

# 方向性损伤的 Lamb 波压电线阵扫描成像与评估<sup>\*</sup>

王 强

(南京邮电大学自动化学院 南京, 210023)

**摘要** 对方向性损伤的 Lamb 波定量监测与评估方法进行了研究,采用了线性压电阵列布置方法,基于传感阵列各阵元捕获到的 Lamb 波损伤散射信号之间的相位情况,扫描方向性损伤反射信号的相位延迟信息,实现损伤和方向中心位置的判定。根据判定损伤方向,通过线阵旋转处理,研究改进了时间反转损伤成像评估方法,实现方向性损伤的成像和评估。在铝板结构上的实验研究表明,该方法可以实现对损伤方位和尺寸的定量评估,较现有成像方法具有更好的抗干扰性和准确性。

**关键词** 结构健康监测; 损伤评估; 成像; 方向性损伤; Lamb 波

**中图分类号** TP206<sup>+</sup>.1; TH17

## 引 言

结构健康监测技术的研究意义在于实现实时结构损伤监测以及对结构健康状态变化和安全性评估,由于对保障航空航天、高速列车、桥梁等基础设施结构的安全性具有重要意义,受到了广泛的关注<sup>[1]</sup>。在现有结构健康监测技术中,由于对传播距离远且对微小损伤敏感,Lamb 波结构健康监测技术被认为是最有效且最具应用前景的结构损伤在线监测和诊断方法<sup>[1-3]</sup>。随着对技术要求的不断提高,以单纯定位和定性评估为主的损伤监测方法,很难为结构安全性评价提供必要的支撑,结构损伤定量评估技术势在必行。针对上述问题,笔者通过分析监测过程中损伤引起的 Lamb 波信号反射和散射变化,结合相控阵理论和时间反转成像机理<sup>[4-6]</sup>,提出 Lamb 波压电线阵定向扫描损伤成像与评估方法,实现对损伤细节信息的分析提取、成像和定量评估,并给出了实验研究和验证。

## 1 主动 Lamb 波损伤监测基本原理

Lamb 波是存在于板壳类结构中的一种超声导波,具有频散及多模特性,其传播特性<sup>[1]</sup>可由式(1)所示的 Rayleigh-Lamb 方程来描述

$$\frac{\tan \beta D}{\tan \alpha D} = - \left[ \frac{4\alpha\beta k^2}{(k^2 - \beta^2)^2} \right]^{\pm 1} \quad (1)$$

其中: $D$  为板厚度; $\alpha^2 = (\omega^2/c_1^2) - k^2$ ;  $\beta^2 = (\omega^2/c_2^2) - k^2$ ;  $\omega$  为角频率;上标正号对应于对称模式 S;负号对应于反对称模式 A; $c_1$  为横波波速; $c_2$  为纵波波速;波数  $k = \omega/c_3$ ,  $c_3$  为 Lamb 波的相速度。

为抑制多模及频散特性带来的影响,目前大多数的研究均采用窄带激励信号,通过控制不同的信号中心频率来获得期望的 Lamb 波模式<sup>[7]</sup>。

基于压电阵列的 Lamb 波损伤监测技术中,按照相邻阵元间隔与激发出的 Lamb 波波长之间的对应关系,大致分为分布式阵列和密集阵列,典型阵列方式如图 1 所示。前者的阵元分散布置在待监测区域中,各阵元轮流作为激励器(其他阵元同时作为传感器),扫查待测结构,损伤引起直达波信号变化或损伤散射信号被各传感器捕获后,经过信号处理和特征参数提取,实现损伤的定位或成像<sup>[1]</sup>;后者通过控制各阵元在激发和传感 Lamb 波过程中的触发时刻,实现对波源信号相位的相干合成,以达到期望方向上激励信号和损伤反射信号的相干增强<sup>[1]</sup>,并实现损伤的定位监测和成像。

上述方法对于通孔、腐蚀及复合材料脱层等类圆损伤,由于反射或散射角度方向分散,容易被各传感器捕获,因此效果较好<sup>[8]</sup>。然而,对于具有一定方向和角度的损伤而言,现有的技术方法监测效果受

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(11202107);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20113223120008);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NJ20140014);中国博士后科学基金资助项目(2015M570401)  
收稿日期:2015-07-07;修回日期:2016-07-11

到限制而难以准确给出损伤定量细节估计。如图 1 所示,分布式压电阵列中阵元较为分散,满足信号反射角度关系的激励器/传感器组较少,尤其当损伤较小时,很难估计出损伤的方向、长度等信息。以相控阵技术为代表的密集阵列方法,对方向敏感性高,然而受监测原理的限制,一方面与分布式阵列类似,当损伤的存在方向和位置与密集阵不能存在入射、反射关系时,损伤引起的反射或散射信号不能返回到线阵,从而探测不到损伤,且这一现象发生的概率较大;另一方面相控阵方法的计算参数为角度、距离,主要反映定位信息,虽然可分析得出损伤的方向信息,但很难同时给出方向与该方向上的长度尺寸信息<sup>[7]</sup>。

## 2 Lamb 波压电线阵方向性损伤扫描成像监测方法原理

针对上述问题,受现有的压电阵列损伤监测方法的启发,将损伤诊断过程分为两步:首先,对待测结构区域进行扫描,并根据损伤散射信号相位信息获得方向信息;其次,在测得方向上根据损伤散射信号能量分布重构损伤图像,获得损伤长度和范围信息,从而得到对方向性损伤细节信息的评估。

### 2.1 损伤方向扫描判定

借助于相控阵监测方法中对反射信号相位信息敏感的原理来探测损伤的方向。扩大线性阵元间的距离使之成为稀疏线阵,传感的范围得到扩大,如图 2 所示。此时阵元间距已不满足机理过程中的信号波阵面相干条件,无法控制实现期望方向上的合成波阵面,因此采用单一阵元激励。由于阵元较为分散,相对于损伤而言,监测信号的入射方向具有较大的范围和角度。监测过程中,选择除两端以外的

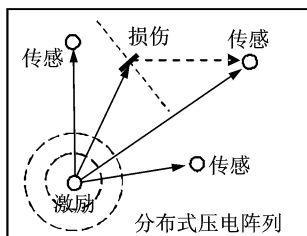


图 1 典型压电阵列形式监测方向性损伤

Fig. 1 Typical pb-based lanthanum doped zirconate titanates (PZT) array for directional damage monitoring

阵元进行轮流激励,其他阵元作为传感器接收损伤反射信号。当某一阵元激发出的信号垂直入射损伤反射面时,损伤反射信号将沿入射方向返回到线阵。远场情况下,该反射信号场近似为线性波阵面,从而可以通过调理激励源相邻传感器信号中的损伤反射信号相位就可以得到损伤方向。

具体而言,通过损伤反射信号相位信息,即到达时间差,对损伤的方向和位置进行准确判定。假设损伤方向的法线与线阵的夹角为  $\theta$ ,当第  $i$  个阵元作为激励器时,损伤反射信号同向返回到线阵,则该信号返回至第  $j$  个阵元和第  $i$  个阵元的相位时间差  $\Delta t_{ji}$  为

$$\Delta t_{ji} = \Delta s/v = (j-i)d \cos\theta/v \quad (2)$$

其中: $v$  为 Lamb 波波包的群速度; $\Delta s$  为信号沿  $\alpha$  方向传播时到第  $j$  个阵元和第  $i$  个阵元的行程差; $d$  为阵元间距。

以  $\theta$  为自变量,将各传感阵元获得的损伤反射信号延时  $\Delta t_{ji}$ ,补偿由于行程差引起的相位时间差,则当  $\theta$  恰为损伤方向法线与线阵的夹角时,各传感信号中的损伤反射信号到达时间实现同步。将延时补偿后的各损伤反射信号进行叠加,此时会获得最高峰值,从而确定  $\theta$  值。为便于确定损伤的中心位置信息,在处理过程中引入空间窗,仅选择激励阵元两侧对称有限个传感阵元的信号带入计算,避免出现多个峰值。此时,激励阵元编号  $i$  和损伤方向信息  $\theta$  值可由式(3)确定

$$[i, \theta] = \max \left[ \sum_{j=i-n}^{i+n} f_{ij} \left( t - \frac{(i-j)d \cos\theta}{v} \right) \right]_{i=n+1; N-n} \quad (3)$$

其中: $n$  为激励阵元两侧选择带入运算的传感阵元数量,本研究选定为 2,构成由激励阵元在内的 5 个阵元组成的空间窗; $f$  为损伤反射信号;下标为阵元编号; $N$  为阵元总数; $d$  为阵元间距。

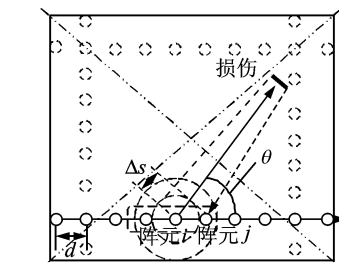
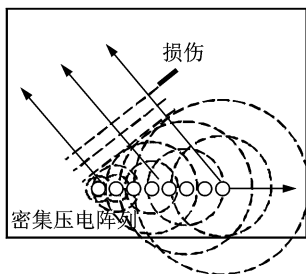


图 2 Lamb 波压电线阵方向性损伤扫描成像监测原理

Fig. 2 Lamb wave and linear PZT array based directional damage scanning imaging and monitoring

按照上述原理过程,单一线阵理论上并不能完全覆盖所有区域和方向,各激励阵元理论可以探测的角度 $\theta_s$ 、损伤长度 $l$ 以及阵元间距 $d$ 之间应满足

$$\sin\theta_s \geq l/2nd \quad (4)$$

针对这一问题,可在测结构区域的四边各布置一组线阵,实现与线阵夹角方向从 $45^\circ \sim 135^\circ$ 的区域探测。理论上两组线阵即可实现所有可能的损伤方向判断,然而受远场假设的限制,在应用中至少需要3组线阵,弥补近场情况(靠近线阵区域)下的监测扫描误差,提高监测的准确性。为直观展现,笔者采用如图2所示的线阵布置方法进行阐述。由于原理过程相同,仅选择其中一组线阵进行分析。

## 2.2 损伤成像与信息提取

现有的 Lamb 波损伤成像方法中,时间反转成像方法是较为成熟的技术之一<sup>[9-10]</sup>。与其他成像方法处理过程一样,是一种搜索融合成像过程,其成像赋值<sup>[10]</sup>可以表示为

$$\begin{cases} S(x, y) = \sum_j A_j f_j \left( \frac{R_{xy}^a + R_{xy}^s}{v} \right) \\ R_{xy}^a = \sqrt{(x - x_j^a)^2 + (y - y_j^a)^2} \\ R_{xy}^s = \sqrt{(x - x_j^s)^2 + (y - y_j^s)^2} \end{cases} \quad (5)$$

其中: $S(x, y)$ 为结构中点 $(x, y)$ 的幅度值; $f$ 为损伤反射信号; $A$ 为补偿系数,用来补偿不同的传播衰减; $(x^a, y^a)$ 和 $(x^s, y^s)$ 分别为损伤放射信号对应的激励器和传感器坐标。

其基本原理如图3实线所示。在应用过程中,遍历搜索会带来伪损伤的可能。已有研究表明,基于线性阵列的时间反转损伤成像方法对线状边界较为敏感<sup>[8]</sup>,易对成像结果带来干扰。

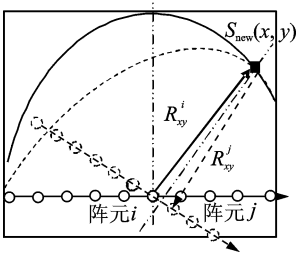


图3 方向性损伤成像原理

Fig. 3 Directional damage imaging principle

基于此,笔者在损伤方向扫描基础上改进成像方法,实现对损伤的成像和信息提取。由于已知损伤的方向,以确定的激励阵元为中心,将线阵旋转至相同的方向。由于结构边界等区别于损伤的方向,线阵旋转过程中各自的反射信号相关关系被破坏,仅存损伤方向上的反射信息;同时,根据时间

反转成像原理中的椭圆规则,在已知损伤方向的基础上,对可能的损伤成像区域可以作进一步的约束,仅对椭圆短轴与椭圆的交点及其附近区域成像赋值,如图3所示。据此,对于判定后的损伤方向 $\theta$ 以及激励阵元 $i$ ,损伤成像赋值过程可表述为

$$\begin{cases} S_{\text{new}}(x, y) = \sum_{j=1}^n A_j f_j \left( \frac{R_{xy}^i + R_{xy}^j}{v} \right) e^{-\frac{\sigma}{v} |i} \\ R_{xy}^i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \\ R_{xy}^j = \sqrt{(x - x_j + \Delta s \cos\theta)^2 + (y - y_j + \Delta s \sin\theta)^2} \end{cases} \quad (6)$$

其中: $r$ 为当前点 $(x, y)$ 到所在椭圆短轴和椭圆交点的距离; $\sigma$ 为衰减系数,本研究取1; $R_{xy}^i, R_{xy}^j$ 分别为当前点 $(x, y)$ 到激励阵元 $i$ 和线阵旋转后的传感阵元 $j$ 的距离。

由于线阵中各传感信号的传播距离差异较小,因此本研究中补偿系数 $A$ 取定值1。在成像的阈值化结果中,通过计算非零像素点端点坐标,可以得到损伤的尺寸信息。

## 3 实验研究

### 3.1 实验设备及过程

为验证上述方法的有效性,在6061铝板结构上进行实验验证。试件尺寸为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ,在结构一侧距边界 $100 \text{ mm}$ 处布置压电线阵,数量为15,间距为 $30 \text{ mm}$ ,压电片直径为 $8 \text{ mm}$ ,厚度为 $0.48 \text{ mm}$ 。在实验试件表面建立坐标系,坐标原点 $O$ 设置为结构的左下角。实验系统为基于PXIe总线的集成Lamb波信号发生与采集系统<sup>[11]</sup>,包括了具有 $100 \text{ MHz}$ 采样率的任意函数发生器、 $60 \text{ MHz}$ 采样率的8通道同步数字化仪、EPA-104功率放大器、EO-LNA-3电荷放大器、时分复用多通道激励与传感控制模块以及控制器。实验过程中,轮流选择3#~13#阵元作为激励器,其他阵元作为传感器,激励信号选择为5波峰正弦调制窄带信号,中心频率为 $200 \text{ kHz}$ ,此时激发出的Lamb波以 $S_0$ 模式为主。通过对比损伤前后的结构响应信号,可以得到损伤引起的反射信号情况。实验中采用了金属条粘贴的形式模拟方向性损伤的发生,图4显示了实验系统和实验试件情况。

### 3.2 实验结果分析

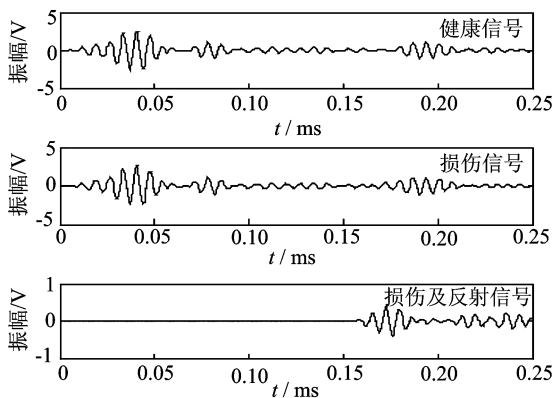
不失一般性,模拟损伤布置在中心位置为 $(455 \text{ mm}, 316.5 \text{ mm})$ 、法线与线阵夹角约 $60^\circ$ 的位



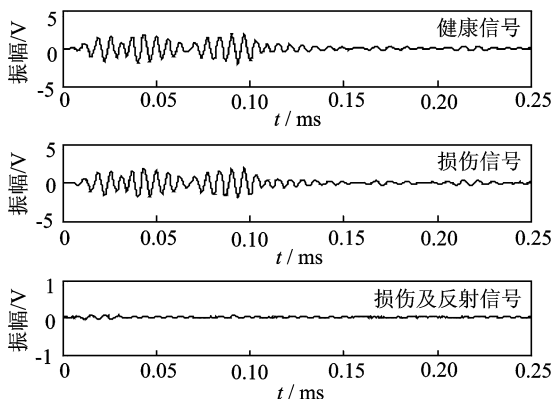
图 4 实验系统及试件

Fig. 4 Experimental setup and specimen

置上,长度为 100 mm。图 5 为不同激励/传感阵元组合下得到的损伤前后结构响应信号及损伤反射信号。通过对比发现,由于损伤存在一定的方向性,只有部分激励/传感阵元组合才能获取到损伤反射信号。根据监测原理,对损伤角度和中心激励阵元进行扫描,不同阵元激励下按角度扫描合成信号的能量分布情况如图 6(a)所示。按照式(3)对各阵元激励下的合成信号峰值进行统计,得到各激励阵元下的合成信号峰值和信号发射角度如图 6(b)所示。结果表明,9# 压电阵元激励时,63°方向的损伤反射信号最为强烈,因此判定损伤方向上的法线与线阵夹角为 63°,中心位置沿法线投射到线阵 9# 阵元附近。



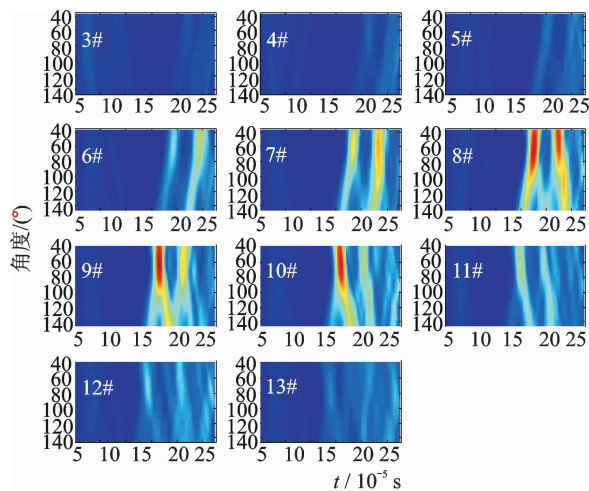
(a) 9#激励阵元和7#传感阵元  
(a) Actuator 9# & Sensor 7#



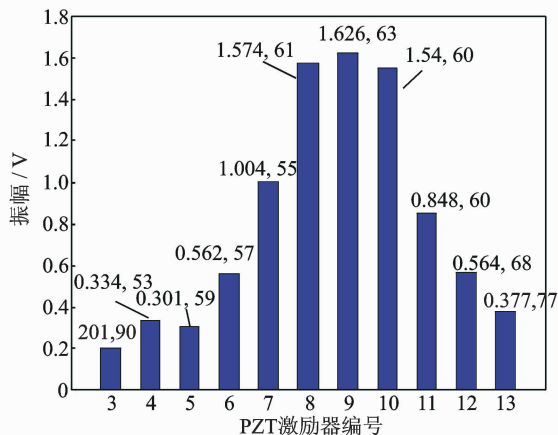
(b) 3#激励阵元和1#传感阵元  
(b) Actuator 3# & Sensor 1#

图 5 不同激励传感阵元得到的 Lamb 波信号

Fig. 5 Typical Lamb wave responses received by different PZT element



(a) 不同阵元激励下合成损伤反射信号随角度变化情况  
(a) Synthesized damage scattering signals varied with scanning angle by different PZT element excitation



(b) 各阵元激励下能量峰值-角度参数统计  
(b) Energy-angle statistics under different PZT element excitation

图 6 不同阵元激励下的损伤反射信号扫描合成能量分布

Fig. 6 Damage scattering signal scanning and synthesizing energy distribution under different PZT element excitation

按照式(6)所示成像方法对损伤情况进行评估和显示,最终的成像结果如图 7 所示,图中的粗黑线表示真实损伤的大小和位置,白色圆圈表示线阵的位置和布置情况。成像处理中采用阈值化方法对成像监测结果进行评估,阈值取实验经验值,为像素峰值的 0.7 倍,得到非零像素点长度为 125.24 mm,与真实损伤的尺寸误差为 25.24 mm,与监测信号的波长相当。监测信号的波长也是损伤尺寸判定精度的主要制约因素。与此同时,由于成像过程中加入了线阵方向变换处理,使得各传感信号中仅损伤反射信号波包相位信息实现了相干合成,其他诸如结构边界反射信号等,由于改变了传感信号之间的相位相干性,所以成像过程中无序叠加而被弱化,使得损伤被突出显示。

为了对比验证方法的有效性,基于相同线阵,采用式(5)所示的时间反转成像方法对损伤情况进行成像,得到的成像结果如图8所示,成像阈值化参数和过程与图7相同。可以看出,线性阵列对直线性的边界较为敏感,结构的边界对成像结果的影响很大。同时,由于成像过程中搜索法则的遍历特点,图像存在许多虚像,使得监测准确性降低,影响了对损伤的判断和评估。

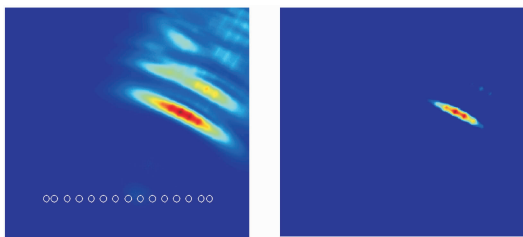


图7 损伤成像及评估结果

Fig. 7 Damage imaging and evaluation results

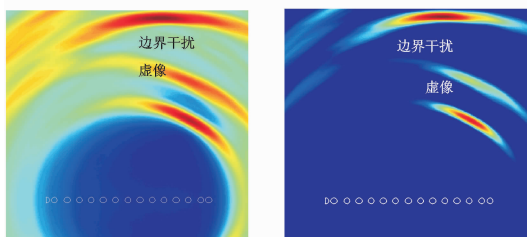


图8 采用时间反转法得到的损伤成像结果

Fig. 8 Damage imaging results using time-reversal method

## 4 结束语

以方向性损伤为对象,研究了基于压电线阵的损伤扫描成像与评估方法,给出了方法原理和实现过程,并在金属铝板结构上进行了实验验证。研究结果表明,该方法可以实现方向性损伤的方位和范围等信息的定量监测和判定,相比于已有的技术方法,缓解了压电线阵监测方法中结构边界等带来的信号干扰,成像结果较为清晰、简单。

### 参 考 文 献

- [1] Su Zhongqing, Ye Lin, Lu Ye. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: a review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295: 753-780.
- [2] Wieslaw O, Maciej R. Structural health monitoring by means of elastic wave propagation[C]//Modern Practice in Stress and Vibration Analysis 2012, Journal of Physics: Conference Series. Bristol, UK: IOP Publishing, 2012.
- [3] 王瑜,袁慎芳,邱雷,等. 主动 Lamb 波中的空间滤波器结构健康监测[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(6):

795-797.

Wang Yu, Yuan Shenfang, Qiu Lei, et al. Direction filter method in active Lamb wave structural health monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6):795-797. (in Chinese)

- [4] 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 health monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(6):977-980. (in Chinese)
- [5] Watkins R, Jha R. A modified time reversal method for Lamb wave based diagnostics of composite structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 31:345-354.
- [6] 王强,严夏君,陈小惠,等. 无基准 Lamb 波时间反转损伤成像监测方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1588-1594.
- Wang Qiang, Yan Xiajun, Chen Xiaohui, et al. Baseline free Lamb wave damage probability imaging monitoring method based on time reversal theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 1588-1594. (in Chinese)
- [7] Leleux A, Micheau H, Castaings M. Long range detection of defects in composite plates using Lamb waves generated and detected by ultrasonic phased array probes[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, 32(2): 200-214.
- [8] 张也弛. 稀疏阵列传感技术及其在结构健康监测中的应用研究[D]. 北京:北京工业大学, 2013.
- [9] Fu Shangchen, Shi Lihua, Zhou Yinghui, et al. Enhancement of Lamb wave imaging resolution by step pulse excitation and prewarping[J]. Shock and Vibration, 2015(1):1-8.
- [10] Wang C H, Rose J T, Chang F K. A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13: 415-423.
- [11] Wang Qiang, Hong Ming, Su Zhongqing. An in-situ structural health diagnosis technique and its realization via a modularized system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(4): 873-887.



**作者简介:**王强,男,1980年5月生,博士、副教授。主要研究方向为结构健康监测、信号分析与处理。曾发表《结构裂纹损伤的 Lamb 波层析成像监测与评估研究》(《机械工程学报》2016年第52卷第6期)等论文。

E-mail: wangqiang@njupt.edu.cn

