波器长度为 L ,对于第 n 时刻第 l 阶的滤波器参数

$$W(n) = \begin{bmatrix} w_i^{(11)}(n) & \cdots & w_i^{(1j)}(n) \\ \vdots & & \vdots \\ w_i^{(i1)}(n) & \cdots & w_i^{(ij)}(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

第 j 个次级声源发出的信号为 I 个参考信号经过 $I \times J$ 个 L 阶滤波器的贡献之和,即

$$y_j(n) = \sum_{i=1}^I \sum_{l=0}^{L-1} w_i^{(ij)}(n) x_i(n-l) \quad (2)$$

第 k 个误差麦克风接收到的残余误差信号为噪声期望信号与 J 个次级扬声器发出的次级声源之

和,即

$$e_k(n) = d_k(n) - y'_k(n) = d_k(n) - \sum_{j=1}^J \sum_{m=0}^{M-1} g_m^{(jk)} y_j(n-m) \quad (3)$$

第 k 个误差信号可表示为

$$e_k(n) = d_k(n) - \sum_{j=1}^J \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{i=1}^I \sum_{l=0}^{L-1} g_m^{(jk)} w_l^{(ij)}(n) x_i(n-l-m) \quad (4)$$

假设次级通道是时不变的,整理式(4)可得

$$e_k(n) = d_k(n) - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{l=0}^{L-1} w_l^{ij}(n) x'_{ijk}(n-l) \quad (5)$$

其中:滤波参考信号为 $x'_{ijk}(n) = \sum_{m=0}^{M-1} g_m^{jk} x_i(n-m)$ 。

控制目标函数一般取为误差麦克风处声压幅值平方和最小,即目标函数为

$$\xi(n) = \sum_{k=1}^K E[e_k^2(n)] \quad (6)$$

其中: E 表示期望。

在计算滤波器权矢量最优解时,对式(6)直接求解需要进行矩阵的求逆运算,计算量过大。一般利用最小均方(least mean square,简称LMS)算法更新自适应滤波器的系数^[17],第 i 个参考传感器到第 j 个控制器的滤波器权系数迭代公式为

$$w_l^{ij}(n+1) = w_l^{ij}(n) - 2\mu \sum_{k=1}^K e_k(n) x'_{ijk}(n-l) \quad (7)$$

由此得到了标准的多通道滤波x最小均方算法。

NFxLMS算法是为了使步长因子独立于输入功率,使用归一化的收敛系数实现自适应过程中收敛系数与稳态误差之间的均衡,加强RNC系统非稳定声源的鲁棒性。其滤波器系数的迭代公式为

$$w_l^{ij}(n+1) = w_l^{ij}(n) - \frac{2\mu_0}{x^T(n)x(n)} \sum_{k=1}^K e_k(n) x'_{ijk}(n-l) \quad (8)$$

实际NFxLMS算法的功率常用滑动矩形窗法进行估计,具体推导可参见文献[18]。

2 基于多重相干法的参考信号选取

2.1 多重相干法选取理论

多通道主动噪声控制算法可在频域展开。对于 I 个参考信号的傅里叶变换

$$X(\omega) = \sum_{i=1}^I \sum_{n=0}^{L-1} x_i(n) e^{-2\pi j \omega n / L} \quad (9)$$

其中: ω 为第 ω 个频率点,后续讨论均在同一变换域

内,为了简便,将 (ω) 省略。

类似的形式可在频域表示出误差信号 E_e 、期望噪声信号 D 、参考信号滤波信号 X 以及次级通道和控制权值的滤波器频域形式 G 和 W 。由式(4)推导出对于所有的误差麦克风采集的残余误差信号

$$E_e = D - \sum_{i=1}^I \sum_{j=0}^J \sum_{k=0}^K G_{jk} W_{ij} X_i \quad (10)$$

类比式(6),在每个频率点上的目标函数

$$\xi = E(E_e^H E_e) = \text{tr}[E(E_e E_e^H)] \quad (11)$$

其中: tr 表示矩阵求迹运算;上标“H”表示共轭转置。

联立式(10),(11)可得

$$\xi = \text{tr}[E(GWXX^H W^H G^H + GWXD^H + DX^H W^H G^H + DD^H)] \quad (12)$$

参考信号的互功率谱矩阵为 $I \times I$ 维矩阵,即 $S_{xx} = E[XX^H]$;参考信号与噪声期望信号的互功率谱矩阵为 $I \times J$ 维矩阵,即 $S_{xd} = E[DX^H]$;噪声期望信号的互功率谱矩阵为 $J \times J$ 维矩阵,即 $S_{dd} = E[DD^H]$ 。据此,式(12)可写为

$$\xi = \text{tr}(GWS_{xx}W^H G^H + GWS_{xd}^H + S_{xd}W^H G^H + S_{dd}) \quad (13)$$

为了得到每个频率点处滤波器的最优权值系数,对式(13)中 W 的实部 W_R 和虚部 W_I 求导可得

$$\frac{\partial \xi}{\partial W_R} + j \frac{\partial \xi}{\partial W_I} = 2(G^H G W S_{xx} + G^H S_{xd}) \quad (14)$$

假设 $G^H G$ 和 S_{xx} 为正定阵,则式(14)为0时得到滤波器的最小值,最优权系数为

$$W_{\text{opt}} = -[G^H G]^{-1} G^H S_{xd} S_{xx}^{-1} \quad (15)$$

将式(15)的结果代入式(13),利用 $\text{tr}(AB) = \text{tr}(BA) = \text{tr}(AB)^T$,得到目标函数的最小解为

$$\xi_{\min} = \text{tr}[S_{dd} - S_{xd} S_{xx}^{-1} S_{xd}^H G(G^H G)^{-1} G^H] \quad (16)$$

当误差传感器和次级声源的数目相同时($J=K$), G 为方阵且 $G(G^H G)^{-1} G^H$ 为单位阵;当 $J=K=1$ 且多个参考信号($I>1$)的情况下, G 为标量且 $G(G^H G)^{-1} G^H$ 等于1。 S_{dd} 和 $S_{xd} S_{xx}^{-1} S_{xd}^H$ 也为标量,因此可省略式(16)的求迹运算,得到最优目标函数^[17]为

$$\frac{\xi_{\min}}{\xi_p} = 1 - \frac{S_{xd} S_{xx}^{-1} S_{xd}^H}{S_{dd}} = 1 - \gamma_{xd}^2 \quad (17)$$

其中: $\xi_p = S_{dd}$ 为控制前的目标函数; γ_{xd}^2 为 I 个参考信号和单个噪声期望信号之间的多重相干系数。

可以看出,系统的最优控制与参考信号和噪声期望信号的多重相干系数有关。 γ_{xd}^2 的值在0~1之间,当多重相干系数为0.9时,表示输出信号中有

10%与输入信号不相干。系统在单个频率点能达到的最大降噪量为

$$\text{NR} = -10 \log(1 - \gamma_{xd}^2) \quad (18)$$

可以看出,当相干性为0.9时,系统能达到的最大降噪量为10 dB。

实际计算底盘振动信号与车内耳旁噪声信号的多重相干系数时,底盘上各个部件存在耦合,输入信号存在相关性,需要将式(17)中矩阵逆的形式写为广义逆的形式,即

$$\gamma_{xd}^2 = \frac{S_{xd} S_{xx}^+ S_{xd}^H}{S_{dd}} \quad (19)$$

其中:上标符号“+”表示求广义逆。

若输入信号之间相关性非常大,会带来矩阵求逆的病态问题,需要对矩阵进行截断奇异值分解,将输入信号互谱矩阵进行特征值分解,即

$$S_{xx} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^H \quad (20)$$

其中: \mathbf{U} 为酉矩阵; $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_I]$ 为 $I \times I$ 维对角矩阵,其元素为矩阵 S_{xx} 的特征值,且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_I$ 。

λ_1/λ_I 为矩阵的条件数,条件数越大,矩阵病态问题越严重。设置合适的奇异值截断阈值 T ,当 $\lambda_1/\lambda_i > T$ 时,将特征值 λ_i 及其之后的奇异值置0,得到新的特征值对角矩阵和经过截断奇异值分解后的矩阵分别为

$$\mathbf{\Lambda}_v = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_B, 0, 0, \dots, 0] \quad (B < I) \quad (21)$$

$$S_{x_v x_v} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda}_v \mathbf{U}^H \quad (22)$$

经过截断奇异值分解后 S_{xx} 的广义逆矩阵为

$$S_{x_v x_v}^+ = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda}_v^+ \mathbf{U}^H \quad (23)$$

其中: $\mathbf{\Lambda}_v^+ = \text{diag}[\frac{1}{\lambda_1}, \frac{1}{\lambda_2}, \dots, \frac{1}{\lambda_B}, 0, 0, \dots, 0]$ 。

经此处理,由测量误差造成的较小奇异值被0代替,从而避免误差被过度放大。最后,将新的输入信号互谱广义逆矩阵 $S_{x_v x_v}^+$ 代入式(19)计算多重相干函数值。

由于多重相干系数的计算结果在某一频率范围内比较时难以量化,故使用多重相干的参考功率级来定义。在计算相干系数时,将原始的多重相干系数乘以原始噪声信号的互功率谱,得到考虑原车噪声的相干系数参考功率级(coherent power level,简称CPL)为

$$\text{CPL} = 20 \log \frac{\int_0^{f_N} (\gamma_{xd}^2 S_{dd}) df}{20 \times 10^{-6} f_N} \quad (24)$$

其中: f_N 为频率点。

2.2 结合遗传算法的优化布放

若车辆的底盘结构比较复杂,需要设置较多的初选点,计算的多重相干组合数目也会激增,因此需要引入更高效的搜索方法。笔者使用遗传算法(genetic algorithm,简称GA)进行传感器最优组合的选取。

从 N 个参考信号中选出 I 个参考信号,其规则如下:若选取第 i 个参考信号,则基因码取1;不选则编码为0。取适应度函数为 I 个参考信号计算出的多重相干系数参考功率级最大,数学模型为

$$\begin{aligned} & \max \text{ CPL} \\ & \text{s.t. } \sum_{i=1}^N x_i = I \\ & (x_i = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (25)$$

遗传算法的主要步骤为:①随机生成一个由基因编码组成的初始群体;②对父代群体重复进行步骤1和步骤2操作,直至满足停止准则(即求解群体中所有个体的适应度值;借助复制、杂交和变异算子产生子代个体);③每次迭代中最好的个体作为求解结果,基因解码即为待求问题的解。

应用笔者提出的多重相干系数寻优,得到结合遗传算法与多重相干分析法进行参考信号的选取流程如图2所示。

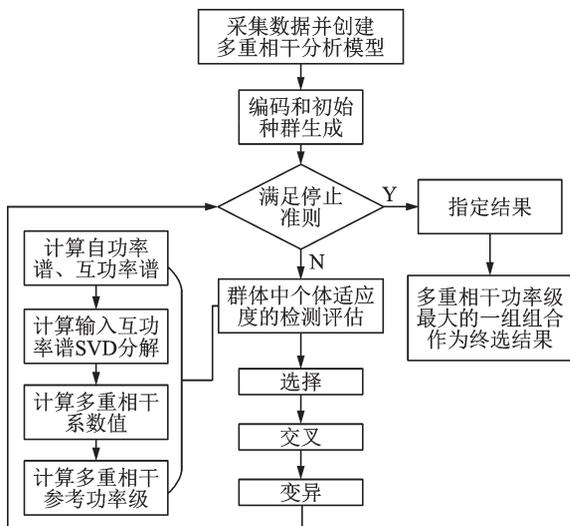


图2 结合遗传算法与多重相干法的参考信号选取流程
Fig.2 Flow chart of reference signal selection combining genetic algorithm and multiple coherence method

2.3 车内噪声多重相干分析

本次试验车为某国产纯电动汽车,试验车在50~70 km/h时的路噪十分突出,在60 km/h时噪声

最大,是主要的问题工况。因此,在60 km/h匀速行驶工况下进行车内路噪多重相干分析,输入信号为底盘悬架各部件的振动信号,布置16个三向加速度传感器,具体的参考传感器布点位置及编号如表1所示。由于电驱系统噪声的绝对能量很低且以高频为主,所以电动车路噪在进行多重相干分析时,没有加入悬置路径。目标输出点为副驾驶右耳处和后左座位右耳处。每个传感器测量3个方向共48个输入信号和2个目标输出信号。计算中选择奇异值的截断阈值为40 dB。

表1 参考传感器路径及编号

Tab.1 Reference sensor path and serial number

| 编号 | 名称 | 编号 | 名称 |
|----|------------|----|----------|
| 1 | 左前轮下摆臂前衬套 | 9 | 左后轮横向控制臂 |
| 2 | 左前轮下摆臂后衬套 | 10 | 左后轮纵臂前衬套 |
| 3 | 左前轮减振器安装衬套 | 11 | 左后轮减振器衬套 |
| 4 | 右前轮下摆臂前衬套 | 12 | 右后轮下摆臂内侧 |
| 5 | 右前轮下摆臂后衬套 | 13 | 右后轮前束调节杆 |
| 6 | 右前轮减振器安装衬套 | 14 | 右后轮横向控制臂 |
| 7 | 左后轮下摆臂内侧衬套 | 15 | 右后轮纵臂前衬套 |
| 8 | 左后轮前束调节杆 | 16 | 右后轮减振器衬套 |

将表1中16个三向加速度传感器的48个通道依次编号为1~48,其中:1~3号依次对应1号点的 x, y, z 3个方向,4~6号依次对应2号点的 x, y, z 3个方向,依次类推。由于本次RNC硬件的参考信号通道数为8,故设置遗传算法中参考信号的个数为8。

GA计算参数为:父代种群规模为50,交叉率为0.85,变异概率为0.1,交叉算子选择多点交叉,个体选择使用锦标赛法。此外,笔者使用粒子群优化(particle swarm optimization,简称PSO)算法与GA进行对比,PSO算法种群数目设置与GA相同。经过500次迭代,得到遗传算法适应度函数变化如图3所示。从图3可以看出,PSO算法较早地陷入了局部最优解,GA得到的目标解优于PSO算法。GA约在第350步迭代时已经趋于收敛,对应的适应度

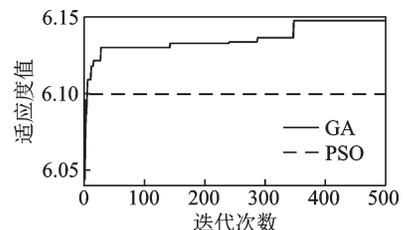


图3 遗传算法适应度函数变化
Fig.3 Variation of fitness function with GA iterations

函数计算了约 17 500 次,只需搜索总组合数目的约 0.004% 即可,极大地减少了使用多重相干法选择参考传感器的开发周期。迭代完成后,输出的编号对应的传感器通道为左前轮下摆臂后衬套 xz 、右前轮下摆臂后衬套 yz 、左后纵臂 x 、左后轮横向控制臂 z 、右后轮横向控制臂 xy 。由此得到了使用多重相干分析法的传感器选取结果。

图 4 为多重相干法分析结果。可以看出,前右座位和后左座位处的路噪主要峰值为 112, 182, 212 和 230 Hz, 分别对应图中 f_1, f_2, f_3 和 f_4 。选取的 8 个通道计算出的多重相干系数在 $f_1 \sim f_4$ 频点处的多重相干系数都大于 0.9。由式(18)可知,该组合方式实现的理想最大降噪量大于 10 dB, 满足系统相干性的要求。

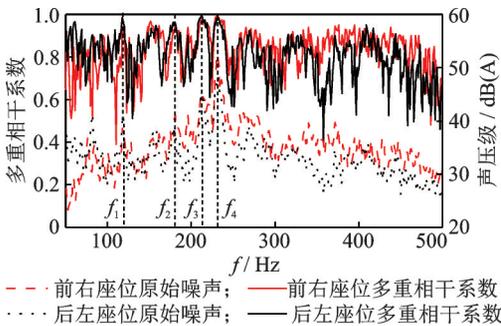


图 4 多重相干法分析结果

Fig.4 Results of multiple coherence analysis method

3 车内路噪主动控制仿真

为验证多重相干法选取的参考信号的有效性,在 Matlab/Simulink 中建立多通道路噪主动控制模型。该模型有 8 个参考信号、4 个扬声器信号和 4 个误差麦克风信号,采用实车匀速工况下行驶的数据进行离线仿真。

3.1 仿真数据采集

为了使仿真更贴合实际情况,采用实车测得的次级通道估计。次级声源及误差麦克风布置如图 5 所示,在前右座位和后左座位的左右耳位置各布置 1 个 MPA 416 型麦克风。通过控制每个次级声源依次发出 50~500 Hz 的线性扫频信号,误差麦克风同时进行采集,并利用 LMS 算法离线计算得到次级通道估计值。

图 6 为扬声器到误差麦克风的滤波器系数。每个次级通道使用长度为 128 的 FIR 滤波器进行估计。

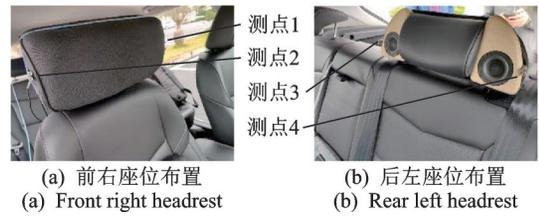


图 5 次级声源与误差麦克风布置

Fig.5 Arrangement of loudspeakers and error sensors

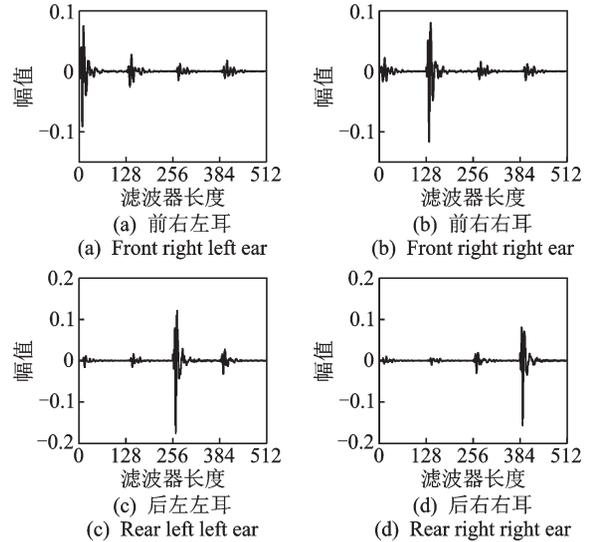


图 6 扬声器到误差麦克风的滤波器系数

Fig.6 Filter coefficients for loudspeakers to error microphones

由多重相干法得到的加速度计安装位置及测试方向如图 7 所示,共 5 个 PCB356A32 型加速度计,采集 8 路振动信号作为系统参考信号。



图 7 加速度计安装位置及测试方向

Fig.7 Installation position and test direction of accelerometers

采集实车以 50, 60, 70 km/h 匀速行驶时的仿真数据,共采集图 5 中 4 个测点的车内原始噪声信号及图 7 中 8 路振动信号。将仿真数据和辨识得到的次级通道导入 Simulink 模型中,设采样频率为 2 kHz;

NFxLMS算法的固定收敛因子 $\mu_0=0.06$;采样时长为40 s,前30 s为系统收敛时间,统计最后10 s的残余误差信号并与原始噪声进行对比。

3.2 仿真结果分析

试验原始方案将加速度计布置在车轮的4个转向节附近,使用多重相干法优化布放与原始布放方案的仿真结果对比如表2所示。由表2可知:①前排降噪效果好于后排,前右座位右耳降噪效果最好;②各车速降噪量不同,车速为60 km/h时降噪量最大;③使用多重相干法优化方案的降噪效果优于原始方案。

表2 仿真结果对比(50~500 Hz)

Tab.2 Comparison of simulation results (50~500 Hz)

| 车速/ (km·h ⁻¹) | 方案 | 降噪量/dB(A) | | | |
|------------------------------|------|-----------|-----|-----|-----|
| | | 测点1 | 测点2 | 测点3 | 测点4 |
| 50 | 原始 | 3.8 | 4.4 | 1.9 | 2.2 |
| | 多重相干 | 5.5 | 6.2 | 4.1 | 4.2 |
| 60 | 原始 | 4.2 | 4.9 | 2.4 | 2.8 |
| | 多重相干 | 6.1 | 7.4 | 4.2 | 4.9 |
| 70 | 原始 | 3.3 | 3.7 | 1.9 | 2.0 |
| | 多重相干 | 4.9 | 5.1 | 4.0 | 4.0 |

车速为60 km/h时4个位置处的仿真结果如图8所示。可以看到:①优化后方案车辆在230 Hz附近的空腔声得到了极大的衰减,位于后左座位右耳的空腔声下降了21.2 dB(A),其余位置的空腔声也下降了12.7~18.7 dB(A);②原始布置方案在后左座位300 Hz以上频带范围没有得到有效控制,优化后方案有效地控制了这部分噪声;③由于本次仿真引入了真实的次级通道估值,但试验中使用的头枕扬声器在80 Hz以下频响不足,因此80 Hz以下频带噪声未得到控制。

4 车内路噪主动控制试验验证

4.1 路噪主动控制实车试验

为了进一步验证仿真分析结论的有效性,在某电动车上进行车内路噪主动控制系统实车道路测试。误差麦克风、次级声源及加速度计的布置与仿真一致,在误差麦克风附近另布置一个监测麦克风,用以采集降噪效果。控制器为ADI公司的ADSP-21489,将数字功放和信号调理功能与DSP芯片集成在一块开发板上。数据采集设备为NI DAQmx,其余还包括供电电源、线束等。试验车辆及数字信

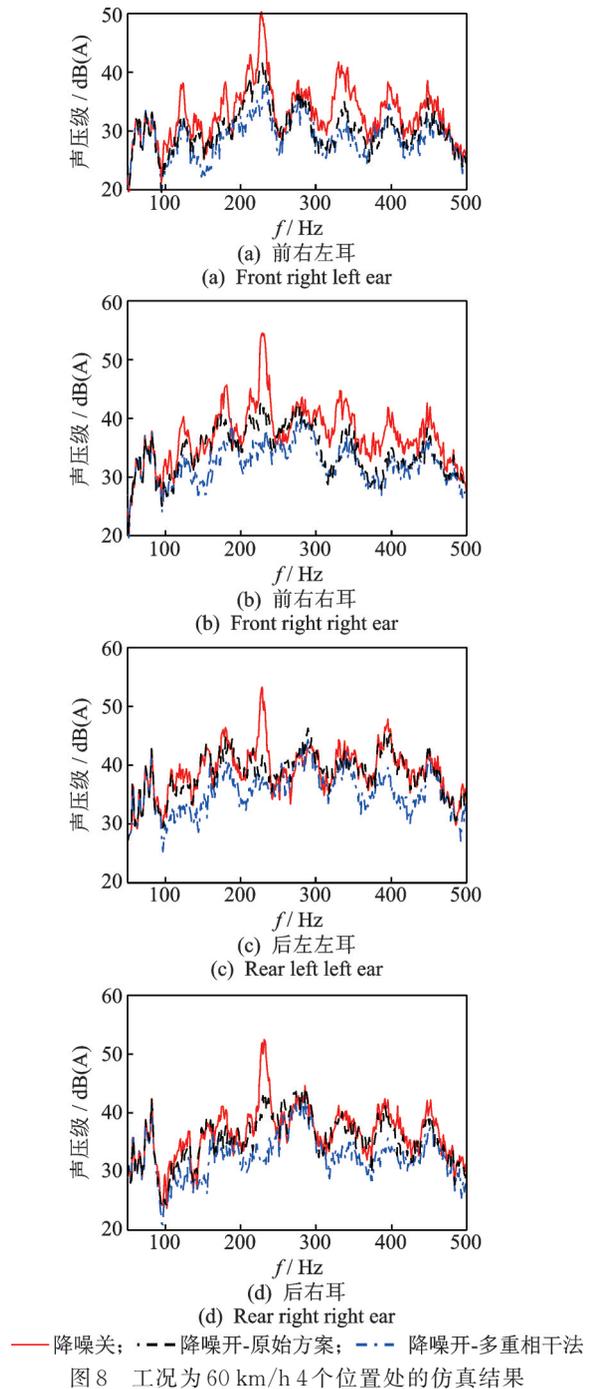


图8 工况为60 km/h 4个位置处的仿真结果

Fig.8 Simulation results of noise reduction at 60km/h

号处理器(digital signal process,简称DSP)如图9所示。



(a) 试验车辆 (a) Test vehicle (b) DSP控制器 (b) DSP controller

图9 试验车辆及DSP控制器

Fig.9 Test vehicle and DSP controller

4.2 试验结果分析

试验系统所用的采样频率为2 kHz,滤波器长度为128。实车道路试验在干燥沥青路面上进行,测试工况为60 km/h匀速行驶。试验开始时打开RNC系统,等待系统收敛后开始数据采集,并在采集的第5 s关闭RNC系统,数据采集时长为10 s。对比RNC系统开启5 s和关闭后5 s相应的噪声信号。

道路测试结果如表3所示。与仿真结果类似,多重相干法的降噪效果优于原始方案。60 km/h降噪效果最好,此时左右耳在50~500 Hz频带内的总声压级分别下降了4.9 dB(A)和5.1 dB(A),后左座位的降噪效果略差,左右耳在50~500 Hz总声压级分别下降了3.4 dB(A)和3.7 dB(A)。

表3 道路测试结果(50~500 Hz)
Tab.3 Road test results(50~500 Hz)

| 车速/ (km·h ⁻¹) | 方案 | 降噪量/dB(A) | | | |
|------------------------------|-------|-----------|-----|-----|-----|
| | | 测点1 | 测点2 | 测点3 | 测点4 |
| 50 | 原始 | 2.8 | 3.7 | 1.7 | 1.8 |
| | 多重相干法 | 4.4 | 5.0 | 3.4 | 3.9 |
| 60 | 原始 | 2.6 | 4.5 | 2.4 | 2.4 |
| | 多重相干法 | 4.6 | 5.7 | 3.2 | 3.6 |
| 70 | 原始 | 2.1 | 2.0 | 1.4 | 2.2 |
| | 多重相干法 | 3.6 | 4.2 | 2.7 | 3.7 |

图10为60 km/h道路测试结果。可以看出,优化前在300 Hz以上的高频部分几乎没有控制效果,这可能是由于原始方案没有有效地采集到这部分频率成分的噪声。多重相干法优化后方案较为全面地覆盖了整个目标降噪频带,预设的112,182,212和230 Hz噪声都得到了有效抑制,原车的空腔声得到了极大衰减,前右座位的最大峰值降噪量达到18.9 dB(A),80 Hz以下的频带没有得到有效控制是受制于本次试验所用的头枕扬声器的频响限制。

综上所述,多重相干法选取的参考信号质量较好,改善了原车RNC系统的降噪效果,验证了笔者所提出的参考信号布放方法的有效性。

5 结论

1) 将多重相干法应用于参考信号选取,使用截断奇异值分解法提高了多重相干系数的计算精度,并采用遗传算法进行多重相干系数计算结果寻优,参考传感器的终选位置为具有最大多重相干系数的

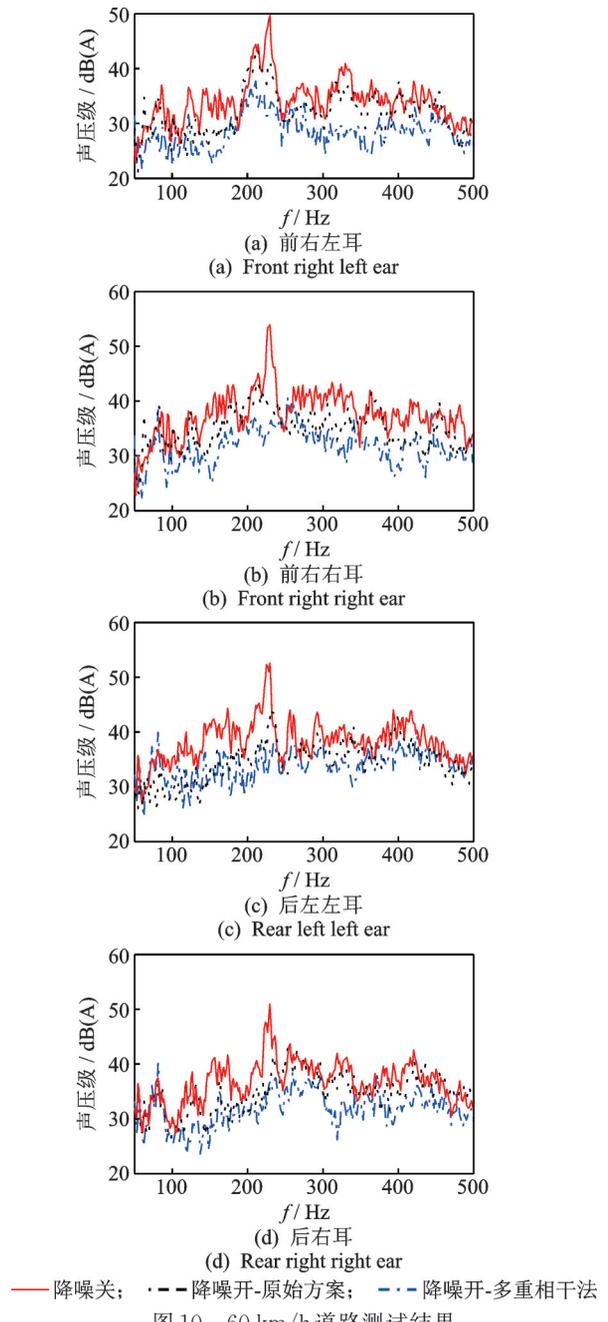


图10 60 km/h道路测试结果

Fig.10 Test results of noise reduction at 60 km/h

一组传感器。

2) 基于多通道NFxLMS算法,建立了车内多通道路噪主动控制Simulink模型,采集实车稳态工况下的数据进行仿真分析,并对比了采用改进前后布放方案的系统降噪效果。仿真结果表明,优化的布放方案在降噪量和降噪频带宽度上都有所提升。

3) 基于DSP硬件平台,建立了某电动车路噪主动控制试验系统,通过实车道路试验,进一步验证了所提出的参考传感器布放方法可以提升RNC系统的降噪效果。

参 考 文 献

- [1] THILAGAM S, KARTHIGA KUMAR P. Implementation of interior noise control system using digital adaptive filter for on-road car applications[J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 104(1): 339-356.
- [2] 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): 173-178.
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): 173-178. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] CHEER J, ELLIOTT S J. Multichannel control systems for the attenuation of interior road noise in vehicles[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015(60/61): 753-769.
- [5] JIA Z, ZHENG X, ZHOU Q, et al. A hybrid active noise control system for the attenuation of road noise inside a vehicle cabin[J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 7190.
- [6] 马进, 邹海山, 邱小军. 存在声反馈的前馈有源噪声控制系统性能分析[J]. *声学学报*, 2016, 41(5): 686-693.
MA Jin, ZOU Haishan, QIU Xiaojun. Performance analysis of feedforward active noise control systems with acoustic feedback[J]. *Acta Acustica*, 2016, 41(5): 686-693. (in Chinese)
- [7] 郭荣, 裘剡, 房怀庆, 等. 频域传递路径分析方法(TPA)的研究进展[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(13): 49-55.
GUO Rong, QIU Shan, FANG Huaiqing, et al. Advance in studying on transfer path analysis methods in frequency domain[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(13): 49-55. (in Chinese)
- [8] 余雄鹰, 闵福江, 文伟, 等. 轮胎/路面噪声的结构传递路径分析[J]. *汽车工程*, 2013, 35(11): 1030-1034.
YU Xiongying, MIN Fujiang, WEN Wei, et al. Structural transfer path analysis of tire/road noise[J]. *Automotive Engineering*, 2013, 35(11): 1030-1034. (in Chinese)
- [9] DE-KLERK D, OSSIPOV A. Operational transfer path analysis: theory, guidelines and tire noise application[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24(7): 1950-1962.
- [10] 杨洋, 褚志刚. 汽车路面噪声多重相干分解方法研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(19): 31-36.
YANG Yang, CHU Zhigang. Multiple coherence decomposition method for road noise of a car[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(19): 31-36. (in Chinese)
- [11] GOMEZ G A, RODRIGUEZ J, SAGARTZAZU X, et al. Multiple coherence method in time domain for the analysis of the transmission paths of noise and vibrations with nonstationary signal[C]//International Conference on Noise and Vibration Engineering 2010 Including International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics 2010. Leuven, Belgium: [s. n.], 2010: 3927-3941.
- [12] HEATWOLE C M, BERNHARD R J. Reference transducer selection for active control of structure-borne road noise in automobile interiors[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 1996, 44(1): 35-43.
- [13] ZAFEIROPOULOS N. Active noise control in a luxury vehicle[D]. Salford: University of Salford, 2015.
- [14] DUAN J, LI M, LIM T C, et al. Combined feedforward-feedback active control of road noise inside a vehicle cabin[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2014, 136(4): 41020.
- [15] 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)
- [16] BAEK K H, ELLIOTT S J. Natural algorithms for choosing source locations in active control systems[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 186(2): 245-267.
- [17] ELLIOTT S J. *Signal processing for active control*[M]. London: Academic Press, 2001: 104-131.
- [18] 陈克安. *有源噪声控制*[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2014: 77-86.



第一作者简介:贺岩松,男,1968年4月生,博士、教授。主要研究方向为汽车振动噪声控制等。曾发表《考虑人体热调节的乘员表面温度分布及车内热环境的数值仿真和试验》(《中国公路学报》2021年第1期)等论文。
E-mail: hys68@cqu.edu.cn