

集成主被动协同 Lamb 波结构健康监测技术*

王 强, 华 杰

(南京邮电大学自动化学院 南京, 210046)

摘要 通过对主被动 Lamb 波监测系统存在的互联性与互补性的分析, 针对主被动监测系统各自的优势和存在的缺陷, 研究并提出了主被动监测系统的协同工作机制。将被动监测触发和间歇扫查相结合, 设定主动监测机制, 并对主被动监测结果进行融合。给出了主被动集成化系统的硬件实现方案, 并搭建实时监测的软件平台。实验结果表明, 主被动协同技术与系统很好地融合了主被动监测信息, 提高了监测效率、监测精度并降低了系统功耗。

关键词 结构健康监测; Lamb 波主动监测; Lamb 波被动监测; 协同工作机制; 集成技术

中图分类号 TH878; TN911.7; TP391

引 言

航空航天飞行器、土木工程、船舶铁路及输油管道等大型工程结构因受到外部环境荷载的作用、疲劳、腐蚀效应及材料老化等影响, 导致结构表面及其内部损伤的形成或深化。为避免引起突发事件, 20 世纪 90 年代初, 结构健康监测技术首先在航空领域被提出, 并得到了广泛关注和关注^[1]。结构健康监测(structural health monitoring, 简称 SHM) 是一种实时、在线监测技术, 以不破坏结构件本体和保证结构件完整性为前提, 运用专业设备对结构件进行不间断监测, 对收集到的结构响应信号进行分析, 并以此来确定是否存在损伤和判定损伤位置以及分析损伤程度^[2-3]。

Lamb 波监测技术是结构健康监测领域内的热点和前沿技术之一, 应用前景广泛。Lamb 波结构健康监测按照监测机理可分为被动监测和主动监测两大类, 被动监测方法即捕获待监测结构发生的冲击响应信号, 利用冲击响应产生的 Lamb 波信号提取损伤相关信息, 实现对损伤的在线监测和定位^[1,4]。主动监测方法, 即主动向结构激励一定形式的 Lamb 波信号, 利用分布在结构各处的传感器接收响应信号, 通过分析损伤前后响应信号的差异变化来提取损伤特征信息, 实现损伤监测和诊断^[4-6]。受系统技术等因素的限制, 现有的研究大多是针对上述某一种监测方法展开研究和验证, 各自

的优势难以兼顾。针对这一问题, 笔者在现有的两种监测方法成果的基础上, 研究了主被动系统协同工作机制, 提出了主被动结构健康监测融合技术, 并进行了技术验证。

1 主被动协同 Lamb 波结构健康监测机理及信息融合分析

1.1 主被动协同 Lamb 波结构健康监测机理分析

主动监测方法是通过向待测结构中激励一定形式的 Lamb 波信号, 对比损伤前后的响应信号, 分析提取与损伤相关的信息进而对损伤区域进行诊断, 故对待测结构的固有损伤(已形成的损伤)较为敏感。被动监测方法是捕获待测结构的冲击响应或损伤发生时产生的声发射信号, 对 Lamb 波响应信号或声发射信号的损伤相关信息进行分析提取, 对损伤进行定位, 故其偏向于对瞬时损伤或原始损伤发生点的定位监测。主动监测方式由于对冲击响应的损伤不敏感, 为了防止对损伤监测的遗漏, 需要设定短时间节点对待测结构件进行定时的扫查监测。在整个监测时间周期内, 扫查监测设定的时间间隔越短, 其功耗就越大。被动监测方式由于对冲击损伤敏感, 可以在整个监测周期内全时段的待机监测, 对损伤反应及时且待机功耗很小, 但是被动监测只能对损伤发生时的定位点进行监测, 对损伤的范围不敏感, 故监测精度差。针对上述问题, 融合主被动

* 国家自然科学基金重点资助项目(61533010); 中国博士后基金资助项目(2015M570401); 南京邮电大学先进技术研究院开放基金资助项目(NY215093); 南京邮电大学科研资助项目(NY215093)
收稿日期: 2017-03-04; 修回日期: 2017-05-11

Lamb波监测机理的各自优势,通过在时序上对两类监测方法进行功能组合,实现对被测结构全时段的高效监测。提出的主被动协同监测机理如图1所示。

由图1可得,主被动协同监测方式根据主动和被动监测的特点,在时间序列上分时采用主被动监测方式,被动监测方式在主动扫描间歇处于全时段的待机监测状态。由于主动监测是基于结构状态的变化,而突发性结构状态改变往往伴随着声发射现象,因此可以用被动监测作为主动监测的触发事件,并将主动监测方式的扫描间隔延长,降低功耗和提高监测效率。当冲击响应发生时,被动监测方式可以及时对损伤进行定位,同时触发主动监测方式对损伤大小及范围进行监测,两次的监测信息可进一步的融合,实现对损伤的精确评估。

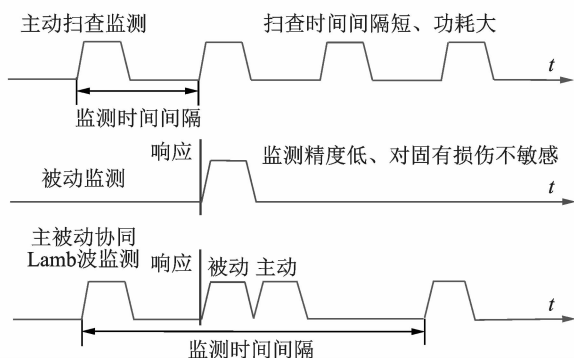


图1 主被动协同监测机理

Fig. 1 Principle of the active and passive fusion monitoring methodology

1.2 主被动协同Lamb波监测信息融合

主被动协同监测机理为结构损伤信息的融合提供了基础,有助于提高监测和诊断结果的准确性。本研究中主被动协同监测信息的融合结合概率定位成像算法^[7-8],分别提取主被动监测状态下Lamb波损伤特征信号,分析损伤特征参数,通过对被测结构表面坐标化,等分为 $M \times N$ 个像素点来求取每个像素点的对比度值,得到主被动监测的定位成像矩阵,并对定位成像矩阵进一步融合。

被动监测状态下的像素点对比度计算公式为

$$\alpha_{mn} = \sum_{a=1}^{K-1} \sum_b^K \lambda \left| \frac{S_{mn}^a - S_{mn}^b}{(t_a - t_b)v} - 1 \right| \quad (1)$$

其中: K 为传感器数量; a, b 为相邻两传感器的序号; λ 为传感器个数 K 中每两个传感器配对组数的倒数,即平均权值; t_a, t_b 为其接收到的冲击响应波到达时间; S_{mn}^a, S_{mn}^b 为像素点 (m, n) 到 a 号、 b 号压电传感器的距离; v 为冲击响应实验标定值,联立每个像素点的对比度可得到 $M \times N$ 阶被动定位成像矩阵 \mathbf{A}_{MN} 。

主动监测状态下的像素点对比度计算公式为

$$\beta_{mn} = \sum_{a, a \neq z}^K \sum_{b, b \neq a}^K \eta \frac{\left| \frac{\Delta t_a}{\Delta t_b} - \frac{S_{mn}^z + S_{mn}^a}{S_{mn}^z + S_{mn}^b} \right|}{\frac{\Delta t_a}{\Delta t_b}} \quad (2)$$

其中: K 为传感器数量; a, b, z 分别为传感器的序号; z 号传感器为激励通道; $\Delta t_a, \Delta t_b$ 为 a 号、 b 号传感器接受到的Lamb波散射信号的到达时间; $S_{mn}^a, S_{mn}^b, S_{mn}^z$ 为像素点 (m, n) 到 a 号、 b 号、 z 号传感器的距离值; η 为传感器个数 K 中每三个传感器配对组数的倒数,即平均权值。

同上,联立每个像素点的对比度可得 $M \times N$ 阶主动定位成像矩阵 \mathbf{B}_{MN} 。由于主动监测方式像素点的监测信息来自3个配对传感器,故式(2)中 a 的取值为序号从小到大不为 z 的值, b 的取值同理。

主动和被动方式所得监测信息的定位成像矩阵是基于传感器阵列排布方式,故在融合主被动方法的定位成像矩阵时,认为两种方法的可信度相同,单个传感器信息的可信度不变,在此条件下,根据主被动方式中所采用传感器的组数 $\frac{1}{\lambda}$ 和 $\frac{1}{\eta}$,并归一化处理,得到融合矩阵中主动和被动方式分配的权值为

$$\delta_\alpha : \delta_\beta = \frac{3}{K+1} : \frac{K-2}{K+1} \quad (3)$$

其中: K 为传感器数量; δ_α 为被动方法成像矩阵的权值; δ_β 为主动方法矩阵的权值。

利用Min-Max标准化方法使矩阵中的元素都线性化并映射到 $[0, 1]$ 之中。被动方法标准化的公式为

$$\alpha_{mn}^* = \frac{\alpha_{mn} - \min(\mathbf{A}_{MN})}{\max(\mathbf{A}_{MN}) - \min(\mathbf{A}_{MN})} \quad (4)$$

同理,对主动监测方法进行标准化,得到主动的定位成像矩阵中像素点对比度分别为 $\alpha_{mn}^*, \beta_{mn}^*$,定位成像矩阵分别为 $\mathbf{A}_{MN}^*, \mathbf{B}_{MN}^*$ 。

两矩阵融合得到主被动协同信息融合矩阵为

$$\mathbf{C}_{MN}^* = \delta_\alpha \mathbf{A}_{MN}^* + \delta_\beta \mathbf{B}_{MN}^* = \frac{3}{K+1} \alpha_{mn}^* + \frac{K-2}{K+1} \beta_{mn}^* \quad (5)$$

其中: K 为传感器数量; $\delta_\alpha, \delta_\beta$ 分别主被动监测信息的权值系数。

2 集成主被动协同结构健康监测系统设计

根据主被动系统Lamb波结构健康监测机理,笔者对该监测机理进行功能验证,采用现有的模块设计开发集成主被动协同监测系统。该系统包括基于软件后台的人机交互界面和硬件设备模块,如图2所示。

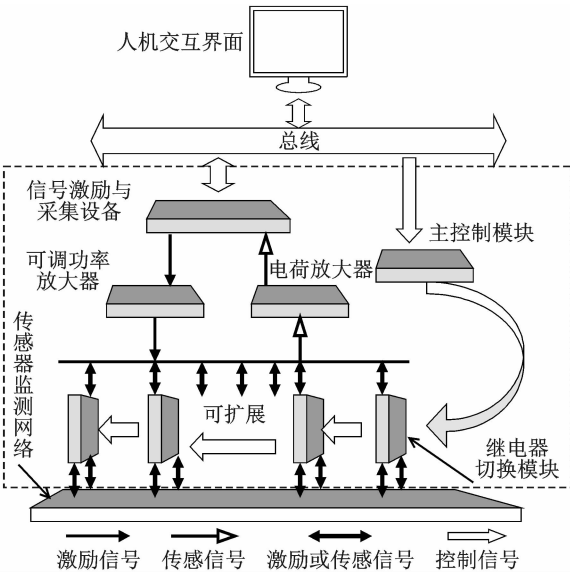


图 2 集成系统设计框图

Fig. 2 Block diagram based on the integrated system

2.1 集成系统硬件框架设计

集成系统的硬件框架如图 2 中虚线框所示,主要成为主控制模块、监测通道切换模块和信号调理模块。其中,信号调理模块包括信号的激励与采集设备、可调功率放大器、电荷放大器。硬件各部分由外部通讯控制,通过总线相连并协调统一管理。该集成系统总线互联的方式使其与其他系统兼容,并能扩展监测通道和传感器网络,从而实现对被监测结构大范围大面积的监测。

主控制模块通过总线与 PC 机进行通信,对人机交互界面发出的控制信号指令进行缓存、处理和转化,从而实现系统主被动监测方式的切换、采集通道的选择及相应地线的选择。信号调理模块实现 Lamb 波激励信号的发生、可调功率放大、压电传感网络的压电感应电荷信号放大和采集存储。监测通道切换模块是硬件系统设计的核心之一,解决了主被动监测方式中压电阵列自由切换的难点。该模块采用继电器阵列方法,其切换的拓扑结构基本单元(两个继电器组成一个通道)如图 3 所示。

根据图 3,结合主被动协同监测的机理分析,被动监测方式在主动扫描间歇处于全时段的待机监测状态时,第二级继电器的常闭开关分别接通电荷放

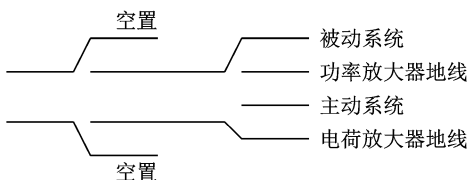


图 3 监测通道切换模块拓扑结构图

Fig. 3 Topology diagram of channel switching

大器信号输入端及电荷放大器的地端;当主动扫描或者事件触发切换到主动监测状态时,第二级继电器连接到常开开关,接通功率放大器的输出端及功率放大器的地端;在时间序列上方便地实现主被动监测方式的切换。

2.2 集成系统软件框架

根据集成系统的协同工作机制及硬件设计,基于 Labview 软件编程,主被动系统的软件框架主要划分为应用层和驱动层,并通过人机界面进行交互,其软件设计框架如图 4 所示。

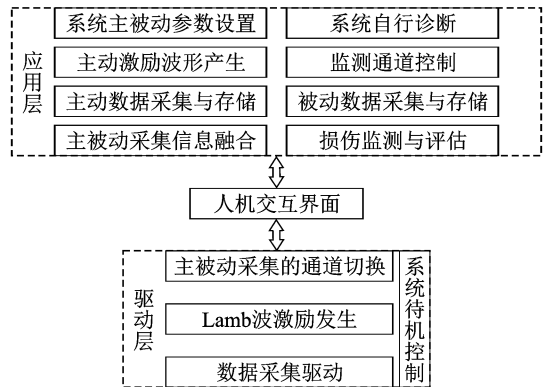


图 4 主被动协同系统软件设计框图

Fig. 4 The framework of the software

图 4 中,人机交互界面实现主被动系统参数和用户指令的输入及损伤监测结果的呈现等功能。其用户指令的输入方便地实现主被动方式的切换、监测通道的扩展及传感网络的扩展。

应用层的设计主要体现在激励波形的产生、监测通道的控制、主被动采集信息的融合及损伤的监测与评估。监测通道控制实现了主被动方式下激励器与传感器的选通,以及根据监测对象的范围进行通道的扩展。主被动采集信息的融合体现在对主被动 Lamb 波的损伤信息进行特征参数的提取,并可在成像算法中进行融合。驱动层主要是通过控制信号实现对硬件设备的驱动,包括通道的切换、Lamb 波信号的激励、数据的采集及系统待机状态的驱动。

主被动协同 Lamb 波结构健康监测系统流程如图 5 所示,系统中传感阵列同时应用于主动和被动系统。首先,预设置采集参数、通道及波形发生,被动监测系统作待机状态实时在线监测,监测到结构中的冲击响应,进行被动损伤信息提取和数据处理;其次,利用主动监测系统进行扫描,提取主动损伤信息并进行数据处理,融合被动监测信息和主动监测信息,判断固有损伤位置与瞬时冲击位置的关系,并给出主被动信息融合后的定位成像,以此为依据对损伤进行评估。

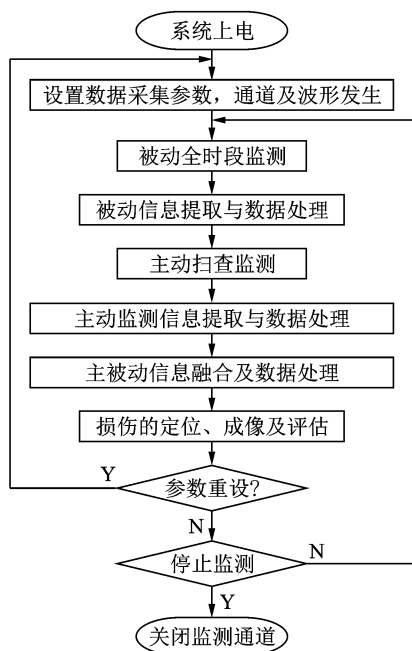


图5 主被动协同监测流程图

Fig. 5 The Active and passive collaborative monitoring flow diagram

3 实验研究与验证

3.1 实验对象、平台及步骤

本技术验证的实验对象为一块长方形的玻璃纤维复合材料板,如图6所示。其长宽为 $1\,000\text{ mm} \times 500\text{ mm}$,厚度为 3 mm ,8枚压电传感器以传感阵列的形式均匀分布在复合材料表面,传感器间距 $d=250\text{ mm}$,并且以左下角传感器为1号,依次逆时针编号组成了A,B,C三个传感区域。根据矩形成像的原理,设置左上角8号传感器为坐标原点,由8号到1号传感器的方向为 x 轴正方向,8号到5号传感器的方向为 y 轴正方向,整个结构监测区域分为 250×750 个 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的正方形像素块。

集成系统监测实验中被动监测的模拟冲击损伤使用冲击锤敲击结构表面,主动监测的模拟裂纹、孔洞及脱层等损伤则在结构表面粘贴质量块。笔者粘贴的是质量较大的螺母。集成系统实验平台如图7所示。

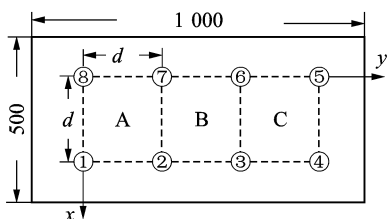


图6 实验对象示意图(单位:mm)

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental object (unit: mm)

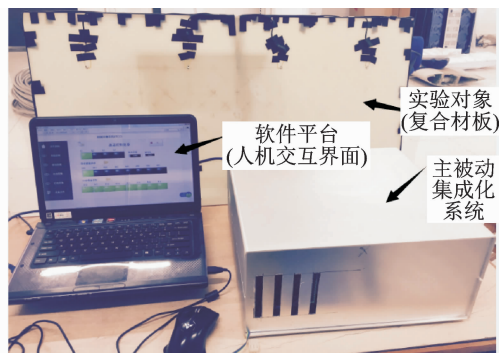


图7 集成系统实验平台

Fig. 7 Experimental Platform of Integrated System

3.2 集成系统实验定位与成像

在实验验证时,采用典型的五波峰正弦调制信号作为激励信号,激发频率为 60 kHz ,激发出的Lamb波信号主要以 A_0 模式为主,模拟输出电压幅值为 1 V ,经功率放大器放大后为 100 V 。先对复合材料板进行模拟冲击,并在大致模拟冲击位置采用粘贴质量块的方式模拟损伤的形成^[9-11],其位置为 $(125, 187)$,冲击触发被动监测和数据采集,利用被动定位成像算法及传感器阵列几何排布得出冲击点坐标(单位:mm)为 $(123, 183)$ 。同时触发主动监测和数据采集,利用主动监测的定位成像算法得到损伤点坐标为 $(123, 189)$ 。根据主被动融合算法得到的定位坐标为 $(124, 185)$ 。定位坐标对比如表1所示。

表1 模拟定位及各方法定位对比

Tab. 1 Comparison of different monitoring methods

| 定位方法 | 定位坐标/mm |
|-----------|--------------|
| 模拟冲击及损伤 | $(125, 187)$ |
| 被动方法 | $(123, 183)$ |
| 主动方法 | $(123, 189)$ |
| 主被动协同融合方法 | $(124, 185)$ |

对主被动单独监测的信息和协同融合监测信息分别进行了定位成像,且局部放大到 $(x: 100 \sim 140, y: 170 \sim 210)$ 的范围,如图8所示。图中的十字为模拟冲击及损伤粘贴的定位点,颜色加深高亮的部分为被动、主动及融合后的定位区域。从图8(a)可以看到,颜色加深的定位点及其成像对于模拟冲击的位置说明了被动监测方式对定位点敏感。图8(b)中颜色加深区域为从中间向两侧扩展的横向区域,其符合正六边形螺母模拟损伤的横向粘贴形式。笔者虽然用数学方法求出了主动监测方法的定位点,但是其只具备参考价值,因为主动方法是利用散射信号对损伤范围进行监测,实验结果也证明主动监测的定位点精度是不能保证的。由图8(c)可知,相较于单一的主动或被动方式,主被动协同融合之后定位点相对更加精确,十字更接近于颜色高亮区域,从颜色高亮的发展趋势来看,损伤发生后是向右

扩展的,而右侧也确实是实际模拟损伤的位置。

由成像结果可得,主被动协同监测方式的损伤

信息融合了被动方法定位点精确及主动方法对损伤区域敏感的优势,具有更多的损伤发展信息。

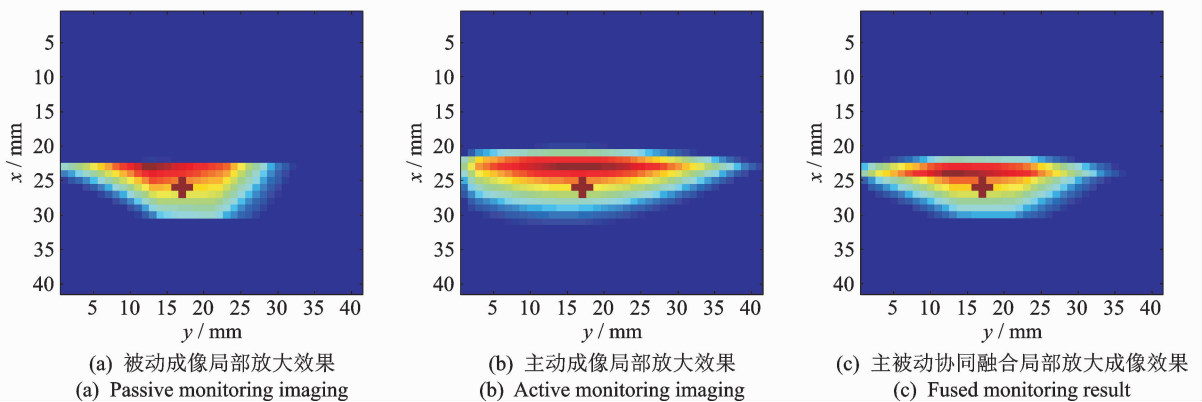


图8 集成系统实验成像效果图

Fig. 8 The single and fusion of information by imaging

4 结束语

主被动协同 Lamb 波结构健康监测机制利用主被动单独监测的优势,实现对被测结构的全时段监测且功耗小、对瞬时损伤反应灵敏。主被动协同 Lamb 波监测信息的融合及算法的实现,提高了损伤定位的准确性并预测了损伤发展趋势。主被动协同结构健康监测系统实现了主被动监测系统的集成化和小型化,提高了主被动协同监测方式的工作效率。

参 考 文 献

- [1] 袁慎芳. 结构健康监控[M]. 北京:国防工业出版社, 2007:1-19,162-185.
- [2] 邱雷,袁慎芳,王强. 基于 Lamb 波主动结构健康监测系统的研制[J]. 压电与声光,2009,31(5):763-766.
Qiu Lei, Yuan Shenfang, Wang Qiang. Development of Lamb wave based active structural health monitoring system[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2009, 31(5):763-766. (in Chinese)
- [3] Qiu Lei, Yuan Shenfang. On development of a multi-channel PZT array scanning system and its evaluate-ning application on UAV wing box[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 151(2):220-230.
- [4] Habib F, Martinez M, Artemev A, et al. Structural health monitoring of bonded composite repairs a critical comparison between ultrasonic lamb wave approach and surface mounted crack sensor approach[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 17:26-34.
- [5] Dodson J C, Inman D J. Thermal sensitivity of lamb waves for structural health monitoring applicati-ons [J]. Ultrasonics, 2013, 53(3):677-685.
- [6] Su Zhongqing, Zhou Chao, Hong Ming, et al. Acousto-ultrasonics-based fatigue damage characterization linear

versus nonlinear signal features[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 45(1):225-239.

- [7] 刘彬,邱雷,袁慎芳. 复合材料 T 型接头损伤监测的概率成像方法[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(3): 519-524.
Liu Bin, Qiu Lei, Yuan Shenfang. The probability imaging algorithm of composite T-joint damage monitoring [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(3): 519-524. (in Chinese)
- [8] 王志凌,袁慎芳,邱雷. 基于压电超声相控阵方法的结构多损伤监测[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5): 796-801.
Wang Zhiling, Yuan Shenfang, Qiu Lei. Structure multi-damage monitoring based on the piezoelectric ultrasonic phased array[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5): 796-801. (in Chinese)
- [9] Ren Baiyang, Lissenden C J. PVDF multi-element lamb wave sensor for structural health monitoring[J]. IEEE Trans-Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2016, 63(1):178-185.
- [10] Wang Qiang, Li Jing. Active lamb wave based crack monitoring and evaluation using projection of reflection field[C]// 2013 32nd Chinese Control Conference. [s. n.]: IEEE, 2013:6248-6251.
- [11] Wang Qiang, Xu Jing. Lamb wave tomography technique for crack damage detection[C]// 2014 33rd Chinese Control Conference (CCC). [s. n.]: IEEE, 2014: 3094-3099.



第一作者简介: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