

文章编号:1006-1355(2021)05-0014-07+49

# 基于听觉感知的飞机舱内噪声合成

李云鹤, 陈克安

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

**摘要:**飞机舱内噪声评价及控制研究需要大量的舱内噪声样本,只依靠实测飞机噪声获取数据具有成本高、数据量有限等缺点。声音合成技术可以在一定程度上弥补其不足,能够提供满足需求的声样本数据库。基于正弦+噪声模型,提出飞机舱内噪声合成的两种方法,以波音737、空客321等4种机型巡航状态下的舱内噪声为参考噪声,合成飞机舱内噪声。从听觉感知角度,开展了主观评价实验,采用成对比较法比较参考噪声和合成声,验证两种声音合成方法的有效性。

**关键词:**声学;噪声合成;听觉感知;飞机舱内噪声;正弦+噪声模型图

中图分类号:O423

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2021.05.003

## Synthesis of Noise inside Aircraft Cabins Based on Auditory Perception

LI Yunhe, CHEN Kean

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

**Abstract:** The research of aircraft cabin noise evaluation and control requires a large number of cabin noise samples, and only relies on measured aircraft noise to obtain the data, which has disadvantages of high cost and limited amount of data. Sound synthesis technology can make up the shortcomings and provide a sound sample database that meets the needs of the research. Based on the sine plus noise model, this paper proposes two methods for the synthesis of aircraft cabin noise. The cabin noise of the four types of aircraft in the cruise state, including Boeing 737, Airbus 321 and so on, is used as the reference noise to synthesize the cabin noise of the aircraft. From the perspective of auditory perception, a subjective evaluation experiment is carried out, and the pairwise comparison method is used to compare the reference noise and the synthesized sound. The efficiencies of the two sound synthesis methods are verified.

**Key words:** acoustics; sound synthesis; auditory perception; aircraft cabin noise; sine plus noise model

随着飞机逐渐成为大众化的出行选择,飞机噪声越来越引起人们的关注。在飞机噪声控制与评价研究中,常常需要大量的噪声样本,然而实际飞行测试人力物力耗费巨大、时间周期长,且受到各种条件限制。声音合成技术是一种成本低、实现方便的方法,受到研究者的重视。目前,声音合成技术已广泛应用到汽车、飞机、舰船等各个领域的噪声研究当中,其中飞机噪声合成主流方法有3种:正弦+噪声模型、双耳正弦+噪声模型、物理模型。

Berckmans等<sup>[1]</sup>基于正弦+噪声模型,将飞机飞越噪声分为线谱、宽带、多普勒频移分量和地面效应4部分,合成了飞机飞越噪声。Janssens等<sup>[2]</sup>同样基于正弦+噪声模型,介绍了飞越噪声和舱内噪声的合成方法,方法与Berckmans类似,并将该方法应用在直升机噪声<sup>[3]</sup>。Arntzen等<sup>[4]</sup>基于物理模型,建立了各个飞机噪声源预测模型,叠加得到监测点合成声,但精确度较差。Verron等<sup>[5-6]</sup>提出了双耳正弦+噪声合成模型,在正弦+噪声模型的基础上加入了耳间相干性和耳间相位差2个双耳线索,合成了某种机型的飞机舱内噪声。国内关于飞机噪声合成的研究相对较少,盛晓伟等<sup>[7]</sup>使用短时傅里叶分析与合成技术以及线性预测分析与合成技术从飞机驾驶座舱的原始录音提取声源,并将之应用到了飞行器音效模拟系统。

现有的飞机噪声合成研究大多以飞机舱外噪声

收稿日期:2021-05-01

基金项目:民机科研专项资助项目(MJ-2018-F-09);

国家自然科学基金资助项目(11974287)

作者简介:李云鹤(1996-),男,陕西省商洛市人,硕士研究生,主要研究方向为舱内噪声合成与声场重构。

E-mail: yunhelinwpu@foxmail.com

通信作者:陈克安(1965-),男,教授,博士生导师。

即飞越噪声为对象,主要为飞越噪声的噪声烦恼感研究提供样本,舱内噪声合成研究相对较少。并且飞机噪声合成方法大多以正弦+噪声模型为基础,分别合成线谱及基于1/3倍频程合成宽带谱。声音合成方法的评价指标大多为声压级、A声级等物理属性,关于人耳实际听觉感知方面的研究较少。

基于此,本文分别从理论和实测噪声分析两种角度研究飞机舱内噪声特性,选择正弦+噪声合成模型,在此基础上介绍两种飞机舱内噪声合成方法,检测提取实测噪声的峰值信息合成线谱,然后分别基于1/3倍频程和听觉临界频带合成宽带谱,叠加得到合成声。以波音737、波音747、波音777和空客321巡航状态下的舱内实测噪声为原始噪声,建立噪声合成模型,合成各测点处舱内噪声,最后设计并开展主观评价实验,从听觉感知的角度,评估合成声的有效性。

## 1 飞机舱内噪声特性

目前飞机舱内噪声合成主流方法有正弦+噪声模型、双耳正弦+噪声模型和物理模型3种,研究飞机舱内噪声特性可知,飞机舱内噪声主要由中低频线谱和连续宽带谱构成,与正弦+噪声模型较为符合,并且建立各个噪声源的物理模型精度较差,合成效果不理想,而双耳正弦+噪声模型偏重耳间相干性和耳间相位差合成,合成精度和正弦+噪声模型基本一致,因此通过飞机舱内噪声特性理论与实测噪声分析,选择正弦+噪声模型进行舱内噪声合成。

### 1.1 飞机舱内噪声来源及特性

飞机舱内噪声由各种声源和振源形成,并经过空气传声或结构传声这两种噪声传递路径进入舱内,噪声包括驾驶舱、空勤舱、乘客舱、设备舱和货舱等各个舱室内的噪声。影响飞机舱内声学环境的噪声源很多,从声源位置的角度主要分为两类,外部噪声源及内部噪声源。其中,外部噪声源主要来自于航空发动机和湍流边界层噪声<sup>[8-9]</sup>,包括:

(1) 飞机在飞行状态下,气流流过机体表面如机身、机翼等位置引起的气流压力扰动产生的湍流边界层噪声,也叫机体噪声;

(2) 发动机风扇、涡轮等产生的噪声;

(3) 发动机振动引起的结构振动辐射噪声;外部噪声源示意图见图1。机舱内部噪声源主要包括环控系统、液压系统、压力安全阀以及电子机械设备等,但相对于发动机噪声和湍流边界层噪声,舱内噪声源产生的噪声往往被忽略。

从频谱组成的角度来看,飞机舱内噪声频谱主要由线谱和宽带谱组成,其中线谱的主要来源为发



图1 飞机外部噪声源分布示意图

动机中的风扇、涡轮、压气机等产生的机械噪声。机械噪声的基本频率 $f_1$ 或叶片通过频率BPF(Blade Passing Frequency, BPF)与转速有关:

$$\text{BPF} = f_1 = \frac{\text{RPM}}{60} \quad (1)$$

其中:BPF是机械噪声线谱部分的基本频率,RPM(RPM, Revolutions Per Minute)是机械转速(每分钟转数)。基频旁边也会出现部分谐波分量:

$$f_n = Nf_1 \quad (2)$$

其中: $f_n$ 是第 $n$ 次谐波, $f_1$ 是基频, $N$ 是谐波阶数。

宽带谱的主要来源是机身外部的湍流边界层噪声,湍流边界层大多附着在机身表面上,但是在突出物附近和驾驶舱周围可能存在一些分离的流动区域。即使对于亚音速巡航,也可能存在一些带有冲击波的超音速流动区域,尤其是在驾驶舱上方。外部湍流边界层产生的舱室内部噪声通常在中高频率范围内占主导地位,它的主要特征是受飞行速度影响很大,噪声强度随飞机速度的增大而增大<sup>[10]</sup>。

### 1.2 实测噪声分析

本文后续使用的实测噪声数据分为舱内噪声特性研究数据集和主观评价实验数据集两种。两种数据集的单个测点噪声数据均为单通道采样获得,非双耳采样。

(1) 舱内噪声特性研究数据集:通过与中国飞机强度研究所合作,获得波音737-800舱内巡航状态下实测数据。测试时飞机内部配置齐全,座椅靠背为直立状态,增压和空调系统处于正常运转状态,乘客和机组人员的空气出口关闭,公共广播系统关闭。测点个数为23个,位置如图2所示。其中1~16号为座椅头枕处测点,高度为坐姿时人耳高度,约为1.2 m;17~23号为过道测点,高度为过道站立时人耳高度,约为1.7 m,采样频率为32 768 Hz,采样时长30 s。

(2) 主观评价实验数据集:包括上述实测波音737-800舱内23个测点噪声数据,以及从Sound

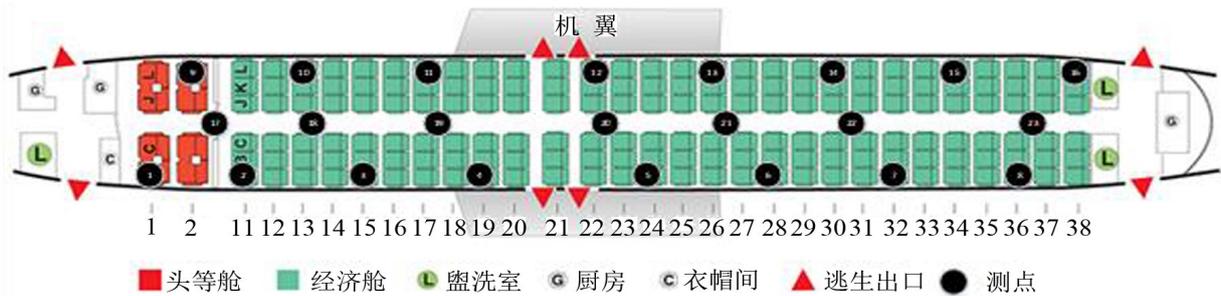


图2 波音737-800舱内测点图

Ideas公司购买的波音747、波音777和空客321 3种机型巡航状态下舱内各4个测点共12个测点的噪声数据。

对波音737舱内23个测点的数据做FFT分析,发现频谱如前所述由线谱和宽带谱构成,线谱主要处在低频区域,具有明显的谐波特性。图3给出了测点1的时域波形图和频谱图,从时谱图可以看出飞机舱内噪声信号基本平稳,从频谱图可以发现飞机舱内噪声能量主要集中在中低频区,在65 Hz、194 Hz和2 060 Hz有明显的线谱成分,其余测点频谱在65 Hz处同样具有线谱成分,并伴有不定阶数的谐波成分。

## 2 舱内噪声合成模型

由前文可知,飞机舱内噪声可分为宽带谱和线谱,其中宽带谱是飞机舱内噪声听觉感知属性的基础,如果宽带谱不正确就不像飞机舱内噪声;线谱中包含有飞机舱内状态的重要信息,如果缺失线谱,人耳就无法辨别飞机的重要状态信息。

因此,本文基于正弦+噪声模型,使用线谱+宽带谱的合成模型,将飞机舱内噪声分为线谱和宽带谱两部分分别合成。线谱成分通过对实测噪声信号峰值检测提取合成,宽带谱通常在某一频带内研究,常用频带为1/3倍频程,然而从心理声学角度考虑,人

耳听觉系统具有带通滤波器特性,1 Bark临界带约等于沿耳蜗基底膜1.3 mm长的距离<sup>[1]</sup>,传统的1/3倍频带没有考虑到人耳的听觉感知。因此,分别使用1/3倍频程和听觉临界频带两种方法建模合成宽带谱,然后叠加线谱和宽带谱得到两种合成声,流程如图4所示,步骤如下:

(1) 峰值检测:采集噪声样本,对该样本进行FFT变换,检测提取其中的峰值信息;

(2) 线谱合成:利用提取到的峰值信息,合成线谱成分;

(3) 滤波器设计:从噪声样本中剔除线谱成分,对于剩下的宽带谱分别基于1/3倍频程和听觉临界频带形式分析,提取相关参数,设计滤波器;

(4) 宽带谱合成:将高斯白噪声通入滤波器后,调节幅值,合成宽带谱;

(5) 叠加合成:使用傅里叶合成法叠加线谱和宽带谱成分,得到合成声。

本文使用MATLAB软件对飞机舱内噪声信号进行频谱分析、峰值检测、滤波器设计,线谱和宽带谱合成以及合成声叠加等相关信号处理。

### 2.1 线谱合成

对舱内噪声信号做FFT得到频谱信息后,下一步就是要进行峰值检测,找到每个频谱中显著的峰

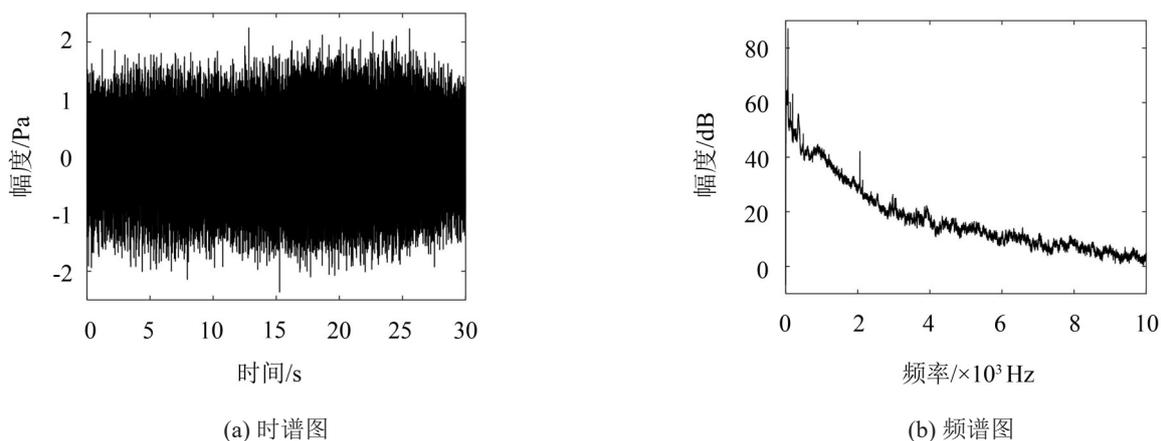


图3 波音737-800舱内测点时频谱图

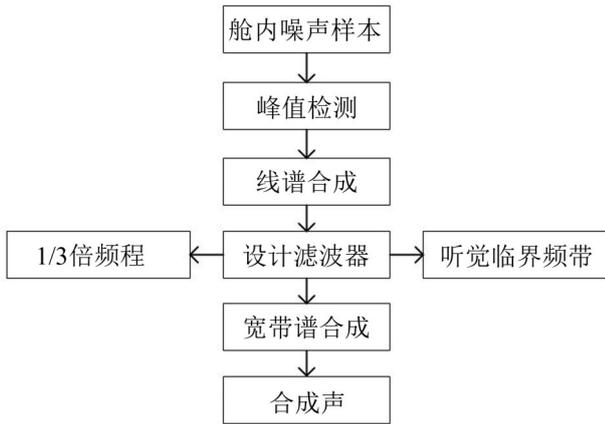


图4 飞机舱内噪声合成模型

值。峰值定义为在幅值频谱 $|X(k)|$ 中的局部最大值。如果 $k_a$ 是频谱中的一个频率索引,那么它只有满足:

$$|X(k_a - i)| \leq |X(k_a)| \geq |X(k_a + i)|, i \in R \quad (3)$$

才是局部最大值。但并不是所有的峰值在频谱中都同样明显,因此需要对峰值进行一定的筛选,采用设置阈值搜索局部峰值的方法筛选峰值,峰值高度设为峰值和邻近谷值的差值,计算如式(4)所示:

$$h(k_a) = \frac{|X(k_a)|}{[|X(k_{\beta-})| + |X(k_{\beta+})|]/2} \quad (4)$$

其中: $h(k_a)$ 是峰值高度, $|X(k_a)|$ 为检测到的峰值, $|X(k_{\beta-})|$ 和 $|X(k_{\beta+})|$ 则是 $|X(k_a)|$ 附近的谷值。从听觉感知的角度考虑,通常将线性幅值 $|X(k)|$ 转换为分贝幅值 $X_{dB}(k)$ :

$$X_{dB}(k) = 20 \log_{10} |X(k)| \quad (5)$$

因此重新定义峰值高度为:

$$h(k_a) = X_{dB}(k_a) - \frac{X_{dB}(k_{\beta-}) + X_{dB}(k_{\beta+})}{2} \quad (6)$$

在峰值检测算法中设置一个阈值 $M$ , $M$ 就是设定的允许通过的最小峰值高度,即要求 $h(k_a) > M$ 。除了比较峰值高度外,还需要对峰值的幅度进行筛选,设定 $N$ 为最小峰值幅度,如果 $X_{dB}(k_a) \leq N$ ,则该峰值不能通过筛选。峰值检测的步骤如下:

(1) 峰值谷值检测:检测信号频谱中所有的峰值和谷值,计算每一个峰值与其左右相邻的谷值的差值 $h(k_a)$ ;

(2) 阈值设定:设定阈值 $M$ ,比较 $h(k_a)$ 和 $M$ ,如果峰值高度大于阈值,继续进行筛选,如果峰值高度小于阈值,剔除该峰值;

(3) 最小峰值幅度设定:设定最小峰值幅度 $N$ ,比较 $N$ 和 $X_{dB}(k_a)$ ,如果 $X_{dB}(k_a)$ 大于 $N$ ,该峰值被提取出来,如果 $X_{dB}(k_a)$ 小于等于 $N$ ,剔除该峰值。

对于波音737-800飞机,阈值 $M$ 设定为5 dB,最

小峰值幅度 $N$ 设定为40 dB,然后进行峰值检测提取,测点1峰值检测结果如图5所示。

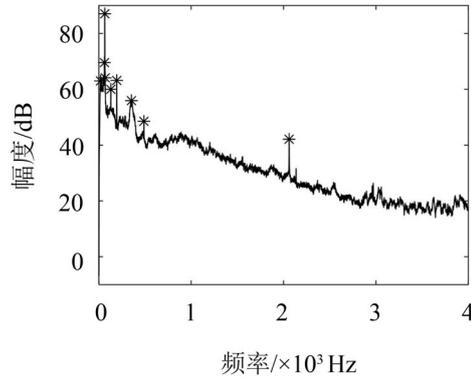


图5 峰值提取结果

从图中可知共筛选出了9个峰值,分别是18 Hz、61 Hz、65 Hz、69 Hz、130 Hz、194 Hz、353 Hz、488 Hz和2 060 Hz,并提取各个峰值频率所对应的幅值和相位。

检测并提取了峰值的频率、幅度和相位信息后,使用加法合成法来合成舱内噪声信号的线谱成分为:

$$XP = \sum_{i=1}^n A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (7)$$

其中: $XP$ 是合成的线谱成分, $n$ 是检测到的峰值个数, $A_i$ 是第 $i$ 个峰值的幅度, $f_i$ 是第 $i$ 个峰值的频率, $\varphi_i$ 是第 $i$ 个峰值的相位。图6是测点1的线谱成分合成结果,共合成了9个线谱成分。

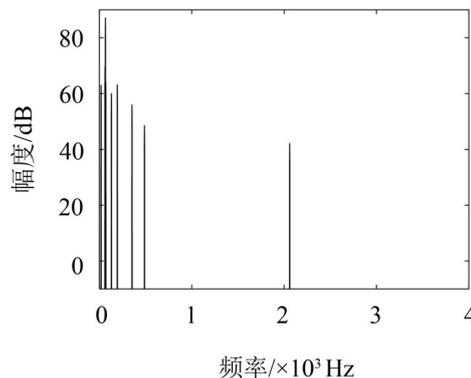


图6 线谱合成结果

## 2.2 1/3倍频程合成

在合成舱内噪声信号的线谱成分后,下一步就是要合成残余的宽带谱成分,本节介绍以1/3倍频程的形式合成宽带谱的方法。首先从原始噪声信号的频谱中去掉线谱成分,以1/3倍频程的形式对残余宽带谱进行分析,并对每个1/3倍频带内的幅值求平均,得到残余宽带谱在每个1/3倍频带内的幅值分布,图7是测点1残余宽带谱在各个1/3倍频带内的

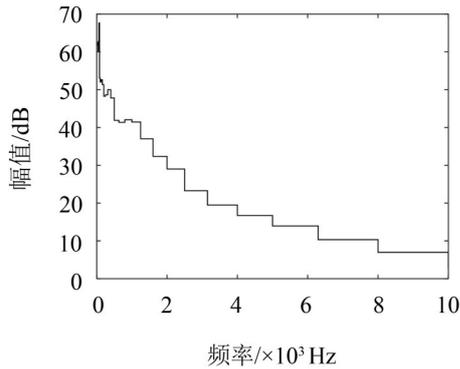


图7 残余宽带谱1/3倍频程幅值分布图

幅值分布。

根据获得的残余宽带谱在每个1/3倍频带的幅值分布确定各个1/3倍频带的权重系数,基于权重系数设计具有对应频响曲线的滤波器,图8是对应测点1的1/3倍频程幅值分布所设计的滤波器频响曲线。

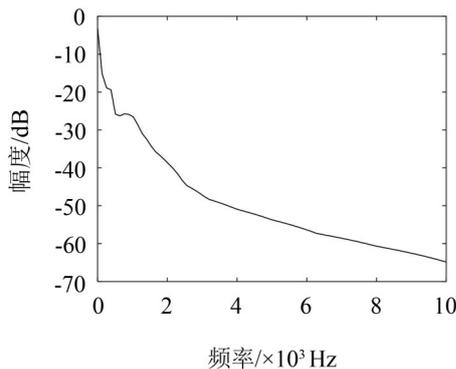


图8 基于1/3倍频程设计滤波器频响曲线

将高斯白噪声通过设计的滤波器,并经过幅值调节得到合成的宽带谱,测点1宽带合成结果如图9所示。

### 2.3 听觉临界频带合成

研究人耳听觉系统灵敏度和分辨率时发现信号的频带宽度可以明显改变绝对阈值和辨别阈值。如果从一个很窄的带宽开始逐渐增加宽度,在一定范围内,这种信号带宽的增加并不影响绝对阈值,但是,当带宽超出某一临界值时,继续增加带宽会使绝对阈值提高,该带宽临界值被称为临界带宽,由Fletcher提出,后Zwicker给出了临界带宽的具体解析式,并将Bark作为临界带宽的度量单位<sup>[12-13]</sup>。

因此,结合听觉感知原理,本节提出以听觉临界带的形式进行宽带谱合成,主要考虑不同临界带内声音信号强度的相对差异,而忽略处于同一临界带内的频谱结构细节。同样首先从原始噪声信号的频谱中去掉线谱成分,以听觉临界带的形式对残余宽带谱进行分析,并对每一Bark的临界带幅值求平

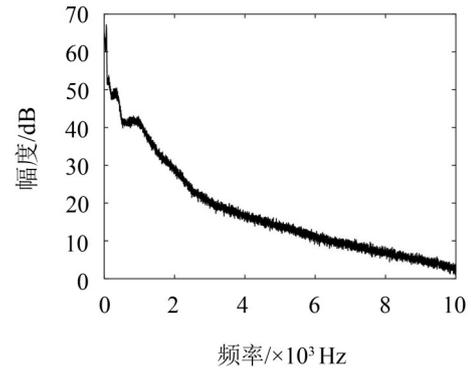


图9 1/3倍频程宽带合成结果

均,得到残余宽带谱在每Bark临界带内的幅值分布,图10给出了测点1残余宽带谱在各个临界带内的幅值分布。

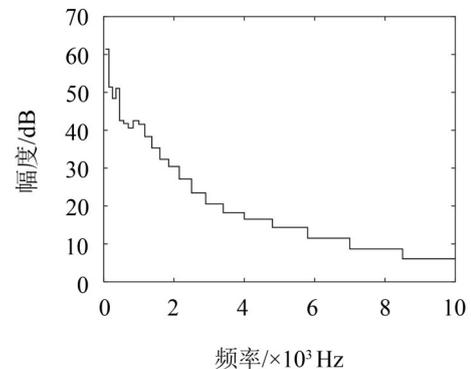


图10 残余宽带谱临界带幅值分布图

根据获得的残余宽带谱在每个临界带的幅值分布确定各个临界频带的权重系数,基于权重系数设计具有对应频响曲线的滤波器,图11是对应测点1临界带幅值分布所设计的滤波器频响曲线。

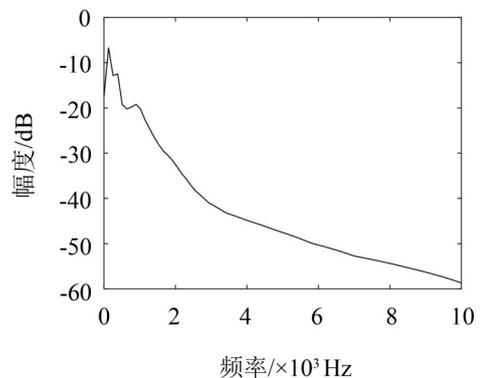


图11 基于听觉临界频带设计滤波器频响曲线

将高斯白噪声通过设计的滤波器,并经过幅值调节得到合成的宽带谱,测点1基于临界频带的宽带合成结果如图12所示

### 2.4 噪声合成

分别合成舱内噪声信号的线谱和宽带谱后,使

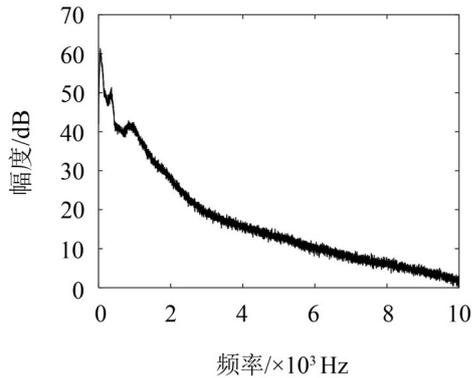


图12 临界带宽带合成结果

用傅里叶合成法也称作线谱迭加法叠加两部分,得到舱内噪声合成声,如式(8)所示:

$$H_{cs} = C + XP = C + \sum_{i=1}^n A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (8)$$

其中: $H_{cs}$ 表示合成声, $C$ 表示合成的宽带谱成分, $XP$ 为合成的线谱成分。图13是测点1实测噪声和两种合成声的对比,从图中可以看出两种合成声与实测噪声的频谱曲线基本一致,两种方法都能取得比较好的合成效果。

### 3 主观评价实验

从频谱的角度,两种方法的合成声与实测噪声基本一致,下一步需要从听觉感知的角度检验合成声的有效性。本节使用成对比较法,选取了16位被试,对4种机型的舱内实测噪声样本做了相似度评价实验,从实际听觉感知的角度对比舱内实测噪声与合成声,验证了两种方法的有效性。

#### 3.1 声样本

实验样本为主观评价实验数据集内的4种机型共35个测点的实测噪声以及使用两种方法得到的70个合成声,共计105个声样本。配对方式为每个测点的实测噪声与实测噪声组成一对,即实测噪声

的重复,共35对;每个测点的实测噪声和1/3倍频程合成声组成一对,共35对;每个测点的实测噪声和临界带合成声组成一对,共35对。通过上述配对方式,每个测点有3对声样本,对应实测噪声重复、实测噪声和1/3倍频程合成声对比、实测噪声和临界带合成声对比3种情况,35个测点3种情况共对应105对声样本。

此外考虑到人耳听觉中主观感知的形成过程,发现声样本的时长为5 s即可产生稳定的感知印象,因此,将所有声样本统一截取为5 s长的声音片段。

#### 3.2 被试

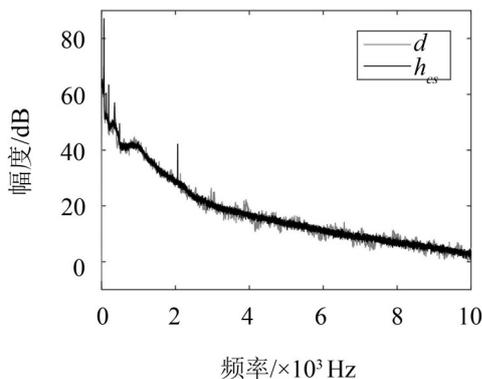
实验中,16位被试的年龄均在18岁~30岁,所有被试听觉正常,无耳病症状,耳道无耵聍堵塞,无过度噪声暴露史或家族性听力损失者。

#### 3.3 回放设备

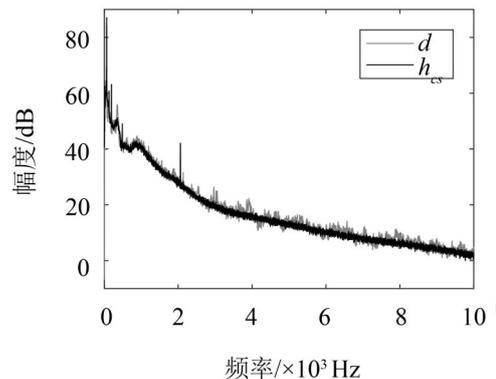
为确保每个被试在相同的条件下听到相同的声音,通过耳机回放进行主观评价实验,评价结果不受房间声学特性或者被试位置的影响,而且可有效屏蔽外界噪声干扰且信号失真小。实验使用仪器设备有一台笔记本电脑,一台16通道的功率放大器(BEHRINGER HA4700)以及8副动圈式高保真监听级头戴耳机(SENNHEISER HD280)。

#### 3.4 实验流程

本次实验采用5级评价尺度,对105对声样本进行相似度评价实验,评价尺度如表1所示。得分从1~5对应相似程度为非常不相似、比较不相似、有点相似、比较相似、完全相似。实验前,实验者进行讲解并对被试进行试听训练。实验过程中,被试每次听到一对声音,第一个声音播放后间隔2 s播放第二个声音,每对声音播放完后,被试将有5 s的时间对声音的相似度感知进行评分。实验方法采用问卷调查的形式,问卷分两部分,第一部分为被试基本信



(a) 实测噪声与1/3倍频程合成声对比图



(b) 实测噪声与临界频带合成声对比图

图13 实测噪声和两种合成声的对比图

表1 相似度评分标准

评价分值	1	2	3	4	5
语言描述	非常不相似	比较不相似	有点相似	比较相似	完全相似

息,第二部分是105对声样本的相似度打分。

### 3.5 实验结果

实验回收了16份问卷,其中有1位被试的得分与其他被试的打分有明显不同,剔除该份问卷。对于每个测点,取15位被试对3种情况下的相似度打分,分别对每种情况下的15个得分做平均,对35个测点均重复此操作,得到35个测点在每种情况下的相似度得分,如图14所示。两种合成声的相似度得分整体低于实测噪声的重复,但整体仍在4分左右,并且在部分测点合成声与实测噪声的相似度得分一致;临界带合成声与1/3倍频程合成声整体得分基本一致,但在部分测点优于1/3倍频程合成声。

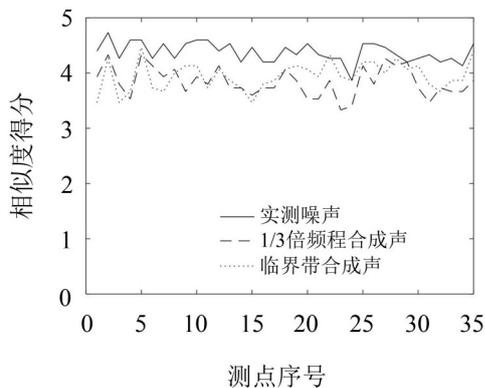


图14 35个测点的相似度得分

对于每位被试,分别在3种情况下取35个测点的相似度得分,并对每种情况分别求平均,对15位被试均重复此操作,得到15位被试在每种情况下的相似度得分,如图15所示。15位被试的相似度打分虽然不完全相同,但总体趋势为两种合成声的相似度得分基本一致,且大都低于实测噪声的重复,但差距较小,其中8号和15号被试临界带合成声得分与实测噪声重复基本相同。

对3种情况下的15位被试对35个测点的相似度打分总体进行平均,结果如表2所示。1/3倍频程合成声与临界带合成声得分低于实测噪声重复,但差距较小,临界带合成声得分稍优于1/3倍频程合成声。因此,从听觉感知的角度,两种合成方法均能有效合成舱内噪声,其中临界带合成方法稍优于1/3倍频程合成声。

## 4 结论及展望

本文基于正弦+噪声模型介绍了两种飞机舱内噪声合成方法,线谱部分通过峰值检测提取合成,宽

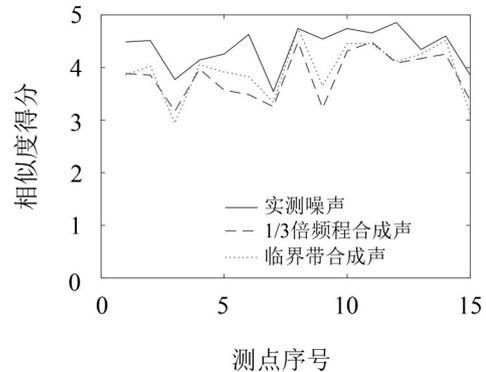


图15 15位被试的相似度得分

表2 3种情况下相似度平均得分

名称	实测噪声重复	1/3倍频程合成声	临界带合成声
平均得分	4.38	3.84	3.95

带部分分别基于1/3倍频程和临界带两种方法进行合成,最后叠加得到合成声。并以波音737、747、777和空客321共4种机型巡航状态下共计35个测点的舱内噪声为参考噪声,使用两种合成方法进行了噪声合成。从人耳听觉感知角度考虑,使用成对比较法,选取了16位被试进行了相似度评价实验,实验结果表明从听觉感知角度,两种合成方法均能有效合成舱内实测噪声,其中临界带合成声稍优于1/3倍频程合成声。

飞机噪声特性研究表明舱内噪声线谱成分与发动机涡轮、风扇等旋转机械的物理特性有直接对应关系,合成方法中的线谱合成由于无法获得巡航状态下各种机械的相关参数,只能通过对实测噪声的峰值检测提取合成,在以后的研究中需建立两者之间的联系,通过各种机械的物理参数合成线谱成分,从而合成不同工况下的飞机舱内噪声。

致谢:

在此特别感谢中国飞机强度研究所提供波音737-800巡航状态下舱内实测噪声数据。

参考文献:

- [1] BERCKMANS D, JANSSENS K, VAN DER AUWERAER H, et al. Model-based synthesis of aircraft noise to quantify human perception of sound quality and annoyance [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 311(3-5): 1175-1195.

(下转第49页)