

基于集中质量法的纤维增强复合材料的损伤定位

李 晖^{1,2,3}, 徐忠浩^{1,2}, 王东升^{1,2}, 祖旭东⁴
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 利物浦大学 工程学院, 英国 利物浦 L69 3GQ; 4. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 研究了纤维增强复合材料的损伤定位方法, 将其命名为“指数幂逼近-集中质量法”. 首先, 以纤维增强复合材料梁结构为例建立集中质量模型; 然后通过理论求解获得未损伤梁的刚度矩阵, 结合测试获得的固有频率和正则化的模态振型数据, 获得梁结构损伤后的残差力向量, 并将其作为关键定位指标; 并基于指数幂思想对损伤梁结构的质量块数量进行划分, 提出损伤位置逼近判定准则, 确定一套规范的损伤定位流程. 最后, 对带有不同纤维断裂损伤的 T300 碳纤维/树脂基复合材料梁进行实例研究, 研究发现本文提出的定位方法可有效辨识获得复合材料梁的损伤位置.

关 键 词: 集中质量法; 指数幂逼近; 纤维增强复合材料; 残差力向量; 损伤定位

中图分类号: TB 535 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)02-0234-07

Damage Location of Fiber-Reinforced Composites Based on Lumped Mass Approach

LI Hui^{1,2,3}, XU Zhong-hao^{1,2}, WANG Dong-sheng^{1,2}, ZU Xu-dong⁴
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion Systems(Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. School of Engineering, University of Liverpool, Liverpool L69 3GQ, UK; 4. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Corresponding author: LI Hui, E-mail: lh200300206@163.com)

Abstract: A method for locating the damage of fiber-reinforced composites(FRCs) is studied, which is named as the ‘exponential approximation-lumped mass approach’. Firstly, a lumped mass model is established for a FRCs beam structure. Then, the stiffness matrix of the undamaged beam is obtained by theoretical calculation, and the residual force vector of the beam with damage is determined as the key locating index based on the measured natural frequencies and the regularized modal shape data. Furthermore, a criterion is proposed for approximating the position of damage, so that a set of standard procedures for the damage locating can be determined. Finally, a T300 carbon fiber/resin composite beam with different fiber breakage damages is studied as a case and it is found that the as-proposed damage locating approach can effectively identify the damage positions of the composite beam.

Key words: lumped mass approach; exponential approximation; fiber-reinforced composite; residual force vector; damage location

纤维增强复合材料具有优异的力学和减重性能,被越来越多地应用于航天、航空、核工业等重要领域^[1]. 纤维增强复合材料结构件的服役环境复杂,可能长期处于高温、高压、高幅振动、冲击等恶劣工况下^[2-3],因此容易产生纤维断裂、基体裂纹、分层损伤等. 上述损伤问题不仅严重影响材料及结构的静态承载、抗振性和抗疲劳能力,有时甚至会导致一些灾难性的后果^[4-5].

长期以来,人们针对金属及复合材料的损伤定位开展了许多工作,已取得阶段性的研究成果. Pandey 等^[6]利用金属梁模型研究损伤问题,提出一种基于结构柔度矩阵变化来识别和确定损伤位置的方法. Lew 等^[7]利用被动控制理论,在待检测的梁结构上附加若干个子结构,通过控制闭环控制系统中固有频率的阶数和精度,提高受控结构模态参数对损伤的敏感度,进而识别损伤位置; Koh 等^[8]将该方法进一步发展,采用多个受控结构的频率信息,通过构造频率与损伤之间的敏感矩阵进行损伤定位. Zhao 等^[9]利用信号差异系数构造结构损伤的分布概率图,并提出一种基于相关分析的损伤概率成像方法来进行损伤定位. Hu 等^[10]利用拉伸试验和三点弯曲试验来进行实验模态分析,通过获得的损伤前、后的模态位移,成功实现了复合材料基体裂纹的损伤定位. 朱永凯等^[11]结合强度型光纤传感技术,利用声发射检测系统对纤维复合薄板进行损伤检测. 冯侃等^[12]基于扫描式激光测振仪获得的碳纤维复合板 ODS 响应数据,提出了二维间隔平滑法来检测冲击裂纹损伤. Kersemans 等^[13]应用超声波极坐标扫描法对带有分层损伤的纤维增强复合板进行损伤检测,研究认为该方法不仅可以定位分层损伤的位置,还可以检测损伤的深度. Roy 等^[14]应用连续扫描激光测振仪对复合材料板进行损伤监测,提出基于模态振型的损伤辨识定位方法,但需分别测试健康与损伤板的模态振型,检测过程较为繁琐. 黄博等^[15]利用光纤光栅传感器,应用应变模态识别技术提取金属材料结构的局部动态应变特征,并准确识别出损伤位置. 刘国强等^[16]提出一种改进的损伤概率成像方法,利用损伤因子与损伤位置到激励-传感通道间的直线距离之间的关系,对损伤概率分布函数进行改进,并对复合材料加筋壁板上不同位置的损伤进行了识别.

从目前的研究现状可知,人们从宏观振动学角度研究复合材料损伤检测的相关文献依然比较匮乏,特别是缺乏简单、高效的损伤定位方法. 另外,国内研究人员开展的损伤辨识工作,许多都依赖于价格昂贵的连续扫描激光测振仪、声发射检测系统及光纤传感测试设备,不利于普通科研工作者开展自主创新性研究.

本文针对上述问题,提出了指数幂逼近-集中质量法来准确辨识纤维增强复合材料(fiber-reinforced composite, FRC)的损伤位置. 以 FRC 梁结构为例,建立了集中质量模型,并将损伤后的残差力向量作为关键定位指标,在阐明了损伤定

位的理论原理后,总结、概括出一套规范的定位流程. 最后,利用本文提出的方法对带有不同纤维断裂损伤的 TC300 碳纤维/树脂梁结构的损伤位置进行了辨识. 研究表明,该定位方法可有效确定复合材料梁的损伤位置.

1 复合材料梁刚度矩阵的理论求解

首先,建立图 1 所示的 FRC 梁的集中质量模型,以梁的下表面为 x 轴、厚度方向为 y 轴,建立 xOy 坐标系;梁的长度为 a ,质量为 m . 假设梁处于一端约束的悬臂状态,其内部结构可看作由 n 个集中质量块组合而成,且每个集中质量块的质量分配均匀且相等,即 $m_1 = m_2 = \cdots = m_{n-1} = m_n = m/n$.

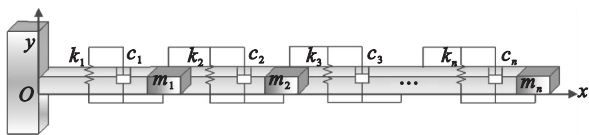


图 1 FRC 梁的集中质量模型
Fig. 1 A lumped mass model of FRC beam

根据宏观振动学原理,梁的振动微分方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \tag{1}$$

式中: M, C, K 分别为 FRC 梁的质量矩阵、材料阻尼矩阵和刚度矩阵; \ddot{x}, \dot{x}, x 分别为广义加速度、速度和位移; F 为激振力向量.

为了求解方便,将式(1)写成矩阵形式:

$$(K + iC - \omega^2 M)\varphi = F \tag{2}$$

式中: φ 为广义位移向量; ω 为固有频率;对应的 $n \times n$ 维刚度矩阵 K 、质量矩阵 M 和阻尼矩阵 C ,可分别用图解的形式表示,如图 2 所示.

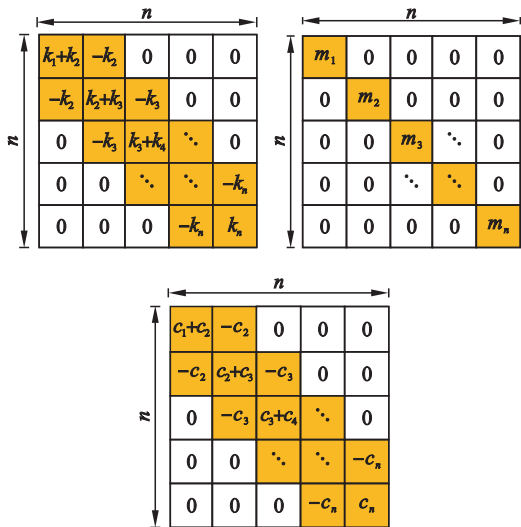


图 2 FRC 梁的刚度、质量和阻尼矩阵
Fig. 2 Matrixes of stiffness, mass and damping of FRC beam

结构损伤在数学上表现为刚度和质量矩阵的改变,在物理上表现为固有频率、振型、阻尼等动态特性参数的改变.下面,首先推导 FRC 梁固有频率和振型向量的求解公式.令式(2)中阻尼矩阵 C 和激振力向量 F 为零,即

$$(K - \omega^2 M) \varphi = 0. \tag{3}$$

假设可通过理论求解方法,获得第 i 阶固有频率 ω_i 及其对应的正则化振型向量 φ_i ,这时刚度矩阵 K 就可求解获得.这样,便建立了 ω_i, φ_i 和 K 之间的关系:

$$(K - \omega_i^2 M) \varphi_i = 0. \tag{4}$$

为了准确计算 K ,将式(4)拓展,可将前 r 阶固有频率和振型向量与刚度矩阵 K 的关系进一步表示为

$$(K - \Omega_{(r)}^2 M) \varphi_{(r)} = 0. \tag{5}$$

式中: $\Omega_{(r)}$ 是由理论计算获得的 FRC 梁的前 r 阶固有频率组成的对角矩阵; $\varphi_{(r)}$ 为相应的振型矩阵. $\Omega_{(r)}$ 和 $\varphi_{(r)}$ 的具体表达式如下:

$$\Omega_{(r)} = \begin{bmatrix} \omega_1 & & \\ & \omega_2 & \\ & & \ddots \\ & & & \omega_r \end{bmatrix}, \tag{6}$$

$$\varphi_{(r)} = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_r). \tag{7}$$

2 复合材料梁结构的损伤定位原理

假设可分别通过理论求解和测试获得 FRC 梁损伤前、后所对应的固有频率及其正则化振型向量,并用下标 b 和 d 表示结构损伤前、后的状态,则式(4)可分别表示为

$$(K_b - \omega_{bi}^2 M_b) \varphi_{bi} = 0, \tag{8}$$

$$(K_d - \omega_{di}^2 M_d) \varphi_{di} = 0. \tag{9}$$

分别用 ΔK 和 ΔM 表示结构损伤前、后刚度和质量的改变量,则结构损伤后的刚度和质量矩阵可表示为

$$K_d = K_b + \Delta K, \tag{10}$$

$$M_d = M_b + \Delta M. \tag{11}$$

由于结构损伤对其质量的影响很小,因此, ΔM 可忽略不计,即 $\Delta M = 0$, 则 $M_d = M_b$. 将式(10)和式(11)代入到式(9)中,可获得如下表达式:

$$\Delta K \varphi_{di} - \omega_{di}^2 \Delta M \varphi_{di} = (-K_b + \omega_{di}^2 M_b) \varphi_{di}. \tag{12}$$

将式(12)左侧变量定义为第 i 阶模态的残差力向量 R_i :

$$R_i = \Delta K \varphi_{di} - \omega_{di}^2 \Delta M \varphi_{di}. \tag{13}$$

R_i 可进一步表示为

$$R_i = (-K_b + \omega_{di}^2 M_b) \varphi_{di}. \tag{14}$$

将理论求解获得的未损伤梁的前 r 阶固有频率和正则化振型向量代入到式(5)中,即可获得结构损伤前的刚度矩阵 K_b . 再将其代入式(14)中,并结合测试获得的第 i 阶固有频率和正则化振型向量,即可获得第 i 阶残差力向量 R_i :

$$R_i = (r_1, r_2, \dots, r_j, \dots, r_n)^T. \tag{15}$$

式中 r_j 为 FRC 梁第 j 个自由度上对应的残差力元素 ($j=1, 2, \dots, n$).

为了提高定位的准确性,可采用几何平均的方式来获得残差力向量 R :

$$R = \left[\prod_{i=1}^p (|R_i|) \right]^{1/p}. \tag{16}$$

式中 p 为所关注结构模态的最大阶次.

图 3 给出了 FRC 梁损伤定位的原理图.

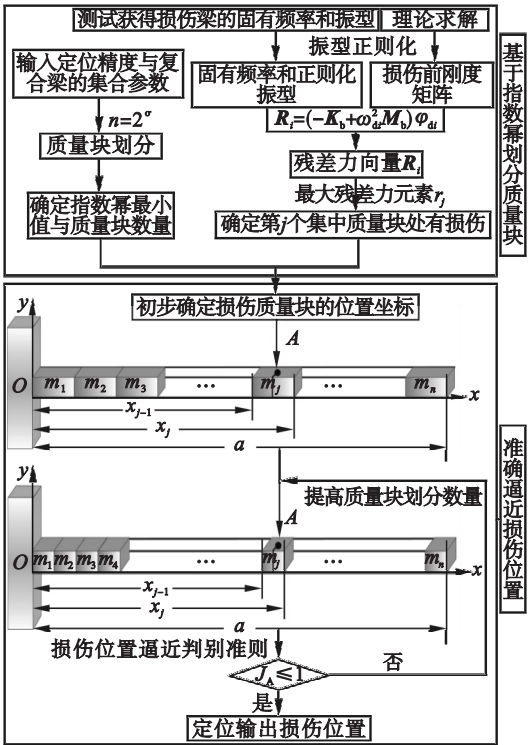


图 3 基于指数幂逼近-集中质量法的 FRC 梁损伤定位示意图
Fig.3 Schematic of locating the damage of FRC beam based on exponential approximation – lumped mass method

首先,可通过式(16)获得梁结构损伤后的残差力向量 R ,并将 R 中最大的残差力元素 r_j 作为损伤定位指标;然后,假设在 r_j 对应的梁上第 j 个集中质量块位置发生了损伤(A 为质量块的中心点,且 r_j 对应梁上的第 j 个自由度),则该质量块的左、右端点对应的坐标值 x_{j-1} 和 x_j 可表示为

$$\left. \begin{aligned} x_{j-1} &= (j-1)a/n, \\ x_j &= ja/n. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

假设可按照 2 的指数幂思想,将 FRC 梁均分为 $n=2^\sigma$ 个质量块(σ 为与定位精度有关的待定指数),(相应地,将整个损伤定位方法命名为“指数幂逼近-集中质量法”),则梁结构上每个集中质量块的长度可表示为

$$a_{\text{mass}} = \frac{a}{2^\sigma}. \quad (18)$$

假设 ε_0 为定位精度,根据已描述的质量块划分规则,可将 2 的指数 σ 对应的最小值 σ_{\min} 与 ε_0 的关系表示为

$$\sigma_{\min} = \lg \frac{a}{\varepsilon_0} - 1. \quad (19)$$

利用式(19)可确定 σ_{\min} ,进而确定相应的质量块数量 n 并代入式(17),可获得损伤质量块左、右端点对应的坐标值.经过化简求解后,可获得损伤质量块的中点坐标 $X_{j,\sigma_{\min}}$:

$$X_{j,\sigma_{\min}} = (j-1)\frac{a}{2^{\sigma_{\min}}} + \frac{a}{2^{\sigma_{\min}+1}}. \quad (20)$$

最后,定义 J_A 为损伤定位偏差系数,可制定如下的损伤位置逼近判别准则:

$$J_A = \frac{|X_{j,\sigma_{\min}} - X_{j,\sigma_{\min}-1}|}{a_{\text{mass}}} \leq 1. \quad (21)$$

式中, $X_{j,\sigma_{\min}-1}$ 表示当 2 的指数为 $\sigma_{\min}-1$ 时,根据质量块划分规则获得的损伤质量块的中点坐标.

当 $J_A > 1$ 时,表明按照 $n=2^{\sigma_{\min}}$ 划分质量块后,仍不能达到定位精度 ε_0 的要求.此时,还需进一步提高指数值 σ_{\min} ,将梁结构均分为更多的质量块来逼近实际的损伤位置,见图 3 所示.当 $J_A \leq 1$ 时,可保证对应的质量块数量 n 满足定位精度的要求,即可准确定位梁的损伤位置.

3 损伤定位流程

可按照下面 4 个关键步骤确定复合材料梁结构的损伤位置.

3.1 确定损伤梁的固有频率

为了精确获得 FRC 梁的固有频率,可首先通过锤击法模态实验初步获得其固有频率,然后选择各阶固有频率的 75%~125% 作为扫频频段,并在较慢的扫频速率下(例如 0.25 Hz/s)进行正弦扫频测试.在依次获得了各阶频域响应曲线后,可通过辨识响应峰值的方式,精确获取各阶固有频率值.

3.2 确定损伤梁的模态振型

利用振动激励设备,在 FRC 梁的各阶固有频率处,激发其达到各阶共振状态.然后利用激光扫描测振方法^[17],获得各阶共振状态对应的参考点和激光扫描测点的响应信号;在对振幅和相位数据进行滤波、缩减、提取处理后,可快速获得损伤梁的各阶模态振型.

3.3 理论求解损伤梁的残差力向量

在输入 FRC 梁的尺寸和铺设参数后,可通过有限元法、解析法等方法求解未损伤梁的固有特性.然后通过图 2 中给出的质量矩阵形式获得梁的质量矩阵,并将计算获得的振型向量和固有频率代入式(8),获得未损伤梁的刚度矩阵.最后,将测试获得的损伤梁的固有频率和正则化振型向量代入到式(14)中获得损伤后的第 i 阶残差力向量,并求几何平均值.

3.4 基于指数幂逼近-集中质量法确定损伤位置

根据所要求的定位精度,将损伤梁结构均分为 2^σ 个质量块.然后将残差力向量中绝对值最大的残差力元素作为损伤定位指标,并根据式(17)初步确定损伤质量块的位置坐标.最后,根据损伤位置逼近判别准则,不断提高质量块的划分数量以逼近实际损伤位置,最终准确输出梁的损伤位置.

4 实例研究

本文以带有纤维断裂损伤的 TC300 碳纤维/树脂基复合材料梁为研究对象,对其损伤位置进行研究.首先,通过图 4 所示的夹具固定一边,夹持长度为 30 mm,用以模拟悬臂约束边界条件,约束后复合梁的长、宽、厚尺寸为 230 mm×20 mm×2.36 mm.然后,利用锋利的小刀对复合梁进行破坏,第一次损伤位置距约束端为 80 mm,第二次损伤位置距约束端为 160 mm,裂纹长度为梁的宽度,破坏深度约为复合梁厚度的 20%,裂纹宽度为 1 mm 左右.

FRC 梁的损伤测试系统主要包括:基于维控触摸屏和 PLC 控制的二维激光线性扫描测振装置、LMS 16 通道便携式数据采集仪、Polytec PDV-100 激光测振仪、金盾 1 000 kg 电磁振动台及功率放大器等.实验时,通过夹具中的两个 M12 螺栓夹紧 FRC 梁的一端.为了有效地夹紧被测梁,在夹具中设置两个孔,在不同的拧紧力矩下重复测量 FRC 梁的前 4 阶固有频率.通过比较,当拧紧力矩为 40 N·m 时,频率值的重复性最好,

因此,测量时通常在此扭矩下对悬臂梁进行测试.此外,测试时选择以下设置和参数:①激励幅度范围 0.5g~2g;②正弦扫频速度 0.5 Hz/s;③采样频率 5 120 Hz;④频率分辨率 0.125 Hz;⑤对激励信号和响应信号添加汉宁窗函数.

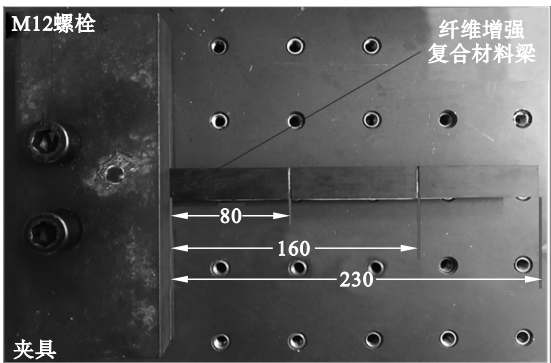


图 4 带有纤维断裂损伤的 FRC 梁
Fig. 4 FRC beam with fiber fracture damages

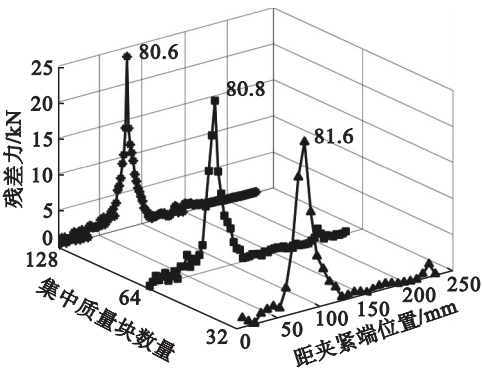
实验时,首先对梁试件进行第一次损伤破坏,通过扫频测试方法,获得包含某阶固有频率的频域响应曲线;通过辨识频域响应峰值,获得其固有频率.然后,在上述固有频率处,激发其达到共振状态,并通过二维激光线性扫描测振装置获取每一阶固有频率所对应的模态振型.表 1 给出了测试获得的第一次损伤后的 FRC 梁的前 4 阶固有频率和模态振型.

表 1 第一次损伤后 FRC 梁的前 4 阶固有频率和振型
Table 1 The first four natural frequencies and modal shapes of FRC beam first damaged

模态阶次	固有频率 Hz	模态振型
1	48.75	
2	307.42	
3	841.80	
4	1 673.44	

然后,利用解析方法^[18]求解获得未损伤梁的各阶固有频率和振型向量,并将它们代入式(8),即可求出未损伤梁的刚度矩阵.结合测试获得的固有频率和正则化振型数据,利用式(16)可进一步求出梁结构损伤后的残差力向量.

由于工程上常用的定位精度要达到毫米级别($\varepsilon_0=1\text{ mm}$),因此,可根据该要求,利用质量块划分规则,由式(19)确定指数 σ 的最小值 $\sigma_{\min}=6$,即质量块数量达到 64 时,才能满足定位精度要求.为了验证质量块数量与定位精度之间的关系,将梁分别划分为 32 个和 128 个质量块,然后,以梁的长度作为 x 轴,以质量块数量作为 y 轴,并以残差力作为纵坐标,可绘制出图 5 所示的不同质量块数量下第一次损伤后 FRC 梁的损伤定位图.



图中数据为损伤位置
图 5 不同质量块数量下第一次损伤后 FRC 梁的损伤定位图

Fig. 5 Damage detection map of FRC beam first damaged when the beam is divided into different numbers of mass blocks

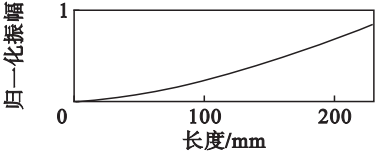
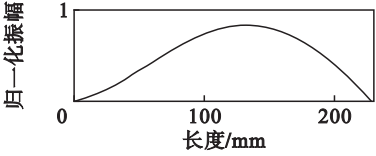
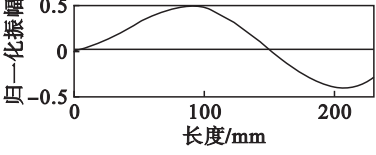
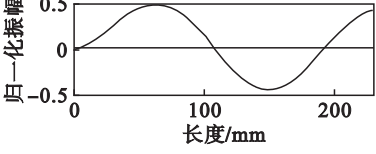
对图 5 的定位结果进行分析可以看出,在质量块数量为 64 时,定位输出的损伤位置为 80.8 mm,其损伤定位偏差系数 $J_A \leq 1$;在质量块数量为 32 时,定位输出的损伤位置为 81.6 mm,其损伤定位偏差系数 $J_A > 1$,不满足定位精度要求;另外,在质量块数量为 128 时,其定位输出的损伤位置与 64 块时对应的损伤位置相差不大.由此证明了本文提出的损伤位置逼近判别准则的有效性.利用该方法可以准确辨识第一次损伤后 FRC 梁的损伤位置.

为了进一步验证该损伤定位方法的准确性,表 2 给出了在边界条件和原有损伤状态不变的条件下,对 FRC 梁试件进行第二次损伤破坏,并采用相同的测试方法获取第二次损伤后梁的前 4 阶固有频率和模态振型.

对表 1 和表 2 的数据进行对比分析可知,由

于纤维断裂损伤的存在,导致第二次损伤后梁的固有频率进一步减小,但其模态振型差别不大,因此,仅仅利用固有频率和模态振型对应的原始数据进行判别,很难准确定位损伤位置.

表 2 第二次损伤后 FRC 梁的前 4 阶固有频率和振型
Table 2 The first four natural frequencies and modal shapes of FRC beam second damaged

模态阶次	固有频率 Hz	模态振型
1	47.66	
2	301.56	
3	816.80	
4	1 667.19	

这里,再次利用指数幂逼近-集中质量法,即在质量块数量达到 64 时,对第二次损伤后梁的损伤位置进行定位辨识.同时,为了验证质量块数量与定位精度之间的关系,再将梁划分为 32 个和 128 个质量块.图 6 给出了不同质量块数量下第二次损伤后 FRC 梁的损伤定位图.

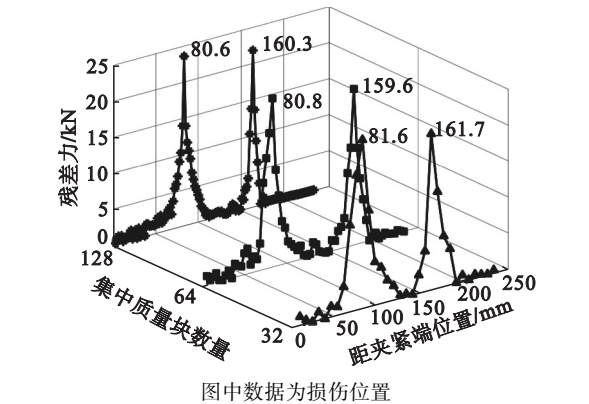


图 6 不同质量块数量下第二次损伤后 FRC 梁的损伤定位图
Fig. 6 Damage detection map of FRC beam second damaged when the beam is divided into different numbers of mass blocks

对图 6 的定位结果进行分析可知,在质量块数量为 64 时,定位输出的两处损伤位置分别为 80.8 mm 和 159.6 mm,与图 4 给出的原始损伤位置非常接近(相对误差小于 1%,计算时间约为 108 s).由此可证明该损伤定位方法的正确性和有效性.

在质量块数量为 32 时,定位输出的损伤位置为 81.6 mm(对应的 $J_A = 1.22$)和 161.7 mm(对应的 $J_A = 1.28$),其损伤定位偏差系数均大于 1,不满足定位要求.另外,在质量块数量为 128 时,定位输出的损伤位置为 80.6 mm 和 160.3 mm,与 64 块时确定的损伤位置接近(两者相对于原始损伤位置的误差都小于 1%),但计算花费了更多的时间(计算时间约为 220 s).

综上所述,利用该损伤定位方法,不仅可以准确辨识 FRC 梁的损伤位置,且在满足定位精度要求的同时,提高了定位效率.

5 结 语

本文以纤维增强复合材料梁为例,提出了指数幂逼近-集中质量法,用以辨识该类型复合材料的损伤位置.同时,还讨论了梁的质量块划分数对两次损伤后 TC300 碳纤维/树脂梁结构的损伤定位精度的影响.研究发现,利用本文提出的定位方法可有效获取两次损伤对应的结构损伤位置,且利用本文制定的损伤位置逼近判别准则,可以在保证定位精度的同时,提高定位效率.

参考文献:

[1] Vinson J R, Sierakowski R L. The behavior of structures composed of composite materials[M]. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2006.

[2] 李晖,吴怀帅,张体南,等.热环境对基础激励作用下纤维增强树脂基复合薄板振动特性的影响[J].复合材料学报, 2019, 36(2): 380-388.
(Li Hui, Wu Huai-shuai, Zhang Ti-nan, et al. Influence of thermal environment on vibration characteristic of fiber-reinforced resin composite thin plate under base excitation [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(2): 380-388.)

[3] Sha Y D, Li J Y, Gao Z J. Dynamic response of pre/post buckled thin-walled structure under thermo-acoustic loading [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 80/81: 536-541.

[4] 童明波,陈普会,曾建江.低能量冲击损伤复合材料飞机结构的强度性能研究[J].航空学报, 1998, 19(2): 232-235.
(Tong Ming-bo, Chen Pu-hui, Zeng Jian-jiang. Strength study of composite structure with low energy impact damage[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(2): 232-235.)

[5] 朱元林,温卫东,刘礼华,等.碳/碳复合材料疲劳损伤失效

试验研究[J]. 复合材料学报,2016,33(2):386-393.
(Zhu Yuan-lin, Wen Wei-dong, Liu Li-hua, et al. Test research on fatigue damage failure of C/C composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*,2016,33(2):386-393.)

[6] Pandey A K, Biswas M. Damage detection in structures using changes in flexibility[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1994,169(1):3-17.

[7] Lew J S, Juang J N. Structural damage detection using virtual passive controllers[J/OL]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2002, 25(3):419-424 [2019-03-10]. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/2.4918>.

[8] Koh B H, Ray L R. Localization of damage in smart structures through sensitivity enhancing feedback control[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*,2003,17(4):837-855.

[9] Zhao X, Gao H, Zhang G, et al. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. defect detection, localization and growth monitoring[J]. *Smart Materials & Structures*,2007,16(4):1208-1217.

[10] Hu H, Lee C H, Wu C B, et al. Detection of matrix cracks in composite laminates by using the modal strain energy method[J]. *Mechanics of Composite Materials*,2010,46(2):117-132.

[11] 朱永凯, 崇博, 林啸鸣, 等. 基于强度型光纤传感技术的复合材料薄板损伤声发射定位法[J]. 无损检测,2011,33(12):54-57.
(Zhu Yong-kai, Chong Bo, Lin Xiao-ming, et al. Composites sheet damage acoustic emission localization method based on optical fiber intensity sensing technology[J]. *Nondestructive Testing*,2011,33(12):54-57.)

[12] 冯侃, Gong Xiao-jing, Sicot Olivier, 等. 复合材料板冲击损伤检测的二维间隔平滑法[J]. 实验力学,2013,28(2):173-179.
(Feng Kan, Gong Xiao-jing, Sicot Olivier, et al. Two-dimensional gapped smoothing method for impact damage detection of composite laminates[J]. *Journal of Experimental Mechanics*,2013,28(2):173-179.)

[13] Kersemans M, Martens A, Van Den Abeele K, et al. Detection and localization of delaminations in thin carbon fiber reinforced composites with the ultrasonic polar scan[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*,2014,33(4):522-534.

[14] Roy K, Agrawal S, Bhattacharya B, et al. Fundamental mode shape to localize delamination in cantilever composite plates using laser doppler vibrometer[M]//Advances in Structural Engineering. New Delhi:Springer,2015:2621-2633.

[15] 黄博, 白生宝, 宁宁, 等. 基于 FBG 动态应变监测的金属结构损伤识别方法研究[J]. 航空制造技术,2017,538(19):67-71.
(Huang Bo, Bai Sheng-bao, Ning Ning, et al. Study on metal structure damage identification based on dynamic strain monitoring using fiber Bragg grating sensor[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*,2017,538(19):67-71.)

[16] 刘国强, 肖迎春, 张华, 等. 复合材料加筋壁板损伤识别的概率成像方法[J]. 复合材料学报,2018,35(2):311-319.
(Liu Guo-qiang, Xiao Ying-chun, Zhang Hua, et al. Probability-based diagnostic imaging for damage identification of stiffened composite panel[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*,2018,35(2):311-319.)

[17] Li H, Chang Y L, Xu Z H, et al. Modal shape measurement of fiber-reinforced composite plate with high efficiency and precision based on laser linear scanning method[J]. *Measurement and Control*,2018,51(9):470-487.

[18] 李晖, 吴怀帅, 薛鹏程, 等. 纤维增强悬臂复合薄板固有特性分析与验证[J]. 东北大学学报(自然科学版),2017,38(12):1731-1736.
(Li Hui, Wu Huai-shuai, Xue Peng-cheng, et al. Analysis and verification of natural characteristics of fiber-reinforced thin cantilever plate[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*,2017,38(12):1731-1736.)

(上接第 233 页)

[4] Sun Z, Wang J, Li R, et al. LIF: a new Kriging based learning function and its application to structural reliability analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 157:152-165.

[5] Wang J, Sun Z. The stepwise accuracy-improvement strategy based on the Kriging model for structural reliability analysis[J]. *Structural & Multidisciplinary Optimization*, 2018, 58(2):595-612.

[6] 刘阔, 李晓雷, 王健. 一种基于 Kriging 模型的机械结构可靠性分析方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2017,38(7):1002-1006.
(Liu Kuo, Li Xiao-lei, Wang Jian. An analysis method of mechanical structural reliability based on the Kriging model[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2017,38(7):1002-1006.)

[7] Zhang X, Wang L, Sørensen J D. REIF: a novel active-learning function toward adaptive Kriging surrogate models for structural reliability analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*,2019,185:440-454.

[8] Bichon B J, Eldred M S, Swiler L P, et al. Efficient global reliability analysis for nonlinear implicit performance functions[J]. *AIAA Journal*,2008,46(10):2459-2468.

[9] Echard B, Gayton N, Lemaire M. AK-MCS: an active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo simulation[J]. *Structural Safety*,2011,33(2):145-154.

[10] Wen Z, Pei H, Liu H, et al. A sequential Kriging reliability analysis method with characteristics of adaptive sampling regions and parallelizability[J]. *Reliability Engineering & System Safety*,2016,153:170-179.

[11] Xiao N C, Zuo M J, Zhou C. A new adaptive sequential sampling method to construct surrogate models for efficient reliability analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*,2018,169:330-338.

[12] Hu Z, Mahadevan S. Global sensitivity analysis-enhanced surrogate (GSAS) modeling for reliability analysis[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*,2015,53(3):501-521.

[13] Wang Z, Shafieezadeh A. ESC: an efficient error-based stopping criterion for Kriging-based reliability analysis methods[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019,59(5):1621-1637.

[14] Wang Z, Shafieezadeh A. REAK: reliability analysis through error rate-based adaptive Kriging[J]. *Reliability Engineering & System Safety*,2019,182:33-45.