

基于非线性超声调制方法的损伤识别与定位^{*}

屈文忠, 李拯, 王芝, 肖黎

(武汉大学工程力学系 武汉, 430072)

摘要 在结构健康监测技术中,非线性弹性波谱方法具有对结构微小变化敏感的特性,能够有效地对裂纹等非线性损伤进行识别。笔者针对采用两个持续激励的普通非线性弹性波谱方法不能定位损伤的问题,提出了一种能够识别并且定位铝板中疲劳裂纹的非线性超声调制方法。该方法通过识别脉冲与高频超声波之间的调制现象来进行损伤检测。实验中,压电阵列粘贴于疲劳裂纹铝板表面,汉宁窗调制的正弦脉冲激励和正弦持续激励同时施加在压电阵列上。通过采集不同的作动传感路径的响应,利用短时傅里叶变换对响应进行频域分析,构造损伤指数量化损伤程度,对疲劳裂纹进行识别和定位。实验结果表明,所提出的方法可以成功地检测并定位疲劳裂纹损伤。

关键词 结构健康监测; 疲劳裂纹; 非线性超声调制; 短时傅里叶变换; 压电阵列

中图分类号 TH113

引言

金属材料具有高强度和低成本的优点,在土木、机械和航空航天结构等领域得到广泛应用。在长期使用过程中,由于撞击、化学腐蚀以及疲劳等因素影响,结构中有可能产生裂纹等损伤。缺陷结构检测维修不及时,最终会导致结构失效。对于金属结构微小损伤尤其是疲劳裂纹的检测技术的研究日益受到人们的重视^[1]。传统的线性检测技术基于损伤附近超声波的反射、散射、衰减以及模式转换等变化进行损伤识别,但对于疲劳裂纹等微小损伤不敏感^[2]。与线性检测方法相比,非线性检测方法基于谐波、亚谐波和调制等非线性特征进行损伤识别,对于疲劳裂纹等微小损伤更加敏感^[3]。

非线性超声调制方法是一种典型的基于非线性特征的检测方法^[4]。疲劳裂纹开合、复合材料层脱和螺栓松动等都会产生明显的非线性特征,采用非线性调制方法可以识别这些特征^[5-6]。Meo等^[7]利用非线性弹性波谱方法探测复合材料中的裂纹,在各向异性材料中成功识别裂纹损伤。Kim等^[8]在风力涡轮机工作时,将风机匀速转动的振动作为低

频振动信号,利用振动声调制方法探测风机叶片的疲劳裂纹。Sohn等^[9]利用非线性超声调制方法检测铝板和飞机机翼与机身连接接头试件中的疲劳裂纹。Kazakov等^[10]提出非线性调幅方法,该方法需发射周期性的超声波脉冲,通过脉冲的调幅来识别裂纹。胡海峰等^[11]利用希尔伯特变换对铝板的调制信号进行解调,研究了裂纹长度对振动声调制信号调制强度的影响。Solodov等^[12]研究非线性自调制技术,并通过扫描定位板中的裂纹。

非线性调制方法通常采用两个不同频率的持续正弦信号作为激励,一个是低频波动或振动信号,另一个是高频波动信号。将激励施加在结构的作动器上,利用传感器采集响应并进行频域分析。若频域中存在调制成分则说明结构中存在非线性损伤。然而,由于采用持续激励,上述的非线性调制方法只能识别损伤而不能定位。笔者提出了一种能够定位铝板中疲劳裂纹损伤的非线性超声调制方法,对存在疲劳裂纹的铝板进行了实验研究。实验验证了笔者所提出的非线性超声调制方法能够有效、准确地识别并且定位结构中的损伤,并给出直观的损伤定位图。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51078293,51378402)
收稿日期:2014-08-09;修回日期:2014-12-15

1 非线性超声调制原理

在大幅值激励状态下,结构中疲劳裂纹开合引起刚度变化是一种典型的非线性特征,非线性超声调制方法通过测量非线性特征有效地探测损伤。由两个正弦信号组成的激励同时施加在结构上,其中一个为低频激励,频率为 f_1 ;另一个为高频激励,频率为 f_2 。采集响应并进行频域分析。在频域内,非线性系统的响应与线性系统的响应不同。线性系统内,应力应变关系满足胡克定律

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

其中: σ 为应力; ε 为应变; E 为弹性模量。

当系统受到高、低频信号同时激励,应变表示为

$$\varepsilon = A_1 \sin 2\pi f_1 t + A_2 \sin 2\pi f_2 t \quad (2)$$

其中: A_1 为低频激励的应变幅值; A_2 为高频激励的应变幅值。

将式(2)代入式(1),得

$$\sigma = A_1 E \sin 2\pi f_1 t + A_2 E \sin 2\pi f_2 t \quad (3)$$

线性系统的响应为两个激励的线性叠加。若试件出现疲劳裂纹或其他非线性损伤,系统将变为非线性。非线性系统的应力应变关系可以表示^[8]为

$$\sigma = E(\varepsilon + \alpha_1 \varepsilon^2 + \alpha_2 \varepsilon^3 + \dots) \cong E(\varepsilon + \alpha_1 \varepsilon^2) \quad (4)$$

其中: α_1 和 α_2 为非线性参数。

联立式(4)和式(2),可得应力表达式为

$$\begin{aligned} \sigma = & A_1 E \sin 2\pi f_1 t + A_2 E \sin 2\pi f_2 t + \\ & E\alpha_1 \left(\frac{A_1^2 + A_2^2}{2} - \frac{A_1^2}{2} \cos 2\pi 2f_1 t - \frac{A_2^2}{2} \cos 2\pi 2f_2 t \right) + \\ & E\alpha_1 A_1 A_2 [\cos 2\pi (f_1 + f_2) t - \cos 2\pi (f_2 - f_1) t] \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,非线性系统响应的频率成分包含谐波成分($2f_1$ 和 $2f_2$)和非线性调制成分($f_2 \pm f_1$)。

非线性超声调制方法采用的激励通常是两个持续的正弦信号,该方法可以准确识别铝板结构中疲劳裂纹等损伤,但是不能定位损伤。因为当采用两个持续激励时,超声波会在铝板中朝各个方向不停传播。只要铝板中的任何位置出现疲劳裂纹,超声波都会经过损伤位置,传感网络中的任一条作动传感路径采集的响应都含有非线性特征。即使在没有损伤的路径上也会有调制现象,因此无法找出疲劳裂纹的位置。针对上述问题,笔者提出一种改进的非线性超声调制方法,用来定位铝板中的疲劳裂纹。

该方法的关键是采用脉冲激励,其原理如图 1 所示。若采用短周期的脉冲信号,由于信号周期太少,导致频域成分不明显。综合考虑传感网络分布和频域分析效果,同时为了减少频谱泄露,笔者采用汉宁窗调制的 30 周脉冲信号和持续正弦信号作为激励^[13]。在一条作动传感路径中,脉冲激励和持续正弦激励同时施加在作动器上,只采集传感器特定时间段的响应,以保证采集的响应中只包含超声波激励从最短路径传播过来的信号而没有边界或远离本条路径的损伤反射的信号。若该条路径存在疲劳裂纹损伤,则响应的频域中会有调制现象。组成作动传感网络,通过该方法比较各条路径的非线性特征,可以准确地识别损伤的位置。

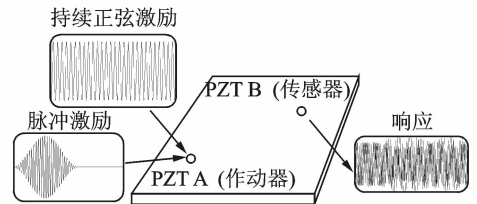


图 1 非线性调制方法原理图

Fig. 1 Schematic of the nonlinear modulation method

2 疲劳实验

利用 MB 公司的 MODAL50 激振器进行疲劳实验,在铝板上生成疲劳裂纹。如图 2 所示,将铝板四周固定在框架上,在板中间位置开个小槽,将激振器顶杆置于小槽附近,利用应力集中生成初始疲劳裂纹。

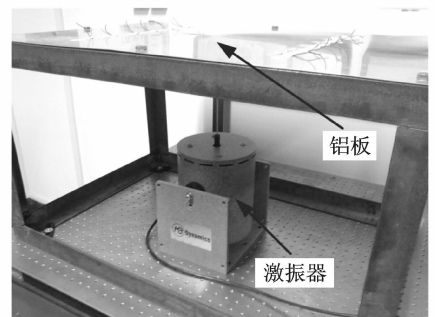


图 2 铝板疲劳实验

Fig. 2 Fatigue testing arrangements

激振器由频率为 5 Hz 的正弦信号驱动,信号峰-峰值为 2 V,功率放大器增益调到最大。在激励大约 535 000 周后,小槽底端出现疲劳裂纹,然后将正弦信号峰-峰值降到 1.5 V,保持增益不变。再经

历 43 200 周激励后,疲劳裂纹长度达到 15 mm,停止疲劳实验。产生疲劳裂纹后,可进行非线性调制实验定位裂纹损伤。

3 非线性超声调制实验

3.1 实验装置与过程

实验装置如图 3 所示,其中铝板尺寸为 900 mm×600 mm×1 mm。铝板的几何形状和压电片(PZT)的位置如图 4 所示。采用 STEMINC 公司的圆形压电片,直径为 12 mm,厚度为 0.6 mm。在铝板表面粘贴两列压电片,每列 6 个。作动传感网络由这两列压电片组成,其中一列压电片作为作动器,另一列作为传感器。压电片的坐标如表 1 所示。疲劳裂纹长度为 15 mm,其中心坐标为 (283.5 mm, 450 mm)。利用 Agilent 公司的 33522A 任意函数发生器产生激励信号;由 TEGAM 公司的 2350 电压放大器将信号放大;利用 Agilent 公司的 DSO-X 3014A 示波器采集信号。

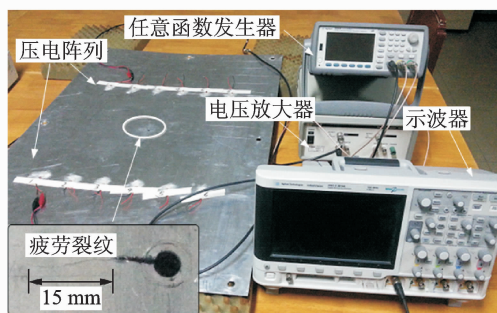


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

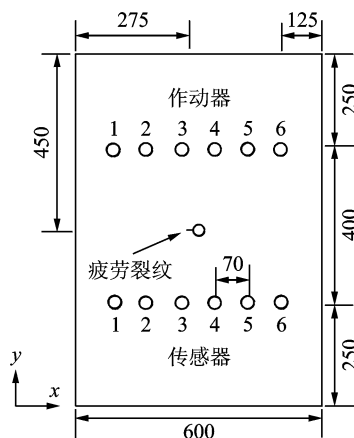


图 4 压电阵列和损伤位置示意图(单位:mm)

Fig. 4 Geometry of plate showing the PZT array and damage position (unit: mm)

表 1 压电片坐标

Tab. 1 Coordinates of transducers

传感器	$L_{x,y}/\text{mm}$	作动器	$L_{x,y}/\text{mm}$
ACT ₁	(125,250)	SEN ₁	(125,650)
ACT ₂	(195,250)	SEN ₂	(195,650)
ACT ₃	(265,250)	SEN ₃	(265,650)
ACT ₄	(335,250)	SEN ₄	(335,650)
ACT ₅	(405,250)	SEN ₅	(405,650)
ACT ₆	(475,250)	SEN ₆	(475,650)

汉宁窗调制的 30 周 50 kHz 正弦脉冲和 170 kHz 的正弦波作为激励信号,电压峰-峰值均为 50 V。利用 BNC 三通接头,将两个激励信号同时施加在 1 个压电片(作动器)上。170 kHz 的正弦波信号持续施加在作动器上,以脉冲信号开始施加在作动器上作为传感器测量响应的零点。同样的激励信号轮流激励 6 个作动器(ACT₁~ACT₆),每当激励 1 个作动器时,6 个传感器(SEN₁~SEN₆)同时记录响应,称这些响应为测量信号。由于每条作动传感路径长度不同,这必然会影响到各条路径非线性特征的比较。在频域内,距离较短的完整路径的响应在调制频率 220 kHz 处的值有可能比距离较长的损伤路径的值大。因此,直接比较各条作动传感路径的调制成分会导致错误的判断。为了避免路径长度不同的影响,必须引入参考信号。现将只有脉冲信号施加在作动器上时传感器的响应作为参考信号。由于各条路径的参考信号在频率 220 kHz 值的大小同样受到路径长度不同的影响,故将各条路径测量信号在频率 220 kHz 处的值减去参考信号在频率 220 kHz 处的值便可去除路径长度不同的影响。相减后的值可以准确表征各条路径的非线性特征。

3.2 损伤指数

构造损伤指数量化各条路径的非线性特征。以 ACT₄~SEN₆(完整路径)和 ACT₅~SEN₁(损伤路径)这两条路径为例说明。利用短时傅里叶变换(short-time Fourier transform,简称 STFT)计算这两条路径测量信号和参考信号的频谱^[14],计算结果如图 5 所示。根据式(5)中的理论分析,损伤路径响应频谱图中应包含脉冲激励倍频信号频谱 100 kHz 和非线性调制信号差频频谱 120 kHz 以及和频频谱 220 kHz。由于实验中铝板上的疲劳裂纹非线性程度较弱以及实验过程中噪声干扰,响应信

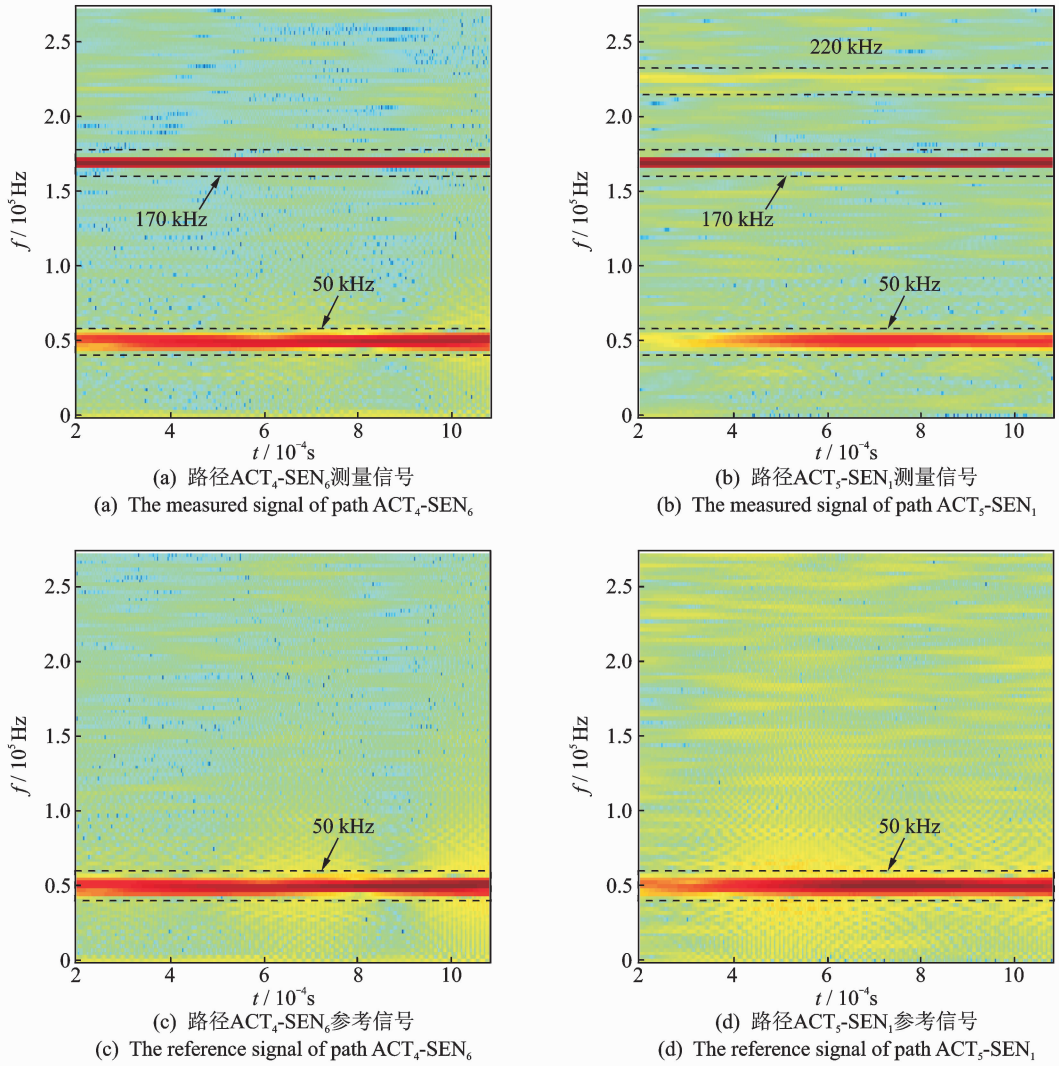


图 5 响应的频谱

Fig. 5 The spectrograms of responses

号频谱中,脉冲激励倍频信号频谱 100 kHz 和非线性调制信号差频频谱 120 kHz 较弱,无法与背景噪声区分,非线性调制信号和频频谱 220 kHz 较强。因此,选择 220 kHz 的调制成分构造损伤指数。需要说明的是,笔者主要研究脉冲激励 50 kHz 与持续正弦激励 170 kHz 之间的非线性调制现象,选取的分析频率范围为 0~270 kHz,故频谱图中没有显示出持续正弦激励倍频信号频谱 340 kHz。

损伤指数通过识别频谱的调制现象构造,考虑到各条路径长度不同,需利用参考信号来避免路径长度不同的影响。选取频率范围为调制频率 220 kHz,在该范围内用测量信号的频谱直接减去参考信号的频谱得到损伤指数。为方便起见,参考信号的频谱结果记为 $X_r(t, f)$,测量信号的频谱结果记为 $X_m(t, f)$ 。损伤指数定义为

$$DI = \sum_{t=t_1}^{t_2} \sum_{f=f_1}^{\hat{f}_2} |X_m(t, f)| - \sum_{t=t_1}^{t_2} \sum_{f=f_1}^{\hat{f}_2} |X_r(t, f)| \quad (6)$$

其中: t_1 和 t_2 分别为信号采集的开始时间和结束时间; \hat{f}_1 和 \hat{f}_2 为选取的频率范围。

由于每次激励一个作动器,6 个作动器轮流激励,因此将各条路径的损伤指数分为 6 组,每组包含一个作动器到 6 个传感器的 6 条路径的损伤指数,各组之间相互没有影响。为保证各组损伤指数在定位损伤时的权重相同,将每组的 6 个损伤指数进行归一化,最终得到每条路径的损伤指数。所有路径的损伤指数如表 2 所示,损伤指数值越大,表明该路径上存在损伤的可能性越大,或者损伤距离路径越近。

表2 各条路径的损伤指数

Tab. 2 Damage index of different paths

DI	SEN ₁	SEN ₂	SEN ₃	SEN ₄	SEN ₅	SEN ₆
ACT ₁	0.272 2	0.792 6	0.778 7	0.471 0	1.000 0	0.401 1
ACT ₂	0.442 9	0.748 5	1.000 0	0.481 3	0.608 9	0.543 5
ACT ₃	0.493 9	0.768 1	1.000 0	0.365 7	0.718 8	0.365 4
ACT ₄	0.735 7	1.000 0	0.927 3	0.286 0	0.231 0	0.182 0
ACT ₅	1.000 0	0.953 7	0.622 6	0.675 1	0.727 5	0.524 6
ACT ₆	0.717 1	0.438 0	0.999 9	1.000 0	0.268 7	0.613 5

3.3 损伤定位方法

传感网络中各检测点存在损伤的概率由各条作动传感路径的损伤指数决定,检测点与某条路径的距离决定了该条路径对该点计算损伤存在概率时所起作用的大小。路径与检测点的距离越大,所起的作用越小,于是令作动传感路径对损伤存在概率计算的影响符合正态分布^[15]

$$f_k(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(r_k - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

在以第 k 条作动传感路径的作动器和传感器为焦点的椭圆区域内定义 $r_k = \frac{(l_{pa} + l_{pb})}{l_k} - 1$, l_k 为作动器与传感器的距离, l_{pa} 和 l_{pb} 分别表示某个检测点 (x, y) 到作动器和传感器的距离。当检测点位于第 k 条作动传感路径上, $f_k(x, y)$ 应取最大值,此时 $l_{pa} + l_{pb}$ 等于 l_k , 即 $r_k = 0$, 故 μ 应该设定为 0。根据铝板的大小和压电片之间的间隔, 将 σ 设定为 0.02 mm。于是, $f_k(x, y)$ 为第 k 条作动传感路径对检测点 (x, y) 判断损伤存在性的影响程度。为了减少计算量, 只计算包含压电阵列区域 (450 mm × 500 mm) 内的检测点 (像素点), 精度为 1 mm。假设利用作动传感网络的 n 条路径来探测损伤, 则在某个位置存在损伤的概率^[15]为

$$p(x, y) = \sum_{k=1}^n p_k(x, y) = \sum_{k=1}^n DI_k f_k(x, y) \quad (8)$$

其中: DI_k 为第 k 条路径的损伤指数; $p_k(x, y)$ 定义为根据第 k 条路径, 像素点 (x, y) 上存在损伤的概率。

利用 36 条作动传感路径定位损伤结果如图 6 所示, 图中红色圆圈表示作动器和传感器的位置, 短线表示疲劳裂纹的位置。像素点红色越深表明疲劳裂纹位于该点的概率越大。从图中可以看出, 疲劳裂纹位于红色最深的区域。实验结果表明, 非线性超声调制方法能准确定位损伤。

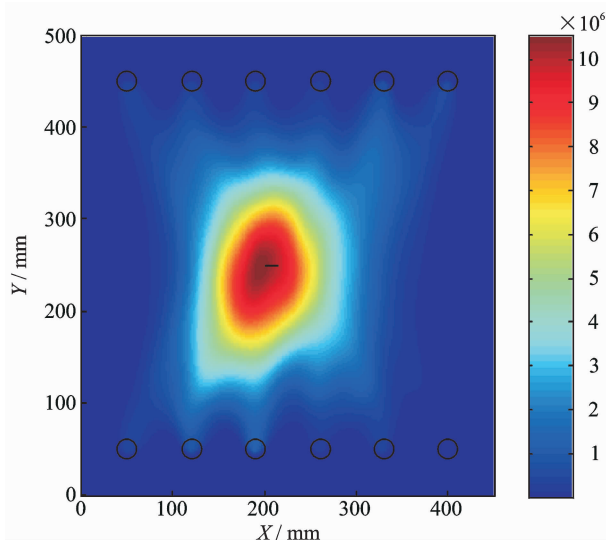


图6 利用36条路径定位损伤

Fig. 6 Damage imaging constructed with 36 actuator-sensor paths

4 结束语

笔者提出了一种基于非线性超声调制技术的损伤检测方法, 阐释了其基本原理并进行相关实验。该方法采用脉冲信号作为激励, 克服了传统非线性超声调制方法不能定位损伤的缺点。实验中, 通过在铝板上粘贴压电片构成传感网络, 利用短时傅里叶变换对各条路径的响应信号进行频域分析, 通过脉冲和持续正弦激励的非线性调制现象构造损伤指数, 量化各条路径的非线性特征, 通过定位算法进行损伤定位。实验结果表明, 笔者提出的非线性超声调制方法可以准确定位铝板中的疲劳裂纹损伤。该方法不仅可以识别和定位疲劳裂纹, 对于其他非线性损伤同样有效。

参 考 文 献

- [1] Sohn H, Farrar C R, Hemez F M. A review of structural health monitoring literature: 1996-2001[R]. [S. l.]: Los Alamos National Laboratory, LA-13976-MS, 2004.
- [2] Kim J Y, Jacobs L J, Qu J, et al. Experimental characterization of fatigue damage in a nickel-base super alloy using nonlinear ultrasonic waves [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 120(3): 1266-1273.
- [3] Zaitsev V, Nazarov V, Gusev V, et al. Novel nonlin-

- ear-modulation acoustic technique for crack detection [J]. *NDT & E International*, 2006, 39(3): 184-194.
- [4] Van Den Abeele K E A, Johnson P A, Sutin A. Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, part I: nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS) [J]. *Research in Non-destructive Evaluation*, 2000, 12(1): 17-30.
- [5] Duffour P, Morbidini M, Cawley P. A study of the vibro-acoustic modulation technique for the detection of cracks in metals[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 119(3): 1463-1475.
- [6] Klepka A, Staszewski W J, Jenal R B, et al. Nonlinear acoustics for fatigue crack detection-experimental investigations of vibro-acoustic wave modulations [J]. *Structural Health Monitoring*, 2012, 11(2): 197-211.
- [7] Meo M, Polimeno U, Zumpano G. Detecting damage in composite material using nonlinear elastic wave spectroscopy methods[J]. *Applied Composite Materials*, 2008, 15(3): 115-126.
- [8] Kim S, Adams D E, Sohn H. Crack detection on wind turbine blades in an operating environment using vibro-acoustic modulation technique[C]// *Aip Conference Proceedings*. Denver, America: American Institute of Physics, 2013, 1511(1): 286-293.
- [9] Sohn H, Lim H J, DeSimio M P, et al. Nonlinear ultrasonic wave modulation for online fatigue crack detection [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333(5): 1473-1484.
- [10] Kazakov V V, Sutin A, Johnson P A. Sensitive imaging of an elastic nonlinear wave-scattering source in a solid [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(4): 646-648.
- [11] 胡海峰, 胡葛庆, 秦国军. 非线性振动声调制信号耦合特征分析[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(23): 68-76.
- Hu Haifeng, Hu Niaoqing, Qin Guojun. Coupling Analysis of Nonlinear Vibro-acoustic Modulation Signals [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(23): 68-76. (in Chinese)
- [12] Solodov I, Wackerl J, Pfeleiderer K, et al. Nonlinear self-modulation and subharmonic acoustic spectroscopy for damage detection and location [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(26): 5386-5388.
- [13] 张宇, 余龙, 闫云聚. Lamb波结合相控阵技术的结构损伤检测[J]. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(6): 977-980.
- Zhang Yu, Yu Long, Yan Yunju. Application of phased array technique in lamb wave based structural damage detection[J] *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(6): 977-980. (in Chinese)
- [14] Michaels J E, Michaels T E. Detection of structural damage from the local temporal coherence of diffuse ultrasonic signals[J]. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. *IEEE Transactions*, 2005, 52(10): 1769-1782.
- [15] Dong Wang, Lin Ye, Ye Lu. A probabilistic diagnostic algorithm for identification of multiple notches using digital damage fingerprints (DDFs)[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(12): 1439-1450.



第一作者简介: 屈文忠,男,1968年8月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为振动工程和结构健康监测等。曾发表《Lamb wave damage detection using time reversal DORT method》(《*Smart Materials and Structures*》2013, Vol. 22, No. 4)等论文。
E-mail: qwz@whu.edu.cn