

车载独立声学空间原型系统设计与评价

严 格¹, 张 喆², 李洪亮², 杨海艳²

(1. 柳州五菱汽车工业有限公司, 广西 柳州 545000;

2. 中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司, 天津 300300)

摘 要:基于 ACC-PM 原理开发出声音分区控制时域滤波优化算法, 结合相关软硬件设计搭建一套车载独立声学空间原型系统, 使得驾驶员与后排右侧乘客能体验到相互独立的声场环境。客观测试和主观评价显示, 该原型系统的声音分区控制效果较为理想。

关键词:独立声学空间; 原型系统; 算法开发; 测试评价

中图分类号: U463.99; TN99

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2022)05-0010-06

Design and Evaluation of Vehicle Independent Acoustic Space Prototype System

YAN Ge¹, ZHANG Zhe², LI Hongliang², YANG Haiyan²

(1. Liuzhou Wuling Automobile Industry Co., Ltd., Liuzhou 545000, China;

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

Abstract: A vehicle individual sound zone (ISZ) prototype is developed in this paper, which enables the driver and the rear right passenger can experience independent sound field environment. This is realized by the development of a real-time ACC-PM-based ISZ algorithm as well as the related software and hardware. The sound compartmentalization effect of the prototype is approved by both objective and subjective tests.

Key words: individual sound zone; prototype system; algorithm development; test and evaluation

车载独立声学空间是指利用声音分区控制优化算法对车内不同音频流进行区域化管理, 使特定音频流只在车内指定区域(亮区)可听, 而在其他区域(暗区)不可听^[1]。近年来, 针对车载独立声学空间系统的研究, 相继提出的声音分区控制优化算法有对比度控制法(ACC)^[1-2]、声场重构法(SFR)^[3-4]、对比度控制-声压匹配法(ACC-PM)^[5]等。英国南安普顿大学是这一领域的先驱, 其采用基于 SFR 算法的最小平方方法为不同车型设计了独立声学空间原型系统^[6-7], 可以满足车内驾乘人员不同的听觉需求; 哈曼等扬声器供应商也开展了广泛研究^[8]。相比之下, 国内在相关领域尚处于起步阶段。

本文以某小型电动车为应用对象, 设计了一套车载独立声学空间原型系统, 可以让驾驶员与后排右侧

乘客分别享有独立的声学环境。该原型系统的核心是在传统 ACC-PM 算法^[5]基础上, 提出一种声音分区控制时域滤波优化算法, 以进一步减小亮区失真度。为了检验该原型系统的声音分区控制效果, 本文还开展了一系列主客观测评。结果显示, 该原型系统可以较好地实现声音分区控制。

1 声音分区控制评价指标与优化算法

1.1 评价指标

目前, 常用的声音分区控制效果评价指标包括亮暗区对比度、亮区失真度、能耗指数等^[1-7]。本文只介绍前两个评价指标, 并以这两个指标为优化参数进行相应的算法开发。

1) 亮暗区对比度(AC)。是指亮、暗区内平均声

收稿日期: 2022-06-27。

第一作者: 严 格(1970—), 男, 高级工程师; 主要从事整车产品开发工作。E-mail: yange@wuling.com.cn。

通信作者: 张 喆(1989—), 男, 博士; 工程师; 主要从事汽车电声技术开发工作。E-mail: zhangzhe2021@catarc.ac.cn。

势能之比,其定义为

$$AC = (\mathbf{p}_b^H \mathbf{p}_b / M_b) / (\mathbf{p}_d^H \mathbf{p}_d / M_d) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{p}_b$ 、 $\mathbf{p}_d$ 分别代表亮、暗区内控制点处声压; M_b 、 M_d 分别代表亮、暗区内控制点数量; 上标 H 代表复数共轭转置矩阵。亮暗区对比度越大, 声音分区控制效果越好。

2) 亮区失真度 (Err)。反映了亮区内声音的失真程度, 其定义为

$$Err = (\mathbf{p}_{bt} - \mathbf{p}_b)^H (\mathbf{p}_{bt} - \mathbf{p}_b) / (\mathbf{p}_{bt}^H \mathbf{p}_{bt}) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{p}_{bt}$ 代表亮区目标声压。亮区失真度越小, 声音失真程度就越低, 声音分区控制效果也就越理想。

1.2 声音分区控制时域滤波优化算法

本文在 ACC-PM^[5] 算法的基础上提出了一种声音分区控制时域滤波优化算法, 可以对任意音频信号进行离线或实时的声音分区控制处理。相比 ACC-PM 算法, 该算法可以减小亮区失真度, 从而获得更好的声音分区控制效果。该算法可以大致分为求解扬声器驱动信号频域滤波系数最优解以及将最优解由频域转换到时域并进行时域滤波两步。

1.2.1 求解扬声器驱动信号频域滤波系数最优解

通常, ACC-PM 算法^[5] 通过寻找合适的扬声器驱动信号频域滤波系数 $\mathbf{q}$, 使得暗区内的声势能 ($\mathbf{p}_d^H \mathbf{p}_d$) 和亮区声压与亮区目标声压之差的内积 ($(\mathbf{p}_{bt} - \mathbf{p}_b)^H (\mathbf{p}_{bt} - \mathbf{p}_b)$) 的线性组合最小。通过引入传递阻抗 $\mathbf{Z}_b$ 、 $\mathbf{Z}_d$ 使得 $\mathbf{p}_b$ 、 $\mathbf{p}_d$ 与 $\mathbf{q}$ 满足

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_b \\ \mathbf{p}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_b \\ \mathbf{Z}_d \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (3)$$

那么, ACC-PM 算法就可以表示为

$$\min_{\mathbf{q}} [\kappa \mathbf{q}^H (\mathbf{Z}_d^H \mathbf{Z}_d) \mathbf{q} + (1 - \kappa) (\mathbf{p}_{bt} - \mathbf{Z}_b \mathbf{q})^H (\mathbf{p}_{bt} - \mathbf{Z}_b \mathbf{q})] \quad (4)$$

式中: κ 为权重系数, 其取值范围在 0 到 1 之间 (通常取接近 1); $\mathbf{p}_{bt}$ 取单位向量。

对式 (4) 中的 $\mathbf{q}$ 求导, 并令求导后的表达式为零, 求解可得

$$\mathbf{q} = [\kappa \mathbf{Z}_d^H \mathbf{Z}_d + (1 - \kappa) \mathbf{Z}_b^H \mathbf{Z}_b + \lambda \mathbf{I}]^{-1} (1 - \kappa) \mathbf{Z}_b^H \mathbf{p}_{bt} \quad (5)$$

式中: 修正项 $\lambda \mathbf{I}$ (λ 为拉格朗日乘子, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵) 用来改善待求逆矩阵的病态程度, 以提高算法的鲁棒性^[9]。

将式 (5) 所得的 $\mathbf{q}$ 代入式 (3), 得到声势能分布重构后的 $\mathbf{p}_b$ 、 $\mathbf{p}_d$, 再进一步代入式 (1)、式 (2), 可以得到亮暗区对比度 AC_1 和亮区失真度 Err_1 。仿真计算规律显示, 通常情况下 AC_1 和 Err_1 均较大, 即虽然亮暗区内声势能分布差异明显, 但亮区内声音失真较为严重, 难以满足声音分区控制的要求。

为了改变这一状况, 本文对式 (5) 所得的 $\mathbf{q}$ 进行幅值与相位变换

$$\mathbf{q}_{opt} = \beta e^{i\theta} \mathbf{q} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{q}_{opt}$ 为变换后的扬声器驱动信号滤波系数; β 为幅值系数 (取正实数); θ 为相角; $\mathbf{q}$ 为式 (5) 所得结果。

分析式 (1) 和式 (3) 可知, 采用形如式 (6) 的变换可以在保持 AC_1 不变的前提下, 最大程度地改善亮区内的声音失真现象, 即有

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{q}_{opt}} (\mathbf{p}_{bt} - \mathbf{Z}_b \mathbf{q}_{opt})^H (\mathbf{p}_{bt} - \mathbf{Z}_b \mathbf{q}_{opt}) \\ \text{s. t. } AC = AC_1 \end{cases} \quad (7)$$

将式 (6) 代入式 (7), 得到

$$\min_{\beta, \theta} \{ \beta^2 \mathbf{q}^H (\mathbf{Z}_b^H \mathbf{Z}_b) \mathbf{q} - 2\beta \operatorname{Re} [\exp(-i\theta) \mathbf{q}^H \mathbf{Z}_b^H \mathbf{p}_{bt}] + \mathbf{p}_{bt}^H \mathbf{p}_{bt} \} \quad (8)$$

式中: $\operatorname{Re}[\dots]$ 代表对括号中内容取实部; i 代表虚数单位。

分别对式 (8) 中的 β 和 θ 求偏导, 并令求导后的表达式为零, 求解可得

$$\begin{aligned} \beta &= |\mathbf{q}^H \mathbf{Z}_b^H \mathbf{p}_{bt}| / [\mathbf{q}^H (\mathbf{Z}_b^H \mathbf{Z}_b) \mathbf{q}] \\ \theta &= \angle (\mathbf{q}^H \mathbf{Z}_b^H \mathbf{p}_{bt}) \end{aligned} \quad (9)$$

将式 (5)、式 (9) 代入式 (6) 得到的 $\mathbf{q}_{opt}$ 即为扬声器驱动信号滤波系数的最优解。使用此最优解可以直接方便地开展数值仿真, 从而预估独立声学空间原型系统的声音分区控制效果。

然而, $\mathbf{q}_{opt}$ 是在频域内求解得到的, 直接使用 $\mathbf{q}_{opt}$ 只能对扬声器驱动信号进行离线滤波, 而无法实现实时处理。因此, 为了能够驱动独立声学空间原型系统进行实时声音分区控制, 需要将 $\mathbf{q}_{opt}$ 由频域转换到时域, 并在时域中对音频信号进行实时滤波。

1.2.2 滤波系数最优解频域时域转换及时域滤波

对式 (6) 得到的 $\mathbf{q}_{opt}$ 进行逆傅里叶变换得到 $\hat{\mathbf{q}}_{opt}$, ‘^’ 代表时域。若 $\mathbf{q}_{opt}$ 与待处理的时域音频信号 $\hat{\mathbf{Q}}$ 采

样频率不同,需先对 q_{opt} 进行重新采样,保证二者采样频率一致。得到 $\hat{q}_{\text{opt}}$ 后,可以通过三个步骤完成对 $\hat{Q}$ 的时域滤波:

1) 将 $\hat{Q}$ 依次截取成若干分段,每个分段包含 4 000 个数据点,分段重叠率为 50%。

2) 对第 i 个分段 $\hat{Q}_i$ 作圆周卷积运算($*$)

$$\hat{Q}'_i = \hat{Q}_i * \hat{q}_{\text{opt}} = \begin{bmatrix} \hat{Q}_{i,1} & \hat{Q}_{i,N} & \hat{Q}_{i,N-1} & \cdots & \hat{Q}_{i,2} \\ \hat{Q}_{i,2} & \hat{Q}_{i,1} & \hat{Q}_{i,N} & \cdots & \hat{Q}_{i,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{Q}_{i,N} & \hat{Q}_{i,N-1} & \hat{Q}_{i,N-2} & \cdots & \hat{Q}_{i,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{q}_{\text{opt},1} \\ \hat{q}_{\text{opt},2} \\ \vdots \\ \hat{q}_{\text{opt},N} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: N 维向量($N=4\ 000$) $\hat{Q}'_i$ 为 $\hat{Q}_i$ 经时域滤波后生成的音频分段,其第 j ($1 \leq j \leq N$) 个元素 $\hat{Q}'_{i,j}$ 可表示为

$$\hat{Q}'_{i,j} = [\hat{Q}_{i,j} \quad \hat{Q}_{i,j-1} \cdots \hat{Q}_{i,1} \quad \hat{Q}_{i,N} \quad \hat{Q}_{i,N-1} \cdots \hat{Q}_{i,j+1}] [\hat{q}_{\text{opt},1} \quad \hat{q}_{\text{opt},2} \quad \cdots \quad \hat{q}_{\text{opt},N}]^T \quad (11)$$

3) 将滤波后的各分段按照下述方式进行组合,得到经过时域滤波后的总音频信号 $\hat{Q}'$:

$$\hat{Q}' = [\hat{Q}'_{11} \quad \hat{Q}'_{21} \quad \hat{Q}'_{31} \quad \cdots] \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{Q}'_{11} &= [\hat{Q}'_{1,1} \quad \hat{Q}'_{1,2} \quad \cdots \quad \hat{Q}'_{1,0.75N}] \\ \hat{Q}'_{k1} &= [\hat{Q}'_{k,0.25N+1} \quad \hat{Q}'_{k,0.25N+2} \quad \cdots \quad \hat{Q}'_{k,0.75N}] \quad (k \geq 2) \end{aligned} \quad (13)$$

即首段取前 75% 的数据点,之后各分段取中间 50% 的数据点(注意 $\hat{Q}'_{k1}$ 中各项角标的第二位从 $0.25N+1$ 一直递增至 $0.75N$),这样可以有效地提高滤波准确度。

2 原型系统设计及控制策略开发

2.1 扬声器壳体

使用 1.2 节得到的结果进行数值仿真(直接用 q_{opt} 对音频信号进行离线滤波),结果显示扬声器距离人耳越近,声音分区控制效果越佳。因而,为了更好地实现声音分区控制,不宜使用原车自带的扬声器(车门及 A 柱内),而应将扬声器布置在座椅头枕的

内部或两侧。为了不破坏原车座椅头枕,本文将扬声器安装在头枕两侧,因此专门为扬声器设计与头枕适配的壳体(图 1)。该壳体本身的吸隔声性能会产生一定的声音分区控制效果,但由下文 2.2 节可知,这并不影响对 1.2 节所述的声音分区控制效果进行有效评估。



图 1 扬声器壳体示意图

2.2 控制器及控制策略

针对本文搭建的车载独立声学空间原型系统的结构特点(主驾位与后排右侧座位为两个相互独立的声学空间,如图 2 所示),本文开发了专用的控制器,其结构框图如图 3 所示。该控制器的核心是基于 TMS320F2812 型 DSP 芯片设计的一组滤波器(滤波器 11、12、21、22),用于运行 1.2 节所述的声音分区控制时域滤波优化算法。除 DSP 芯片外,该控制器还包含 2 个输入通道、存储器、功率放大电路和 4 个输出通道。



图 2 独立声学空间布局形式

与普遍采用的全局控制策略^[6-7]不同,本文采用了局部控制策略。当控制器关闭时,两个原始音频信号(分别对应图 2 中独立空间的信号 1、2)不经过滤波器而直接由放大电路调节增益,之后由各自对应的扬声器播放。这种情况下,次级音频信号 11 与 12 以及 21 与 22 分别相同。此时产生的声音分区控制效果仅源于座椅头枕本身及扬声器壳体的吸隔声性能。而当控制器开启后,以原始音频信号 1 为例,其经过

滤波器 11、12 处理后生成次级音频信号 11、12, 二者不再相同, 经放大电路调节增益后, 分别由前排的两个头枕扬声器播放。此时产生的声音分区控制效果为头枕及壳体与声音分区控制时域滤波优化算法二者贡献之和。因此, 通过比较控制器关闭与开启时声音分区控制效果的差异, 就可以评估出声音分区控制时域滤波优化算法对于提升声音分区控制效果所作的贡献。

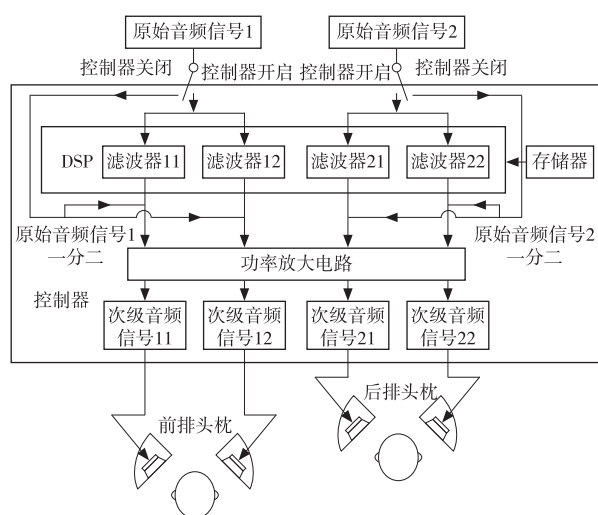


图3 控制器结构框图

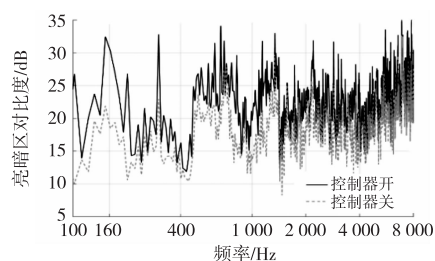
3 声音分区效果测试与评价

3.1 客观测试

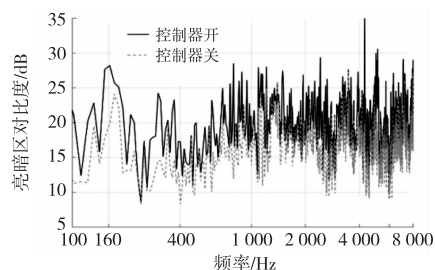
本文分别测量了 100~8 000 Hz 内主驾位及后排右侧座位为亮区时的亮暗区对比度和亮区失真度, 结果如图 4 和图 5 所示。

3.1.1 亮暗区对比度测试

由图 4 可知, 除极个别频点外, 当控制器关闭时, 座椅头枕及扬声器壳体可以提供约 10~33 dB (主驾位为亮区) 和 8~28 dB (后排右侧座位为亮区) 的亮暗区对比度; 而控制器开启后, 亮暗区对比度上升至约 12~35 dB (主驾位为亮区) 和 9~30 dB (后排右侧座位为亮区)。其中, 1 500 Hz 以下提升尤为明显, 两种情形下增幅均达 3~10 dB。针对后排右侧座位为亮区的情形, 虽然 500~800 Hz 及 5 000 Hz 以上的亮暗区对比度略小, 但由于人耳的敏感频率范围大致在 800~4 000 Hz 之间, 故车内人员的实际听觉感受应与主驾位为亮区时基本一致。



(a) 主驾位为亮区



(b) 后排右侧座位为亮区

图4 亮暗区对比度

以上结果表明: 声音分区控制时域滤波优化算法主要在中低频范围内起作用。对于语音等以中低频为主的音频, 使用该算法将有效地提升分区效果; 随着频率增加, 座椅头枕及扬声器壳体的吸隔声性能将逐渐起主导作用, 而算法的作用则不明显。

3.1.2 亮区失真度测试

由图 5 可知, 对于两种亮暗区分形式, 亮区失真度都基本保持在 -5~-15 dB 之间; 随着频率的增加, 失真度逐渐减小。

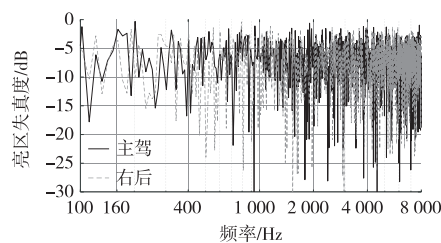


图5 亮区失真度

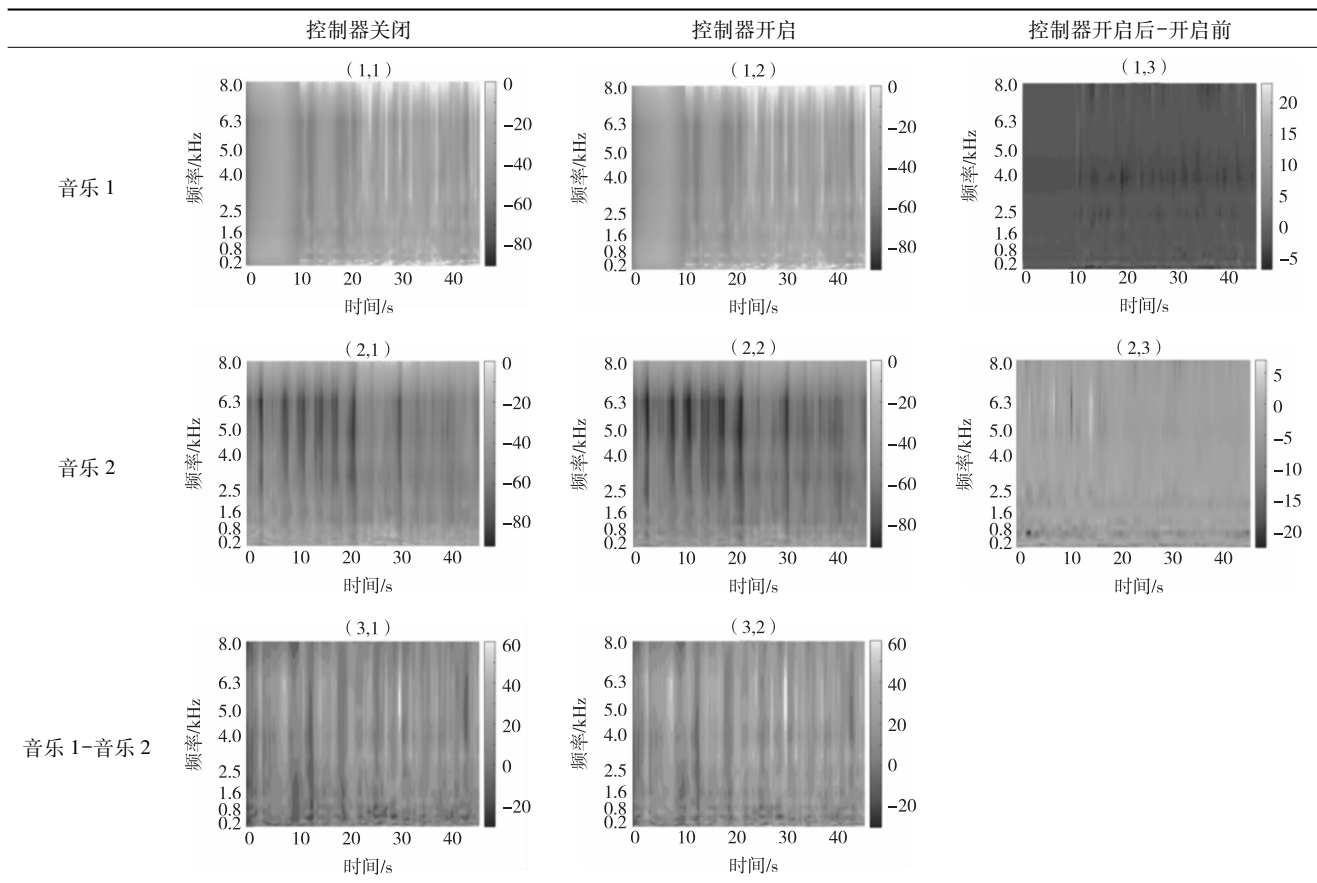
3.1.3 驾驶员耳部声势能变化分析

以上客观测试虽然能反映车内声势能分布差异及声音失真度, 但对于实际评价车内声音分区效果仍显不足。为了更加直观地评估分区后车内的听觉效果, 本文测量并计算了当两座位播放不同音乐 (信号强度一致) 时驾驶员左耳处的声势能 (dB), 结果见表 1。表中各图的具体含义如下: (1,1)/(1,2) 为控制

器关闭时/开启后音乐 1 的声势能时频分布;(1,3)/(2,3)为控制器开启前后音乐 1/音乐 2 的声势能变化;(2,1)/(2,2)为控制器关闭时/开启后音乐 2 的

声势能时频分布;(3,1)/(3,2)为控制器关闭时/开启后两首音乐的声势能之差。

表 1 驾驶员左耳处声势能时频分布



由表 1 可知:对于音乐 1,开启或关闭控制器对其声势能时频分布几乎没有影响(除约 4 000 Hz 处,见图(1,3)),可见施加本文提出的声音分区控制时域滤波优化算法所带来的亮区声音失真现象几乎可以忽略不计;对于音乐 2,开启控制器后,其声势能有所减弱,200~800 Hz 内尤为明显(见图(2,3)),降幅达 5~10 dB,这与图 4 所示的现象一致;由于上述变化,开启控制器后,驾驶员左耳处音乐 1 与音乐 2 的声势能之差增大(比较图(3,1)与(3,2)),即声音分区效果有所提升。

3.2 主观评价

作为对客观测量的补充,本文邀请了 10 名不同年龄受试者参加了非正式主观评价(评价方法见文献[6])。评价中仍然使用音乐与语音两种音频组合,每名受试者均体验了两种不同音频组合下两个座位

的分区效果。

绝大部分受试者对分区效果较为满意,试听中本座位的声音基本可以掩盖从另一座位传来的声音;轻微转头不影响主观感受,但上身大幅度移动会对主观感受带来负面影响。

多数受试者反映,两座位声音品质较好,无明显失真。当控制器开启时,主观感受更佳,主要体现在:分区效果更加明显,头部可活动的范围变大,且声音立体感增强。

与音乐相比,语音提示音分区效果较差,原因在于语音提示音在时域上较为离散,频谱成分也多集中在低频,故其掩蔽能力不及音乐,导致分区效果较差。

4 结束语

本文实车设计了一套独立声学空间原型系统。

该系统以基于 ACC-PM 算法的声音分区控制时域滤波优化算法为基础,可以在车内主驾位与后排右侧座位形成两个相互独立的声学空间。客观测试显示,声音分区控制时域滤波优化算法可以增大低频的亮暗区对比度,且不会带来明显的声音失真;主观评价表明,两座位的分区效果均较为明显,且声品质不错,但声音分区控制空间范围有限。

参考文献:

- [1] CHANG Ji-Ho, LEE Chan-Hui, PARK Jin-Young, et al. A realization of sound focused personal audio system using acoustic contrast control[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 125(4): 2091-2097.
- [2] CHOI Joung-Woo, KIM Yang-Hann. Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111(4): 1695-1700.
- [3] BERKHOUT A J, DE VRIES D, VOGEL P. Acoustic control by wave field synthesis[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 93(5): 2764-2778.
- [4] POLETTI M A, FAZI F M, NELSON P A. Sound reproduction systems using variable-directivity loudspeakers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(3): 1429-1438.
- [5] CHANG Jiho, FINN J. control of sound field with a circular double-layer array of loudspeakers[J]. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2012(12): 4938-5912.
- [6] CHEER J, ELLIOTT J S. Design and implementation of a personal audio system in a car cabin[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133(5): 3251.
- [7] HOUSE C, DENNISON S, MORGAN D, et al. Personal spatial audio in cars - development of a loudspeaker array for multi-listener transaural reproduction in a vehicle[C]//Reproduced Sound 2017, Nottingham, United Kingdom.
- [8] Harman: individual sound zones[EB]. <http://www.individualsoundzones.com>.
- [9] 章康宁, 卢晶. 指向性小尺度线性扬声器阵列鲁棒性研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 180-190.

《客车技术与研究》征订启事

《客车技术与研究》主要刊登内容为国家的科技政策及有关国内外客车技术等方面的学术论文,包括但不限于科研成果和实践经验,标准,新技术、新工艺及新材料,客车市场,客车检测,使用和维修,经营与管理等。其内容丰富,信息量大,专业性、针对性和使用性强,是我国创刊较早、学术水平较高的客车专业性期刊。本刊国内外公开发行,双月刊,大16开本,定价10.00元/册,全年6期合计定价60元,往年合订本80元/套。

国内订阅方式:

1. 全国各地邮局,邮发代号:78-115。
2. 本刊编辑部,电话:023-62653044;QQ:1711088150。

国外订阅方式:中国国际图书贸易集团有限公司,发行代号:BM 2856。