DOI: 10.3901/JME.2019.18.008

基于激光扫描法的纤维增强复合薄板 损伤定位研究*

李 晖 常永乐 张体南 徐忠浩 闻邦椿
(东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110004)

摘要: 采用激光扫描法研究了纤维增强复合薄板的损伤定位问题。建立复合薄板激光扫描线框模型,在明确振型数据提取原理的基础上,提出二维五点三次曲面平滑法,并推导获得用于损伤定位检测的量化指标-损伤位置指数。编写 Matlab 计算程序,并给出基于激光扫描法进行损伤定位的具体流程。搭建激光扫描振动测试系统,并以带有纤维断裂损伤的 TC300 碳纤维/树脂复合薄板为研究对象,进行实际测试。试验结果表明,利用上述方法可以准确检测出复合薄板的损伤位置,该方法及相关试验系统可以为复合材料结构的损伤检测及识别提供一种新思路。

关键词: 纤维增强复合薄板; 二维五点三次曲面平滑法; 损伤定位; 激光扫描法; 试验研究

中图分类号: TB535

Study on Damage Location Detection of Fiber-reinforced Composite Thin Plate Based on Laser Linear Scanning Method

LI Hui CHANG Yongle ZHANG Tinan XU Zhonghao WEN Bangchun
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract: This research studies damage location detection of fiber-reinforced composite thin plate based on laser scanning method. The laser scanning frame model of the composite plate is established, and when the extraction principle of modal shape data is illustrated, two-dimensional five-spot-tripling surface smoothing method is proposed, so that a quantitative index for damage location detection of fiber-reinforced composite thin plate, i.e., the damage location index can be derived. The Matlab calculation program is written, and the specific damage location detection procedures of composite plate based on laser scanning method are also proposed. T300 fiber/epoxy composite plate is taken as a study object, and damage detection experiment is performed based on the established laser scanning vibration testing system. It has been proved that the above method can detect fiber breakage position of such composite plate with high accuracy, and this method and the related experimental system can provide a new idea for damage detection and identification of composite structures.

Key words: fiber-reinforced composite plate; two-dimensional five-spot-tripling surface smoothing method; damage location detection; laser linear scanning; experimental study

0 前言

纤维增强复合材料比强度高、比模量高、热稳定性好,还有一定的阻尼减振能力。目前,以 TC300、TC500 和 TC800 等为代表的先进碳纤维/树脂基复合材料正在被越来越多地应用于航空、航天、汽车

工业、船舶、体育器械与兵器工业等重要领域^[1-2]。由于长期服役在高温、高压、高速气体冲蚀、高幅振动等恶劣工况下,纤维增强复合材料及其薄壁构件容易产生纤维断裂、基体开裂、分层等缺陷。上述缺陷会严重影响复合结构的力学性能,有时甚至会导致一些灾难性的故障。

长期以来,人们在梁、板等金属及复合材料结构件的损伤定位方面开展了许多研究工作,并取得了阶段性的研究成果。早在 20 世纪 70 年代和 80 年代,国内外学者和研究人员就基于激光测振技术来研究损伤定位方法。目前,由于连续扫描激光测

* 国家自然科学基金(51505070)、中央高校基本科研业务费专项资金(N150304011, N160313002)和东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室研究基金(VCAME201603)资助项目。20180713 收到初稿,20190115 收到修改稿

振仪测试精度高、速度快、测试数据密集,因此被越来越多地用于损伤定位研究。例如, SUNDARESAN 等^[3]对带有加强筋的机翼板上的铆钉孔损伤进行了试验研究,通过连续扫描激光测振仪获得了振动响应信号,并通过振动变形形态方法来识别铆钉孔位置的损伤及其具体的裂纹位置。GHOSHAL 等^[4]对石墨环氧复合板的分层损伤进行了试验研究,采用压电陶瓷激励,并通过扫描激光测振仪获得了复合梁、板等结构的振动响应,进而采用振动变形形态方法来实现分层损伤相对于中面层的损伤位置的确定。CASTELLINI 等^[5]也使用压电陶瓷做激励信号,利用连续扫描激光测振仪对带有分层损伤的铝基纤维增强复合薄板进行损伤监测,并绘制了损伤检测图来对激光测损方法进行评估。试验表明,在激励频率较低时,检测图上的表面损伤缺陷特征更为明显,而在较高频率时,深层损伤缺陷具有更明显的特征。ROY 等^[6]应用连续扫描激光测振仪对带有分层损伤的纤维增强复合薄板进行损伤监测,提出了基于模态振型的损伤识定位方法,但需要分别测试获得健康复合薄板与损伤复合薄板的模态振型,并利用两者差值进行损伤定位。VANLANDUIT^[7]考虑了背景噪声和非线性失真对损伤检测的影响,提出了线性和非线性组合的方法,并利用连续激光扫描测振仪来获得模态振型数据。同时,采用了文献[8]中提出的共位模态置信准则来定位玻璃纤维/聚酯基复合薄板的分层损伤位置。冯侃等^[9]利用 YOON 等^[10]提出的二维间隔平滑法,对由冲击造成的碳纤维复合薄板中的层裂损伤进行定位。通过扫描式激光测振仪测得结构在不同固定频率下的结构的 ODS(Operational Deformation Shape, ODS)响应,最终准确检测出冲击损伤位置。

虽然广大学者和研究人员对梁、板等结构的损伤定位开展了一些研究,但绝大多数都是应用连续扫描激光测振仪来获取其模态振型。一方面,由于该仪器系统价格极其高昂,且主要被德国、日本等发达国家垄断生产,不利于普通科研工作者开展自主创新性研究;另一方面,也难以将损伤定位检测的研究成果(包括辨识程序和算法),与商用的激光扫描控制软件相互融合,进而形成具有自主知识产权的损伤检测识别系统。本文利用单点激光测振仪性价比良好、测量精度高的优势,采用激光扫描法研究了纤维增强复合薄板的损伤定位问题。首先,建立了复合薄板激光扫描线框模型,在明确了振型数据提取原理的基础上,提出了二维五点三次曲面平滑法,并推导出对纤维增强复合薄板进行损伤定位的量化指标-损伤位置指数。同时,自行开发了激

光扫描振动测试系统,并对带有纤维断裂损伤的 TC300 碳纤维/树脂复合薄板进行了损伤检测研究,最终验证了该损伤定位方法的正确性。

1 基于激光扫描法的复合薄板损伤定位原理

本节提出了基于激光扫描法,并对纤维增强复合薄板进行损伤定位的理论原理进行详细介绍。

1.1 基于激光扫描法获取复合薄板模态振型

图 1 给出了所建立的纤维增强复合薄板激光扫描线框模型,其主要通过利用单点激光测振仪,对复合薄板进行逐行扫描的方式而获得。假设 $O-xyz$ 为整体坐标系, x 轴位于结构的上表面,且纤维方向 x' 与整体坐标系 x 轴方向的夹角为 θ 。复合薄板的长度为 a ,宽度为 b ,厚度为 h ,密度为 ρ ,质量为 m_s 。

基于激光扫描法逐行扫描 线框模型
图 1 纤维增强复合薄板的激光扫描线框模型

假设激光测振仪发出的激光点可以进行直线扫描移动,且激光点的扫描路径沿 x 方向将纤维增强复合薄板划分为 $M_1, M_2, \dots, M_m$ 行,其中, m, n 分别为行扫描路径对应的最大行数和列数, x 方向和 y 方向测点数目分别为 K_n, K_m , i 和 j 分别为任一扫描测点 $A(i, j)$ 沿 x 和 y 方向的序列号。同时,假设每行和每列扫描时的间隔间距相等,可以用间隔距离 B_M 来表示。另外,假设在复合薄板某一固定参考位置 P 点上,布置了加速度传感器,其测试数据将会与激光扫描数据一并进行提取。

当进行逐行扫描时,沿 x 方向的每行,在线框模型所需加载的点数 K_n 可表示为

$$K_n = \frac{a + B_M}{B_M} \quad (1)$$

式中, a 是复合薄板的长度, B_M 是扫描时间间隔距离。则 y 方向的每列,在线框模型所需加载的点数 K_m 为

$$K_m = \frac{b + B_M}{B_M} \quad (2)$$

式中, b 是复合薄板的宽度, B_M 是扫描时间间隔距离。

假设激光以扫描速度 v_s 对复合薄板进行扫描,

当激光点扫描移动到测点 A 时, 激光测振仪获得的响应信号的时域波形为 $\dot{z}_{i,j}(t)$, 对 $\dot{z}_{i,j}(t)$ 进行 FFT 变换, 可以获得其频域响应为 $\dot{z}_{i,j}(\omega)$ 。同时, 对参考点 P 处的响应信号 $z_p(t)$ 进行 FFT 变换, 假设其频域响应为 $z_p(\omega)$, 然后, 定义两者的比值为传递率函数 $\gamma_{i,j}(\omega)$, 其表达式为

$$\gamma_{i,j}(\omega) = \frac{\dot{z}_{i,j}(\omega)}{z_p(\omega)} \quad i=1,2,\dots,K_n, j=1,2,\dots,K_m \quad (3)$$

式中, $\gamma_{i,j}(\omega)$ 表示了行扫描模式下, 通过激光测振仪获得的任意测点位置的传递率函数。

当以某一共振频率 ω_r 激励复合薄板时, 根据共振理论, 各阶模态不存在耦合时, 可将式(3)近似为

$$\gamma_{i,j}(\omega) \approx \frac{\phi_{(i,j)r}}{\phi_{pr}} = \bar{\phi}_{(i,j)r} \quad i=1,2,\dots,K_n, j=1,2,\dots,K_m \quad (4)$$

式中, $\phi_{(i,j)r}$ 和 ϕ_{pr} 是第 r 阶模态振型在任意扫描测点 $A(i,j)$ 和固定参考点 P 处的分量值。

但在工程实际上, 为了降低外界噪声对结果的影响, 传递率函数 $\gamma_{i,j}(\omega)$ 一般通过扫描测点响应和固定参考点响应的互功率谱 $G_{(i,j)P}(\omega)$ 除以固定参考点响应的自功率谱 $G_{pp}(\omega)$ 来获得, 即将式(4)写成

$$\gamma_{i,j}(\omega) = \frac{\dot{z}_{i,j}(\omega) z_p^*(\omega)}{z_p(\omega) z_p^*(\omega)} = \frac{G_{(i,j)P}(\omega)}{G_{pp}(\omega)} \quad i=1,2,\dots,K_n, j=1,2,\dots,K_m \quad (5)$$

式中, $G_{(i,j)P}(\omega)$ 是任意扫描测点 A 响应和固定参考点响应的互功率谱, $G_{pp}(\omega)$ 是固定参考点响应的自功率谱, $z^*(\omega)_p$ 是 $z(\omega)_p$ 的共轭值。

由于采用了同一参考点的振动响应作为参考信号, 所以传递率函数确保了不同响应测点相对于参考点的相位关系, 而且不同测量组工况的变化所带来的影响基本可以被消除掉。另外, 通过式(5)可以读取传递率函数 $\gamma_{i,j}$ 在固有频率 ω_r 处的幅值和相位 (当激励频率等于某阶固有频率 ω_r), 进而通过其幅值和相位来获得某一扫描测点对应振动大小和方向信息。需要说明的是, 由于篇幅问题, 可参考文献 [11], 明确提取不同激光扫描测点和参考点对应的时域数据的方法。一旦获得了上述数据, 就可通过频谱分析技术, 获得所关注的传递率函数。

1.2 复合薄板曲率振型的提取

首先, 将传递率函数 $\gamma_{i,j}$ 进行正则化处理, 可得

$$\varphi_{i,j}(\omega) = \gamma_{i,j}(\omega) \sqrt{K_m \cdot K_n / \sum_i \sum_j |\gamma_{i,j}(\omega)|^2} \quad (6)$$

式中, $\varphi_{i,j}(\omega)$ 是在任意测点 $A(i,j)$ 处正则化后的传

递率函数。

假如复合薄板是由均匀变化的纤维材料构成的, 其在某位置处的刚度改变越大, 即损伤程度越大时, 在该处的曲率奇异性就会越明显^[12]。因此, 可根据上述原理来实现损伤定位, 一般利用二维中心差分法, 来近似得到测点 $A(i,j)$ 处的曲率振型为

$$Z_{i,j}(\omega) = \left[\varphi_{i+1,j}(\omega) + \varphi_{i-1,j}(\omega) - 2\varphi_{i,j}(\omega) \right] / B_M^2 + \left[\varphi_{i,j+1}(\omega) + \varphi_{i,j-1}(\omega) - 2\varphi_{i,j}(\omega) \right] / B_M^2 \quad (7)$$

1.3 基于二维五点三次曲面平滑法的损伤位置确定

本节在五点三次平滑理论的基础上, 将其推广至二维, 称之为“二维五点三次曲面平滑法”, 其具有计算快、损伤定位准确等突出优点, 以下详细说明其定位原理。

首先, 设任一扫描测点 $A(i,j)$ 在 x 与 y 方向上坐标值为 x_i, y_j , 如图 2 所示, 并假设在 x 与 y 方向上任一等距测点为 $A_1, A_2, \dots, A_{25}$ (包括 A 点的总数为 25 个), 且每个测点的坐标值如图 2 所示。则根据五点三次运算原理, 任一扫描测点 $A(i,j)$ 对应的曲率振型可定义为

$$Z(\alpha, \beta) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 C_{i,j} \alpha^i \beta^j \quad (8)$$

式中, α, β 和 $C_{i,j}$ 分别为任一等距测点 A 相对于测点 $A(i,j)$ 进行五点三次运算时的相对位置系数及拟合系数。 α, β 可表示为

$$\alpha = \frac{x_A - x_A}{B_M} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{y_L - y_A}{B_M} \quad (10)$$

图 2 应用二维五点三次曲面平滑法时扫描测点及其等距测点

通过式(9)、(10)计算, 可知 $\alpha, \beta = -2, -1, 0, 1, 2$, 然后利用最小二乘法来确定二维五点三次运算时的拟合系数 $C_{i,j}$, 假定最小二乘函数 δ 如下

$$\delta = \sum_{\alpha=-2}^2 \sum_{\beta=-2}^2 \left[\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 C_{i,j} \alpha^i \beta^j - Z(\alpha, \beta) \right]^2 \quad (11)$$

为使 δ 达到最小, 将它分对 $C_{\tilde{i}, \tilde{j}}(\tilde{i}, \tilde{j} = 0, 1, 2, 3)$ 求偏导数, 并令其为 0, 可得方程组

$$\sum_{\alpha=-2}^2 \sum_{\beta=-2}^2 \alpha^{\tilde{i}} \beta^{\tilde{j}} \cdot Z(\alpha, \beta) = \sum_{\tilde{i}=0}^3 \sum_{\tilde{j}=0}^3 C_{\tilde{i}, \tilde{j}} \sum_{\alpha=-2}^2 \sum_{\beta=-2}^2 \alpha^{\tilde{i}+1} \beta^{\tilde{j}+1} \quad (12)$$

由此解出 $C_{\tilde{i}, \tilde{j}}(\tilde{i}, \tilde{j} = 0, 1, 2, 3)$, 并将其代入式(8), 可得二维五点三次平滑公式

$$\Gamma = \bar{Z}(\alpha, \beta) = \sum_{\tilde{i}=0}^3 \sum_{\tilde{j}=0}^3 C_{\tilde{i}, \tilde{j}}(\alpha)^{\tilde{i}} (\beta)^{\tilde{j}} \quad (13)$$

式中, $\bar{Z}(\alpha, \beta)$ 为 $Z(\alpha, \beta)$ 经过二维五点三次平滑运算后得到的平滑曲率振型。

最后, 可以利用式(13)对测点 $A(i, j)$ 处的曲率振型 $Z_{i,j}(\omega)$ 进行平滑处理。可分为下面几种处理方式: ① 在第一行 M_1 两端测点的曲率振型可分别用式(13)中的 $\Gamma = \bar{Z}(-2, -2)$, $\Gamma = \bar{Z}(-1, -2)$, $\Gamma = \bar{Z}(1, -2)$ 和 $\Gamma = \bar{Z}(2, -2)$ 进行平滑处理, 而其中间测点的曲率振型则用 $\Gamma = \bar{Z}(0, -2)$ 进行平滑处理; ② 在第二行 M_2 两端测点的曲率振型可以分别用式(13)中 $\Gamma = \bar{Z}(-2, -1)$, $\Gamma = \bar{Z}(-1, -1)$, $\Gamma = \bar{Z}(1, -1)$ 和 $\Gamma = \bar{Z}(2, -1)$ 进行平滑处理, 而其中间测点的曲率振型则用 $\Gamma = \bar{Z}(0, -1)$ 进行平滑处理; ③ 类似地, 由对称性可知复合薄板的倒数第一行 M_m 和倒数第二行 M_{m-1} 的曲率振型表达方式与前两行 M_1, M_2 相类似; ④ 同理可知, 第一, 二列以及倒数第一, 二列的曲率振型处理方式也与每行的处理方式类似; ⑤ 其余测点的曲率振型则都可用式(13)中 $\Gamma = \bar{Z}(0, 0)$ 进行平滑处理。如此, 便可利用上述曲率振型处理方式, 得到到任一扫描测点 $A(i, j)$ 处的平滑曲率振型 $\bar{Z}_{i,j}(\omega)$ 。

最后, 参考文献[13], 将利用二维五点三次曲面平滑法获得平滑曲率振型值与相同点的曲率振型值做差, 通过获取绝对值的方法, 便可得到损伤位置指数。

$$\delta_{i,j}(\omega) = |Z_{i,j}(\omega) - \bar{Z}_{i,j}(\omega)| \quad (14)$$

为了防止损伤位置可能位于复合薄板某阶模态振型节点附近, 而影响损伤定位的精度, 可分别对不同固有频率激励下的损伤位置指数 $\delta_{i,j}(\omega)$ 进行平均, 以提高损伤定位精度。则经过平均后的损伤位置指数 $\bar{\delta}_{i,j}(\omega)$ 可表示为

$$\bar{\delta}_{i,j}(\omega) = \frac{1}{\Pi} \sum_{\chi=\mu}^{\nu} |Z_{i,j}(\omega_{\chi}) - \bar{Z}_{i,j}(\omega_{\chi})| \quad (15)$$

式中, 而 μ 和 ν 分别为最低阶固有频率和和最高阶固有对应的阶次, Π 为平均处理时所利用的不同固有频率对应的相关阶次差值, $\Pi = |\mu - \nu| + 1$ 。

2 纤维增强复合薄板损伤定位检测流程

本文在第 1 节明确了基于激光扫描法对纤维增强复合薄板进行损伤定位的原理, 本节提出了损伤定位检测的具体流程, 可分为以下 6 个关键步骤。

(1) 精确测试损伤复合薄板的各阶固有频率。为了精确获得纤维增强损伤复合薄板的固有频率, 可首先通过锤击法模态试验, 采用单点激励单点响应的方式来初步获得其固有频率, 也可通过有限元分析获得所考虑频段内的固有频率及模态振型作为测试的参考。然后, 确定基础激励的扫描频段和扫描速度, 通过获取“时间-频率-响应峰值”的三维瀑布图来精确识别纤维增强损伤复合薄板的各阶固有频率。

(2) 激励复合薄板达到能量充足的共振状态, 进行激光扫描测试并采集响应信号。将激振设备的激振频率调整到纤维增强损伤复合薄板的某阶固有频率, 并对其进行定频定幅激励。为有效测试模态振型数据, 必须保证设定的激振力幅足够大, 以便可以有效激发出该阶次对应的共振模态。

(3) 基于相干函数判别共振响应数据的质量。由于共振响应信号测试质量对于损伤定位精度有着重要影响, 因此有必要利用相干函数来判别共振响应数据的质量。将纤维增强复合薄板上的各个响应点相对于参考点的相干函数表示为

$$\lambda_{(i,j)P}^2(\omega) = \frac{|G_{(i,j)P}(\omega)|^2}{G_{i,j}(\omega)G_P(\omega)} \quad i=1, 2, \dots, K_n, j=1, 2, \dots, K_m \quad (16)$$

式中, $\lambda \geq 0.85$, 则认为响应信号完全由激振设备发出的激励信号引起, 此时环境噪声的干扰非常小, 信号质量较高, 可进行后续的振型识别。

(4) 对共振响应信号进行加窗及滤波处理。为了减少频谱能量泄漏, 需要对共振响应信号进行加窗, 建议采用幅值识别精度较高的汉宁窗。另外, 为了剔除时域信号中的背景噪声成分, 可采用低通滤波器进行滤波处理。以获取复合薄板第 1 阶共振响应信号为例, 图 3 给出了为经过加窗及滤波处理后、后参考点和第 1 行激光扫描点对应的时域波形。

(5) 进行正则化处理, 并获得某阶曲率振型。首先, 在对某阶共振响应数据并进行加窗及滤波处理后, 将其代入式(5)中, 得到传递率函数 $\gamma_{i,j}$ 。然后, 通过式(6)将传递率函数 $\gamma_{i,j}$ 进行正则化处理, 化为量纲一的表达式, 成为纯量(正则化处理后的振型幅值, 只具有相对意义, 其绝对值没有意义)。接

图 3 第 1 阶共振状态下参考点和激光扫描点对应的时域波形

着, 将正则化后的振型幅值代入式(7), 并计算获得损伤复合薄板的某阶曲率振型。

(6) 确定复合薄板的损伤位置。重复步骤(1)到步骤(5), 可获得所关注的损伤复合薄板不同阶次对应的曲率振型。然后, 利用二维五点三次曲面平滑法, 获得每点对应的平滑曲率振型值, 并将上述参数代入到式(15), 得到平均后的损伤指标。最后, 根据纤维增强复合薄板的尺寸, 绘制出所需加载的激光扫描线框模型, 并将计算获得平均后的损伤位置指数加载到各扫描测点对应的坐标上, 便可实现损伤位置的确定。

3 实例研究

本节以带有纤维断裂损伤的 TC300 碳纤维/树脂基复合薄板为例, 对损伤位置进行研究。纤维增强复合薄板的实际模拟对象可以是不同尺寸的复合材料叶片, 在航空发动机中是一种通用的对象。图 4 给出了人为制造的裂纹(用锋利的小刀对复合薄板进行损伤破坏, 破坏深度约为复合薄板的厚度的 20%), 其裂纹长度为 70 mm, 且距离复合薄板的悬臂约束端为 160 mm, 具体位置参数如图 4 所示。该类型复合薄板为对称正交铺设, 即 $[-45/45]_s$, 共有 20 层, 每个铺层具有相同的厚度和纤维体积分数, 通过图 5 所示的夹具固定一边, 夹持长度为 30 mm,

图 4 带有纤维断裂损伤的复合薄板

用以模拟悬臂约束边界条件, 约束后的复合薄板的长、宽、厚尺寸为 200 mm×130 mm×2.36 mm。

图 5、6 分别给出了所搭建的基于激光扫描的振动测试系统的连接示意图和损伤定位测试现场图, 试验中的主要测试设备、仪器包括激光扫描测试系统、振动激励设备、激振平台以及信号采集仪等, 它们的具体型号: ① LMS SCADAS 16 通道便携式数据采集仪; ② 联能 JZK-100 激振器(最大正弦激振力 1 000 N)和 YE5878 型功率放大器(额定输出功率 1 200 W, 输出电压 40 vrms); ③ Polytec PDV-100 激光测振仪(测试频率范围 0~22 kHz, 最小速度分辨率 0.05 $\mu\text{m/s}$); ④ 自行开发的激振平台, 其台面上安装有 BK4508B 加速度传感器。另外, 为了有效地夹紧被测复合薄板, 在夹具中设置四个孔, 在不同的拧紧力矩下重复测量板的前 3 阶固有频率。通过比较, 当拧紧力矩为 50 N·m 时, 固有频率值的重复性最好。因此, 正式试验时便使用该拧紧力矩, 并用 502 胶水将 B&K4517 轻质加速度传感器固定在参考点 P(如图 5 所示, 其位于复合薄板的背面, 距离复合板约束端 30 mm, 且距离下端自由边 30 mm)。

图 5 基于激光扫描的复合薄板振动测试系统连接示意图

图 6 纤维增强复合薄板损伤定位测试现场

试验时, 按照第 2 部分提出的板损伤定位检测流程, 首先通过 LMS 采集仪发出正弦扫频激励信号, 并通过激振器对复合薄板进行振动激励, 然后

通过控制软件, 调整激光扫描装置中激光点的具体位置, 并通过 LMS 采集仪对激光测振仪获得的响应信号进行实时采集。此外, 进行试验测试时, 选择以下设置和参数: 行间距为 $B_M = 10 \text{ mm}$; 激励幅度范围 $0.5 \sim 2 \text{ g}$; 扫描速度 3 mm/s ; 采样频率 3.200 kHz ; 频率分辨率 0.125 Hz ; 对激振信号和响应信号添加汉宁窗函数; 正弦扫频速率为 1 Hz/s 。

通过扫频测试方法, 获得的包含某阶固有频率的频域响应曲线, 通过辨识其峰值, 则可精确地获得固有频率结果。然后, 在上述固有频率处, 激发其达到共振状态, 并通过激光扫描装置来获得每一阶固有频率对应的模态振型, 表 1 给出了测试获得的带有损伤的纤维增强复合薄板前 5 阶固有频率、模态振型。接着, 利用二维五点三次曲面平滑法, 通过 Matlab 计算程序, 则可获得前 5 阶模态对应的平滑曲率振型, 也一并将其列入表 1 中。最后, 可对前 5 阶固有频率激励下的损伤位置指数 $\delta_{i,j}(\omega)$ 进行平均处理, 获得平均损伤指标, 并将其加载到激光扫描线框模型上, 其二维图如图 7 所示。

表 1 通过激光扫描测试获得的纤维增强复合薄板前 5 阶固有频率、模态振型、曲率振型和平滑曲率振型

模态阶次	1	2	3	4	5
测试频率 f/Hz	31.0	175.5	193.5	499.5	580.5
模态振型
曲率振型
平滑曲率振型

图 7 加载前 5 阶平均损伤位置指数的激光扫描线框模型二维图

对表 1 的数据进行分析可知, 由于纤维断裂损伤的存在, 导致复合薄板的模态振型不连续, 即通过曲率振型可以看出在纤维断裂附近处存在一定的奇异区域。但仅从曲率振型来看, 损伤区域并不十

分明显, 虽然可以判断损伤的存在, 但不足以准确确定损伤的具体位置。如果利用本文提出的激光扫描法进行损伤定位, 则从图 7 的二维图结果都可以看出, 在纤维断裂处附近处, 平均损伤位置指数明显高于其他部分。由此可判定, 复合薄板在该损伤位置的扭转刚度发生改变, 曲率振型存在奇异性, 即说明在该区域结构存在损伤。由此可知, 利用该方法确实可以准确、有效地确定复合薄板的具体损伤位置。但由于本文提出的方法是从结构的宏观振动方面入手, 因而对于复合材料出现的微观损伤(例如基体内部的纤维拔出、界面错位、较微弱的分层损伤等), 其将难以进行损伤定位, 还存在一定的局限性。

4 结论

采用理论与试验相结合的方式, 对纤维增强复合薄板的纤维断裂损伤位置进行了研究, 具体工作如下。

(1) 基于激光扫描法和二维五点三次曲面平滑法, 推导出了对纤维增强复合薄板损伤进行定位的量化损伤指标, 明确了损伤定位的原理, 并给出了详细的损伤定位检测流程。

(2) 搭建了基于激光扫描的复合薄板振动测试系统, 并以带有纤维断裂损伤的 TC300 碳纤维/树脂基复合薄板为例进行了实际测试。试验结果表明在纤维断裂处附近处, 平均损伤位置指数明显高于其他部分, 证明了该方法确实可以准确检测出复合薄板的损伤位置。

参 考 文 献

- [1] MORGAN P. Carbon fibers and their composites[M]. Boca Raton: The Chemical Rubber Company Press, 2005.
- [2] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
SHEN Guanlin. Mechanics of composite materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [3] SUNDARESAN M J, GHOSHAL A, LI J, et al. Experimental Damage detection on a wing panel using vibration deflection shapes[J]. Acoustics Speech & Signal Processing Newsletter IEEE, 2003, 2(3): 243-256.
- [4] GHOSHAL A, CHATTOPADHYAY A, SCHULZ M J, et al. Experimental investigation of damage detection in composite material structures using a laser vibrometer and piezoelectric actuators[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2003, 14(8): 521-537.
- [5] CASTELLINI P. Structural damage assessment in

- composite material using laser Doppler vibrometry[J]. Proc Spie, 2004, 5503: 375-379.
- [6] ROY K, AGRAWAL S, BHATTACHARYA B, et al. Fundamental mode shape to localize delamination in cantilever composite plates using laser doppler vibrometer[C]// 9th Structural Engineering Convention (SEC2014), December 22-24, 2014, Indian Institute of Technology Delhi, India. New Delhi: Springer, 2015: 2621-2633.
- [7] VANLANDUIT S. Linear and nonlinear damage detection using a scanning laser vibrometer[J]. Shock and Vibration. 2015, 9(1-2): 43-56.
- [8] LIEVEN N A, EWINS D J. Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC)[C]// Proceedings of the sixth international modal analysis conference, February 1-4, 1988, Orlando, Florida. Kissimmee: Union College, 1988: 690-695.
- [9] 冯侃, GONG Xiaojing, OLIVIER Sicot, 等. 复合材料板冲击损伤检测的二维间隔平滑法[J]. 试验力学, 2013, 28(2): 173-179.
- FENG Kan, GONG Xiaojing, OLIVIER Sicot, et al. Two-dimensional gapped smoothing method for impact damage detection of composite laminates[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(2): 173-179.
- [10] YOON M K, HEIDER D, GILLESPIE J W J R, et al. Local damage detection using the two-dimensional gapped smoothing method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 279(1-2): 119-139.
- [11] 李晖, 孙伟, 许卓, 等. 基于激光旋转扫描的约束态薄壁圆柱壳模态振型测试新方法[J]. 振动与冲击, 2014, 33(16): 155-159.
- LI Hui, SUN Wei, XU Zhuo, et al. Experimental method of laser rotating scanning to measure mode shapes of constrained thin cylindrical shell[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(16): 155-159.
- [12] RATCLIFFE C P. Damage detection using a modified Laplacian operator on mode shape data[J]. Journal of Sound & Vibration, 1997, 204(3): 505-517.
- [13] QIAO P, LU K, LESTARI W, et al. Curvature mode shape-based damage detection in composite laminated plates[J]. Steel Construction, 2008, 80(3): 409-428.
-
- 作者简介: 李晖(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士后, 副教授。主要研究方向为复合薄壁构件振动测试及故障诊断。
E-mail: lh200300206@qq.com
- 常永乐, 男, 1989 年出生。主要研究方向为纤维增强复合薄板振动特性测试方法。
E-mail: 631081103@qq.com