

基于 Lamb 波的平尾大轴裂纹扩展监测*

杨伟博^{1,2}, 袁慎芳^{1,2}, 邱雷^{1,2}

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

(2. 南京航空航天大学结构健康监测与预测研究中心 南京, 210016)

摘要 平尾大轴作为在役飞机的主承力构件,其轴内变厚度截面处存在应力集中现象,是疲劳断裂高发的关键部位。针对平尾大轴变截面处裂纹损伤,研究其基于主动 Lamb 波的裂纹深度在线监测方法。首先,通过线切割制造真实损伤,对压电传感器采集的监测信号进行 Shannon 连续复数小波变换,去噪提取 Lamb 波信号;其次,重点研究了不同模式 Lamb 波的 4 种损伤因子对大轴裂纹深度的表征能力,结果表明,基于 A_0 模式的互相关损伤因子对裂纹深度的表征效果最佳;最后,利用 A_0 模式的互相关损伤因子实现了平尾大轴裂纹萌生及裂纹尺寸的量化监测,为平尾大轴的在线监测提供了方法基础。

关键词 主动弹性波; 损伤因子; 疲劳裂纹; 平尾大轴; 健康监测

中图分类号 TH878; TP391.4; V229+.2; V240.2

引言

平尾大轴是飞机水平安定面转动轴的简称^[1],作为飞机的主承力构件,其结构形式为变厚度截面的细长腔体且存在贯穿轴,结构形式比较复杂,其可靠性直接影响飞机的安全使用。损伤容限及力学建模研究的结果表明,轴内变截面处的应力集中现象以及粗糙的加工刀痕^[2]是导致疲劳断裂的主要原因。然而,疲劳裂纹的产生具有不确定性,产生的位置和时间常与上述分析结果相背离,传统的定期维护手段已无法有效实现平尾大轴裂纹的监测与预警,急需在线监测的视情维护手段^[3],实时监测裂纹的萌生及扩展情况,以保障飞行安全。及时制定维护策略,避免平尾大轴的疲劳裂纹对飞行器带来灾难性的影响,对于在役飞机的延寿和维护保障具有重要意义和应用价值。

基于压电传感器 (piezoelectric transducer, 简称 PZT) 的主动 Lamb 波在线监测方法被认为是最具应用潜力的结构健康监测技术之一^[4-5],具有在线监测和对小损伤敏感的优点,能实现结构的区域监测。传感器在粘贴时可避开应力集中区域,可靠性更高,易布置在监测结构上,适用于结构的裂纹监测与预警,具备发展成为视情维护的潜力。基于上述优点,Cho 等^[6]研究了铝板中 Lamb 波波包能量随裂纹损伤的变化规律,并开展了量化研究。Giurgiutiu 等^[7]在

开口裂纹、中心裂纹和孔边裂纹等多种铝板试件中开展裂纹监测与成像研究,取得了一些进展。目前,裂纹损伤监测的应用对象主要还是简单的平板结构,对于复杂的变截面和连接件等实际飞行器关键元件的裂纹监测,其定位和成像的实现较为困难。

针对平尾大轴变截面处裂纹损伤,笔者研究其基于主动 Lamb 波的裂纹深度在线监测方法,通过线切割制造真实损伤,重点研究了 4 种损伤因子对平尾大轴裂纹深度的表征能力。在此基础上,利用互相关损伤因子实现了平尾大轴裂纹萌生及裂纹尺寸的量化监测,为平尾大轴的在线监测提供了方法基础。

1 基于 Lamb 波的裂纹扩展损伤监测方法

Lamb 波是厚度与激励声波波长为相同数量级的声波导中、由纵波和横波耦合而成的特殊形式的应力波,通常也称为板波,是结构健康监测中最常见的一种导波形式。它根据介质质点运动形态,分为对称模式和反对称模式。对称模式又进一步分为 S_0, S_1, \dots, S_n 等不同阶的模式,反对称模式可分为 A_0, A_1, \dots, A_n 等不同阶的模式。随着激励频率的增大,结构中出现的高阶模式会越多,而且每种 Lamb 波模式的相(群)速度与板厚和激励频率的乘积(频厚积)相关,

* 国家自然科学基金重点资助项目(51635008);国家自然科学基金资助项目(51575263);国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(51225502);青蓝工程;江苏省优势学科建设工程资助项目
收稿日期:2017-01-18;修回日期:2017-03-28

这两种特性即多模式和频散特性^[4]。基于压电传感器的 Lamb 波裂纹在线监测原理如图 1 所示。当 Lamb 波在结构中被激励时,随着裂纹的扩展,响应信号将受到影响,因此提取相关特征,可实现复杂结构的裂纹损伤监测。

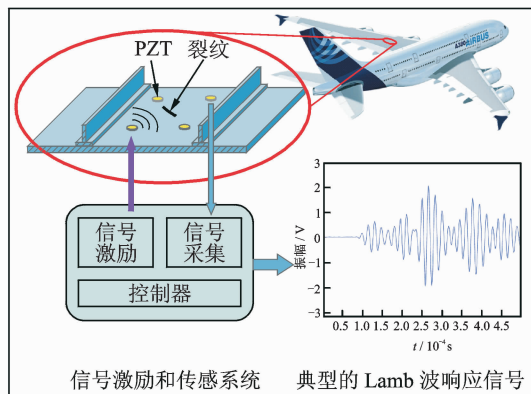


图 1 基于压电传感器的 Lamb 波裂纹损伤在线监测方法
Fig. 1 PZTs based Lamb wave on-line crack monitoring method

损伤因子是将裂纹尺寸与 Lamb 波响应信号的某种特征关联起来,定量地分析 Lamb 波对裂纹损伤的响应和监测规律。受裂纹损伤的影响,Lamb 波响应信号在时域上的变化主要为幅值和相位,因此笔者从幅值和相位变化的角度选取了 4 种损伤因子进行研究,考察其对裂纹损伤的量化表征能力,经归一化后,单位均为无量纲,分别如下。

1) 最大幅值损伤因子^[6]为

$$DI_1 = \max(|x_i(t)|) / \max(|x_0(t)|) \quad (i=0, 1, \dots, n) \quad (1)$$

其中: $x_i(t)$ 为各模式响应信号的直达波,即传感器接收到各模式首个 Lamb 波响应信号的波包; $x_0(t)$ 为健康信号,下标 i 对应裂纹扩展的不同尺寸。

该损伤因子反映了响应信号幅值随裂纹尺寸的变化规律。

2) 能量差损伤因子^[8]为

$$DI_2 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |x_i(t)| dt - \int_{t_1}^{t_2} |x_0(t)| dt}{\int_{t_1}^{t_2} |x_0(t)| dt} \quad (2)$$

其中: $t_1 \sim t_2$ 为直达波包络的到达时刻。

该损伤因子反映了响应信号的能量随裂纹尺寸的变化规律。

3) 散射信号归一化能量损伤因子^[8]为

$$DI_3 = \left(\frac{\int_{t_1}^{t_2} |x_i(t) - x_0(t)|^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} |x_0(t)|^2 dt} \right)^\alpha \quad (3)$$

其中: α 取值为 0.5,此时损伤因子可与实际疲劳裂纹之间获得很好的线性响应^[8]。

该损伤因子反映了损伤散射信号的能量随裂纹尺寸的变化规律,其中,损伤散射信号是通过对比损伤前后 Lamb 波信号的变化而获得的。

4) 信号相关性损伤因子^[9]为

$$DI_4 = 1 - \frac{\sqrt{\left\{ \int_{t_1}^{t_2} x_0(t) x_i(t) dt \right\}^2}}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} x_0^2(t) dt} \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} x_i^2(t) dt}} \quad (4)$$

该损伤因子是对直达波的波达时刻延迟以及信号幅值变化的量化表征。

2 实验结果及讨论

平尾大轴为细长腔体,存在变厚度截面及贯穿轴,结构形式较为复杂。由 Lamb 波的频散特性可知,变厚度截面处频厚积发生变化,波速亦发生变化,故相较简单的平板结构,大轴的损伤监测更为困难。为真实比较 4 种损伤因子对裂纹损伤的表征能力,在本研究中采用线切割方法在大轴中制造真实裂纹损伤,并开展研究对比,分析选取最优损伤因子实现平尾大轴的裂纹深度监测。实验采用南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室自主研发的预测和健康管理系统 (prognostics and health management, 简称 PHM) 扫查系统^[10],线切割设备型号为 DK7732。图 2 为传感器布置的尺寸示意图及实验试件。6 个传感器编号为 1~6,构成两个矩形的稀疏阵。裂纹监测的损伤因子算法是基于 Lamb 响应信号的幅值与相位的变化,来反映裂纹扩展的规律。考虑到信号在传播过程中的衰减与系统噪声的影响,为保障裂纹损伤检测与识别的灵敏度,在传感器布置时,令稀疏阵覆盖裂纹萌生区域,对裂纹形成区域监测。PHM 扫查系统及实验位置如图 3 所示。

进行线切割之前,在实验室内先对平尾大轴在健康状态下 50~500 kHz 的响应信号进行分析。结果表明,在 160 kHz 下,直达波响应信号与其他波包基本无混叠且幅值较大,应用于损伤监测中具备较高的可靠性和灵敏度。因此,以中心频率为 160 kHz 的正弦调制五波峰作为激励信号,对平尾大轴中易产生裂纹的变厚度截面处进行线切割,切割的不同裂纹深度如表 1 所示。以 10 MHz 为采样率,在结束每个裂纹尺寸的线切割后,以传感器 1 作为激励源,采集 4,5 和 6 传感器上所接收到的响应信号,将 1-4,1-5 和 1-6 三组激励-传感通道简略记为 1-456 通道,同理再采集 2-456 和 3-456 通道的响

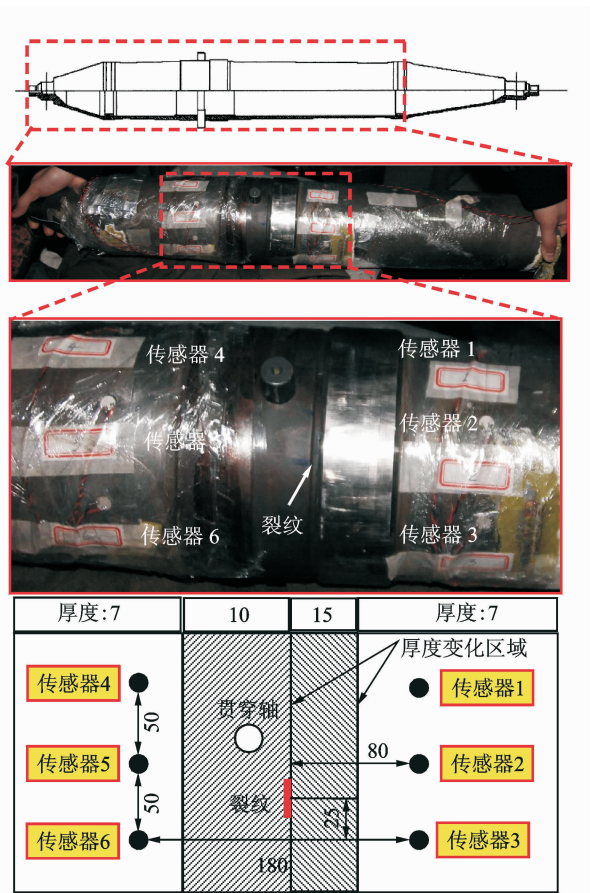
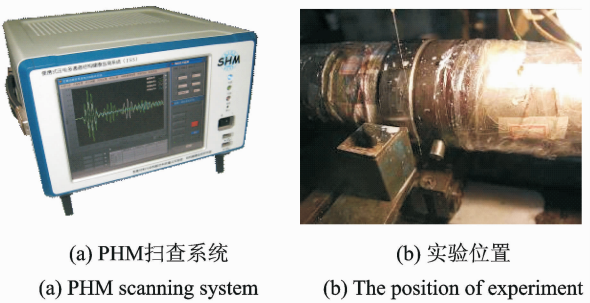


图 2 传感器布置示意图及实验试件(单位:mm)

Fig. 2 Sensor layout diagram and experimental specimen (unit: mm)



(a) PHM 扫查系统

(b) 实验位置

(a) PHM scanning system

(b) The position of experiment

图 3 PHM 扫查系统及线切割部位

Fig. 3 PHM scanning system and the position of experiment

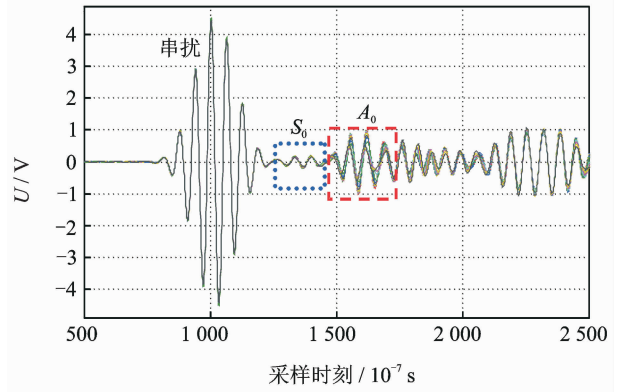
表 1 实验裂纹尺寸

Tab. 1 State of crack

裂纹工况	裂纹深度/mm	裂纹工况	裂纹深度/mm
1	0	8	2.0
2	0.2	9	2.5
3	0.4	10	3.0
4	0.6	11	3.5
5	0.8	12	4.0
6	1.0	13	4.5
7	1.5	14	5.0

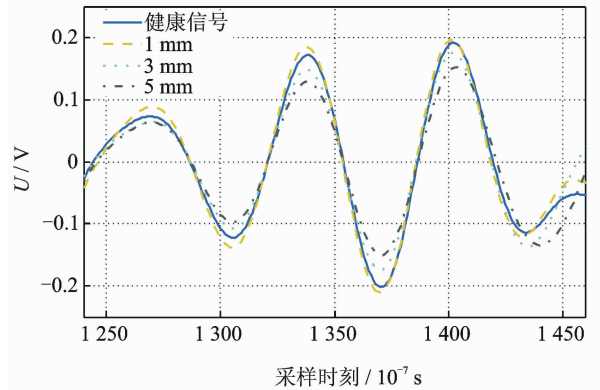
应信号,共 9 组数据,以监测裂纹深度对 Lamb 波信号的影响。

由于不同模式的 Lamb 波在不同中心频率下获得的响应信号能量不同,因此接收到的首个直达波可能是 A_0 或 S_0 模式。一般情况下,低频下的首个直达波为 A_0 模式,高频下为 S_0 模式, A_0 模式紧随其后。利用 Shannon 连续复数小波变换去噪提取响应信号后^[11],图 4 为 2-6 通道响应信号在不同裂



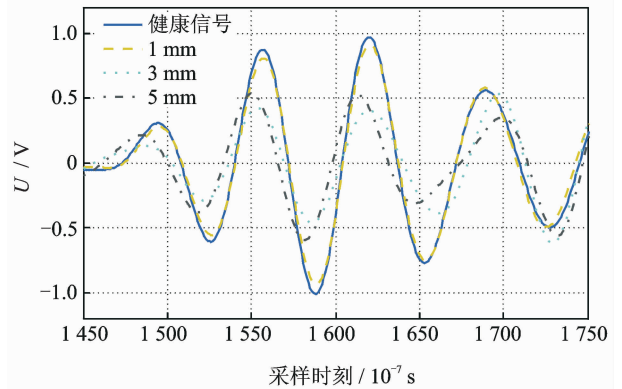
(a) 全局信号

(a) Global signals



(b) S_0 模式

(b) S_0 mode



(c) A_0 模式

(c) A_0 mode

图 4 2-6 通道响应信号在不同裂纹深度下的变化

Fig. 4 Response signal of channel 2-6 in different crack depth

纹深度下的变化。利用矩形窗提取 S_0 和 A_0 模式响应信号的直达波进行分析,可以看出,直达波受不同裂纹深度的影响程度不同,时域上主要表现为幅值和相位的变化。此外,在 160 kHz 激励下,平尾大轴中 A_0 模式的幅值大于 S_0 模式,且约为 5 倍。

分别对去噪后 1-456, 2-456, 3-456 这 9 个通道上的 S_0 与 A_0 模式的响应信号进行分析,利用矩形窗提取直达波信号,以健康信号作为基准。首先,采用式(1)~(3)的 3 种幅值或能量损伤因子建立损伤因子与裂纹深度之间的关系。如图 5, 6 为 2-6 通道中 S_0 和 A_0 模式的 3 种损伤因子的处理结果。

随着平尾大轴的裂纹深度扩展,图 5 中 S_0 模式 Lamb 波的最大幅值和能量整体呈现下降趋势,散射信号能量呈上升趋势。由于 S_0 模式的幅值较小,且由于变厚度截面及贯穿轴的存在,响应信号在这些界面处的反射及模式转换,将和系统噪声一起对 S_0 模式产生干扰,故损伤因子的变化呈现较强的波动性。对于大轴中的 A_0 模式,3 种损伤因子变化规律与 S_0 模式基本一致,但 A_0 模式的幅值较大。由于反射及模式转换信号的能量较小,产生的干扰有限,故其损伤因子变化趋势较为光滑,具有较高的监测灵敏度和可靠性。

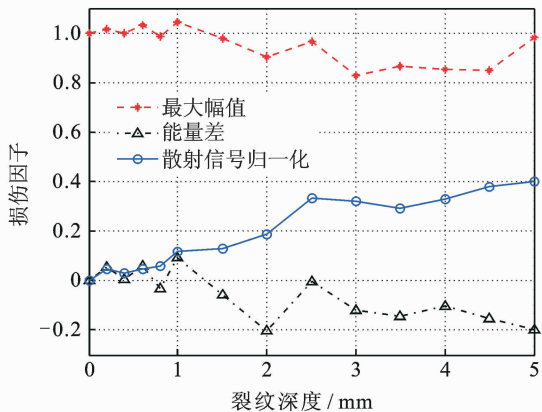


图 5 2-6 通道上 S_0 模式的 3 种损伤因子与裂纹之间的关系

Fig. 5 The relationship between crack depth and 3 kinds of damage index of S_0 mode in channel 2-6

如图 6 所示,当裂纹深度较深时, A_0 模式的相位也受到了影响。在裂纹深度较深时损伤因子开始变得平缓,呈现非单调变化趋势,裂纹深度与损伤因子之间无法构建一一映射关系。综上所述,这 3 种损伤因子无法作为平尾大轴裂纹深度监测的手段,此外在监测信号的选择上, A_0 比 S_0 模式具备更高的灵敏度及可靠性。

不同于前 3 种损伤因子仅从幅值或能量的单尺度特征来表征裂纹深度的扩展,互相关损伤因子综

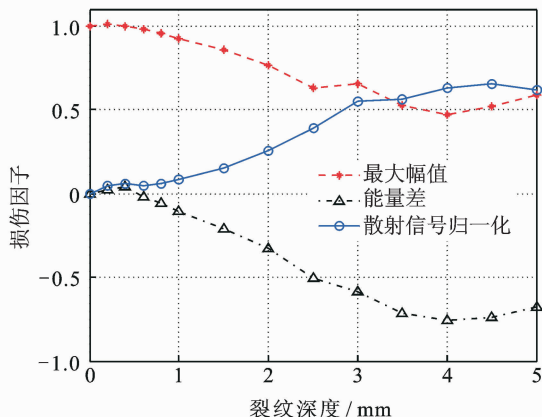


图 6 2-6 通道上 A_0 模式的 3 种损伤因子与裂纹之间的关系

Fig. 6 Relationship between crack depth and 3 kinds of damage index of A_0 mode in channel 2-6

合考虑了直达波相位和幅值的变化,反映了响应信号与健康信号之间的互相关程度。如图 7 所示,互相关损伤因子与裂纹深度呈单调递增的一一映射关系,随着裂纹深度的扩展, S_0 模式的损伤因子变化渐趋平缓,快呈下降趋势,而 A_0 模式保持单调递增,且比 S_0 模式的灵敏度更高,故 A_0 模式更适合于平尾大轴的裂纹深度监测。以五阶多项式拟合互相关损伤因子与裂纹深度之间的关系,如式(5)所示,拟合曲线与实验值对比如图 8 所示。

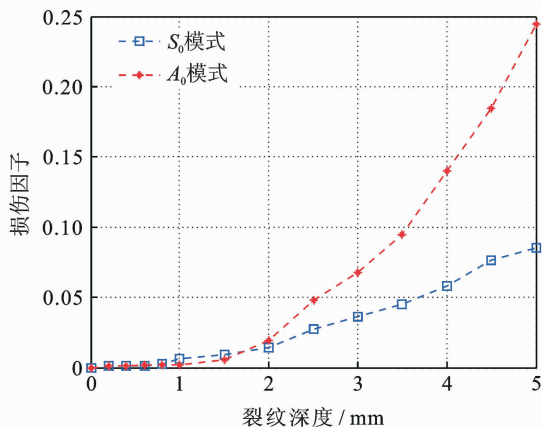


图 7 2-6 通道上 S_0 与 A_0 模式的互相关损伤因子对比

Fig. 7 Comparison of cross-correlation damage index of S_0 and A_0 modes in channel 2-6

$$DI = 2.564 \times 10^{-4} a^5 - 3.083 \times 10^{-3} a^4 + 0.01355 a^3 - 0.01387 a^2 + 4.634 \times 10^{-3} a + 5.256 \times 10^{-4} \quad (5)$$

其中: a 为裂纹深度。

由式(5)可知,当 $a=0$ 时,损伤因子为 5.256×10^{-4} ,当损伤因子低于该数值时,可判定平尾大轴处于健康状态;当损伤因子大于该数值时,可判断裂纹

已萌生,进入了扩展阶段。

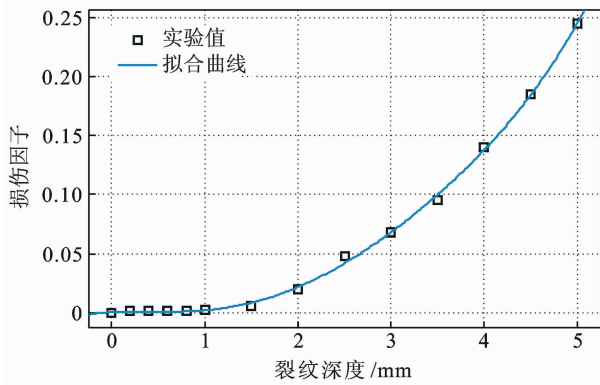


图8 拟合曲线与实验值的对比

Fig. 8 Comparison of fitting curve and experimental value

3 结束语

笔者将结构健康监测中常用的Lamb波主动监测方法应用于平尾大轴裂纹深度监测研究中,通过线切割制造真实损伤,研究了4种损伤因子对大轴裂纹深度的表征能力。结果表明,基于 A_0 模式的互相关损伤因子对裂纹深度的表征效果最佳,并在此基础上利用互相关损伤因子实现了平尾大轴裂纹萌生及裂纹尺寸的量化监测,为平尾大轴的在线监测提供了方法基础,对指导在役飞机的延寿和维护保障具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 陈荣,李权,王洪伟.飞机平尾大轴断裂故障分析[J].失效分析与预防,2009,4(1):47-57.
Chen Rong, Li Quan, Wang Hongwei. Fracture analysis of an horizontal stabilizer shaft[J]. Failure Analysis and Prevention, 2009,4(1):47-57. (in Chinese)
- [2] 朱有利,刘开亮,黄元林,等.应力集中和表面完整性对平尾大轴抗疲劳性能的影响[J].机械工程学报,2012,48(22):93-97.
Zhu Youli, Liu Kailiang, Huang Yuanlin, et al. Effects of stress concentration and surface integrity on anti-fatigue performances of horizontal stabilizer shaft [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48 (22):93-97. (in Chinese)
- [3] Jaw L, Merrill W. CBM+ research environment-facilitating technology development, experimentation, and maturation[C]//Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE Xplore, 2008:1-6.
- [4] 袁慎芳.结构健康监控[M].北京:国防工业出版社,2007:39-49.
- [5] 胥保春,袁慎芳,邱雷.Lamb波与瞬时相位技术在损

伤识别中的应用[J].振动、测试与诊断,2010,30(3):240-244.

Xu Baochun, Yuan Shenfang, Qiu Lei. Damage detection based on technology of Lamb wave and instantaneous phase[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(3):240-244. (in Chinese)

- [6] Cho H, Lissenden C. Structural health monitoring of fatigue crack growth in plate structures with ultrasonic guided waves [J]. Structural Health Monitoring, 2012,11(4):393-404.
- [7] Giurgiutiu V, Xu B, Chao Y, et al. Smart sensors for monitoring crack growth under fatigue loading conditions[J]. Smart Structures and Systems—An International Journal of Mechatronics, Sensors, Monitoring, Control, Diagnosis, and Maintenance, 2006, 2 (2): 101-113.
- [8] Ihn J, Chang F. Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: I. diagnostics[J]. Smart Materials & Structures, 2004,13(3):609.
- [9] Sohn H, Park H, LAW K, et al. Combination of a time reversal process and a consecutiv outlier analysis for baseline-free damage diagnosis[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007, 18 (4):335-346.
- [10] 邱雷,袁慎芳.集成压电健康监测扫描系统的研制及其应用[J].压电与声光,2008,30(1):39-41.
Qiu Lei, Yuan Shenfang. Research and application of integrated health monitoring scanning system based on PZT sensor array[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2008,30(1):39-41. (in Chinese)
- [11] 邱雷,袁慎芳,苏永振,等.基于Shannon复数小波和时间反转聚焦的复合材料结构多源冲击成像定位方法[J].航空学报,2010,31(12):2417-2424.
Qiu Lei, Yuan Shenfang, Su Yongzhen, et al. Multiple impact source imaging and localization on composite structure based on shannon complex wavelet and time reversal focusing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010,31(12):2417-2424. (in Chinese)



第一作者简介:杨伟博,男,1987年7月生,博士。主要研究方向为结构健康监测和裂纹扩展寿命预测。

E-mail: ywb1987@nuaa.edu.cn

通信作者简介:袁慎芳,女,1968年4月生,教授、博士生导师、长江学者特聘教授、国家杰出青年基金获得者。主要研究方向为结构健康监测、先进智能传感技术、无线传感器网络及信号信息处理技术。

E-mail: ysf@nuaa.edu.cn

