

采用聚焦 Lamb 波方法的板结构螺钉松动监测

王 强¹, 袁慎芳², 田 峰³, 江 兵¹

(1. 南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210046; 2. 南京航空航天大学 智能材料与结构航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016;
3. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210046)

摘 要:针对基于压电元件和主动 Lamb 波的螺钉松动监测研究中存在的问题, 研究采用聚焦 Lamb 波信号方法改进现有监测技术。介绍和分析了基于时间反转处理的 Lamb 波信号聚焦原理和过程, 以及基于此的螺钉松动监测特征参数提取以及方法的实现技术; 通过在铝板盒段试件上的实验, 给出了实验验证, 证明了该方法具有较好的实用性。

关键词:结构故障监测; 螺钉松动; 时间反转聚焦; 盒段; Lamb 波

中图分类号:TB302.5; TB33

文献标识码:A

Study on Structural Bolt Debonding Monitoring Based on Focused Lamb Waves

WANG Qiang¹, YUAN Shenfang², TIAN Feng³, JIANG Bin¹

(1. College of Automation, Nanjing University of Post & Telecommunications, Nanjing 210046, China;
2. The Aeronautic Key Lab. for Smart Material and Structure, Nanjing University of Aeronautic and Astronautic, Nanjing 210016, China;
3. College of Telecommunication and Information Engineering, Nanjing University of Post & Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: Aiming to the problems in the bolt debonding monitoring based on PZT and active Lamb wave, this paper presented the improved monitoring method based on focused Lamb waves. The principle and procedure of the Lamb waves focalization by time-reversal process. Improved bolt debonding monitoring method and its application technique are analyzed. The effect and practicability of the new method were demonstrated in experiments in which the joints of a test box with aluminum board were monitoring.

Key words: structure damage monitoring; bolt debonding; time-reversal focalization; test box; Lamb waves

0 引言

现代航空航天飞行器结构是技术高度综合、复杂的系统, 局部、微小的损伤就可能引起重大事故, 对结构的在线监测意义显得尤为重要。飞行器结构的很多连接都是依靠螺钉来实现, 为防止结构损伤带来的灾难或损失, 必须对结构进行有效的监测。

目前研究较多的螺钉松动监测技术都是基于声波的监测方法^[1-4], 即在结构中激发一定形式的声波信号, 通过采集结构响应信号并分析提取相关特征参数, 实现对螺钉连接情况的监测。对于板、壳类结构而言, 在结构中传播的 Lamb 波信号传播特性复杂, 加上使用环境及结构的复杂性, 常会使结构响应的稳定性和信噪比降低, 从而造成误判和监测失效。针对这一问题, 本文研究采用时间反转聚焦原理, 实现监测信号和特征参数的聚焦, 简化信号分析和特

征参数提取难度, 提高 Lamb 波监测响应信号性能、提高监测系统稳定性, 并进行实验验证和对比。

1 Lamb 波的时间反转聚焦原理

上世纪 80 年代末 90 年代初, 法国科学家 Fink 将时间反转理论引入到声学领域, 他所带领的研究小组对此开展了大量的理论和实验研究工作^[5]。时间反转理论是声互易性原理的应用之一, 其过程是指传感器接收到来自声源结构响应信号后, 在时间域内将信号反转, 再发射出去, 即先到后发、后到先发, 使响应信号在波源处实现空间和时间上聚焦, 其最大的特点是不需要介质和换能器数组性质和结构的先验知识, 就可实现声波自适应聚焦和检测。研究表明, 时间反转处理可使板结构中传播的多模态 Lamb 波信号重新聚焦并重构初始波源信号^[6-7]。

借鉴信号与系统理论, 可对 Lamb 波的时反过

收稿日期: 2011-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61001077), 江苏省高校自然科学基金资助项目(11KJB130002), 南京邮电大学引进人才科研启动基金资助项目(NY209019)

作者简介: 王强(1980-), 男, 江苏句容人, 讲师, 博士, 主要从事结构健康监测、信号处理的研究。袁慎芳(1968-), 女, 江苏南京人, 教授, 博士, 主要从事结构健康监测、先进智能传感技术、无线传感器网络、信号信息处理技术等方面的研究。

程作以下简单的描述。如果用 $S(\omega)$ 表示激励信号的频域表达式, $H(\omega)$ 表示传播路径的传输函数, 则结构响应信号经传感器获取后的频域表达式为

$$R(\omega) = H(\omega) \cdot S(\omega) \quad (1)$$

令 $X(\omega)$ 为 $R(\omega)$ 的复共扼(时域中即为时反), 即

$$X(\omega) = R^*(\omega) = H^*(\omega) \cdot S^*(\omega) \quad (2)$$

将式(2)两边同乘 $H(\omega)$, 即将时反后的响应信号由传感器重新发射, 可得

$$Z(\omega) = H(\omega) \cdot H^*(\omega) \cdot S^*(\omega) \quad (3)$$

式(3)中 $Z(\omega)$ 可认为是时间反转处理后输出的频域表达式; “ $H(\omega) \cdot H^*(\omega)$ ” 一项是实、偶、正函数, 它在时间零点的傅里叶反变换是同相迭加的, 会得到主相关峰值, 这使得对于同一个激励信号 $S(\omega)$, $Z(\omega)$ 比 $R(\omega)$ 大。这就是 Lamb 波时间反转法聚焦的基本原理。

2 螺钉松动监测原理及改进方法

结构螺钉松动后, 结构的物理特性及边界条件随之发生变化, 对设定的激励信号的响应就会发生改变。根据这一原理, 利用安装在结构上的激励器对结构施加激励, 并通过传感器测量结构的响应, 从中提取信号特征参数, 判断结构损伤的发生与否。

基于 Lamb 波的损伤监测技术是板结构健康监测中采用最多的一种方法。但 Lamb 波传播特性复杂, 存在多模及频散特性, 在结构损伤监测过程中, 信号分析困难。在板结构螺钉松动监测中, 螺钉所处位置不同, 其监测难度不同。一般, 处于结构内部区域的螺钉可通过在其四周布置传感器和激励器, 通过判断 Lamb 波响应信号的幅值变化来监测其松动情况。当螺钉处于结构边缘时, 传感器和激励器只能布置在待测螺钉一侧, 通过反射信号来判断螺钉情况, 而边界对 Lamb 波传播特性影响较大, 信号较复杂, 会发生模式变换、混叠等现象, 如何选择合适的信号参数作为特征量提取困难。

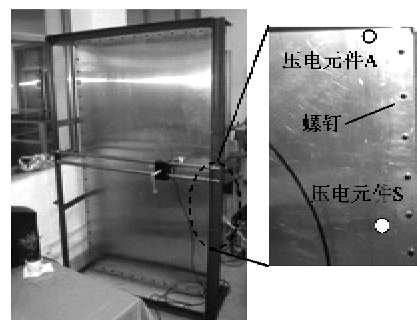
时间反转处理可以使信号在空间和时间上重新进行聚焦, 使各模态信号及来自边界的反射和散射信号同时同向到达聚焦点, 最终得到与初始激励信号具有相同特性的波包, 信号的能量也汇聚到聚焦点。聚焦后各模态信号、边界反射信号及散射信号对结构变化的响应也得以聚焦和叠加, 从而实现对特征参数的放大增强, 由于噪声是外界因素产生, 并不具备反转聚焦所要求的条件, 因此在时反聚焦时是无序叠加, 并不会对聚焦信号产生影响。这一特点恰好克服了对于近边界螺钉松动监测时存在的信号分析复杂、特征参数提取困难的问题。

为了进一步降低信号处理难度, 本文研究中采

用窄带信号作为激励信号, 以激发出单一模式为主的 Lamb 波信号。基于压电元件的正反压电效应, 选择 P5 压电陶瓷片作为激励器和传感器。监测时将激励信号 $s(t)$ 加载到激励器上在结构中激发处单一模式为主的 Lamb 波信号, 经传感器接收采集结构的响应信号 $r(t)$, 再将响应信号以时间 T 为反转周期进行时反得到反转信号 $x(t) = r(T-t)$, 将反转信号再次加载到激励器上, 再经传感器接收采集的结构响应信号 $z(t)$ 即为最后的目标信号。通过选取信号幅值或能量变化作为参数量, 实现对结构螺钉状态的监测。

3 实验分析

机翼盒段是一种典型的飞行器结构, 对其连接部进行螺钉松动监测研究具有普遍意义。因此, 实验中所针对的实验对象为 LF-21M 防锈铝板与钢架构成的盒段, 二者之间采用螺钉连接。钢架尺寸为 $2\,000\text{ mm} \times 1\,200\text{ mm} \times 395\text{ mm}$, 铝板尺寸为 $2\,000\text{ mm} \times 1\,200\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$, 螺钉间距为 100 mm , 螺钉到铝板边缘的距离为 30 mm , 压电元件布置在距铝板边缘 110 mm 处, 相邻压电元件的距离均为 450 mm 。整个盒段结构中, 任意两压电元件间的区域所包含的螺钉数为 5。实验时松动待监测区域内的螺钉并进行监测。图 1(a) 是盒段的结构以及其中一个监测通道区域内压电元件、螺钉布置图。实验中信号采集与处理采用了南京航空航天大学开发的多通道压电扫查系统^[8], 如图 1(b) 所示。实验研究中选用的窄带信号为 5 波峰调制正弦信号(见图 2), 其中心频率为 50 kHz 。



(a) 实验试件



(b) 实验设备

图 1 实验设备和实验试件

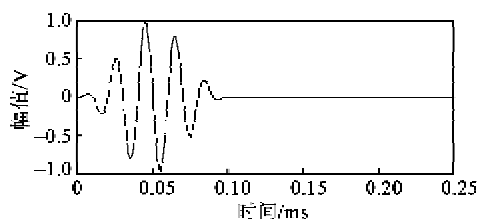


图 2 窄带 5 波峰正弦调制信号时域波形

如图 1(a)所示,实验中选取盒段右下区域的螺钉松动监测数据进行分析 and 对比。实验时采用压电元件 A 激励而压电元件 S 作为传感器,分别采用传统方法和本文研究的时间反转改进方法进行监测。图 3、4 是采用传统的声激励方法及本文改进方法对 1 号(见图 1)螺钉松动时的实验监测结果,监测结果参数如表 1 所示。

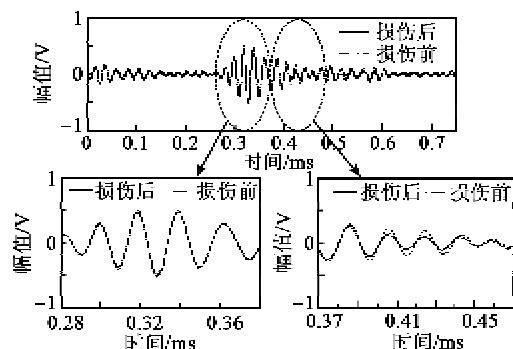


图 3 采用传统方法得到的损伤前后结构响应信号及细节图

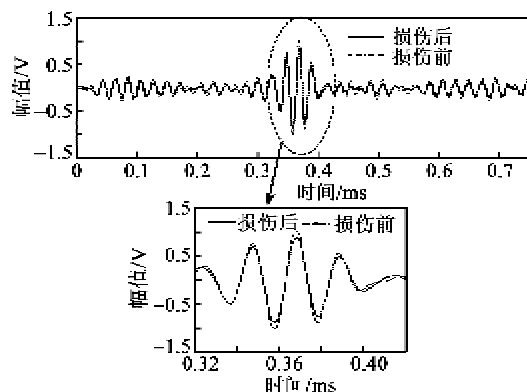


图 4 采用时反改进方法得到的损伤前后结构响应信号及细节图

表 1 盒段 1 号螺钉松动前后两种方法监测结果对比

	损伤前 峰值/V	损伤后 峰值/V	变化量/V	变化率/%
常规方法	0.471 8	0.497 6	0.025 8	5.47
时反聚焦方法	0.865 5	1.011 5	0.146 0	16.87

由于螺钉的松动或缺失,检测区域结构的刚度及边界条件发生变化,造成了 Lamb 波响应信号能量的变化,从图 3 的结构响应变化情况可观察到这一变化,但变化较弱。从信号幅值上看,由于 1 号螺钉并不在信号的直接传播路径上,因此松动 1 号螺钉引起的最大峰值变化仅从 0.471 8 V 变化增加至 0.497 6 V,变化量为 0.025 8 V,变化率为 5.47%;而结构响应中的反射信号峰值也由于螺钉的松动发生了一定的变化,但这些变化并不是存在于某一波包中,而是分布在较长时间序列的多个波包上,这在一方面增加了损伤特征参数的提取难度,另一方面由于这些波包本身能量就较小,因此影响了信号的信噪比和检测的灵敏度。采用相同的检测设备和设备参数,利用基于时反处理的改进监测方法对 1 号螺钉进行螺钉松动检测的实验结果如图 4 所示。从图中看出,结构响应信号实现了聚焦,形成了一个主波峰,其幅值要大于图 3 所示的传统检测方法得到的结构响应信号最大波峰能量。由于设备及各项参数均未发生变化,噪声信号的能量也就没有发生变化;同时从信号幅值的变化情况上看,松动 1 号螺钉引起的聚焦波峰值从 0.865 5 V 变化增加至 1.011 5 V,变化量为 0.146 0 V,变化率为 16.87%,松动螺钉后造成的结构响应峰值变化量比传统方法得到的结果提高了 5.66 倍,提高了信号特征参数的能量和变化量。信号峰值和变化量的提高使信号抗干扰能力增强,减少了监测系统的误判。

4 结束语

本文采用 Lamb 波时间反转聚焦方法,对螺钉松动监测进行了分析和改进,解决近边界螺钉松动监测中存在的 Lamb 波信号分析和特征参数提取问题。研究分析和实验对比表明,本文提出的改进方法可有效克服 Lamb 波所固有的模式混叠,以及环境噪声、边界反射和信号散射体等因素带来的不利影响,信号分析和特征参数提取更简单,为解决复杂条件下真实飞行器结构的损伤监测与评估研究提供了新的途径。

参考文献:

- [1] NG C T, VEIDT M. Lamb-wave-based technique for damage detection in composite laminates[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(7): 074006.

(下转第 80 页)