



多重相干分析法结合OTPA技术在汽车路噪主动控制中的应用

郑森, 史晨路, 吕晓, 高坤, 张贤

引用本文:

郑森, 史晨路, 吕晓, 等. 多重相干分析法结合OTPA技术在汽车路噪主动控制中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(11): 49-57.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

基于人-车-路闭环系统的路径跟踪模型预测控制

Model Predictive Control of Path Tracking Based on Human-Vehicle-Road Closed-Loop System

重庆理工大学学报(自然科学). 2020, 34(5): 35-42 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2020.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2020.05.005)

基于滚动时域算法的汽车电动助力转向电流跟踪方法研究

Research on Current Tracking Method of Electric Power Steering Based on Receding Time Domain Algorithm

重庆理工大学学报(自然科学). 2019, 33(11): 24-32 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2019.11.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2019.11.004)

基于汽车风噪的主动噪声控制系统的研究与设计

Design of Active Noise Control System Based on Vehicle Wind Noise

重庆理工大学学报(自然科学). 2019, 33(10): 9-15 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2019.10.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2019.10.002)

基于EMD和提升小波改进阈值函数的水听器信号去噪研究

Denoising of Hydrophone Signal Based on EMD and Lifting Wavelet Improved Threshold Function

重庆理工大学学报(自然科学). 2018, 32(6): 188-192 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2018.06.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2018.06.029)

汽车轮心力振动噪声贡献率计算方法对比研究

Comparative Studies on Methods for Computing Wheel Center Forces' Contribution to Vehicle's Noise and Vibration

重庆理工大学学报(自然科学). 2017, 31(5): 6-13 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2017.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2017.05.002)



多重相干分析法结合 OPA 技术在汽车路噪主动控制中的应用

郑森¹, 史晨路², 吕晓², 高坤², 张贤²

(1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401;

2. 中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司, 天津 300300)

摘要:针对参考信号的选取质量对路面噪声主动控制系统的效果有较大影响这一问题, 提出了一种多重相干分析结合工况传递路径分析(OPA)技术选取参考信号的方法。该方法在不拆除耦合部件的前提下, 利用工况传递路径分析技术对汽车噪声进行分解; 并利用多重相干法优选出与目标噪声强相关的参考信号组合; 最后, 将寻优出的参考信号组合在汽车路噪主动控制(RANC)系统模型中进行验证, 验证结果显示优化方法可筛选出相干性更好的参考信号通道, 进而提升汽车路噪主动控制系统的降噪性能。

关键词: OPA; 多重相干法; 路噪主动控制; 参考信号

中图分类号: U461.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-8425(2021)11-0049-09

Application of Multi-coherence Analysis Method Combined with OPA Technology in Active Control of Automobile Road Noise

ZHENG Sen¹, SHI Chenlu², LYU Xiao², GAO Kun², ZHANG Xian²

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. China Auto Research (Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd.,
Tianjin 300300, China)

Abstract: With the rapid development of the domestic automobile industry and body lightweight, the NVH (noise vibration harshness, NVH) performance of automobiles has become an important indicator for evaluating automobile comfort. In the traditional passive vibration and noise control technology, the control of noise is mainly to analyze and optimize the structure of the vehicle body by adding sound insulation and sound absorption materials. The passive noise control method has a better

收稿日期: 2020-12-28

基金项目: 国家科技部新能源汽车专项子任务(2017YFB0102400)

作者简介: 郑森, 男, 硕士, 主要从事汽车路噪主动控制研究, E-mail: 1599926421@qq.com; 通讯作者 史晨路, 男, 硕士, 工程师, 主要从事汽车路噪主动控制研究, E-mail: shichenlu@catarc.ac.cn.

本文引用格式: 郑森, 史晨路, 吕晓, 等. 多重相干分析法结合 OPA 技术在汽车路噪主动控制中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(11): 49-57.

Citation format: ZHENG Sen, SHI Chenlu, LV Xiao, et al. Application of Multi-coherence Analysis Method Combined with OPA Technology in Active Control of Automobile Road Noise[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(11): 49-57.

control effect on high-frequency noise. However, the effect of low-frequency noise control such as road structure noise is not obvious, and it is not conducive to the lightweight and cost control of the car body. The active noise control technology can effectively control low-frequency noise without destroying the weight of the vehicle body. The above application has become a hot spot in the automotive NVH industry. In particular, the new energy electric vehicle do not have an engine and lose the “masking” of engine noise, which will increase the sensitivity of the car’s noise, and the problem of car road noise will become more prominent. Aiming at the problem that the quality of reference signal selection has a great influence on the noise reduction effect of the active control of road noise system, this paper proposes a method of selecting reference signal by combining the Multi-coherenceAnalysis and the Operational Transfer Path Analysis (OTPA) technology. First, the principle of OTPA technology and Multi-coherenceAnalysis is explained, and then a large number of vibration sensors and microphones are arranged on the body structure of the test vehicle and at different positions in the vehicle to collect vibration and noise data under different operational conditions. The different noise components of the target noise at the controlled position are separated to obtain the road structure noise separated from the target noise at the position to be controlled; Then, based on the Multi-coherence Analysis method and the Multi-coherence Analysis method combined with OTPA technology, the corresponding multi-coherence coefficients between the vibration reference signal and the target noise and the road noise separated from the target noise are calculated respectively, and two sets of reference signal combinations with strong coherence with the target noise are selected; Finally, the optimized two sets of reference signals are combined in the vehicle road noise active control system model for simulation verification. In the frequency range of 20 ~ 400 Hz under 80 km/h operational condition, using the reference signal combination optimized by the Multi-coherence method, the average noise reduction of the system is 2.9 dB(A), and the peak noise reduction at the frequency of 210 Hz is 12 dB(A); using the reference signal combination optimized by the Multi-coherence method combined with OTPA technology, the average noise reduction of the system can reach 3.7 dB(A), and the peak noise reduction at the frequency of 210 Hz is 14.2 dB(A); in the frequency range of 20 ~ 400 Hz under 120 km/h operational condition, using the reference signal combination optimized by the original Multi-coherence method, the average noise reduction of the system is 1.6 dB(A), using the reference signal combination optimized by the Multi-coherence method combined with OTPA technology, the average noise reduction of the system can reach 2.7 dB(A). It is proved that the reference signal combination optimized by using the Multi-coherence method combined with OTPA technology can filter the reference signal combination with better coherence and improve the noise reduction performance of the active control of road noise system.

Key words: OTPA; multi-coherence method; RANC; reference signal

随着国内汽车行业的快速发展,汽车 NVH (noise vibration harshness, NVH) 性能已经成为评价汽车舒适性的重要指标,汽车路噪主动控制 (active control of road noise, RANC) 技术已成为目前汽车 NVH 行业的潮流方向。路面噪声是汽车噪声的主要来源之一,利用工况传递路径分析 (operational transfer path analysis, OTPA) 技术可离线排除干扰信号,分解出汽车路面结构噪声。国内外的诸多研究和应用证明汽车路面噪声是可控

制的,韩国现代汽车的杰恩斯 GV80 已经将路噪主动控制技术应用在实车中,并提出参考信号必须和车内被控噪声信号是强相关的。如何在众多可能的参考点中寻优出最佳组合,是汽车路噪主动控制系统开发流程中的关键步骤。

李传兵等^[1]对传统的传递路径方法进行改进,利用 OTPA 技术分析乘用车的车内噪声,计算了各个独立声源对总噪声的贡献率。杨洋等^[2]采用优化的多重相干法对汽车被控噪声进行分解,

计算出各个独立声源对被控噪声的贡献量。多重相干法主要采取设定阈值的方法对汽车被控噪声信号的自功率谱进行优化,计算出多重相干系数,并依据信号相干性的优劣对参考信号布置点进行分组。刘佳音等^[3]结合 Hankel 矩阵和奇异值分解法对齿轮噪声信号进行降噪处理,主要原理是将噪声信号向量转化成 Hankel 矩阵,并结合不同的奇异值分解法对目标矩阵进行优化处理重新合成信号,可剔除干扰信号,达到最终消噪的目的。据林锋等^[4]提出了一种汽车路噪主动控制的参考信号的选取方法,该方法主要根据被控噪声的峰值处对应的频段计算参考信号与被控噪声的相干性,进而对参考点的位置和数量进行优化。综上所述:目前 OTPA 技术大多数应用在传统的被动降噪分析中,用来确定某结构所产生的特定频段噪声,然后进行结构优化以消除噪声;目前提出的参考信号优化方法选取的频段范围有限,并且被控噪声与参考信号的相干性计算不够准确,汽车 RANC 系统难以达到最佳的降噪效果。

鉴于此,提出一种基于奇异值中值法的 OTPA 技术结合多重相干理论寻优参考信号组合的方法,并将其应用在汽车 RANC 系统中。首先,利用基于奇异值中值法的 OTPA 技术对汽车噪声进行分解并消除干扰信号;其次,利用多重相干理论从车外振动参考信号中寻优出相干性高的参考信号通道组合;最后,建立基于滤波 x 最小均方算法(filtered-x least mean square algorithm, FxLMS)的多通道 RANC 系统模型并进行仿真,验证提出的优化方法在汽车路噪主动控制系统中选取参考信号方面的优越性。

1 工况传递路径分析(OTPA)技术

由于新能源汽车没有发动机噪声的掩蔽,且不断向轻量化、电子化方向发展,路面噪声问题变得更加突出。汽车路面噪声是指汽车在路面上行驶时,路面不平度对轮胎产生多点和多方向的随机振动激励,振动从轮胎传递到轴头,并通过轴头传递到车内悬架、车架等部件而产生的轰鸣声。产生汽车路面噪声的传递机理主要分为结构传递噪声和空气传递噪声。由结构传递的噪声主要分布在 400 Hz 以内,如在频带 30 ~ 50 Hz 中产生的“鼓噪”声,频带 80 ~ 140 Hz 中产生“隆隆”的“路

噪”声,以及 200 Hz 左右的胎噪声。而由空气传递的噪声主要分布在 400 Hz 以上,如有“沙沙”声的轮胎花纹噪声,并且车内噪声的频带范围会随着车速的不同而发生改变^[5-6]。OTPA 技术可有效地对噪声信号进行路径识别和贡献量分析,确定出振动传递的关键路径,可应用在汽车噪声主动控制领域。

1.1 OTPA 技术原理

OTPA 技术是基于传递路径分析(transfer path analysis, TPA)技术衍生出的一种有限振动传递路径的测量方法,是一种线性传递函数的数值计算方法。相较于传统 TPA 技术,OTPA 技术在识别路径和贡献量分析时不需要拆除汽车零部件,可直接利用工况数据计算出不同路径的传递函数^[7-8]。因此该方法可直接应用到汽车噪声的分解中,能够解决结构噪声和空气噪声之前的串扰问题。原理公式如下:

$$p_n = \sum_{i=1}^k H_{ni} \times F_i + \sum_{j=1}^m H_{nj} \times Q_j \quad (1)$$

式中: p 表示车内 m 点的总响应, F_i 和 Q_j 分别表示激励源作用到车内机械系统的激励力和体积速度; H_{ni} 、 H_{nj} 分别表示力载荷和声载荷到目标响应点的传递函数。其中目标噪声响应点处的噪声是由结构声场和空气声场叠加而成,上述公式可简化为:

$$p = a_k + \beta_m \quad (2)$$

式中: a_k 表示力载荷, β_m 表示声载荷,目标总响应 p 为:

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} & \beta_{11} & \cdots & \beta_{1m} \\ a_{21} & \cdots & a_{2k} & \beta_{21} & \cdots & \beta_{2m} \\ a_{31} & \cdots & a_{3k} & \beta_{31} & \cdots & \beta_{3m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nk} & \beta_{n1} & \cdots & \beta_{nm} \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} H_{a1} \\ \vdots \\ H_{ak} \\ H_{\beta 1} \\ \vdots \\ H_{\beta m} \end{pmatrix}$$

则可求得传递函数 H 为:

$$\begin{pmatrix} H_{a1} \\ \vdots \\ H_{ak} \\ H_{\beta 1} \\ \vdots \\ H_{\beta m} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} & \beta_{11} & \cdots & \beta_{1m} \\ a_{21} & \cdots & a_{2k} & \beta_{21} & \cdots & \beta_{2m} \\ a_{31} & \cdots & a_{3k} & \beta_{31} & \cdots & \beta_{3m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nk} & \beta_{n1} & \cdots & \beta_{nm} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix}$$

式中: n 表示测试工况数; k, m 分别表示振动参考点和声音参考点的个数; a_{nk} 表示在第 n 个工况点第 k 个振动参考点的响应值; β_{nm} 表示在第 n 个工况点第 m 个声音参考点的响应值; H_{ak} 表示在第 n 个工况点第 k 个振动参考点到目标噪声响应点的传递函数; $H_{\beta m}$ 表示在第 n 个工况点第 m 个声音参考点到目标噪声响应点的传递函数。

根据上式求出的传递函数 H , 可确定某一特定工况下各路径对目标噪声响应点的贡献量, 但是基于实际情况, 载荷矩阵不一定是可逆方阵, 并且在载荷矩阵中存在信号之间的串扰问题, 所以需对载荷矩阵求伪逆矩阵和奇异值优化处理。

1.2 奇异值分解

OPTA 技术的基本原理是利用逆矩阵法对载荷矩阵进行识别, 在矩阵求逆的过程中, 奇异值分解法 (*singular value decomposition, SVD*) 可将矩阵转换为正交空间, 不同的奇异值和奇异值向量代表了目标矩阵中线性无关的项, 并按贡献量大小进行排序^[9-10]。具体原理如下所示:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T \quad (3)$$

式中: \mathbf{A} 表示 $n \times (k+m)$ 的载荷矩阵, \mathbf{U} 表示 $n \times (k+m)$ 的左奇异矩阵, \mathbf{V} 表示 $(k+m) \times (k+m)$ 的右奇异矩阵, $\mathbf{\Lambda}$ 表示 $(k+m) \times (k+m)$ 的奇异值对角矩阵。试验工况数 n 要大于参考点数 $(k+m)$, 以保证载荷矩阵求逆有唯一解。奇异值矩阵 $\mathbf{\Lambda}$ 可表示为:

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_{k+m} \end{bmatrix}$$

奇异值矩阵 $\mathbf{\Lambda}$ 中, 对角矩阵的元素为从大到小的奇异值, 也代表了主成分分析中贡献量的大小。贡献量较小的值对目标噪声响应点影响较小, 大部分是测量误差或是信号间的串扰所导致的, 所以对部分奇异值进行置零处理, 从而提高载荷矩阵的准确度。结合式(3), 求得载荷矩阵的伪逆矩阵:

$$\mathbf{A}^{-1} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^{-1}\mathbf{U}^T \quad (4)$$

由此求得不同路径的传递函数:

$$\mathbf{H} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^{-1}\mathbf{U}^T\mathbf{F} \quad (5)$$

1.3 奇异值选取方法

根据上述理论, 奇异值的置零处理对载荷矩

阵有很大影响, 如果置零处理的奇异值少, 生成的目标矩阵仍会出现测量误差、串扰等现象; 如果置零处理的奇异值多, 生成的目标矩阵则不会体现主要的噪声特征。所以需要选择合适的奇异值选取方法对奇异值进行置零处理。奇异值的选取方法主要有能量差分谱法、均值法、中值法等。

1.3.1 能量差分谱法

对载荷矩阵进行奇异值分解后, 根据奇异值 σ 按大小顺序排序, 并对其进行能量差分谱计算:

$$\rho(i) = \frac{\sigma_i^2 - \sigma_{i+1}^2}{\sigma_{\max}^2 - \sigma_{\min}^2} \quad (6)$$

式(6)表示相邻 2 个奇异值 σ 对应的能量分布, 如果相邻 2 个奇异值之间能量相差较大, 在奇异值能量频谱图中会出现一段峰值, 则说明第 i 个奇异值之后发生突变, 该点是目标信号与串扰信号的分解点, 因此将第 i 个之后的奇异值全部设定为零, 并合成新的目标矩阵。

1.3.2 均值法

对载荷矩阵分解出的奇异值, 计算所有奇异值的平均值, 并基于平均值对奇异值进行选择。

$$\sigma_i = \begin{cases} \sigma_i & \sigma_i \geq \bar{\sigma} \\ 0 & \sigma_i < \bar{\sigma} \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7), 将小于平均值的奇异值设定为 0, 并合成目标矩阵。

1.3.3 中值法

对载荷矩阵分解出的奇异值, 计算所有奇异值的中值, 并基于中值对奇异值进行选择。

$$\sigma_i = \begin{cases} \sigma_i & \sigma_i \geq \sigma_{\text{median}} \\ 0 & i < \sigma_{\text{median}} \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8), 将小于平均值的奇异值设定为 0, 并合成目标矩阵。

2 多重相干法

多重相干法^[2-4]的原理是将多输入、多输出信号的频域信号分成不同的组合, 计算其相干系数, 并进行数据处理和排序筛选, 基于筛选出的参考点再重新进行信号组合, 直到达到目标效果。在本文中, 输入信号是在汽车轮毂附近处安置加速度传感器采集的振动信号, 输出信号在车内乘客头枕处安置麦克风采集的声音信号。其中, 基

于相干系数 $\gamma_{xd}^2(f)$ 求得目标降噪量,公式如下:

$$\Delta(f) = -10\log[1 - \gamma_{xd}^2(f)] \quad (9)$$

由式(9)可知,单个频点的相干系数 $\gamma_{xd}^2(f)$ 达到 0.9 时,降噪量可达到 10 dB。但是在实际情况中单通道的参考信号与被控噪声很难直接实现强相干,使用多个通道填充整个频带的相干系数在一定程度上可提升控制系统的强相干性,多通道相干性计算公式如下:

$$\gamma_{xd}^2(f) = \frac{|S_{xd}(f)|^2}{S_{dd}(f)S_{xx}(f)} \quad (10)$$

式中: $S_{xd}(f)$ 为目标信号 $d(n)$ 与参考 $x(n)$ 的互功率谱; $S_{dd}(f)$ 和 $S_{xx}(f)$ 分别为目标信号 $d(n)$ 和参考信号 $x(n)$ 的自功率谱。若目标信号 $d(n)$ 与参考信号 $x(n)$ 互不相关,则 $S_{dx}(f) = 0$; 反之,则 $S_{dx}(f) \neq 0$, S_{dx} 可表示每个频率点参考信号 $x(n)$ 与目标信号 $d(n)$ 的相干性。

对所有频点的目标信号和参考信号计算相干系数,得到 $f \times x \times d$ 的三维相干系数矩阵 $\gamma_{xd}^2(f)$:

$$\gamma_{xd}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^f \gamma_{xd}^2(i) \quad (11)$$

根据式(11),将三维相干系数矩阵 $\gamma_{xd}^2(f)$ 转化为 $x \times d$ 的二维相干系数矩阵 γ_{xd}^2 :

$$\gamma_{xd}^2 = \begin{bmatrix} \gamma_{11}^2 & \cdots & \gamma_{1d}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{x1}^2 & \cdots & \gamma_{xd}^2 \end{bmatrix}$$

对二维相干系数矩阵 γ_{xd}^2 的列向量进行均值运算,求得基于参考信号的相干性向量 γ^2 :

$$\gamma^2 = [\gamma_1^2, \gamma_2^2, \cdots, \gamma_x^2]$$

最后,对该向量进行筛选,找到与目标点相干性最大的参考点,并基于该参考点寻求下个位置的参考点,逐步列出参考信号的最优组合。

3 结合 OPTA 技术的多重相干分析法

在选取汽车路噪主动控制系统参考信号的过程中,汽车的结构特性和运行工况会直接影响参考信号的选取。新能源汽车噪声没有发动机噪声的掩蔽,路噪、风噪及其他噪声会更加突出,若直接使用多重相干理论,选取的参考信号不能体现出目标信号特性——多重相干分析法无法在相干分析时区分其中的路面结构和空气噪声成分。为提高路噪主动控制系统中参考信号选取的准确性,因此采用 OTPA 技术对多重相干分析法进行优化调整^[11-12]。

使用 OTPA 技术,可将车内目标位置中的路噪成分进行分解,分解后的残差信号中仅包含路面空气噪声与风噪成分^[13]。利用多重相干理论对分解后的目标噪声在 20 ~ 400 Hz 频段内进行参考信号组合的寻优工作,参考信号组合寻优拓扑流程如图 1 所示。

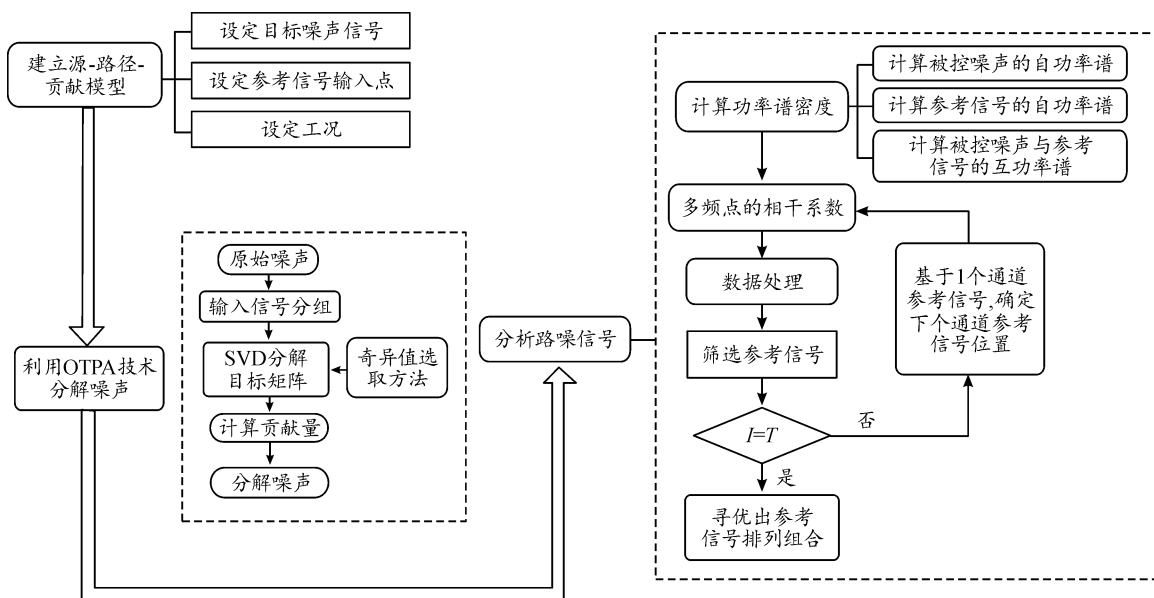


图 1 结合 OTPA 技术的多重相干法寻优参考信号流程框图

为了验证 OTPA 技术结合多重相干法的有效性,需要进行实车数据采集工作,采集的实车数据为某电动 SUV 汽车在城市沥青路面 80、120 km/h 匀速工况下的噪声和振动信号。

如图 2 所示,数据采集设备为 HEADlab(便携式模块化多通道数据采集系统),设定采样时间为 60 s、采样频率为 16 000 Hz、采样点数为 960 000,在后排一座椅头枕处放置 2 个麦克风,在其他 3 个座椅头枕处放置 3 个麦克风,在车内 A、B、C 柱处两侧放置 6 个麦克风,共 11 个声音通道,前 2 个通道用于采集后排乘客头枕处的 2 个被控噪声信号,后 9 个声音通道用于分析车内声场;为更好的体现汽车路噪噪声特性,在车外的汽车轴头附近和悬架上安置 13 个振动加速度传感器测量 3 个方向(X、Y、Z)的振动信号,共 31 个输入通道(其中部分加速度传感器仅使用部分方向的振动信号)。



图 2 数据采集仪器及传感器布置示意图

利用 OTPA 技术对试验数据处理具体过程如下:

1) 计算各个测点的功率谱,建立传递路径计算网络,并建立 $480\ 000 \times 1$ 阶被控噪声信号和 $480\ 000 \times 31$ 阶载荷矩阵。

2) 对上述载荷矩阵进行 SVD 分解。对计算出的 31 个奇异值进行归一化处理,防止出现主成分错误衰减,结合奇异值选取方法对 31 个奇异值进行置零处理;计算输入端和被控噪声的传递

函数。

3) 基于计算出的传递函数分解出 $480\ 000 \times 1$ 阶的路面结构噪声信号,并与原始噪声信号进行对比。

为验证采用不同奇异值选取方法的 OTPA 技术对原始噪声进行处理后的效果,采用信噪比和均方根误差作为评价信号质量的客观指标。

1) 信噪比 SNR

$$SNR = 10 \times \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^n x^2(i)}{\sum_{i=1}^n [x(i) - z(i)]^2} \right] \quad (12)$$

式中: x 和 z 分别表示原始信号和处理后信号的声压, n 表示时域信号长度。

2) 均方根误差 RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x(i) - z(i)]^2} \quad (13)$$

式中: x 、 z 分别表示原始信号和处理后信号的声压, n 表示时域信号的长度。均方根误差 RMSE 表示原始信号与处理后信号之间的误差关系。其中,信噪比 SNR 的值越大,均方根误差 RMSE 的值越小,则处理后的信号越接近原始信号,得到的信号的质量也越好。基于 3 种不同奇异值选取方法的 OTPA 技术对车内噪声信号分解效果如表 1 和图 3 所示。

表 1 不同奇异值选取方法优化效果指标

奇异值选取方法	信噪比	均方根误差
中值法	1.707 0	1.148 5
均值法	1.303 5	1.203 1
差分谱法	0.972 1	1.249 9

由表 1 和图 3 可知,基于 3 种奇异值选取方法的 OTPA 技术对原噪声的分解出的信号,均没有出现失真现象,其中奇异中值法的信噪比最高、均方根误差最小,并且基于奇异值中值法的 OTPA 技术分解的目标信号更好地保留了原噪声信号的主要特征。因此,基于奇异值中值法的 OTPA 技术分解的目标噪声的效果是最好的,选取上述采集的实车数据进行分解,得到的目标信号声压级频谱如图 4 和图 5 所示。

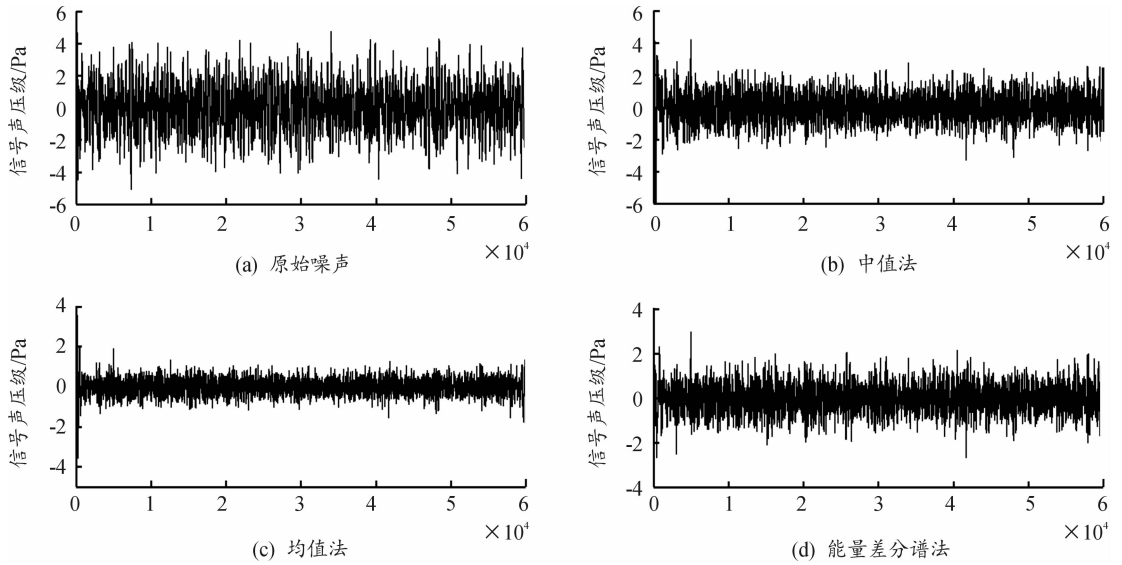


图3 时域图优化效果

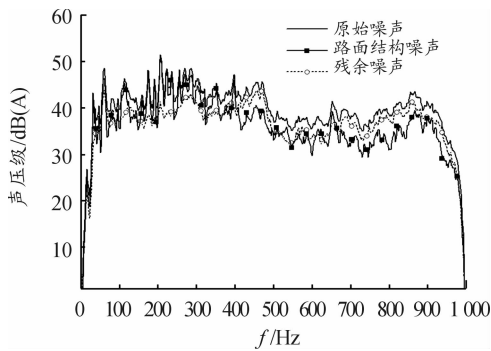


图4 80 km/h 工况下后排一座椅头枕处噪声频谱

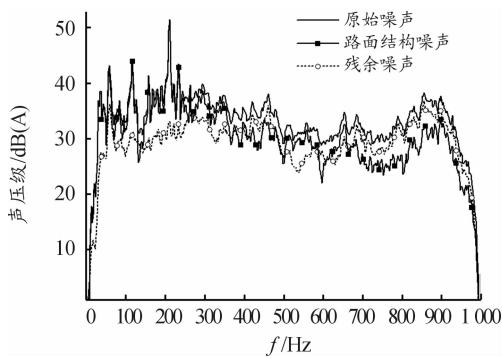


图5 120 km/h 工况下后排一座椅头枕处噪声频谱

由频谱图可得,分解的路面结构噪声与原始噪声在频率 20 ~ 400 Hz 较吻合,而残余噪声与原始噪声在频率 400 ~ 1 000 Hz 较吻合,验证了该方法的正确性,并得出随着车速的提高,噪声的主要

成分逐渐向高频方向偏移。

使用多重相干法对分解出的路面结构噪声进行参考信号组合寻优,对 31 个振动信号与 2 个被控噪声信号进行多重相干性计算,选取出 8 个强相干的参考信号通道。

多重相干法和优化多重相干法在 80 km/h 和 100 km/h 工况下对参考信号通道组合寻优的结果如表 2 和表 3 所示。

表2 80 km/h 工况参考信号相干性寻优组合

方法	通道数							
	1	2	3	4	5	6	7	8
多重相干法	18	31	17	9	19	21	6	26
优化多重相干法	31	13	9	26	7	27	6	12

表3 120 km/h 工况参考信号相干性寻优组合

方法	通道数							
	1	2	3	4	5	6	7	8
多重相干法	18	31	17	13	19	11	1	29
优化多重相干法	31	13	14	11	27	1	3	10

4 仿真分析和实车试验

基于 FxLMS 算法建立 Matlab/simulink 多通道

RANC 模型对车内路噪进行仿真分析,以验证不同方法寻优的参考信号组合对汽车 RANC 系统降噪效果的影响,仿真模型如图 6 所示。

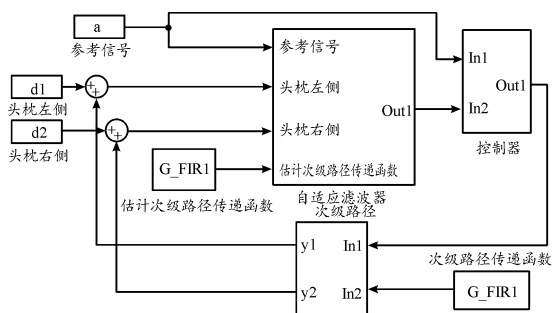


图 6 汽车 RANC 系统仿真模型框图

在仿真过程中,将试验数据通过 Matlab 中的 resample 函数进行离线重采样,采样频率设定为 2 000 Hz,采样点设定为 120 000,设定仿真时间为 60 s,其中,控制滤波器为 128 抽头数的 FIR 滤波器,仿真模型中输入信号为选取的振动参考信号和后排头枕处的被控噪声信号,输出是头枕处扬声器发出的次级信号。

选取 20 ~ 400 Hz 的频带范围计算多通道 RANC 系统的降噪量 ΔdB 以衡量降噪效果,计算公式如下:

$$\Delta dB = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i x^2(i)} - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i z^2(i)} \quad (14)$$

式中: x 和 z 分别表示多通道 RANC 系统降噪前后的声压级; n 表示频带长度。

由图 7、8 可知,在 80 km/h 工况下的 20 ~ 400 Hz 频带范围内,使用原始多重相干法寻优出的参考信号组合,系统的平均降噪量为 2.9 dB(A),在频率为 210 Hz 处的峰值降噪量为 12 dB(A);在使用优化后的多重相干法寻优出的参考信号组合,系统的平均降噪量可达到 3.7 dB(A),在频率为 210 Hz 处的峰值降噪量 14.2 dB(A);在 120 km/h 工况下的 20 ~ 400 Hz 的频带范围内,使用原始多重相干法寻优出的参考信号组合,系统的平均降噪量为 1.6 dB(A),而使用优化后的多重相干法寻优出的参考信号组合,系统的降噪量可达到 2.7 dB(A),降噪效果明显提高。由此验证了使用结合 OTPA 技术的多重相干法寻优出的参考信号组合要比原方法

更加准确,达到了更好的降噪效果。

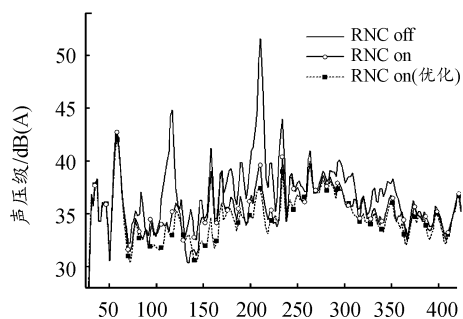


图 7 80 km/h 工况下后排头枕处降噪效果

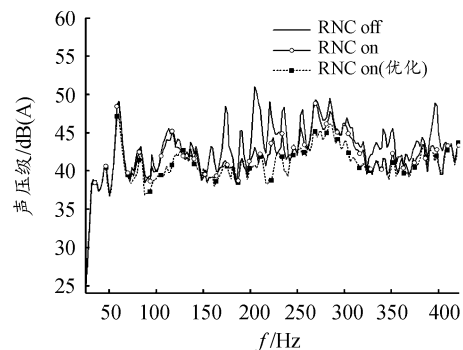


图 8 120 km/h 工况下后排头枕处降噪效果

5 结论

1) 阐述了 OTPA 技术原理和消除干扰信号的方法,创建了源-路径-贡献模型,在计算输入输出信号的功率谱后,采用中值奇异值选取法对载荷矩阵进行置零处理,并求得不同路径的传递函数,分解出路面结构噪声信号和残余噪声信号。

2) 阐述了多重相干的基本原理,在 OTPA 技术对原始噪声信号分解的基础上,计算参考信号与被控噪声信号的多重相干系数,进而寻优出与被控噪声相干性较好的参考信号组合。

3) 结合 OTPA 技术的多重相干法比原多重相干法寻优出的参考信号组合要更加准确,可使路噪主动控制系统的降噪效果更好,平均降噪量约可达 3 dB(A),局部频段可达 8 ~ 15 dB(A),为汽车路噪主动控制的参考信号选取提供了一种可参考的优化方法。

参考文献:

[1] 李传兵,王彬星,李宏成,等. 运行工况传递路径分析

- 识别车内声源[J]. 噪声与振动控制,2013,33(2):77-81.
- [2] 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.
- [3] 刘佳音,于晓光,王琦,等. 基于 Hankel 矩阵与奇异值分解降噪方法的齿轮故障诊断研究[J]. 机床与液压,2018,46(1):158-162,172.
- [4] 据林锋,彭博,范佳亮,等. 一种用于汽车道路噪声主动控制的参考信号选择方法:中国,CN110688956A [P]. 2020-01-14.
- [5] 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.
- [6] NIKOS Z, MARCO B, ANDY M, et al. Active control of structure-borne road noise based on the separation of front and rear structural road noise related dynamics[Z]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2015.
- [7] 肖忠弟,靳畅,魏娜,等. OTPA 结合声场分析在路噪开发中的应用[J]. 噪声与振动控制,2020,40(2):140-145,151.
- [8] 伍先俊,吕亚东,隋富生. 工况传递路径分析法原理及其应用[J]. 噪声与振动控制,2014,34(1):28-31.
- [9] 孟宗,刘子涵,吕蒙. 基于改进奇异值分解滤波和谱峭度的滚动轴承故障诊断[J]. 中国机械工程,2020,31(20):2420-2428.
- [10] 尹立言,向新,张婧怡,等. 基于双路奇异值分解的信号降噪方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2019,20(5):51-57.
- [11] ELLIOTT A S, MOORHOUSE A T, HUNTLEY T, et al. Insitu source path contribution analysis of structure borne road noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(24):6276-6295.
- [12] SOTTEK R, PHILIPPEN B. Separation of airborne and structure-borne tire-road noise based on vehicle interior noise measurements [Z]. SAE International, 2010-01-1430.
- [13] ZHANG J A, MURATA N, MAENO Y, et al. Coherence-based performance analysis on noise reduction in multi-channel active noise control systems[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 148(3):1519-1528.
- (责任编辑 江 磊)
-
- (上接第 26 页)
- [14] 梁忠超,张欢,赵晶,等. 基于自适应 MPC 的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制[J]. 东北大学学报(自然科学版),2020,41(6):835-840.
- [15] 石贞洪,江洪,于文浩,等. 适用于路径跟踪控制的自适应 MPC 算法研究[J]. 计算机工程与应用,2020,56(21):266-271.
- [16] 孙银健. 基于模型预测控制的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制算法研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
- [17] 夏万林. 智能分布式驱动电动车动力学控制方法研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2018.
- [18] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [19] FALCONE P, TUFO M, BORRELLI F, et al. A linear time varying model predictive control approach to the integrated vehicle dynamics control problem in autonomous systems[C]//IEEE Conference on Decision & Control. IEEE, 2007.
- [20] QIN S J, BADGWELL T A. An overview of industrial model predictive control technology [J]. Control Engineering Practice, 1997, 93(7):232-256.
- (责任编辑 林 芳)