汽车智能座舱的主动声音管理系统研究*

朱奕霖[1]　崔怀峰[1]　马景涛[1,2]　谭灿灿[1]　崔淮[1]

（1.宁波工程学院，宁波 315211；2.江苏大学，镇江 212013）

【欢迎引用】朱奕霖，崔怀峰，马景涛，等. 汽车智能座舱的主动声音管理系统研究[J]. 汽车文摘，2026(8): 49-58.

【Cite this paper】ZHU Y L, CUI H F, MA J T, et al. Research on the Active Sound Management System of Automotive Intelligent Cockpit[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(8): 49-58.

【摘要】为了降低电动汽车行驶中的低频噪声，提高驾乘舒适性，设计了一种针对电动汽车智能座舱的主动声音管理系统。以FbLMS算法为基础，将座舱内的噪声以出现时间长短和突发性分为有用噪声和无用噪声，通过车内音响和布置在目标降噪位置的误差传声器，对噪声进行分离和处理。结果表明，通过基于突变因子λ的主动声音管理系统，实现了对有用突变信号的保留，同时抑制了无用噪声，达成了智能座舱声音主动管理的目标。

关键词：智能座舱；主动声音管理系统；FbLMS算法；突变因子λ

中图分类号：TB535　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250071

Research on the Active Sound Management System of Automotive Intelligent Cockpit

Zhu Yilin[1], Cui Huaifeng[1], Ma Jingtao[1,2], Tan Cancan[1], Cui Huai[1]

（1. Ningbo University of Technology, Ningbo 315211; 2. Jiangsu University, Zhenjiang 212013）

【Abstract】To reduce the low-frequency noise generated during the driving of electric vehicles and improve riding comfort, an active sound management system for electric vehicle cabins is designed. It is based on the FbLMS algorithm, which classifies the noise in the cockpit into useful noise and useless noise according to the length of occurrence and burstiness. The two types of noise are separated and processed through the audio of the vehicle and the error microphone arranged in the target noise reduction position. The results show that, by the active sound management system based on the mutation factor λ, the retention of useful mutational signals is achieved while the useless noise is suppressed, thus fulfilling the objective of active sound management in the intelligent cockpit.

Key words: Intelligent cockpit, Active sound management system, FbLMS algorithm, Mutation factor λ

0　引言

在全球能源转型与“双碳”发展战略驱动下，电动汽车凭借低碳环保、高能效的优势快速发展。我国新能源汽车产业政策与可持续发展战略的深度融合，更使电动汽车成为交通领域低碳升级的核心载体[1]。然而，相较于传统燃油汽车以内燃机为驱动的动力构型，纯电动汽车驱动电机运行时较为平稳且无剧烈振动，缺少发动机噪声对车内低频噪声的掩蔽，使座舱低频噪声问题被进一步放大，影响车辆驾乘舒适性。现有电动汽车降噪方案多聚焦于声压级控制，尚未形成智能化的解决方案，需进一步研究降噪技术在产品中应用[2]。

本文创新性地提出智能座舱自适应主动降噪系统架构，将主动声音管理从单一被动降噪升级为噪声智能调控，通过多通道扬声器阵列与智能算法协

*基金项目：国家级大学生创新创业训练计划项目“AI主动降噪开放式车载耳机研究”（202411058008）；国家级大学生创新创业训练计划项目“多智能体系统的复杂封闭空间主动降噪研究”（202311058012）；浙江省高等教育“十四五”教学改革项目“问题导向的多课程综合创新实践教研合一研究”（jg20220596）。

通信作者：崔怀峰（1974—），男，工学博士，副教授，主要研究方向为汽车振动噪声的主被动控制及声品质控制，cuihuaifeng@126.com。

同工作，构建双重噪声处理机制。该架构突破了传统降噪技术的局限性，旨在消除低频路噪、风噪、空调噪声，同时保留语音、娱乐以及反映车辆工况的突变信号。在提升声学舒适度的同时，保留必要的人机交互信息，构建电动汽车智能座舱的主动声音管理系统，旨在提升智能座舱的个性化体验和满足汽车智能安全辅助需求。

1 主动声音管理系统设计

1.1 噪声控制技术

噪声控制技术可分为主动控制和被动控制。被动控制依赖于吸声材料和车身结构优化，对中高频噪声具有较好降噪效果，但对低频噪声的控制效果并不理想，还会增加车身质量和制造成本[3-5]。

主动噪声控制（Active Noise Control，ANC）技术利用电子声学手段，在指定的空间实时产生与该空间噪声声场幅值相等、相位相反的二次声场，使之与原噪声声场叠加，以达到声场抵消、消减噪声的目的[6-8]，具有控制能力强、控制目标灵活、对低频噪声降噪效果明显、布置便捷以及静音区大的优点[7]。

依据是否直接获取参考信号，ANC系统可分为前馈系统和反馈系统。前馈ANC系统在产生次级噪声前，通过参考传声器测量初级噪声并获取参考信号，而反馈ANC系统无需参考信号即可产生次级噪声进行干涉消声[9]。根据初级噪声的声学特征进行分析，将电动汽车座舱内的噪声分为包含有价值信息的噪声（以下简称“有用噪声”）和无价值信息的噪声（以下简称“无用噪声”）。有用噪声主要包括车内对话声、影音娱乐以及车辆在行驶过程中产生的具有瞬态特性的突发性声信号。上述噪声提供了与当前驾驶状况、路面条件以及车辆自身状态有关的重要信息，有助于驾驶员做出准确判断。

1.2 智能座舱系统

汽车智能座舱是指集成多个子系统或功能的汽车驾驶舱，通过传感器、计算机、人工智能等技术，实现车内环境、座椅、娱乐、安全等多重功能的智能化控制[10]。将主动声音管理系统集成到智能座舱的中央控制单元中，与其他子系统进行数据共享和协调，提供更全面的噪声控制。利用音响系统中的扬声器作为噪声抑制的“抗噪声”源，各扬声器协调管理，以平衡噪声管理效果与车内音响质量、改善音响效果，满足沉浸式视听体验[11]。主动声音管理系统通过车载系统对反馈数据进行计算，掌握汽车行驶状态以及各种参数指标，以适配车辆保持最佳状态[13]。主动声音管理系统显著提升了电动汽车智能座舱系统的整体性能，为驾驶员和乘客提供更加安全、舒适和便捷的驾乘体验。

智能座舱主动声管理系统需构建动态决策模型，通过融合工况参数与用户行为数据，实现控制策略的实时自适应调节。例如，在高速驾驶工况下，噪声抑制优先级高于娱乐系统音量；在突发强噪声场景下，可自动触发音响均衡器调节与环境模式协同。此外，系统通过车载总线共享声场特征数据，实现跨域联动控制。在集成阶段，引入多物理场耦合测试，验证声-振-热多场耦合稳定性，确保全工况下系统响应延迟<80 ms，声品质指标提升35%以上，实现噪声、振动与声振粗糙度（Noise Vibration Harshness，NVH）性能与用户体验的双优化。

1.3 主动声音管理系统

在电动汽车智能座舱系统中，主动声音管理系统与信息娱乐系统的协作至关重要，其通过传声器、控制器和扬声器等组件优化声音管理效果，从而提升车辆的综合音频体验和乘坐舒适性。

主动声音管理系统包括噪声采集、分析和处理模块（图1），需与智能座舱系统中的其他模块保持良好的接口和兼容性。系统通过高质量传声器实时监测和采集环境噪声，并结合车速、运行状态等信息对其进行分析和分类。噪声数据共享至信息娱乐系统，以便实时自动调整音量。采用反馈最小均方改进算法（Modified Feedback Least Mean Square，MFbLMS）处理噪声，通过扬声器生成相反相位的声音抵消无用噪声。主动声音管理系统与信息娱乐系统的集成，能够显著增强车载音响系统的功能性，打造卓越的声音体验和舒适的驾乘环境。

1.3.1 传声器

监测传声器布置直接影响声音管理系统的性能表现。车顶中部的主传声器主要负责车内中央区域的车内环境噪声检测，使主动声音管理系统实时调整算法参数和扬声器输出；前座传声器则布置于前排座椅背部或仪表板区域，负责采集前方噪声和驾驶员的语音指令；后座传声器负责后排区域，采集后排乘客的语音和环境噪声，确保后排音效并支持后排乘客的语音交互[11]。

布置监测传声器时，需要确保其能有效捕捉环境噪声和车内语音，确保语音清晰度[13]，同时减少车外噪声对采集效果的影响，并根据车内不同的声音源和

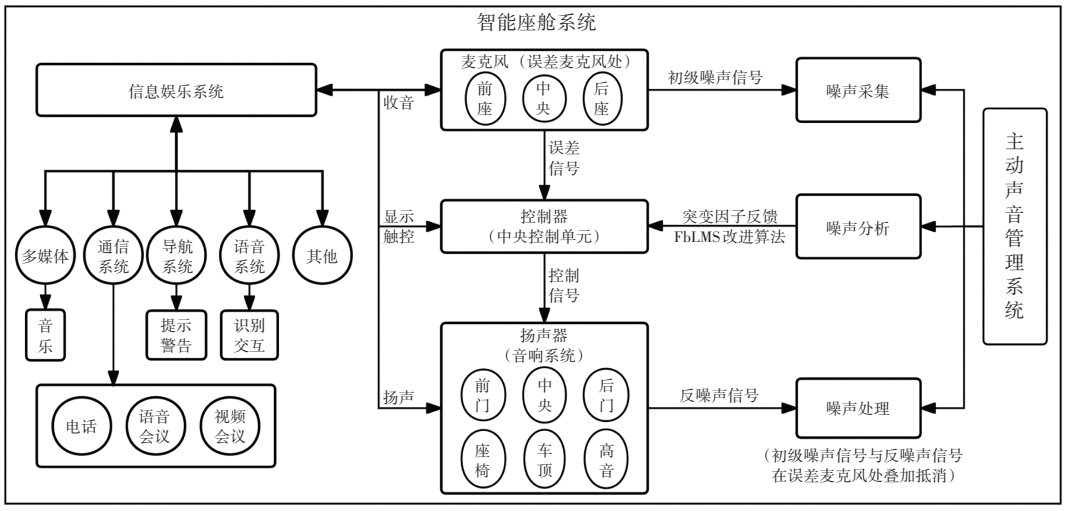


图1　智能座舱系统架构

噪声水平调整监测传声器的灵敏度，确保声音信号的清晰度和准确性。

1.3.2　控制器

中央控制单元负责操控主动声音管理系统和信息娱乐系统的音频输出，具备强大计算能力和实时处理能力的控制器可以确保系统稳定运行。中央控制器需实现主动降噪算法与娱乐系统的深度耦合，构建双模态任务调度机制。通过异构计算架构动态分配处理资源，根据车速、噪声水平等因素动态调整系统设置，以适应不同的驾驶环境和声音需求。

1.3.3　扬声器

主动声音管理系统的扬声器主要处理低频噪声。前门扬声器主要用于中和前方的噪声（如路噪、风噪等）；后门扬声器则针对从车后方进入车内的噪声；座椅下方的扬声器负责增强局部噪声控制，特别是座椅后方的噪声源；车顶区域的扬声器负责处理车顶风噪和其他低频噪声。扬声器系统布局如表1所示。

信息娱乐系统的扬声器需要覆盖全频段，侧重于音质的优化。前门扬声器提供清晰的中高频音效，确保前排乘客享受高质量音频；后门扬声器针对后排乘客的听觉需求，带来沉浸式音效体验；中央扬声器布置在仪表板或前排座椅区域，用于导航提示和电话通话；高音扬声器则布置在车窗边缘或其他适合的位置，以增强高频效果，提供更清晰的音频细节。

在系统布局设计中，需重点优化扬声器的位置，确保主动声音管理系统能够有效覆盖车内所有区域，特别是噪声集中处，并避免与信息娱乐系统处理的频段产生交叠干扰。具体实施时，需要考虑车内空间的声学特性，并根据音质需求合理分布扬声器，以实现最佳的立体声或环绕声效果，确保各座位区获得均衡的声压级分布，为驾乘人员带来沉浸式听觉体验[12]。

表1　扬声器系统布局

		主动声音管理系统	信息娱乐系统
目标		主动抵消低频噪声，提升座舱静谧性	优化音频音质，提供沉浸式听觉体验
频段		以低频为主	全频段覆盖
扬声器	前门	增加环境噪声控制，如中部和前方路噪、风噪	输出清晰中高频音效，保障前排音质体验
	后门	抑制车后方传入的噪声	匹配后排听觉需求，营造环绕音效
	座椅下方	增强座椅后方等局部区域的噪声控制	
	车顶	处理车顶风噪及其他低频噪声	
	中央		布置于仪表板或前排座椅区域，用于导航、通话等语音提示
	高音		布置于车窗边缘，增强高频细节，提升解析力

1.4　系统兼容性

车辆开发阶段需通过多物理场耦合测试验证声学组件布局，构建声源–传声器–扬声器的协同响应模型，确保系统级NVH性能，避免音效冲突。进行噪声管理时需要给予驾驶员或乘客适当的声音提示，明确其工作状态或设置需求。软件更新可优化扬声器控制算法和系统间交互，提高声音处理的精度和效率，使声音更为清晰自然。同时，用户界面应显示主动声音管理系统的状态信息，并允许用户根据需要调整噪声控制设置，从而增强用户的参与感和提高用户满意度。此外，通过用户反馈了解实际使用中的问题和改进点，以进一步调整和优化声音管理系统的设计，达

成声音管理个性化目标，提升整体驾乘体验。

本文主要研究汽车智能座舱系统中基于MFbLMS的主动声音管理系统，系统设计考虑了与信息娱乐系统的兼容性，通过座舱内音响系统和误差传声器的配合，保留突变噪声中的有用信息，同时抑制无用噪声，提升车辆性能和舒适性。

2 基于反馈FbLMS改进算法的主动声音管理

LMS算法由于忽略次级通道的影响[9]，存在收敛速度慢、对噪声和干扰的鲁棒性较差的问题。为此衍生出了多种基于LMS算法的改进算法，其中最典型的是滤波-x最小均方算法（Filtered-x least mean square，FxLMS）和FbLMS反馈算法。

电动汽车采用电机驱动[14]，座舱内噪声源分布散且复杂[7]，不适合引入参考传声器，故采用反馈型主动噪声控制系统（Feedback Active Noise Control System，Feedback ANC）。该系统仅使用一个误差传声器(Errormicrophone)收集目标降噪位置的误差信号作为输入信号。在座舱内安装高质量的监测传声器(Monitoring microphone)，用于实时监测车内噪声。将上述数据与车速、座舱状态等信息整合，主动声音管理系统以此进行噪声分析。同时，该系统结构简单且不存在声反馈问题，具有一定的主动阻尼特性，可以有效抑制暂态信号[9]。

图2为反馈FbLMS改进算法主动噪声控制框图。初级噪声$d(n)$从噪声源N到误差传声器的声传递函数为$P(z)$，模拟控制信号$y(n)$从主动噪声控制器到汽车扬声器的声传递函数为$S(z)$，而汽车扬声器输出的声信号传播到目标降噪位置的信号为实际控制信号$s(n)$，两者叠加产生的误差信号为$e(n)$，$e(n)$数值越小则代表降噪效果越好。其中，$P(z)$称为初级通道传递函数，对应的脉冲响应为$P(n)$，$S(z)$称为次级通道传递函数，对应的脉冲响应为$s(n)$，$\hat{S}(z)$为估计的次级通道。

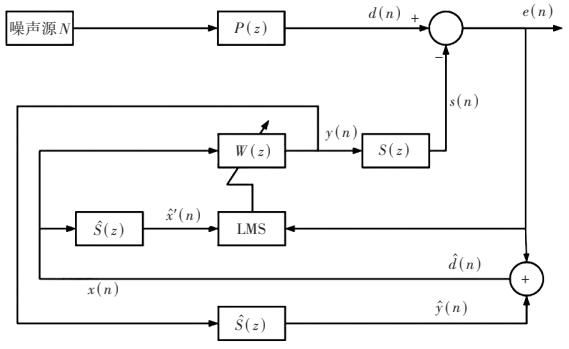


图2 FbLMS算法主动噪声控制框图

假设滤波器$W(z)$长度为L，则滤波器可表示为：

$$\boldsymbol{W}(n)=[w_1(n),w_2(n),\cdots,w_L(n)]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{W}(n)$为第n时刻的滤波器权值向量（列向量）；$w_i(n)$为第i个滤波器权值（标量），i=1,2, ..., L；L为滤波器长度（正整数），决定滤波器的复杂度。

第n时刻的横向滤波器的参考输入信号可表示为：

$$\boldsymbol{X}(n)=[x(n),x(n-1),\cdots,x(n-L+1)]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{X}(n)$为第n时刻的参考输入信号向量（列向量）；$x(n-k)$为参考信号在$n-k$时刻的采样值（标量），k = 0,1,...,L - 1。

将式(1)和式(2)相乘，可以得到模拟控制信号$y(n)$，计算过程可表示为：

$$y(n)=\sum_{i=1}^{L}w_i(n)\,x(n-i+1)=\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W} \tag{3}$$

式中：$y(n)$为模拟控制信号，即滤波器输出信号。

模拟控制信号$y(n)$经过次级通道传递函数$S(z)$后得到实际控制信号$s(n)$，表达式为：

$$s(n)=\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{s}_i(n)\,y(n-i+1)=\boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S} \tag{4}$$

式中：$s(n)$为经过次级通道传递函数$S(z)$后的实际控制信号，$\boldsymbol{S}$为次级通道传递函数的向量表示（在离散时间域中的表示），$\boldsymbol{Y}$为模拟控制信号$y(n)$在n时刻及其前M-1个时刻的采样值构成的列向量。

将实际控制信号$s(n)$和初级噪声信号在误差传声器处叠加，可得到误差信号的表达式：

$$e(n)=d(n)-s(n) \tag{5}$$

式中：$e(n)$为误差信号，表示期望信号$d(n)$与实际控制信号$s(n)$之间的差异。

有限长单位冲激响应FIR滤波器$\boldsymbol{W}(z)$的权值更新可表示为[16]：

$$\boldsymbol{W}(n+1)=\boldsymbol{W}(n)+2\mu e(n)\hat{x}'(n) \tag{6}$$

式中：μ为收敛系数，控制算法的收敛速度；滤波信号$\hat{x}'(n)$为经过估计的次级通道$\hat{s}(z)$的输出信号。FbLMS算法中，因无参考传声器，其参考信号$x(n)$由内部算法合成得来，可表示为：

$$x(n)=\hat{d}(n)=e(n)+\hat{y}(n) \tag{7}$$

$$\hat{y}(n)=y(n)\cdot\hat{s}(n) \tag{8}$$

$$d(n)=e(n)+y(n)\cdot s(n) \tag{9}$$

$$\hat{d}(n)=e(n)+y(n)\cdot\hat{s}(n) \tag{10}$$

式中：$\hat{d}(n)$为估计的期望信号，$\hat{y}(n)$为模拟控制信号$y(n)$经过估计的次级通道$\hat{s}(n)$后的信号。

对于式(9)和式(10)，当$s(n)=\hat{s}(n)$时，$d(n)=$

$\hat{d}(n)$,此时,参考信号$x(n)$可以通过$\hat{d}(n)$来估计。

电动汽车与内燃机汽车区别在于其无内燃机振动和轰鸣,导致座舱内噪声构成不同。电动汽车噪声主要由路噪、风噪和电动机发出的电磁噪声构成[14],绝大部分均集中在400 Hz以下的低频段域内,难以通过传统滤波方法有效分离。

本文提出基于FbLMS算法的改进算法,通过突变因子检测突变噪声,保留有用噪声,降低无用噪声,改进FbLMS算法的控制系统框图如图3所示。由图3可知,该算法相较于传统FbLMS算法,仅在次级通道后增加了一个突变滤波器,即图3中的过滤函数$M(n)$,用于识别并过滤突变信号,其余部分与改进前的FbLMS算法相同,故推导过程不再赘述。

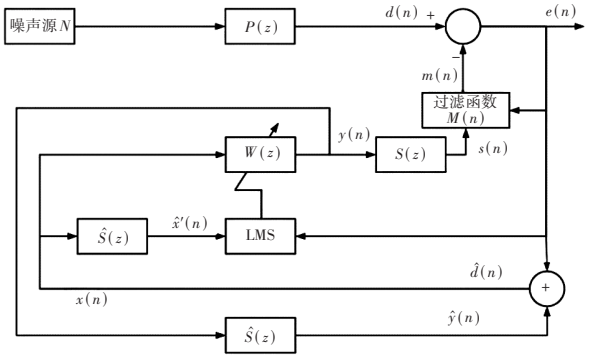


图3　改进的FbLMS算法控制框图

突变滤波器设计需先引入突变因子,其表达式为:

$$\lambda(n)=\exp(e^2(n)/\alpha)-\beta \tag{11}$$

式中:$\lambda(n)$表示第n时刻的突变因子;$e(n)$为误差信号;α、β为常数,依照经验取值。当$\lambda(n)>0$时,表示在第n时刻出现突变噪声;当$\lambda(n)<0$时,则无突变噪声产生。

由式(11)可知,突变因子与误差信号相关,反映其声学特征和状态。若误差信号在突变噪声出现时仍能在一小段时间内收敛,则该时刻突变因子$\lambda(n)$低于设置的阈值。

为方便识别和后续编程,在此引入阶跃函数$\mathrm{sgn}(x)$,使突变因子只能取0或1,可表示为:

$$\eta(n)=\mathrm{sgn}(\lambda(n))=\begin{cases}1, & \lambda(n)\geqslant 0\\ 0, & \lambda(n)<0\end{cases} \tag{12}$$

式中:$\eta(n)$为突变过滤函数的输出标志,用于判断在第n时刻是否检测到突变噪声。

误差信号在突变噪声发生时有可能很微弱,无法达到突变噪声的阈值,则突变噪声发生期间无法准确过滤有用噪声。为此设计了一个突变过滤函数$M(n)$来过滤断点信号,可表示为:

$$M(n)=\max[\eta(n-L+1)\ \eta(n-L)\ \eta(n-L-1)\cdots\eta(n)] \tag{13}$$

式中:$M(n)$为突变过滤函数,$\eta(n-k)$($k=0,1,\cdots,L-1$)为过去时刻(第n-k时刻)的突变过滤函数输出标志。

次级通道函数$S(z)$的输出$y(n)$经过突变过滤函数后得到的控制信号$m(n)$的表达式为:

$$m(n)=\begin{cases}\hat{y}(n), & M(n)=0\\ 0, & M(n)=1\end{cases} \tag{14}$$

由式(14)可知,当突变因子为1,即有用噪声出现时,突变过滤函数会使控制信号$m(n)=0$,从而在目标位置保留初级噪声。反之,当突变因子为0时,该函数不发挥作用,噪声在人耳处被降至最低,以此保留有用噪声,消除无用噪声。

3　数据采集和算法仿真

3.1　数据采集及分析

为确保试验合理性和算法有效性,本文使用专业软件通过实车测试以获取不同工况下实际的电动汽车内的噪声数据。试验路段为一段长约400 m的平缓公路。

3.1.1　试验设备介绍数据采集

试验以LMS Scadas Mobile Frontend作为数据采集前端;以GRAS公司旗下的传声器作为误差传声器,用于检测噪声信号;试验所用车型为上汽通用五菱宏光MINIEV纯电动汽车(具备智能座舱的基本特征,即通过智能化技术提升用户的驾驶和乘车体验),最高速度达80 km/h。试验数据采集及分析软件为LMS Test.Lab Software,笔记本电脑用于保存试验数据,监测数据采集情况。

考虑到驾驶室以及后座差异化需求,设置2个误差传声器:误差传声器1号置于副驾驶,误差传声器2号置于后座中间。数据采集前端及电脑置于右后座,具体布置位置如图4和图5所示。



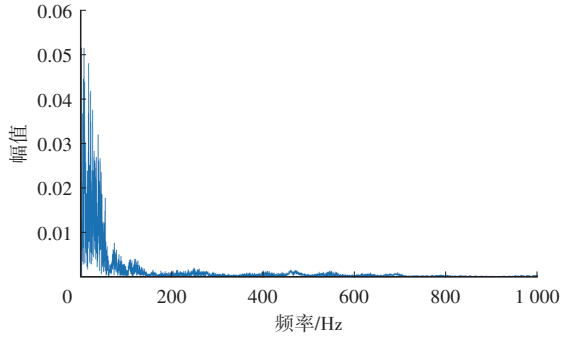
图4　1号误差传声器布放位置



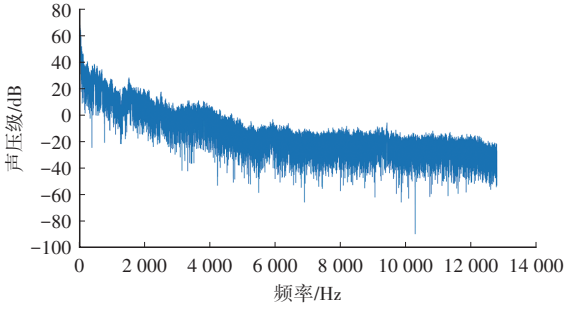
图5　数据采集前端2号误差传声器布放位置

3.1.2　数据分析

汽车低速行驶时，车内噪声主要来自轮胎和路面摩擦产生的噪声，风噪成分较小，但当行驶速度超过80 km/h时，风噪逐渐占主导地位[13]。本文选取3段副驾驶在不同稳态工况下的噪声，用于仿真建模和试验（图6~图8），验证算法合理性和可行性。



(a)包含人声的频谱图



(b)噪声声压级图谱

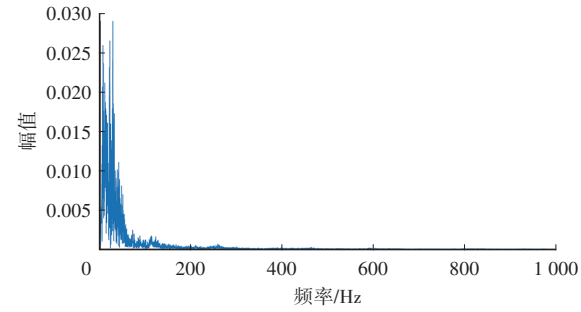
图6　60 km/h稳态工况下车内(包含人声)仿真

由图6可知，试验用电动汽车内的噪声主要集中在400 Hz以下的低频段内，且各类噪声频率叠加，很难通过滤波器进行分离。与内燃机汽车相比，电动汽车内噪声声压级低得多，一般工况下不超过60 dB。

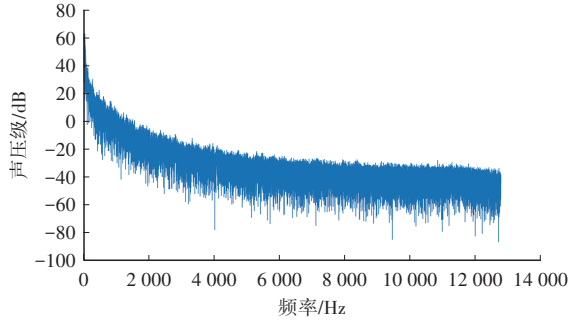
3.2　计算机仿真

3.2.1　次级通道建模仿真

次级通道指从控制源到误差传声器间的物理通路。在主动声音管理系统中，次级声源经电声器件、次级通道传播至误差传声器，过程中发生相位偏移、延时，与控制系统效果密切相关。因此，次级通道的识别决定着主动声音管理系统的控制效果，对于后续主动声音管理系统的构建至关重要。

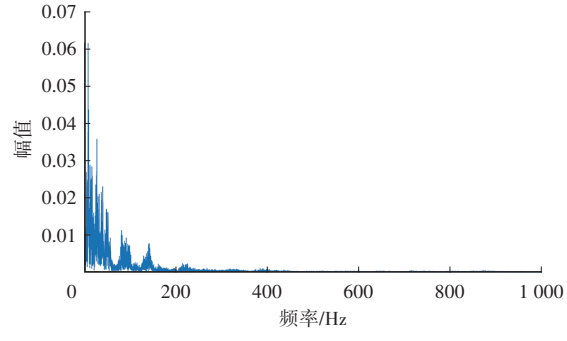


(a)包含压井盖的频谱图

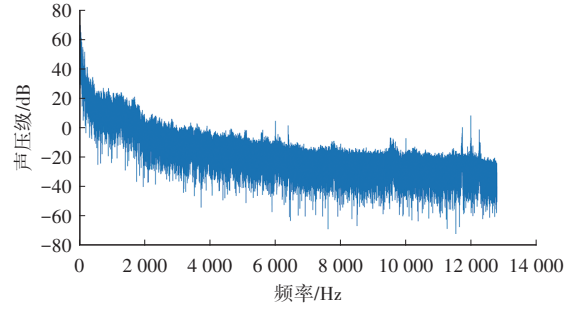


(b)噪声声压级图谱

图7　60 km/h稳态工况下车内(包含压井盖)仿真



(a)包含过减速带噪声的频谱图



(b)噪声声压级图谱

图8　20 km/h稳态工况下车内(包含过减速带)仿真

识别次级通道主要分为离线识别和在线识别[16]。离线识别适用于传递函数不随时间变化的情况，具有计算量小、结构简单、易实现的优点，但易引入噪声干扰系统稳定性[9]。在正常情况下，汽车驾驶舱内的驾驶员姿势相对固定，耳朵的位置变动量也相对较小，

故次级通道建模宜采用离线识别的方法。本文采用MATLAB软件进行仿真建模。次级通道的辨识模型如图9所示。

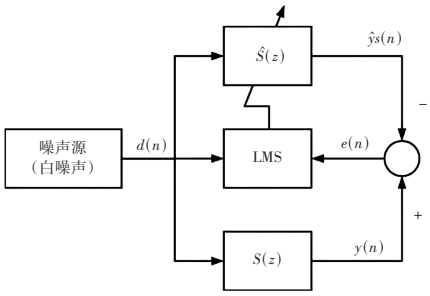


图9　次级通道建模

如图9所示，白噪声设为$d(n)$，长度为M的自适应滤波器产生的控制信号$\hat{y}(n)$可表示为：

$$\hat{y}(n)=\sum_{i=0}^{M=0}s_i(n)d(n-i) \tag{15}$$

式中：$s_i(n)$为第n时刻自适应滤波器的第i个系数。

实际次级通路表示为$y(n)$，则误差信号$e(n)$可表示为：

$$e(n)=y(n)-\hat{y}s(n) \tag{16}$$

式中：$y(n)$为实际次级通路输出信号，$\hat{y}s(n)$为自适应滤波器产生的控制信号。

得到误差信号后，利用误差信号更新自适应滤波器$\hat{S}(z)$的系数，可表示为：

$$s_i(n+1)=s_i(n)+\mu e(n)d(n-1),\quad 其中i=0,1,\cdots,M-1 \tag{17}$$

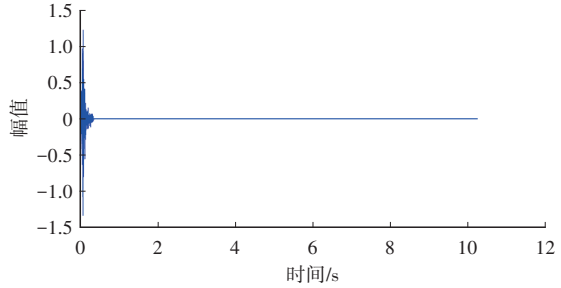
式中：$s_i(n+1)$为第n+1时刻自适应滤波器的第i个系数。

当误差信号稳定收敛且达到预期效果时，所得自适应滤波器$\hat{S}(z)$系数即次级通道的数学模型。

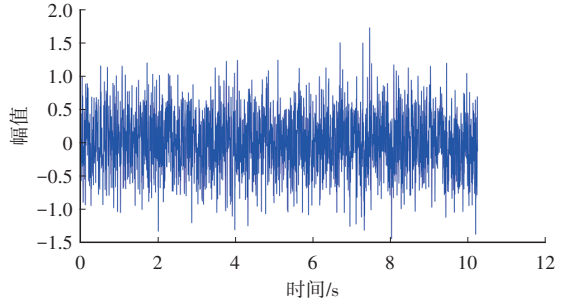
据上述公式和示意图，可在仿真软件中建立次级通道辨识模型。本文使用MATLAB生成白噪声作为初级信号，时长10 s，均值为0，方差为1，采样频率为1 000 Hz，采用LMS算法。滤波器阶数需要根据信号特性确定，高阶滤波器降噪效果好但计算复杂，本文设滤波器阶数为16。收敛因子影响辨识速度和准确性，本文确定$\mu=0.038$时仿真获得的次级通道的准确性和收敛速度最佳。仿真结果如图10所示。

3.2.2　反馈FbLMS改进算法仿真

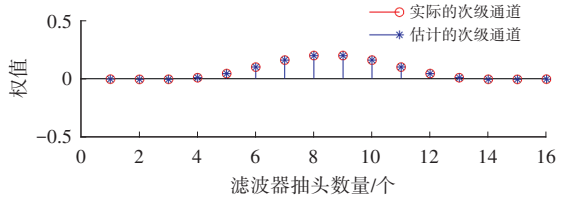
本文旨在抑制电动汽车智能座舱中的无用噪声，保留突变噪声、人声等包含有用价值的噪声。在获取次级通道模型后，基于不同工况下的副驾驶噪声改进算法，并将次级通道建模仿真得到的次级通道模型导入改进算法中。据图3及算法推导，编写控制算法，进行仿真试验。



（a）误差信号收敛曲线



（b）初级噪声时域图

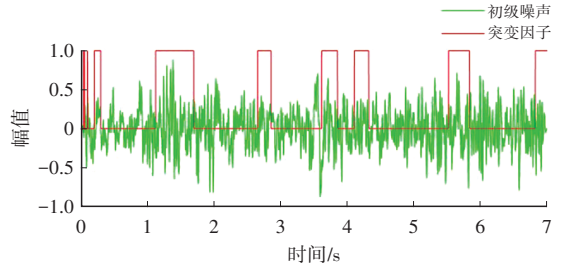


（c）次级通道权值对比

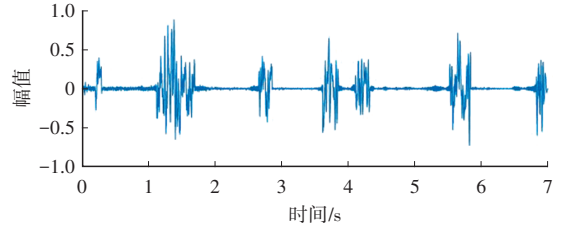
图10　次级通道建仿真

该仿真中所用的噪声为60 km/h匀速工况且包含人声的噪声，如图11所示。

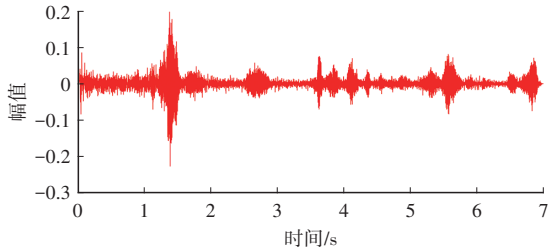
该仿真中所用的噪声为60 km/h匀速工况且包含压井盖的噪声，如图12所示。



（a）含突变因子的初级噪声信号

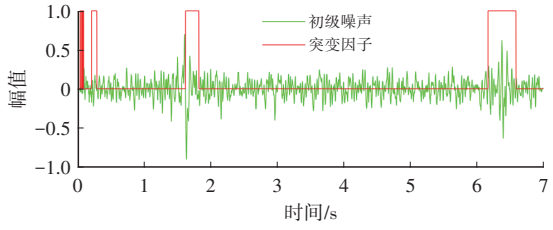


（b）改进算法的误差信号时域波形

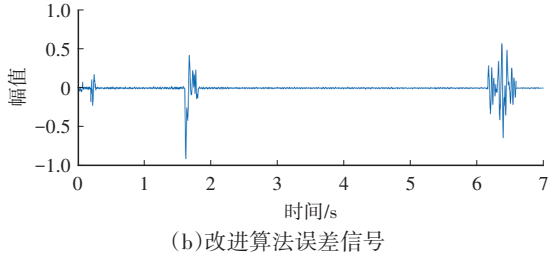


(c)FbLMS算法的误差信号时域波形

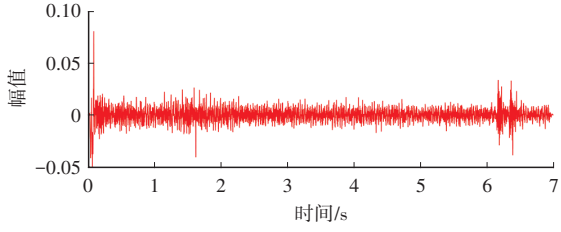
图11　保留人声的改进算法仿真



(a)带突变因子的初级噪声



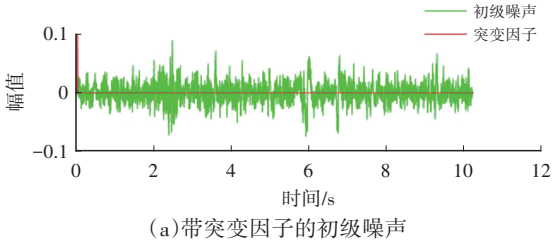
(b)改进算法误差信号



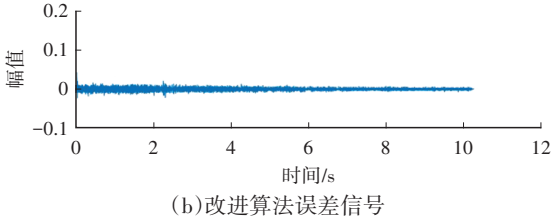
(c)FbLMS算法误差信号

图12　保留压井盖的声音的改进算法仿真

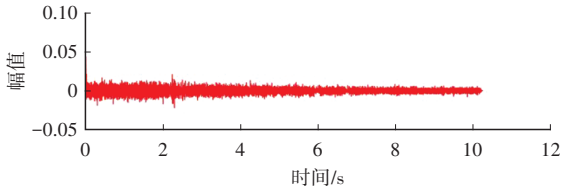
该仿真中所用的噪声为60 km/h匀速工况下不包含有用突变噪声的噪声。如图13所示，由于输入信号中没有有用突变信号，主动声音管理系统相当于普通的主动噪声控制系统，即单纯实现降噪功能，这验证了系统在无突变信号条件下的基础降噪性能。



(a)带突变因子的初级噪声



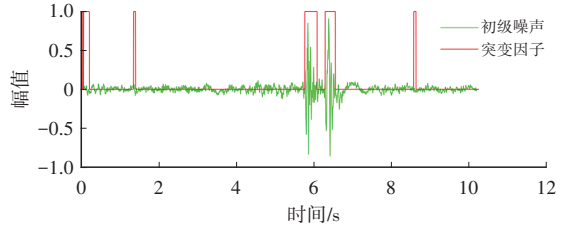
(b)改进算法误差信号



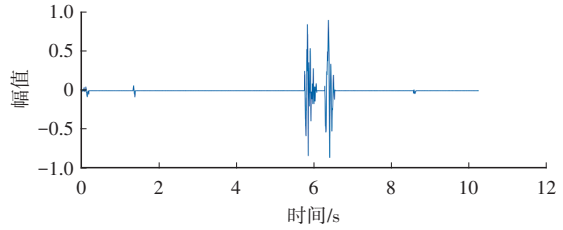
(c)FbLMS算法误差信号

图13　不包含有用突变噪声的改进算法仿真

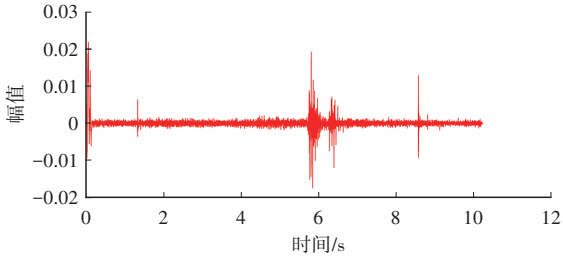
该仿真中所用的噪声为20 km/h匀速工况且包含过减速带的噪声，如图14所示。



(a)带突变因子的初级噪声



(b)改进算法误差信号

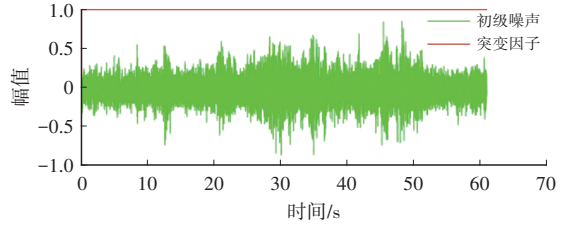


(c)FbLMS算法误差信号

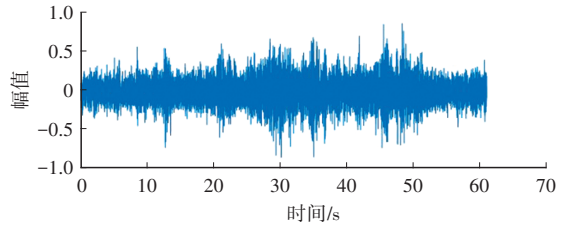
图14　保留过减速带噪声的改进算法仿真

如图12~图14所示，主动声音管理系统有效地区分并处理了突变信号与噪声，既保留了有用突变信号，又实现了无用噪声的抑制。

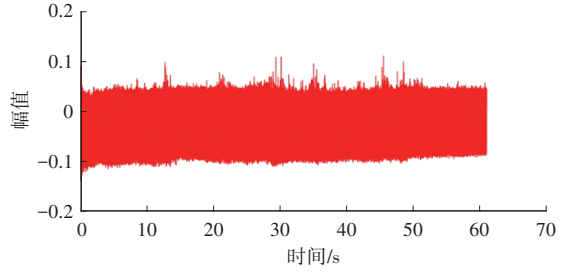
该仿真中所用的噪声为50 km/h匀速工况且包含音乐。如图15所示，音乐声音被系统识别为需要保留的突变信号，因此突变因子始终为1，即整个音乐得以保留，未被作为无用噪声进行抑制。



(a)初级噪声与突变因子时域波形图



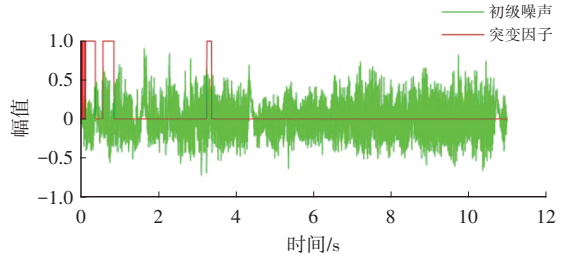
(b)改进算法的误差信号时域波形图



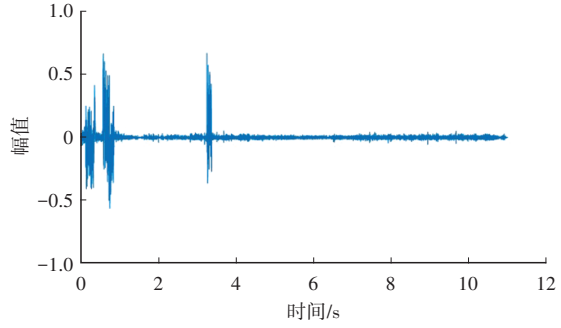
(c)FbLMS 算法的误差信号时域波形图

图15　保留音乐的改进算法仿真

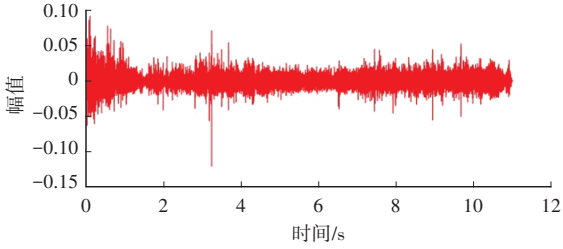
该仿真中所用的噪声为45 km/h匀速工况包含空调的噪声。图16进一步验证了系统对无用噪声的抑制能力。在该场景中,空调运行噪声被系统识别为无用噪声,其突变因子始终为0,即对该噪声进行有效抑制,再次体现了系统区分并处理不同声学信号的智能化特性。



(a)带突变因子的初级噪声



(b)改进算法误差信号



(c)FbLMS算法误差信号

图16　包含空调噪声的的改进算法仿真

仿真结果显示,改进算法通过突变因子λ识别突变信号,避免误抵消,实现噪声智能调控(降噪 + 保留有用信号),在保留有用噪声的同时,去除了大部分无用噪声,符合预期目标。没有突变噪声时改进算法仍保持更优降噪效果,说明其鲁棒性更强。将仿真结果与智能座舱的舒适性和驾驶模式调整结合,确保主动声音管理系统能够在不同驾驶条件下自适应优化,以实现更高效的噪声控制。

4　结束语

本研究采集了电动汽车在正常工况下不同速度的座舱内的噪声,设计了智能自适应主动降噪系统。LMS软件分析可知,在不同速度的稳态工况下,该电动汽车内的噪声声压级较高的部分主要集中在400 Hz以下的低频段内,且风噪、路噪、人声、压井盖声、过减速带声等突变噪声的频率存在重叠。该系统能够实时分析和分类噪声,并根据信号的出现频率以及其突发性来调整处理策略,从而更有效地适应各种不同的噪声环境和驾驶条件。主要研究结果如下:

(1)构建基于汽车智能座舱的主动声音管理系统框架,实现智能座舱系统中车载音响系统的扬声器与主动声音管理系统无缝交互,简化了车内主动声音管理系统,并拓展了汽车智能座舱的功能,实现了智能化、集成化和个性化交互体验的提升。

(2)提出突变因子反馈FbLMS算法,改变传统算法降低车内所有噪声信号的做法,保留人声、压井盖声、过减速带声、音乐等有用突变噪声,尽可能消除风噪、路噪、空调等无用噪声,以减少对驾乘人员的负面影响,优化车内环境和驾驶体验,提升驾乘舒适性,满足人们的沉浸式需求和个性化体验,推进智能座舱系统的持续发展。

(3)在保证一定沉浸式体验的前提下维持驾驶员的警惕性[17]。通过有效的噪声管理,减少车内无用噪声对驾驶员的干扰,帮助驾驶员保持专注和集中;安静的车内环境中,驾驶员能够更清晰地辨识道路警报音、导航指示音等有用噪声,增强驾驶安全性,更符合智能座舱安全辅助的核心需求。

参　考　文　献

[1] 李妙然. 中国新能源汽车产业扶持政策效应[D]. 北京: 中国社会科学院大学, 2020: 1-3.

[2] 孙林. 国内外汽车噪声法和标准的发展[J]. 汽车工程, 2000, 22(3): 155-158.

[3] 刘锋, 吴鸣, 杨军. 量产车型噪声主动控制系统性能实测

与分析[J]. 汽车工程, 2019, 41(6): 676-681+710.
[4] LEE H M, WANG Z M, LIM K M, et al. A Review of Active Noise Control Applications on Noise Barrier in Three-Dimensional/Open Space: Myths and Challenges[J]. Fluctuation and Noise Letters, 2019, 18(4): 1930002.
[5] JIANG J, LI Y. Review of Active Noise Control Techniques with Emphasis on Sound Quality Enhancement[J]. Applied Acoustics, 2018, 136: 139-148.
[6] 陈端石, 关元洪. 噪声主动控制研究的发展与动向[J]. 应用声学, 2001, 20(4): 1-2.
[7] 李鑫. 纯电动汽车车内噪声主动控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
[8] 胡啸, 涂有超. 机动车辆室内复合主动噪声控制系统的设计[J]. 噪声与振动控制, 2001, 21(1): 9-11.
[9] 凌逆战. 主动噪声控制理论及Matlab代码实现[EB/OL]. (2019-10-18) [2021-01-14]. https://www. cnblogs. com/LXP-Never/p/11693567.html.
[10] 蔡萌亚, 王文丽. 汽车智能座舱交互设计研究综述[J]. 包装工程, 2023, 44(6): 430-440.
[11] J.D.Power君迪. 智能座舱的七大趋势[J]. 汽车与配件, 2023, (4): 26-27.
[12] 回姝, 郑红丽, 顾莹. 汽车智能座舱发展趋势下的机遇和挑战[J]. 汽车文摘, 2022(5): 3-4.
[13] 庞剑, 谌刚, 何华. 汽车噪声与振动:理论与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
[14] 王钟缘. 电动汽车车内声品质评价及电磁噪声分析[D]. 沈阳: 沈阳理工大学.
[15] 陆森林, 默超. 车内ANC系统次级通道辨识及仿真研究[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2016, 30(3): 23-24.
[16] 陈克安. 有源噪声控制. 第2版[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
[17] 王军雷, 冀然. 基于专利分析的智能座舱系统技术研究[J]. 汽车文摘, 2022(2): 4-5

（责任编辑　**梵玲**）

《汽车工艺与材料》投稿须知

《汽车工艺与材料》于1986年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车材料与制造技术类月刊，目前已入选《中文核心期刊要目总览》（第二版）、RCCSE中国准核心学术期刊（B+）、中国核心期刊（遴选）数据库、中国学术期刊综合评价数据库、欧洲学术出版中心数据库（EuroPub）、哥白尼精选期刊数据库（ICI Journals Master List）、EBSCO International数据库、J-Gate数据库。

《汽车工艺与材料》以“为中国报道汽车制造，为汽车引领工艺材料”为办刊宗旨，致力于报道以汽车轻量化技术和智能制造技术为核心的先进制造技术与材料应用技术，重点关注电动汽车蓄电池、电机、电控关键材料技术，燃料电池材料技术，高强度钢、铝镁合金、非金属材料及其成形技术，连接技术，智能装备与绿色制造等，以期通过高质量学术内容的出版和传播助推行业创新技术的交流与发展。

《汽车工艺与材料》杂志关注领先的整车及零部件企业和材料、装备等供应商，及时报道汽车行业最新的产品设计、制造、材料、加工技术、生产装备、检测技术等方面的成功案例。

主要栏目：

AT&M视界、生产现场、材料应用、生产装备、检测技术、数字化园地、行业动态等。

投稿要求：

（1）来稿须具有独创性并与实践相结合，文章字数最好控制在5 000～8 000字。

（2）来稿不能在国内、外公开杂志上发表过，请勿一稿多投。

（3）来稿的试验方法、试验数据、试验结论必须准确、可靠。

（4）来稿须包括以下项目：题名、作者姓名、作者单位、摘要（200字左右）、参考文献等。来稿采用word文档的格式。

（5）来稿文章格式应符合一般科技论文格式，或参考近期本刊所刊登文章格式。

（6）文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献，且在文中应标注文献引用处。

（7）本刊使用网站投稿，投稿网址：http://qcgyycl.cbpt.cnki.net，咨询电话：0431-82026054。

竭诚欢迎汽车行业及相关各界的专家学者积极向本刊投稿。