复合材料学报 第22卷 第6期 12月 2005年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 22 No. 6 December 2005

文章编号: 1000-3851 (2005) 06-0150-06

基于频率和阻尼分析的含分层损伤复合材料层合板的损伤诊断

庄小燕, 陈浩然*
(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

摘 要: 提出了一种基于动力有限元分析和神经网络相结合的含分层损伤层合板的诊断方法。采用作者发展的含分层损伤层合板的动力有限元分析模型和方法, 计算了具有不同分层长度损伤层合板的频率和模态阻尼值, 以此建立样本库。应用反向传播BP神经网络训练和形成网络。典型含层间分层损伤层合板的仿真结果表明, 采用对损伤变化较为灵敏的高阶模态阻尼作为网络的输入参数进行分层损伤诊断比常用的模态频率更为合理。本文中提出的是一种用于层合板的分层损伤诊断的有效和经济的方法。

关键词: 分层损伤诊断; 非线性动力有限元法; 神经网络; 复合材料层合板
中图分类号: TP277; TB330.1 **文献标识码**: A

DELAMINATION DETECTION BY USING FREQUENCY AND DAMPING ANALYSIS IN CONJUNCTION WITH NEURAL NETWORKS

ZHUANG Xiaoyan, CHEN Haoran*
(State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Based on the dynamic finite element method in conjunction of neural networks, a strategy for detecting delamination of composite laminates was proposed. To establish the data-base for neural networks, a nonlinear dynamic finite element method, developed by the authors, was used to calculate the values of natural frequencies and mode damping of the delaminated composite plates, while a back propagation (BP) neural network was employed for training and testing the network. The typical simulating results show that the high order mode damping is better than frequencies as an input parameter for detecting delamination damage, because the former is more sensitive to the extent of delamination. The present strategy is an effective and low cost method for detecting delamination of the composite laminates.

Keywords: delamination detection; nonlinear dynamic finite element analysis; neural networks; composite laminates

先进复合材料和结构的基础及其应用领域的研究是当今材料学界、力学界和工程界研究的热点, 也是高新技术研究领域的重要分支。复合材料由于特殊的结构和性能, 其结构构件在制作成型、加工、运输或维修过程中, 若受到外来物的冲击, 在其内部会出现各种缺陷和损伤, 包括大范围的基体开裂、分层、少量纤维断裂以及纤维与基体间界面脱粘等。其中分层损伤将会导致结构抗压缩和剪切承载能力的较大幅度降低, 因此复合材料层合结构损伤的早期诊断是一项具有重要工程价值的研究工作, 目前国内外许多研究工作者已取得了很多有价值的研究成果[1]。基于测定损伤后复合材料层合结构的动力特性的变异以识别其损伤程度和位置是国内外研究工作者经常采用的方法[2]。人工神经网络是在现代神经科学研究成果基础上提出来的一种科学理论和技术, 其作为一种优秀的非参数化诊断方法在结构损伤诊断领域具有极大的应用前景。如果通过试验或理论计算得到损伤后层合结构的动力特

收稿日期: 2005-01-24; **收修改稿日期**: 2005-04-25
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10272025)
通讯作者: 陈浩然, 教授, 博导, 研究方向为复合材料结构力学 会员证号 E63040001GJ E-mail: chenhr@dlut.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性变异的相关数据，作为人工神经网络的训练样本，则人工神经网络就可以通过自学习获得正确的数学模型，模型可用来实现结构的在线故障检测。神经网络输入参数的选择对于网络训练能够达到的精度至关重要。Thyagarajan 以频率作为网络的输入参数对复合材料层合结构损伤进行早期诊断[3]。燕瑛等根据实验所得的缝合复合材料的性能参数，训练神经网络，建立了预测缝合复合材料刚度和强度性能的模型[4]。华宏星等通过一个反向传播神经网络，利用正交各向异性板的动态特性识别复合材料板的刚度[5]。本文中采用作者提出的含层间分层损伤层合板的非线性动力有限元法，讨论了分层损伤程度和位置对该层合板结构的固有频率以及模态阻尼产生的影响，并形成样本库，然后应用 MATLAB 的神经网络工具箱建立了人工神经网络，并用含层间分层损伤层合板的典型算例对本文中提出的方法诊断误差进行了讨论。

1 含层间分层破坏复合材料层合板的动力响应有限元分析

为了描述方便起见，采用如图 1 所示的含一层间贯穿分层层合板。该板可划分为三个区域：处于分层面下子板区、上子板区和两端无分层的基板区，其分别以 1、2 和 3 表示。

根据 Mindlin 板理论，该层合板的上、下子板和基板内任意点的位移场均可表示为

$$u = u_0 + z\theta_y,\ v = v_0 - z\theta_x,\ w = w_0 \qquad (1)$$

其中：u_0、v_0 和 w_0 分别表示所在板中面 x、y 和 z 轴方向位移；θ_x 和 θ_y 分别表示所在板中面绕 x 和 y 轴方向转角。

在分层和无分层区域交界面上，沿上、下子板

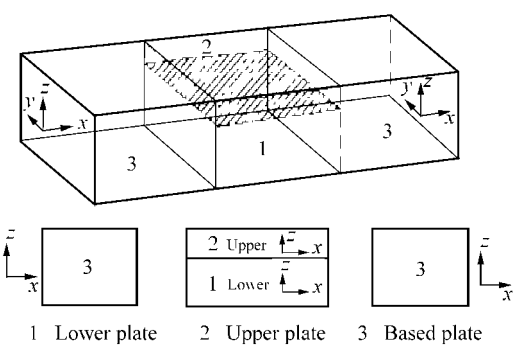

图 1 含贯穿分层的复合材料层合板示意图

Fig. 1 Schematic of the laminate with a through-width delamination

板与基板的公共围线上各点应满足几何协调条件[6]：

$$u_1 = u_3 + \theta_{y3}(h - h_l)/2,\ u_2 = u_3 - \theta_{y3}(h - h_u)/2,$$
$$v_1 = v_3 - \theta_{x3}(h - h_l)/2,\ v_2 = v_3 + \theta_{x3}(h - h_u)/2,$$
$$w_1 = w_3,\ w_2 = w_3,\ \theta_{x1} = \theta_{x3},$$
$$\theta_{x2} = \theta_{x3},\ \theta_{y1} = \theta_{y3},\ \theta_{y2} = \theta_{y3} \qquad (2)$$

其中 h、h_u 和 h_l 分别为基板、上子板和下子板的厚度。

1.1 模态频率分析

根据结构振动理论，一般来说，在进行结构自由振动分析时可假设忽略阻尼的影响，应用 Hamilton 原理，可得到结构的自由振动有限元分析方程

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \qquad (3)$$

其中：$\{x\}$ 是结构系统节点总位移向量；$[K]$ 和 $[M]$ 分别为系统的刚度阵和总质量阵，其表达式分别为

$$[K] = \sum_{i=1}^{m}\iint_{\Omega}[B]_i^{\mathrm{T}}[\overline{D}]_i[B]_i|J|\,\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta,$$

$$[M] = \sum_{i=1}^{m}\iint_{\Omega}[N]_i^{\mathrm{T}}[\overline{\rho}]_i[N]_i|J|\,\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta.$$

式中，B、$\overline{D}$、$\overline{\rho}$ 和 N 分别为应变-节点位移阵、弹性阵、质量阵和形函数阵。在构造有限元时，作者采用了分项 Serendipity 插值方法，满足了未知位移场 C^0 阶连续要求。同时，为了避免剪切闭锁现象，在上述刚度阵的数值积分运算中，还采用了选择积分法。

含分层损伤层合板的自由振动分析是一个特征值求解问题，可采用子空间方法得到该结构相应的固有频率 ω_i 和振型 $\{\Phi\}_i$。在分析中发现，所得到该板的各阶模态中将会出现上、下子板嵌入的模态现象。实际结构中，这种彼此嵌入的振动模式是不可能出现的，故本文作者提出了一种层间虚拟约束模型以避免分析时出现的这种虚假模态[7]。

1.2 模态阻尼分析

1.2.1 单层板和层合板的振动比阻尼容量

纤维增强树脂基复合材料的粘弹性特征，可以以其在交变荷载作用下的能量耗散来表征。而复合材料层合板振动比阻尼容量可作为其层合结构动力行为中能量耗散的一种度量。根据材料和结构比阻尼容量(SDC)定义

$$\Phi = \frac{\Delta U}{U} \qquad (4)$$

式中：ΔU 表示一个交变应力周期内材料和结构的耗散能量；U 表示一个交变应力周期内材料和结构的最大应变能量。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于 Adams 和 Bacon 提出的纤维复合材料层合板阻尼单元模型，其单层板单位面积的耗散能可以表示各个单个方向的耗散能之和[8]，即

$$\delta(\Delta U) = \delta(\Delta U_1) + \delta(\Delta U_2) + \delta(\Delta U_4) + \delta(\Delta U_5) + \delta(\Delta U_6) \tag{5}$$

应用比阻尼容量定义，式(5)可改写为

$$\delta(\Delta U_i) = \frac{1}{2}\phi_i \varepsilon_i \sigma_i \delta z, \quad (i = 1,2,4,5,6) \tag{6}$$

则层合板单位面积的总耗散能可以用所组成的单层板单位面积耗散能表示

$$\Delta U = \sum_{k=1}^{n} \Delta U_k = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{2} \int_{z_{k-1}}^{z_k} \{\varepsilon_k\}^{\mathrm{T}} [\phi] \{\sigma_k\} \mathrm{d}z \tag{7}$$

其中 n 为层合板层数 。

1.2.2　层合板振动模态阻尼[9]

由于结构系统各振动模态之间的正交性，解耦的模态阻尼可以用相应模态下结构比阻尼容量 ψ_i 表征。根据比阻尼容量的定义，在一个变形周期内，比阻尼容量 ψ_i 为结构响应模态的整体变形能 U_i 与整体变形的耗散能 ΔU_i 之比。根据复合材料层合板结构动力学理论，由单层板比阻尼容量 $\{\phi_1, \phi_2, \phi_4, \phi_5, \phi_6\}$ 和结构系统在第 i 解固有模态振动时的固有振型 $\{\phi_i\}$，便可确定相应模态下的结构比阻尼容量 ψ_i 值

$$\psi_i = \frac{\Delta U}{U} = \frac{\sum_{e=1}^{m} \int_{v_e} \{\phi_i\}^{\mathrm{T}} [K_{\mathrm{d}}^e] \{\phi_i\} \mathrm{d}v_e}{\sum_{e=1}^{m} \int_{v_e} \{\phi_i\}^{\mathrm{T}} [K^e] \{\phi_i\} \mathrm{d}v_e} \tag{8}$$

式中：$[K^e]$ 和 $[K_{\mathrm{d}}^e]$ 分别为结构单元刚度阵和单元耗散刚度阵板单元耗散能；e 表示单元号；m 为层合板单元总数。而

$$[K^e] = \int_v [B]^{\mathrm{T}} [\overline{D}] [B] \mathrm{d}v$$

$$[K_{\mathrm{d}}^e] = \int_v [B]^{\mathrm{T}} [\overline{D}^{\mathrm{d}}] [B] \mathrm{d}v$$

$$[\overline{D}^{\mathrm{d}}] = [\phi] [\overline{D}]$$

式中，$[B]$ 和 $[\overline{D}]$ 分别为广义应变节点-位移阵和广义弹性阵。结构系统在第 i 阶固有模态振动时比阻尼容量 ψ_i 与结构振动模态阻尼系数 ξ_i 之间存在如下的关系

$$\psi_i = 4\pi\xi_i \tag{9}$$

1.3　程序的试验值验证

设一 $[0°/90°/0°/90°]_S$ 铺设 GI/EP 完善方板，其单边长度为 0.27 m，厚 0.00205 m。材料参数为：$E_1 = 37.78$ GPa，$E_2 = 10.9$ GPa，$G_{12} = G_{13} = G_{23} = 4.91$ GPa，$\nu_{12} = 0.3$，$\nu_{23} = 0.3$，$\rho = 1813.9$ kg/m^3，$\phi_1 = 0.87\%$，$\phi_2 = 5.05\%$ 和 $\phi_4 = \phi_5 = \phi_6 = 6.91\%$。表 1 给出了该板前六阶模态频率和比阻尼容量(SDC)的本文理论值和 Koo 等在文献[10]中给出的试验值的比较。由表 1 可以看出，所提出的复合材料层合板动力分析有限元方法和程序是可靠的。

表 1　完善板的自然频率和 SDC 值的试验值和程序计算值比较

Table 1　Natural frequencies and specific damping capacity (SDC) of perfect composite laminates

Mode	Natural frequencies/ Hz		Specific damping capacity (SDC)/ %	
	Experiment[10]	Present	Experiment[10]	Present
1	62.2	68.7	6.70	6.67
2	131.4	131.5	2.80	2.57
3	159.2	165.7	1.90	1.38
4	180.5	191.1	4.90	4.65
5	200.1	213.3	3.20	3.57
6	326.7	349.1	5.80	4.76

2　用于损伤诊断的 BP 神经网络

BP 神经网络(Back propagation NN)是当前工程应用最为广泛的一种神经网络。它的最大特点是仅仅借助样本数据，无需建立系统的数学模型就可对系统实现由 R_n 空间(n 为输入节点数)到 R_m 空间(m 为输出节点数)高度的非线性映射，而且，这种映射结果的精度一般可由足够的训练样本(试验或理论样本)来保证。BP 网络可以看成是一种输入到输出的高度非线性映射，其分析过程大致可分为以下三部分[11]：

(1)　网络的初始化

选定一个非线性的光滑活化函数 $g: R^1 \to R^1$，并按稍后给出的规则确定了权矩阵隐含层到输出层权值 $W = \{W_{mp}\}_{1 \le m \le M, 1 \le p \le P}$ 和输入层到隐含层权值 $w = \{w_{pn}\}_{1 \le p \le P, 1 \le n \le N}$ 之后，对任意输入信息向量 $\xi = (\xi_1, \cdots, \xi_N)^{\mathrm{T}} \in R^N$，网络的实际输出为

$$\zeta_m = g(W_m \tau) = g\left(\sum_{p=1}^{P} W_{mp} \tau_p\right), \quad m = 1, \cdots, M \tag{10}$$

其中隐含层输出为

$$\tau_p = g(w_p \xi) = g\left(\sum_{p=1}^{P} w_{pn} \xi_p\right), \quad p = 1, \cdots, P \tag{11}$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　单层材料性能

Table 2　Mechanical properties of T300/ QY8911

E_1/ GPa	E_2/ GPa	G_{12}/ GPa	ν_1	ρ (kg · m^{-3})	Φ_1/ %	Φ_2/ %	$\Phi_4 = \Phi_5 = \Phi_6$/ %
135.0	8.80	4.47	0.33	1380.0	0.43	3.8	5.72

(2) 实际输出与理想输出之间的误差值

假设给定一组样本输入向量$\{\bar{\xi}^j\}_{j=1}^J \subset R^N$ 以及相应的理想输出$\{O^j\}_{j=1}^J \subset R^M$，并记$\{\bar{\zeta}^j\}_{j=1}^J \subset R^M$为相应的网络实际输出，定义误差函数

$$E(W,w) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{J}\|O^j - \bar{\zeta}^j\|^2 = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M}\left\{O_m^j - g\left[\sum_{p=1}^{P}W_{mp}\, g\left(\sum_{n=1}^{N}w_{pn}\bar{\xi}_n^j\right)\right]\right\}^2 \tag{12}$$

(3) 按一定的规则由后向前逐层修改权值，直至误差达到要求

权值矩阵 W 和 w 的确定(即学习过程)应使误差函数达到极小，为此，一个简单而又常用的方法是梯度下降法。取当前权值 W_{mp}的改变量为

$$\Delta W_{mp} = -\eta\frac{\partial E}{\partial W_{mp}} = \eta\sum_{j=1}^{J}(O_m^j - \bar{\zeta}_m^j)\, g'(H_m^j)\,\tau_p^j = \eta\sum_{j=1}^{J}\Delta_m^j\tau_p^j \tag{13}$$

其中：$\eta > 0$ 为学习速率；$\Delta_m^j = (O_m^j - \bar{\zeta}_m^j)\, g'(H_m^j)$；$H_m^j$ 是隐含层单元对第 m 个输出层单元的线性输入

$$H_m^j = \sum_{p=1}^{P}W_{mp}\tau_p^j$$

进一步，可以得到当前权值的 w_{pn}改变量为

$$\Delta w_{pn} = -\eta\frac{\partial E}{\partial w_{pn}} = -\eta\sum_{j=1}^{J}\frac{\partial E}{\partial \tau_p^j}\frac{\partial \tau_p^j}{\partial w_{pn}} = \eta\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M}(O_m^j - \bar{\zeta}_m^j)\, g'(H_m^j)\, W_{mp}\, g'(h_p^j)\,\bar{\xi}_n^j = \eta\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M}\Delta_m^j W_{mp}\, g'(h_p^j)\,\bar{\xi}_n^j = \eta\sum_{j=1}^{J}\delta_p\bar{\xi}_n^j$$

其中：

$$h_p^j = \sum_{n=1}^{N}w_{pn}\bar{\xi}_n^j;\quad \delta_p = g'(h_p^j)\sum_{m=1}^{M}\Delta_m^j W_{mp}.$$

3　算例讨论

设一 T300/ QY8911 材料组成的 [0°/90°/90°/0°]$_S$ 层合板，其边界条件为一边固支、三边自由，长、宽和厚度分别为 0.2 m、0.025 m 和 0.002 m，在其跨中具有一穿透分层，层合板单层材料性能如表 2 所示[12]。

采用前面给出的复合材料层合结构的动力响应有限元分析方法，可通过计算分别得到无损伤和具有不同分层长度情况下的悬臂层合板的前五阶固有频率和模态阻尼值，其结果如表 3、图 2 所示。

表 3　无损伤情况下的悬臂层板的前五阶固有频率和模态阻尼

Table 3　The values of natural frequency and modal damping for the first five modes

Mode	Mode damping	Natural frequencies/ Hz
1	0.000465	62.8
2	0.003972	379.7
3	0.000682	393.3
4	0.000929	687.3
5	0.000560	1092.8

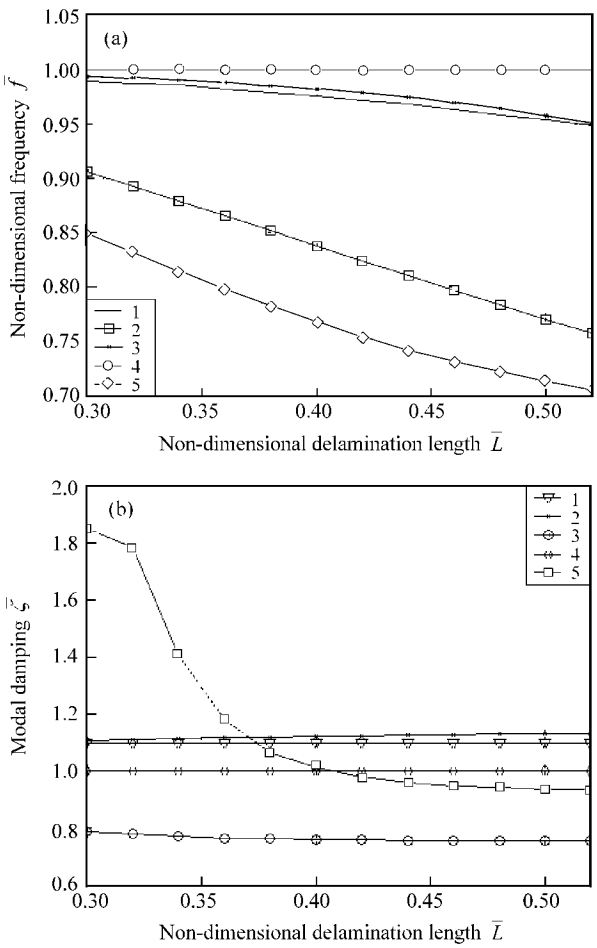

图 2　前五阶无量纲频率和无量纲模态阻尼随无量纲分层长度变化

Fig. 2　Variations of the non-dimensional frequency and modal damping value for the first five modes with non-dimensional delamination lengths of the laminates

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

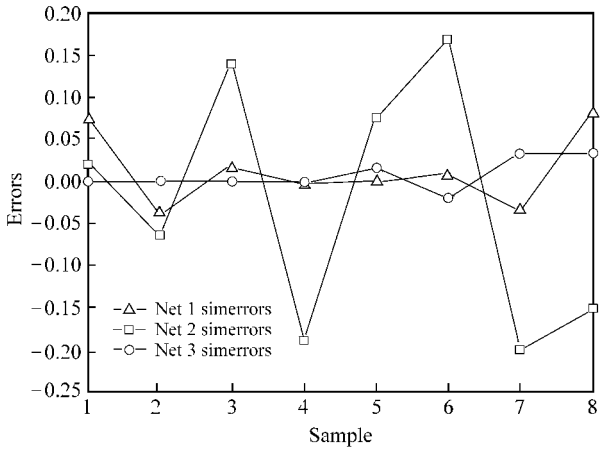

图 3　采用不同的输入参数形成的网络所对应的仿真误差值的比较

Fig. 3　Comparisons of the simulation error values forming nets with different input parameters

为了提高神经网络的训练效率，需要对“输入-目标”样本集数据作必要的预处理[11]，使样本数据值尽量落入一个比较小的区间，因此对图中坐标进行了无量纲化处理，其中图 2 横轴 $\bar{L}$ 为无量纲长度(分层长度和板总长度之比)，而纵轴 $\bar{f}$ 和 $\bar{\xi}$ 分别为无量纲频率与其阻尼值(含分层与无分层板所对应值之比)。

由图 2 可知，含分层板的模态频率低于无损伤板的固有频率，且随着分层长度的增加，其频率逐渐减小，其中高阶模态时下降的程度尤为明显；但是，含分层板的阻尼值在低阶模态时随着分层长度的改变出现了增加或减小的趋势。在高阶模态时，阻尼对分层长度的敏感度大大升高，而且明显高于对频率的敏感度。

本文中应用了三层 BP 网络，其中前两层采用 Sigmoid 激活函数，而最后一层应用纯线性传递函数 ——Purelin 激活函数；分别以前五阶频率，前五阶模态阻尼，以及单独以第五阶模态阻尼作为网络输入参数，通过训练及仿真使其误差最小，最终得到了三个优化网络。图 3 给出了这三个网络的仿真误差比较，其中 Net1、Net2 和 Net3 分别为用前 5 阶模态频率的归一化处理、用前 5 阶模态阻尼的归一化处理和单独用第 5 阶模态阻尼的归一化处理值生成的网络的仿真误差值。

由图 3 可以看出，由前 5 阶模态频率生成的网络可保证其绝大部分的仿真误差都能在 ±0.05 之间，但其较少部分的仿真误差还较大；由前 5 阶模态阻尼生成的网络仿真误差都较大，其主要原因是低阶频率段阻尼值的敏感度太低；单独由第 5 阶模态阻尼形成的网络，其仿真误差值全部落在 ±0.05 区间之内，这表明采用对损伤变化较为灵敏的高阶模态阻尼作为网络的输入参数进行分层损伤诊断将更为合理，输入参数的选择将直接影响工程或材料结构损伤识别的精度和准确性。

4　结　论

用基于实验验证的动力有限元法和神经网络相结合的技术对复合材料层合结构的损伤检测研究进行了一些初步的探索性工作。从本文中的研究结果可得到如下结论：

(1) 采用基于经少量实验验证的复合材料动力有限元分析方法，通过大量的数值计算可获得用于神经网络训练所需要的足够的样本。由于该方法可取代大量的昂贵的试验工作，有效地降低了形成样本库的成本，是一种较为经济的获得神经网络样本的手段。

(2) 采用复合材料层合结构的频率和比阻尼容量作为神经网络的输入参数的方法，有助于检测含穿透分层的层合板的分层长度和位置。其中采用对损伤变化较为灵敏的高阶模态阻尼作为网络的输入参数进行分层损伤诊断比常用的模态频率更合理。

参考文献：

[1]　Elder David J, Thomson Rodney S, Nguyen Minh Q, *et al*. Review of delamination predictive methods for low speed impact of composite laminates [J]. *Composite Structures*, 2004, 66: 677 - 683.

[2]　Yam L H, Yan Y J, Jiang J S. Vibration-based damage detection for composite structures using wavelet transform and neural network identification [J]. *Composite Structures*, 2003, 60: 403 - 412.

[3]　Thyagarajan S K, Schulz M J, Pai P F, *et al*. Detecting structural damage using frequency functions [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 210(1): 162 - 170.

[4]　燕　瑛, 刘兵山, 黄　聪, 成传贤. 缝合复合材料面内刚度和强度的神经网络预测[J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 179 - 183.
Yan Y, Liu B S, Huang C, Cheng C X. Neural network predicting of stiffness and strength in plane of stitched composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(6): 179 - 183

[5]　华宏星, 陈小琳, 石银明. 运用神经网络识别复合材料板刚度[J]. 复合材料学报, 2000, 17(1): 108 - 110.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Hua H X, Chen X L, Shi Y M. Composite plates stiffness identification using neural network [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2000, 17(1): 108 - 110.

[6] Chen H R, Hong M, Liu Y D. Dynamic behavior of delaminated plates considering progressive failure process [J]. *Composite Structure*, 2004, 66: 459 - 466.

[7] Hong M, Chen H R. Frequency response functions analysis of composite laminated plate with delamination [J]. *J of Ship Mechanics*, 2002, 6(3): 83 - 93.

[8] Ni R G, Adams R D. The damping and dynamic moduli of symmetric laminated composite beams —Theoretical and experimental results [J]. *Journal of Composite Materials*, 1984, 18(3): 104 - 121.

[9] Hong M, Chen H R. Vibration frequency, mode and damping behavior of laminated composite plates with delamination [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 1999, 3(6): 36 - 47

[10] Koo K N, Lee I. Vibration and damping analysis of composite laminates using shear deformable finite element [J]. *AIAA Journal*, 1993, 31(4): 728 - 723.

[11] 许 东，吴 铮. 基于 Matlab 6. X 的系统分析与设计 —— 神经网络[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2002.

[12] 庄小燕，陈浩然. 基于动力有限元分析和神经网络技术的含分层复合材料层合板的损伤诊断 [J]. 玻璃钢/复合材料，2004(5): 3 - 6.

Zhuang X Y, Chen H R. Delamination detection in composite laminates using dynamic finite element analysis and neural networks [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2004 (5): 3 - 6.

(上接 129 页)

KEYWORDS FOR COMPOSITES

computational modelling
damage mechanics
finite element analysis(FEA)
laminate mechanics
micro-mechanics
numerical analysis
statistical properties/methods

D: TESTING

acoustic emission
chemical analysis
electron microscopy
fractography
mechanical testing
non-destructive testing
optical microscopy
physical methods of analysis
process monitoring
radiography
surface analysis
thermal analysis
ultrasonics

E: MANUFACTURING/PROCESSING

assembly
autoclave
automation
braiding
casting
chemical vapour deposition (CVD)
compression moulding
consolidation
cure
cutting
extrusion
fibre conversion processes
filament winding
forging
forming
heat treatment
injection moulding
isostatic processing
joints/joining
knitting
lay-up (manual/automated)
liquid metal infiltration
machining
melt-spinning
moulding compounds
powder processing
preform
prepreg
pultrusion
recycling
resin film infiltration (RFI)
resin flow
resin transfer moulding (RTM)
sintering
slip casting
stitching
surface treatments
tape
thermal analysis
thermoplastic resin
thermosetting resin
tooling
tow
weaving

(from *Composites Part A*)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net