

文章编号:1006-1355(2018)05-0113-06

## 加强筋截面类型对轨道车辆板件结构 隔声影响研究

詹雪燕<sup>1</sup>, 姚丹<sup>2</sup>, 张捷<sup>2</sup>, 刘冀钊<sup>1,3</sup>, 肖新标<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 成都 611756;

2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 成都 610031;

3. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142)

**摘要:**针对轨道车辆轻量化设计后可能带来的隔声性能降低问题,研究不同截面加强筋铺设对板件隔声性能的改善效果。基于混合有限元-统计能量分析(Hybrid FE-SEA)方法建立轨道车辆加强筋板结构隔声特性预测分析模型,系统分析T型、L型、I型和矩形加强筋截面类型对板件隔声性能的影响。研究表明,加强筋的刚度和1阶固有频率皆比均质板大,且随加强筋厚度的增大而增大;当加强筋厚度恒定时,T型加强筋的刚度和1阶固有频率最大,L型加强筋次之;敷设厚度15 mm的加强筋,板件的隔声性能最佳;当加强筋的质量、厚度、腹板面积及尺寸、翼板面积相等时,各类型加强筋的计权隔声量 $R_w$ 差异不大;板件加筋后,刚度控制区的隔声量增幅3 dB~17 dB,1 250 Hz~4 000 Hz中高频段的隔声量增幅1 dB~6 dB。综合分析可知,以计权隔声量为评价标准时,在加强筋质量、腹板面积、翼板面积及尺寸相等时,敷设厚度15 mm加强筋,板件的隔声性能最佳, $R_w$ 较均质板可提高1.4 dB~1.5 dB,而加强筋厚度恒定时,T型和L型加强筋的刚度又最佳。相关研究成果可为轨道车辆板件结构加筋优化提供设计参考。

**关键词:**声学;FE-SEA;加强筋;截面类型;加筋板;隔声

中图分类号:TU112.5;TU112.4<sup>+</sup>

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.05.020

## Study on Effects of Stiffener Section Types on Sound Insulation of Railway Vehicle's Panel Structures

ZHAN Xueyan<sup>1</sup>, YAO Dan<sup>2</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, LIU Jizhao<sup>1,3</sup>, XIAO Xinbiao<sup>2</sup>

(1. School of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. China Railway Design Group Co. Ltd., Tianjin 300142, China)

**Abstract:** In view of the reduction of sound insulation effects due to the lightweight design of railway vehicles, the influence of different stiffener section types on the sound insulation characteristics is studied. The prediction model of sound insulation characteristics of stiffened plates for railway vehicles is built based on the hybrid finite element method and statistical energy analysis (Hybrid FE-SEA), and the effects of stiffener sections on the sound insulation characteristics of the plate are systematically analyzed. The section types include T-type, L-type, I-type and rectangular type. The results show that the stiffness and the first-order natural frequency of the stiffened plate are larger than that of the homogeneous plate, and increase with the increasing of stiffener thickness. When the stiffener thickness is constant, the stiffness and the first-order natural frequency of the T-type stiffened plate are the largest, and the L-type stiffened plate is the second. Laying the stiffener with 15 mm thickness, the sound insulation performance of the plate is the best. When the mass, thickness, web area and size, flange area of the stiffeners remain the same, there is little difference in the weighted sound transmission loss for various types of stiffened plates. In addition, after the panel is reinforced, the sound insulation in the stiffness control zone is increased by 3 dB-17 dB, and the sound insulation in 1 250 Hz-4 000 Hz frequency bands is increased by 1 dB-6 dB. Comprehensive analysis indicates that with the weighted sound insulation as the evaluation standard, when the stiffener mass, web area, flange area and size keep unchanging, laying 15 mm thick stiffener can reach the best sound insulation performance for the plate, its  $R_w$  is 1.4 dB-1.5 dB higher than that of the homogeneous plate. When the stiffener thickness is constant, the stiffness of T-type and L-type stiffened plates is the best. The research results may provide a reference for reinforced optimization design of plates of railway vehicles.

**Keywords:** acoustics; FE-SEA; stiffener; section type; stiffened plate; sound insulation

收稿日期:2017-12-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200503-02, 2016YFB1200506-08);

国家自然科学基金资助项目(U1434201, 51475);

国家科技支撑计划资助项目(2015BAG13B01-03)

作者简介:詹雪燕(1990-),女,福州市人,硕士研究生,目前从事轨道交通减振降噪研究。

通信作者:肖新标,男,副研究员,硕士生导师。

E-mail: xinbiaoxiao@163.com

从车身型材、内地板到内饰件,板件是轨道列车车体结构的主要型式。在机械力或声载荷激励下,板件结构的声振特性会直接影响列车的车内噪声,进而影响乘客的乘坐舒适性。

轻量化和低噪声是轨道交通列车发展的两大要素,但这两个目标往往又是矛盾的。尤其是在日益提升的轨道车辆轻量化设计要求下,板件结构往轻、薄方向发展,其刚度特性受到较大影响,进而使得更多的模态数量出现在车内噪声显著的频带范围,这会在一定程度上使得车内噪声增大。另外一方面,从强度考虑,也使得板件结构的加筋处理越来越被设计师们采用。为此,结合加筋板耦合结构质量轻、承载能力良好、抗冲击能力强和减振性能佳等优点,对铝材均质板进行加筋优化,既满足列车轻量化的发展趋势,又能实现车内低噪声的目的。

隔声特性用来衡量结构对空气传声抑制的作用,对车内噪声起到非常关键的影响。针对加筋板隔声特性的研究已有不少。唐广鑫等<sup>[1]</sup>通过仿真计算表明,加强筋能够提高板的共振频率,降低隔声低谷数量,从而有效改善板件的隔声特性。黎胜等<sup>[2]</sup>采用有限元和 Rayleigh 积分理论,建立了空气中嵌在无限大刚性障板上的加筋板声传输计算模型,并研究了加筋板结构的声传输特性。数值计算表明,板加筋后,板的传声损失增大,隔声性能有所改善。金叶青等<sup>[3]</sup>基于板梁组合理论,建立了正交加筋板声透射模型,并研究了正交加筋板的声振特性。研究显示,板件加筋能使结构的刚度增大,进而提高低频段透射损失,从而改善结构的整体隔声性能。但是,目前对加筋板隔声性能的研究,多数关注在加强筋敷设位置,或是加强筋几何尺寸的影响,对加强筋截面类型的研究较少。

另一方面,仿真技术的日益成熟,也使得数值方法预测结构隔声特性变得越来越普遍和可靠。文献[4]和[5]表明,基于 Hybrid FE-SEA 方法建立的板件隔声预测模型能有效预测 0~4 000 Hz 频率范围内板件的隔声量。

本文基于 Hybrid FE-SEA 方法,以控制轨道车辆车内噪声为目标,针对轨道车辆设计中最常用的 L 型、矩形、I 型和 T 型共计 4 种加强筋截面类型,对比分析其对板件结构隔声特性的影响,为轨道车体板件加筋优化设计提供参考依据。

## 1 Hybrid FE-SEA 理论

Hybrid FE-SEA 方法是由 P. J. Shorter 和 R. S. Langley 等创立的一种基于波动理论分析长波子系统与短波子系统间相互动态影响作用的研究方法。

在 Hybrid FE-SEA 理论中,将系统中整体模态特性控制的区域采用 FE 子系统建模,建立 FE 子系统运动方程,而由局部模态特性控制的区域采用 SEA 子系统建模,求解 SEA 子系统的能量响应,结合各个子系统的能量平衡方程与扩散场互逆原理得到 FE 子系统的位移响应<sup>[6]</sup>。

FE 子系统的动态响应如下

$$\langle S_{qq} \rangle = \langle qq^H \rangle = D_{\text{tot}}^{-1} \left( S_{\text{ff}}^{\text{ext}} + \sum_m \langle S_{\text{ff},m}^{\text{rev}} \rangle \right) D_{\text{tot}}^{-H} \quad (1)$$

其中: $q$  是 FE 子系统中的自由度; $D_{\text{tot}}$  为 FE 子系统的总动刚度矩阵; $S_{\text{ff}}^{\text{ext}}$  是外界直接施加在 FE 子系统的作用力; $\langle S_{\text{ff},m}^{\text{rev}} \rangle$  是 SEA 子系统  $m$  的混响场作用在与 FE 子系统耦合节点处的作用力。

针对 SEA 子系统  $m$  建立能量平衡方程<sup>[7]</sup>

$$P_{\text{in,dir}}^{(m)} = P_{\text{out,rev}}^{(m)} + P_{\text{diss,m}} \quad (2)$$

其中: $P_{\text{in,dir}}^{(m)}$  是输入到 SEA 子系统  $m$  的直接场平均功率流; $P_{\text{out,rev}}^{(m)}$  是 SEA 子系统  $m$  的输出功率; $P_{\text{diss,m}}$  是 SEA 子系统  $m$  自身耗散功率流。

结合 SEA 子系统的能量平衡方程,就能求得每个 SEA 子系统的能量响应以及 FE 子系统的位移响应。整个系统的隔声量表达如下

$$TL = 10 \log_{10} \left( P_{\text{inc}} / P_{\text{trans}} \right) \quad (3)$$

其中: $P_{\text{inc}}$  为整个系统的入射声功率; $P_{\text{trans}}$  为透射声功率。

## 2 加筋板隔声 Hybrid FE-SEA 建模

工程上使用的加筋板种类繁多,轨道车辆设计中最常用的加强筋截面类型主要为 T 型、L 型、I 型和矩形,筋条的敷设形式多以正交为主。为此,本文将在正交加筋布设方式上,对比分析不同加强筋截面类型下的加筋板隔声特性。

### 2.1 Hybrid FE-SEA 建模

为减小“质量因素”对结构隔声特性的影响,所有布设的加强筋质量均为均质底板(参考矩形铝板)质量的 2%,且材料与底板一致,加强筋敷设方式为正交等间距布设。均质底板的长、宽和厚度分别为 985 mm、970 mm 和 10 mm,其材料属性中,杨氏弹性模量为 71 GPa,泊松比为 0.33,密度为 2 700 kg/m<sup>3</sup>。

基于 Hybrid FE-SEA 理论,建立板件结构的隔声预测模型如图 1 所示。其中,图 1(a)为均质底板的隔声特性预测模型,图 1(b)为加筋板的隔声特性预测模型。

图 1(a)中,均质底板被划分为结构 FE 子系统(Structure Finite Element Subsystem),其两侧分别建

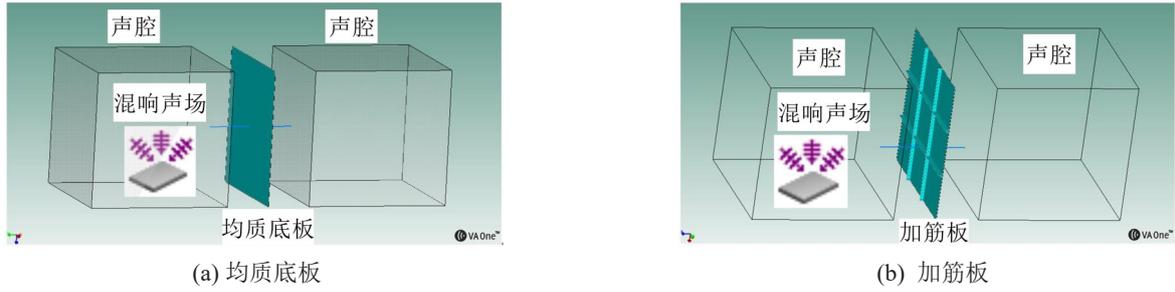


图1 隔声预测模型

立一个声腔,与均质底板之间形成面连接(Hybrid Area Junction),模拟声源室和接收室;在均质底板发声一侧的空腔上施加混响声场(Diffuse Acoustic Field, DAF),模拟声源激励,混响声场的大小为100 dB,频率范围为10 Hz~5 000 Hz;均质底板阻尼损耗因子定义为0.01。

图1(b)中,加强筋采用FEM实体单元离散,加强筋之间以及加强筋与底板间通过直接共节点的方式连接。加强筋和底板均被划分为FE子系统,同时,在加筋板的两侧与均质底板一样,分别建立一个声腔与加筋板面连接,并在发声一侧施加混响声场,模拟声源。

2.2 加筋板几何特性

本文考虑的加筋板类型有四类,分别为T型、L型、I型、矩形,各加强筋截面类型和几何特性如图2和表1所示。

图2中,加强筋截面面积均相同,阴影区域为腹板,空白区域为翼板,而矩形加强筋无腹板、翼板之分,  $L=L_f$ 。表1中,根据加强筋厚度  $t$  分组,  $t$  设置为15 mm、22.5 mm和30 mm;另外除矩形加强筋外,其

他加强筋的翼板面积均相等,即  $S_2=50 \text{ mm}^2$ ,且同种截面类型加强筋的翼板几何参数不变,加强筋厚度通过腹板几何参数变化调整,但腹板面积保持不变,即  $S_1=50 \text{ mm}^2$ 。根据文献[8],板件的刚度可以近似通过板件几何中心施加的垂向集中载荷  $F$  与最大弯曲挠度  $w$  的比值来求解。

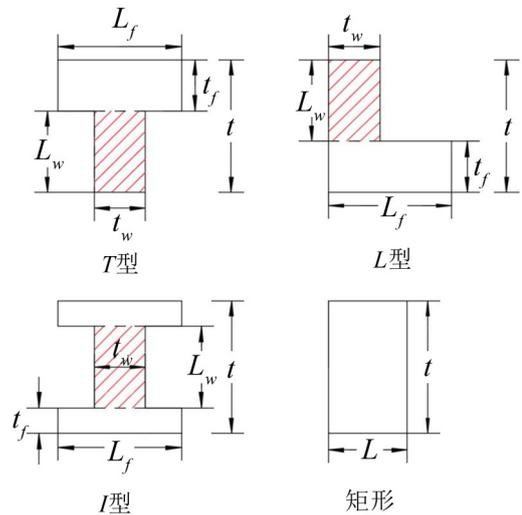


图2 加强筋截面类型

表1 板件几何特性

加强筋厚度 $t/\text{mm}$	板件类型	几何尺寸/mm						刚度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	刚度增量/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )
		腹板面积 $S_1/\text{mm}^2$	腹板长度 $L_w/\text{mm}$	腹板厚度 $t_w/\text{mm}$	翼板面积 $S_2/\text{mm}^2$	翼板长度 $L_f/\text{mm}$	翼板厚度 $t_f/\text{mm}$		
	均质板							862	—
15	矩形-1加筋板			—		6.667	—	1 222	360
	I-1型加筋板					10	2.5	1 227	365
	L-1型加筋板	50	10	5	50	10	5	1 258	396
	T-1型加筋板					10	5	1 261	399
22.5	矩形-2加筋板			—		4.444		1 506	644
	I-2型加筋板					10	2.5	1 550	688
	L-2型加筋板	50	17.5	2.857	50	10	5	1 689	827
	T-2型加筋板					10	5	1 695	833
30	矩形-3加筋板			—		3.333	—	1 776	914
	I-3型加筋板					10	2.5	1 838	976
	L-3型加筋板	50	25	2	50	10	5	2 062	1 200
	T-3型加筋板					10	5	2 066	1 204

由表1可知,加筋板的刚度皆比均质板大,说明加筋能够有效增大结构的刚度,强化板件抵抗变形的能力。板件的刚度随着加强筋厚度的增大而增大。当加强筋的厚度不变时,T型加筋板的刚度最大,L型加筋板次之,I型和矩形加筋板的刚度最小。

### 2.3 加筋板模态特性

表2给出了均质板和各类加筋板的1阶固有频率。

表2 板件1阶固有频率比较

加强筋厚度 $t/\text{mm}$	板件类型	1阶固有频率/Hz
15	均质板	51.4
	矩形-1加筋板	56.8
	I-1型加筋板	57.1
	L-1型加筋板	58.0
	T-1型加筋板	58.1
	矩形-2加筋板	61.2
	I-2型加筋板	62.0
22.5	L-2型加筋板	64.7
	T-2型加筋板	65.0
	矩形-3加筋板	66.4
30	I-3型加筋板	67.8
	L-3型加筋板	72.9
	T-3型加筋板	73.1

由表2可以看出,均质板敷设加强筋后,板件的1阶固有频率有明显的增大趋势。结合表1和表2可知,无论是不同类型加筋板还是同类型加筋板,结构的1阶固有频率都随着结构刚度的增大而增大。因而,T-3型加强筋板的1阶固有频率较均质板增大最显著,增大了21.7 Hz,L-3型加强筋板次之,增大了21.5 Hz。

## 3 加筋板隔声特性分析

### 3.1 计权隔声特性

表3给出了各板件的计权隔声量 $R_w$ ,结果显示,除T-3型加筋板外,其他加筋板的 $R_w$ 皆比均质板大,敷设各类型加强筋使得板件的计权隔声量分别提高1.4 dB、1.5 dB、1.4 dB、1.4 dB、0.9 dB、0.8 dB、0.5 dB、0.6 dB、0.3 dB、0.5 dB、0.1 dB,相比之下,加强筋厚度越小,即加强筋腹板粗短时,加筋板的 $R_w$ 越大,故加强筋厚度为15 mm的四类加筋板的隔声量提高最为显著。从表3也可以看出,加强筋质量、腹板面积及尺寸、翼板面积都相同时,不同类型加筋板的 $R_w$ 差异不大。

### 3.2 频率隔声特性

图4是各类加筋板与均质板的1/3倍频程隔声曲线对比图。

表3 板件的计权隔声量 $R_w$

加强筋厚度 $t/\text{mm}$	板件类型	$R_w/\text{dB}$	$\Delta R_w/\text{dB}$
15	均质板	32.2	—
	矩形-1加筋板	33.6	1.4
	I-1型加筋板	33.7	1.5
	L-1型加筋板	33.6	1.4
	T-1型加筋板	33.6	1.4
	矩形-2加筋板	33.1	0.9
	I-2型加筋板	33.0	0.8
22.5	L-2型加筋板	32.7	0.5
	T-2型加筋板	32.8	0.6
	矩形-3加筋板	32.5	0.3
25	I-3型加筋板	32.7	0.5
	L-3型加筋板	32.3	0.1
	T-3型加筋板	32.2	0

从图4(a)~图4(c)可见,由于板件敷设加强筋后,刚度增大,1阶固有频率随之增大,故板件结构50 Hz处的隔声低谷发生高频偏移,偏移至63 Hz或80 Hz处,隔声量也有所提高,最大提高约6 dB;刚度控制区内的频带隔声量显著增加3 dB~17 dB。此外,加筋板在1 250 Hz~4 000 Hz中高频段的隔声量基本也都比均质板大,增幅1 dB~6 dB。

### 3.3 隔声性能差异分析

本节将基于矩形-1加筋板来分析板件敷设加强筋导致隔声水平差异的原因。

由图4(a)的隔声曲线可以看出,与均质板相比,敷设矩形-1加强筋后,结构在50 Hz处的隔声低谷向高频偏移至63 Hz,隔声量提高约6 dB;低于50 Hz的刚度控制区,结构的隔声水平显著提高3 dB~6 dB;1 250 Hz~4 000 Hz中高频段的隔声量也均有所增加,增幅在1 dB~6 dB之间。

刚度控制区的隔声量差异源于结构刚度的变化。如表1和表2显示,板件添加矩形-1加强筋后,其弯曲刚度较均质板明显提高,致使结构的1阶固有频率增大,由51.4 Hz变为56.8 Hz,第1个隔声低谷出现在了更高频率处,进而导致刚度控制区的隔声量大幅度提高。

针对50 Hz处隔声低谷高频偏移后隔声量的提高,图5给出了矩形-1加筋板在45 Hz~71 Hz频段的速度响应。

由图5可见,均质板50 Hz频段(50 Hz隔声低谷对应频段45 Hz~56 Hz)的速度响应明显高于矩形-1加筋板63 Hz频段(63 Hz隔声低谷对应频段56 Hz~71 Hz)的速度响应。然而,结构的速度响应反映了结构振动的强烈程度,决定了结构辐射的声压和

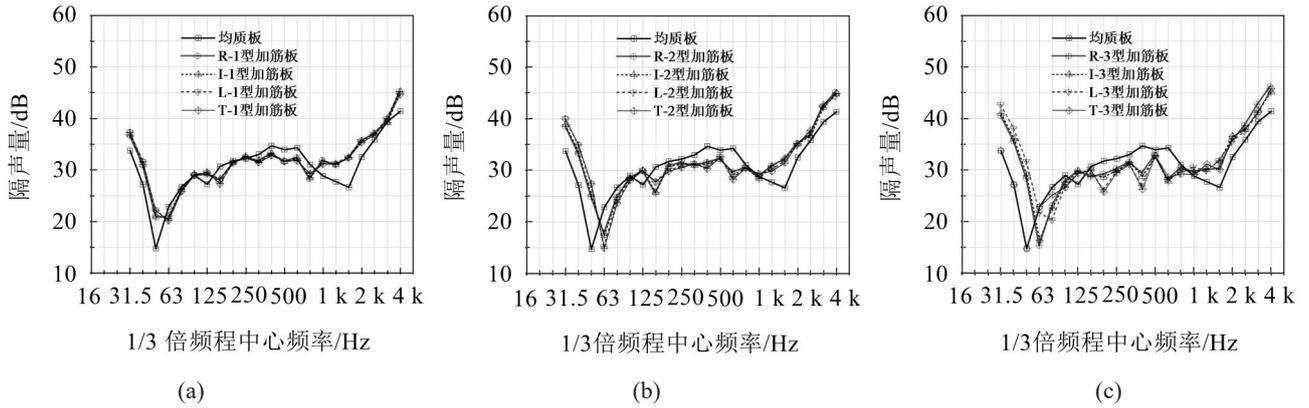


图4 板件隔声量预测结果对比

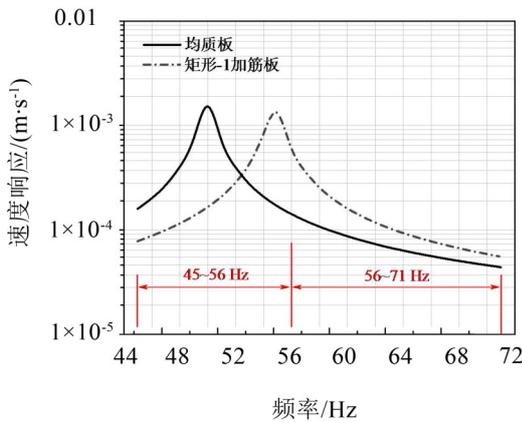


图5 速度响应(45 Hz~71 Hz)

隔声性能。结构的速度响应越大,结构的振动越剧烈,结构辐射声压越高,结构的隔声水平就越低。

图6给出了矩形-1加强板在45 Hz~71 Hz频段隔声频谱特性窄带结果。

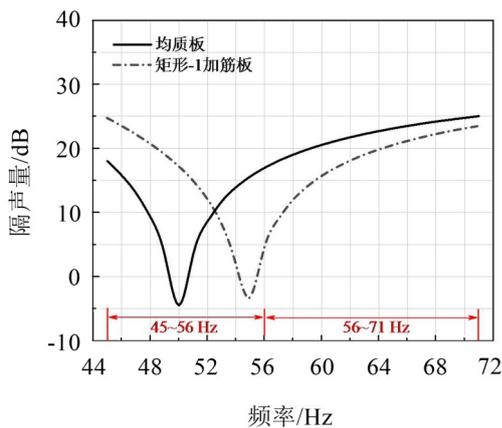


图6 隔声频谱特性窄带结果(45 Hz~71 Hz)

从图6的隔声频谱特性窄带结果也可以明显看出,均质板50 Hz频段的隔声量确实比矩形-1加强板63 Hz频段的隔声量低,因而50 Hz处的隔声低谷高频偏移后隔声水平有所提高。

图7给出了板件在1 120 Hz~4 470 Hz频段内的部分模态振型与频率。

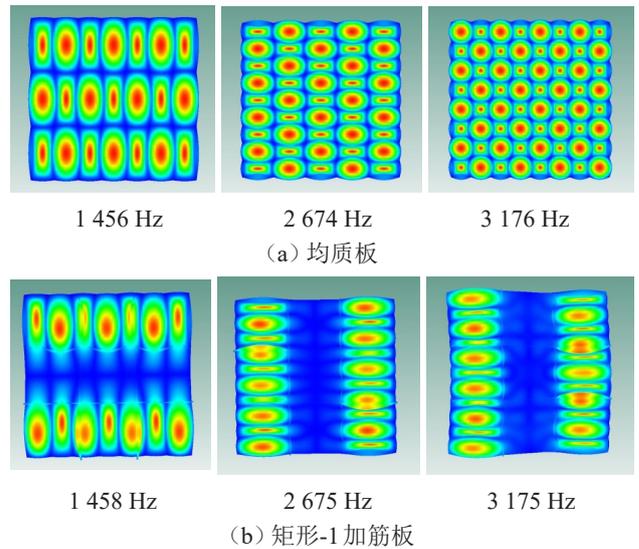


图7 模态振型及频率(1 120 Hz~4 470 Hz)

由图7可见,均质板的局部振动面积要远大于矩形-1加强板的局部振动面积,同样的声激励下,均质板的振动显然要比矩形-1加强板剧烈,透过板件的能量也大,因此在1 120 Hz~4 470 Hz频段内,均质板的隔声水平较矩形-1加强板低。

图8给出了板件在1 120 Hz~4 470 Hz频段内的窄带隔声量预测结果。

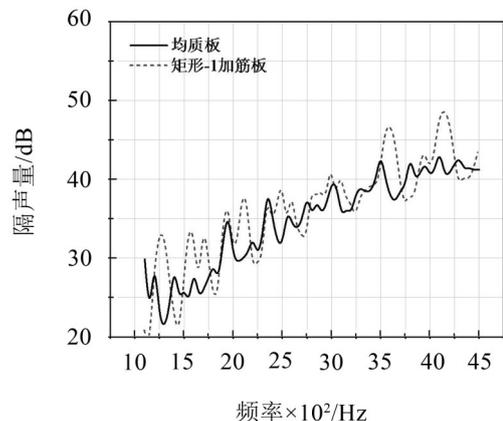


图8 隔声频谱特性窄带结果(1 120 Hz~4 470 Hz)

从图8的频段窄带隔声量预测结果也可看出,矩形-1加筋板的整体隔声水平皆在均质板之上。因此,矩形-1加筋板在1 250 Hz~4 000 Hz 1/3倍频程的频段隔声量较高。

## 4 结语

本文采用Hybrid FE-SEA方法预测分析了不同截面类型加筋板隔声的频率特性,得到如下结论:

(1) 在板件质量增加2%,加筋板底板几何尺寸统一的情况下,相比于均质板,敷设加强筋后,板件的刚度和1阶固有频率均增大,且随加强筋厚度的增大而增大。当加强筋的厚度不变时,T型加筋板的刚度和1阶固有频率最大,L型加筋板次之,I型和矩形加筋板最小。

(2) 以计权隔声量为隔声性能评价标准时,对比敷设不同厚度加强筋的板件隔声性能,加强筋厚度为15 mm时,板件的隔声性能最佳,但当加强筋质量、腹板面积及尺寸参数、翼板面积都相同时,不同类型加筋板间的 $R_w$ 差异不大。

(3) 在板件质量增加2%,加筋板底板几何尺寸统一的情况下,加筋板在刚度控制区内的隔声量相比于均质板都有所提高,提高3 dB~17 dB;板件敷设加强筋后,50 Hz处的隔声低谷均向高频偏移,且

隔声量最大提高约6 dB;在1 250 Hz~4 000 Hz的中高频段内,各加筋板的隔声量也皆比均质板提高1 dB~6 dB。

### 参考文献:

- [1] 唐广鑫,白国锋,刘克.加筋板隔声量的研究[A].中国声学学会2007年青年学术会议论文集(下)[C].上海:声学技术,2007,26(05):99-100.
- [2] 黎胜,赵德有.加筋板结构声传输研究[J].船舶力学,2001,05(04):61-66.
- [3] 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(05):579-588.
- [4] VA One 2015, Users Guide, Validation and QA. The ESI Group 2015.
- [5] 陈艳,隋富生,纪琳.梁板组合结构中频隔声特性的仿真和实验研究[J].噪声与振动控制,2013,33(S1):179-182.
- [6] P J SHORTER, R S LANGLEY. Vibro-acoustic analysis of complex systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 288(3): 669-699.
- [7] R H LYON, R G DEJONG, M HECKL. Theory and application of statistical energy analysis, second edition [M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 1995.
- [8] 杨凤玲.车身刚度计算方法与优化研究[D].长春:吉林大学,2013.

(上接第74页)

- [6] 王蕾,陈安军.矩形脉冲激励下悬挂式弹簧系统冲击特性的研究[J].振动与冲击,2012,31(11):142-144.
- [7] 王蕾.悬挂式缓冲包装系统动力学性能的研究[D].无锡:江南大学,2012.
- [8] 王蕾,陈安军.悬挂式弹簧包装系统的冲击特性研究[J].包装工程,2011,32(09):33-36.
- [9] WANG L, CHEN A J. The shock response spectra of the suspension packaging system under rectangular pulse[J]. Journal of Applied Packaging Research, 2011, 5(4): 237-246.
- [10] WANG L, CHEN A J. The damage boundary curve of the suspension packaging system under rectangular pulse [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 105(107): 70-73.
- [11] 宋爽,陈安军.基于变分迭代法的悬挂式弹簧系统的跌落破损评价[J].包装工程,2013,34(13):36-39.
- [12] 宋爽,王蕾,陈安军.悬挂式弹簧系统跌落冲击问题的变分迭代法[J].噪声与振动控制,2013,33(6):36-39.
- [13] 宋爽.跌落工况下悬挂式缓冲包装系统动力学性能研究[D].无锡:江南大学,2014.
- [14] SONG S, DUAN N N, CHEN A J. Application of variational iteration method for dropping damage evaluation of the suspension spring packaging system[J]. Abstract and Applied Analysis, 2014, Article ID 385404, 7 Pages.
- [15] SONG S, CHEN A J. Variational iteration method of dropping shock response for the suspension spring packaging system[J]. Shock Vibration, 2015, Article, ID408674, 6 pages.
- [16] 李辉,陈安军.悬挂式缓冲系统易损件冲击响应特性[J].包装工程,2017,38(11):74-78.