

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2025.05.017

# 车内集群式多通道主动噪声控制系统研究\*

邓慧萍<sup>1,2</sup>, 卢焯华<sup>1,2</sup>, 陈 弯<sup>1,2</sup>, 刘志恩<sup>1,2</sup>, 罗 挺<sup>3</sup>, 王永亮<sup>3</sup>, 孙孟雷<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学, 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070;  
2. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070; 3. 东风汽车集团有限公司研发总院, 武汉 430056)

**[摘要]** 为解决油电混合动力汽车充放电时发动机间歇介入工作, 导致车内轰鸣声的问题, 本文基于传统多通道主动噪声控制(active noise control, ANC)系统, 通过融合集中式控制策略与分散式控制策略的优点, 提出了一种综合性能较优的半耦合式集群式控制策略。集群式控制策略较集中式控制策略计算量降低50%左右, 且保持着与其相当的噪声衰减性能; 较分散式控制策略稳定性明显更优, 降噪效果突出。基于MATLAB仿真平台对提出的车内多种集群式控制策略及传统控制策略进行了对比分析, 同时基于某增程式电动车在其常用工况下开展了实车路试实验验证。结果表明集群式控制策略可较好地应用于车内多通道主动噪声控制系统, 2、4、6阶增程器噪声在4个座椅头枕位置处的平均降噪量分别可达15.9、10.6和5.7 dB(A), 表现出了良好的降噪效果及稳定性。研究成果可推广应用于有人舱室的噪声控制如飞机、潜艇等领域, 有重要的科学意义和工程价值。

**关键词:** 车内噪声; 多通道主动噪声控制; 集群式控制策略; 低计算复杂度; 高稳定性

## Research on Clustered Multi-channel Active Noise Control System in Car

Deng Huiping<sup>1,2</sup>, Lu Chihua<sup>1,2</sup>, Chen Wan<sup>1,2</sup>, Liu Zhien<sup>1,2</sup>, Luo Ting<sup>3</sup>,  
Wang Yongliang<sup>3</sup> & Sun Menglei<sup>3</sup>

1. Wuhan University of Technology, Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070;  
2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan 430070;  
3. Dongfeng Motor Corporation Research and Development Institute, Wuhan 430056

**[Abstract]** In order to solve the problem of roaring sound inside the vehicle caused by intermittent engine intervention during charging and discharging of diesel-electric hybrid vehicles, in this paper a semi-coupled cluster control strategy with better comprehensive performance is proposed based on the traditional multi-channel active noise control (ANC) system by combining the advantages of the centralized control strategy and decentralized control strategy. Compared with the centralized control strategy, the computational cost of the cluster control strategy is reduced by about 50%, and the noise attenuation performance is comparable to that of the centralized control strategy. Compared with the decentralized control strategy, the stability is obviously better, and the noise reduction effect is outstanding. Based on the MATLAB simulation platform, a variety of cluster control strategies and traditional control strategies in the vehicle are compared and analyzed, and the road test experiments of a range-extended electric vehicle are carried out under its common working conditions. The results show that the cluster control strategy can be well applied to the multi-channel active noise control system in the vehicle, and the average noise reduction amount of the second-, fourth-, and sixth-order range extender noise at the four seat headrest positions can reach 15.9, 10.6 and 5.7 dB(A), respectively, showing good noise reduction effect and stability. The research results can be applied to the noise control of manned cabins, such as aircraft, submarines and other fields, which has important scientific significance and engineering value.

\* 国家自然科学基金(52405127)和湖北省自然科学基金(2024AFB177)资助。

原稿收到日期为2024年09月22日, 修改稿收到日期为2024年11月07日。

通信作者: 陈弯, 特设副研究员, 博士, E-mail: wch@whut.edu.cn。

**Keywords: vehicle interior noise; multi-channel active noise control; clustered control strategy; low computational complexity; high stability**

## 前言

随着人们对汽车品质要求的不断提高和汽车市场竞争的日益激烈,车内噪声已逐渐成为用户对汽车乘坐舒适性和产品满意度评价的重要指标。降低汽车噪声、提高汽车乘坐舒适性对提升汽车市场份额和汽车品牌形象至关重要<sup>[1]</sup>。ANC技术直接采用次级声源作为控制源(次级声源),生成与车内噪声(也称初级噪声或期望信号)幅值相等、相位相反的抵消噪声(次级噪声),基于干涉相消的原理实现对噪声的衰减。ANC技术不影响车辆质量和车内空间,符合汽车轻量化和高舒适性的发展趋势<sup>[2]</sup>。更重要的是,这种方法不仅对被动控制方法难以抑制的低频噪声具有显著的控制效果,其自适应特性还能实时跟踪车内噪声的变化<sup>[3-4]</sup>。ANC技术不仅在汽车领域得到了广泛的应用,在船舶、飞机和工程机械中也应用广泛<sup>[5-7]</sup>。

发动机噪声是内燃机汽车舱内的主要噪声源,它含有大量的低频谐波成分。此外,它也是插电式混合动力汽车、增程式电动汽车等新能源混合动力汽车在发动机进行动力输出或行驶充电时舱内的主要噪声源,为了消除此类噪声,车内主动噪声控制成为研究热点。

针对两厢四座车而言,为实现车辆内部声场中4个座位的噪声抑制,须配备多个次级声源和误差传声器的多通道主动噪声控制系统。传统的多通道ANC系统基于集中式控制策略,具有良好的全局降噪性能<sup>[8-9]</sup>。然而,当通道数量增加时,系统的计算复杂度大大增加。此外,各通道之间存在耦合效应,一旦其中一个通道失效,可能导致整个系统失效。这两个关键因素严重制约了集中式多通道ANC系统在车辆中的实际应用。

针对多输入多输出系统,Ferrer等<sup>[10]</sup>引入了几个分散式结构的集中式自适应算法MEFxLMS来处理无约束和约束网络;Kamaldar等<sup>[11]</sup>提出集中和分散自适应谐波控制算法来更高效地处理多通道系统;Dong等<sup>[12]</sup>采用多节点网络来构建波域自动识别系统,并提出了一种分散式算法来降低算法计算量。分散式算法,将每个通道都看作是完全独立的,不考

虑通道之间的耦合关系,仅使用相关的误差信号独立更新每个控制器的权系数,那么多个次级声源之间就会相互影响,从而降低ANC系统的降噪性能<sup>[13]</sup>。Yang等<sup>[14]</sup>利用分散式控制策略将多通道ANC系统简化为并行的单通道系统,从而削弱了多路径耦合效应。Pradhan等<sup>[15]</sup>提出了一种带有辅助滤波器的分散双通道ANC系统。通过对频率响应的整形设计辅助滤波器,使系统达到与集中式系统相似的降噪性能,但所涉及的辅助滤波器设计过程复杂,且只进行了双通道系统的研究。

以上研究均采用集中式或分散式多通道ANC系统,然而集中式多通道ANC系统虽然降噪效果好,但是计算复杂度高,分散式多通道ANC系统计算复杂度低但降噪效果不好、稳定性差。针对以上缺点,本文围绕集中式多通道ANC系统完全耦合和分散式多通道ANC系统完全独立的控制策略,提出一种新的集群式“半耦合”控制策略,不仅有与集中式多通道ANC系统相当的降噪性能,且计算量较低、稳定性好。

针对最为实用的四座汽车,集群式控制策略将车内四通道其中两两耦合,相较于集中式控制策略,集群式控制策略的计算复杂度要低很多。为了探究集群式控制策略的降噪效果,本文在第2节对所提出的多种集群式控制策略、集中式和分散式控制策略分别进行仿真对比分析,仿真结果表明集群式控制策略在计算复杂度大大降低的前提下的确具有与集中式控制策略相当的降噪效果,且第3节的实车路试实验也印证了仿真分析的结果,集群式控制策略的确具有良好的全局降噪性能。

## 1 提出的集群式多通道ANC系统

### 1.1 多通道自适应陷波滤波推导

主动噪声控制技术通过控制算法产生抗噪声来减轻噪声,已引起人们的广泛关注。滤波最小均方(filter-x least mean square, FxLMS)算法具有良好的鲁棒性和较低的计算复杂度,是ANC应用中最常用的算法。图1为单通道自适应陷波FxLMS算法框图,其中 $x_{k,0}(n)$ 和 $x_{k,1}(n)$ 分别表示余弦、正弦参考信号, $d(n)$ 表示初级噪声信号, $e(n)$ 表示误差信号。

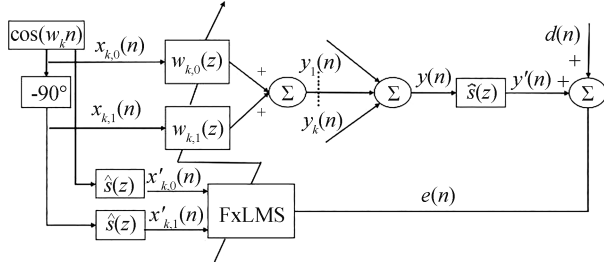


图1 单通道自适应陷波 FxLMS 算法框图

在该系统中,算法进行一次完整的迭代主要分为3步。

第1步生成控制信号。首先定义第 $k$ 个待抵消频率 $w_k$ 对应的参考信号分别为

$$x_{k,0}(n) = \cos(w_k n) \quad (1)$$

$$x_{k,1}(n) = \sin(w_k n) \quad (2)$$

式中 $k=1, 2, 3, 4, \dots, K$ ,为待抵消频率的个数。控制滤波器的输出可表示为

$$y_k(n) = w_{k,0}(n)x_{k,0}(n) + w_{k,1}(n)x_{k,1}(n) \quad (3)$$

$$y(n) = \sum_{k=1}^K y_k(n) \quad (4)$$

式中 $w_{k,0}(n)$ 和 $w_{k,1}(n)$ 分别为 $x_{k,0}(n)$ 和 $x_{k,1}(n)$ 对应的权系数。

第2步,生成滤波参考信号。两参考信号经次级通路的估计 $\hat{S}(z)$ 后生成滤波参考信号:

$$x'_{k,0}(n) = x_{k,0}(n) * \hat{s}(n) \quad (5)$$

$$x'_{k,1}(n) = x_{k,1}(n) * \hat{s}(n) \quad (6)$$

$$\mathbf{x}'_k(n) = [x'_{k,0}(n), x'_{k,1}(n)]^T \quad (7)$$

式中: $*$ 表示线性卷积运算; $\hat{s}(n)$ 表示 $\hat{S}(z)$ 的脉冲响应函数。

第3步,更新权系数。基于FxLMS算法利用最小均方准则更新自适应陷波器权系数,于是有

$$\mathbf{w}_k(n+1) = \mathbf{w}_k(n) + 2\mu \mathbf{x}'_k(n) e(n) \quad (8)$$

式中 $\mu$ 为步长因子。经过多次迭代后,系统收敛,残余误差信号 $e(n)$ 达到最小值,完成对频率分量 $w_k$ 的消除。

以上就是单通道窄带陷波 FxLMS 算法完成一次完整的权系数更新所需要的全过程。

图2为多通道 ANC 系统框图。该系统包括 $K$ 个参考信号、 $M$ 个次级声源和 $L$ 个误差传声器。在每个次级声源和每个误差传声器之间都有一条次级通路,因此在这个系统中一共有 $M \times L$ 条次级通路,对于第 $k$ 个参考信号,第 $m$ 个控制器的输出为

$$y_{mk}(n) = w_{mk0}(n)x_{k0}(n) + w_{mk1}(n)x_{k1}(n) \quad (9)$$

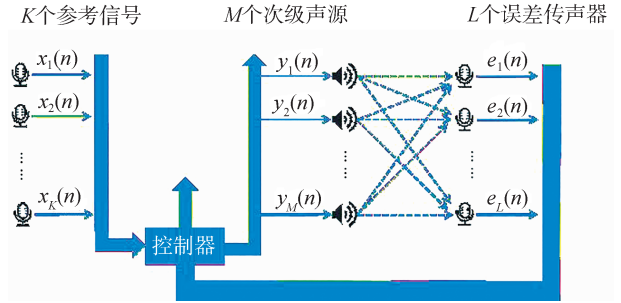


图2 多通道主动噪声控制系统

则对于所有 $K$ 个参考信号,第 $m$ 个控制器的输出为

$$y_m(n) = \sum_{k=1}^K y_{mk}(n) \quad (10)$$

参考信号经次级通路滤波后的信号为

$$\mathbf{x}'_{mk0}(n) = \sum_{i=0}^{l-1} \hat{s}_{mk,i}(n) x_{k,0}(n-i) \quad (11)$$

$$\mathbf{x}'_{mk1}(n) = \sum_{i=0}^{l-1} \hat{s}_{mk,i}(n) x_{k,1}(n-i) \quad (12)$$

$$\mathbf{x}'_{mk}(n) = [\mathbf{x}'_{mk0}(n), \mathbf{x}'_{mk1}(n)]^T \quad (13)$$

式中 $\sum_{i=0}^{l-1} \hat{s}_{mk,i}(n)$ 是第 $m$ 个次级声源和第 $l$ 个误差传声器之间次级通路的脉冲响应系数的估计。

最后,对控制滤波器权系数进行更新:

$$\mathbf{w}_{mk}(n+1) = \mathbf{w}_{mk}(n) - \mu \sum_{l=1}^L e_l(n) \mathbf{x}'_{mk}(n) \quad (14)$$

## 1.2 集群式多通道控制策略

对于车内四通道而言,为实现全局噪声控制,可以采用集中式多通道 ANC 系统,该系统需要许多次级通路模型来产生滤波后的参考信号,并需要所有误差信号来更新控制滤波器权系数,当通道数量增加时,集中式算法的计算复杂度显著增加。而分散式多通道 ANC 系统仅使用来自误差传声器的误差信号更新与自己对应的控制滤波器的权系数,虽然计算复杂度较小,但是各通道之间的次级噪声会相互影响,降低 ANC 系统的降噪性能。

本文结合集中式与分散式控制策略,基于将车内四通道两两耦合的方式,提出了3种集群式控制策略,并将在第2节中进行择优选取。

以前后排为例,考虑到车内座椅的阻隔作用,前排通道和后排通道可能存在的耦合关系较弱,即将车内前排两通道建立 $2 \times 2$ 的耦合关系,后排两通道同样建立 $2 \times 2$ 的耦合关系,而前排和后排之间相互独立,根据各位置编号将该种前后排集群控制策略

记为 12/34,同样的还有左右列 13/24 集群式控制策略和交叉式 14/23 集群式控制策略。具体控制方式如图 3 所示。

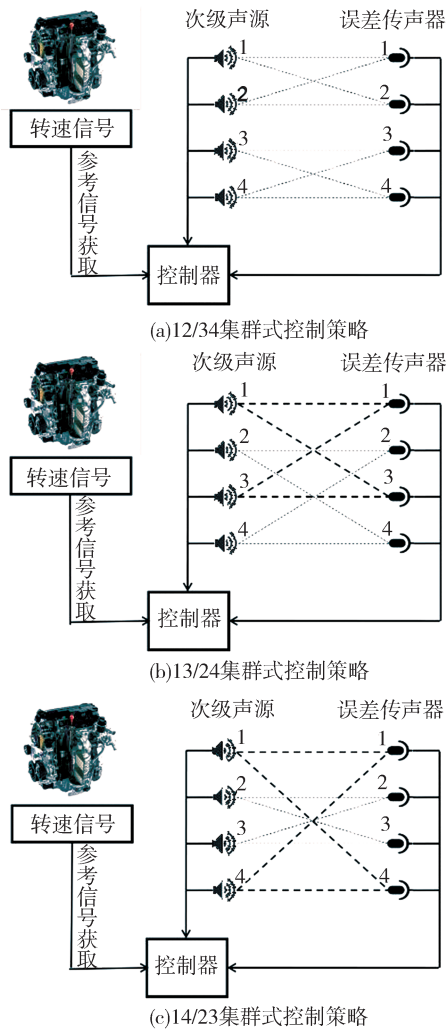


图3 3种集群式ANC系统原理图

### 1.3 计算复杂度分析

计算复杂度是评判算法好坏的重要指标之一。对于车载ANC系统,过高的计算复杂度意味着更高的硬件成本和更长的迭代运算时间,这会导致系统实时性减弱,直接影响ANC系统的降噪性能<sup>[16]</sup>。

在本节中,对传统集中式、分散式和集群式3种四通道ANC系统的计算复杂度进行了分析对比。表1总结了3个系统每次迭代所需的乘法次数。此外,表2对不同 $K$ 和 $I$ 值下系统的计算量进行了定量比较。如前所述, $K$ 表示控制频率的个数, $I$ 表示估计的次级通路的长度。

从表2可以看出,与传统的集中式和分散式四通道ANC系统相比,所提出的四通道ANC系统所需

的计算量要低得多。根据式(9)~式(14),容易算出:在 $K=3$ 和 $I=128$ 的通常情况下,集群式多通道ANC系统执行的乘法次数减少到集中式多通道ANC系统的50.19%。因此,所提出的四通道ANC系统具有相当大的计算优势,这意味着它将消耗更少的硬件资源,且在实际应用中更容易实现。

表1 集中式、分散式和集群式四通道ANC系统在乘法方面的计算复杂度

项目	集中式	分散式	集群式
生成控制信号	8K	8K	8K
生成滤波参考信号	32KI	8KI	16KI
更新权系数	40K	16K	24K
总计算量	32KI+48K	8KI+24K	16KI+32K

表2 针对不同的 $K$ 和 $I$ ,集中式、分散式和集群式四通道ANC系统的计算量分析

$K$	$I$	集中式	分散式	集群式
3	64	6 288	1 608	3 168
3	128	12 432	3 144	6 240
3	256	24 270	6 216	12 384
9	64	18 864	4 824	9 504
9	128	37 296	9 432	18 720
9	256	74 160	18 648	37 152

## 2 降噪性能仿真分析

### 2.1 3种集群式控制策略比较

在某国产增程式电动汽车上主驾、副驾、左后和右后位置分别布置传声器,增程器常用工况2 600 r/min下采集这4个位置的噪声信号,直接作为初级噪声信号,以实车16条次级通路数据作为仿真参数进行仿真分析。

以平均降噪量(average noise reduction, ANR)<sup>[17]</sup>和加权声压级(sound pressure level, SPL)两个指标来评价系统的降噪性能,平均降噪量ANR定义如下:

$$ANR = 20 \log_{10} \left[ \frac{A_e(n)}{A_d(n)} \right] \quad (15)$$

式中:  $A_e(n) = \tau A_e(n-1) + (1-\tau)|e_1(n)|$ ;  $A_d(n) = \tau A_d(n-1) + (1-\tau)|d_1(n)|$ ,其初始值都为0,遗忘因子 $\tau = 0.999$ 。

声压级定义如下:

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_{ref}} \right) \text{ (dB)} \quad (16)$$

式中: $p$ 为待计算声压; $p_{ref} = 2 \times 10^{-5}$  Pa,为参考声压,在此基础上,在频域进行频谱处理得到A加权声压级,具体过程可参考MATLAB中的A加权滤波器。噪声采集时间为7 s,采样频率为4 096 Hz,16条长度为128的次级通路如图4所示。增程器工况2 600 r/min时,其2、4、6阶频率分别为87、173和260 Hz。

所有的步长都经过仔细调整达到最优,以便在系统之间提供公平的比较。3种集群式控制策略的仿真效果和ANR曲线如图5所示,具体的各阶次降噪量如表3所示。车内4个位置,其中前排的主驾位置与后排的右后位置就可以反映车内的噪声水平,所以为了节约篇幅,本文的仿真频谱图和ANR曲线都只展示前排的主驾位置与后排的右后位置,副驾位置与左后位置的降噪结果会在对应的表中进行展示。

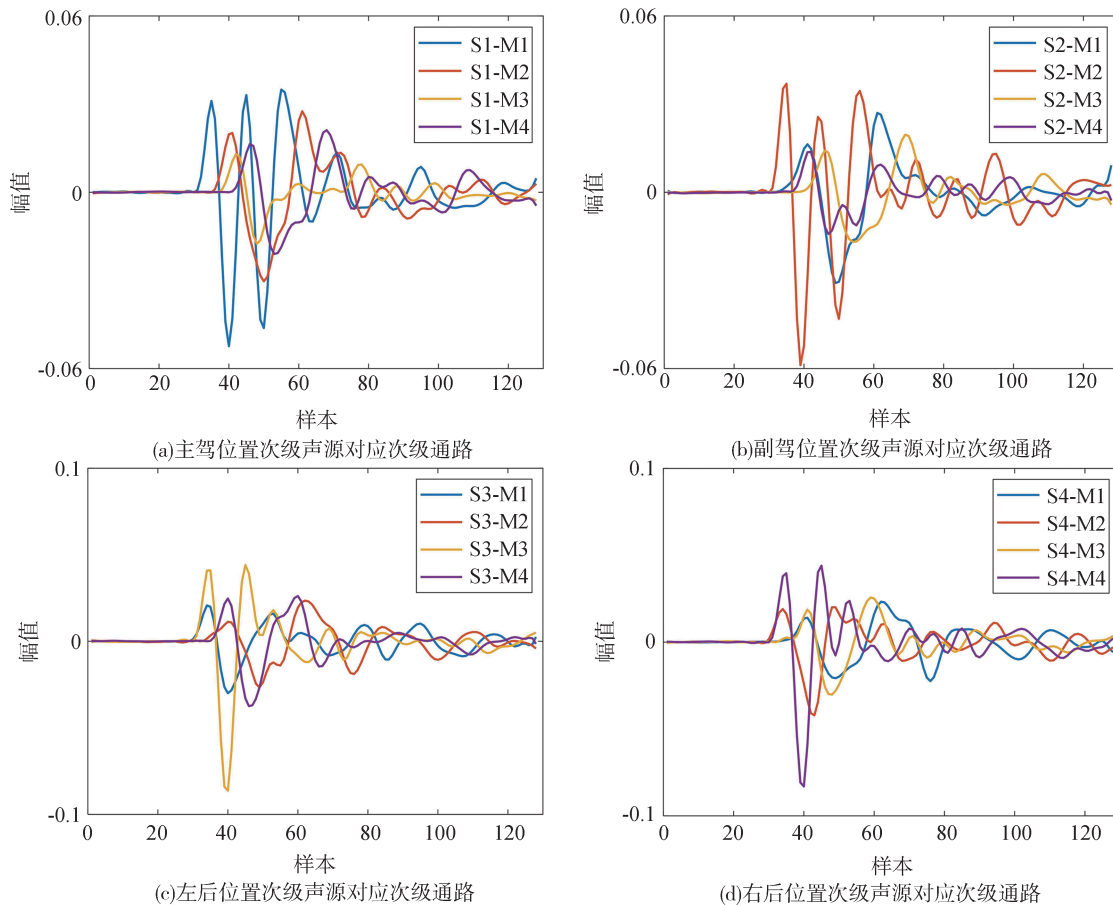


图4 全车4个位置对应的16条次级通路

分析图5和表3可知,在车内4个目标降噪位置,3种控制策略都可以对增程器阶次噪声进行抑制;图5的ANR曲线清晰显示,12/34集群式控制策略下的降噪量在主驾和右后目标降噪位置都最大,系统收敛速度也最快。结果表明:3种集群式控制策略都具有一定的降噪效果,但是13/24与14/23集群式控制系统的2、4、6阶降噪性能明显劣于12/34集群式控制系统。分析其原因可能是由于前排座椅的空间阻隔作用,将实车空间分为了前后两个相对

独立的局部空间,使得前排通道与后排通道之间耦合关系较弱,而前排两通道内部以及后排两通道内部耦合作用较强,而12/34集群式控制策略就是将前排两通道和后排两通道分别进行耦合,所以降噪效果最好。综合考虑,最终将前后排12/34集群式控制策略定为最佳的四通道系统控制方案。

### 2.2 集群式控制策略与传统控制策略比较

为了证明提出的集群式控制策略相较于传统控制策略的优越性,本节将2.1节挑选出的最优集群

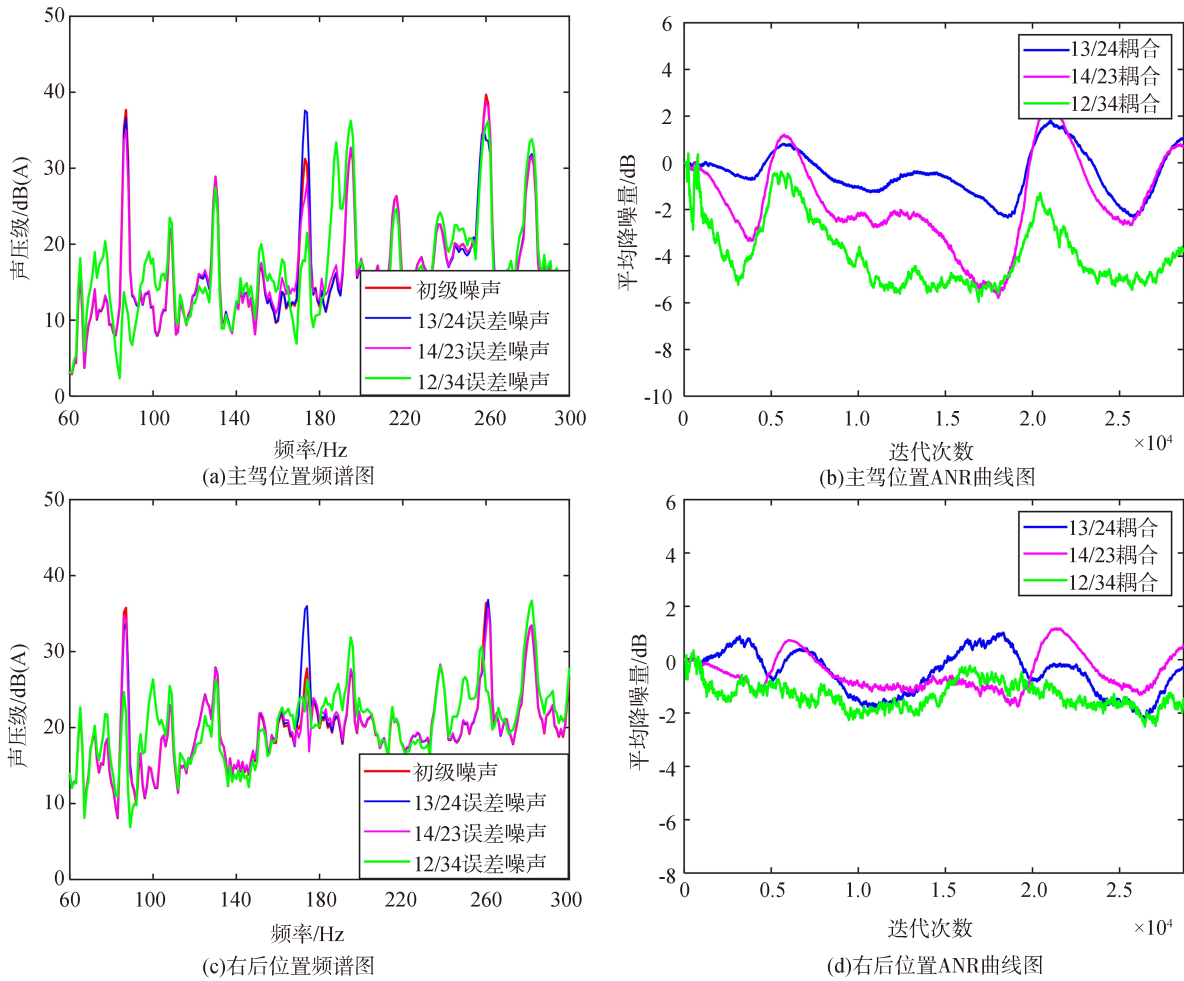


图5 常用工况2 600 r/min下3种集群式四通道控制系统仿真频谱图与ANR曲线图

表3 常用工况2 600 r/min下3种集群式ANC系统降噪结果 dB(A)

控制方式	位置	2阶降噪量	4阶降噪量	6阶降噪量
12/34	主驾	25.9	13.9	4.2
	副驾	14	13.4	2.6
	左后	15.2	16.8	16.1
	右后	13.7	4.4	11.6
13/24	主驾	1.6	-6.4	6
	副驾	1.6	4.6	5.7
	右后	2	-9.4	1.6
14/23	主驾	2.7	5.2	0.9
	副驾	2.6	10.8	2.5
	左后	0.8	10.9	8.2
	右后	1.4	1.8	3.8

式控制策略与集中式、分散式控制策略进行对比分析,其仿真参数设置与2.1节一致。图6为3种多通道ANC系统主驾和右后位置的降噪频谱对比和

ANR曲线,其具体的各阶次降噪量对比如表4所示。

从图6可以看到分散式控制系统的最主要阶次2阶降噪效果很有限,只有右后位置的4阶和6阶噪声降噪效果理想,由于各次级噪声之间的干涉,其它位置其它阶次的降噪效果有限,从ANR曲线图可以看出,在迭代5 000多次也就是1 s多时,两个位置都有增噪现象;从图6还可以看到集中式控制系统两个位置均有良好的降噪效果,且2阶降噪量很理想,ANR曲线图也可以直观地看出两个位置均可以收敛至稳态。通过对比发现集群式12/34与集中式各阶次降噪效果相当,尤其是最主要阶次2阶次降噪效果最优。

分析其原因是:集中式控制策略将所有误差传声器采集的误差信号用于每个子控制器的更新,使得系统具有良好的全局噪声控制效果,但当通道数增加时,系统的计算复杂度将大大增加,且由于各通

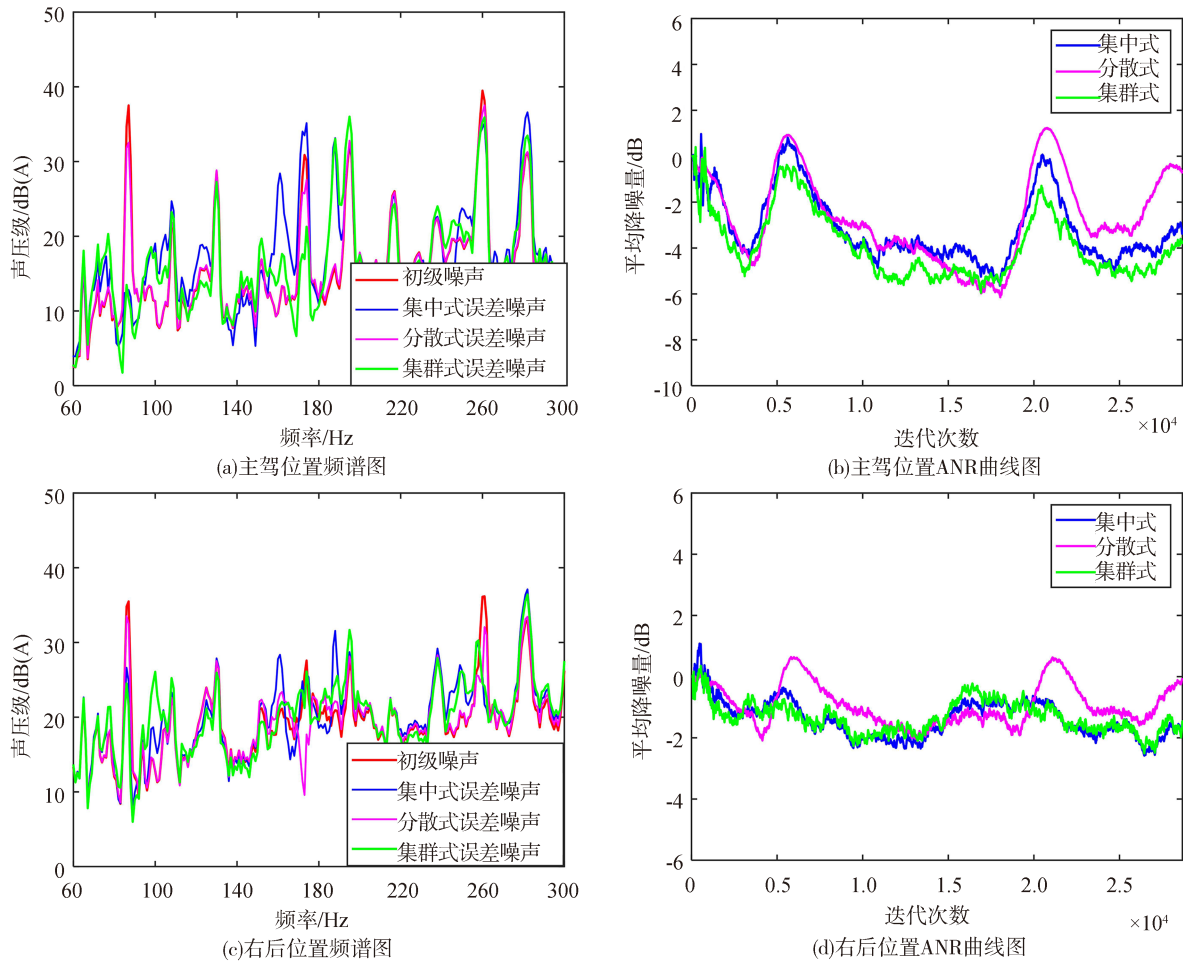


图6 常用工况2 600 r/min下3种控制系统仿真频谱图与ANR曲线图

表4 常用工况2 600 r/min下3种ANC系统降噪结果  
dB(A)

控制方式	位置	2阶降噪量	4阶降噪量	6阶降噪量
集中式	主驾	24.7	-2.6	5
	副驾	20.1	15.9	12.9
	左后	14.6	7.5	10.1
	右后	10.8	3.2	10.7
分散式	主驾	5	5.2	3
	副驾	4	5.4	7.2
	左后	1.8	15.3	19.2
	右后	3	16	10.7
集群式	主驾	25.9	13.9	4.2
	副驾	14	13.4	2.6
	左后	15.2	16.8	16.1
	右后	13.7	4.4	11.6

道之间存在耦合效应,稳定性也将变得十分脆弱。相比之下,分散式控制策略仿真效果不佳是由于忽略了所有次级通路矩阵中的非对角元素,需要在苛

刻的次级声源和误差传声器的几何配置条件下才能实现令人满意的噪声控制效果与稳定性。

然而集群式控制策略兼顾了二者的优点,利用前排座椅的空间阻隔作用,使得前排通道与后排通道之间耦合关系较弱,而前排两通道内部以及后排两通道内部耦合作用较强,而集群式控制策略就是将前排两通道和后排两通道分别进行耦合,所以降噪效果最好。仿真结果也表明了集群式控制策略在达到与集中式控制策略相当的降噪性能的前提下,计算量更低、稳定性好。

### 3 实车多通道主动噪声控制实验验证

#### 3.1 增程式电动车路试实验

前面通过MATLAB软件进行仿真分析,初步验证了四通道集群式ANC系统的有效性。考虑到实车运行工况下声场环境更为复杂,本文进一步开展了实车多通道主动噪声控制路试实验。本文实验样

车采用某款豪华增程式电动车,其实车 ANC 设备连接示意图如图 7 所示。在样车上搭建四通道 ANC 实车系统来验证集群式 ANC 系统的降噪性能,本次所用的主要实验器材和设备如表 5 所示。

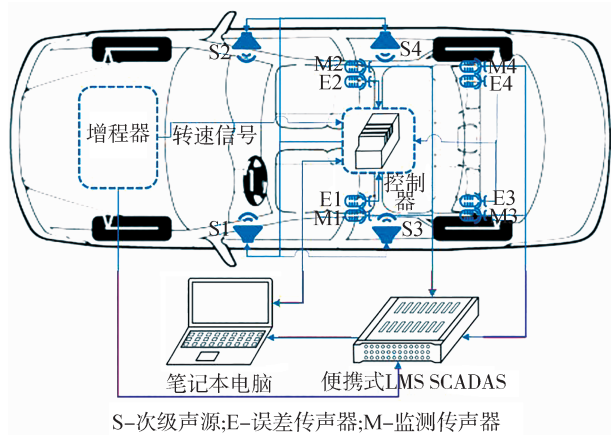


图7 实车 ANC 设备连接示意图

表5 主要硬件设备列表

序号	设备名称	规格型号	主要参数
1	实时控制器	CompactRIO 9040	处理器: Intel Atom E3930; SSD: 4GB; 可重配置 FPGA: Xilinx Kintex-77K70T
2	信号输入模块	NI 9231	通道数目: 8; 采样率: 51.2 kS/s/通道
3	信号输出模块	NI 9269	通道数目: 4; 采样率: 100 kS/s/通道
4	传声器	GRAS-46AE	动态范围: 17~138 dB(A), 灵敏度: 50 mV/Pa
5	数据采集系统	SCADAS-XS-12	通道数量: 12; 采样频率: 51.2 kHz/通道

设计实验方案:针对4个目标降噪位置,选择车辆常用工况 2 100和 2 600 r/min 进行实验。在整个实验过程中,采样时间为 7 s,采样频率设置为 4 096 Hz。此外,为了减少实验过程中的外界干扰,特别选择了在车辆较少的时间段和路段进行实验,这样可以避免其他车辆的噪声对测试结果产生影响,该实验方法可以有效减少外界干扰<sup>[18]</sup>。

在实车的四通道 ANC 系统中,4个车门次级声源作为次级声源,每个座位头枕处布置2个传声器,其中一个为监测传声器,另一个是误差传声器,车门次级声源如图 8 所示,误差传声器和监测传声器布置如图 9 所示。

集群式实车四通道 ANC 系统的降噪性能测试结果频谱图分别如图 10 和图 11 所示,各阶次降噪量



图8 车门次级声源布置图

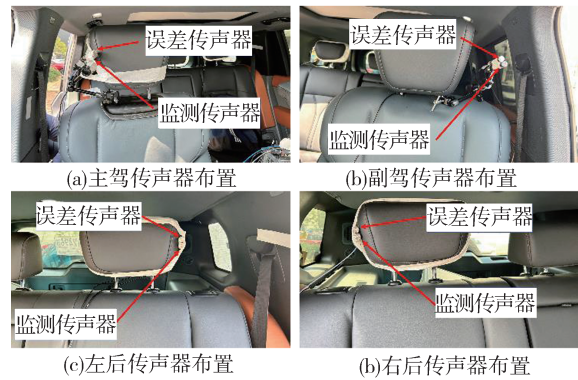
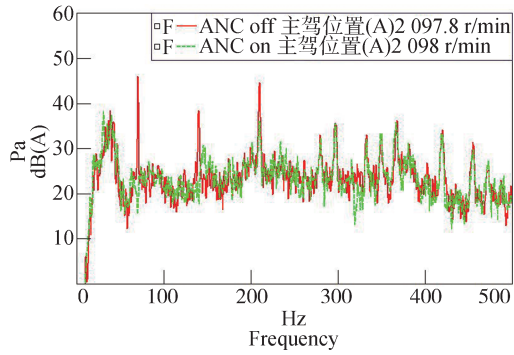
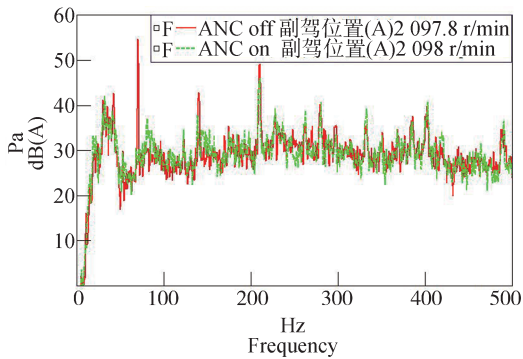


图9 误差传声器布置图

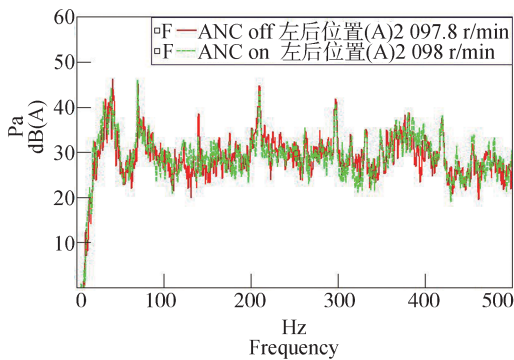
见表 6。从频谱图可以看到,增程器工况 2 100 r/min 时 ANC 系统主驾和副驾的 2 阶降噪量达到 28 dB(A) 以上,只有左后位置的 2 阶和 6 阶没效果,其它位置的其它阶次降噪效果良好,车内 4 个位置的 2、4、6 阶降噪量分别可达 15.9、10.6 和 5.7 dB(A);增程器工况 2 600 r/min 时 ANC 系统 4 个位置的 2 阶降噪量达到 17 dB(A) 以上,只有右后位置的 4 有少量增噪现象,其它位置的其它阶次降噪效果良好。



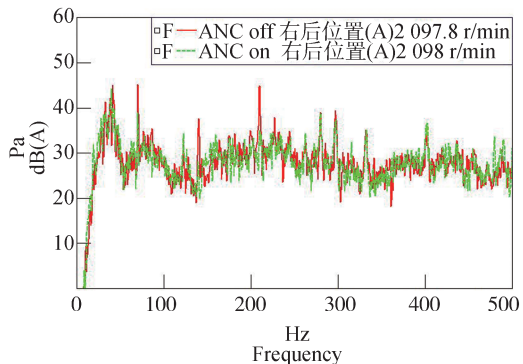
(a)主驾位置降噪结果



(b)副驾位置降噪结果

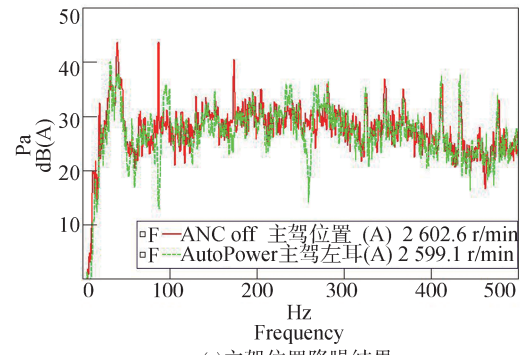


(c)左后位置降噪结果

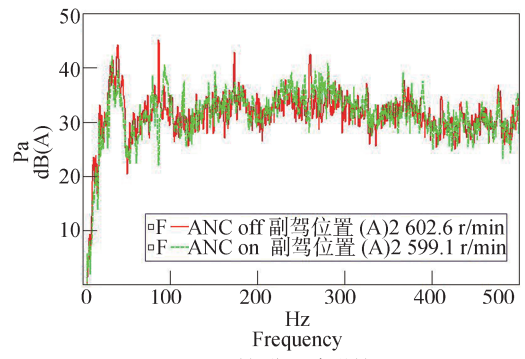


(d)右后位置降噪结果

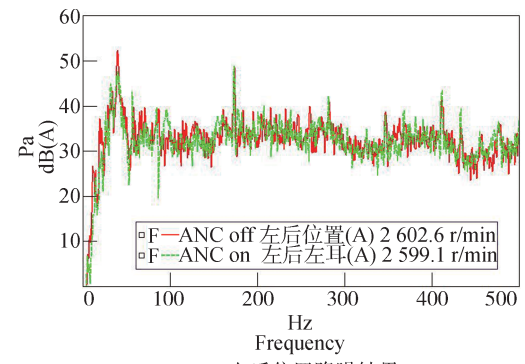
图10 集群式ANC系统2100 r/min工况各位置降噪频谱图



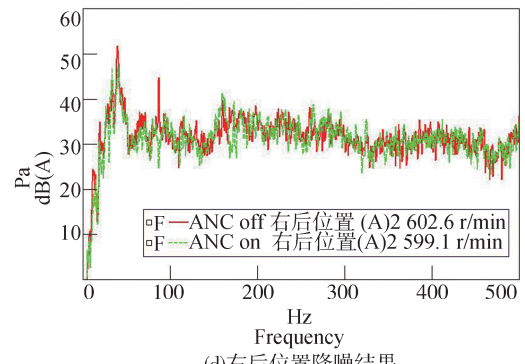
(a)主驾位置降噪结果



(b)副驾位置降噪结果



(c)左后位置降噪结果



(d)右后位置降噪结果

图11 集群式ANC系统2600 r/min工况各位置降噪频谱图

表6 路试实验ANC控制测试结果 dB(A)

发动机转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	误差传声器 位置	2阶 降噪量	4阶 降噪量	6阶 降噪量
2 100	主驾左耳	30	20.3	9.1
	副驾右耳	28.1	9	3
	左后左耳	-0.6	6.5	0.9
	右后右耳	6.2	10.9	9.9
2 600	主驾左耳	30	12	10.9
	副驾右耳	25.2	7.2	10.3
	左后左耳	14.2	-1.7	5.9
	右后右耳	24.1	8	6.1

3.2 误差传声器位置更换实验

上节通过增程器两个常用工况实验,验证了误差传声器位于头枕处时集群式控制系统良好的降噪性能,然而实车量产一般不会将误差传声器单独放置在头枕处,为了更加贴近实车量产方案,将误差传声器布放在顶棚位置,监测传声器依然位于头枕处,用于监测头枕位置的噪声,监测传声器和误差传声器布放位置如图12所示,其余实验条件与3.1节中完全一致。

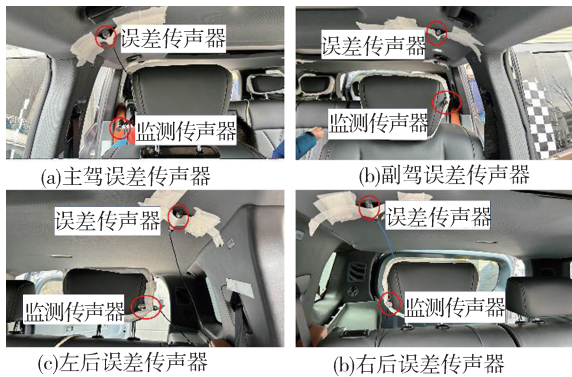
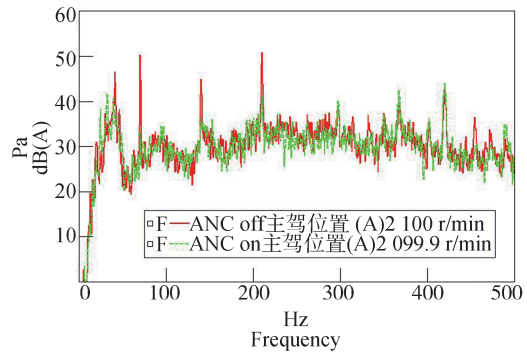
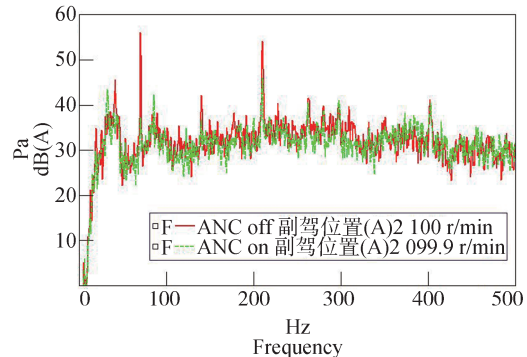


图12 顶棚误差传声器布置图

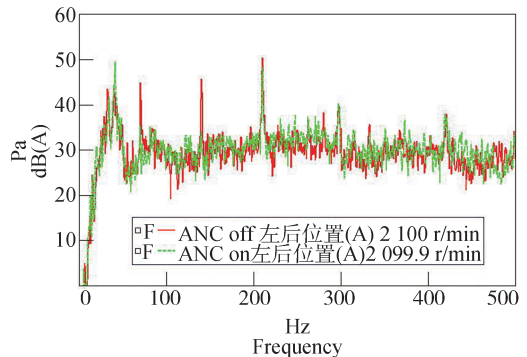
顶棚传声器ANC系统的降噪性能测试结果频谱图分别如图13和图14所示,各阶次降噪量见表7。从频谱图和表7可以看到,增程器2 100 r/min时ANC系统主驾和副驾的2阶降噪量达到17 dB(A)以上,只有右后位置的2阶出现极少量增噪,其它位置的其它阶次降噪效果良好,2、4、6阶噪声在4个座椅头枕位置处的平均降噪量分别可达11.1、7.8和5.1 dB(A);增程器2 600 r/min时ANC系统4个位置的2阶降噪量达到8 dB(A)以上,4阶次降噪效果一般,6阶次降噪效果良好。



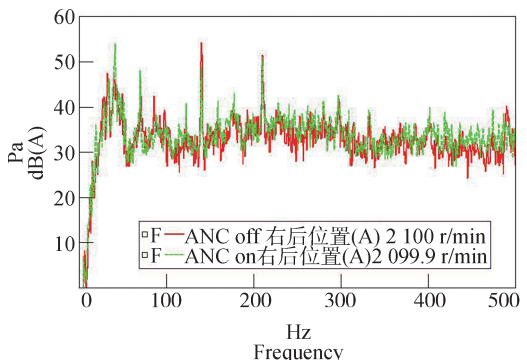
(a)主驾位置降噪结果



(b)副驾位置降噪结果



(c)左后位置降噪结果



(d)右后位置降噪结果

图13 2 100 r/min 工况顶棚传声器各位置降噪频谱图

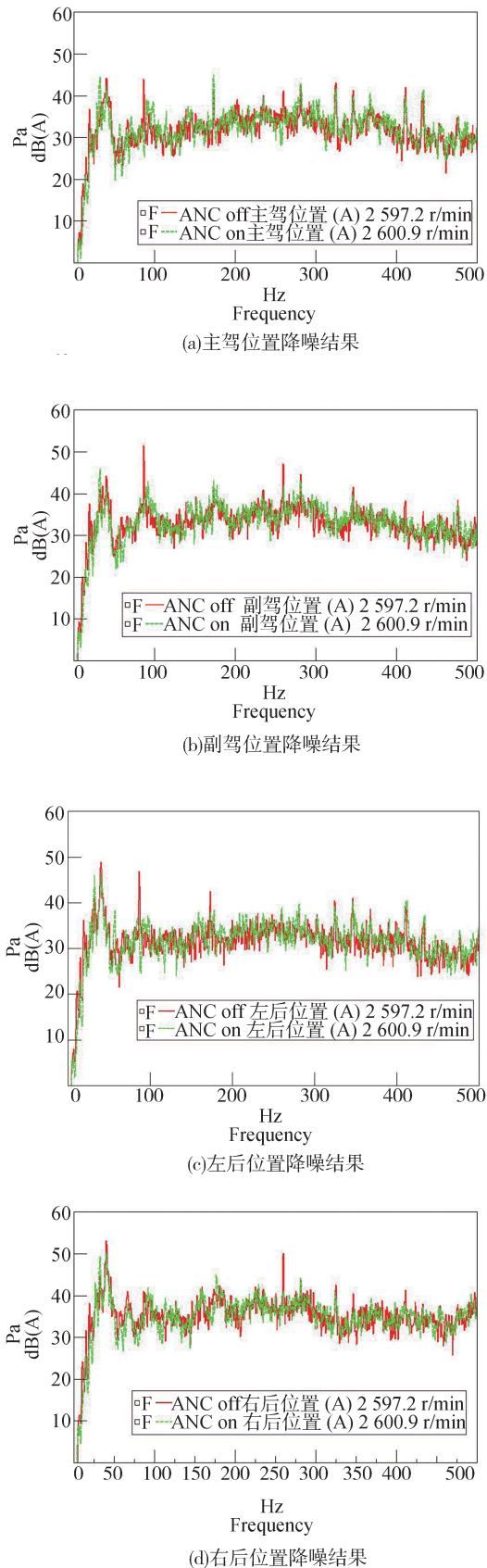


图14 2 600 r/min工况顶棚传声器各位置降噪频谱图

表7 顶棚误差传声器路试实验 ANC 控制

测试结果		dB(A)		
发动机转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	误差传声器 位置	2阶 降噪量	4阶 降噪量	6阶 降噪量
2 100	主驾顶棚	17.4	8.5	9.9
	副驾顶棚	19	5.5	8.1
	左后顶棚	9.5	11.6	2
	右后顶棚	-1.6	5.4	0.4
2 600	主驾顶棚	14.1	-2.6	4
	副驾顶棚	10.9	-0.2	6.3
	左后顶棚	10.5	4.5	1.1
	右后顶棚	8.5	2.5	8.9

## 4 结论

本文提出了一种集群式多通道主动噪声控制系统,旨在解决新能源汽车增程器阶次噪声问题。传统的多通道ANC系统存在集中式控制策略计算量大、成本高和稳定性低以及分散式控制策略降噪效果差、稳定性低的问题。针对这些不足,本文创新性地将集中式与分散式控制策略相结合,提出了集群式控制策略,通过仿真和实车路试实验验证了其有效性。

集群式控制策略通过将车内四通道两两耦合,使系统的计算复杂度降低了50%左右,同时保持了系统的稳定性,并加快了系统收敛时间。仿真分析表明,集群式控制策略在计算复杂度降低的前提下,具有与集中式控制策略相当的降噪效果。增程式电动车的路试实验进一步证实了仿真分析的结果,特别是在前排和后排通道之间耦合关系较弱的情况下,集群式控制策略表现出良好的降噪性能。在增程器2 100  $r/\min$ 时2、4、6阶噪声在4个座椅头枕位置处的平均降噪量分别可达15.9、10.6和5.7 dB(A)。同时,通过改变误差传声器的位置,进一步模拟了实车量产方案,验证了集群式控制系统的适应性和灵活性。在顶棚误差传声器实验中,在增程器2 100  $r/\min$ 时其2、4、6阶噪声在4个座椅头枕位置处的平均降噪量分别可达11.1、7.8和5.1 dB(A)。

所提出的集群式多通道ANC系统在仿真和实车实验中都表现出了良好的降噪效果,这充分证实了其有效性和稳定性。综上所述,集群式多通道ANC系统在实际应用中展现出了良好的降噪效果,为汽车噪声控制提供了一种新的解决方案。

## 参考文献

- [1] 陈辉. 车内路噪自适应主动控制技术[D]. 长春: 吉林大学, 2019.  
CHEN H. Research on adaptive active control technology for interior road noise [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [2] LU L, YIN K, DE LAMARE R C, et al. A survey on active noise control in the past decade—part I: linear systems[J]. *Signal Processing*, 2021, 183: 108039.
- [3] CHEN W, LIU Z, HU L, et al. A low-complexity multi-channel active noise control system using local secondary path estimation and clustered control strategy for vehicle interior engine noise[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 204: 110786.
- [4] DE OLIVEIRA L P, JANSSENS K, GAJDATSY P, et al. Active sound quality control of engine induced cavity noise[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(2): 476–488.
- [5] 夏雪宝, 明志茂, 赵可论, 等. 基于田口法的VS-MFxLMS算法优化及其在船舶舱室主动降噪上的应用[J]. *测试技术学报*, 2022, 36(4): 327–331.  
XIA X B, MING Z M, ZHAO K L, et al. Optimization of VS MFX-LMS algorithm based on Taguchi method and its application in active noise reduction of ship cabins [J]. *Journal of Testing Technology*, 2022, 36 (4): 327–331.
- [6] 郝彩凤, 康玉莹, 赵华勇, 等. 主动噪声控制技术在涡扇飞机飞行试验中的应用研究[J]. *民用飞机设计与研究*, 2024(1): 79–85. DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2024.01.013.  
HAO C F, KANG Y Y, ZHAO H Y, et al. Application research of active noise control technology in turbofan aircraft flight tests [J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2024(1): 79–85. DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2024.01.013.
- [7] 卢炽华, 吴方博, 刘志恩, 等. 液压挖掘机驾驶室窄带主动噪声控制研究[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(11): 167–175.  
LU C H, WU F B, LIU Z E, et al. Research on narrowband active noise control of hydraulic excavator cockpit [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56 (11): 167–175.
- [8] SHI D, LAM B, GAN W S, et al. Block coordinate descent based algorithm for computational complexity reduction in multichannel active noise control system [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 151: 107346.
- [9] IWAI K, KINOSHITA S, KAJIKAWA Y. Multichannel feedforward active noise control system combined with noise source separation by microphone arrays[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 453: 151–173.
- [10] FERRER M, DIEGO D M, PIÑERO G, et al. Active noise control over adaptive distributed networks [J]. *Signal Processing*, 2015, 10782–95.
- [11] KAMALDAR M, HOAGG J B. Centralized and decentralized adaptive harmonic control for sinusoidal disturbance rejection[J]. *Control Engineering Practice*, 2021, 112: 104814.
- [12] DONG Y, CHEN J, ZHANG W. Wave-domain active noise control over distributed networks of multi-channel nodes [J]. *Signal Processing*, 2021, 184: 108050.
- [13] 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.
- [14] YANG L, GAO W, YANG J, et al. A novel active control strategy with decentralized decoupling and wavelet packet transformation: design and verification [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11 (8): 3554.
- [15] PRADHAN S, ZHANG G, QIU X. A time domain decentralized algorithm for two channel active noise control [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 147(6): 3808–3813.
- [16] MOSQUERA-SÁNCHEZ J A, DE OLIVEIRA L P R. A multi-harmonic amplitude and relative-phase controller for active sound quality control [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 45(2): 542–562.
- [17] SONG P, ZHAO H. Filtered-x generalized mixed norm (FXGMN) algorithm for active noise control [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 107.
- [18] 刘东旭. 基于FxLMS算法的汽车风噪ANC系统的研究与实现 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019. DOI: 10.27675/d.cnki.gcydx.2019.001004.  
LIU D X. Research and implementation of automotive wind noise ANC system based on FxLMS algorithm [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2019. DOI: 10.27675/d.cnki.gcydx.2019.001004.