

文章编号:1000-582X(2008)03-0280-05

基于传递函数的含损伤复合材料加筋板振动

王 蔓^{1,2}, 白瑞祥¹, 陈浩然¹

(1. 大连理工大学 运载工程与力学部 工程力学系 工业装备与结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连工业大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 大连 116034)

摘 要:研究了具有基板嵌入分层损伤和筋板脱粘损伤的复合材料加筋层合板的振动特性。根据层合板和层合梁的一阶理论,结合 Adams 应变能法的模态阻尼模型,建立了含损伤复合材料加筋板动力分析的有限元方法,开发了相应的有限元分析软件。通过典型数值算例的计算结果,分别讨论了具有基板分层和筋、板间脱粘的复合材料加筋板损伤尺度和损伤位置对板的传递函数的影响,得到含不同类型和尺度的含损伤复合材料加筋板的振动特征。

关键词:复合材料加筋板;损伤;动力特性;传递函数

中图分类号:V214.8

文献标志码:A

Analysis of Transfer Functions for Damaged Stiffened Laminates

WANG Man^{1,2}, BAI Rui-xiang¹, CHEN Hao-ran¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China;
2. School of Mechanical Engineering & Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian, 116034, P. R. China)

Abstract: The dynamic characteristics of the stiffened composite plate with embedded delamination and/or interface debonding between the stiffener and laminates were studied via the investigation of frequency response function (FRFs). According to the Mindlin shear deformation theory of the composite plate and beam, and the modal damping model on the basis of the Adams' strain energy method (MSE), the finite element method of dynamic analysis for the damaged composite stiffened plates was developed. The influences of damage size and location on the frequency response function for the stiffened composite plate with embedded delamination and/or the interface debonding were studied. The results show that this method can be used for damage identification of composite stiffened plates.

Key words: composite stiffened plates; delamination; frequency response function; damaged; the dynamic characteristic

复合材料加筋结构作为典型的功能型复合材料,具有强度高、刚度大、质量轻、整体性好等良好的力学性能,在航空航天、船舶制造、交通、医疗、体育、包装等领域得到越来越广泛的重视,可以完成传统材料不可替代的功能。因损伤广泛存在于复合材料和结构的生产、加工和使用的各个阶段,往往承受各种外界环境如温度、碰撞和载荷等的影响,使结构产

生各种细观和宏观局部缺陷。其中,基板分层、筋和板的脱粘是较为常见的损伤形式(如图1所示)。该类损伤使复合材料结构在失效前的力学性能逐渐劣化,并将导致结构刚度的降低和结构动力特性的改变。对含损伤复合材料层合结构动态特性的研究较多^[1-5],由于频响函数的计算是复合材料结构动力分析控制参数识别和故障诊断的重要环节,可针对

收稿日期:2007-12-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10272025;10302004)

作者简介:王蔓(1973-),女,大连理工大学副教授,主要从事复合材料和结构损伤力学研究,
(E-mail) wangman3669@sina.com。

结构上具体的激励和响应位置,将其动力特征在频率上连续的给予描述,对于复合材料加筋结构的损伤识别和故障诊断具有重要意义。笔者采用有限元方法研究了含筋板脱层和层间分层损伤加筋板的传递函数,讨论了损伤尺度和损伤位置对加筋板传递函数的影响,得到含损伤复合材料加筋板的振动特征。

1 复合材料加筋板损伤类型描述

在复合材料加筋板的诸多损伤形式中,基板分层损伤和筋与板之间的脱粘损伤是较为常见的损伤形式,对结构振动特性的影响也最为明显,通过对含有这两种损伤结构的动力特征在频率上连续的给予描述,对这两种损伤的类型识别、损伤位置、损伤形状以及损伤尺度的预测都具有一定的实用价值。

1.1 层合板的分层损伤

加筋板在制造过程中若存在工艺上的缺陷,如夹杂或贫胶现象以及在结构服役过程受到外来物的冲击,都可能会产生分层损伤,损伤的形状具有一定的随机性,但一般均可以简化为圆形、椭圆形或花生形来处理,对于这3种不同分层形状,从数值模拟角度来说,均可以采用同一个分析模型来处理,即分层模型,区别仅在于几何建模时考虑其相应的真实形状。对于分层模型,图1中以圆形分层为例,给出了整板可能出现的振动模式的1/4加以标注说明。分层损伤出现后,蒙皮分层区附近基板将被分为上子板(I)、下子板(II)和完善板(III)3个部分,其中分层上子板刚度会大幅度下降,特别是厚度较小的子板容易出现局部振动,而加筋板结构的整体刚度也会不同程度地折减。

1.2 层合板与加强筋之间的脱层损伤

在加筋板的制作工艺中,一种常用的做法是将基板和加强筋分别成型,然后再固化成一体,这种方法因为工艺简单且较为经济而被广泛采用,但容易出现筋板之间粘结不牢,在服役过程中因砂石、冰雹、子弹以及维修时工具掉落等冲击也都容易产生层合板和加强筋的局部脱开损伤,而脱开后的加强筋因失去基板的制约容易出现局部振动,如图1所示,结构整体刚度也将根据不同的脱开尺度而不同程度的折减。

2 含损伤复合材料加筋板的传递函数

依据 Hamilton 原理,含损伤复合材料加筋板的自由振动方程和动载荷作用下的运动方程分别为

$$M \ddot{q} + Kq = 0, \tag{1}$$

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + Kq = f, \tag{2}$$

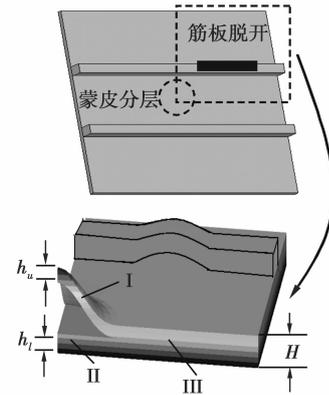


图1 分层损伤与筋板脱开损伤模型示意图

设线性系统在简谐激励 $f = \{F\} e^{i\omega t}$ 下的位移响应符合 $q(t) = qe^{i\omega t}$,代入运动方程(2)

$$\{-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]\} \{q\} = \{F\}, \tag{3}$$

定义

$$[H(\omega)]^{-1} = -\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K], \tag{4}$$

根据结构振型 ϕ 的正交性质,并取前 N 阶振型进行正则化处理,经推导,可得传递函数矩阵 H ,表示为

$$[H]_{N \times N} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1N} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_{N1} & H_{N2} & \dots & H_{NN} \end{bmatrix}_{N \times N} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\xi_j \omega_j \omega} \begin{Bmatrix} \varphi_{1m} \\ \varphi_{2m} \\ \vdots \\ \varphi_{Nm} \end{Bmatrix}_{N \times 1} \begin{Bmatrix} \varphi_{1m} \\ \varphi_{2m} \\ \vdots \\ \varphi_{Nm} \end{Bmatrix}_{N \times 1}^T, \tag{5}$$

$$H_{mn}(\omega) = \sum_{j=1}^N \frac{\Phi_{jm} \Phi_{jn}}{\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\xi_j \omega_j \omega}. \tag{6}$$

将式(6)传递函数的实部和虚部分离,得到加筋板节点 n 处的单位幅值简谐激励引起结点 m 处的幅频响应和相频响应,而相应的传递函数实部 $H_{mn}^R(\omega)$ 和虚部 $H_{mn}^I(\omega)$ 表示为

$$H_{mn}^R(\omega) = \sum_{j=1}^N \frac{(\omega_j^2 - \omega^2) \Phi_{jm} \Phi_{jn}}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_j^2 \omega_j^2 \omega^2},$$

$$H_{mn}^I(\omega) = \sum_{j=1}^N \frac{2\xi_j \omega_j \omega \Phi_{jm} \Phi_{jn}}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_j^2 \omega_j^2 \omega^2}, \tag{7}$$

从而传递函数 H 的幅值表示为

$$A_{mn}(\omega) = \sqrt{H_{mn}^R(\omega)^2 + H_{mn}^I(\omega)^2}, \tag{8}$$

由以上分析可知,确定含损伤复合材料加筋板的传递函数矩阵需要先确定结构各阶频率、振型以及模态阻尼系数。由于含损伤复合材料加筋板的结构复杂性和复合材料阻尼的复杂性,很难构造出符合精度要求的解析解,而借助有限元数值模拟工具可以成功解决这一问题。

3 含损伤复合材料加筋板有限元分析

复合材料加筋板结构可采用分项插值的八节点层合板单元和抛物线插值的三节点层合梁单元来模拟。考虑到层合结构横向剪切刚度很小,文中对层合板和层合梁均采用一阶横向剪切变形理论(Mindlin 假定)。

3.1 复合材料加筋板位移场

根据层合板一阶剪切变形理论,层合板每一子板的位移场可统一表示为如下形式

$$\left. \begin{aligned} u_i(x, y, z, t) &= u_{0i}(x, y, t) + z\theta_{yi}(x, y, t), \\ v_i(x, y, z, t) &= v_{0i}(x, y, t) - z\theta_{xi}(x, y, t) \quad (i=1, 2, 3), \\ w_i(x, y, z, t) &= w_{0i}(x, y, t), \end{aligned} \right\} (9)$$

其中: u_0, v_0 和 w_0 为中面位移, θ_x, θ_y 为绕 x, y 的转角。下标 $i = 1, 2, 3$ 分别表示为上子板、下子板和基板。在分层前缘处节点面内位移必须满足位移连续条件,而其他自由度相同。

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= u_3 + \theta_{y3}(H - h_l)/2, \\ v_1 &= v_3 - \theta_{x3}(H - h_l)/2, \\ u_2 &= u_3 - \theta_{y3}(H - h_u)/2, \\ v_2 &= v_3 + \theta_{x3}(H - h_u)/2, \end{aligned} \right\} (10)$$

式中: H, h_u 和 h_l 分别为基板、上子板和下子板的厚度。加强筋的位移场可表示为

$$\left. \begin{aligned} u &= u_c(x) + z\theta_y(x), \\ v &= -z\theta_x(x), \\ w &= w_c(x), \end{aligned} \right\} (11)$$

式中: u_c 和 w_c 为筋沿 x 和 z 方向的中面位移。将梁的单元刚度阵叠加到层合板的单元刚度阵上去,以形成加筋板结构的单元刚度阵。

3.2 复合材料加筋板的刚度阵和质量阵

根据复合材料层合板的变形几何关系和本构关系,可得到含分层损伤层合板和层合梁各部分的应变能和动能表达式,由变分原理,可得单元刚度阵和质量阵列式,对于层合板单元,有下式

$$\mathbf{K}^p = \int_{\Omega} \mathbf{B}_p^T \mathbf{D}_p \mathbf{B}_p d\Omega, \quad (12)$$

$$\mathbf{M}^p = \int_{\Omega} \mathbf{N}_p^T \mathbf{R}_p \mathbf{N}_p d\Omega, \quad (13)$$

其中: \mathbf{N}_p 为形函数矩阵, \mathbf{B}_p 和 \mathbf{D}_p 分别为应变—结点位移阵和弹性阵;下标 p 表示层合板, \mathbf{R}_p 为密度阵,有关该部分的详细推导及具体表达式可参见文献[6]。同理可得层合梁的刚度阵和质量阵:

$$\mathbf{K}^b = \int_l \mathbf{B}_b^T \mathbf{D}_b \mathbf{B}_b dl, \quad (14)$$

$$\mathbf{M}_b = \int_l \rho_1 \mathbf{N}_b^T \mathbf{N}_b dl, \quad (15)$$

式中: \mathbf{B}_b 和 \mathbf{D}_b 层合梁的应变—位移阵和弹性阵,其

具体表达式可参见文献[7], ρ_1 为层合梁的线密度,下标 b 表示层合梁。

假定变形前垂直于层合板中面和筋中面的公法线在变形后仍保持为直线,则筋骨中面上任意点的广义位移可由层合板中面相应点的广义位移表示成

$$\begin{Bmatrix} u_c \\ v_c \\ w_c \\ \theta_x \\ \theta_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & e & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & e \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ \theta_x \\ \theta_y \end{Bmatrix} = L \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ \theta_x \\ \theta_y \end{Bmatrix}, \quad (16)$$

则加筋板的单元刚度阵 $[\mathbf{K}^e]$ 可表示为

$$\mathbf{K}^e = \mathbf{K}^p + L^T \bar{\mathbf{K}}^b L, \quad (17)$$

式中 e 为加强筋中面到板中面的距离。对于筋的脱层部分其自由度保持独立。对于筋板完好结合部位,由于层合梁单元和板单元共用节点,在组装结构总体刚度阵时,梁单元的质量阵自动叠加到相应的板单元节点上。

3.3 阻尼模型和阻尼阵表达式

采用子空间迭代法求解加筋板自由振动方程(1)可得结构各阶固有频率和振型,根据 Adams^[7] 提出的复合材料层合板应变能理论,结构比阻尼 Ψ_j 为

$$\Psi_j = \frac{\Delta U_j}{U_j} = \frac{\sum_{e=1}^n \int_v \varphi_j \mathbf{K}_d^e \varphi_j dv_e}{\sum_{e=1}^n \int_v \varphi_j \mathbf{K}^e \varphi_j dv_e}, \quad (18)$$

其中: $\{\varphi_j\}$ 为第 j 阶模态振动的固有振型; \mathbf{K}^e 和 \mathbf{K}_d^e 分别为单元总刚度阵和单元耗散刚度阵。

结构在第 j 阶固有模态振动时的模态阻尼系数 ξ_j 与比阻尼容量 ψ_j 之间存在如下关系

$$\xi_j = \psi_j / 4\pi, \quad (19)$$

假设加筋层合板阻尼阵 \mathbf{C} 仍采用 Rayleigh 阻尼模型^[8],即为

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}, \quad (20)$$

其中: \mathbf{M} 和 \mathbf{K} 分别为质量阵和刚度阵, α 和 β 分别为质量和刚度的比例系数。

在式(19)的左、右端分别左乘和右乘其模态向量 φ_j ,则可得

$$\varphi_j \mathbf{C} \varphi_j = \varphi_j (\alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}) \varphi_j, \quad (21)$$

其中: ω_j 和 ξ_j 分别为各阶频率和比阻尼,根据模态正交性质,上式为

$$2\omega_j \xi_j = \alpha + \beta \omega_j^2, \quad (22)$$

通过回归法确定上式的 α 和 β ,然后代入式(19)即可得到加筋层合板的阻尼矩阵 \mathbf{C} 。

通过以上有限元方法,可确定出含损伤复合材料加筋板结构的质量阵 \mathbf{M} 、刚度阵 \mathbf{K} 、阻尼阵 \mathbf{C} 以及结模态阻尼系数构的各阶固有频率 ω 、振型 φ 和结模态阻尼系数 ξ ,根据公式(5)、(6)和(7)即可进行

含损伤复合材料加筋板结构的传递函数分析。

4 加筋板振动研究的程序分析系统

根据上述分析理论和方法,基于 VISUAL FORTRAN 6.0 软件平台,开发了含损伤复合材料加筋板振动特性研究的计算机程序分析系统,可对任意几何形状、任意分层形状、任意加筋形式,任意筋/板脱层位置的含损伤复合材料加筋板进行自由振动分析、阻尼分析、传递函数分析以及动力响应分析。整个系统由前处理、计算分析和后处理 3 个部分组成,计算分析部分包括自由振动分析、阻尼分析、传递函数分析和动力响应分析 3 个模块,文中内容涉及前 3 个分析模块。其中,实现内存优化是本程序系统的一大特点,数据采用一维存储并实现动态管理,全部分析数据均存储在一个一维数据中,充分利用了计算机资源。通过对含不同分层损伤复合材料悬臂梁进行振动试验,验证了程序系统的有效性和可靠性。传递函数分析流程如图 2 所示。

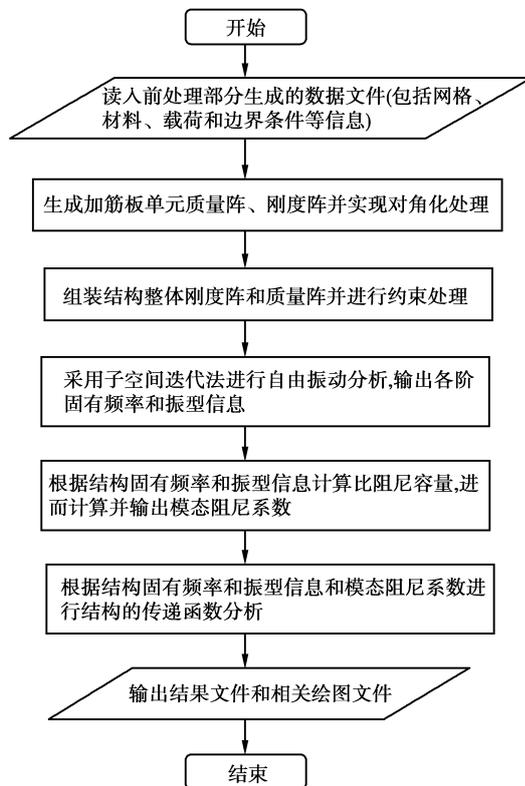


图 2 传递函数计算流程图

5 数值算例

设加筋方板的板长为 $L = 300 \text{ mm}$,在板的一侧对称布置 2 条加强筋,筋宽 $t_s = 5 \text{ mm}$ 。层合板和加强筋的铺设方式分别为 $[0/90/90/0]_{2S}$ 和 0_{40} 。边界条件为四边简支。层合板与加强筋的单层材料参数均为: $E_1 = 135.0 \text{ GPa}$, $E_2 = 8.80 \text{ GPa}$, $G_{12} = G_{23} = G_{13} = 4.47 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = 0.33$, $\rho = 1380 \text{ kg/m}^3$, $\Psi_1 =$

0.43% , $\Psi_2 = 3.86\%$, $\Psi_4 = \Psi_5 = \Psi_6 = 5.72\%$, 单层厚度均为 0.125 mm 。

5.1 板内嵌入分层损伤加筋板的传递函数

5.1.1 分层面积的影响

两筋间距为 100 mm 的加筋板基板中心有一圆形嵌入分层损伤,分层位于第 8、9 层之间,即上子板厚度/板厚为 $h/H = 1/2$ 。在圆形分层半径 R 分别为 20 mm 、 30 mm 和 40 mm 3 种情况下,在加筋板的上子板中心施加单位正弦激励时,加筋板上、下子板中心点的幅频响应曲线如图 3 所示。因复合材料结构的频响函数,其最大值和最小值之比很大,在线性坐标系内小值的精度难以保证,故在处理数据时对频响函数的幅值时采用幅值/板厚,即 W/H 再取对数表示,则无论大值或小值均可获得较好的精度。通过对比图 3 的加筋板基板圆形嵌入分层上、下子板中点的频响函数曲线发现,当基板分层损伤半径逐渐增大时,频响函数共振峰值对应的各阶固有频率值均随之降低。

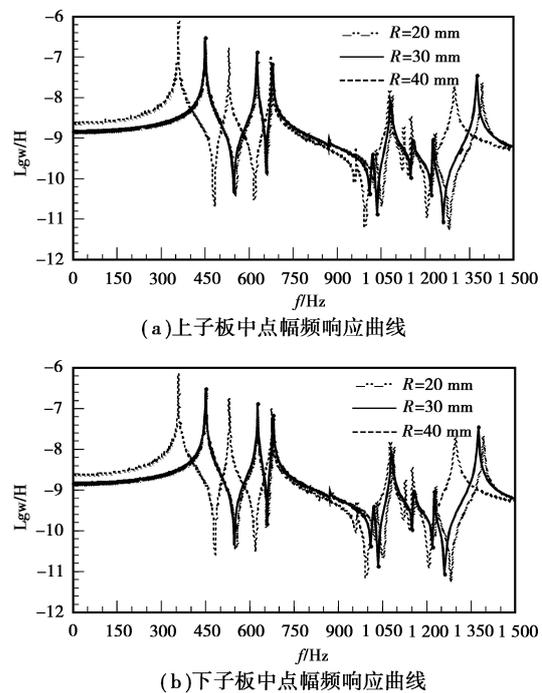


图 3 不同分层面积加筋板上下子板中点幅频曲线($h/H = 1/2$)

5.1.2 有无加筋情况下含分层损伤层合板传递函数的比较

图 4(a) 和 (b) 分别给出了面内嵌入圆形分层半径 $R = 20 \text{ mm}$, 分层深度 $h/H = 1/2$ 时,无筋板和加筋板的传递函数曲线。通过对比 4(a) 和 4(b),从幅频响应曲线看出,无筋板振动的共振响应的幅值较大,而加筋后出现共振峰时响应幅值较小,加筋后层合板的各阶固有频率也大幅度增加,这是由于

加筋后筋提高了结构的刚度,从而在一定程度上抑制了损伤对结构整体力学性能的影响;从相频曲线上看,当激励与结构的共振频率相遇时,相频特性的相位角就会发生变化,无筋板和加筋板相位角的变化也有所不同。

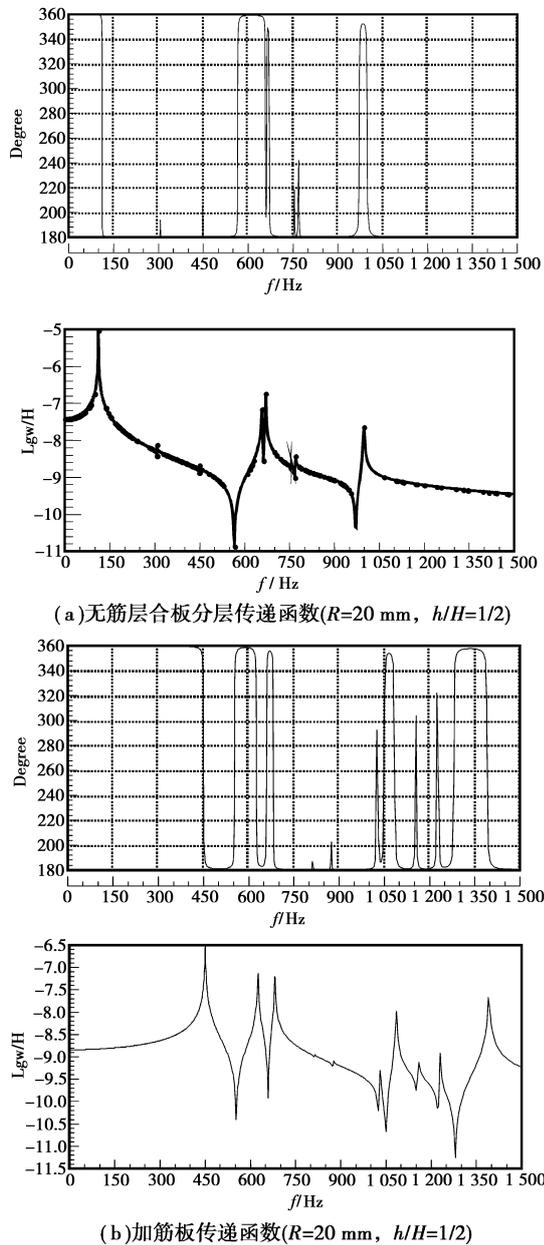


图4 加筋对嵌入分层损伤层合板传递函数的影响

5.2 筋板脱层损伤加筋板的传递函数

两筋间距仍取为 100 mm,当筋板脱层长度 l 分别为 0、50、150、250 mm 时加筋板的幅频曲线如图 5 所示。通过比较图 5 曲线,当筋板脱层长度增加较大时,其共振响应幅值变大,且共振峰值出现时,因刚度退化造成相应的固有频率值趋于减小,可见筋与板脱粘损伤将会造成结构力学性能的大幅度劣化,对于实际结构应予以及时检测和修复。

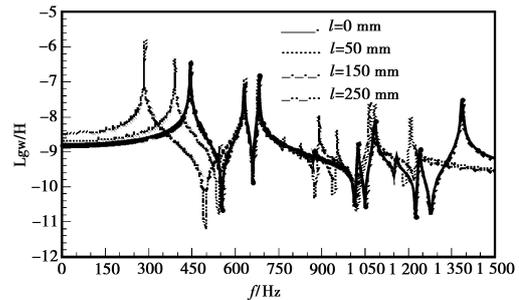


图5 筋与板间不同脱粘长度的加筋板频响函数

6 结论

1)筋和板的脱层、基板的分层损伤均改变了幅频响应函数峰值出现的位置,共振峰值增大,而对应的各阶固有频率降低,但两种损伤对频响函数的影响程度不同,筋和板的脱层对加筋板的固有频率影响较显著;

2)当损伤尺度增大时,通过对比完善板的传递函数曲线可以发现:损伤扩大时其幅频响应峰值对应的各阶固有频率均向左移动,频率降低,通过对比传递函数确定结构是否存在损伤,为复合材料结构损伤的故障诊断提供依据。

参考文献:

- [1] LUO H, HANAGUD S. Dynamics of delaminated beam[J]. Int J Solids Struct, 2000, 37(10): 1501-1519.
- [2] LEE J. Free vibration analysis of delaminated composite beams[J]. Comput Struct, 2000, 74(2): 121-129.
- [3] RAO MK, DESAI YM, CHITNIS MR. Free vibrations of laminated beams using mixed theory[J]. Compos Struct, 2001, 52(2): 149-160.
- [4] WANG I, TONG L. A study of the vibration of delaminated beams using a nonlinear anti-interpenetration constraint model[J]. Compos Struct, 2002(57): 483-488.
- [5] KIM T W, KIM J H. Nonlinear vibration of viscoelastic laminated composite plates[J]. J Solids Struct, 2002, 39(10): 2857-2870.
- [6] 陈浩然, 刘远东. 动荷载作用下含损伤复合材料层合板承载能力[J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 115-119. CHEN HAO-RAN, LIU YUAN-DONG. Loaded capability of delaminated composite plates under dynamic loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(3): 115-119.
- [7] 白瑞祥, 陈浩然, 刘远东. 含分层损伤复合材料加筋层合板屈曲和后屈曲性态研究[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(3): 274-280. BAI RUI-XIANG, CHEN HAO-RAN, LIU YUAN-DONG. Study of buckling and postbuckling behavior of stiffened laminated plates with a delamination damage[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(3): 274-280.
- [8] R D ADAMS, D. GC. Bacon. Effect fiber-orientation and laminate geometry on properties of CFRP[J]. Composite Materials, 1973(7): 402.

(编辑 陈移峰)