◇ 研究报告 ◇

含损伤黏弹性阻尼加筋层合板声功率和 指向性变异*

沈敏†何为王真余联庆

(湖北省数字化纺织装备重点实验室 武汉纺织大学机械工程与自动化学院 武汉 430200)

摘要:该文旨在研究损伤位置和程度对自由阻尼加筋层合板声辐射功率和指向性的影响。基于 Mindlin 和 Timoshenko梁理论,建立了自由阻尼层合板-梁组合结构有限元模型。数值求解四边简支边界条件自由阻尼 加筋层合板振动响应,继而通过 Rayleigh 积分计算加筋层合板辐射声功率和指向性。将计算得到的前4阶模 态固有频率、声辐射功率与指向性与已有文献进行了对比基本一致,验证了数值模型的正确性。最后,详细讨 论了损伤位置和程度对自由阻尼加筋层合板固有频率、振型、声辐射功率和指向性的影响,结果表明:随着结 构损伤程度的增大,声辐射功率峰值向低频移动,在更多角度上出现明显的指向性;声辐射功率和指向性对损 伤位置比损伤程度更加敏感。

关键词:加筋板结构;结构损伤;自由阻尼层;辐射功率;指向性

中图法分类号: O429 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2021)05-0705-10 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.05.008

Variations of sound radiation power and directivity of stiffened laminated panel with viscoelastic damping material

SHEN Min HE Wei WANG Zhen YU Lianqing

(Hubei Key Laboratory of Digital Textile Equipment, School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract: This paper is to study the effects of damage location and degree on acoustic radiation power and directivity of an unconstrained damping stiffened laminated plate. Based on Mindlin and Timoshenko beam theory, a finite element model is established for laminated plate consisted of beams structure. The vibration response of the stiffened laminated plate solved numerically with full edges simply supported. Then, the sound power and directivity of the stiffened aminated plate are calculated according to Rayleigh integral. The first five modal frequencies, acoustic radiation power and directivity are basically consistent with the existing literature, which verifies the correctness of the numerical model. Finally, the effects of damage location and degree on the natural frequency, modal shape, acoustic radiation power and directivity of the stiffened laminated plates are discussed in detail. The results show that the peak values of acoustic power move to low frequency with the increasing of structural damage degree and obvious directivity at more angles. The acoustic radiation power and directivity are more sensitive to damage location than damage degree.

Keywords: Stiffened panel; Structural damage; Unconstrained damped layer; Radiation power; Directivity pattern

²⁰²⁰⁻¹²⁻²² 收稿; 2021-04-09 定稿

^{*}国家自然科学基金项目 (51505344, 11872048), 湖北省自然科学基金项目 (2014CFB766), 湖北省数字化纺织装备重点实验室开放课题 (DTL2018017)

作者简介: 沈敏 (1978-), 女, 湖北武汉人, 博士, 研究方向: 结构振动与声学。

[†]通信作者 E-mail: min_shen18@163.com

0 引言

为提高板结构承载力和稳定性,加筋板结构在 舰船、土木、车辆工程和航空航天等领域被广泛应 用。在舰船动力机舱、水线下舷等重要舱段加筋板 表面敷设阻尼材料,可将结构振动能量转化为热能 耗散,达到减振和降低噪声辐射的目的^[1-2]。加筋 板结构形式复杂,并工作在重载环境下,在服役过程 中加筋板容易出现疲劳损伤,影响舰船等结构的可 靠性和安全性。

由试验观察可知,对于含损伤的加筋板,在动 载荷作用下的损伤演化规律复杂,难以评估,当加筋 板出现损伤后,不仅导致结构动力特性发生变化,并 且其声学辐射特性也将发生变化^[3]。因此,利用结 构声学辐射特性的变化对典型加筋板结构的损伤 加以识别和对受损结构的寿命进行评估,对于加筋 板实际工程应用具有重要的意义。

国内外研究人员已对加筋板的动力学特性展 开了大量的研究,在加筋板理论建模方面,主要集中 在正交板模型、板架模型和板梁模型。Xu等^[4]用改 进的傅里叶级数给出了加筋板的位移函数,计算了 不同边界条件加筋板的模态固有频率和振型。Cho 等^[5]用有限元及假定模态法研究了加筋板振动特 性。黄海燕等^[6]建立了板梁组合有限元模型,并考 虑了板的剪切变形和板梁单元中性轴不重合的偏 心作用,计算了四边固支单向加筋板的固有频率和 振型。刘文光等^[7]建立了铆接、点焊和滚焊连接方 式加筋板的有限元模型,讨论了不同连接方式对单 向和双向加筋板振动模态特性的影响。石楚千等^[8] 使用 ABAQUS 建立了复合材料加筋板的有限元模 型,研究了不同筋条刚度下的加筋板剪切稳定性。

高双等^[9]将正交加筋板在特定边界条件的结构动力学问题转化为基于李兹法的能量泛函变分问题,推导了加筋板的振动方程,计算了典型加筋薄板的固有频率,并使用边界元方法计算了加筋板声辐射特性。张英蓉等^[10]采用有限元方法研究了加筋板振动和声辐射特性,讨论了基板加筋和腹板加筋对板结构振动声辐射的影响。刘成武等^[11]使用加筋板有限元模型计算振动响应,结合边界元方法计算了薄板的声辐射,讨论了沿长度方向"二字型"、"十字型"和"X字型"不同加筋形式对加筋板结构声辐射功率和效率的影响。周海安等^[12]也采用有限元和边界元结合的方法研究了双层周期加

筋板在简谐力作用下的声辐射特性。Ma等^[13-14]使用解析公式计算了单向和双向加筋双层板结构的振动响应,使用Rayleigh积分计算了声辐射功率,并讨论了施加主动控制力对降低双层加筋板声辐射功率的作用。郭新毅等^[15-16]研究了含损伤的加筋钢板振动模态和声辐射模态、声辐射功率的变异。然而,对于含损伤黏弹性阻尼加筋层合板动力学特性和声学变异研究成果还很缺乏。

本文旨在研究结构损伤程度和位置对自由阻 尼加筋层合板振动和声辐射特性的影响。基于板梁 组合有限元动力学模型,计算四边简支边界条件下 自由阻尼加筋板模态固有频率和振型,将有限元模 型计算结果与Ansys建立的阻尼加筋层合板有限元 模型的结果对比,误差不超过3%,验证了有限元模 型的正确性;继而采用Rayleigh积分法计算了复合 板结构声辐射功率和指向性,并与已有文献中的结 果对比,验证了其正确性。最后,详细讨论了四边简 支边界条件下,黏弹性阻尼加筋钢板结构损伤程度 和位置对声辐射功率和指向性的影响。

1 黏弹性阻尼加筋层合板有限元动力 学方程

本文研究对象为矩形黏弹性阻尼加筋层合板 结构,如图1所示。钢板作为基板,在基板的上层铺 设筋条,基板的下层敷设一层黏弹性材料作为阻尼 层,当加强筋的宽度和高度远小于加强筋的长度时, 可以将加强筋简化为梁。



图1 敷设自由阻尼加筋层合板结构

Fig. 1 Stiffened laminated panel with unconstrained damping materials

1.1 基板和黏弹性层 Mindlin 板单元有限元模型

基板和黏弹性阻尼层使用 Mindlin 板单元,采 用分项等参插值方法构造4节点等参数单元,每个 节点有6个自由度,3个线自由度u、v、w和2个中 面法线转角自由度 θ_x 、 θ_y 以及一个面内旋转自由度 θ_z ,节点自由度可用向量表示为

$$\{\boldsymbol{d}_i\}^{\mathrm{T}} = (u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}), \quad i = 1, 2, 3, 4.$$
 (1)

构建黏弹性复合板结构的能量泛函数,得到自 由阻尼复合板结构单元质量矩阵和单元刚度矩阵:

$$\boldsymbol{M}_{\rm ep}^{\rm b,v} = \iint_{\Omega} \rho^{\rm b,v} \boldsymbol{N}^{\rm T} \boldsymbol{N} \,\mathrm{d}\,\Omega_{\rm e}, \tag{2}$$

$$\boldsymbol{K}_{ep}^{b} = \iint_{\Omega} \boldsymbol{B}_{b}^{T} \boldsymbol{D}_{b}^{b} \boldsymbol{B}_{b} d\Omega_{e} + \iint_{\Omega} \boldsymbol{B}_{s}^{T} \boldsymbol{D}_{s}^{b} \boldsymbol{B}_{s} d\Omega_{e},$$
(3)

$$\boldsymbol{K}_{ep}^{v} = \iint_{\Omega} \boldsymbol{B}_{b}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D}_{b}^{v} \boldsymbol{B}_{b} \,\mathrm{d}\Omega_{e} + \iint_{\Omega} \boldsymbol{B}_{s}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D}_{s}^{v} \boldsymbol{B}_{s} \,\mathrm{d}\Omega_{e},$$

$$(4)$$

其中, M_{ep}^{b} 和 M_{ep}^{v} 分别表示基板和黏弹性阻尼层 的单元一致质量矩阵, ρ^{b} 和 ρ^{v} 分别是基板和黏弹 性阻尼层的密度,N为Mindlin板单元形函数, K_{ep}^{b} 和 K_{ep}^{v} 分别为基板和黏弹性阻尼层的单元刚度矩 阵, D_{b}^{b} 和 D_{b}^{v} 分别为基板和黏弹性阻尼层的弯曲弹 性矩阵, D_{b}^{b} 和 D_{s}^{v} 分别为基板和黏弹性阻尼层的弯 切弹性矩阵, B_{b} 和 B_{s} 分别为弯曲和剪切应变矩阵, 具体形式可参考文献[17]。

1.2 加强筋 Timoshenko 梁单元有限元模型

Timoshenko梁单元考虑剪切变形和面内旋转的影响,属于扰度w和截面转动 θ 各自独立插值的单元。Timoshenko梁单元为2节点梁单元,每个节点有6个自由度:节点线位移u、v、w和转角 θ_{xi} 、 θ_{yi} 、 θ_{zi} ,节点自由度可以用向量表示为

$$\{\boldsymbol{d}_i\}^{\mathrm{T}} = (u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}), \quad i = 1, 2.$$
 (5)

从而可以导出梁单元刚度矩阵为

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{eL}} = \int_{0}^{l} \boldsymbol{B}_{\mathrm{L}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D}_{\mathrm{L}} \boldsymbol{B}_{\mathrm{L}} \mathrm{d}l, \qquad (6)$$

$$\boldsymbol{M}_{\rm eL} = \int_0^l \boldsymbol{N}_{\rm L}^{\rm T} \rho_{\rm eL} \boldsymbol{N}_{\rm L} \,\mathrm{d}l, \qquad (7)$$

其中, K_{eL} 和 M_{eL} 分别为不考虑偏置梁单元的刚度 矩阵和一致质量矩阵, N_L 为Timoshenko梁单元形 函数, D_L 为梁单元的弹性矩阵, B_L 为梁单元的应 变矩阵,具体形式可参考文献[17]。

1.3 板梁组合结构有限元模型

在板梁组合结构中,由于板结构的中性面和梁 中性轴之间有一定距离,板单元和梁单元节点不重 合。因此,梁单元需要进行偏心转换:

$$e^* = \frac{A_1}{A_1 + A_2}e,$$
 (8)

式(8)中,A₁和A₂分别为板、梁横截面面积;e为梁的中性轴到板中面的距离;e*为梁的中性轴到组合截面中性轴距离。

将公式(6)的刚度矩阵与公式(8)进行集成,可 得到偏心梁单元的刚度矩阵为

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{eL}}^* = \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{K}_{\mathrm{eL}} \boldsymbol{H}, \qquad (9)$$

式(9)中,**K**^{*}_{eL}为偏心梁单元刚度矩阵,**K**_{eL}为无偏 心的梁单元刚度矩阵,**H**为变换矩阵,具体可参考 文献[18]。

最后对梁板组合结构的单元刚度矩阵进行组装,得到系统的总刚度矩阵,以复刚度法表达自由 阻尼层的黏弹性材料特性,根据Hamilton变分原 理,可得复合材料加筋板在频域的有限元动力学 方程为

 $[M]{\ddot{x}} + [C]{\dot{x}} + [K]{x} = {F} e^{j\omega t}$, (10) 其中, [M]为总质量矩阵, [K]为总刚度矩阵, [C]为 总阻尼矩阵, 结构无阻尼取零值, $\{x\}$ 和 $\{F\}$ 分别为 板结构节点的总位移向量和激励力向量。

当激振力为谐波激励 **F** e^{jωt} 时,根据有限元法 可以得到结构振动速度响应为

$$\{\boldsymbol{v}\} = \left(-\omega^2[\boldsymbol{M}] + j\omega[\boldsymbol{C}] + [\boldsymbol{K}]\right)^{-1} \{\boldsymbol{F}\}j\omega. \quad (11)$$

2 声辐射数值模型

2.1 声辐射功率

计算板的声辐射功率时,假设该板镶嵌在一块 无穷大的障板上,如图2所示。在这块障板上,仅嵌 入的板表面振动时向半空间辐射噪声。



图2 板振动辐射声压示意图



根据结构表面上的法向振速分布函数 $\dot{w}(r_s)$, 由格林函数方法可以建立辐射面为s的声学 Rayleigh积分方程:

$$p(\mathbf{r}) = \frac{\mathrm{j}\omega\rho_0}{2\pi} \int_s \dot{w}\left(\mathbf{r}_s\right) \frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \mathrm{d}S,\qquad(12)$$

其中, $p(\mathbf{r})$ 表示空间中一点 \mathbf{r} 处的声压, $|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|$ 表 示振动的板上某一单元与点 \mathbf{r} 处的距离, ρ_0 和 c_0 表 示周围空间的介质密度和声速,k表示声波波数, $\dot{w}(\mathbf{r}_s)$ 表示板单元法向振速。

声功率可以用声强的表面法向分量对表面的 积分表示:

$$\bar{W} = \oint_{s} \bar{I}(\boldsymbol{r}) \cdot n(\boldsymbol{r}_{s}) dS$$
$$= \frac{1}{2} \oint_{s} \operatorname{Re}\left(p(\boldsymbol{r})\dot{w}^{*}\left(\boldsymbol{r}_{s}\right)\right) dS, \qquad (13)$$

其中, $\bar{I}(\mathbf{r})$ 表示为时间平均声强, $n(\mathbf{r}_s)$ 为表面的法 向单位向量,Re为实部, $\dot{w}^*(\mathbf{r}_s)$ 为振速 $\dot{w}(\mathbf{r}_s)$ 的复 共轭。

使用数值方法计算 Rayleigh 积分,将板沿 x、y 方向分别划分为 N_x和 N_y 个均匀的矩形单元,面元 的最大几何尺寸应远小于声波在介质中传播的波 长,若每个振动面可看作独立声源,总的声功率可 表示为

$$\bar{W} = w_n^{\rm H}(\boldsymbol{r}) \left[\boldsymbol{R}\right] w_n(\boldsymbol{r}), \qquad (14)$$

其中, $w_n(\mathbf{r})$ 表示为每个面元法向复振速构成的向量, $[\mathbf{R}]$ 表示 $N \times N$ 阶声辐射阻抗矩阵。

声功率变化范围极大,采用声功率级来表示,即

$$SwL = 10 \lg(W/W_0), \tag{15}$$

其中,基准声功率 $W_0 = 1 \times 10^{-12}$ W。

2.2 声辐射指向性

定义任意 θ 方向的声压幅值与 $\theta = 0^{\circ}$ 轴上的声压辐射之比为该声源的辐射指向特性:

$$D(\theta) = \frac{(P_a)_{\theta}}{(P_a)_{\theta=0}}.$$
(16)

3 结果与讨论

3.1 数值模型验证

为了验证数值模型的正确性,本节根据上面的 理论基础,使用数值计算软件计算四边简支约束加 筋钢板振动模态和声辐射特性,加强筋使用偏置的 梁单元,基板使用 Mindlin 板单元,加强筋、基板结 构离散采用共节点叠加的有限元网格。计算过程 中,空气密度 $\rho_0 = 1.12 \text{ kg/m}^3$,声速 $c_0 = 343 \text{ m/s}$, 其他具体参数如表1所示。根据本文建立的坐标原 点在基板的左下角,激励力 F_1 位置分作用在中心 点(0,0,0), F_2 作用在加强筋上一点(0.15, 0.10, 0.0)。 此外与使用 ANSYS 软件建立的加筋钢板有限元模型进行比较, 板壳单元为 shell 4 node 181 单元, 是一种用于模拟复合材料层合板较好的单元, 加强筋使用 Beam 2 node 188 单元, 板梁组合有限元模型采用共网格方式, 使得阻尼层、基板和加强筋具有位移协调性。

本文建立的有限元模型计算的单一材料加筋 钢板的前4阶固有频率如表2所示,与文献[18]给 出的结果基本接近,相对误差在2%以内,与使用 ANSYS计算的结果对比,相对误差在3%以内,可 以验证本文有限元模型的正确性,但是计算效率远 超过ANSYS软件。

表1 自由阻尼加筋层合板性能参数 Table 1 Property parameters of the lam-

inated plate with unconstrained damping

参数	符号	数值
钢材杨氏模量	$E_{\rm b}$	210 GPa
钢材密度	$ ho_{ m b}$	$7800~\rm kg/m^3$
钢材泊松比	$v_{ m b}$	0.3
黏弹性材料杨氏模量	$E_{\rm v}$	$0.5~\mathrm{GPa}$
黏弹性材料密度	$ ho_{ m v}$	$1400~\rm kg/m^3$
黏弹性材料泊松比	$v_{ m v}$	0.49
模态损失因子	η	0.01
总长度	L_x	0.6 m
总宽度	L_y	0.4 m
基板厚度	$h_{ m b}$	$0.0015~\mathrm{m}$
黏弹性材料厚度	h_v	0.006 m
加强筋高度	$h_{ m rib}$	0.006 m
筋宽度	w	0.004 m

表2	健康单一材料加筋钢板前4阶固有频率
Table	2 The first four natural frequencies
of hea	lthy steel plate

			(单位: Hz)
固有频率	本文方法	ANSYS	文献 [18]
第1阶	71.1	72.2	73.1
第2阶	124.2	125.5	124.7
第3阶	216.3	220.9	215.2
第4阶	240.1	247.4	237.1

为了进一步验证本文建立的声辐射数值模型 精确度,通过计算加筋钢板结构的声辐射功率和 声辐射指向性进行验证。在健康的加筋钢板中心 (0,0,0) 位置施加单位简谐力 F_1 , 计算板结构振动速度, 继而使用 Rayleigh 积分公式得到加筋钢板振动向外场辐射的声功率, 如图3所示。从图3中可以看出, 计算的声辐射功率和声辐射指向性与文献 [18]的计算结果基本一致, 验证了声辐射功率计算结果的正确性。图4给出了在激励力频率 F_1 为200 Hz, 健康的加筋钢板在 z = 0的平面内, 以坐标圆点为中心、半径为1 m的圆周上的声压分布, 其中 x 轴沿 $\theta = 0^\circ$, y 轴沿方向 $\theta = 90^\circ$ 。从图4可以看出, 本文计算的声辐射指向性与文献 [18]的结果非常接近, 验证了声辐射指向性计算结果正确性。



图 3 健康加筋钢板的声辐射功率与文献 [18] 的对比 Fig. 3 Comparison of radiation power of healthy stiffened steel plate with Ref.[18]



图 4 健康加筋钢板的声辐射指向性与文献 [18] 的 对比

Fig. 4 Comparison of sound radiation directivity of healthy stiffened steel plate with Ref. [18]

运行数值分析软件有限元程序进行加筋板振动模态和谐响应分析,用"etime"指令调用windows系统时钟读取程序运行时间,使用ANSYS有 限元程序进行加筋板模态特性和谐响应分析时,用 APDL中的"get, cputime"指令读取程序运行时间。 分别使用两种方法提取加筋钢板振动前10阶固有 频率以及振动速度所消耗的时间,如表3所示。从 表3中可见,加筋钢板振动模态分析时,ANSYS软 件运行时间约为数值分析软件编写的有限元动力 学方程的3倍。进行谐响应分析时,ANSYS运行时 间是数值分析软件编写的有限元程序的5倍。由数 值分析软件编写的加筋板振动有限元程序计算速 度远超过ANSYS,在工程应用中,可以极大提高运 算效率。

表3 数值分析软件和ANSYS计算耗时对比

Table 3Comparison of calculation timebetween matrix laboratory and commer-cial finite element software

	数值分析软件耗时/s	ANSYS 耗时/s
前10阶固有频率	0.45	1.52
板结构振速	14.27	81.07

3.2 损伤对自由阻尼加筋层合板结构模态固有频 率的影响

为了讨论不同损伤位置对声辐射特性的影响, 本文设计了如图5所示的含损伤自由阻尼加筋板 结构有限元模型。损伤区域分别有3个位置满足 $a_1 \leq x \leq a_2 \pi b_1 \leq y \leq b_2$ 。对各向同性损伤情况, 定义损伤程度 $k = 1 - E_S/E$ 代表受损后钢板结构 刚度的弱化程度,k取值是任意给定的,方便进行有 限元的计算。



图 5 含损伤自由阻尼加筋层合板结构有限元模型 Fig. 5 Finite element model of structural damaged stiffened laminated plate with unconstrained damping

计算过程中,钢材、黏弹性材料阻尼层的材料 参数,层合板、加强筋的几何参数如表1所示。表4 是自由阻尼加筋板在同样的损伤位置1,但是在不

表4 自由阻尼加筋层合板不同损伤程度的前6 阶固有频率

Table 4 The first six natural frequencies ofdamped stiffened laminated plates at dif-ferent damaged degree

		(单位: Hz)			
固有频率	伸声		损伤程度		
	JE/承	0.3	0.7	0.9	
第1阶	62.3	61.2	58.7	56.4	
第2阶	110.4	109.1	106.4	103.9	
第3阶	198.2	197.5	196.1	191.5	
第4阶	211.4	209.3	204.6	201.6	
第5阶	229.3	226.2	218.8	211.1	
第6阶	263.4	262.2	259.9	257.9	

表5是自由阻尼加筋板在相同的损伤程度 k = 0.9、在不同损伤位置时,根据前文有限元模 型求解的前5阶固有频率。从表5可以看出,随着损 伤位置的不同,自由阻尼加筋板的模态固有频率也 会发生变异。

3.3 损伤位置对自由阻尼加筋层合板结构模态振型的影响

使用数值分析软件计算自由阻尼加筋板健康 结构的第5阶模态振型,如图6(a)所示。图6(b)为 使用ANSYS建立阻尼加筋板结构有限元模型。从 图6可以看出计算的第5阶模态振型与数值分析软件计算的振型是吻合的,健康的加筋板结构第5阶振型关于板中心点呈现对称形态。

表5 自由阻尼加筋层合板不同损伤位置的前5 阶固有频率

Table 5 The first five natural frequenciesof damped stiffened laminated plates atdifferent damaged locations

			(单位: Hz)	
固有频率	损伤位置1	损伤位置2	损伤位置3	
第1阶	56.4	54.5	52.9	
第2阶	103.8	107.3	106.1	
第3阶	191.5	178.0	177.6	
第4阶	201.6	200.2	191.4	
第5阶	211.1	215.1	216.4	

图7为自由阻尼加筋板在位置1出现损伤时的 第5阶模态振型。从图7可以看出,当自由阻尼加筋 层合板在不同位置出现损伤后,模态振型发生明显 改变,但是基本形态还是保持了与健康结构大致相 同的振型,只是在局部位置发生了改变,表明出现局 部损伤后,加筋层合板在损伤区域出现局部振动。

图 8 为自由阻尼加筋层合板在位置 3 出现损伤 时的第5阶模态振型。从图 8 可以看出,当阻尼加筋 板在位置 3 出现损伤后,模态振型发生了较大的改 变,不再呈现关于中心对称的形态。并且根据出现 的损伤位置不同,加筋层合板的模态振型都有明显 的变化,表明加筋层合板结构模态振型对于损伤位 置敏感。





Fig. 6 The fifth mode shape of healthy stiffened laminated plate with unconstrained damping







Fig. 7 The fifth mode shape of stiffened laminated plate with unconstrained damping at damage Position 1



图 8 损伤位置 3 时自由阻尼加筋层合板第 5 阶模态振型

Fig. 8 The fifth mode shape of stiffened laminated plate with unconstrained damping at damaged Position 3

3.4 损伤程度对自由阻尼加筋层合板声辐射功率 和指向性的影响

图9中比较了健康的自由阻尼加筋板、损伤程 度 k 分别取值 0.3、0.7 和 0.9 时, 在同一个损伤位置 2的声辐射功率与频率的曲线。从图9中可以看出, 随着损伤程度增加,加筋板声辐射功率峰值总体 趋势向低频移动, 这是由于加筋板结构出现损伤 后,结构整体刚度弱化使得结构固有频率降低。在 0~350 Hz 低频范围内, 声辐射功率变化不明显; 在 350~800 Hz 频率范围内,随着损伤程度的增加,由 于系统刚度弱化,在同一激励下结构振动幅度加大, 导致加筋板向外场辐射的声功率幅值增大。

图10表示自由阻尼加筋板的损伤程度分别为 0.3、0.7和0.9, 激励频率分别为400 Hz和500 Hz 时的声辐射指向性。从图10(a)中可以看出频率 为400 Hz时,健康的加筋板声辐射指向性在90° 和270°时出现极大值;当自由阻尼加筋板受损后, 在120°和300°两个角度出现极大值。从图10(b)可 以看出,激励频率为500 Hz时,健康加筋板在0°和



图 9 不同损伤程度对自由阻尼加筋层合板声辐射 功率的影响

Fig. 9 Influence of different damage degrees on acoustic radiation power of stiffened laminated plate with unconstrained damping





图 10 不同损伤程度对阻尼加筋层合板声辐射指向性的影响

Fig. 10 Influence of different damage degree on acoustic radiation directivity of stiffened laminated plate with unconstrained damping

180°出现极大值,阻尼加筋板出现不同程度损伤,均在60°、150°、240°和330°四个角度出现极大值,呈现更加明显的指向性。

3.5 损伤位置对自由阻尼加筋板声辐射功率和指向性的影响

图11显示了自由阻尼加筋层合板在不同位置 出现损伤时声辐射功率与频率的曲线。从图11中 可看出,自由阻尼加筋层合板损伤位置对声辐射功 率的影响较大,由于加筋层合板发生损伤部位局部 振动比较强烈,不同损伤位置时声功率幅值相差不 大,由于不同位置出现损伤后,结构刚度弱化的局部 位置不同,固有频率不同,所以声辐射功率曲线的 峰值出现位置各不相同。由图11中可见,损伤位置 2和损伤位置3的声辐射功率曲线变化有相似的规 律,这是由于损伤位置2在自由阻尼加筋层合板的 右上侧,损伤位置3在自由阻尼加筋层合板的左下 侧,损伤区域关于板中心点对称。

图12显示了自由阻尼加筋层合板在3个不同 位置出现损伤,激励频率在400 Hz和500 Hz时的 声辐射指向性曲线。从图12(a)中可看出,当频率 为400 Hz时,自由阻尼加筋层合板在第1个位置出 现损伤时,声辐射指向性在120°和300°出现最大 值;若在第2个位置出现损伤,声辐射指向性在120° 和300°出现最大值;而在第3个位置出现损伤,声 辐射指向性在90°和270°出现极大值。图12(b)为 激励频率为500 Hz、自由阻尼加筋层合板在第3个 不同位置出现损伤时的声辐射指向性。从图12(b) 中可见,自由阻尼加筋层合板在第1个位置出现损 伤,声辐射指向性在60°和240°出现最大值;若在 第2和第3个位置出现损伤,声辐射指向性在60°、 150°、240°、330°四个方向出现最大值。随着频率的 增加,含损伤的自由阻尼加筋层合板在更多角度上 出现了明显的指向性。由于损伤位置2和损伤位置 3分别位于加筋板结构右上角和左下角,在400 Hz 和500 Hz时,自由阻尼加筋层合板声辐射指向性呈 现出类似的特征。



图 11 损伤位置对自由阻尼加筋层合板声功率影响 Fig. 11 Influence of damage location on sound power of stiffened laminated panel with unconstrained damping



图 12 损伤位置对自由阻尼加筋层合板声辐射指向性的影响

Fig. 12 Influence of damage location on acoustic radiation directivity of stiffened laminated panel with unconstrained damping

4 结论

自由阻尼加筋层合板振动向空间辐射噪声,辐 射噪声特性受到结构表面振动速度响应的影响,当 加筋层合板出现损伤,结构本身刚度弱化发生了变 化,其振动特性和声辐射特性也发生相应的变化。

结构损伤程度对结构的模态特性影响较小,而 损伤位置对加筋层合板结构的振动模态固有频率 和振型影响尤为明显。随着自由阻尼加筋层合板结 构损伤程度增大,在400~800 Hz范围内,其声辐 射功率幅值增大,并且峰值向低频方向移动。

健康的自由阻尼加筋层合板声辐射指向性在 0°~360°分布比较均匀,随着加筋层合板结构损伤 程度扩大,将在特定角度出现更加明显的指向性。

随着简谐力激励频率的增加,声辐射指向性 也在更多的角度出现极大值,呈现多主瓣形态。自 由阻尼加筋层合板声辐射特性对损伤位置尤其敏 感,在实际工程中可以利用声功率和声辐射指向性 的变异检测加筋层合板结构的损伤程度以及损失 位置。

参考文献

 路庆贺,梁森,周运发,等. 阻尼夹芯复合材料加筋板的振动 分析与数值模拟 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(5): 250-261.
 Lu Qinghe, Liang Sen, Zhou Yunfa, et al. Vibration characteristics analysis and numerical simulation for stiffened plates with damping core composite[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(5): 250-261. [2] 魏强,朱英富,张国良. 阻尼处理多向加筋板的振动响应及声 辐射 [J]. 中国造船, 2005, 46(2): 35-42.

Wei Qiang, Zhu Yingfu, Zhang Guoliang. The vibration response and sound radiation of multi-direction stiffened plate with damped treatment[J]. Shipbuilding of China, 2005, 46(2): 35–42.

- [3] 闫兆敏,张东俊,温激鸿,等.基于有限元法的贴敷阻尼薄板声 辐射性能研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(15): 195–199, 211.
 Yan Zhaomin, Zhang Dongjun, Wen Jihong, et al. Sound radiation from a damped thin plate based on finite element method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(15): 195–199, 211.
- [4] Xu H, Du J, Li W L. Vibrations of rectangular plates reinforced by any number of beams of arbitrary lengths and placement angles[J]. Journal of Sound and Vibraiton, 2010, 329(18): 3759–3779.
- [5] Cho D S, Kim B H, Kim J, et al. Forced vibration analysis of arbitrarily constrained rectangular plates and stiffened panels using the assumed mode method[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 90: 182–190.
- [6] 黄海燕, 王德禹. 加筋板结构的自由振动分析 [J]. 船舶工程, 2008, 30(6): 1–3, 18.
 Huang Haiyan, Wang Deyu. Free vibration analysis of the stiffened plate[J]. Ship Engineering, 2008, 30(6): 1–3, 18.
- [7] 刘文光, 郭隆清, 付俊, 等. 加筋薄板的自由振动分析 [J]. 机 械设计与制造, 2017(2): 58-61, 66.
 Liu Wenguang, Guo Longqing, Fu Jun, et al. Free vibration analysis of stiffened thin plate[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(2): 58-61, 66.
- [8] 石楚千,曾建江,朱书华,等.不同筋条刚度下复材加筋板剪 切稳定性分析 [J]. 航空计算技术, 2014, 44(1): 94–97. Shi Chuqian, Zeng Jianjiang, Zhu Shuhua, et al. Analysis of stability on composite stiffened panels subjected to shear loading under different stiffness conditions[J]. Aeronautical Computing Technique, 2014, 44(1): 94–97.
- [9] 高双,朱翔,李天匀,等. 基于不同模型的正交加筋板低频振动和声辐射分析 [J]. 中国舰船研究, 2016, 11(4): 72-78.

Gao Shuang, Zhu Xiang, Li Tianyun, et al. Vibration and acoustic radiation characteristics of orthogonal stiffened plates based on different models[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(4): 72–78.

[10] 张英蓉, 沈火明, 张鑫, 等. 加筋位置对铝型材板振动声辐射 特性的影响分析 [J]. 四川理工学院学报 (自然科学版), 2016, 29(6): 48-51.

Zhang Yingrong, Shen Huoming, Zhang Xin, et al. Study on the influence of reinforced location on vibration and sound radiation of the aluminum plate[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering(Natural Science Edition), 2016, 29(6): 48–51.

- [11] 刘成武,郭小斌. 薄板结构振动声辐射特性分析及优化 [J]. 福 建工程学院学报, 2020, 18(4): 375–380.
 Liu Chengwu, Guo Xiaobin. Analysis and optimization of vibration acoustic radiation characteristics of thin plate structure[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2020, 18(4): 375–380.
- [12] 周海安, 修孝廷, 孟建兵. 基于有限元/边界元的双层周期加 筋板声辐射分析 [J]. 山东理工大学学报 (自然科学版), 2019, 33(3): 31-36, 42.

Zhou Hai'an, Xiu Xiaoting, Meng Jianbing. Acoustic radiation analysis of double periodical beam-stiffened panels based on FEM/BEM[J]. Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition), 2019, 33(3): 31–36, 42.

- [13] Ma X Y, Chen K, Ding S H, et al. Physical mechanisms of active control of sound transmission through rib stiffened double-panel structure[J]. Journal of Sound and Vibraiton, 2016, 371: 2–18.
- [14] Ma X Y, Chen K, Xu J. Active control of sound transmission through orthogonally rib stiffened double-panel structure: mechanism analysis[J]. Applied Sciences, 2019, 9(16): 1–17.
- [15] 郭新毅, 洪明. 含损伤加筋板结构声辐射阻尼变异研究 [J]. 船 舶力学, 2007, 11(4): 628-636.
 Guo Xinyi, Hong Ming. A study on the variations of acoustic radiation damping of a damaged stiffened plate[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007, 11(4): 628-636.
- [16] 郭新毅, 洪明, 李艮田. 含损伤加筋板结构声辐射模态变异研究 [J]. 船舶力学, 2005, 9(2): 115–123.
 Guo Xinyi, Hong Ming, Li Gentian. A study on variations of acoustic radiation modes of a damaged stiffened panel[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(2): 115–123.
- [17] 王勖成, 邵敏. 有限单元法的基本原理和数值方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2018: 343-353.
- [18] 邹平.加筋板拓扑结构与声辐射特性研究 [D]. 长沙: 湖南大 学, 2009: 45-46.