

基于非线性压缩变换的纤维增强复合薄板 非线性阻尼的时域测试方法

李 晖, 牛 义, 梁晓龙, 闻邦椿

(东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819)

摘 要: 提出了基于非线性压缩变换的纤维增强复合薄板非线性阻尼的时域测试方法。基于非线性压缩变换构造了理论分析信号,并推导获得了复合结构系统非线性阻尼的表达式,明确了从时域测试角度获取非线性阻尼参数的理论原理。编写了 Matlab 算法,并用数值算例证明了该算法的正确性。总结并概括出一套合理、规范的测试流程,并对 TC500 碳纤维/树脂基复合薄板进行了实际测试。实践证明,利用所提出的方法可以有效获得复合薄板在不同衰减时刻对应的阻尼参数,该方法可以用来定量评价不同振动幅值及频率下复合结构的非线性阻尼特性。

关 键 词: 纤维增强复合薄板; 非线性阻尼; 时域测试; 测试方法; 非线性压缩变换

中图分类号: V214.3⁺5; TB535

文献标志码: A

Time-domain test method for nonlinear damping of fiber reinforced composite thin plate based on nonlinear squeezing transform

LI Hui, NIU Yi, LIANG Xiaolong, WEN Bangchun

(School of Mechanical Engineering and Automation,
Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: A time-domain test method for nonlinear damping of fiber reinforced composite thin plate based on nonlinear squeezing transform was proposed. The analytic signal was constructed based on the nonlinear squeezing transform, and the expression of nonlinear damping of the composite structure system was derived, so that the theoretical principles of acquiring the nonlinear damping parameters from the time-domain test view could be clarified. Then, the Matlab algorithm was written and numerical example was used to prove the correctness of the algorithm. The reasonable and standard test procedures were summarized and applied to real measurement of TC500 carbon fiber/resin composite thin plate. It was proved that the proposed method can effectively obtain its damping parameters in different decay time, thus it can be used to quantitatively evaluate nonlinear damping characteristic of composite structure under different excitation amplitudes and frequencies.

Key words: fiber reinforced composite thin plate; nonlinear damping;
time-domain test; test method; nonlinear squeezing transform

收稿日期: 2016-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(51505070, 51375079); 中央高校基本科研业务费专项资金(N150304011)

作者简介: 李晖(1982—),男,副教授,博士后,主要从事阻尼减振技术研究。

引用格式: 李晖,牛义,梁晓龙,等. 基于非线性压缩变换的纤维增强复合薄板非线性阻尼的时域测试方法[J]. 航空动力学报, 2018, 33(6): 1456-1463. LI Hui, NIU Yi, LIANG Xiaolong, et al. Time-domain test method for nonlinear damping of fiber reinforced composite thin plate based on nonlinear squeezing transform[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(6): 1456-1463.

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,因此被广泛应用于航空、航天、汽车工业、船舶、兵器工业等重要领域^[1-2]。目前,工程实际中存在大量通过该类型材料制成的典型复合薄板结构件,如太阳能帆板、航空发动机风扇叶片以及大型风力机叶片等^[3-4],随着它们的结构越来越复杂、工作环境越来越苛刻,其振动超标、磨损、疲劳失效等问题也越来越突出^[5-8]。另外,由于该类型复合材料的阻尼参数呈现非线性特点,其与纤维方向、外界激励能量、激励频率等因素密切相关,其宏观结构还表现出随外界激振幅度及频率变化的阻尼特性(称之为频率依赖性和振幅依赖性)以及非线性的刚度特征(固有频率也随着振幅而改变,称为软式非线性或硬式非线性),这给传统的以线性等效为主的振动测试方法带来很大的挑战。

长期以来,人们在实验研究纤维增强复合梁、板结构件的线性及非线性阻尼特性方面已经做了许多工作,并取得了阶段性的研究成果。来自美国伊利诺伊大学的 Schultz 和空军材料研究所的 Tsai^[9]在 1968 年首次对玻璃纤维/树脂复合悬臂梁的阻尼特性进行了测试,在频率范围 5~10 kHz 内,发现复合梁的阻尼具有频率依赖性,即在不同的激振频率下,复合梁结构表现出不同的阻尼值。经过与金属铝悬臂梁相比较,研究发现纤维方向分别为 0°、22.5°、45°和 90°的复合悬臂梁的阻尼比一般为 1%左右,是金属悬臂梁阻尼值的 5~30 倍。Suarez 等人^[10]采用正弦、随机以及脉冲激励三种方式来获取复合薄板的阻尼,比较了不同激励方式的优缺点,并与传统金属梁结构的阻尼结果进行了比较。Crane 和 Gillespie^[11]搭建脉冲激励实验台,对三类不同材料的复合梁实验件的损耗因子进行了测试,研究发现 90°纤维复合梁的阻尼性能要优于 0°纤维复合梁。Wolfenden 和 Wolla^[12]基于 Granato-Lucke 理论,实验研究了纤维增强铝基复合结构阻尼随应变幅值变化的非线性问题,研究表明短纤维材料结构的应变振幅依赖性要明显强于长纤维结构,并且增大纤维直径也有助于提高结构的阻尼性能。Hadi 和 Ashton^[13]使用悬臂梁弯曲共振法对不同的纤维取向与体积分数的玻璃纤维/树脂基复合梁结构的阻尼特性进行了研究。结果表明,在 100~1000 Hz 内复合梁的阻尼会随着纤维体积分数的升高而降低,且当纤维取向为 30°时,该类型结构的阻尼达到最大值。Kinra 等人^[14]对四

层铝基复合梁的非线性阻尼进行实验研究,采用激光测振仪获取结构的振动响应信号,并通过对数衰减法获得了 0°、15°、30°、45°、60°、75°等多种纤维铺设角度下复合结构的阻尼结果,研究发现纤维铺设角为 60°时,结构的阻尼达到最大值。QIAN Guanliang 等人^[15]研究了一种利用振动测试数据确定复合薄板阻尼性能的方法,同时,考虑了横向剪切变形和滞回阻尼的影响,并与有限元法获得的阻尼结果进行了对比,两者误差在 8.2%以内。黎大志等人^[16]对碳/环氧树脂复合梁结构的阻尼测试方法进行研究,研究认为采用非接触测振方式,且在自由边界条件开展实验,可能会获得最佳的阻尼测试效果。李明俊等人^[17]借助动态热机械分析仪考察了不同边界条件下纤维增强复合梁结构的阻尼性能。研究发现该类型复合结构的内耗都随着结构应变振幅的增加而减少,且结构内耗峰值所对应的温度随应变振幅的增加而向低温方向移动。杨宇昭等人^[18]对国产 JHT300-3K 和 MT300-3K 碳纤维梁结构的阻尼特性也进行了测试,研究发现随着纤维铺设角的增大,结构阻尼性能也增强,且随着激励频率的增大,该类型复合结构的一阶模态损耗因子出现先增大后减小的变化趋势。Chen 等人^[19]在简支边界条件下利用振动台对碳纤维复合薄板结构进行扫频测试,通过对比在不同扫频方向获得的响应信号的频谱及其发生跳跃现象对应的频率,来判断复合结构系统的硬式、软式刚度非线性特征,初步确认了一套可行的非线性振动实验测试方法。

虽然人们对纤维增强复合结构开展了许多实验研究工作,但绝大多数是从线性测试角度来获取阻尼结果,对复合结构系统非线性阻尼特性开展实验研究的相对较少,特别是从时域测试角度研究其非线性阻尼变化及其影响的文献并不多见。因此,关于其阻尼特性的测试研究还应进一步深入。

本文利用了非线性压缩变换对噪声具有较好的鲁棒性、运算效率高、变换原理简单的优势^[20],从时域测试角度,提出了基于非线性压缩变换的纤维增强复合薄板非线性阻尼测试方法。首先,基于非线性压缩变换构造了理论分析信号,并推导获得了复合结构系统非线性阻尼的表达式,明确了从时域测试角度获取非线性阻尼参数的理论原理。然后,编写了 Matlab 程序,并用数值算例证明了上述时域方法的正确性。最后,总结并概括出一套合理、规范的测试流程,并对 TC500 碳

纤维/树脂基复合薄板进行了实际测试。实践证明,利用本文所提出的方法,可以有效获得不同衰减时刻对应的阻尼参数,该方法可以用来定量评价不同激励幅度及频率下复合结构的非线性阻尼特性。

1 理论原理

从信号分析与处理角度来看,时域信号具有物理概念明晰、测试原理简单、信号波形直观等独特优势,因此本文从时域测试角度出发,结合非线性压缩变换技术来研究纤维增强复合薄板的非线性阻尼特性,以下详细说明该方法的理论原理。

根据振动学原理,一个结构系统的阻尼特性决定了其振动能量消耗的快慢,假设结构系统共振时(不论复合结构还是单一材料结构),当其各阶模态耦合现象不严重,可以将其看作单自由度系统,并可通过自由振动衰减法来获取其阻尼参数。即首先利用振动激励设备,激发其达到某阶共振状态,然后切断激励源后,研究其时域信号衰减的快慢程度,进而从时域测试角度来客观评价其阻尼参数的大小。对于本文所研究的纤维增强复合结构,由于其刚度及阻尼参数均随着系统的振幅而发生改变,因而对于这一衰减过程,可以认为复合结构系统的刚度及阻尼随着衰减时间的变化而发生改变,这样可将上述衰减过程用如下的单自由度方程来描述:

$$m\ddot{q}(t) + c(t)\dot{q}(t) + k(t)q(t) = 0 \quad (1)$$

式中 m 为纤维增强复合薄板的模态质量, $c(t)$ 和 $k(t)$ 则分别为纤维增强复合薄板的时变模态阻尼及刚度, $q(t)$ 为对应模态坐标的振动衰减响应。

基于非线性压缩变换技术,推导对纤维增强复合结构进行非线性阻尼测试的理论原理。首先,通过测试可以获得某阶固有频率对应的共振状态下的时域振动衰减响应信号 $q(t)$, 然后对其进行非线性压缩变换,并将变换表达式表示为

$$\bar{q}(t) = P[q(t)] = \frac{S_x(t, \xi)}{S_x^g(t, \xi)} \quad (2)$$

式中 P 表示非线性压缩变换, $\bar{q}(t)$ 是变换后的振动衰减响应信号, $S_x(t, \xi)$ 是信号 $q(t)$ 以 $g_\sigma(t)$ 为窗函数的短时傅里叶变换, $S_x^g(t, \xi)$ 是以原始窗函数的导数 $g'_\sigma(t)$ 为窗函数的短时傅里叶变换。参考文献[21], 短时傅里叶变换可定义为

$$S_x(t, \xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) g_\sigma(\tau - t) e^{-j\xi(\tau - t)} d\tau \quad (3)$$

其中 x 为分析信号, t 为整个分析域的时间, τ 为

窗函数区域内的时间, $g_\sigma(t)$ 是窗函数 $g(t)$ 的一个参数形式, 其可表示为

$$g_\sigma(t) = \frac{1}{\sqrt{\sigma}} g\left(\frac{t}{\sigma}\right) \quad (4)$$

式中 σ 为特定参数, 可以根据具体情况进行调节。

进行非线性压缩变换后, 可以将变换后的信号与原始时域振动衰减信号进行合并, 并获得一组新的分析信号 $Q(t)$, 假设其表达式为

$$Q(t) = q(t) + j\bar{q}(t) \quad (5)$$

新的分析信号 $Q(t)$ 的包络线 $A(t)$ 和瞬时相位 $\phi(t)$ 可分别表示为

$$A(t) = \sqrt{q^2(t) + \bar{q}^2(t)} \quad (6)$$

$$\phi(t) = \arctan[\bar{q}(t)/q(t)] \quad (7)$$

对瞬时相位 $\phi(t)$ 求导数, 则可获得即时频率 $\omega(t)$, 即

$$\phi'(t) = \omega(t) \quad (8)$$

对式(1)进行非线性压缩变换, 可以得到

$$m\ddot{\bar{q}}(t) + c(t)\dot{\bar{q}}(t) + k(t)\bar{q}(t) = 0 \quad (9)$$

需要说明的是, 对式(1)进行非线性压缩变换时, 这里假设时变模态阻尼 $c(t)$ 和时变刚度 $k(t)$ 都是稳定改变的, 即在变换过程中, $c(t)$ 和 $k(t)$ 都为常数, 即

$$H[c(t)\dot{q}(t)] = c(t)H[\dot{q}(t)] = c(t)\dot{\bar{q}}(t) \quad (10)$$

$$H[k(t)q(t)] = k(t)H[q(t)] = k(t)\bar{q}(t) \quad (11)$$

将式(9)两端乘以虚数单位 j 后加到式(1)上, 可得到用分析信号表达的运动方程, 即

$$m\ddot{Q}(t) + c(t)\dot{Q}(t) + k(t)Q(t) = 0 \quad (12)$$

利用式(5)~式(7), 可将式(12)中分析信号的一阶及二阶导数 $\dot{Q}(t)$ 、 $\ddot{Q}(t)$ 用包络线 $A(t)$ 和即时频率 $\omega(t)$ 来表达, 即

$$\dot{Q}(t) = Q(t) \left[\frac{\dot{A}(t)}{A(t)} + j\omega(t) \right] \quad (13)$$

$$\ddot{Q}(t) = Q(t) \cdot$$

$$\left[\frac{\ddot{A}(t)}{A(t)} - \omega^2(t) + 2j \frac{\dot{A}(t)\omega(t)}{A(t)} + j\dot{\omega}(t) \right] \quad (14)$$

将式(13)和式(14)代入到式(12), 整理后可获得

$$m \frac{\ddot{A}(t)}{A(t)} - m\omega^2(t) + k(t) + c(t) \frac{\dot{A}(t)}{A(t)} + j \left[2m \frac{\dot{A}(t)\omega(t)}{A(t)} + m\dot{\omega}(t) + c(t)\omega(t) \right] = 0 \quad (15)$$

令式(15)的实部和虚部都等于零, 就可获得复合结构系统的非线性刚度及阻尼的表达式

$$k(t) = m \left[\omega^2(t) - \frac{\ddot{A}(t)}{A(t)} + 2 \frac{\dot{A}^2(t)}{A^2(t)} + \frac{\dot{\omega}(t)}{\omega(t)} \cdot \frac{\dot{A}(t)}{A(t)} \right] \tag{16}$$

$$c(t) = -m \left[2 \frac{\dot{A}(t)}{A(t)} + \frac{\dot{\omega}(t)}{\omega(t)} \right] \tag{17}$$

2 数值算例

本节用数值算例校验所提出的时域测试方法的正确性,假设阻尼的表达式为 $c(t) = 0.01 \cdot \ln(t+1) + 0.005$,单位为 $(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}$,系统质量 $m = 1 \text{ kg}$.初始振动幅值 $A_0 = 1 \text{ mm}$,频率 $\omega = 200 \text{ Hz}$.

首先,假设初始条件为 $q_0 = 1, \dot{q}_0 = 0, \ddot{q}_0 = 0$,并将复合结构系统的时域衰减信号 $q(t)$ 表示为

$$q(t) = A_0 e^{-c(t)\omega t} \sin(\omega t) \tag{18}$$

所产生的信号如图 1(a)所示。进一步,利用编写的 Matlab 程序对 $q(t)$ 进行非线性压缩变换,并获得包络线,如图 1(b)所示。最后,利用式 (17)来获取复合结构系统的非线性阻尼参数,图 2 分别给出了阻尼辨识结果与已知设定值的对比曲线,从中可以看出,利用该方法获得的阻尼结果与预设的时变阻尼参数差距不大,从而证明了上

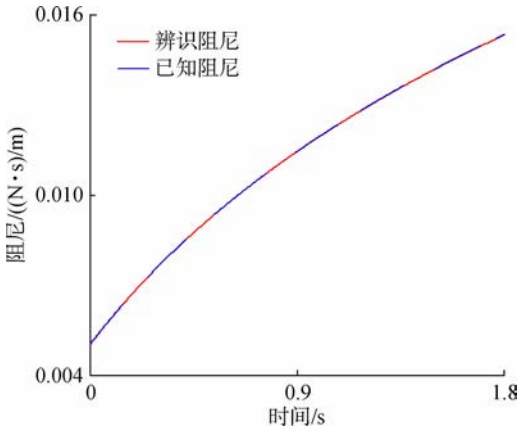


图 2 阻尼辨识结果与设定值的时域曲线

Fig. 2 Time-domain curves of the identified damping results and the known results

述时域方法的正确性。

3 测试流程

根据上述的理论原理,经过反复实验,不断总结,可参照如下的测试流程,从时域角度来获取纤维增强复合薄板的非线性阻尼参数,共包含以下六个关键步骤:

1) 理论计算固有频率

首先,可通过解析或有限元方法对纤维增强复合薄板结构的固有频率进行计算,初步掌握各阶固有频率所在频段及其对应的模态振型的节点、节线的分布位置,以便在实验中确定测试频率范围,掌握模态数量,建立测试模型,科学合理地布置测点。

2) 确定测试所需的边界条件

若在自由态测试,则需采用橡皮绳将被测薄板结构悬挂,确保可以有效模拟自由边界条件;若在约束态下测试,则需要开展“预实验”,即通过力矩扳手来确定被测结构对应夹具上夹紧螺栓的最大力矩值。应以统一规定的力矩测试获得前三阶固有频率,至少测试三次,直到各次测试结果相差不大为止(例如 3~5 Hz),确定为正式测试时所采纳的边界约束条件。若各次测试的频率结果超过 10 Hz,则还需进一步增大拧紧力矩,重复进行预实验多次。同时,还需开展 Maxwell 互异性实验,排除约束边界造成的非线性影响。

3) 确定测试时响应点的位置

参照步骤 1)中获得的固有频率和振型结果,科学地确定测试时响应点的位置。实际测试时,由于纤维增强复合薄板的振型节线复杂,且局部振型丰富,为了避免将响应点布置在结构的节点

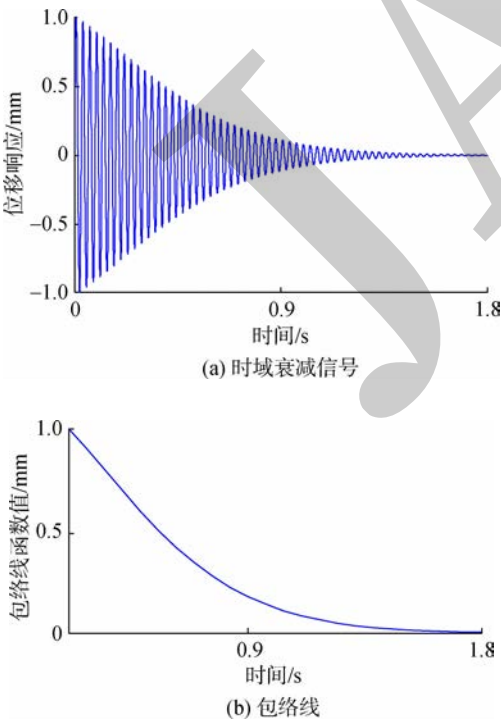


图 1 复合结构系统的时域衰减信号以及非线性压缩变换后获得的衰减信号的包络线

Fig. 1 Time-domain attenuation signal of composite structure system and its envelope obtained by nonlinear squeezing transform method

或节线,应至少获取三个响应点的振动数据,并通过比较后,来获取最佳的响应点的位置。同时,为了减小阻尼参数的测试误差,应通过非接触测振的方式来获取其响应信号。

4) 记录不同激励幅度下某阶固有频率对应的共振状态下的时域衰减信号

首先,通过扫频激励方法获取不同激励幅度下纤维增强复合薄板的某阶固有频率(该固有频率值受到激励幅度的影响,会呈现一定程度的变化)。然后,按照激励幅度依次增大的顺序,利用稳态激励装置(例如,电磁振动台或激振器)激发其达到共振状态,并在其稳定一段时间后,停止激励,最终记录不同激励幅度下某阶固有频率对应的共振状态下的时域衰减信号。

5) 计算纤维增强复合薄板的模态质量

由于实际测试中,复合薄板多处于一端约束、一端自由的悬臂状态,下面以悬臂复合薄板为例,给出计算纤维增强复合薄板的模态质量的方法。首先,可通过双向梁函数法将悬臂复合薄板的振型函数 W 表示为如下形式:

$$W(x,y)=\sum_{i=1}^p\sum_{j=1}^qa_{ij}X_i(x)Y_j(y)\tag{19}$$

式中 a_{ij} ($i=1,2,\cdots,\alpha;j=1,2,\cdots,\beta$) 是与激励幅度有关的待定系数; $X_i(x)$ 表示沿着 x 方向时一端固定,一端自由梁的第 i 阶模态函数; $Y_j(y)$ 表示沿着 y 方向时两端自由梁的第 j 阶模态函数; p,q 为各自模态所考虑的最大阶次,利用该振型函数可获得薄板任一位置的模态质量 $m(x,y)$,其表达式为

$$m(x,y)=\iint_s\rho hW^2(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\tag{20}$$

式中 s 为复合薄板的面积, ρ 为其密度, h 为薄板的厚度。

6) 进行非线性压缩变换并获得非线性阻尼参数

分别对复合薄板的各阶时域衰减信号进行非线性压缩变换处理,去掉不是固有频率的频率成分,排除噪声和其他环境因素的影响,进一步利用式(6)和式(8)来获得各阶时域衰减信号的包络线 $A(t)$ 和即时频率 $\omega(t)$,然后将其代入到式(17),则可获得被测复合薄板的时变阻尼参数 $c(t)$ 。最后,根据式(21)将其转换为常用的模态阻尼比 $\zeta(t)$

$$\zeta(t)=\frac{c(t)}{2m\omega(t)}\tag{21}$$

4 测试实例

下面以 TC500 碳纤维/树脂基复合薄板为研究对象,如图 3 所示,对其非线性阻尼进行测试。该类型复合薄板为对称正交铺设,即 $[(0/90)_s/0/(90/0)_s]$,共有 21 层,每个铺层具有相同的厚度和纤维体积分数,其纤维纵向弹性模量 $E_1=136$ GPa,横向弹性模量 $E_2=7.92$ GPa,切变模量 $G_{12}=3.39$ GPa,泊松比 $\nu_{12}=0.32$,质量为 251 g,密度为 1780 kg/m^3 。通过图 3 所示的夹具来将其夹紧,用以模拟悬臂约束边界条件,夹持长度为 30 mm,夹持后复合薄板的长、宽、厚尺寸分别为 $200\text{ mm}\times130\text{ mm}\times2.36\text{ mm}$ 。

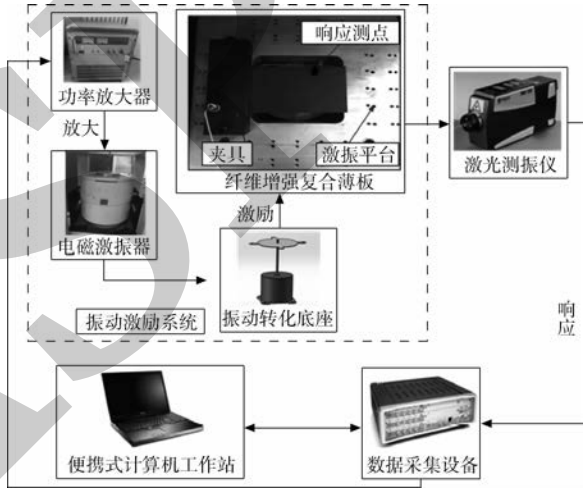


图 3 复合薄板振动测试系统连接示意图
Fig. 3 Connection schematic of vibration test system of composite thin plate

首先,搭建了复合薄板振动测试系统,其连接示意图见图 3,主要包括 Polytec PDV-100 激光测振仪、LMS 16 通道便携式数据采集分析仪、便携式计算机工作站以及由联能 JZK-100 电磁激振器、联能 YE5878 功率放大器以及振动转化底座、激振平台构成的振动激励系统。其中,数据采集设备可发出激励信号,并通过功率放大器将信号放大,进而控制电磁激振器实现振动激励。电磁激振器的振动能量将作用在振动转化底座上,并通过激振平台以基础激励的形式传递给复合薄板结构。

测试时,首先将复合薄板通过夹具固定在激振平台上。接下来进行测点位置的确定,选取振动响应较强又不超出传感器量程的点为响应测点;然后,对纤维增强复合薄板开展扫频测试,分别在 $1g$ 、 $2g$ 和 $4g$ (g 为重力加速度)三个激励幅

度下获得该类型复合薄板的各阶固有频率,结果如表 1 所示。接着,在上述固有频率处激发其达到共振状态,并通过激光测振仪获取其时域衰减信号。同时,对各阶时域衰减信号进行非线性压缩变换。图 4 给出了 1g 激励幅度下,测试获得的第 4 阶共振衰减的时域信号以及经过非线性压缩变换后获得的包络线。图 5 为通过非线性压缩变换辨识获得的第 4 阶阻尼比。同时,图 5 还给出了通过传统的对数衰减法求得的第 4 阶阻尼结果(将时域衰减信号从 0~1.5 s 平均分成 15 段,每段对应的时间为 0.1 s)及其拟合曲线。通过对比可知对数衰减法只适合获得线性阻尼,并不能较好地评价复合薄板随时间变化的阻尼参数。由于不具有连续性,该方法辨识获得的不同衰减阶段的阻尼结果差距较大(虽然通过数据拟合的方法可适当提高阻尼辨识精度),而采用本文提出的方法则可以连续、客观地评价非线性系统在自由衰减过程中的阻尼变化情况。

表 1 不同激励幅度下纤维增强复合薄板的前 6 阶固有频率

Table 1 The first 6 natural frequencies of fiber reinforced composite thin plate under different excitation amplitudes						
激励幅度	固有频率/Hz					
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
1g	48.8	101.6	310.8	416.0	505.2	854.0
2g	47.0	98.8	308.8	414.2	503.8	848.2
4g	46.7	98.0	306.0	410.0	500.2	846.0

最后,按照所提出的测试流程,通过非线性压缩变换方法,还可获得其他阶次对应的非线性阻尼参数,以测试第 2 阶、第 3 阶、第 4 阶时域阻尼为例,图 6 给出了它们在 1g、2g、4g 三个不同激

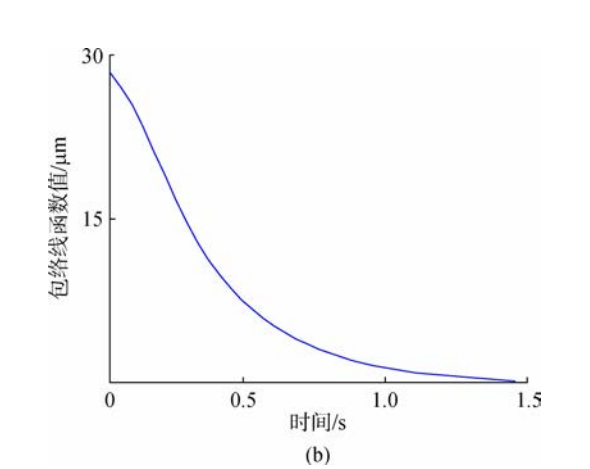
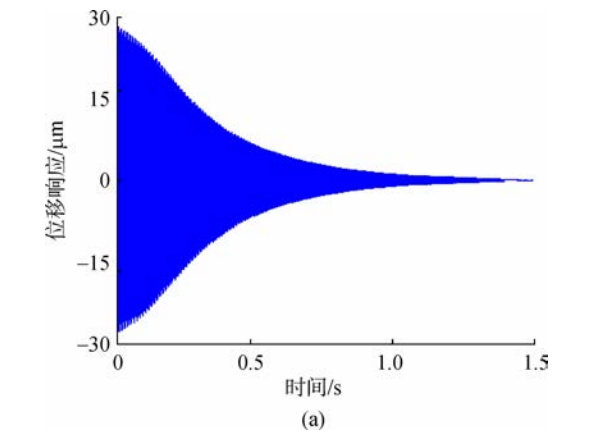


图 4 复合薄板第 4 阶共振衰减的时域信号及其包络线

Fig. 4 Time-domain attenuation signal and its envelope of the 4th resonance response of the composite thin plate

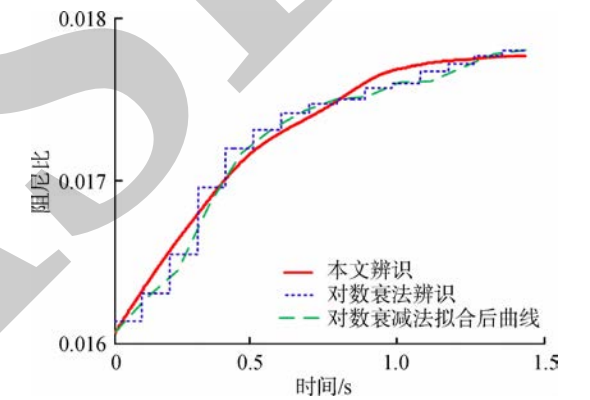


图 5 本文方法和传统对数衰减法分别获得的第 4 阶阻尼比

Fig. 5 The 4th damping ratio obtained by the method used in this paper and traditional logarithmic attenuation method

励幅度下的阻尼结果。从阻尼结果可以看出,随着激励幅度的减少,纤维增强复合薄板的阻尼比呈现逐步增大的趋势。另外,从整个衰减时间范围内来看,该类型复合结构的阻尼也随着衰减时间的持续呈现出逐步增大的趋势(这也进一步验证了第一条结论的正确性,因为随着衰减信号的持续,激励幅度显然是越来越小的)。但随着激励幅度的降低,其阻尼增大的趋势逐步趋于平稳,后续有必要针对这种非线性现象,从理论上建立其非线性阻尼模型,进一步解释其非线性变化的能量耗散机理。

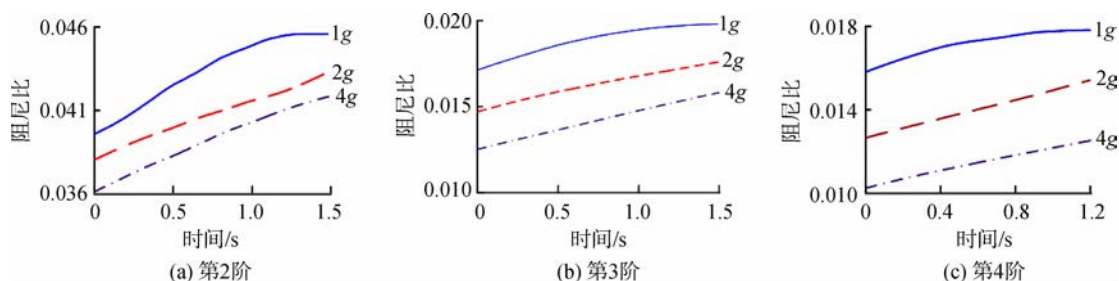


图6 不同激励幅度下通过非线性压缩变换方法获得的纤维增强复合薄板的阻尼比

Fig. 6 Damping ratios of fiber reinforced composite thin plate obtained by nonlinear squeezing transform method under different excitation amplitudes

5 结 论

本文从时域测试角度,提出了基于非线性压缩变换的纤维增强复合薄板非线性阻尼测试方法,该方法共包括6个关键步骤:①理论计算固有频率;②确定测试所需的边界条件;③确定测试时响应测点的位置;④记录不同激励幅度下某阶固有频率对应的共振状态下的时域衰减信号;⑤计算纤维增强复合薄板的模态质量;⑥进行非线性压缩变换并获得非线性阻尼参数。

利用所提出的方法,获得了TC500碳纤维/树脂基复合薄板在不同衰减时刻对应的阻尼参数。实践证明,该方法可以用来定量评价不同激励幅度及频率下纤维增强复合结构的非线性阻尼特性,同时也有助于研究者从理论和实践两个层面揭示其非线性振动特点。

参考文献:

- [1] VINSON J R, SIERAKOWSKI R L, BERT C W. The behavior of structures composed of composite materials[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [2] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [3] 傅恒志. 未来航空发动机材料面临的挑战与发展趋向[J]. 航空材料学报, 1998, 18(4): 52-61.
FU Hengzhi. Challenge and development trends to future aero engine materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1998, 18(4): 52-61. (in Chinese)
- [4] HASELBACH F, NEWBY A, PARKER R. Concepts & technologies for the next generation of large civil aircraft engines[R]. Petersburg, Russia: the 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2014.
- [5] 齐红宇, 温卫东, 崔海潮. 含孔复合材料层合板疲劳寿命预测研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(5): 658-661.
QI Hongyu, WEN Weidong, CUI Haitao. Fatigue life prediction of notched composite material laminates[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(5): 658-661. (in Chinese)
- [6] KAW A K. Mechanics of composite materials[M]. Boca Raton: the Chemical Rubber Company Press, 2005.
- [7] LEYENS C, KOCIAN F, HAUSMANN J, et al. Materials and design concepts for high performance compressor components[J]. Aerospace Science and Technology, 2003, 7(3): 201-210.
- [8] 温卫东, 崔海潮, 徐颖. T300/BMP-316 复合材料板冲击损伤研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(5): 749-754.
WEN Weidong, CUI Haiipo, XU Ying. Research on impact damage of T300/BMP-316 composite laminates[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(5): 749-754. (in Chinese)
- [9] SCHULTZ A B, TSAI S W. Dynamic moduli and damping ratios in fiber-reinforced composites[J]. Journal of Composite Materials, 1968, 2(3): 368-379.
- [10] SUAREZ S A, GIBSON R F, DEOBALD R. Random and impulse techniques for measurement of damping in composite materials[J]. Experimental Techniques, 1984, 8(10): 19-24.
- [11] CRANE R M, GILLESPIE J W. Characterization of the vibration damping loss factor of glass and graphite fiber composites[J]. Composites Science and Technology, 1991, 40(4): 355-375.
- [12] WOLFENDEN A, WOLLA J M. Mechanical damping and dynamic modulus measurements in alumina and tungsten fibre-reinforced aluminium composites[J]. Journal of Materials Science, 1989, 24(9): 3205-3212.
- [13] HADI A S, ASHTON J N. Measurement and theoretical modelling of the damping properties of a uni-directional glass/epoxy composite[J]. Composite Structures, 1996, 34(4): 381-385.
- [14] KINRA V K, RAY S, ZHU C, et al. Measurement of non-linear damping in a Gr/Al metal-matrix composite[J]. Experimental Mechanics, 1997, 37(1): 5-10.
- [15] QIAN Guanliang, HOA S V, XIAO Xinran. A vibration method for measuring mechanical properties of composite, theory and experiment[J]. Composite Structures, 1997, 39(1/2): 31-38.
- [16] 黎大志, 陈树年. 复合材料阻尼测试方法及空气阻尼影响的探讨[J]. 振动与冲击, 1992(1/2): 128-131.
LI Dazhi, CHEN shunian. Study on the damping test meth-

od and the influence of air damping of the composite materials[J]. Journal of Aerospace Power,1992(1-2):128-131. (in Chinese)

[17] 李明俊,黎鹏平,徐泳文,等. 不同边界条件和应变振幅对各向异性层合阻尼结构内耗的影响[J]. 复合材料学报, 2007,24(5):66-71.
LI Mingjun,LI Pengping,XU Yongwen,et al. Influence of different boundary conditions and strain amplitudes on the structural internal friction of anisotropic laminated damped structures[J]. Journal of Composite Materials, 2007, 24 (5):66-71. (in Chinese)

[18] 杨云昭,易凯,王建月,等. 国产碳纤维增强树脂基复合材料阻尼性能实验研究[J]. 强度与环境,2014,41(6):402-428.
YANG Yunzhao, YI Kai, WANG Jianyue, et al. Experi- mental investigation of damping performance of domestic carbon fiber reinforced composite materials[J]. Structure- and Environment Engineering, 2014, 41 (6): 402-428. (in Chinese)

[19] CHEN J E,ZHANG W, GUO X Y, et al. Theoretical and experimental studies on nonlinear oscillations of symmetric cross-ply composite laminated plates[J]. Nonlinear Dynamics,2013,73(3):1697-1714.

[20] WANG Shibin, CHEN Xuefeng, WANG Yan, et al. Non- linear squeezing time-frequency transform for weak signal detection[J]. Signal Processing,2015,113(10):195-210.

[21] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2015:54-56.

(编辑:陈 越)