文章编号：1008-1542（2026）00-0000-00

电动汽车加速工况车内声品质主观评价标定及主动控制方法

王运玲[1]，吕星浩[1]，曹蕴涛[2]，李轶鹏[3]，张 帅[1]，张玉琢[1]

（1.河南科技大学车辆与交通工程学院，河南洛阳 471003；

2.中国第一汽车股份有限公司高端汽车集成与控制全国重点实验室，吉林长春 130013；

3.长春工业大学，吉林长春 130012）

摘 要：为开发电动汽车内的主动发声系统，提升加速行驶时车内声音的舒适性和动力感，提出了一种考虑发动机阶次组成、频谱能量分布以及典型车速区间内声音幅值增强等 3 个方面的加速行驶车内声音设计方法。结合车内声音调查、主观评价和测试结果，进行发动机阶次声音的模拟分析，为某 A 级纯电动 SUV 车型构建加速行驶场景下的声学设计方案，并开发基于车载音响系统的主动发声系统，最后进行实车测试。结果表明，所提主动发声系统增加了车内声音的声压级和响度，实现了车内声音尖锐度 1.0 acum 的最大降幅。该主动发声系统能够有效改善电动汽车车内声音品质，为电动汽车加速工况车内声品质主观评价标定及主动控制方法研究提供了参考。

关键词：车辆工程；电动汽车；加速工况；车内声品质；主观评价方法；主动发声系统

中图分类号：U463 **文献标志码：**A

Subjective evaluation calibration and active control methods for interior sound quality in electric vehicle acceleration conditions

WANG Yunling[1]，LYU Xinghao[1]，CAO Yuntao[2]，LI Yipeng[3]，ZHANG Shuai[1]，ZHANG Yuzhuo[1]

(1. School of Vehicles and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China;

2. China FAW Group Corporation, National Key Laboratory of Integrated and Control of High-end Vehicles, Changchun, Jilin 130013, China;

3. Changchun University of Technology, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract: This study aims to develop an active sound generation system for electric vehicles to enhance the comfort and power sensation of the in-car sound during acceleration. A design method for in-car sound during acceleration is proposed, considering three aspects: the composition of engine orders, the distribution of spectral energy, and the enhancement of sound amplitude within typical speed ranges. Based on in-car sound surveys, subjective evaluations, and test results, the simulation analysis of engine order sounds was completed. An acoustic design scheme for the acceleration scenario was established for a certain A-class pure electric SUV model, and an active sound generation system based on the vehicle's audio system was developed. The in-vehicle test results show that the

收稿日期：2025-10-16；修回日期：2025-12-18；责任编辑： 冯民
基金项目：国家自然科基金资助项目（52302408）；河南省重点研发专项（241111241800）
第一作者简介：王运玲（1979—），女，河南鹤壁人，讲师，硕士，主要从事交通行为分析与建模、车辆智能控制方面的研究。
通信作者：张帅，副教授。E-mail：boreke@126.com

active sound generation system increases the sound pressure level and loudness inside the vehicle, achieving a maximum reduction of 1.0 acum in the sharpness of the in-car sound. This active sound generation system can effectively improve the sound quality inside electric vehicles, providing reference for the subjective evaluation calibration and active control method research of in-car sound quality during the acceleration condition of electric vehicles.

Keywords: vehicle engineering; electric vehicle; acceleration condition; in-vehicle sound quality; subjective evaluation method; active sound-generating system

汽车车内声品质是汽车品质最重要的指标之一。目前，提升车内声品质最有效的解决方案是主动发声技术，尤其是加速状态下，主动发声系统可根据运行工况实现声品质需求。

国内外学者所开展的研究工作主要集中在发动机声音拟合、主动发声系统开发、传统汽车发动机声音设计与评价、行人警示声音测试与评价等方面，并取得了较为丰硕的研究成果[1-10]。然而，基于主观评价的电动汽车加速工况下车内声品质的动力感和舒适感兼顾研究较少，主动控制系统开发未充分结合主观需求，已成熟的主观评价方法未有效介入到主动控制系统的前期设计开发中。

为解决上述问题，本文提出一种考虑发动机阶次组成、频谱能量分布以及典型车速区间内声音幅值增强等 3 个方面的加速行驶车内声音设计方法，在此基础上开发了基于车载音响系统的主动发声系统，以期有效改善电动汽车车内声音品质。

1　电动汽车车内声品质需求研究

1.1　加速行驶车内声音品质主观感知分析

针对不同频率构成的加速行驶车内声音，采用双维度主观感知评价原则，从驾驶舒适性和动力反馈两个维度进行感知评估，并设计对应的主观评分体系。

1.1.1　人员确定及方法选择

组织有丰富声学评价经验的 NVH（噪声、振动与声振粗糙度）工程师建立主观评价团队，团队人员具体信息如表 1 所示。采用等级评分法，以舒适感和动力感为评价维度，建立加速行驶车内声品质的十级主观强度分级标准，量化不同加速场景下声学刺激的主观感知程度，主观评价分值等级划分如表 2 所示。

表 1　主观评价团队人员信息表

Tab.1 Information table of subjective evaluation of team members

评价人员	性别	年龄	专业方向	工作年限
A	男	35	NVH 主观评价	11
B	男	30	NVH 主观评价	6
C	女	34	声音品质研究	9
D	男	32	NVH 主观评价	7
E	男	34	声音品质研究	10
F	男	40	整车 NVH 性能开发	14
G	男	38	整车 NVH 性能开发	11
H	男	35	NVH 主观评价	9

表 2　主观评价分值等级划分表

Tab.2 Classification table of subjective evaluation score levels

评价分值	声音品质主观感知描述	满意度
1	无法接受	没有声音品质感
2		
3	很差	
4		
5	需要改进	有一定的声音品质感，但仍需改进
6	可接受	声音品质基本令人满意
7	好	
8	很好	明显的声音品质感
9	非常高	非常强烈的声音品质感
10	好极了	

1.1.2　加速行驶车内声音测试

使用采集声音与回放的方式，通过 HEAD Acoustics 人工头采集样车加速行驶车内声音，将人工头的高度调节到与身高为 1.7 m 的评价人员坐在副驾驶座位时所处高度，如图 1 所示。

选取 12 辆传统内燃机汽车和 2 辆电动汽车。在试验场水平平滑路面上进行加速行驶车内声音测试。对于内燃机汽车，将变速器挡位设定为 3 挡，驾驶员把加速踏板踩至最大行程，实现油门全开。使车辆从该挡位对应的发动机最低转速开始，以全负荷工况加速行驶，将发动机转速提高到 6 000 r/min，同时采集车内声音、发动机转速等信号。在电动车中，选择了 D 档的工作状态，然后再次将加速踏板踩到底，将这辆车从最低的稳定速度启动，加速达 120 km/h，同时将电机的转速信号和车内的声音信号一起收集起来。

图 1　HEAD Acoustics 人工头车内声音测点布置

Fig.1 Layout of sound measurement points in the HEAD Acoustics artificial head vehicle interior

图 2　HEAD Acoustics GmbH 声音回放及主观评价系统

Fig.2 HEAD acoustics GmbH sound playback and subjective evaluation system

1.2　加速行驶车内声音主观评价方法

如图 2 所示，将 14 辆试车中的声学参数输入到 HEAD Acoustics GmbH 声音回放及主观评价系统里。然后，随机对 14 个样品进行编号，隐藏汽车关键信息，仅根据声音样本进行主观评价。

1.2.1　主观评价结果

将评价结果进行汇总，查看各个加速行驶车内声音样本评价结果的一致性，剔除其中与其他评价结果偏差较大的评价结果，以免对最终评价结果产生影响，然后将剩余的主观评价结果分值进行平均，得到主观评价最终结果，如表 3 所示。图 3 为其二维平面结果分布图。

表 3　加速行驶车内声音样本评价结果表

Tab.3 Evaluation results of in-car sound samples during accelerated driving

样车编号	舒适感主观评价分值	动力感主观评价分值
1#	7.5	8.0
2#	8.2	7.0
3#	6.0	6.2
4#	7.0	7.0
5#	8.5	7.0
6#	7.4	7.7
7#	5.8	5.8
8#	7.5	7.5
9#	7.2	6.8
10#	7.0	6.9
11#	8.0	6.8
12#	7.0	8.5
13#	7.0	7.2
14#	6.3	5.8

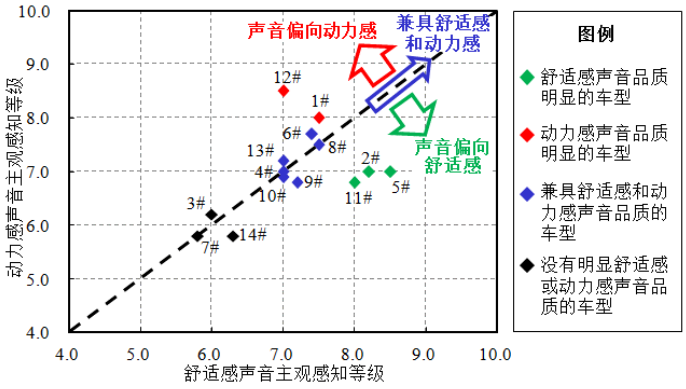
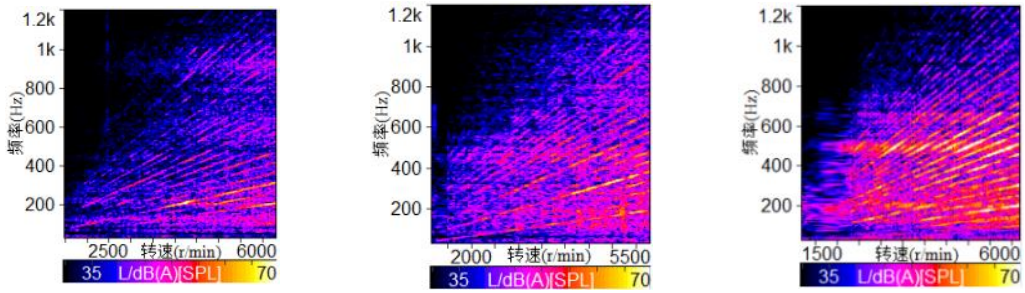


图 3　样车加速行驶车内声音品质感主观评价结果

Fig.3 Subjective evaluation results of the audio quality in the cabin of the prototype vehicle during acceleration driving

1.2.2　主观评价结果分析

以 14 个声音样本为对象，开展基于发动机转速（若为电动汽车则是电机转速）跟踪的快速傅里叶变换（FFT）频谱分析，以 5#、8#、12#为例，如图 4 所示。



a) 5#　　b) 8#　　c) 12#

图 4　评价样车加速行驶车内声音 FFT 频谱例图

Fig.4 Example of FFT spectrum of the interior sound inside the evaluation prototype during acceleration driving

1) 5#车在加速行驶时能带来典型的舒适体验，车内声音表现出色。它拥有幅值最低的车内背景声音，这一特性为车内营造了良好的声学环境，确保了较高的语音清晰度。5#车发动机阶次成分的声音能量和背景声音能量的比值处于理想区间。该车发动机阶次成分丰富多元，在频域分布上呈现显著差异：400 Hz 以下的发动机阶次成分比 400 Hz 以上的更加清晰、易于分辨。在车内，能够明显感知到发动机主阶次（3 阶或 4 阶）成分的声音。

2) 12#车在加速行驶时，车内声音展现出典型的动力感品质。其发动机阶次成分极为丰富，为车内营造出独特的声学氛围。12#车发动机阶次成分的声音能量与背景声音能量的比值略大，这使得发动机阶次声音的幅值更为突出，在车内声音中占据较为显著的地位。12#车发动机阶次成分在 400 Hz 以上的清晰度明显高于 400 Hz 以下，在 450~500 Hz 这一特定频率区间内，发动机阶次成分的声音出现了显著增强的情况。除此之外，该车发动机主阶次成分声音的幅值处于较为合适的水平，保证了声音的平衡和舒适感。

3) 除了前面提到的典型样车，还有一些样车同时具备舒适感和动力感的特征，例如 8#车。8#车同样存在丰富的发动机阶次成分，且以发动机主阶次最为突出。在能量分布上，其 400 Hz 以下和以上的发动机阶次成分能量水平相近。相较于前面所述的两类典型样车，8#车的声品质特征不够鲜明。

1.3 确定车速域内声音幅值的局部增强区域

依托于针对驾驶员动态驾驶行为开展的研究，总结出驾驶员最有可能进行加速行驶操作的车速区间为 40~75 km/h > 0~6 km/h > 15~20 km/h。40~75 km/h 是驾驶员进行加速行驶概率最大的车速区间。具体而言，2 500~4 000 r/min 虚拟发动机转速区间，是通过主动发声控制系统来增强车内动力感体验、提升动力感品质时，应当优先选择的区间。

1.4 舒适感和动力感的声音控制需求

本文以某 A 级纯电动 SUV 为研究对象，为了能够同时兼顾两种声音品质感知要求，借助车内主动发声控制系统找到一个平衡点，达成这款 A 级纯电动 SUV 车内声音具备舒适感与动力感相融合的声音品质特性。

而在加速行驶时，传统内燃机汽车发动机声音在车内声品质方面的具体表现为：

1）发动机阶次成分越多，声音越和谐悦耳，相反则越单调枯燥。多缸发动机具有较强的声音可塑性；

2）在车辆加速行进的过程中，发动机阶次能量的分布区域不同，会让车内声音品质呈现出不同的特质。要是发动机阶次能量在低频率段集中分布，车内的声音听起来就会充满力量感；而当这种能量集中分布在中高频率段时，车内声音则会更偏向于传递出运动感；

3）发动机阶次成分声音幅值会随着发动机转速而增加[11]，进而提升车内动力感或运动感的声音品质感受。

所以，本文针对加速工况下电动汽车车内声音的设计所遵循的指导原则如下：以人的听觉主观感知作为出发点，从发动机阶次构成、频率域的能量分布以及典型车速范围声音幅值增强这三个维度进行全面且综合的考量。开展针对在加速行驶过程中电动汽车车内主动发声系统的声音设计。

2 车内发动机阶次声音拟合与验证

2.1 加速行驶车内声音频谱分析

在加速行驶状态下，相较于传统内燃机汽车，电动汽车车内声音的构成发生了显著变化，原本以中低频特性占主导的发动机阶次成分不复存在，转而被具备高频特性的电机阶次成分以及减速器齿轮啮合阶次成分所替代[12-17]。

2.2 车内发动机阶次声音拟合

2.2.1 传统汽车车内发动机阶次声音测试及分析

在某试验场的水平平整沥青路面上，选定变速器第三挡位工况，慢慢地将加速油门踏板踩下，使发动机的转速从当前挡位对应的最低转速开始，以匀速的状态提升至发动机的额定转速，整个加速过程的时长应在 20 s 以上，采样频率设置为 51.2 kHz。测试得到的某传统汽车加速行驶车内声音时域信号和 FFT 频谱分析如图 5、6 所示。

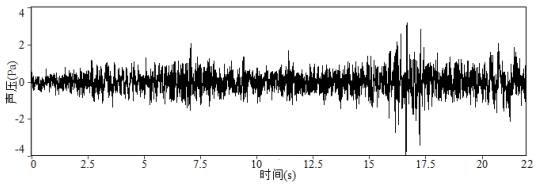


图 5　某传统汽车加速行驶车内声音时域信号

Fig.5 Time-domain signal of the interior sound inside a traditional car during acceleration

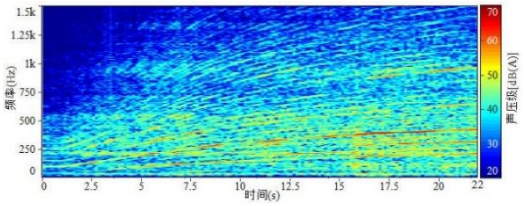


图 6　某传统汽车加速行驶车内声音频谱

Fig.6 Sound spectrum of the interior of a traditional car during acceleration

2.2.2　车内发动机阶次声音合成与验证

采用短时傅里叶变换分析图 7 中的发动机阶次成分。主要参数设置如下：选用 Kaiser 分析窗，β 取值为 5.8，将窗长度设定为 1 280，重叠率设置为 50%，FFT 长度确定为 4 096，时间帧长度设为 0.05 s。之后，通过短时傅里叶综合的方法，对车内发动机阶次成分的声音进行拟合。图 7 呈现的是合成的加速行驶车内声音时域信号，而图 8 则展示了其 FFT 频谱。

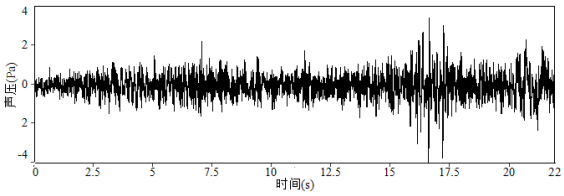


图 7　合成的加速行驶车内声音时域信号

Fig.7 Time-domain signal of the synthesized sound of the vehicle interior during accelerated driving

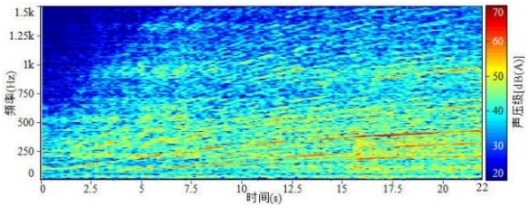


图 8　合成的加速行驶车内声音频谱

Fig.8 Spectrum of the synthesized sound inside a vehicle during accelerated driving

由图 5—8 可知，图 7、图 8 中主要能量分布区域以及主要阶次成分幅值的变化态势均与初始输入信号保持了较高的一致性。

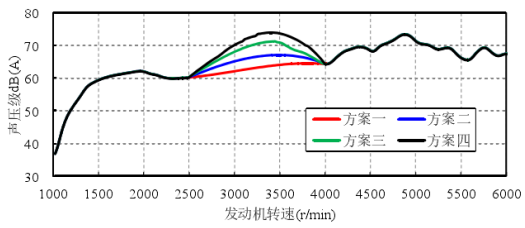
通过主观试听检验发现，合成的加速行驶车内声音和原始声音信号在整体主观听觉体验方面高度相似。不过，二者在声音真实感上存在细微差异，造成这一差别的根本原因是由于高频段发动机的阶次成分在合成过程中产生的误差。这表明，短时傅里叶变换与综合技术能够满足拟合精度要求，可将其应用于车内主动发声控制系统的发动机声音模拟工作中。

3　加速工况主动发声控制方法研究

3.1　加速工况声音设计

加速工况声音设计原则：整体上要体现出舒适感；局部车速区间内要体现出动力感。

借助 Genesis 公司的声学处理软件 LEA，利用其 Active Sound Design 模块构建发动机阶次成分声音。针对 2 500~4 000 r/min 这一虚拟发动机转速范围，设计了不同方案。图 9 表明了不同方案的随发动机转速变化的声音总值变化曲线。组织评价团队对 4 个方案进行主观评价，结果如图 10 所示。



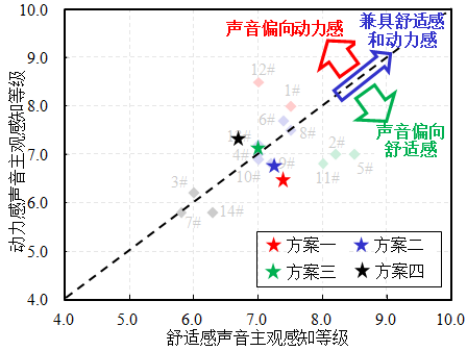


图 9　加速行驶车内声音设计备选方案

Fig.9 Alternative design options for interior sound in accelerated driving scenarios

图 10　四个备选方案主观评价结果分布图

Fig.10 Distribution Chart of Subjective Evaluation Results for Four Alternatives

主观评价结果表明，前两个方案的加速行驶声虽带来舒适驾乘体验，但动力表现稍显不足；方案四强调动力感，却牺牲了舒适性。相较之下，方案三所塑造的车内加速声，在满足舒适需求的同时，赋予了一定的动力属性。综合考量，方案三被选定为电动汽车车内主动发声控制系统的实施方案。

3.2　车内发动机阶次声音总值目标

以一款与该电动汽车定位匹配的传统内燃机汽车为参照，系统剖析其车内发动机阶次声音幅值与其余声音的关联。基于此研究成果，分别设定主动发声系统声音幅值目标趋势线（见图中黑色虚线）和电动汽车车内声音总值目标趋势线（见图中绿色虚线），具体情况如图 11 所示。

根据主动发声系统声音幅值目标趋势线，对所设计方案三转速区间的声音幅值趋势变化进行适当调整，保持声音幅值增强区域不变，分析 100%加速踏板开度工况下的声学特性，得到声音幅值变化曲线，为优化车内声学环境提供依据，如图 12 所示。

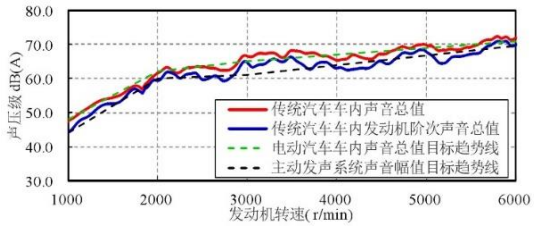


图 11　100%踏板开度下主动发声系统声音幅值目标趋势线

Fig.11 Trend line of the target sound amplitude of the active sound system at 100% pedal opening

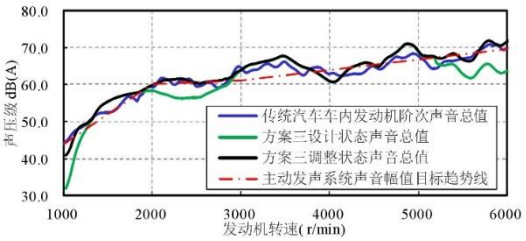


图 12　方案三在 100%踏板开度声音总值随发动机转速变化曲线

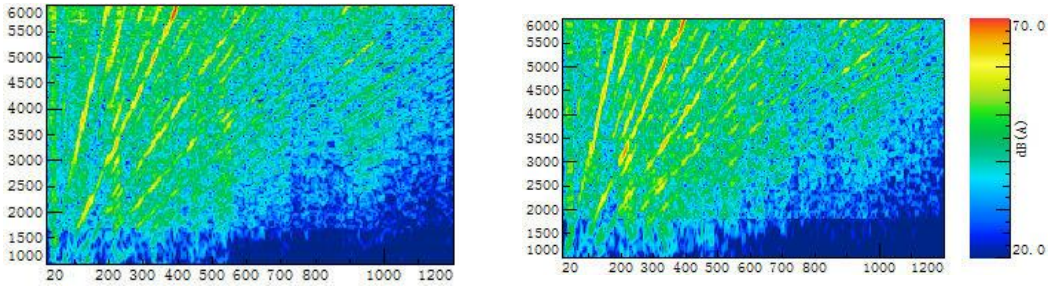
Fig.12 Curve showing the total sound value of Scheme Three at 100% pedal opening as it varies with engine speed

经过调整后，在全转速区间内，系统声音总值的变化趋势与传统汽车发动机阶次声音总值变化趋势保持一致，并且依旧保留了声音幅值增强区域——2 500~4 000 r/min。

3.3　加速行驶车内声音频谱分析

为实现舒适感与动力感的声音控制目标，综合权衡控制参数程序编写复杂度及实际控制可行性，主动发声系统选定车速和加速踏板开度作为声音控制参数。

对传统汽车在加速行驶过程中，不同恒定踏板开度下的车内声音信号开展 FFT 频谱分析：频谱分析的范围确定为 20 Hz~12.5 kHz，发动机转速的分析间隔设定为 20 r/min，频率分辨率设为 4 Hz，以 40%、50%踏板开度为例的 FFT 频谱云图如图 13 所示。



a) 40%　　b) 50%

图 13　加速行驶车内声音随发动机转速变化 FFT 频谱云图

Fig.13 FFT spectral cloud chart of the interior sound inside the vehicle during acceleration as a function of engine speed

3.4 车内发动机阶次声音幅值与动力感相关性分析

汇总各工况下车内发动机阶次声音幅值随发动机转速变化的趋势情况，如图 14 所示。由图可知，选取 3 000~6 000 r/min 的转速区间，作为分析声音幅值与发动机输出功率相关性的优先选择区间。

车内发动机阶次声音幅值趋势随加速踏板开度变化曲线如图 15 所示，随发动机输出功率负荷比变化曲线如图 16 所示。

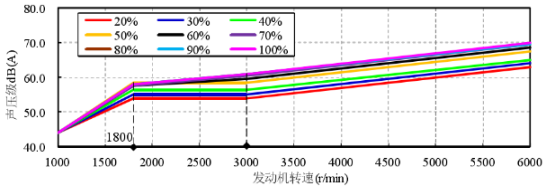


图 14　所有工况车内发动机阶次声音幅值变化趋势

Fig.14 Trend of amplitude variation of engine harmonic sounds inside the vehicle under all operating conditions

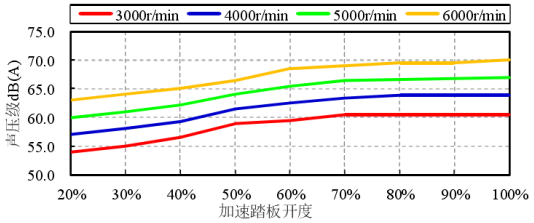


图 15　发动机阶次声音幅值随加速踏板开度变化

Fig.15 Amplitude of engine harmonic noise variation with the opening degree of the accelerator pedal

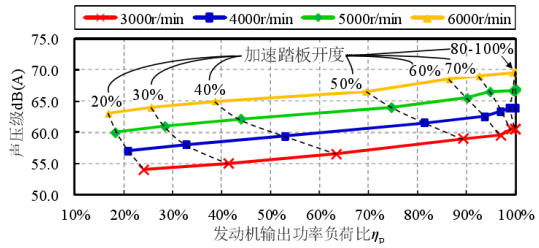


图 16　发动机阶次声音幅值趋势随发动机输出功率负荷比变化

Fig.16 Trend of engine harmonic sound amplitude variation with respect to engine output power load ratio

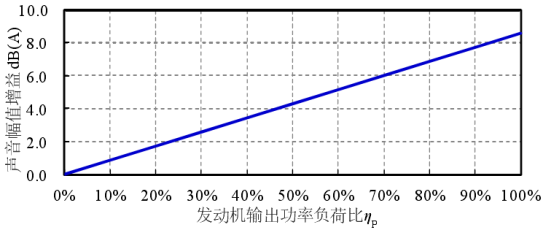


图 17　发动机阶次声音幅值增益随发动机输出功率负荷比变化

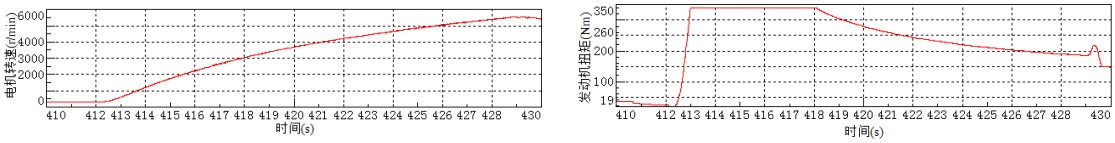
Fig.17 Amplitude gain of engine harmonic sounds varies with the engine output power load ratio

根据图 16 计算得到声音幅值增益系数均值 $\alpha_{AVE}=8.5\left[dB(A)/100\%\right]$。将其适用与发动机的全部功率输出负荷比，如图 17 所示，绘制了车内发动机阶次声音幅值增益与发动机输出功率负荷比的变化曲线。

3.5 电动汽车主动发声参数设定分析

针对不同的加速踏板开度，对电动汽车的电机转速、电机扭矩等参数进行测试，测试准备与上文类似。在本次测试中，选定变速器的 D 挡工况开展实验。驾驶员以较快速度踩下加速踏板，并精准地将踏板开度维持在 20%这一固定数值，在此条件下，电机转速由初始的 0 r/min 逐步加速，直至达到目标转速 6 000 r/min。在整个加速过程中，同步开展相关参数信息的采集与记录工作。之后，分别在 30%~100%的加速踏板开度下重复上述测试流程。

在 60%加速踏板开度下，车内测试结果时间历程曲线如图 18。



(a) 电机转速测试　　(b) 电机扭矩测试

图 18　60%加速踏板开度下各个测试信号时间历程曲线

Fig.18 Time history curves of various test signals at 60% accelerator pedal opening

基于测试成果，针对加速踏板开度保持恒定状态时的电机输出功率展开计算。图 19 为电机输出功率随电机转速变动的曲线关系，图 20 为在不同电机转速条件下，电机输出功率随加速踏板开度的变化。

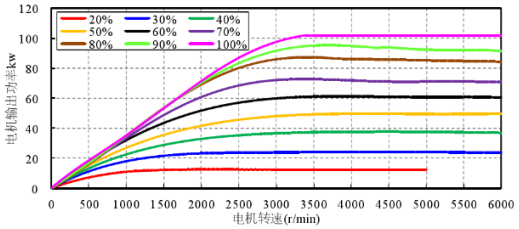


图 19　不同加速踏板开度下电机输出功率随电机转速变化曲线

Fig.19 Curve of motor output power varying with motor speed under different accelerator pedal openings

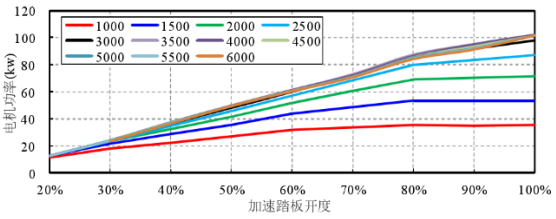


图 20　不同电机转速下电机输出功率随加速踏板开度变化曲线

Fig.20 Curve showing the variation of motor output power with respect to the opening degree of the accelerator pedal at different motor speeds

由图 19 可知，伴随电机转速的持续攀升，电机输出功率呈现出线性递增的态势。当电机转速达到某一特定阈值后，输出功率逐渐趋于平稳，这一表现与典型的电机输出功率特性曲线相吻合。由图 20 可知，当电机转速高于 3 000 r/min 时，若增大加速踏板的开度，电机输出功率会呈现线性增加的趋势。基于此，得出驱动电机输出功率随加速踏板开度线性变化的分布状况，该分布情况如图 21 所示。由图可知，在电动汽车的特定运行工况下，电机输出功率与加速踏板开度呈现线性变化关系。而在传统内燃机汽车中，车内发动机阶次声音幅值增益与发动机输出功率负荷比同样存在线性相关性。基于上述这两个特性开展车内主动发声控制工作，能够赋予电动汽车车内声音独特的声音品质，使其同时拥有舒适感和动力感。

将虚拟发动机转速 1 800 r/min 对应的 24 km/h 车速设为拐点车速，也能从其他低车速里选一个作为替代。当车辆行驶速度低于该设定车速时，要对声音幅值进行适度的“淡入”操作，在这个较低的车速阶段，车内声音的营造重点在于让驾乘者感受到舒适。而行驶速度超过了拐点车速，车内声音的特性就会有所转变，它不再仅仅是舒适，还会融入动力感。以加速踏板开度 100%时声音幅值随车速的变化为基准，结合幅值增益与踏板开度的关联，调整不同开度下声音幅值随车速的变化趋势，让车内声音适配行驶状态。

如图 22 所示，为实现加速行驶时车内声音的舒适体验，特制定声音幅值增益与车速相关的控制曲线。其中，车速为 0 km/h 所对应的最小声音幅值增益 $Gain_{min}$ 需结合实际车辆情况，通过主观试听感受进行针对性调整。

主动发声控制系统依托加速踏板开度和车速的协同调节机制，即便在车速相同的状况下，只要加速踏板开度存在差异，就能对声音幅值实施差异化控制，进而产生相应幅值大小的反馈声音。

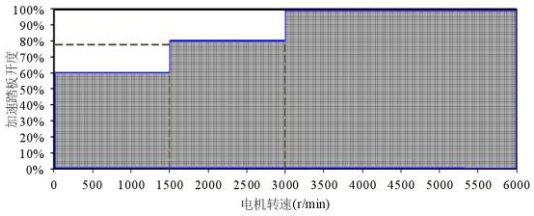


图 21　驱动电机输出功率随加速踏板开度线性变化

Fig.21 The output power of the drive motor varies linearly with the opening degree of the accelerator pedal

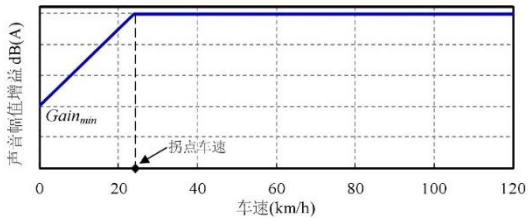


图 22　声音幅值增益随加速踏板开度的控制曲线

Fig.22 Control curve of sound amplitude gain with respect to the opening degree of the accelerator pedal

4　电动汽车车内主动发声控制系统开发

4.1　车内主动发声控制系统开发

车辆运行时，控制系统通过实时采集 CAN 信息中的车速、（电机/发动机）转速、加速踏板开度及挡位数据，与预先设定的声音参数文件进行联合处理，依据当前工况动态生成适配的声音信号。该信号经功率放大器增强后，输送至车内音响系统进行播放，具体原理框架如图 23 所示。

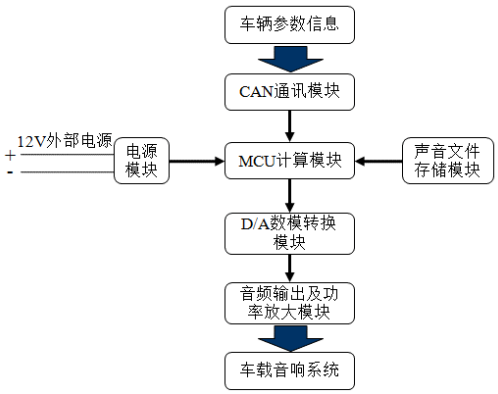


图 23　车内主动发声控制系统原理框架图

Fig.23 Principle Framework Diagram of the In-Car Active Sound Control System

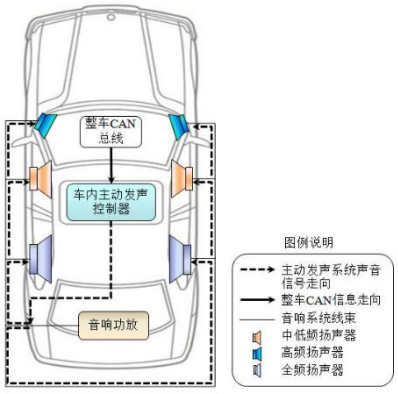


图 24　车内主动发声控制系统示意图

Fig.24 Schematic Diagram of the Active Sound Generation System in the Vehicle

4.2　主动发声控制系统搭建

功放：音响系统功放布置在后备箱内，与 6 个扬声器通过线束连接。

将主动发声控制系统声音输出线与音响系统功放线束连接，最终车内主动发声控制系统如图 24。

4.3　高保真扬声器条件下主动发声系统声音标定

4.3.1　高保真扬声器频率响应测试

选用 GENELEC 公司所生产的 8030B 型双功放有源音箱，将其当作高保真扬声器，在与该扬声器表面相距 0.1 m 之处，布置一个 B&K1890A 型 ICP 传声器，于整车半消声室的环境里，以此开展频率响应测试，具体情况如图 25 所示，图 26 所示为测得的时域信号。

图 25　高保真扬声器频率响应测试

Fig.25 Frequency response test of high-fidelity speaker

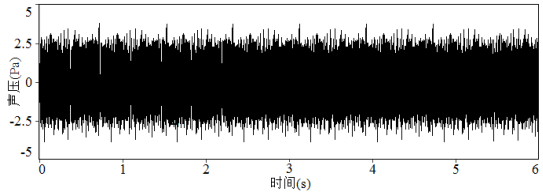


图 26　高保真扬声器声音测试时域信号

Fig.26 Time-domain signal of sound test for high-fidelity speaker

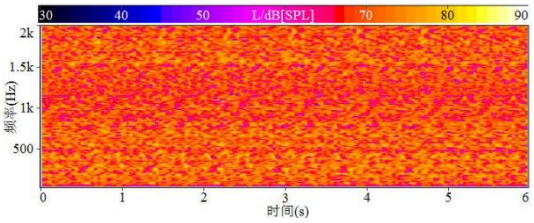


图 27　高保真扬声器测试 FFT 频谱

Fig.27 FFT spectrum of high-fidelity speaker test

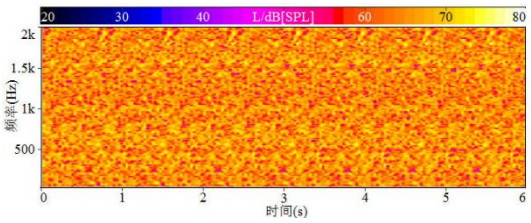


图 28　原始的白噪声信号 FFT 频谱

Fig.28 FFT spectrum of the original white noise signal

对比图 27 和图 28 发现，实验数据表明，在 20~2 000 Hz 频段内，扬声器的频率响应趋势与原始白噪声信号高度趋同，仅幅值因音响系统旋钮设置及测点差异产生变化。这表明该扬声器能够有效还原主动发声系统合成的发动机阶次声音频率特性。

4.3.2　主动发声系统声音合成精度验证

对加速行驶车内声音的最终方案进行离散处理，借助傅里叶变换来获取各个发动机阶次成分的频率、幅值以及相位等信息，并将这些信息导入主动发声控制器。主动发声控制系统调用匹配声学参数，合成发

动机阶次声信号，并基于加速踏板与车速信号计算声信号总体幅值，通过扬声器进行声波辐射。测试过程中，虚拟发动机转速设定为与方案三一致的运行工况——转速从 1 000 r/min 线性升至 6 000 r/min，同步保持加速踏板全开状态。通过调节扬声器音量旋钮，使输出声信号幅值特性与方案三优化设计后的状态趋于一致，继而开展转速动态变化过程中扬声器输出声信号的测试。图 29 为测试得到的模拟加速行驶车内声音时域信号，图 30 为方案三设计状态的原始车内声信号时域波形。

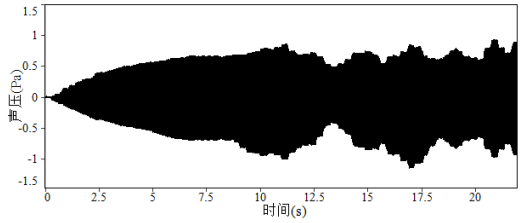


图 29　测试得到的模拟加速行驶车内声音时域信号

Fig.29 Time-domain signal of the simulated sound inside the vehicle during accelerated driving obtained through testing

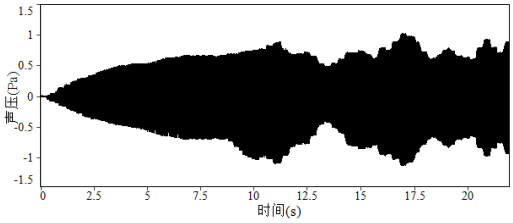


图 30　方案三声音设计状态下的时域信号

Fig.30 Time-domain signal under the sound design condition of Scheme Three

对测试结果加以对比后发现，处于两种不同状态时，声信号在时域特征上基本一致。只是在 15~18 s 时，存在着微小的差别。为了更精准地判断，开展了主观听觉评估工作，从评估情况来看，两种状态下发动机所发出的声信号展现出高度的契合度。由此不难看出，该控制系统的发动机声音拟合精度能够满足系统设计要求。

5　电动汽车主动发声系统车内声音测试与分析

安排一名试验人员坐在驾驶座上，选用了由丹麦 B&K 公司出品的 4189-A-021 型全指向传声器。在传声器的布置方面，严格遵循《GB/T18697-2002 声学汽车车内噪声测量方法》所给出的标准方式，将其安置在靠近司机右耳的位置。为实现对声音信号的有效记录，该传声器接入西门子公司的 SCR205 型多通道数据采集前端。在整个测试期间，为营造稳定且符合要求的测试环境，汽车的所有车门和车窗均全程保持关闭。车内司机右耳位置频率响应测点布置如图 31 所示。

分别在主动发声系统开启与关闭的情形下，对车辆在加速踏板开度达到 100%、处于加速行驶状态时，车内驾驶员右耳位置的声音信号进行测量，计算出车内声压级总值、尖锐度、随车速的变化曲线，以及 FFT 频谱对比，如图 32—36 所示。

图 31　车内司机右耳位置频率响应测点布置图

Fig.31 Layout of frequency response measurement points at the right ear position of the driver inside the vehicle

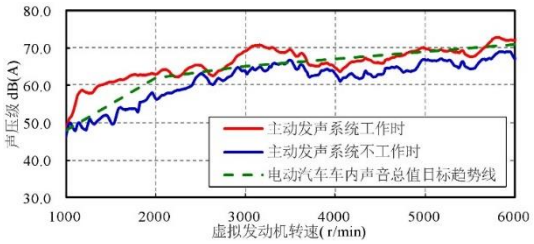


图 32　100%踏板开度加速行驶车内声音总值曲线

Fig.32 Total sound value curve inside the vehicle during acceleration at 100% pedal opening

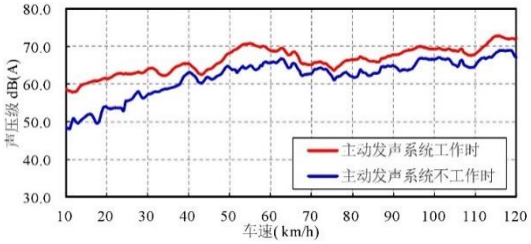


图 33　100%踏板开度下加速行驶车内声压级总值曲线

Fig.33 Total sound pressure level curve inside the vehicle during acceleration at 100% pedal opening

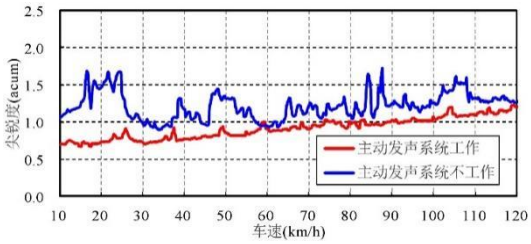


图 34　100%踏板开度加速行驶车内声音尖锐度曲线

Fig.34 Curve of sharpness of interior sound during acceleration with 100% pedal opening

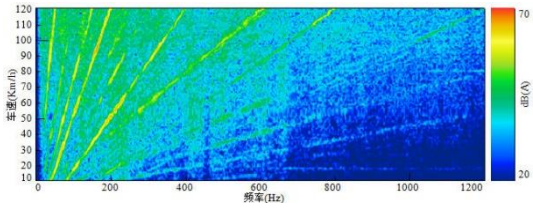


图 35　主动发声系统工作时加速行驶声音 FFT 频谱

Fig.35 FFT spectrum of the accelerating sound produced by the active sound generation system during operation

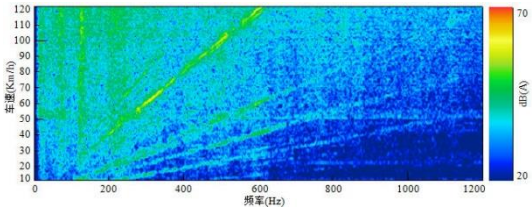


图 36　主动发声系统不工作时加速行驶声音 FFT 频谱

Fig.36 FFT spectrum of the sound of accelerating when the active sound system is not working

由图 32 可知，当主动发声系统处于稳定运行状态时，电动汽车车内声信号的总体幅值能够基本遵循目标趋势线的变化规律。由图 33—36 可知，当主动发声控制系统稳定运行时，车内声环境的声压级呈现提升趋势。然而，声音尖锐度指标获得显著优化，最大优化幅度达 1.0 acum，该优化效果有效降低了原车高频阶次声导致的听觉不适感。

在客观指标层面，该主动发声系统聚焦于发动机阶次成分、频率域能量配置，以及典型车速范围内声信号幅值提升这三大方向，基本达成了既具备舒适感品质又拥有动力感品质的声音设计标准。

6　结　语

以国内某 A 级纯电动 SUV 为研究对象，开展了电动汽车车内声音发展趋势调查研究，开发了车内主动发声系统控制系统，试验证明了该主动发声控制系统稳定运行时，车内声环境的声压级与响度呈现提升趋势，且声音尖锐度的最大优化幅度达 1.0acum。经主客观双重检验，该主动发声系统能显著优化电动汽车加速工况下的车内声品质，有效增强驾乘的舒适感与动力氛围。该主动发声系统能够提升电动汽车加速行驶工况车内声音的舒适感和动力感品质，为电动汽车加速工况下的声品质研究提供了参考。

本文未深入研究主动发声系统对车内语音清晰度及原车音响系统音乐播放效果的潜在影响，没有考虑极端环境（如高低温、强电磁干扰）下系统的稳定性以及产品的成本效益等。未来可开展以上方面的研究，研发能够同时兼顾主动发声效果、语音清晰度及音乐播放质量的智能控制策略，并深入研究环境适应性、电磁兼容性以及成本控制技术，推动主动发声技术的成熟化和大规模产品化应用，为消费者带来更具吸引力的电动汽车驾乘体验。

参考文献：

[1] FANG Yuan,ZHANG Tong.Sound quality investigation and improvement of an electric powertrain for electric vehicles[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(2):1149-1157.

[2] MIN D,PARK B,PARK J.Artificial engine sound synthesis method for modification of the acoustic

characteristics of electric vehicles[J].Shock and Vibration,2018.DOI:10.1155/2018/5209207.

[3] MA Conggan,AN Yuansheng,LIU Lantao,et al.Sound-quality diagnosis method of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles based on critical band analysis[J].IET Electric Power Applications,2019,13(10):1613-1621.

[4] DOLESCHAL F,VERHEY J L.Magnitude of tonal content of electric vehicle interior sounds containing subharmonics[J].Applied Acoustics,2022.DOI:10.1016/j.apacoust.2021.108442.

[5] HE Yuebo,GAO Hui,LIE Hai,et al.Identification of prominent noise components of an electric powertrain using a psychoacoustic model[J].Noise Control Engineering Journal,2020,70(2):102-113.

[6] LIANG Kai,ZHAO Haijun.Application of generative adversarial Nets(GANs)in active sound production system of electric automobiles[J].Shock and Vibration,2020.DOI:10.1155/2020/8888578.

[7] CHANG K J,PARK D C,LEE Y S.Active noise control using a body-mounted vibration actuator to enhance the interior sound of vehicle[J].International Journal of Automotive Technology,2022,23(2):327-333.

[8] WANG Y S,FENG T P,WANG X L,et al.An improved LMS algorithm for active sound-quality control of vehicle interior noise based on auditory masking effect[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2018,108:292-303.

[9]GHANATI G,AZADI S.Active control of vehicle's interior sound field by using multichannel H-infinity robust controller[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D:Journal of Automobile Engineering,2020,234(2/3):725-738.

[10]CHEN Wan,LU Chihua,LIU Zhien,et al.A computationally efficient active sound quality control algorithm using local secondary-path estimation for vehicle interior noise[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2022.DOI:10.1016/j.ymssp.2021.108698.

[11]Kim S, CHANG K J, PARK D,et al.A Systematic approach to engine sound design for enhancing sound character by active sound design[J].SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems,2017,10:691-702.

[12]杨攀.电动汽车电驱动系统声品质评价及预测方法研究[D].西安:西安理工大学,2024.

YANG Pan.Research on Sound Quality Evaluation and Prediction Method of Electric Vehicle Powertrains[D].Xi’an:Xi’an University of Technology,2024.

[13]DU Jinfu,YANG Pan,QU Nanfei.Study on the sound quality of the electric vehicle powertrain under acceleration conditions[J].Measurement,2025.DOI:10.1016/j.measurement. 2024.115414.

[14]SHI Li,CHEN Hongyu,ZOU Haishan,et al.Feedback control of car cabin noise using sound field compensation[J].Applied Acoustics,2025.DOI:10.1016/j.apacoust.2025.110613.

[15]杜进辅,杨攀,曲南飞.电动汽车电驱动系统加速工况声品质评价及预测[J].振动与冲击,2024,43(22):126-134.

DU Jinfu,YANG Pan,QU Nanfei.Evaluation and prediction of the sound quality of the electric powertrain for electric vehicles under acceleration conditions[J].Journal of Vibration and Shock,2024,43(22):126-134.

[16]岳贵平,王刚,杨攀,等.基于主客观评价的电动汽车电驱动系统声品质预测[J].噪声与振动控制,2025,45(5):160-166.

YUE Guiping,WANG Gang,YANG Pan,et al.Soundquality prediction of electric vehicle powertrain based on subjective and objective evaluation[J].Noise and Vibration Control,2025,45(5):160-166..

[17]钱堃,刘珂,王言夫,等.电动汽车车内声品质评价研究进展[J].汽车工程,2024,46(8):1431-1446.

QIAN Kun,LIU Ke,WANG Yanfu,et al.Progress in research on interior sound quality evaluation of electric vehicles[J].Automotive Engineering,2024,46(8):1431-1446.