

基于正则化声压匹配法的舱室声场复现



王海涛¹, 陈克安¹, 曾向阳¹, 董宁娟², 高南沙¹

1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072

2. 中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710065

摘要: 舱室噪声控制、声品质设计等研究通常需开展大量的声场测试试验, 由于舱室实际试验成本较高, 因此通过声场复现的方式在舱室模拟舱中复现所需求的声学环境, 对于降低研究成本、开展重复性试验具有重要意义。本文面向舱室声环境复现需求, 以经典声压匹配法为基础, 建立了基于扬声器阵列输出的多目标点位协同复现算法, 通过引入正则化技术, 使算法对实际测试中的各类噪声具有更强的鲁棒性。在一个实际舱室模拟舱环境中搭建了复现系统, 复现试验表明, 本文算法可在指定舱内的多个点位上协同复现目标频响曲线, 在宽频范围内相对误差小于5%, 具有良好的精度, 在舱室声环境复现应用中具有良好的前景。

关键词: 舱室; 声场复现; 声压匹配; 扬声器阵列; 正则化

中图分类号: TB53

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.08.002

随着经济的增长, 已有越来越多的人将飞机作为出行的交通工具。据国际航空运输协会预测, 2036年全球客运总量将突破78亿人次, 而我国的这一数字将增长到15亿人次, 巨大的市场使国内外客机制造厂商及航空公司十分关注客舱的乘坐舒适性以提高竞争力。在各种舒适性因素中, 舱内噪声水平是一个关键性问题。舱内噪声来源复杂, 包括发动机噪声、气动噪声、内部环控系统噪声等^[1-2], 舱内噪声控制一直是航空研究领域的一个重点问题, 我国早在大飞机计划立项初期, 就将舱内噪声预测及其控制技术列为需要突破的十大关键技术之一。

对飞机舱室的噪声控制、声品质设计等工作需要以大量的舱内声场测试试验为基础, 但是飞机飞行工况下进行测试的成本极其高昂, 因此常需要在实验室建立舱室模型, 利用声场复现(SFR)技术在模拟舱室中重建初级声场, 继而在此声场环境下完成重复度较高的信号采集、降噪验证等试验。SFR技术是通过复现声源发声, 在特定空间区域产生近似目标声场(包含频率、时间和空间特征)的一种技术, 目前国内外声场复现的主流方法主要包括波场合成、高

阶高保真立体声重现以及声压匹配法等三种方式。

波场合成(WFS)于1988年由Berkhout提出^[3], 其基本原理是基于惠更斯理论及Kirchhoff-Helmholtz积分方程, 即如果已知封闭曲面上声压和法向质点振速分布, 那么就可以在其表面布置一系列单极子和偶极子声源复现内部声场。对于简单声场, 可以利用点声源或平面波模型推导复现声源(或称为次级声源)的驱动函数; 对于复杂声场, 可利用传声器阵列采集声场信息, 外推次级声源位置的声场, 计算其驱动函数, 进而复现原始声场。实际的WFS声场复现系统利用Rayleigh积分将闭合的次级声源曲面缩减为平面, 将声源区域和复现区域分开, 同时移除了偶极子声源, 仅利用无指向性点声源实现复现^[4]。经典WFS理论将假设声波在自由场传播, Gauthier等^[5]将WFS技术拓展到房间场景中, 通过房间补偿有效地提高了WFS技术在非自由场环境中的复现精度, 此外, WFS技术在飞机舱室的声场复现中也得到应用, 具有良好的精度^[6-7]。但是受限于次级波阵面的准确表达, 此技术所需要的扬声器数量过高, 并且也只能在一个较小区域内实现准确复现, 全局性较差; 另外, 由

收稿日期: 2023-12-18; 退修日期: 2024-04-11; 录用日期: 2024-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(12074317); 航空科学基金(20181553017)

引用格式: Wang Haitao, Chen Ke'an, Zeng Xiangyang, et al. Cabin sound field reproduction based on pressure matching method combining regularization technique[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(08): 14-20. 王海涛, 陈克安, 曾向阳, 等. 基于正则化声压匹配法的舱室声场复现[J]. 航空科学技术, 2024, 35(08): 14-20.

于WFS利用有限数目的扬声器阵列实现复现,会产生次级声源的离散和截断误差。

高阶高保真立体声复现(HOA)技术认为球坐标系下的声场可由一系列球谐函数(基函数)及其展开系数组成^[8],于是可以利用初级声场与合成声场之间的球谐函数模态匹配原理求解次级声源的驱动函数,进而复现三维声场^[9]。根据空间形状不同,HOA技术可以方便地采用球谐函数或者柱函数实现复现^[10],但是与WFS类似,HOA同样面临次级声源的空间离散误差问题。

声压匹配(PM)在空间中设定次级声源分布及复现点位置,构建声源驱动函数与目标点位声压之间的线性方程组,然后在最小二乘意义下求解此方程组获得次级声源驱动函数,使得其复现声场与传声器阵列测量的声场能够很好地吻合。该方法不限制次级声源位置及传声器阵列形式,相较WFS和HOA方法实现更为简便。但是,由于线性方程组通常是不适定的,对测量噪声等非常敏感,因此性能稳定性较差。

针对飞机舱室声环境在模拟舱中的复现问题,本文以声压匹配法为基础,将Tikhonov正则化技术引入逆问题求解中,发展了一种正则化声压匹配法。此方法首先在飞机模拟舱环境下建立舱内目标点位与舱外扬声器阵列的传递函数关系,然后利用正则化声压匹配方法求解扬声器阵列的驱动信号,从而在目标点位复现飞机不同工况下的真实声场。

1 正则化声压匹配声场复现方法

1.1 基于声压匹配的声场复现

假设现需在一个模拟舱环境中复现飞机飞行过程中的真实声场。如图1所示,由于飞机舱室通常较为狭小,在舱内无法布置较多扬声器,因此在模拟舱外部设置一定数量的扬声器。通过正则化声压匹配算法,结合实际声场目标计算各个扬声器的驱动信号,在驱动信号作用下,可在模拟舱内的目标点位上生成与真实频响一致的频响,最后所有目标点位即可构成复现声场。

设模拟舱中的目标点位数目为 M , L 为扬声器数目; $\mathbf{d}(t) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 是 M 个目标点位上在时刻 t 的真实声场的声压矢量; $\mathbf{p}(t) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 是复现声场声压矢量。由于模拟舱环境与真实飞机舱室环境存在一定区别,若想在模拟舱中的目标点位上获得与 $\mathbf{d}(t)$ 一致的响应,需在 $\mathbf{d}(t)$ 的基础上对其进行处理,以获得激励 L 个扬声器发声的驱动信号 $\mathbf{s}(t) \in \mathbb{C}^{L \times 1}$

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{d}(t) \quad (1)$$

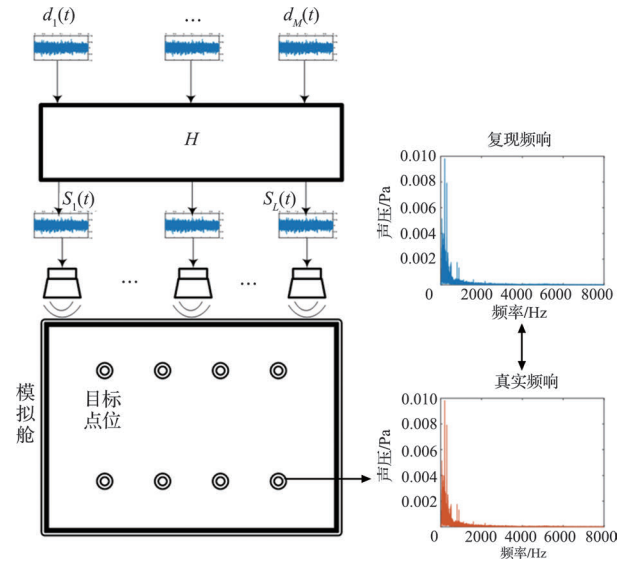


图1 声场复现原理框架图

Fig.1 Framework of the sound field reproduction

式中, $\mathbf{H}(t) \in \mathbb{C}^{L \times M}$ 称作均衡矩阵,作用是将传声器采样的目标声场声压信号转换为扬声器的驱动信号。

扬声器播放驱动信号后,声波通过一定传播路径到达模拟舱内的目标点位,在各个扬声器的作用下,复现声场可以表示为

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{G}(t)\mathbf{s}(t) \quad (2)$$

式中, $\mathbf{G}(t) \in \mathbb{C}^{M \times L}$ 是声通道传递函数矩阵,即目标点位到扬声器之间的传递函数。

如果利用 $\mathbf{e}(t) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 表示复现误差,可用其 ℓ_2 范数的平方衡量复现精度,即

$$\|\mathbf{e}(t)\|_2^2 = \|\mathbf{d}(t) - \mathbf{p}(t)\|_2^2 \quad (3)$$

为方便起见,省略各参数表达中的时间参数 t ,并结合式(2)和式(3),可以构造声场复现的目标函数为

$$J(\mathbf{s}) = \|\mathbf{G}\mathbf{s} - \mathbf{d}\|_2^2 \quad (4)$$

计算扬声器阵列的驱动信号,就是要求使得目标函数取最小值

$$\mathbf{s} = \operatorname{argmin} \left\{ \|\mathbf{G}\mathbf{s} - \mathbf{d}\|_2^2 \right\} \quad (5)$$

对式(5)使用最小二乘法求解可得扬声器驱动信号的解析表达式为^[11]

$$\mathbf{s} = (\mathbf{G}^H \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^H \mathbf{d} \quad (6)$$

式(6)的求解实际上是求解 $M \times L$ 维线性方程组,当 $L = M$ 时,即扬声器个数等于目标点位个数,可以准确求得扬声器驱动信号 $\mathbf{s}$,使得复现误差趋近于零;当 $L < M$ 时,即扬声器个数小于目标点位个数,方程组超定,可以求得使目标函

数最小的驱动信号 $\mathbf{s}$, 但是复现误差并不趋近于零; 当 $L > M$ 时, 即复现扬声器个数大于监测传声器个数, 方程组欠定, 驱动信号解不唯一。因此利用式(6)求解驱动信号通常存在两个问题, 即需要适合的扬声器和传声器个数形成超定和正定方程组; 另外, 求解方程组往往是病态的, 在矩阵求逆计算中出现错误, 导致驱动信号求解结果不稳定。针对上述问题, 本文在目标函数中引入正则化项来使方程组稳定。

1.2 Tikhonov 正则化声压匹配

正则化技术是目前最普遍且理论上最完备的求解病态逆问题的方法, 其基本思想由苏联著名数学家 Tikhonov 于 20 世纪 40 年代首先创立, 主旨是通过某种措施降低对声场复现中贡献小而对误差非常敏感的分解项的影响。

Tikhonov 正则化目标函数, 就是在解的范数中加个正则化项^[12], 式(4)的目标函数变为

$$J(\mathbf{s}) = \|\mathbf{G}\mathbf{s} - \mathbf{d}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{s}\|_2^2 \quad (7)$$

式中, $\lambda > 0$ 是正则化参数, 作用是将较小的奇异值滤掉, 增强矩阵求逆的稳定性, 从约束优化的角度, 相当于对复现声源能量施加了约束。此时, 式(6)变为

$$\mathbf{s} = (\mathbf{G}^H \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^H \mathbf{d} \quad (8)$$

对比式(1), 均衡矩阵 $\mathbf{H}$ 可以写为

$$\mathbf{H} = (\mathbf{G}^H \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^H \quad (9)$$

对声通道传递函数矩阵 $\mathbf{G}$ 作奇异值分解(SVD)得到

$$\mathbf{G} = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{V}^H \quad (10)$$

式中, $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_M]$ 和 $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_L]$ 为酉矩阵, $\boldsymbol{\Sigma} \in \mathbb{R}^{M \times L}$ 是主对角线上实正奇异值 σ_i 逐渐减小的对角矩阵。

对应的均衡矩阵 $\mathbf{H}$ 可以由式(9)改写为

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^{\text{rank}(\mathbf{G})} f_i \mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^H / \sigma_i \quad (11)$$

式中, σ_i 是 $\mathbf{G}$ 经过 SVD 后的奇异值, f_i 是滤波因子, 其表达式为

$$f_i = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + \lambda} \quad (12)$$

式(12)说明当 $\sigma_i < \lambda$ 时, 滤波因子 f_i 将小于 1 并且会使得对应的奇异值成分 $\mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^H / \sigma_i$ 衰减到原值的 λ 倍; 当 σ_i 远大于 λ 时, 滤波因子 f_i 会逼近于 1, 并且不会改变对应的奇异值成分 $\mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^H / \sigma_i$ 。

引入 Tikhonov 正则化项后, 正则化参数 λ 对复现声源权值以及复现误差有显著影响。为尽可能减小复现误差, 一般采用归一化 Tikhonov 正则化参数, 计算公式为

$$\lambda = \beta \sigma_{\max}^2 \quad (13)$$

式中, β 为归一化参数, $\sigma_{\max}$ 为 $\mathbf{G}$ 经过 SVD 后的最大奇异值。将归一化 Tikhonov 正则化参数 λ 代入式(12)可得

$$f_i = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + \beta \sigma_{\max}^2} \quad (14)$$

从式(14)可知, 通过归一化参数 β 可以改变滤波因子 f_i , 进而改变均衡矩阵 $\mathbf{H}$, 从而使方程组稳定, 得到稳定的扬声器权值解。

1.3 基于自适应建模的反馈算法

在实际应用中, 通过测试或仿真得到的声通道传递函数受模拟舱环境、电声系统等因素影响, 与理想值存在一定差别, 为了提高复现精度, 本文采用自适应建模法对通道传递函数进行在线调整^[13]。自适应建模法流程如图 2 所示, 图中 $\mathbf{s}$ 是初始计算获得的驱动信号, $\mathbf{n}$ 是噪声信号, $\mathbf{G}$ 是理想条件下的通道传递函数, $\mathbf{G}'$ 是传递函数的估计, $\mathbf{d}$ 是目标声压信号, $\mathbf{e}$ 是误差信号。

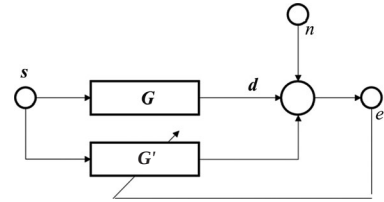


图2 自适应建模法流程

Fig.2 Schematic of adaptive modeling process

在声场复现过程中, 自适应建模法通过自适应算法根据测点所采集的声压信号与目标声压信号之间的误差不断估计并调整通道传递函数, 直到误差收敛。

2 声场复现实施及方法验证

2.1 复现系统搭建

为了验证本文方法的正确性。在一个飞机模拟舱中进行了声场复现试验。在此模拟舱内部设置 4 个目标点位, 要求在这 4 个点位上复现实际飞机中所测得的声压信号。模拟舱、主要尺寸及目标点位位置如图 3 所示。

试验中目标点位的选择模拟了飞行员与乘客位置, 点位的高度均为 1.0m。这 4 个目标点位模拟了对人听觉感知较为重要的区域, 以此作为算法误差的计算位置。

本文中声场复现系统的硬件连接如图 4 所示。包括声场复现控制模块、复现扬声器发声模块以及采集模块。声场复现控制模块包括信号输出控制器, 主要用于将扬声器驱动信号输出到不同的扬声器, 采用 NI-PXIe-8840 控制器, 主体为 PXIe-1082 机箱; 复现扬声器发声模块用于在模

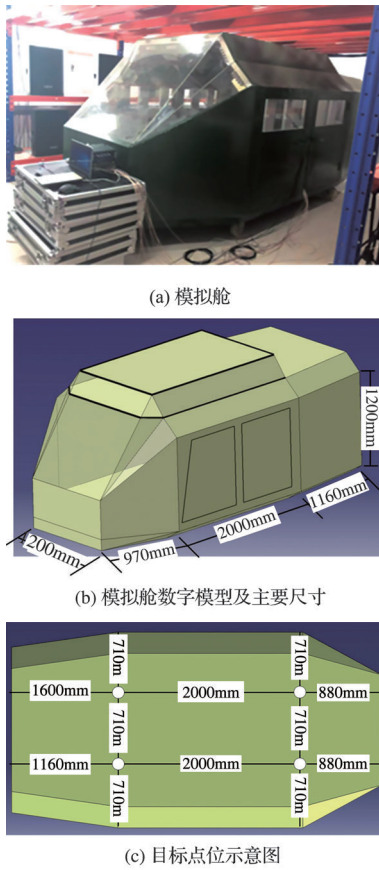


图3 模拟舱尺寸与目标点位位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the simulation cabin dimensions and the position of the target points

拟舱外部发声从而在模拟舱内部形成目标声场,采用TB-4322模拟输出卡;采集模块主要用于反馈算法,并采集目标点位的声压信号,从而与真实信号对比验证方法有效性,采用PXIe采集卡。

复现目标声场的扬声器阵列包含30个扬声器,型号为JBL CM102型高保真有源监听音响。30个扬声器分别布放在模拟舱的左右两侧以及顶部,其中左右两侧各布置8个扬声器,摆放为2×4的阵列形式,上下行距约为0.3m,左

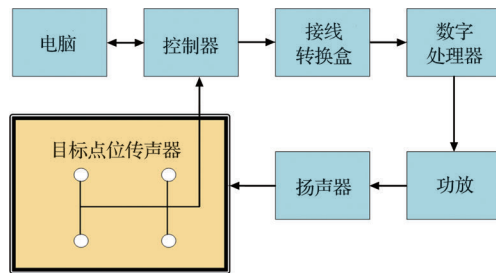


图4 声场复现硬件连接示意图

Fig.4 Schematic of sound field reproduction hardware connection

右列距约为1m;另外14个扬声器放置在模拟舱顶部,分为三行,第一行与第三行以0.8m为间距布置5个扬声器,第二行以1m为间距布置4个扬声器。扬声器外放功率为30W,工作频率为50~20kHz,能够很好地体现原始声音效果,减少扬声器的谐波失真,可保证声场复现试验的顺利进行。为了放大扬声器播放信号,使扬声器阵列能够产生接近飞机真实飞行时的初级声场声级,复现系统使用了15台功率放大器,功率放大器型号为WTWUK600型。扬声器及控制器如图5所示,模拟舱外部的扬声器阵列如图6所示。



图5 控制器及扬声器

Fig.5 The controller and the speaker



图6 复现扬声器阵列

Fig. 6 Array of speakers

2.2 声通道传递函数测量

由扬声器到模拟舱内的声通道传递函数矩阵是声场复现过程中的重要数据基础。本文中进行声场复现验证时,采用测量的方式完成声通道传递函数的获取。在测量中,首先确定每个扬声器以及模拟舱内部目标点位的位置。然后将每个扬声器与目标点位上的传声器一一建立对应关系。如对于第一个扬声器,利用其发出扫频信号,然后在模拟舱内部对一个点位的传声器采集得到响应信号,即可获得其传递函数

$$G(\omega) = \frac{\mathcal{F}[r(t)]}{\mathcal{F}[s(t)]} \quad (15)$$

式中, $\mathcal{F}[\cdot]$ 表示傅里叶变换, $r(t)$ 为接收到的信号, $s(t)$ 为声源发出的扫频信号。

得到对应于第一个扬声器的一组声通道传递函数后, 此后对剩余 29 个扬声器各自完成上述测试, 最终得到每个扬声器对应于每个目标点位的声通道传递函数。其中一个声通道传递函数如图 7 所示。需要注意的是, 此声通道传递函数与环境密切相关, 试验中模拟舱是建于一个半消声环境内, 因此所测得的声通道传递函数包含了模拟舱、外室的各项因素, 当环境改变时, 需重新采集声通道传递函数。

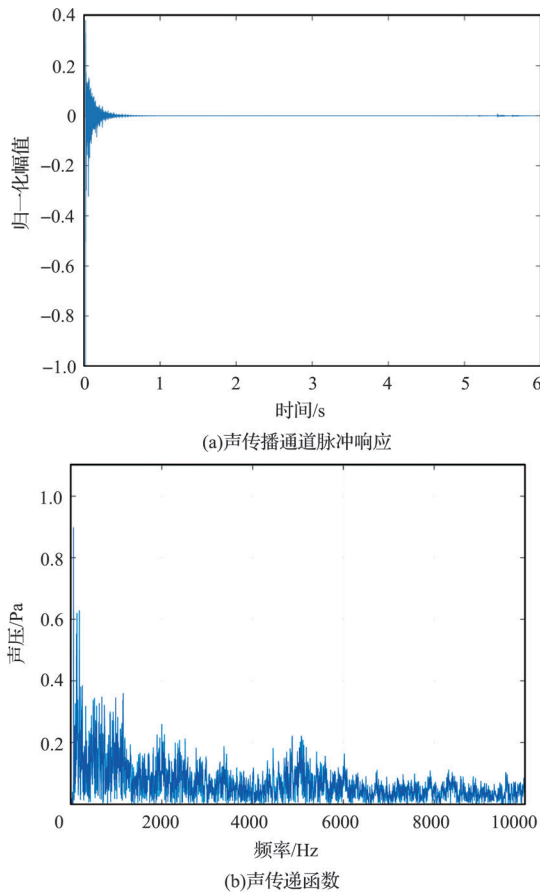


图7 声传播通道脉冲响应及传递函数

Fig.7 Impulse response and transfer function of the acoustic transmit channel

2.3 声场复现结果

利用前述正则化声压匹配方法, 复现模拟舱内 4 个目标点位的声压信息, 目标是 4 个点位的复现声压与目标声压频谱和声压级保持一致。飞机舱室实际声压信号以及模拟舱中的信号通常噪声较高, 无法在其基础上直接比较复现频响与目标频响的差别, 因此本文对目标频响以及复现频响均提取了包络, 如图 8 所示, 这样就可以对其进行对比。

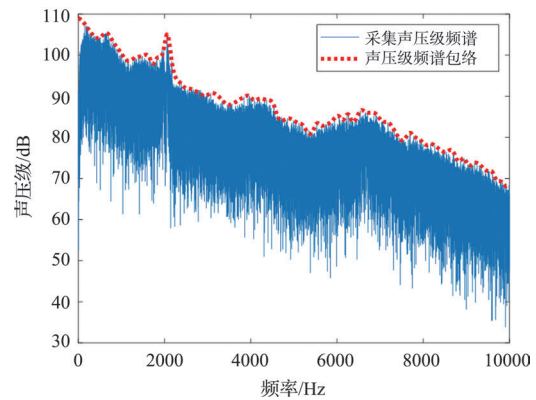


图8 舱内目标点位采集频谱及其包络提取

Fig.8 Measured frequency spectrum at the target point and its envelope

模拟舱中 4 个目标点位的目标频响与复现频响的对比如图 9 所示。从图 9 所示结果来看, 复现频响与目标频响一致度较高。复现声压与目标声压的频谱趋势基本一致, 所复现的各点位的频响曲线具有与真实频响曲线一致的峰值线谱特性, 这对于飞机舱室声场异常重要, 因为受发动机噪声影响, 飞机舱室噪声具有显著的谐频线谱特性, 对这些线谱进行精准复现十分有利于噪声控制方案的设计或者声品质的设计。总体上, 1000Hz 以下的低频段两曲线几乎重合, 说明几乎可以真实复现目标频响。在 2000Hz 处, 点位 1 及点位 2 有一定误差, 而随着频率的增加, 曲线会出现较多不一致, 这是因为在一个舱室空间中, 频率升高引起模态密度的增加, 此时复现难度较高。

为了量化复现精度, 采用相对误差对数据进行统计分析, 4 个点位的误差如图 10 所示。从图 10 所示结果可以看出, 总体上 4 个点位的相对误差均未超过 5%, 证明复现方法具有较高的精度, 在 2000Hz、4300Hz、6500Hz 等处复现误差较大, 是因为在这些频率处, 飞机舱内声压信号具有较为明显的峰值, 当复现的峰值频率有较小偏移时就会产生较大误差。因此未来进一步提高对线谱复现的精准度是一项重要工作。

3 结束语

面向飞机舱室声场复现问题, 本文以经典的声压匹配法为基础, 将正则化技术引入逆问题计算之中, 可避免实际场景中噪声较大所带来的误差问题, 另外, 结合自适应建模反馈算法, 可保证复现算法稳定性。以所发展的算法为基础, 在一个飞机模拟舱环境下搭建了声场复选系统, 在 30 个扬声器的条件下, 可协同复现舱内多个点位的目标频响, 且精度较高。本文所发展的舱室声场复现方法对于降低实

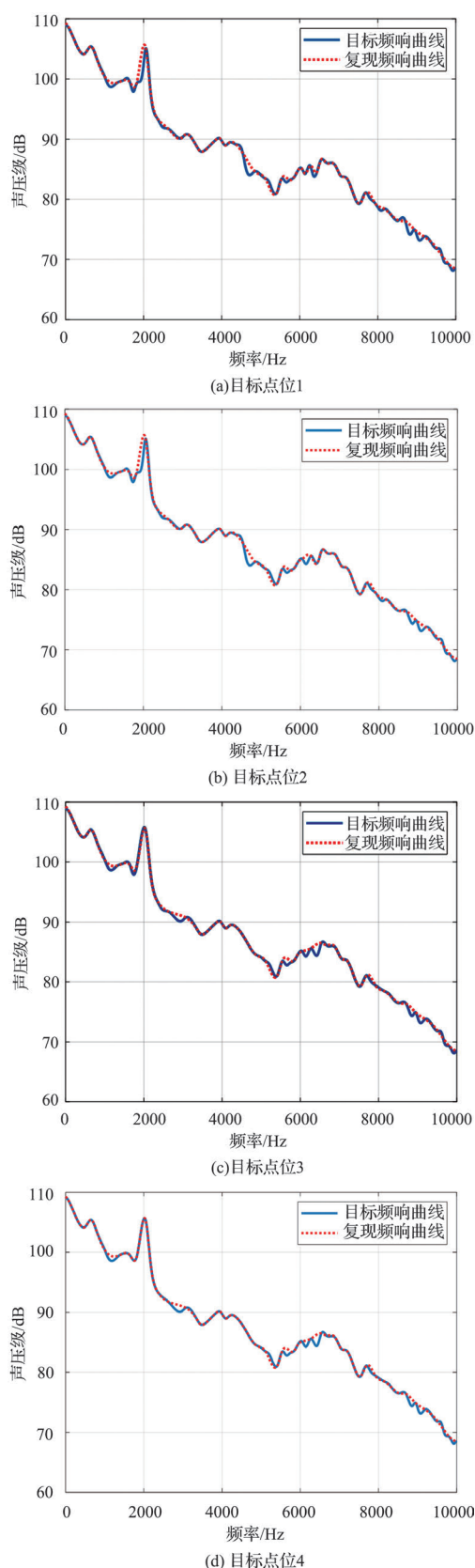


图9 各点位目标频响曲线与复现频响曲线对比

Fig.9 Target frequency response curves and the reproduction ones

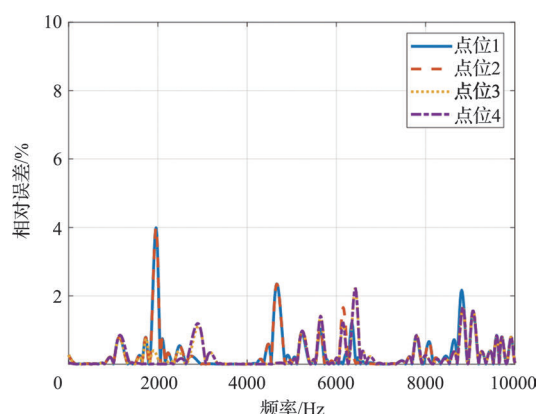


图10 目标频响曲线与复现频响曲线相对误差

Fig.10 Relative errors of the target frequency response curves and the reproduction ones

际飞行试验成本具有重要的作用,而且相关技术也可应用于汽车、高铁等交通工具的舱室声场复现中,为相关研究提供基础试验平台,具有重要意义。

AST

参考文献

- [1] 郑雯斯, 王芳. 基于声扰动方程的气动噪声传播积分计算方法[J]. 航空科学技术, 2023, 34(12): 30-36.
Zheng Wensi, Wang Fang. Integral computation method of aerodynamic noise propagation based on the acoustic perturbation equations[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(12): 30-36. (in Chinese)
- [2] 夏烨, 陆美慧, 李旦望, 等. 涡扇发动机缩尺风扇管道声学试验数据分析[J]. 航空科学技术, 2022, 33(8): 16-22.
Xia Ye, Lu Meihui, Li Danwang, et al. Acoustic test data analysis on turbofan engine reduced scale fan[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(8): 16-22. (in Chinese)
- [3] Berkhout A J. A holographic approach to acoustic control[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1988, 36: 977-995.
- [4] Berkhout A J, Vogel P, Vires D. Acoustic control by wave field synthesis[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 93(5): 2764-2778.
- [5] Gauthier P A, Berry A, Woszczyk A. Sound field reproduction in-room using optimal control techniques: Simulations in the frequency domain[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 117(2): 662-678.
- [6] Gauthier P A, Camier C, Lebel F A, et al. Experiments of sound field reproduction inside aircraft cabin mock-up[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2012, 133: 8716.

- [7] Verron C, Gauthier P A, Langlois J, et al. Spectral and spatial multichannel analysis synthesis of interior aircraft sounds[J]. IEEE Transaction on Audio, Speech, and Language Processing, 2013, 21(7): 1317-1329.
- [8] Betlehem T, Poletti M A. Two dimensional sound field reproduction using higher order sources to exploit room reflections[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(4): 1820-1833.
- [9] Betlehem T, Abhayapala T D. Theory and design of sound field reproduction in reverberant rooms[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 117(4): 2100-2111.
- [10] 王岩, 陈克安, 胥健. 基于 HOA 的圆柱腔低频声场重构[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(4): 649-655.
Wang Yan, Chen Ke'an, Xu Jian. Low frequency sound field reproduction within a cylindrical cavity using higher order ambisonics[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(4): 649-655. (in Chinese)
- [11] Gauthier P A, Camier C. Experiments of multichannel least-square methods for sound field reproduction inside aircraft mock-up: objective evaluations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 376(18): 194-216.
- [12] 贺春东, 张永斌, 毕传兴, 等. 分部优化正则化在近场声全息技术中的应用[J]. 声学学报, 2011, 36(4): 419-426.
He Chundong, Zhang Yongbin, Bi Chuanxing, et al. The application of regularization technique based on partial optimization in the nearfield acoustic holography[J]. Acta Acustica, 2011, 36(4): 419-426. (in Chinese)
- [13] 来昊, 陈克安, 王磊. 面向声品质优化的有源噪声控制算法研究[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(4): 48-53+136.
Lai Hao, Chen Ke'an, Wang Lei. A novel active noise control algorithm for sound quality optimization[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(4): 48-53+136. (in Chinese)

Cabin Sound Field Reproduction Based on Pressure Matching Method Combining Regularization Technique

Wang Haitao¹, Chen Ke'an¹, Zeng Xiangyang¹, Dong Ningjuan², Gao Nansha¹

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China

Abstract: Aircraft noise control, sound quality design and other researches require lots of acoustic field experiments carried out in the cabin. However, the real aircraft flights are too expensive to be frequently performed in the study. Reproducing the sound field in an experimental cabin is very important and valuable to reduce research costs and carry out repeatable experiments. In this paper, a multi-target point sound field reproduction algorithm based on the classical sound pressure matching method is established. To improve the accuracy in the real environment where there is obvious noise, and the regularization technique is introduced into the method. The reproduction system is built in an experimental aircraft cabin environment. The reproduction experiments show that the algorithm can reproduce the target frequency response curve at multiple points in the specified cabin with a relative error of less than 5% in a wide frequency range. The method has good prospects in the aircraft cabin acoustic environment reproduction applications.

Key Words: aircraft cabin; sound field reproduction; sound pressure matching; speaker array; regularization

Received: 2023-12-18; Revised: 2024-04-11; Accepted: 2024-05-09

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(12074317); Aeronautical Science Foundation of China(20181553017)