

文章编号:1006-1355(2021)06-0141-08

# 音频注入下的飞机舱内噪声烦恼感抑制与评价

叶睿, 陈克安, 闫靓, 田旭华

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

**摘要:**飞机舱内噪声令人感到烦恼,影响乘坐舒适性。传统的飞机舱内噪声控制方法包括无源降噪和有源降噪两种方式,它们都是以降低声能量为目标的“减法”策略。然而,此类策略存在代价大、实施困难、效果有限等问题。为此,采取基于听觉感知的“加法”策略—音频注入法。首先,人为选择合适调控声注入到飞机舱内噪声中,降低其烦恼感,然后进一步优化调控声参数,使调控声的烦恼感抑制效果更加显著。主观实验结果表明,音频注入法能够降低舱内噪声的烦恼感,最合适信噪比为+9 dB;改变风声与舱内噪声的带宽重叠率 $\delta$ 无法增强风声的烦恼感抑制作用;在自然声中的风声基础上,将风声信号的功率谱斜率改为-3 dB/倍频程时,风声对舱内噪声的烦恼感抑制作用更加显著。

**关键词:**声学;音频注入法;声掩蔽;飞机舱内噪声;烦恼度;功率谱斜率

中图分类号:O422.8;B845.2

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2021.06.023

## Annoyance Suppression and Evaluation of Aircraft Cabin Noise Based on Audio Injection Approach

YE Rui, CHEN Kean, YAN Liang, TIAN Xuhua

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Aircraft cabin noise is annoying and affects the comfort of passengers. Traditional aircraft cabin noise control mainly includes passive and active noise control methods, both of them belong to the “subtraction” strategy aiming at sound energy reduction. Such a strategy has several drawbacks such as high cost, difficulty in implementation, and limited performance effect. In this paper, an “addition” strategy based on auditory perception, called audio injection approach, is proposed and adopted to reduce the annoyance of aircraft cabin noise. Firstly, the adjustable sound, which is capable to reduce the annoyance of cabin noise, are chosen and injected to the cabin noise. Then additional parameter control of the injected adjustable sound is conducted to enhance the annoyance suppression effect. The subjective experiment results show that the audio injection approach can effectively reduce the annoyance of cabin noise and the optimal SNR is +9 dB. Changing the bandwidth overlap rate  $\delta$  of wind sound and cabin noise cannot improve the suppression performance of wind sound. However, when the power spectrum slope of wind sound is changed to -3 dB/octave, the suppression performance of wind sound to the annoyance of the cabin noise is significant.

**Key words:** acoustics; audio injection method; sound masking; aircraft cabin noise; annoyance; slope of power spectrum

飞机舱内噪声是影响乘客舒适感的重要因素。众多研究表明,过量的舱内噪声会影响乘客与飞行员的舒适感,严重的有可能使他们出现疲劳、心跳加快、血压升高等症状,并且飞机内部的设备仪器也会

因舱内噪声与振动产生失稳和灵敏度减弱等现象<sup>[1-3]</sup>。一直以来,对飞机噪声控制的研究都是从噪声源、传递路径和舱内降噪等3个方面进行,主要采取无源降噪(Passive noise control)和有源降噪(Active noise control)两种方法。

无源降噪一方面可以采用降低噪声源声辐射的方法,从根本上降低噪声,另一方面可以优化噪声传递路径,增大噪声传递的声损失,从而减少传递到舱内的噪声。然而无源降噪存在的问题是,该方法需要修改机身结构,在飞机限重的条件下,降噪效果有限,尤其是对于低频噪声的降低效果欠佳。有源降

收稿日期:2020-10-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12074316)

作者简介:叶睿(1997-),女,湖北省十堰市人,硕士研究生,主要研究方向为心理声学、音频输入法。

E-mail: 2018260604@mail.nwpu.edu.cn

通信作者:陈克安(1965-),男,博士生导师。

E-mail: kachen@nwpu.edu.cn

噪是通过设置次级声源或振源,使之产生与噪声源声模态相位相反、幅值相等的声振信号来抵消舱内噪声的声模态,从而消除噪声源产生的声模态。与无源降噪相比,有源控制的方法不需要改善飞机结构,是一种有效的方法。然而,有源控制作用的频带较窄。虽然该技术对低频噪声降噪效果较好,但控制后的高频声因此变得相对突出,因此尽管有源降噪有一定的成效,但乘客的舒适度未必一定会降低。

为了降低噪声的烦恼感,提高声舒适度,研究者们转而从噪声的声品质入手。国外的学者们进行了声掩蔽效应(Sound masking)相关的研究,Schlittmeier和Hellbrück探讨了背景音乐是否可以降低噪声带来的主观干扰<sup>[4]</sup>。Coensel等<sup>[5]</sup>将自然声中的喷泉声和鸟鸣声与道路交通噪声构成声景观,掩蔽道路交通噪声带来的烦恼感。Vassie<sup>[6]</sup>进行了掩蔽声对开放式办公室工作人员注意力影响的研究,发现掩蔽声可以降低办公室噪声的烦恼感,同时增加私密性。2012年李争光<sup>[7]</sup>提出,在降低噪声声级以外,可以通过改变声音频谱结构、声品质以及声音与周围环境构成的声景观来达到改善声环境的目的,并且选用粉红噪声来掩蔽变电站噪声。陈勇勇等<sup>[8]</sup>也进行了变电站噪声的烦恼度评价研究。曹景攀等<sup>[9]</sup>在2016年报告了掩蔽效应在车内声品质研究中的应用,并建立基于掩蔽效应的烦恼度评价模型。

研究表明,利用声掩蔽效应降低噪声的烦恼感是一种可行的方法。然而,针对飞机舱内噪声的烦恼感抑制,国内外并无相关研究。本文在上述研究成果的基础上,选用一种声音来掩蔽和调节飞机舱内噪声,并对该声音的参数进行优化,寻找调节效果显著的调控声。

## 1 研究思路与方法

本文将声掩蔽效应运用于飞机舱内噪声上,通过向舱内噪声中注入音频声,使噪声的烦恼感降低,该方法称做音频注入法(Audio injection approach)。

### 1.1 概念与术语

音频注入法也称音频调控法,是通过加入人工可调节的音频(可听)声,达到使原始声(目标声, Target sound)烦恼感降低的一种噪声控制方法,属于噪声控制中基于感知的“加法”策略。用于降低目标声烦恼感的可听声为调控声(Adjustable sound),又称次级声。目标声和调控声叠加的声音,即改变后的目标声为叠加声(Combined sound)。声音叠加之后,叠加声的声能量会有不同程度的增加,但是其烦恼感可能降低也可能增加。叠加声烦恼感有所降低的效应为相消效应(Inhibition effect),相反,叠加

声烦恼感增加即为相长效应(Synergistic effect)。

### 1.2 研究思路

本文中的目标声选为波音737-800舱内噪声。对于调控声,Valtteri和David等在关于开放式办公噪声掩蔽的研究中指出,在公共场所,可以使用至少3种声音为调控声:

(1) 由白噪声经过不同滤波器产生的人工掩蔽声,如粉红噪声、棕色噪声等;

(2) 通风声、鸟鸣声和水流声等自然声;

(3) 不会对工作产生影响的音乐声<sup>[10]</sup>。本文首先将上述种类的可听声作为备选注入目标声,进行烦恼感评分实验,选取能够降低烦恼感的可听声作为调控声。确定调控声类型后,进行叠加声信噪比的研究,确定一个合适的信噪比。下一步改变调控声参数,形成不同参数的调控声,将其以合适的信噪比注入目标声,进行叠加声烦恼感主观评价试验,得到烦恼度评分最低的叠加声,对应的调控声参数即为最优,研究思路如图1所示。

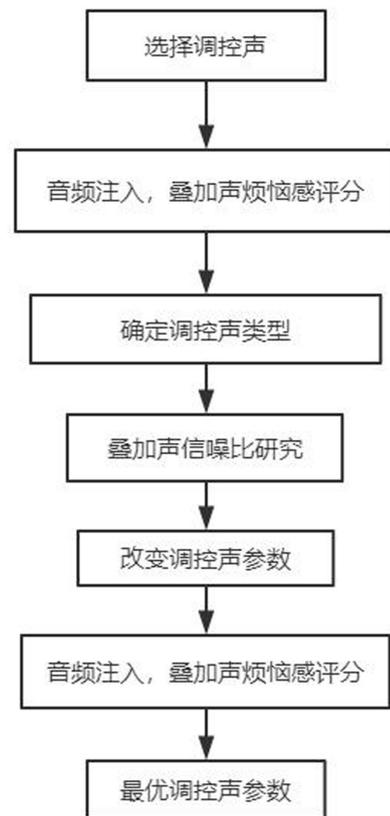


图1 研究思路流程图

### 1.3 目标声样本

本文的研究对象为波音737-800的飞机舱内噪声,一共布置23个测点,对应位置如图2所示。

噪声采集在机舱内进行,数据采集设备为丹麦B&K公司的PULSE测量系统。采样频率设置为32 768 Hz,采样时长为20 s。5 s时长的声样本可以

产生稳定的感知印象,也可避免时间过长导致被试疲劳,降低评价结果的信度。因此,数据采集完毕后,选取平稳的信号段,截取为时长5 s的声样本,用作主观实验。

#### 1.4 备选调控声

Hongisto 等<sup>[10]</sup>在关于开放式办公噪声掩蔽的研究中指出,在公共场所,可以使用至少3种声音为调控声。考虑到乐声可能会影响乘客休息,转移注意力,因此不选取乐声作为调控声。考虑到自然声中的流水声和鸟鸣声与飞机舱内环境不协调,易造成乘客困惑,为此在 [https:// findsounds. com](https://findsounds.com) 网站上下载5种不同的风声,构成自然调控声样本集。由于网站上并未说明风声的详细信息,风速数值尚不明确,所以仅从听感上将风声进行分类。利用 MATLAB 软件生成高斯白噪声,再将白噪声经过滤波生成4种有色噪声,构成人工调控声样本集。最终,调控声备选类型包括10种可听声(表1)。

表1 调控声备选类型

声样本编号	调控声类型	样本说明
1		高斯白噪声
2		粉红噪声
3		棕色噪声
4	人工调控声	蓝色噪声,随着频率的增加,其功率密度每倍频程增加3 dB
5	人工调控声	紫色噪声,随着频率的增加,其功率密度每倍频程增加6 dB <sup>[11]</sup>
6		风声1
7		风声2
8	自然调控声	风声3
9		风声4
10		风声5

## 2 调控声设计

确定目标声样本集和调控声类型后,首先需要选取能够掩蔽舱内噪声的调控声类型,其次调整调控声参数,进而确定最优的调控声参数。

### 2.1 阈限实验

音频注入通过声音叠加实现,在目标声样本集和调控声备选类型范围内,邀请有经验的专家试听调控声和目标声,选出这5种人工调控声、5种自然调控声(风声)以及23个目标声的参考声,将参考目标声作为信号,参考调控声作为噪声进行叠加,用于确定叠加声的信噪比范围。

信噪比范围由上下阈值规定,下阈值  $T_L$  (Lower threshold) 是指在叠加声中刚好听不到目标声时的信噪比,上阈值  $T_U$  (Upper threshold) 是指在叠加声中刚好听不到调控声时的信噪比。叠加声的信噪比应在上下阈值之间变化。

经过初步的听音感受,发现注入人工调控声后的目标声烦恼感无明显降低,因此排除人工调控声。将自然调控声注入目标声进行试听,大致确定  $T_L = -20$  dB、 $T_U = +25$  dB,即叠加声信噪比在  $-20$  dB~ $+25$  dB 之间。阈限确定之后,将参考调控声与参考目标声叠加,信噪比以步长5 dB变化,得到10个叠加声。邀请5~6个西北工业大学航海学院环境工程和声学专业的学生作为被试,他们都拥有主观评价实验的经验。被试根据要求选出上下阈限的值,涵盖所有人的选择范围,得到上下阈限的取值范围。在取值范围内进一步缩小信噪比步长为1 dB,再次进行试听,将所有人的均值作为绝对阈限值,最终得到  $T_L = -7$  dB、 $T_U = +14$  dB,即叠加声信噪比在  $-7$  dB~ $+14$  dB 之间。

### 2.2 调控声类型选择

在阈限范围内,将5种自然调控声分别与参考目标声以相同的信噪比叠加,得到5个叠加声,通过自身试听筛选出叠加7号、9号和10号调控声后,烦

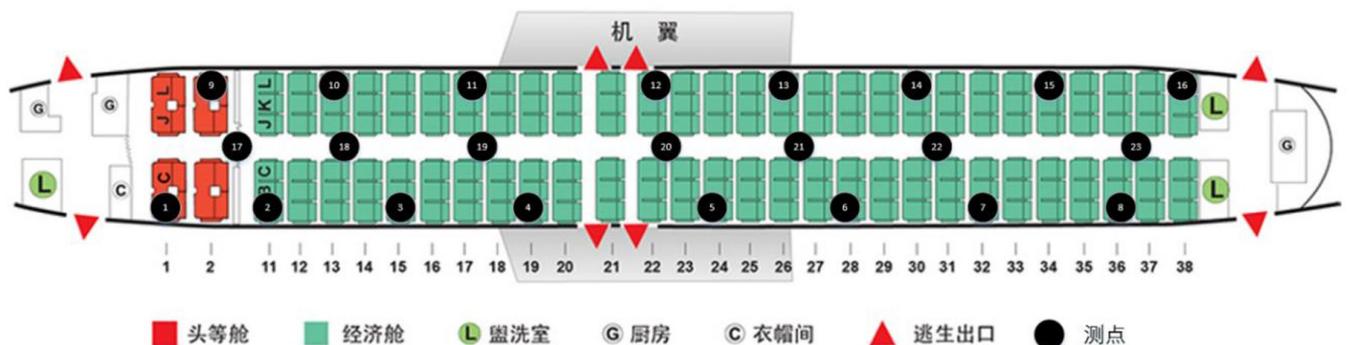


图2 舱内噪声测点布置图

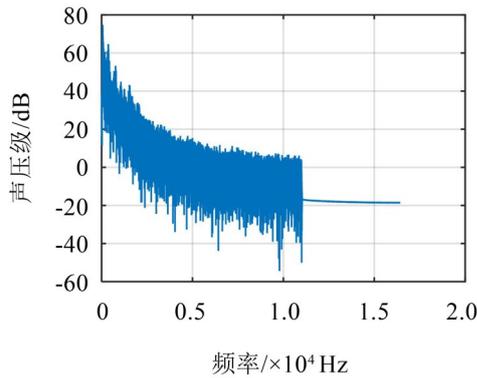


图3 10号调控声频谱图

恼度有所改善。分别邀请7个声学 and 7个非声学专业的人通过试听筛选出的叠加声,最终选出烦恼度改善效果明显的10号调控声。10号调控声频带范围为0 Hz~11 kHz,频谱图如图3所示。

### 2.3 叠加声信噪比

通过阈值实验最终得到  $T_L = -7$  dB、 $T_U = +14$  dB,即叠加声信噪比在  $-7$  dB~ $+14$  dB 之间。将参考目标声和10号调控声以不同的信噪比叠加,将信噪比以1 dB为步长进行变化,得到22个待评价叠加声样本。

### 2.4 调控声参数设计

上述预实验已经证明了音频注入法降低噪声烦恼感的可行性。本文重点研究能够改善目标声烦恼感的调控声特性,在确定10号调控声的基础上,将其经过不同的处理,形成多种人工可调节声,进一步找出可改善目标声烦恼感的调控声特性。

将10号调控声按两种方式进行处理,第一种是经过不同通过频率的低通滤波器,滤掉不同比例的高频部分;第二种是改变10号调控声的功率谱斜率。通过这两种调节方式产生不同的调控声,再经过主观实验选出最合适的调控声特性。

#### 2.4.1 带宽重叠

目标声和调控声频谱图如图4所示,4 kHz以内是声压级的主要贡献,所以第一种调控声处理方式采取滤掉调控声高频部分、保留中低频部分的方法。

将滤掉的高频部分量化,用频谱重叠程度来衡量,定义频谱的重叠程度为带宽重叠率 $\delta$ ,指目标声与调控声带宽重叠的程度,用式(1)表示:

$$\delta = \frac{f_2 - f_1}{\max\{f_{T2}, f_{A2}\} - \min\{f_{T1}, f_{A1}\}} \quad (1)$$

其中: $f_1$ 、 $f_2$ 为目标声和叠加声频谱重叠部分的频率上下限; $f_{T1}$ 、 $f_{T2}$ 为目标声能量集中部分的频率上下限; $f_{A1}$ 、 $f_{A2}$ 为调控声能量集中部分的频率上下限。

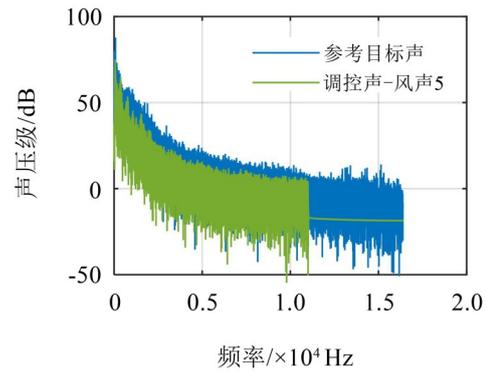


图4 目标声与调控声的带宽重叠

则有原始调控声与目标声的带宽重叠率 $\delta = 0.67$ 。将 $\delta$ 分成4份,取对应低通滤波器的通过频率分别为2.8 kHz、5.6 kHz和8.4 kHz,滤波器衰减斜率 $k_F$ 都为 $-200$  dB/octave,则分别对应 $\delta = 0.17$ 、 $\delta = 0.34$ 、 $\delta = 0.51$ ,频谱图如图5所示。将4种 $\delta$ 不同的调控声与目标声叠加,则每个目标声对应4个 $\delta$ 不同的叠加声。

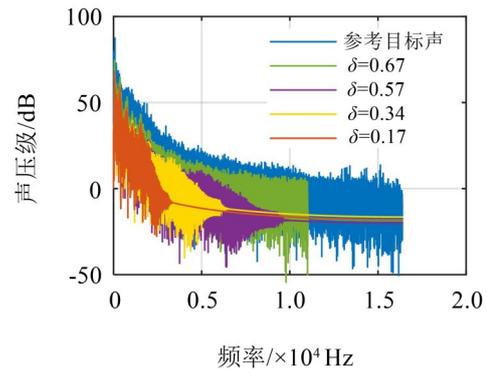


图5 不同带宽重叠率

#### 2.4.2 功率谱斜率

第二种方法是改变调控声的功率谱斜率,将10号调控声进行功率谱斜率 $k_P$ 的变化,在10号调控声的基础上,将其功率谱斜率改为每倍频程增加3 dB、6 dB( $k_P = +3$  dB/倍频程、 $+6$  dB/倍频程)和每倍频程下降3 dB、6 dB( $k_P = -3$  dB/倍频程、 $-6$  dB/倍频程),但是改变功率谱后,原本风声中没有能量的高频部分增加了一些能量(频谱图如图6)。

为了保证同样的带宽重叠率 $\delta = 0.67$ ,将改变功率谱的风声通过衰减斜率 $k_F = -200$  dB/倍频程、通过频率为11 kHz的低通滤波器,滤掉增加的高频能量,这样就保证了 $\delta$ 的一致,频谱图如图7所示。改变功率谱斜率后产生了4个改变功率谱调控声,相应的每个目标声增加了对应的4个改变功率谱斜率叠加声。

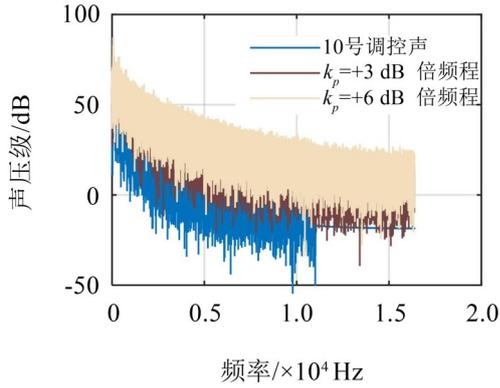


图6 改变功率谱斜率后的调控声

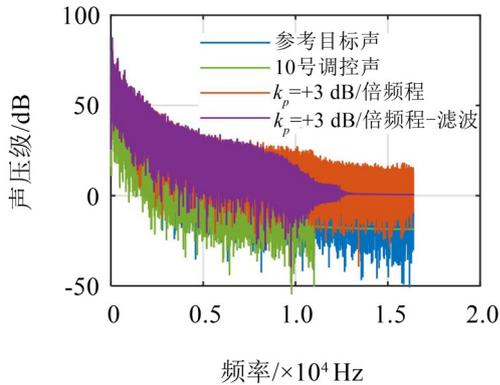


图7 滤波后的改变功率谱斜率调控声

通过试听,  $k_p = +6$  dB/倍频程的调控声叠加到目标声上, 烦恼度显著增加, 因此在主观实验中剔除这个叠加声, 即改变功率谱斜率后, 每个目标声只对应3个叠加声。

经过两种方式处理, 10号调控声对应6种调整参数的调控声, 加上原始10号调控声, 将这7种调控声分别与目标声叠加, 形成叠加声, 用作主观实验的声样本。

表2 10号调控声参数设计

方法	参数设计
带宽重叠率	$\delta=0.51$
	$\delta=0.34$
	$\delta=0.17$
功率谱斜率	$k_p = +3$ dB/倍频程
	$k_p = -3$ dB/倍频程
	$k_p = -6$ dB/倍频程

### 3 主观评价实验及数据处理

经过2种调控声方法处理, 每个目标声对应7种

叠加声, 加上目标声本身也需要进行烦恼度评分, 每个声样本重复评价2次, 共计368个待评分声样本。考虑到被试疲劳会导致实验结果不准确, 实验分两次进行。

#### 3.1 主观评价实验

主观实验的声样本随机排序, 由 Windows media player 音频播放软件播放, 通过一个24位的声卡传至16通道耳机放大器 (BEHRINGERHA4700), 再经动态、开放式高保真监听级头戴耳机 (SENNHEISER HD600) 进行播放。

实验中采用参考评分法<sup>[12]</sup>, 通过邀请专家试听, 选取10号目标声作为参考声样本。参考声样本播放5秒, 中间停顿2秒, 接着播放需要评价的5秒声样本。实验过程中每30分钟休息一次, 一次实验共耗时约1小时20分钟。大量研究表明,  $7 \pm 2$  级评分尺度是最佳的范畴数值<sup>[13]</sup>, 实验中采用7级评分尺度 (见表3), 烦恼度问卷如图8所示。招募24名听力正常的被试, 年龄在18~40岁之间, 男女比例为1.4:1, 实验结束后给予一定的酬劳。

飞机舱内噪声烦恼度问卷

\*1. 您的性别:

男  女

\*2. 您的年龄段:

18~25  26~30  31~40  41~50  51~60  60以上

\*3. 是否参加过类似的听音实验:

是  否

\*4. 标题

1 2 3 4 5 6 7

特别不烦恼        特别烦恼

图8 烦恼度问卷

#### 3.2 数据分析

主观实验结束后, 得到24名被试关于叠加声的烦恼度评分。利用 SPSS 软件对被试的数据进行聚类分析 (图9), 19号被试与其他被试的距离较远, 剔除19号被试数据。

采用参考评分法, 若被试对参考声样本的评分不为4, 则认为被试存在  $i-i$  误判; 所有被试对叠加声样本进行2次重复评价, 2次  $j-i$  评价之间的差值应不大于2, 否则认为被试存在  $j-i$  误判。计算每位

表3 7级烦恼度评分量表

不烦恼	特别	比较	稍微	相同	稍微	比较	特别	烦恼
	1	2	3	4	5	6	7	

被试的误判率,误判率大于0.4,即一致性系数低于0.6,则剔除该被试。分析2次评价的线性相关性,若某被试线性相关系数低于0.6,说明2次评价线性关系弱,剔除该被试。

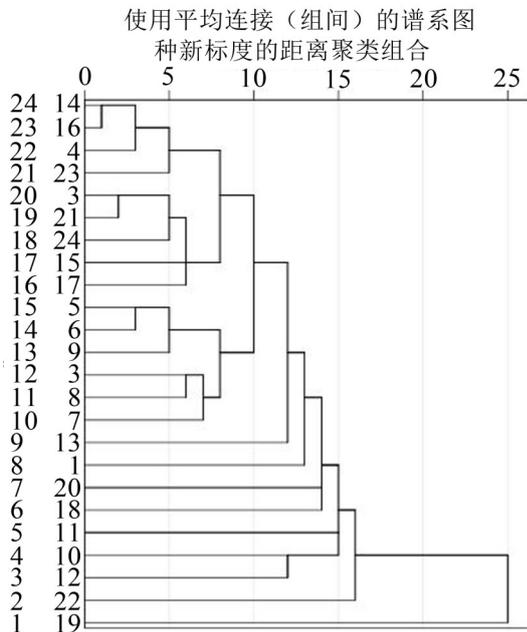


图9 聚类分析

最终剔除19、18、4、14、17、20、21和24号被试的数据(见图10、图11),求出剩余16名被试的烦恼度评分均值,即为最终的烦恼度评分。

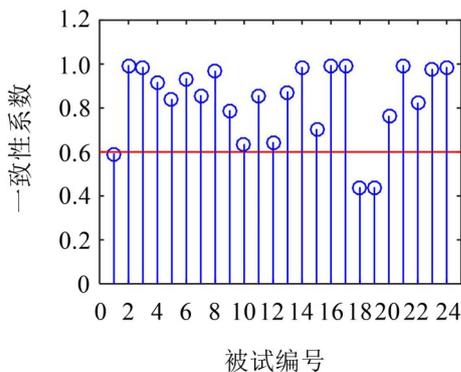


图10 误判分析

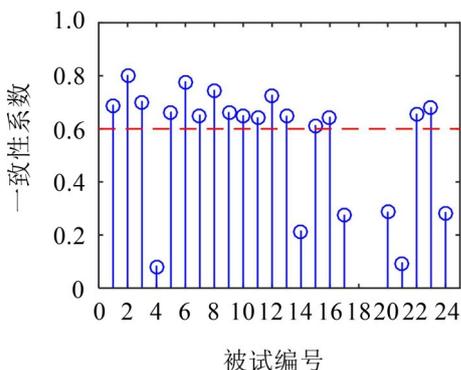


图11 线性相关分析

### 3.3 评价结果

#### 3.3.1 叠加声信噪比

以不同信噪比进行叠加时,叠加声的烦恼度评分如图12所示。虚线为参考目标声评分,采用7级评分尺度时烦恼度得分为4。信噪比小于0时,10号调控声占主导,叠加声烦恼度远高于目标声。虽然10号调控声为自然声,烦恼度理论上应较小,但叠加声频谱结构发生变化,与10号调控声并不完全一致,使得烦恼度明显增加。随着信噪比增大,叠加声烦恼度呈降低趋势,+9 dB为最合适信噪比,改变调控声参数后,均以+9 dB的信噪比进行叠加。

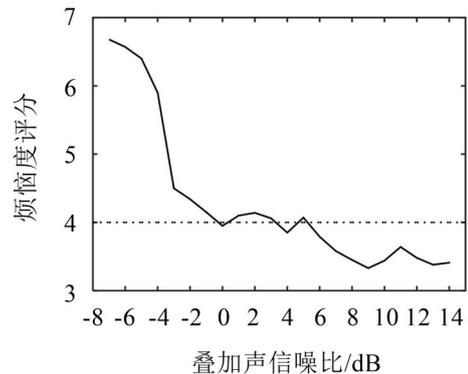


图12 信噪比不同的叠加声烦恼度

#### 3.3.2 带宽重叠

带宽重叠率 $\delta$ 不同的声样本最终评分如图13(a)至图13(d)所示。原始调控声(10号)与目标声带宽重叠率 $\delta = 0.67$ ,将风声注入目标声可以在一定程度上降低目标声的烦恼度。改变目标声与调控声的重叠程度得到不同 $\delta$ 的叠加声,叠加声的烦恼度都在一定程度上低于目标声,但是改变 $\delta$ 前后,叠加声的烦恼度变化不大,改变 $\delta$ 不能显著改善调控声对目标声的调节能力。

#### 3.3.3 功率谱斜率

采用同样的数据分析方法,得到被试对改变功率谱斜率叠加声的烦恼度评分,结果如图14(a)至图14(d)所示,图14(a)与图13(a)都是原始10号调控声和目标声叠加的叠加声烦恼度评分。

功率谱斜率 $k_p = +3$  dB/倍频程和 $k_p = -6$  dB/倍频程时,调控声对目标声都有一定的调节效果,但是调节效果与10号调控声差别不大; $k_p = -3$  dB/倍频程时,改变功率谱叠加声的烦恼度明显低于目标声,相对于10号调控声来说,调节效果显著,即在10号调控声的基础上,将功率谱斜率改为 $k_p = -3$  dB/倍频程时,调控声具备较好的调节效果。

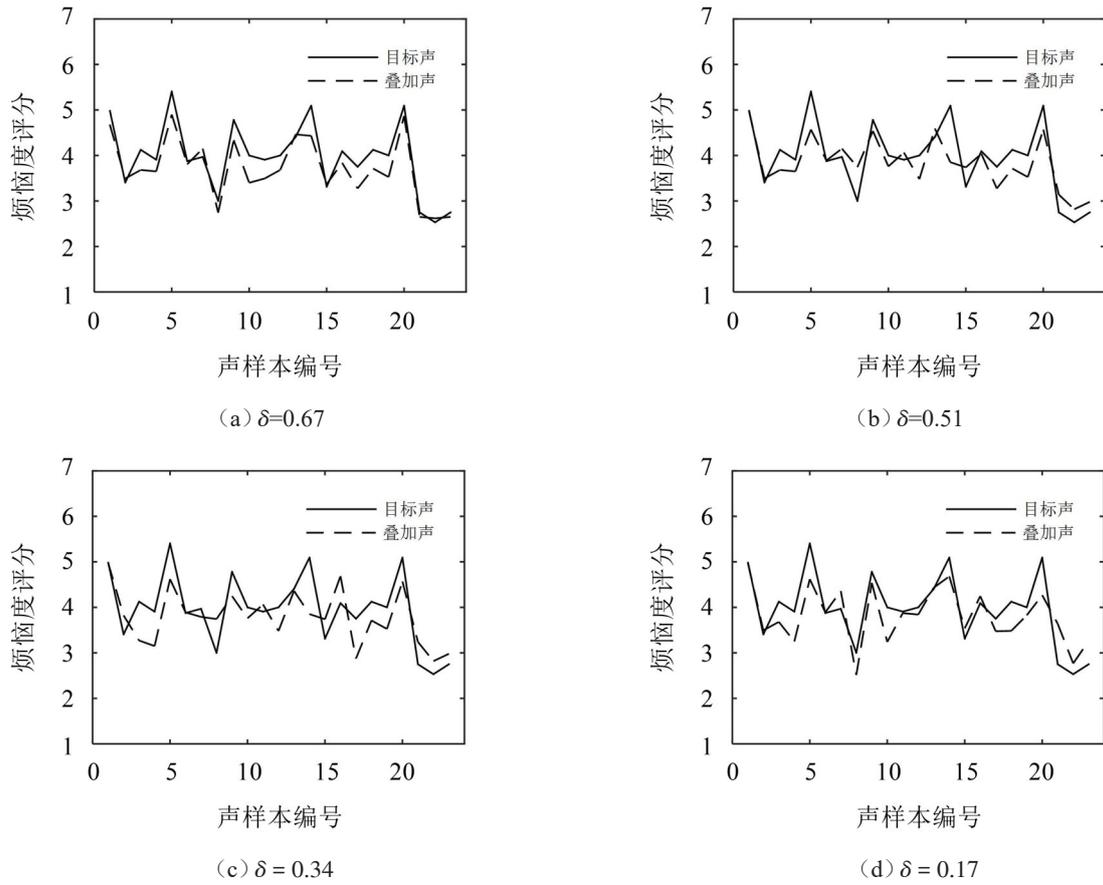


图 13 带宽重叠率 $\delta$ 不同的叠加声烦恼度

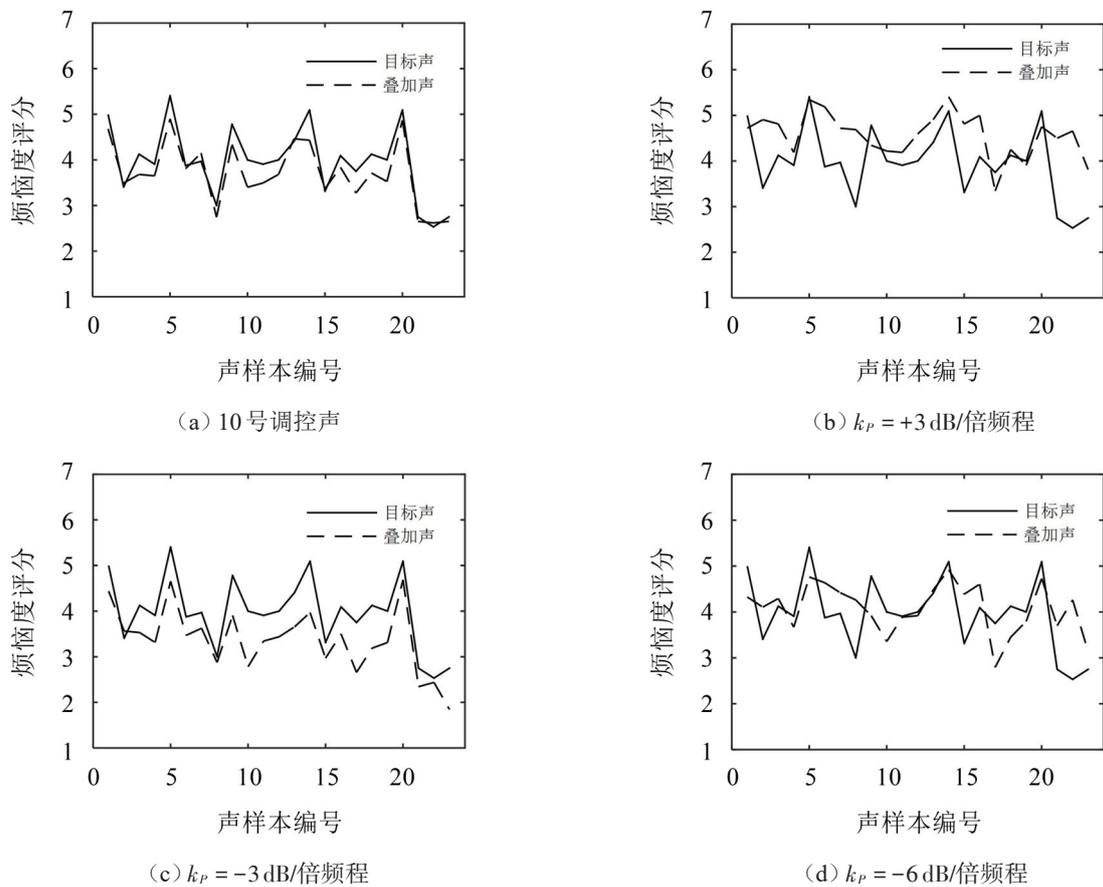


图 14 改变功率谱斜率叠加声烦恼度评分

## 4 结语

本文以波音737-800型飞机舱内噪声为研究对象,较为系统地研究了采用音频注入法改善飞机舱内噪声的可行性以及用于改善舱内噪声烦恼度的调控声特性。结果表明:

(1) 注入音频条件下,自然声中的风声可以改善飞机舱内噪声的烦恼度,叠加声最合适的信噪比为+9 dB。

(2) 改变调控声与目标声的带宽重叠率 $\delta$ 不能得到更好的调节效果,不能起到改善舱内噪声烦恼度的效果。

(3) 改变调控声的功率谱斜率对叠加声的烦恼度既有积极影响也有消极影响,功率谱斜率为 $k_p = -3$  dB/倍频程时,改变功率谱斜率对调控声的调节效果有积极作用。

本文选取的自然调控声均来自于网站下载,依据听感将风声分类,风速的数值尚不明确,下一步工作中可使用实测的风声,探究不同风速的调控声对目标声的烦恼感调节作用,寻找调节效果最佳的风速。进一步还可建立目标声和叠加声的烦恼度模型,用于预测加入不同调控声后叠加声的烦恼度,也可用于解释音频注入的物理机制。

### 参考文献:

- [1] LINDVALL J, VÄSTFJÄLL D. The effect of interior aircraft noise on pilot performance[J]. *Perceptual and Motor Skill*, 2013, 116(2): 472-490.
- [2] PENNIG S, QUEHL J, ROLNY V. Effects of aircraft cabin noise on passenger comfort[J]. *Ergonomics*, 2012, 55(10): 1252-1265.
- [3] LASZLO H E, MCROBIE E S, STANSFELD S A, et al. Annoyance and other reaction measures to changes in

noise exposure-A review[J]. *Science of the total environment*, 2012, 435: 551-562.

- [4] SCHLITTEMEIER S J, HELLEBRÜCK J. Background music as noise abatement in open-plan offices: A laboratory study on performance effects and subjective preferences[J]. *Applied Cognitive Psychology*, 2009, 23(5): 684-697.
- [5] COENSEL B D, VANWETSWINKEL S, BOTTELDOOREN D. Subjective effects of natural sounds on the perception of road traffic noise[J]. *Journal of the Acoustical Society America*, 2011, 29(4): 148-153.
- [6] VASSIE K, RICHARDSON M. Effect of self-adjustable masking noise on open-plan office worker's concentration, task performance and attitudes[J]. *Applied Acoustics*, 2017, 119: 119-127.
- [7] 李争光. 噪声暴露主观感受模拟、调控及脑电变化规律研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [8] 陈勇勇,王小鹏,杨威. 城市变电站噪声的声品质烦躁度评价实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(13): 214-218.
- [9] 曹景攀,王昌旭,李静波. 基于掩蔽效应的车内声品质分析与建模方法[C]// 2016汽车NVH控制技术国际研讨会,2016.
- [10] HONGISTO V, OLIVA D, REKOLA L. Subjective and objective rating of spectrally different pseudorandom noises-Implications for speech masking design[J]. *Journal of the Acoustical Society America*, 2015, 137(3): 1344-1355.
- [11] 佚名. 噪声的颜色和类型[EB/OL]. 2013-04-13 / 2020-10-24. <https://www.jzwcom.com/jzw/89/4449.html>
- [12] 陈克安. 环境声的听觉感知与自动识别[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [13] 孙晓明,邵志跃. 空调噪声主观烦恼度实验研究[J]. *噪声与振动控制*, 2018, 38(3): 124-136.