

# 基于激光无损扫描的纤维增强复合材料 参数测试仪研发

李 晖, 吴腾飞, 许 卓, 韩清凯

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 研发了基于激光无损扫描的纤维增强复合材料参数测试仪. 首先, 以纤维增强复合梁试件为例, 实现了其固有频率和振动响应的理论求解. 然后, 选取合适的步长来构造材料参数的迭代向量, 并详细介绍了纤维增强复合材料参数的辨识原理. 进一步, 基于复合梁试件的激振平台、激光扫描装置、信号发生及数据采集器等功能部件, 完成了测试仪硬件结构的搭建, 并对基于 LabVIEW 编写的软件及其各个模块的功能和测控优势进行了说明. 最后, 利用该仪器辨识获得了三个 TC500 碳纤维/树脂基复合梁试件在不同纤维方向对应的材料参数, 并与厂家所给的相关结果进行了对比, 偏差在 0.63% ~ 10.61% 之间, 证明了所开发的材料参数测试仪的可靠性及其算法的有效性.

**关 键 词:** 纤维增强复合材料; 材料参数测试仪; 参数辨识; 激光无损扫描

中图分类号: TB 535

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)06-0841-06

## Development of a Fiber-Reinforced Composite Material Parameter Tester Based on Laser Non-destructive Scanning

LI Hui, WU Teng-fei, XU Zhuo, HAN Qing-kai

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: LI Hui, E-mail: lh200300206@163.com)

**Abstract:** A material parameter tester of fiber-reinforced composite materials based on the laser non-destructive scanning technique is developed. Firstly, by taking the fiber-reinforced composite beam specimen as an example, the theoretical solutions of natural frequencies and vibration responses are deduced. Then, an appropriate step size is chosen to construct the iterative vector of the material parameters, and the theoretical principle for identifying the fiber-reinforced composite material parameters is explained in details. Next, the excitation platform, laser scanning device, signal generator and data acquisition device are utilized to establish the hardware structures, and the functions as well as the control and measurement advantages of the software and corresponding modules based on LabVIEW are also described. Finally, by using this instrument, the material parameters of three TC500 carbon fiber/resin composite beam specimens in different fiber directions are identified, which are also compared with the material results provided by the manufacturer. The results show that their deviations are in the range of 0.63% ~ 10.61%, which is within an acceptable level. Therefore, the reliability of the developed composite material tester and the effectiveness of the related algorithm have been verified.

**Key words:** fiber-reinforced composite material; material parameter tester; parameter identification; laser non-destructive scanning

纤维增强复合材料(FRP)具有优异的力学性能,被越来越多地应用于航空、航天、船舶、兵器工

收稿日期: 2018-09-07

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51505070); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N150304011, N160313002, N16031200, N170302001); 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资助项目(VCAME201603).

**作者简介:** 李 晖(1982-),男,内蒙古丰镇人,东北大学副教授,博士后研究人员; 韩清凯(1969-),男,山东济宁人,东北大学教授,博士生导师.

业等领域<sup>[1]</sup>,其材料参数包括纤维纵向、横向弹性模量、损耗因子、剪切模量及泊松比等,它们是深入研究复合材料结构静力学及动力学问题的基础<sup>[2]</sup>,准确确定上述基本性能参数,对于复合材料及其结构的力学行为分析与强度评价至关重要。

国内外研究人员针对该类型复合材料参数的辨识开展了大量工作。例如,Araújo 等<sup>[3]</sup>通过实验和有限元仿真方法分别获得结构的固有频率,并构造带权重系数的最小二乘估计函数,进而辨识获得弹性模量  $E_1$  和  $E_2$ ,剪切模量  $G_{12}, G_{13}, G_{23}$  以及泊松比  $\nu_{12}$  和  $\nu_{21}$ 。Bledzki 等<sup>[4]</sup>基于振动测试获得的玻璃纤维/树脂复合薄板的数据,将有限元和响应面法相结合来获得弹性模量  $E_1$  和  $E_2$ ,剪切模量  $G_{12}, G_{23}$  以及泊松比  $\nu_{12}$  等 5 个参数。Hwang 等<sup>[5]</sup>提出了一种结合基因优化算法与振动测试法的混合算法,实现了玻璃纤维/树脂复合材料弹性常数的辨识,还提出了两步法来弥补测试过程中固有频率丢失或者存在较大误差的问题。Matter 等<sup>[6]</sup>构造了实验测试模态损耗因子与数值计算结果的相对误差函数,并提出了一种基于模态阻尼系数来预测复合材料弹性参数和损耗参数的方法。李双蓓等<sup>[7]</sup>以商用 ABAQUS 有限元软件为计算平台,将材料参数辨识转化为极小化目标函数的求解问题,并对硼/环氧简支梁试件的材料参数进行了辨识。

虽然国内外学者针对复合材料参数的辨识开展了大量工作,但绝大多数只是提出了辨识或测试方法,并未从振动利用角度出发研发专用的材料参数测试仪。另外,目前市面上国外的材料测试仪器产品,如瑞典 Hot Disk 公司生产的弹性模量测试仪和德国耐驰公司的动态热机械分析仪 DMA-242E,价格极其昂贵;根据笔者使用经验,上述仪器通常需要多次装卡测试才能获取复合材料在纤维纵向、横向和剪切方向的弹性模量,且一般只能获得损耗角正切值,并不能有效获取剪切方向的损耗因子。为了解决上述问题,本文自主设计并开发了一款基于激光无损扫描的纤维增强复合材料参数测试仪,并详细介绍了相应的辨识原理以及测试仪软、硬件的构成和功能。最后,通过应用研究,证明了该测试仪和软件程序算法的有效性。

## 1 理论求解

为了方便辨识,以纤维增强复合材料梁试件

为例,建立了基础激励下纤维增强复合梁试件的理论模型,并求解其振动特性,如图 1 所示。该复合梁具有正交各向异性性质,由纤维和基体材料组成,有  $n$  层厚度相同的分层,且各层之间牢固粘结,层间无滑移,无相对位移。在该复合梁的理论模型里,假设参考平面为其中面,并建立  $xoy$  坐标系, $\theta$  为纤维方向与整体坐标系  $x$  轴方向的夹角, $a, b$  和  $h$  分别为梁的长、宽和厚度,在  $z$  坐标轴上,每一层位于较低表面  $h_{k-1}$  和较高表面  $h_k$  之间。在图 1 中,1,2 和 3 分别代表纤维纵向、纤维横向和垂直于 1-2 平面的方向。

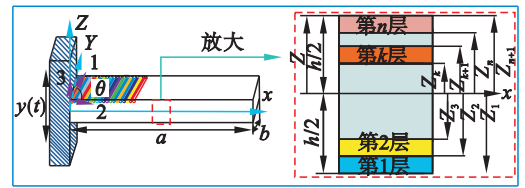


图 1 基础激励下纤维增强复合梁试件的理论模型  
Fig. 1 Theoretical model of fiber-reinforced composite beam under base excitation

假设复合梁试件受到基础激励载荷  $y(t)$  的作用,如图 1 所示,且基础激励的运动表达式为

$$y(t) = Y e^{i\omega t}. \quad (1)$$

其中: $Y$  为激励幅值; $\omega$  为激励频率。

将复合梁的弹性模量表示成如下形式:

$$\left. \begin{aligned} E_1^* &= E_1(1 + i\eta_1), E_2^* = E_2(1 + i\eta_2), \\ G_{12}^* &= G_{12}(1 + i\eta_{12}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:平行纤维方向的复弹性模量、弹性模量和损耗因子分别由  $E_1^*, E_1$  和  $\eta_1$  表示;垂直纤维方向的复弹性模量、弹性模量和损耗因子分别由  $E_2^*, E_2$  和  $\eta_2$  表示;1-2 平面内的复剪切模量、弹性模量和损耗因子分别由  $G_{12}^*, G_{12}$  和  $\eta_{12}$  表示。 $\nu_{12}$  和  $\nu_{21}$  分别为 1,2 方向对应的泊松比。

基于经典层合板理论,可将复合梁的位移场写为

$$\left. \begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) - z \frac{\partial w_0(x, y, t)}{\partial x}, \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) - z \frac{\partial w_0(x, y, t)}{\partial y}, \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:复合梁内的任意一点的位移分别由  $u, v$  和  $w$  表示;时间由  $t$  表示。

由于本文研究的是对称层合梁,其面内振动和横向振动不存在耦合,因此可忽略中面位移  $u_0$  和  $v_0$ ,且正应变  $\varepsilon_z$  和剪应变  $\gamma_{yz}, \gamma_{xz}$  都为 0,即  $\varepsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{xz} = 0$ 。由应变和位移的关系可知,梁内任意一点的应变可表示为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = -2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

当材料主轴方向与整体坐标系之间有一定夹角  $\theta$  时,用应力 - 应变转轴公式计算得到复合梁试件第  $k$  层在整体坐标系下的应力 - 应变关系:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11}^* & \bar{Q}_{12}^* & \bar{Q}_{16}^* \\ \bar{Q}_{12}^* & \bar{Q}_{22}^* & \bar{Q}_{26}^* \\ \bar{Q}_{16}^* & \bar{Q}_{26}^* & \bar{Q}_{66}^* \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

其中:  $\bar{Q}_{11}^*, \bar{Q}_{12}^*, \bar{Q}_{22}^*, \bar{Q}_{16}^*, \bar{Q}_{26}^*$  和  $\bar{Q}_{66}^*$  表达式见文献[8];  $k$  表示复合梁试件的第  $k$  层.

为了便于理论建模,将复合梁所受的基础激励等效为均布惯性力载荷:

$$q(t) = -\rho h \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = \rho h Y \omega^2 e^{i\omega t}. \quad (6)$$

则复合梁的动能为

$$T = \frac{\rho h}{2} \iint_A \left( \frac{\partial w_0}{\partial t} \right)^2 dx dy. \quad (7)$$

其中:  $\rho$  为复合梁试件密度;  $h$  为复合梁试件厚度.

相应地,复合梁的弯曲应变能为

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_{xy} \gamma_{xy}) dx dy dz. \quad (8)$$

复合梁所受的均布惯性力做功为

$$W_q = \iint_A q(t) w_0 dx dy. \quad (9)$$

假设复合梁横向振动的位移可以表示为

$$w_0(x, y, t) = e^{i\omega t} W_{ij}(\xi, \eta). \quad (10)$$

其中:  $\omega$  为圆频率,与激励频率相同;  $W_{ij}(\xi, \eta)$  为振型函数:

$$W_{ij}(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij} p_i(\xi) q_j(\eta). \quad (11)$$

其中:  $a_{ij}$  为待定系数,  $p_i(\xi)$  ( $i=1, \dots, M$ ) 和  $q_j(\eta)$  ( $j=1, \dots, N$ ) 为一系列的正交多项式. 本文研究的悬臂边界条件,详细表达式可见文献[8].

然后,将式(10)代入式(7), (8) 和(9)中,进行化简,忽略谐波分量  $e^{i\omega t}$ ,可以得到复合梁振动的拉格朗日能量函数  $L$  的表达式为

$$L = T + W_q - U. \quad (12)$$

通过使能量函数  $L$  对待定系数  $a_{ij}$  的偏导数为零,即

$$\frac{\partial L}{\partial a_{mn}} = 0, m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N. \quad (13)$$

可以获得  $M \times N$  个非齐次线性代数方程,为了求

解方便,将其写为矩阵形式为

$$(\mathbf{K} + i\mathbf{C} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{a} = \mathbf{F}. \quad (14)$$

其中:  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{M}$  分别为结构刚度矩阵、阻尼矩阵和结构质量矩阵; 广义位移向量  $\mathbf{a} = (a_{11}, a_{12}, \dots, a_{ij})^T$ ;  $\mathbf{F}$  为激振力向量.

对于复合梁的自由振动问题,只须令阻尼矩阵  $\mathbf{C}$  和激振力向量  $\mathbf{F}$  为零,即

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{a} = 0. \quad (15)$$

求解式(15),就可获得复合梁试件的固有频率和振型,并将其代入式(10),可以求解复合梁试件在基础激励载荷下的振动响应. 由于实验测试获得的是复合梁试件的绝对振动响应,即在基础激励位移基础上,还包括梁试件自身的振动响应. 因此,在基础激励载荷下,复合梁试件的振动响应可由  $\lambda(x, y, t)$  表示:

$$\lambda(x, y, t) = y(t) + w_0(x, y, t). \quad (16)$$

## 2 辨识原理

以厂商提供的材料参数均值  $E_1^0, E_2^0, G_{12}^0, \nu_{12}^0$  为中心,考虑  $R_{\text{err}} = 10\% \sim 20\%$ ,给出材料参数的取值范围如下:

$$\left. \begin{aligned} E_1^0(1 - R_{\text{err}}) &\leq E_1 \leq E_1^0(1 + R_{\text{err}}), \\ E_2^0(1 - R_{\text{err}}) &\leq E_2 \leq E_2^0(1 + R_{\text{err}}), \\ G_{12}^0(1 - R_{\text{err}}) &\leq G_{12} \leq G_{12}^0(1 + R_{\text{err}}), \\ \nu_{12}^0(1 - R_{\text{err}}) &\leq \nu_{12} \leq \nu_{12}^0(1 + R_{\text{err}}). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

厂商一般不能提供材料损耗因子的取值,但通常纤维增强复合材料的损耗因子值最大不超过 5%,因此给出其取值范围如下:

$$0 \leq \eta_1 \leq 5\%, 0 \leq \eta_2 \leq 5\%, 0 \leq \eta_{12} \leq 5\%. \quad (18)$$

然后,将 7 个材料参数构造为一维向量  $\mathbf{Q}$ :

$$\mathbf{Q} = [E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \eta_1, \eta_2, \eta_{12}]^T. \quad (19)$$

在各材料参数取值范围内,选取合适的步长  $g$  (例如  $g = 1\%$ ) 构造材料参数的迭代向量:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{Q}^1 \quad \mathbf{Q}^2 \quad \mathbf{Q}^3 \cdots \mathbf{Q}^n]. \quad (20)$$

其中:  $\mathbf{Q}^1 = \mathbf{Q}^1, \mathbf{Q}^2 = g\mathbf{Q}^1, \dots, \mathbf{Q}^n = (n-1)g\mathbf{Q}^1$ .

一方面,通过扫频测试方法获得复合梁试件的某阶固有频率  $\hat{f}_i$ ,并利用共振激励和激光无损扫描测试技术,获取其沿长度方向变化( $x$  方向)的共振振幅曲线  $\lambda(\hat{f}_i)$ ; 另一方面,在相同的激励幅度下,不断迭代计算理论固有频率  $f_i$  和共振振幅曲线  $\lambda(f_i)$ ,使得频率误差函数  $e_{\text{fre}}$  和共振振幅误差函数  $e_{\text{res}}$  分别小于 5% 和 10% 的设定误差,则满足于计算精度要求的  $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \eta_1, \eta_2$  和  $\eta_{12}$  就是辨识的材料参数.



$$e_{fre} = |\hat{f}_i - f_i| \leq 5\%, \tag{21}$$

$$e_{res} = |\lambda(\hat{f}_i) - \lambda(f_i)| \leq 10\%. \tag{22}$$

其中  $i$  为关注的复合梁的模式数.

### 3 材料参数测试仪设计及开发

为了高效准确地获取复合材料参数,本文自行设计开发了基于激光无损扫描的复合材料参数测试仪.

#### 3.1 硬件系统设计及组成

该测试仪的硬件系统主要包括激光无损扫描装置、激振装置、信号发生及数据采集器等. 通过连接这些硬件,最终组配获得了图 2 所示的复合材料参数测试仪,其长、宽、高分别为 550 mm × 330 mm × 380 mm.

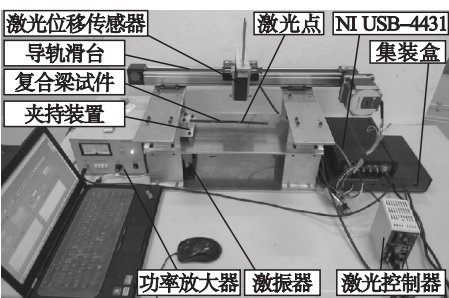


图 2 纤维增强复合材料参数测试仪

Fig. 2 Parameter tester for fiber-reinforced composite material

##### 3.1.1 激光无损扫描装置

激光无损扫描装置主要包括 SOPTOP 激光位移传感器、夹持装置、USB 转 RS485 转换器、导轨滑台、86HS45 步进电机、DM556 电机驱动器和 R-10 控制器(安装在集装箱中)等. 其中,激光位移传感器由夹持装置固定,并布置在导轨滑台上,能够实现水平方向的自由运动.

##### 3.1.2 激振装置

激振装置由联能 JZK-2 型激振器、YE2706A 功率放大器以及激振平台等组成. 首先,将激振器固定于测试仪的底面,并与信号源连接. 然后,将激振器通过传动杆与激振平台连接(平台的四角下方有 4 个均匀分布的弹簧),并将其发出的振动能量,通过基础振动激励的方式传递给激振平台,以实现对其梁试件的基础振动激励.

##### 3.1.3 信号发生及数据采集器

选用 NI USB-4431 信号发生及数据采集器. 可利用其发出正弦、扫频等激励信号,并经功率放大器放大后,传递给激振器;另外,还可对激光位移传感器获取的梁试件的振动响应信号进行

采集. 同时,配合笔记本电脑,可以方便地对激励和响应信号进行存储和分析.

#### 3.2 软件系统设计及开发

所开发的软件系统主要包括激光扫描控制模块、信号发生及采集模块和材料参数辨识模块.

##### 3.2.1 激光扫描控制模块

首先,利用 LabVIEW 软件编写该模块的程序,以实现激光扫描运动控制,程序框图如图 3 所示. 该界面包括了扫描参数设置、手动扫描设置与自动扫描设置三大功能. 在扫描参数设置中,首先需要输入复合梁的长、宽、厚度参数,然后还需设定加、减速扫描距离;在手动扫描设置中,可使用调速转盘和扫描滑块,实现手动调整激光扫描点位置的目的;在自动扫描设置中,可设置激光点的匀速扫描速度以及扫描目标坐标等参数. 另外,点击回归原点按钮,激光点将会自动回到预设的原点位置,并可实时显示激光测点移动时所在的位置坐标.



图 3 激光扫描控制模块

Fig. 3 Module of laser scanning and control

##### 3.2.2 信号发生及采集模块

信号发生及采集模块如图 4 所示. 信号发生模块主要用来对梁试件产生合适的激励信号. 若为定频激励,则需要在该模块中输入激励的频率和激励电压;若为正弦扫频激励,则还需要设置激励频率范围、扫频速率及激振次数. 在完成上述设置的基础上,可以通过该模块对激励信号和激光点响应信号进行采集,并获得相应的时、频域波形.

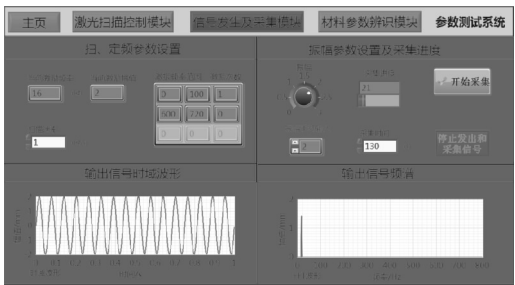


图 4 信号发生及采集模块

Fig. 4 Module of signal generation and acquisition

3.2.3 材料参数辨识模块

材料参数辨识模块如图 5 所示. 在该模块中, 需要在“实验基础数据”部分读取包含梁试件多阶模态的扫频时域信号. 在点击“半功率带宽法”按钮后, 软件会自动辨识扫频测试获得的各阶固有频率和模态阻尼比; 另外, 还需要读取定频激励下多阶模态对应的共振响应信号, 软件会自动绘制出时域波形. 在设置了扫描数据的提取数量后, 通过点击“扫描数据提取并滤波”按钮, 则可自动绘制出定频激励下沿长度方向变化的共振振幅曲线. 最后, 在“理论计算数据”部分, 需要输入厂家所给的可参考的材料参数数值、铺层参数信息, 在点击“迭代求解”按钮后, 软件会自动调用通过 Matlab 编写的后台程序, 并快速辨识获得被测复合梁试件的各项材料参数, 同时绘制出迭代计算获得的共振振幅曲线, 方便与测试结果进行分析和对比.

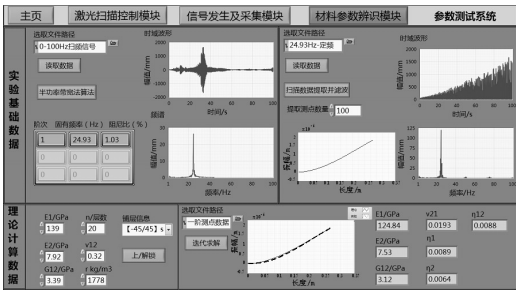


图 5 材料参数辨识模块

Fig. 5 Module of material parameter identification

4 辨识实例

以 3 个不同尺寸的 TC500 碳纤维/环氧树脂基复合梁试件为对象(称之为 A、B 和 C 复合梁, 尺寸分别为 260 mm × 10 mm × 2.68 mm, 100 mm × 10 mm × 2.68 mm 和 200 mm × 10 mm ×

2.68 mm), 利用所开发的参数测试仪, 对其材料参数进行辨识. 该类型复合梁由江西瑞麟复合材料有限公司制备, 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. 厂家给出的参数:  $E_1 = 139$  GPa,  $E_2 = 7.92$  GPa,  $G_{12} = 3.39$  GPa, 泊松比  $\nu_{12} = 0.32$ , 密度  $\rho = 1\,778$  kg/m<sup>3</sup>.

以 A 复合梁为对象说明材料参数辨识的过程. 首先, 将复合梁试件安装在复式工作平台的夹具上, 约束后的长、宽、厚尺寸为 230 mm × 10 mm × 2.68 mm(夹持了 30 mm). 接下来控制激光测点, 使其处于待测复合梁试件的自由端, 并开启激振装置, 在较大的频率范围内进行正弦扫频激振测试, 从而获得复合梁试件前三阶固有频率, 并通过所开发的软件获得激光点的响应信号频谱. 然后, 调节激振装置的频率为 A 复合梁第一阶固有频率, 并在激励幅度为 0.01 g 时激发其达到第一阶共振状态, 通过激光扫描装置移动激光点的位置, 在 2 mm/s 的扫描速度下, 可实现对 A 复合梁从悬臂端到自由端位置的扫描测试. 以 A 复合梁结果为例, 表 1 给出了测试所获得前 3 阶的固有频率以及自由端位置测试获得的共振响应.

表 1 测试获得的 A 复合梁的前 3 阶的固有频率及共振响应

Table 1 First 3 natural frequencies and resonance responses of composite beam A obtained by the experimental test

阶次	1	2	3
固有频率/Hz	24.93	141.53	275.75
共振响应/ $\mu\text{m}$	1.71	1.64	4.62

接着, 利用软件提取每个扫描测点对应的峰值响应, 进而绘制出第一阶共振振幅曲线, 不断重复上述步骤, 可依次测试获得 A 复合梁第二、三阶共振振幅曲线, 如图 6 所示.

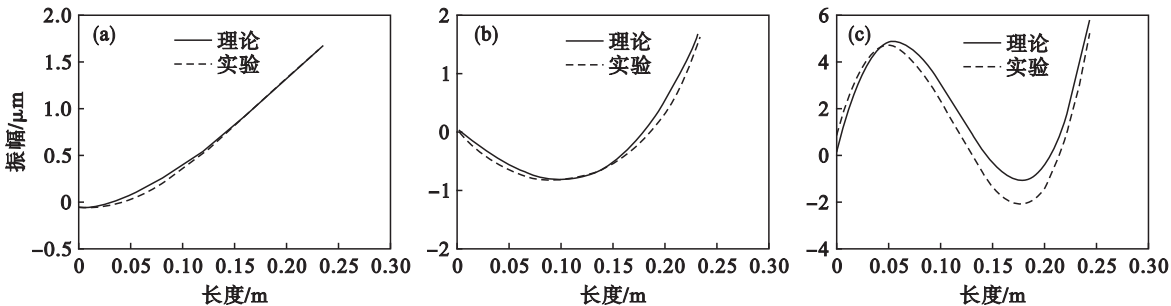


图 6 计算和测试获得的 A 复合梁频域响应曲线

Fig. 6 Frequency response domain curves of composite beam A obtained by calculation and experiment

(a)—第一阶; (b)—第二阶; (c)—第三阶.

最后,在软件中输入  $A$  复合梁试件的长、宽、厚度尺寸,并把厂商提供的材料参数值一并输入作为参考.在设定好激励幅度和迭代误差之后,点击“迭代求解”按钮进行辨识,软件会自动计算  $A$  复合梁的前三阶共振振幅曲线,并与相应的测试曲线不断进行比较.

需要说明的是,对于每阶共振振幅曲线的计

算,取决于提取的响应测点的数量,本次辨识选择了 10 个测点,经过约 5 ~ 6 min 时间,软件系统便可自动识别出被测  $A$  复合梁试件的各项材料参数,如表 2 所示.按照上述步骤,也可完成对  $B$  和  $C$  复合梁试件相关材料参数的辨识,将其结果也一并列入表 2.

表 2 辨识获得的三个复合梁试件的材料参数及其与厂家提供的材料参数的偏差

Table 2 Identified material parameters of three composite beam specimens and the related deviations compared with the ones								
材料参数类别		$E_1/\text{GPa}$	$E_2/\text{GPa}$	$G_{12}/\text{GPa}$	$\nu_{12}$	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_{12}$
厂家提供		139	7.92	3.39	0.32	—	—	—
$A$ 梁 辨识	第一次	125.28	7.12	3.28	0.314	0.008 05	0.006 6	0.008 4
	第二次	124.84	7.53	3.12	0.308	0.008 9	0.006 4	0.008 8
	平均结果	125.06	7.33	3.20	0.311	0.008 7	0.006 5	0.008 6
$B$ 梁 辨识	第一次	122.67	7.23	3.34	0.326	0.008 8	0.007 1	0.008 5
	第二次	125.83	7.17	3.16	0.318	0.008 6	0.006 5	0.008 3
	平均结果	124.25	7.20	3.25	0.322	0.008 7	0.006 8	0.008 4
$C$ 梁 辨识	第一次	126.34	7.17	3.09	0.318	0.008 4	0.006 6	0.008 9
	第二次	123.06	7.33	3.23	0.286	0.008 8	0.006 6	0.008 1
	平均结果	124.70	7.25	3.16	0.302	0.008 6	0.006 6	0.008 5
辨识 偏差/%	$A$ 梁	10.03	7.45	5.60	2.81	—	—	—
	$B$ 梁	10.61	9.09	4.13	0.63	—	—	—
	$C$ 梁	10.29	8.46	6.78	5.63	—	—	—

5 结 论

本文设计和开发了新型的纤维增强复合材料参数测试仪,并利用该仪器辨识获得了两个 TC500 碳纤维/树脂基复合梁试件在纤维纵向、横向和剪切方向的弹性模量、泊松比、损耗因子等 7 个参数.通过与厂家给出的材料参数测试结果进行了对比发现,两者误差在 0.63% ~ 10.61% 之间.实践证明,该测试仪能够达到预期辨识效果,且辨识出的各项材料参数的准确度较高,可以为纤维增强复合材料的参数辨识提供一种新方法和新仪器.

参考文献:

[1] Chu X, Ma L, Li L. A disk-pivot structure micro piezoelectric actuator using vibration mode B11[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44 (sup 1): e561.

[2] Rongong J A, Tomlinson G R. Suppression of ring vibration modes of high nodal diameter using constrained layer damping methods[J]. *Smart Materials & Structures*, 1999, 5(5): 672.

[3] Araújo A L, Soares C M M, Freitas M J M D. Characterization of material parameters of composite plate

specimens using optimization and experimental vibrational data[J]. *Composites Part B: Engineering*, 1996, 27 (2): 185 – 191.

[4] Bledzki A K, Kessler A, Rikards R, et al. Determination of elastic constants of glass/epoxy unidirectional laminates by the vibration testing of plates [J]. *Composites Science & Technology*, 1999, 59(13): 2015 – 2024.

[5] Hwang S F, Wu J C, He R S. Identification of effective elastic constants of composite plates based on a hybrid genetic algorithm[J]. *Composite Structures*, 2009, 90(2): 217 – 224.

[6] Matter M, Gmür T, Cugnoni J, et al. Numerical-experimental identification of the elastic and damping properties in composite plates [J]. *Composite Structures*, 2009, 90 (2): 180 – 187.

[7] 李双蓓,周小军,黄立新,等.基于有限元法的正交各向异性复合材料结构材料参数识别[J]. *复合材料学报*, 2009, 26 (4): 197 – 202.

(Li Shuang-bei, Zhou Xiao-jun, Huang Li-xin, et al. Material parameter identification for orthotropic composite by the finite element method[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(4): 197 – 202. )

[8] 薛鹏程,李晖,常永乐,等.悬臂边界下纤维增强复合薄板固有频率计算及验证[J]. *航空动力学报*, 2016, 31 (7): 1754 – 1760.

(Xue Peng-cheng, Li Hui, Chang Yong-le, et al. Natural frequency calculation and validation of fiber reinforced composite thin plate under cantilever boundary [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(7): 1754 – 1760. )