

# 基于 FE—SEA 混合法的机舱内中频噪声预测技术

刘飞, 白静, 刘小群

(宝鸡文理学院 物理与光电技术学院, 陕西 宝鸡 721016)

**摘要:** 为充分降低机舱中频噪声的振荡频率, 获得更加精确的频段波分析结果, 提出一种基于 FE—SEA 混合法的机舱内中频噪声预测技术手段; 按照原理参数的获取现状, 划分机舱子系统中的节点属性结构, 完成 FE—SEA 混合法的建模处理; 在此基础上, 筛查频段中的所有共节点, 根据中频孔洞的密封原理, 建立标准的噪声腔子系统, 再联合各项预连接结构, 实现机舱中频噪声的预处理; 分别从频段精度、子系统稳定性、噪声损耗因子、传输路径 4 个方面, 分析 FE—SEA 混合法对噪声预测的控制条件, 实现机舱内中频噪声预测手段的顺利应用; 实用分析结果表明, 与 SEA 方法相比, FE—SEA 混合法预测技术可将机舱中频噪声振荡频率稳定在 100 Hz 左右, 对频段波精确分析起到适当促进作用。

**关键词:** FE—SEA 混合法; 机舱噪声; 中频预测; 原理参数; 频段共节点; 中频孔洞; 预连接; 损耗因子

## Prediction Technology of Medium Frequency Noise in Engine Room Based on FE—SEA Hybrid Method

Liu Fei, Bai Jing, Liu Xiaoqun

(Institute of Physics and Optoelectronics Technology, Baoji University of Arts and Science, Baoji 721016, China)

**Abstract:** In order to reduce the oscillation frequency of the medium frequency noise in the engine room and obtain more accurate wave analysis results, a FE—SEA hybrid method was proposed to predict the medium frequency noise in the engine room. According to the acquisition status of the principle parameters, the node attribute structure in the engine room subsystem was divided, and the fe—sea mixed modeling process was completed. On this basis, all common nodes in the frequency band are screened, a standard noise cavity system is established according to the sealing principle of intermediate frequency holes, and then all pre-connected structures are combined to realize the pretreatment of intermediate frequency noise in the engine room. In this paper, the control conditions of fe—sea hybrid method for noise prediction are analyzed from four aspects of frequency band accuracy, subsystem stability, noise loss factor and transmission path, respectively, so as to realize the smooth application of if noise prediction method in engine room. The results of practical analysis show that compared with SEA method, fe—sea hybrid prediction technology can stabilize the oscillation frequency of medium frequency noise in the engine room at about 100 Hz, which plays a proper role in promoting the accurate analysis of frequency band waves.

**Keywords:** FE—SEA mixed method; engine room noise; medium frequency prediction; principle parameters; common nodes of frequency band; intermediate frequency hole; pre-connection; loss factor

## 0 引言

机舱舒适性是评价飞机乘坐安全性及可靠性的重要指标, 而机舱内的基础噪声水平, 则是对乘坐舒适性产生直接影响的物理因素。受到飞行环境等条件的限制, 飞机舱室的结构形式相对较为复杂, 噪声源物质种类较多, 声音在传播过程中所触及的任何物质, 都可能对原始噪声信号

产生一定程度的放大促进作用。结合现有信息资料可知, 存在于机舱内的噪声信号大多表现为中频噪声, 这类噪声主要由机械设备旋转或轴承零件的振动产生, 在一定强度作用下, 可推动接触面或附着面上的物体发生滑移现象, 进而触发一定强度的干扰性声响<sup>[1]</sup>。根据国家参考标准可知, 中频噪声的振荡频率处于 70~350 Hz 之间, 其中超过 200 Hz 的噪声会对人体听觉系统造成损伤性影响, 而低于 200 Hz 的噪声则被定义为安全性中频噪声。

为建立更加舒适的机舱乘坐环境, 现有处理技术借助 SEA 方法统计原始噪声中的频段共节点数量, 再根据噪声腔子系统内预测孔洞的分布状态, 确定中频噪声对整个机舱体结构的影响控制作用。但随着机舱中频噪声振荡频率的不断提升, 人工频段波的统计分析精度始终不能达到预期标准水平。为解决上述问题, 引入 FE—SEA 混合法, 在

收稿日期: 2019-10-15; 修回日期: 2019-10-28。

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目(11JK0847)。

作者简介: 刘飞(1981-), 男, 陕西榆林人, 博士, 副教授, 主要从事机械电子技术方向的研究。

白静(1976-), 女, 陕西汉中, 硕士, 副教授, 主要从事机械及自动化方向的研究。

刘小群(1977-), 女, 陕西宝鸡人, 硕士, 副教授, 主要从事电子技术方向的研究。

机舱子系统重新划分建模的基础上, 密封所有已存在的中频孔洞, 再根据预应连接标准, 确定该方法对于机舱内中频噪声预测的控制能力水平。最后模拟中频噪声在机舱内的传输行为, 根据噪声振荡频率的变换情况, 确定这种新型预测手段对频段波精确分析的促进效果。

### 1 FE-SEA 混合法建模

FE-SEA 混合法是机舱内中频噪声预测技术实现的基础环节, 按照原理参数获取、机舱子系统划分的处理流程, 其具体建模操作方法如下。

#### 1.1 基本原理参数获取

FE-SEA 混合原理参数是以“确定”和“统计”为应用核心的噪声约束条件, 整个求解过程遵循有限元计算理论, 与 SEA 方法相比, 不仅严格规定了机舱子系统内中频噪声分子的传输边界自由度, 也按照频段波的振荡标准, 分配了待筛查共节点可能达到的物理行为区间<sup>[2]</sup>。总的来说, FE-SEA 混合原理参数是一种相对较为完善的标准化建模条件, 可同时提供机舱子系统划分处理所需的时化指标与量化指标。所谓时化指标是指 FE-SEA 混合原理参数在时间角度, 赋予中频噪声分子传输边界自由度的激励条件, 可表示为频段波在反射场环境中的稳态响应趋势, 在必要效力参量保持不变的情况下, FE-SEA 混合原理参数的时化指标  $\bar{j}$ , 只能在上限为  $\chi_1$ 、下限为  $\chi_0$  的物理区间内保持波动状态。量化指标是指 FE-SEA 混合原理参数在数量级角度, 赋予中频噪声震荡波长条件的守恒抑制处理, 可表示为频段波在等效共节点中的振荡偏差行为, 当机舱内噪声的基础振荡频率保持不变时, FE-SEA 混合原理参数的量化指标  $\bar{d}$ , 只与频段带宽  $\bar{\epsilon}$  保持关联性影响关系。联立上述变量条件, 可将 FE-SEA 混合法的基本原理参数获取过程表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{j} &= \frac{\left| p - \delta \sum_{x_1}^{x_i} \omega_1 \sqrt{\epsilon + r} \right|}{\sum_{x_0}^{x_i} \omega_0^2} \\ \bar{d} &= \sqrt{\frac{i}{u-1}} \cdot \bar{\epsilon} \left( \frac{\gamma}{e} \right)^2 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

其中:  $p$  代表机舱内的最大中频噪声流量条件,  $\delta$  代表 FE-SEA 混合原理的“确定”性约束分子,  $\omega_1$ 、 $\omega_0$  代表两个不同的中频噪声频段提取节点向量,  $e$ 、 $r$  分别代表两个不同的幂次项提取数值,  $i$  代表 FE-SEA 混合法的常性建模向量,  $u$  代表目标噪声频段的基参数,  $e$ 、 $\gamma$  分别代表最大和最小的中频噪声节点数据。

#### 1.2 机舱子系统划分及建模

在 FE-SEA 混合法的约束作用下, 机舱环境应该满足 Y-7 结构的搭建原理, 除保留必要的声学传播组织外, 还需要在两端的噪声腔之间, 设置一个独立的频段共聚区域, 用于抑制由孔洞密封不完全而产生的中频振荡频率攀升行为, 如图 1 所示。

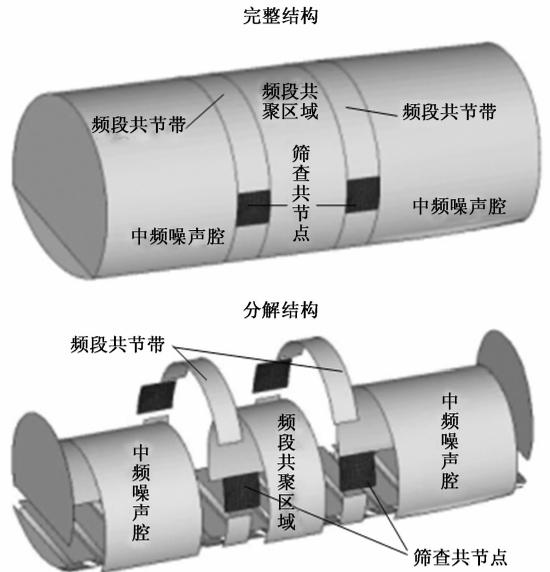


图 1 FE-SEA 混合法中的飞机舱室

由图 1 可知, 满足中频噪声预测原理飞机舱室的频段共聚区域必须位于两条频段共节点带之间, 且每条频段共节点带上都应具有相同数量的筛查共节点。随着飞机航行时间的增加, 整个舱室始终保持匀速传输的运动状态, 两端中频噪声腔内的噪声元素大量累计, 迫使频段共聚区域及频段共节点带出现相同的微振动行为, 而在此过程中, 频段共节点带内的筛查共节点不断移动, 直至整个腔体结构内的所有中频噪声信号均达到标准化分布状态。

机舱子系统是以 FE-SEA 混合法飞机舱室作为理论基础的建模结构, 在遵从 FE-SEA 混合法飞机舱室模型结构的基础上, 增添了下级噪声腔及子体空隙腔, 可在维持原有机舱中频噪声振荡频率的基础上, 充分过滤其中的峰值及谷值筛查节点, 进而使所有共节点噪声量能够完全贴合 FE-SEA 混合法的应用需求标准<sup>[3]</sup>。

分析图 2 所示的机舱子系统建模结构可知, FE-SEA 混合法飞机舱室中的噪声腔对应子系统内的子频率噪声腔, 频段共聚区域对应机舱噪声信号聚合子区域, 频段共节点带对应子系统共节点带, 筛查共节点对应噪声共节点。随着 FE-SEA 混合法的应用, 下级噪声腔与子体空隙腔可联合整个机舱子系统建模结构, 在妥善处置机舱内中频噪声信号的同时, 根据频段共节点的筛查情况, 实施后续的空洞密封与预测处理行为。

## 2 机舱中频噪声预处理

遵照 FE-SEA 混合法建模原理, 筛查噪声频段中的共节点, 再通过密封中频孔洞的方式, 建立完整的噪声腔子系统, 最后根据预应连接的生成步骤, 实现机舱中频噪声的基础预处理。

### 2.1 频段共节点筛查

频段共节点筛查的处理对象为整个 FE-SEA 混合法飞

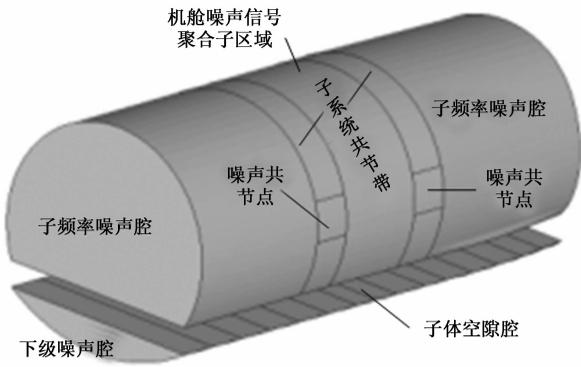


图 2 机舱子系统建模结构

机舱室, 需要在确保中频噪声源保持稳定振动的基础上, 查探连接零件间的搭载方式, 进而使预测主机能够完整获取噪声频段的共节点识别数据, 复原被频段波振荡行为更改的共节点频段接入状态<sup>[4]</sup>。常见的频段共节点筛查手段分为平滑筛查(如图 3)和覆盖筛查(如图 4)两类(出于保密性考虑, 除了必要位置外, 其它机舱结构不能得到清晰展示)。

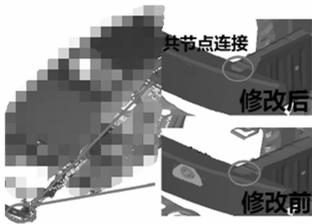


图 3 频段共节点平滑筛查原理

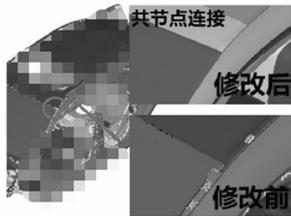


图 4 频段共节点覆盖筛查原理

频段共节点平滑筛查主要发生在机舱内的中频噪声交汇处, 即机舱拐角连接处。筛查前的连接表面相对较为粗糙, 极利于中频噪声信号的粘连或附着, 可加重噪声预测过程中误差回声波所占比重。筛查后的连接表面相对较为光滑, 不合理附着的于中频噪声信号得到有效清除, 对稳定机舱内的噪声振荡频率起到极强促进作用。

频段共节点覆盖筛查主要发生在机舱内中频噪声的遍布分置区域内, 即机舱的弯曲表面。筛查前的连接表面被大量误差中频噪声信号占据, 导致机舱内噪声振荡频率不断提升, 引发了严重的信号量错误传输行为。筛查后连接表面的误差中频噪声信号得到有效清除, 机舱内噪声振荡频率在短时间内回归理想数值水平, 有助有后续中频孔洞

密封操作的实施。

### 2.2 中频孔洞密封

中频孔洞是机舱内噪声参量的唯一传输通道, 在 FE-SEA 混合法处于持续实施应用的条件下, 这些中频孔洞会随噪声振荡频率的增加, 而呈现持续扩张的变化趋势, 最终导致整个机舱环境中的中频噪声分子总数不断提升, 使噪声腔子系统内的频段波开始产生压力形变量。而中频孔洞密封则是缓解频段波形变量, 控制机舱环境内中频噪声分子总数的有效手段<sup>[6]</sup>。组成机舱体结构的板材大多保持良好的声腔包容性, 其中一部分板件内部已经具有一定数量的中频孔洞, 例如舱门隔板等。这些中频机舱孔洞的密封应以填补空隙作为主要操作, 一方面可在传输噪声信息的同时, 形成完全密闭的声腔包容结构, 另一方面也能促进待筛查共节点快速形成频段组织。

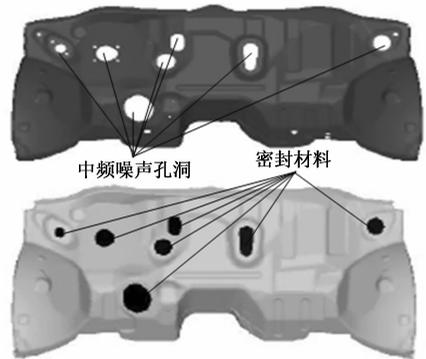


图 5 机舱内中频噪声孔洞密封原理

### 2.3 噪声腔子系统建立

噪声腔子系统是 FE-SEA 混合法飞机舱室结构的分支属性模型, 由仪表板中频实体、中通实体、行李架实体、舱门实体等多个物理结构共同组成, 如表 1 所示。其中一个行李架实体分别对应左右行李传输、左右构架传输、左右控制传输三类中频噪声类型, 在 FE-SEA 混合法作用下, 可形成 6 个符合预测需求的噪声腔子系统。舱门实体分别对应左右前舱门传输、左右后仓门传输两类中频噪声类

表 1 机舱内中频噪声腔子系统汇总表

实体位置	中频噪声类型	噪声腔子系统个数
仪表板中频实体	仪表板	1
中通实体	中通	1
行李架实体	左右行李传输	6
	左右构架传输	
	左右控制传输	
舱门实体	左右前舱门传输	4
	左右后仓门传输	
舱内前部实体	头部传输	6
	腰部传输	
	脚部传输	
舱内后部实体	头部传输	4
	尾部传输	

型, 在 FE-SEA 混合法作用下, 可形成 4 个符合预测需求的噪声腔子系统。舱内前部实体分别对应头部传输、腰部传输、脚部传输三类中频噪声类型, 在 FE-SEA 混合法作用下, 可形成 6 个符合预测需求的噪声腔子系统。舱内后部实体分别对应头部传输与尾部传输两类中频噪声类型, 在 FE-SEA 混合法作用下, 可形成 4 个符合预测需求的噪声腔子系统。

### 2.4 预应连接的生成

预应连接是判断 FE-SEA 混合法在机舱噪声腔子系统内实施有效性的重要指标, 完整的生成过程需要 SEA 接线等物理成分的共同配合。为保证频段波的稳定传输, 满足中频噪声预测标准的机舱子系统应保持良好的规范性连接状态, 即每一个处于起点位置的频段共节点都应连接多条 SEA 接线, 在传输噪声参量的过程中, 这些接线组织间可以存在覆盖或交叉行为, 但所有接线最终只能回归处于终点位置的频段共节点, 且不能在节点处继续保持覆盖或交叉属性<sup>[6]</sup>。

图 6 中的所有连接线都属于 SEA 接线组织, 被标注的空心圆结构都是频段共节点。分析图中接线的连接趋势可知, 在预应连接过程中, 中频噪声的 SEA 接线并不一定始终保持直线传播状态, 也会随机舱结构的变化, 而出现一定弧度的圆周传播行为。

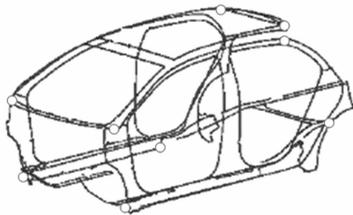


图 6 直升机舱内中频噪声的预应连接路径

## 3 FE-SEA 混合法对噪声预测的控制

在机舱中频噪声预处理流程的支持下, 确定频段精度条件与子系统稳定性, 在确保噪声损耗因子不超过理想限度条件的基础上, 统一信号参量的传输路径, 确定 FE-SEA 混合法对机舱内中频噪声预测控制结果的影响强度。

### 3.1 频段精度

频段精度是指机舱频段波在 FE-SEA 混合法作用下, 对中频噪声信号所表现出来的承载限度条件。按照中频噪声在机舱内的传输特性来看, 完成筛查的共节点和未完成筛查的共节点可存在于同一条频段结构内部, 且随着 FE-SEA 混合法应用时间的不断延长, 这些共节点组织会出现明显的两极化趋近行为, 即所有完成筛查的共节点组织趋近频段结构的一端, 未完成筛查的共节点组织趋近频段结构的另一端<sup>[7]</sup>。在此操作执行的过程中, 频段结构的承载刚度  $k$  始终保持不变, 利用该条权限制性属性, 可将机舱内中频噪声频段的预测精度条件表示为:

$$s = \int_{\bar{f}} \frac{k^2 |\bar{j} \times \bar{d}|}{|f|} df \quad (2)$$

其中:  $\bar{c}$ 、 $\bar{d}$  分别代表机舱结构对中频噪声信号的上、下限边界承载系数,  $f$  代表中频噪声信号的精度定频分子。

### 3.2 子系统稳定性

子系统稳定性是指在处理中频噪声信号时, 机舱所具有的最高预测水平承载等级, 可随共节点所处频段精度数值的改变而出现一定程度的增大或减小。随着 FE-SEA 混合法应用时间的增加, 机舱建模结构中的下级噪声腔物理范围不断扩大, 直至字体空隙腔能够完全容纳一条独立的共节点频段组织<sup>[8]</sup>。而在此过程中, 中频噪声的原始振荡幅值  $h_0$  与预期振荡时间  $t'$  均保持不变, 联立公式 (2) 可将机舱子系统的稳定性数值参量表示为:

$$g_0 = \sqrt{\sqrt{\left(\frac{s}{h_0 \sqrt{H} \cdot t' \sqrt{T}}\right)}} \quad (3)$$

其中:  $H$  代表与中频噪声共节点原始振荡行为相关的指向性参数,  $T$  代表预期振荡过程中的时间行为标量。

### 3.3 噪声损耗因子

噪声损耗因子是影响机舱内中频参量预测精确性的唯一指标, 在短时间内可出现偏离原始数据结果的物理行为, 但这种变化必须以 FE-SEA 混合法的施加程度作为参考标准。通常情况下, FE-SEA 混合法的高水平施加, 会导致噪声损耗因子量的持续上升; FE-SEA 混合法的低水平施加, 会导致噪声损耗因子量的持续下降<sup>[9]</sup>。故确定噪声损耗因子的原始数值结果, 是提升机舱内中频噪声预测准确性的有效手段。

### 3.4 传输路径

传输路径确定是机舱内中频噪声预测处理的末尾应用环节, 在 FE-SEA 混合法的促进下, 机舱发动机、前悬架及后悬架都会出现明显的振动激励行为。而前纵梁、前指梁、前柱体、后纵梁、后横梁、后柱体中原存在的中频噪声共节点会快速集合在一条频段组织内, 进而加速噪声参量在其它机舱设备中的传输速率<sup>[10]</sup>。最终将这些已具备预测能力的频段共节点整合到独立的子系统声腔结构中, 实现一次完整的机舱内中频噪声预测处理操作。

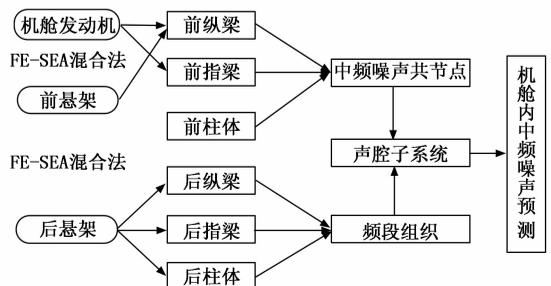


图 7 机舱内中频噪声的预测传输路径

## 4 检测应用分析

联合 SEA 方法与 FE-SEA 混合法, 在相同实验平台

中, 模拟飞机的航行状态, 分别对两组机舱施加相同影响效果的噪声波, 其中前者作为对照组、后者作为实验组。截取其中符合中频要求的噪声波频段, 将各项监测指标输入相同分析软件中, 根据软件结构的物理分析结果, 确定实验组、对照组机舱内中频噪声振荡频率的变化情况。

#### 4.1 频段波分析环境

利用虚拟控制软件模拟飞机的航行状态, 再利用噪声制造仪器对模拟飞机施加一定程度的噪声波, 借助传输导线连接两台操作主机。观察声波主机中噪声频段的变化情况, 截取完整的中频影响区间, 再利用监测软件记录模拟主机中机舱噪声振荡频率在该段时间内的变化数值。改变监测记录方法, 分别获取实验组、对照组的真实操作数值。

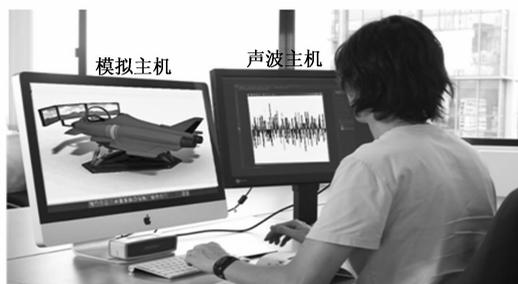


图 8 频段波监测环境

#### 4.2 机舱中频噪声振荡频率对比

振荡频率是反应机舱中频噪声频段波分析精度的重要因素, 在不发生外力干扰的情况下, 机舱中频噪声振荡频率越低, 频段波分析精度越趋于稳定; 机舱中频噪声振荡频率越高, 频段波分析精度的动荡行为越明显。改变接入监测软件中的影响方法, 确定实验组、对照组机舱中频噪声振荡频率的具体变化情况, 如图 9 所示。

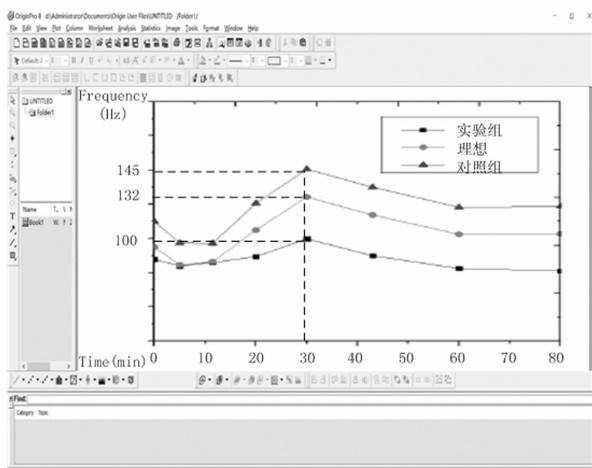


图 9 机舱中频噪声振荡频率对比图

按照由上至下的顺序, 图 9 中曲线依次代表对照组机舱中频噪声振荡频率、理想机舱中频噪声振荡频率、实验组机舱中频噪声振荡频率。前 30 min 的监测时间内, 三条

曲线基本呈现逐渐上升的变化趋势, 30~60 min 内, 机舱中频噪声振荡频率开始逐渐下降, 60 min 后, 曲线变化状态基本保持稳定。分析图 9 可知, 理想机舱中频噪声振荡频率最大值可达 132 Hz, 但实验组机舱中频噪声振荡频率仅达到 100 Hz, 与理想极值相比下降了 32 Hz, 对照组机舱中频噪声振荡频率达到 145 Hz, 与理想极值相比上升了 13 Hz, 更远高于实验组数值水平。综上可认为, 基于 FE-SEA 混合法的机舱内中频噪声预测技术可稳定降低噪声信号的振荡频率, 使频段波分析精度在一段监测时间内始终保持稳定状态。

## 5 结束语

随着 FE-SEA 混合法的应用, 机舱子系统得到有效的规划建模处理, 而频段共节点在此条件下, 密封了所有中频孔洞, 并根据噪声腔的的建立标准, 完善了预应连接的生成要求。从预测控制的角度来看, 频段精度得到精确细化, 并且可以在提升子系统稳定性的同时, 减少噪声损耗因子的实施用量, 最终完善中频噪声信号在机舱环境内的传输路径。从实际监测效果的角度来看, 中频噪声振荡频率出现明显降低, 从根本上解决了机舱噪声频段波分析精度过于动荡的问题。

#### 参考文献:

- [1] 李清, 于汉, 杨德庆. 多类振动噪声源下舰船水下噪声的耦合声场计算方法 [J]. 上海交通大学学报, 2019, 53 (2): 39-47.
- [2] 张勇, 王坤祥, 盛陈. 某特种车车内中频噪声的混合 FE-SEA 法分析 [J]. 机械科学与技术, 2018, 37 (11): 1698-1704.
- [3] 陈琳, 邹惠之, 吴兴存, 等. 基于 NET 的 IETM 插图管理子系统研究与应用 [J]. 电子设计工程, 2017, 25 (10): 61-65.
- [4] 何通能, 任庆鑫, 陈德富. 基于马尔科夫链的 LoRaWAN 网络节点性能分析 [J]. 传感技术学报, 2018, 31 (9): 103-109.
- [5] 潘翔, 焦吾振, 郑河荣, 等. 结合插值细分和径向基函数的 3 维扫描数据孔洞修补 [J]. 中国图象图形学报, 2018, 23 (4): 564-571.
- [6] 黄海波, 李人宪, 丁渭平, 等. 基于小波偏相干分析的车内噪声源识别 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (7): 157-163.
- [7] 张晓琳, 毛红杰, 唐文彦. 干涉测量低频水下声源频率的改进算法 [J]. 光学精密工程, 2018, 26 (11): 14-22.
- [8] 徐万鹏, 徐武彬, 李冰, 等. 不同起点位置对滑动轴承转子系统稳定性影响 [J]. 机械设计与制造, 2017, 17 (11): 91-94.
- [9] 王永, 滕召胜, 李建闯. 基于采样序列重构的高精度介质损耗角测量方法 [J]. 电工技术学报, 2018, 33 (23): 221-229.
- [10] 张文春, 滕莉, 段树林. 舱室噪声传递路径分析的 SEA 赋权图法 [J]. 大连海事大学学报, 2017, 43 (1): 67-71.