

基于混合 FE-SEA 方法的加筋板宽频隔声预计

彭涛, 韩鹏程, 刘兴强, 燕群, 邹学锋, 戚志民

(中国飞机强度研究所 航空声学与振动航空科技重点实验室, 西安 710065)

摘要: **目的** 预测有限尺寸加筋平板结构宽频范围内的隔声特性, 指导飞行器结构声学设计。**方法** 基于混合 FE-SEA 方法, 对单向加筋平板结构开展宽频隔声预计。同时, 在标准声学试验室对其进行隔声测试, 并将 FE-SEA 法预计结果与测试结果、SEA 方法计算结果进行对比分析。**结果** 与 SEA 法相比, 混合 FE-SEA 方法在 50 Hz~10 kHz 频带内的预计结果与试验结果更为吻合, 其更适用于宽频隔声预计; 在 400 Hz~10 kHz 的中高频段内, FE-SEA 方法预计结果与试验结果基本相同; 在 50 Hz~400 Hz 的低频段内, FE-SEA 方法预计结果略高于试验结果, 且随频率降低, 偏差会逐渐增大。**结论** 进行加筋板结构声学设计时, 为了获得精确的宽频隔声预计结果, 可首先选用 FE-SEA 方法。FE-SEA 方法预计结果在中高频段可直接使用, 在低频段仅能作为参考, 使用时应当进行修正。

关键词: 加筋板; 混合 FE-SEA 法; 隔声预计; 宽频; 飞行器

中图分类号: TJ85

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)09-0032-07

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2022.09.006

Prediction of Broadband Sound Insulation of Stiffened Panels Based on Hybrid FE-SEA Method

PENG Tao, HAN Peng-cheng, LIU Xing-qiang, YAN Qun, ZOU Xue-feng, QI Zhi-min

(Aviation Science and Technology Key Laboratory of Aeronautical Acoustics and Vibration Intensity, Aircraft Strength Research Institute of China, Shaanxi Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: This paper aims to predict the broadband sound insulation characteristics of finite size stiffened plates and guide the acoustic design of the aircraft. The hybrid FE-SEA method is used to predict the acoustic characteristics of unidirectional stiffened plate structures. At the same time, the sound insulation test is carried out in a standard acoustic laboratory. Then, the predicted results of FE-SEA are compared with the test results and SEA calculation results. The results show that, I) compared with the SEA method, the predicted results of the FE-SEA method are more consistent with the experimental results in 50 Hz~10 kHz; II) the predicted results of the FE-SEA method are basically the same as the experimental results in the middle and high-frequency band (400 Hz~10 KHz); III) the predicted results of FE-SEA method are higher than the measured results in the low-frequency band (50 Hz~400 Hz), the lower the frequency, the greater the deviation. In the acoustic design of stiffened plates, the FE-SEA method should be preferred in order to obtain high-precision broadband sound insulation prediction results.

收稿日期: 2022-06-23; 修订日期: 2022-07-30

Received: 2022-06-23; Revised: 2022-07-30

基金项目: 航空科学基金 (20200015023003)

Fund: Aeronautical Science Fund (20200015023003)

作者简介: 彭涛 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航空声学与振动噪声控制。

Biography: PENG Tao (1991-), Male, Master, Engineer, Research focus: aviation acoustics and vibration noise control.

引文格式: 彭涛, 韩鹏程, 刘兴强, 等. 基于混合 FE-SEA 方法的加筋板宽频隔声预计[J]. 装备环境工程, 2022, 19(9): 032-038.

PENG Tao, HAN Peng-cheng, LIU Xing-qiang, et al. Prediction of Broadband Sound Insulation of Stiffened Panels Based on Hybrid FE-SEA Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(9): 032-038.

The predicted results of the FE-SEA method can be used directly in the medium-frequency band and high-frequency band, and can only be used as a reference in the low-frequency band, Which should be corrected if it was used.

KEY WORDS: stiffened plate; hybrid FE-SEA method; sound insulation; broadband; aircraft

加筋板结构被广泛用于轨道客车、飞行器、船舶等运载工具的外表面壳体中,其隔声特性问题日益受研究人员的关注。由于加筋板结构振动会向壁板两侧辐射噪声,差的隔声设计会恶化运载设备内部的声场环境,降低舱内声学舒适性,严重时甚至引发乘员身心不适。因此,有必要对加筋板结构的隔声特性展开研究,以指导加筋板结构的声学设计工作。

关于加筋板的隔声特性已有一定研究。冯梓鑫等^[1]应用驻波管法、混响室-半消声室法,结合有限元仿真,得到了约束阻尼对加筋飞机壁板隔声性能的影响特性及作用机理。孙永等^[2]采用驻波管法和有限元法分析了空腔加筋双层板结构的隔声特性,获得了“全耦合模型”“声透明模型”与“无内部声腔模型”隔声曲线的异同。孙勇敢等^[3]推导了受均布压力作用的加筋板的有限元法方程,编程计算了静压力下加筋板结构的隔声性能。庞福振等^[4]以层合板理论为基础,采用空间谐波法,导出正交加筋层合板隔声量的计算公式,分析了无限大正交加筋板的隔声性能。胡毅钧等^[5]提出一种双向正交加筋板的声振响应解析方法,得到了加强筋排布方式对壁板声辐射的影响规律。金叶青等^[6]基于板梁组合理论,建立了正交加筋板声透射模型,分析了筋间距、惯性矩对隔声特性的影响。分析现有研究成果可知,可用于加筋板结构隔声性能研究的方法主要有试验分析法、仿真分析法和理论分析法。其中,试验分析结果最为可信,但需要生产加工试验样件,且试验测试周期长、经济成本高、人力资源耗费大,在一定程度上限制了试验法的应用;理论分析法仅适用于正交加筋无限大平板等周期性的理想结构,对于面积有限的板类加筋结构隔声性能的分析尚存在一定不足;仿真方法能够很好地规避上述 2 种方法的不足,适用于结构在声学设计阶段的研究工作。

目前,隔声预计仿真方法主要为有限元法(FEM)^[7-11]、边界元法(BEM)^[12-15]、统计能量法(SEA)^[16-17]及混合方法(FE-SEA)^[18-20]。其中,FEM法和BEM法适用低频问题的研究,SEA方法适用于高频问题的研究,而FE-SEA混合方法往往被用于中频问题的研究。在进行结构全频段隔声预计时,FEM法、BEM法和SEA法不适用,此时FE-SEA法成为较好的选择。同时,当前基于FE-SEA法的全频段声学预计研究较少。罗文俊等^[21]采用FE-SEA研究了车体 0~500 Hz 内的噪声特性,得到了车内结构噪声及车体各组成部分对车内结构噪声的贡献度。王宇等^[22]研究了板件 1000~5000 Hz 内的隔声特性,证明

了 FE-SEA 计算复杂结构的高效性与精确性。高洁等^[23]研究了圆柱结构在 200~2000 Hz 内的声辐射问题,通过耦合 FEM/BEM 与 FE-SEA 对比,获得了耦合损耗因子的修正值,提高了 FE-SEA 的计算精度。李孔娟^[24]基于 FE-SEA 研究了板梁结构在 200~1 000 Hz 内的声振响应问题,对有效耦合损耗因子进行了深入研究。王振云等^[25]研究了阻尼铝板在 100~3 150 Hz 内的隔声特性问题,得到了阻尼在不同频段随板件隔声特性的影响规律。总体而言,基于 FE-SEA 的隔声问题研究取得了一定成果,但从所研究的频段来看,相关研究很少涉及结构全频段隔声特性的预计。

考虑到上述研究现状,本研究以加筋板为研究对象,基于 FE-SEA 混合方法对其开展全频段隔声预计工作。设计加工相应试验件,进行板件动力学特性和隔声特性测试,并将预计结果与试验结果进行对比,以验证 FE-SEA 混合方法在全频段隔声预计中的适用性。同时,将 SEA 预计结果与 FE-SEA 结果进行对比,进一步验证 FE-SEA 隔声性能预计结果的精确性。

1 FE-SEA 法基本理论

基于波动理论的 FE-SEA 混合方法认为,任一在外力作用下的复杂系统通常由若干确定性子系统和若干随机子系统组成。确定性子系统的动力学方程为:

$$\mathbf{D}_{\text{tot}} \mathbf{q} = \mathbf{f}_{\text{ext}} + \sum_{k=1}^N \mathbf{f}_{\text{rev}}^{(k)} \quad (1)$$

式中: N 为与确定性子系统相连的随机子系统的个数; $\mathbf{f}_{\text{rev}}^{(k)}$ 为第 k 个随机子系统在混响场中的受挡力; $\mathbf{f}_{\text{ext}}$ 为施加在确定性子系统各自由度处的外部简谐激振力(频率为 ω); $\mathbf{q}$ 为用来描述确定性子系统的响应的自由度; $\mathbf{D}_{\text{tot}}$ 为确定性子系统的总动刚度矩阵。

$\mathbf{D}_{\text{tot}}$ 为耦合边界上确定性子系统自身的动刚度矩阵 $\mathbf{D}_d$ 与各随机子系统的直接动刚度矩阵 $\mathbf{D}_{\text{dir}}^{(k)}$ 的叠加,即:

$$\mathbf{D}_{\text{tot}} = \mathbf{D}_d + \mathbf{D}_{\text{dir}}^{(k)} \quad (2)$$

一般来说, $\mathbf{D}_d$ 可直接由 FEM 得出,而 $\mathbf{D}_{\text{dir}}^{(k)}$ 可通过假定第 k 个随机子系统沿确定性边界拓展为半无限/无限结构时用边界元法、解析法或半解析法得到。式(1)中的 $\sum_{k=1}^N \mathbf{f}_{\text{rev}}^{(k)}$ 可由扩散场互易关系

式计算得到, 见式(3)。

$$E \left[\mathbf{f}_{\text{rev}}^{(k)} \mathbf{f}_{\text{rev}}^{(k),H} \right] = \frac{4E_k}{\omega \pi n_k} \text{Im} \left[\mathbf{D}_{\text{dir}}^{(k)} \right] \quad (3)$$

式中: $E[\cdot]$ 为总体平均; n_k 为第 k 个随机子系统的模态密度; E_k 为第 k 个随机子系统在混响场中所具有的能量; ω 为随机子系统固有频率。

根据最大熵假设, 随机子系统间的相互影响可以忽略, 将式(1)和式(3)联立得确定性子系统的位移 $\mathbf{q}$ 的互谱表达式^[17]:

$$\mathbf{S}_{qq} = E \left[\mathbf{q} \mathbf{q}^H \right] = \mathbf{D}_{\text{tot}}^{-1} \left\{ \mathbf{S}_{ff} + \sum_{k=1}^N \frac{4E_k}{\omega \pi n_k} \text{Im} \left[\mathbf{D}_{\text{dir}}^{(k)} \right] \right\} \mathbf{D}_{\text{tot}}^{-H} \quad (4)$$

式(4)使随机子系统与确定性子系统的能量响应建立起了直接的联系。之后, 基于随机子系统的功率流平衡方程(5), 以随机子系统的能量响应为自变量, 求得各子系统的能量响应。

$$\omega(\eta_j + \eta_{d,j})E_j + \sum_{k=1}^N \omega \eta_{jk} n_j \left(\frac{E_j}{n_j} - \frac{E_k}{n_k} \right) = \quad (5)$$

$$P_{\text{in},j}^{\text{ext}} + P_{\text{in},j}$$

式中: η_j 为第 j 个随机子系统的内损耗因子; n_j 为第 j 个随机子系统的模态密度; E_j 为第 j 个随机子系统在混响场中所具有的能量; η_{jk} 为有效耦合损耗因子; $\eta_{d,j}$ 为随机子系统 j 的混响场与确定性子系统间的耦合损耗因子; $P_{\text{in},j}$ 为外界直接加在随机子系统 j 上的输入功率; $P_{\text{in},j}^{\text{ext}}$ 为施加于确定子系统上的外部激励力传递到随机子系统 j 上的输入功率。

对含有 N 个随机子系统的复杂系统, 将式(5)写成矩阵的形式:

$$\omega \mathbf{L} \mathbf{e}_j = \mathbf{P}_{\text{in},j}^{\text{ext}} + \mathbf{P}_{\text{in},j} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{e}_j$ 为由各随机子系统的模态能量组成的列向量, 元素 $e_j = E_j/n_j$; $\mathbf{P}_{\text{in},j}^{\text{ext}}$ 为由施加在确定性子系统上的外部激励力输入到随机子系统 j 上的功率所组成的列向量; $\mathbf{P}_{\text{in},j}$ 为外界直接加在随机子系统 j 上的输入功率列向量; $\mathbf{L}$ 为复杂系统损耗因子矩阵。

通过式(1)、(2)、(4)、(6)可求得各子系统的响应。

2 仿真模型

基于上述理论, 本研究模拟混响室-半消声室隔声测试过程, 进行加筋板结构全频段(50 Hz~10 kHz)隔声预计, 子系统构成如图1所示。图1中, $P_{\text{in},j}$ $P_{\text{in},j}$ 为第 j ($j=1,2,3$) 个子系统的输入功率, $P_{\text{diss},j}$ 为第 j ($j=1,2,3$) 个子系统的功率损耗, P_{ij} 为第 i ($i=1,2,3$)

个子系统流入第 j ($j=1,2,3$) 个子系统的功率。

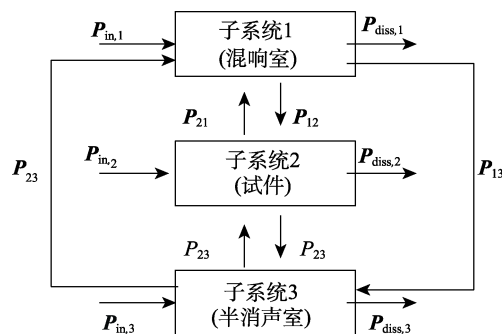


图1 子系统间能量传递关系

Fig.1 Energy transfer relationship between subsystems

在混响室-半消声室隔声量测试中, 以标准混响作为声源室, 以标准半消声室作为受声室, 在声源室中, 通过扬声器发出白噪声, 产生混响声场, 作为入射声场。待声场稳定后, 通过测试获得入射声能 E_i , 在受声室一侧测试透射声能 E_t 。最后依据式(7)计算得到试件(壁板)的隔声量。

$$TL = 10 \lg \frac{E_i}{E_t} \quad (7)$$

本研究中加筋板尺寸为 1 200 mm×1 200 mm×1.5 mm, 采用 L 形加筋, 几何结构如图 2、图 3 所示, 材料参数见表 1。混响室被建立为随机子系统, 采用 1 000 m³ 声腔进行模拟; 半消声室被建立为随机子系统, 采用自由声场进行模拟; 加筋壁板被建立为确定子系统, 采用壳单元进行模拟。最终建立的隔声预计模型如图 4 所示。依据 FE-SEA 混合方法, 计算获得混响室与半消声室子系统混响场中的声能 E_1 和 E_2 , 代入式(7)可获得壁板的隔声量。

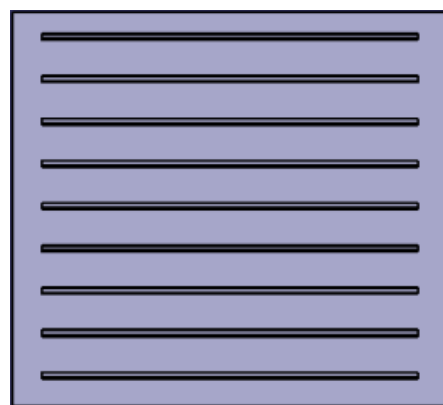


图2 加筋板二维平面模型图

Fig.2 Geometric model of stiffened plate

表1 材料性能参数

Tab.1 Mechanical parameters of the stiffened plate

材料名称	密度 (kg·m ⁻³)	弹性模量 /GPa	剪切模量 /GPa	泊松比
铝合金	2700	72.70	27.30	0.33

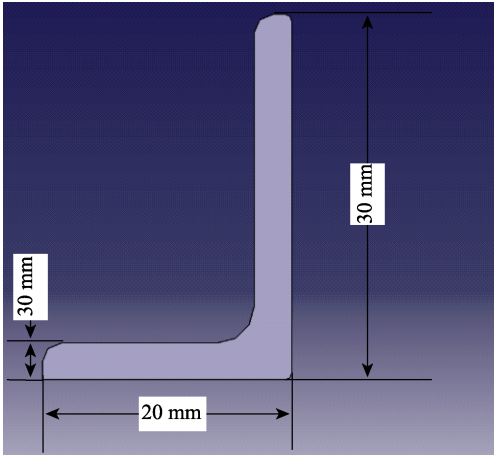


图 3 L 形加筋几何结构
Fig.3 Geometric model of L-shaped reinforcement

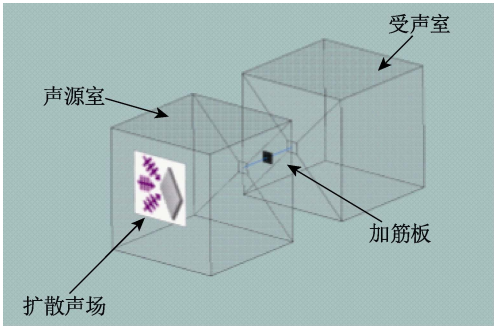


图 4 加筋板隔声 FE-SEA 模型
Fig.4 FE-SEA model of the stiffened plate

为验证声振混合模型的正确性,对加筋板结构模态进行了仿真和试验对比分析。模态测试时,加筋板被固定于试验窗上,四周采用螺栓固定。为防止声泄漏产生,在试验件与夹具间采用橡胶垫封堵。仿真模型中,加筋板 4 条边均采用固支约束条件,结果见图 5 和表 2。通过对比固有频率和振型的仿真结果与测试结果可知,本文所建仿真模型中加筋板模型是准确的。

3 仿真分析及试验验证

依据前文所述原理、建模思路及建模参数设定,最终完成了该加筋板结构的隔声预计,并进行了试验验证。该试验参考声强法隔声测试原理进行,在中国飞机强度研究所航空声学试验室内的混响室与半消声室中完成。测试系统如图 6 所示,测试与预计结果对比情况如图 7 所示。

由图 7 可知,在 50 Hz~10 kHz 内,基于 FE-SEA 混合方法的加筋板隔声预计结果与试验结果吻合良好,隔声特性随频率的变化趋势基本一致,这表明 FE-SEA 法适用于小型加筋板类结构的全频段隔声性能预计。FE-SEA 法结果在 50~125 Hz 的低频区域内略高于试验结果(大于 3.5dB),这一方面是由测量误差导致,空气中的温湿度、测量人员的操作、混响室中传声器的空间位置都对测量结果有一定影响;另一

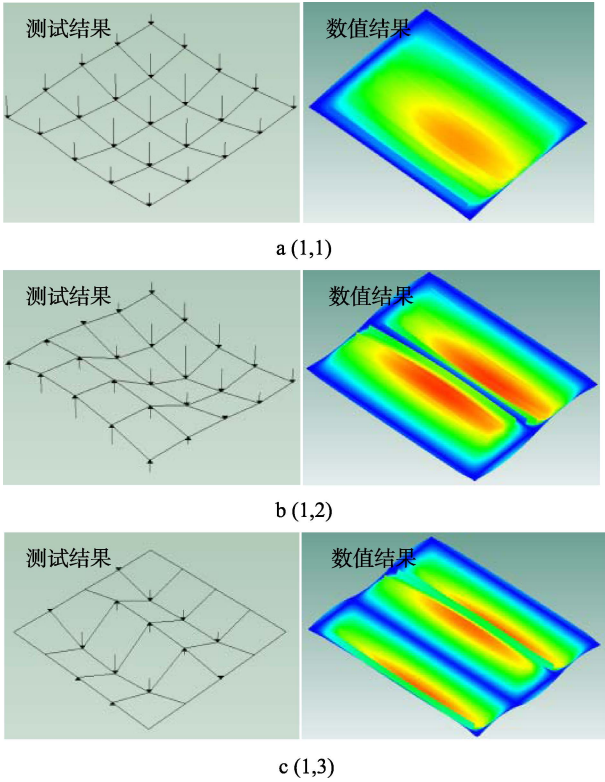


图 5 前 3 阶振型试验仿真结果对比
Fig.5 Comparison between experimental results and simulation results of the stiffened plate in the First 3 Orders

表 2 加筋板前 12 阶固有频率			
Tab.2 Natural frequencies of the stiffened plate in the First 12 Orders			
阶次	固有频率/Hz		误差/%
	测试结果	仿真结果	
1	27.14	27.14	0.00
2	29.31	30.08	-2.55
3	36.93	36.95	-0.05
4	48.21	48.82	-1.25
5	56.29	57.11	-1.43
6	61.22	61.52	-0.49
7	63.01	65.72	-4.13
8	69.45	69.43	0.02
9	80.94	81.31	-0.46
10	87.00	87.13	-0.14
11	96.42	97.41	-1.02
12	112.36	112.25	0.09

方面是由实验室的截止频率所限制,其在 80 Hz 附近,这将会导致测量环境达不到理想状态。在 125 Hz~10 kHz 的中高频带内,除 1 600 Hz 与 2 500 Hz 中心频率外,其余频率点附近,仿真结果与试验结果基本一致,这表明 FE-SEA 法在中高频带内的预计结果比较准确。综合考虑上述结论可以看出,FE-SEA 法在中高频段的预计结果与试验结果十分接近,具有很好的参考价值;其低频预计结果也可以很好地反映加筋板

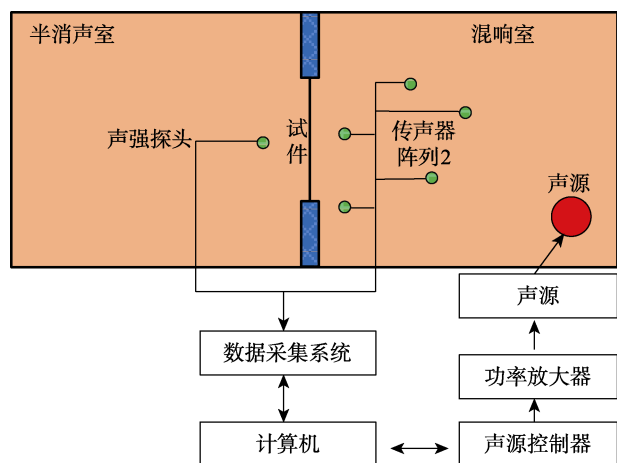


图6 声强法隔声测试系统

Fig.6 Schematic diagram of sound transmission loss experiment

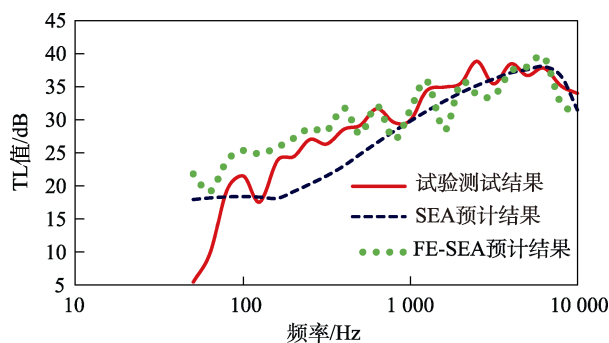


图7 预测结果与试验测试结果对比

Fig.7 Comparison between predicted results and test results

结构的隔声性能随频率的变化趋势,但其具体数值不能直接作为参考,需要进行修正后才可以作为使用。

对比 SEA 法预测结果与 FE-SEA 法预测结果知,在 50 Hz~10 kHz 内,SEA 法与 FE-SEA 法预测结果中,隔声特性随频率的变化趋势完全一致。其中,在 800 Hz~10 kHz 频带内,SEA 法预测结果与 FE-SEA 法预测结果吻合良好;在 50~800 Hz 频带内,SEA 法预测结果小于 FE-SEA 法预测结果。与 SEA 法预测结果相比,FE-SEA 法预测结果更接近试验结果。产生该现象的主要原因是 SEA 法要求所建模型中,子系统在每一个分析频带内,模态数应大于 5,而在本研究中,分析频带采用 1/3 倍频程形式,在 50~800 Hz 内,各中心频率所处频带内加筋板的模态数均小于 5,因此其预测结果准确性较差。

4 结论

通过本文的研究,可以得到以下结论:

1) FE-SEA 法与 SEA 法相比,预计频带更广,可以完成较宽频带内的隔声预计工作,在进行结构全频段隔声预计时,应首选 FE-SEA 法。同时,FE-SEA 法预计精度比 SEA 法更高,且其预计结果与试验结

果更为吻合。在中高频带内,混合 FE-SEA 方法预计结果与实测结果基本一致,仅在低频带,会略高于实测结果。SEA 方法在中高频带虽然与实测结果趋势吻合较好,但不能准确预计低频隔声特性,在宽频隔声预计中适用性不足。

2) 对结构进行精确的动力学模拟是应用 FE-SEA 法进行隔声预计的关键。本研究通过生产加工样件,对其模态进行测试,并对模型进行修正,使得模型与试件的模态等动力学参数保持一致。基于 SEA 法的隔声预计仅为频带内能量均方值,不能精确模拟较低频段内结构的动力学特性,因此误差较大,不适用于宽频隔声预计。

3) FE-SEA 法预计结果在低频内存在隔声预计结果偏大的问题,若需要获得更高精度的预计结果,应当对预计结果进行修正,修正时应考虑试验环境变化和试验室的设计参数。

参考文献:

- [1] 冯梓鑫, 韩峰, 冯盟, 等. 约束层阻尼对飞机壁板隔声特性的影响[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(3): 76-80.
FENG Zi-xin, HAN Feng, FENG Meng, et al. Effects of Constrained Layer Damping Patches on the Sound Insulation Characteristics of Aircraft Panels[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(3): 76-80.
- [2] 孙振永, 李丽君, 刘怡然, 等. 不同加筋双层板结构隔声特性的理论、仿真及试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 245-250.
SUN Zhen-yong, LI Li-jun, LIU Yi-ran, et al. Theoretical, Simulation and Test Investigation on the Sound Isolation Characteristics of Different Stiffened Double-Layer Panels[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(4): 245-250.
- [3] 孙勇敢, 黎胜. 受静压力作用加筋板隔声性能研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(6): 169-173.
SUN Yong-gan, LI Sheng. Sound Transmission through Stiffened Plates under Static Pressure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(6): 169-173.
- [4] 庞福振, 陈林, 缪旭弘, 等. 无限大正交加筋层合板的隔声性能分析[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(8): 1090-1096.
PANG Fu-zhen, CHEN Lin, MIAO Xu-hong, et al. Sound Insulation Performance of an Infinite Orthogonally Stiffened Laminated Plate[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014, 48(8): 1090-1096.
- [5] 胡毅钧, 王伟, 金叶青, 等. 基于数值方法求解的周期加筋板声振特性研究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(6): 21-25.
HU Yi-jun, WANG Wei, JIN Ye-qing, et al. Research on

- Vibroacoustic Characteristics of Periodically Stiffened Plates Based on Numerical Solutions[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(6): 21-25.
- [6] 金叶青, 庞福振, 姚熊亮, 等. 基于板梁组合理论的正交加筋板声振特性分析[J]. *振动工程学报*, 2012, 25(5): 579-588.
JIN Ye-qing, PANG Fu-zhen, YAO Xiong-liang, et al. Analyses of Vibro-Acoustic Characteristics for Orthogonally Stiffened Panel Based on the Plate-Beam Combined Theory[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2012, 25(5): 579-588.
- [7] 尹晶, 葛剑敏. 轨道交通驾驶室地板声学优化设计[J]. *噪声与振动控制*, 2017, 37(5): 71-74.
YIN Jing, GE Jian-min. Acoustic Optimization Design of Vehicle's Cab Floors in Rail Transit[J]. *Noise and Vibration Control*, 2017, 37(5): 71-74.
- [8] 唐世灏, 叶韩峰, 陶猛, 等. 水下蜂窝空腔覆盖层的隔声性能分析[J]. *声学技术*, 2017, 36(5): 437-441.
TANG Shi-hao, YE Han-feng, TAO Meng, et al. Sound Insulation Performance of Underwater Honeycomb Cavity Covering[J]. *Technical Acoustics*, 2017, 36(5): 437-441.
- [9] DEL COZ DÍAZ J J, ÁLVAREZ RABANAL F P, GARCÍA NIETO P J, et al. Sound Transmission Loss Analysis through a Multilayer Lightweight Concrete Hollow Brick Wall by FEM and Experimental Validation[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(11): 2373-2386.
- [10] BOLDUC M, PANNETON R, ATALLA N, et al. Numerical and Experimental Characterization of the Transmission Loss of Complex Composite Panels[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, 108(5): 2625-2625.
- [11] ISHIDA S, MORIMURA H, GOTOU Y, et al. A New Method to Compute Sound Transmission Loss by Acoustic FEM[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 2014, 80(813): DR0127-DR0127.
- [12] 范鑫, 崔洪宇, 洪明. 基于 Virtual.Lab Acoustics 的蜂窝夹层板结构传声特性分析[J]. *噪声与振动控制*, 2017, 37(4): 34-39.
FAN Xin, CUI Hong-yu, HONG Ming. Analysis of Acoustic Performance of Honeycomb Sandwich Panels Based on Virtual.Lab Acoustics[J]. *Noise and Vibration Control*, 2017, 37(4): 34-39.
- [13] PEREIRA A, TADEU A. Prediction of Impact Sound Isolation and Transmission Loss: Analytical Expressions Versus a BEM Approach[C]//BEM/MRM 45. [s.l.]: WIT Press, 2003.
- [14] WU T W, CHENG C Y R, TAO Z. Boundary Element Analysis of Packed Silencers with Protective Cloth and Embedded Thin Surfaces[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 261(1): 1-15.
- [15] YANG L, JI Z L, WU T W. Transmission Loss Prediction of Silencers by Using Combined Boundary Element Method and Point Collocation Approach[J]. *Engineering Analysis With Boundary Elements*, 2015, 61: 265-273.
- [16] 徐磊, 张学飞, 邓欣, 等. 隔音垫参数对高速列车地板结构隔声特性的影响[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2017, 29(5): 52-56.
XU Lei, ZHANG Xue-fei, DENG Xin, et al. Effects of Parameters of Soundproof Mat on Sound Transmission Loss of the Floor of High-Speed Train[J]. *Journal of Changzhou University (Natural Science Edition)*, 2017, 29(5): 52-56.
- [17] 姚德源, 王其政. 统计能量分析原理及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
YAO De-yuan, WANG Qi-zheng. Principle and Application of Statistical Energy Analysis[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 1995.
- [18] 张瑾, 马兴瑞, 韩增尧, 等. 中频力学环境预示的 FE-SEA 混合方法研究[J]. *振动工程学报*, 2012, 25(2): 206-214.
ZHANG Jin, MA Xing-rui, HAN Zeng-yao, et al. FE-SEA Hybrid Method for the Mid-Frequency Dynamic Prediction[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2012, 25(2): 206-214.
- [19] LANGLEY R, BREMNER P. A Hybrid Method for the Vibration Analysis of Complex Structural-Acoustic Systems[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, 105(3): 1657-1671.
- [20] LANGLEY R S, SHORTER P J, COTONI V. A Hybrid FE-SEA Method for the Analysis of Complex Vibroacoustic Systems[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 288: 669-699.
- [21] 罗文俊, 蒋峻楠, 雷晓燕, 等. 基于 FE-SEA 混合法的车内结构噪声预测分析[J]. *铁道学报*, 2017, 39(12): 137-145.
LUO Wen-jun, JIANG Jun-nan, LEI Xiao-yan, et al. Prediction Analysis of Internal Structure Noise of Train Based on FE-SEA Hybrid Method[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2017, 39(12): 137-145.
- [22] 王宇, 陈兴林, 李光民, 等. 混合方法在声-固耦合系统中的应用[J]. *噪声与振动控制*, 2012, 32(2): 23-26.
WANG Yu, CHEN Xing-lin, LI Guang-min, et al. Application of a Hybrid Method in the Analysis Acoustic-Structure Coupled System[J]. *Noise and Vibration*

- Control, 2012, 32(2): 23-26.
- [23] 高洁, 陈克安, 李冰, 等. 基于 FE-SEA 混合法的复杂结构中频声辐射预测精度改进方法[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(7): 1046-1049.
- GAO Jie, CHEN Ke-an, LI Bing, et al. A Fixed Precision Method of Acoustic Radiation Prediction Based Hybrid FE-SEA in Medium-Frequency Region[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(7): 1046-1049.
- [24] 李孔娟. 基于 Hybrid FE-SEA 结构中频声振疲劳分析方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- LI Kong-juan. Research on the Mid-Frequency Vibro-Acoustic Fatigue Analysis Method of Structure Based on Hybrid FE-SEA[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [25] 王振云, 刘磊, 单欢乐. 基于 FE-SEA 混合法的喷涂式阻尼铝板隔声性能研究[J]. 科技风, 2015(23): 5-6.
- WANG Zhen-yun, LIU Lei, SHAN Huan-le. Study on Sound Insulation Performance of Spray Damping Aluminum Plate Based on FE-SEA Hybrid Method[J]. Technology Wind, 2015(23): 5-6.

责任编辑: 刘世忠