

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905828

航天器舱壁结构碎片撞击声发射定位技术研究*

范志涵¹, 张宇², 芮小博²

(1. 中国空间技术研究院 北京 100094; 2. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

摘要: 撞击信号在航天器加筋舱壁结构中的传播规律非常复杂,对太空碎片撞击的快速定位产生阻碍。针对以上问题,提出了一种基于声发射的软阈值滤波双曲线算法。该算法通过软阈值方案解决了加筋结构中衰减声波到达时间判断的难题,通过滤波对波速最快的 S_0 模态进行保留,减少了声波的模态转换对定位造成的影响。通过有限元模拟分析了加强筋对兰姆波的影响规律,得到了不同频带下 S_0 模态兰姆波的能量通过比值,给出滤波频带确定依据。通过对20个撞击点的定位实验验证了算法的可行性,对实验样板来说,当频带为100~200 kHz时定位结果最佳,平均绝对误差为5.59 mm。

关键词: 航天器; 太空碎片; 声发射; 撞击; 定位

中图分类号: TH701 TB553 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Research on space debris impact location of spacecraft bulkhead structure based on the acoustic emission technique

Fan Zhihan¹, Zhang Yu², Rui Xiaobo²

(1. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The propagation of the impact signal in the reinforced bulkhead structure of spacecraft is very complex, which hinders the rapid location of space debris impact. To solve these problems, a soft threshold filtering hyperbolic algorithm based on acoustic emission is proposed. The algorithm solves the difficult problem of judging the arrival time of the attenuation of the wave in the reinforced structure by the soft threshold scheme. The S_0 mode with the fastest wave speed is preserved by filtering, which reduces the influence of the modal transition of the acoustic wave on the location. The influence law of ribs on Lamb waves is analyzed by finite element simulation. The energy passing ratio of S_0 mode Lamb waves in different frequency bands is obtained to determine the filtering frequency band. The feasibility of the algorithm is verified by the location experiments of 20 impact points. For the experimental plate in this study, the best location result is obtained when the frequency band is 100~200 kHz, and the average absolute error is 5.59 mm.

Keywords: spacecraft; space debris; acoustic emission; impact; location

0 引言

人类航天事业自20世纪50年代以来获得了蓬勃的发展,在提供通信、导航等服务的同时,也产生了大量的空间垃圾与碎片^[1]。据不完全统计,地球轨道上目前大于10 cm的空间碎片数量在2018年达到18 000多个,毫米级的微小碎片更是超过了200亿个^[2]。碎片的飞行速度可高达15 km/h,如果与航天器发生撞击,极易造成舱壁破损及压力失控,严重威胁航天器及航天员的在轨运

行安全。例如在2018年8月,与国际空间站对接的美国联盟号飞船遭到空间碎片撞击,在轨道舱的舱体上产生直径约2 mm的漏孔^[3]。因此,对于碎片e的及时感知与定位对航天器安全保障来说显得尤为重要。

目前通用的结构撞击源定位检测技术主要分为加速度法^[4]、光纤光栅法^[5]、电阻薄膜法^[6]及声发射法^[7]等。加速度法基于撞击时产生的瞬时加速度变化获取撞击信息,方法简单但检测范围及精度有限。光纤光栅法通过对结构局部变形的测量进行定位,NASA采用了36个布拉格光栅对38 cm×38 cm的试件进行了定位^[8]。电阻薄膜法

收稿日期:2019-11-19 Received Date:2019-11-19

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(61973227)、天津市重点研发项目(19YFSLQY00080)资助

基于撞击导致的电阻分布变化进行定位,但需预先铺设电阻薄膜。声发射法通过检测撞击产生的声发射信号,通过信号时间信息的处理获得位置。综合来看,声发射技术在定位精度、资源占用、系统集成度和环境适用性等方面具有明显优势。此外,声发射检测法可进行实时、在线检测,对于航天器舱壁的碎片撞击检测具有良好的应用前景。

基于声发射的撞击定位方法主要基于碎片与航天器接触时激发出的应力波,由于撞击的发生具有明确的起始时间,因此可应用基于到达时间差的定位算法^[9]。该方法具有原理简单、易于实现和定位速度快等优点,只需少量传感器,对于航天器来说具有可集成性与轻便性。到达时间差方法对于各项同性的平板结构具有良好的定位精度。然而对于航天器来说,为了保证其关键部位具有足够的机械强度,例如密封舱壁,同时又不使质量过大,通常在其外表面设置有周期性的加强筋结构^[10]。板中的撞击信号在经过加强筋的过程中,其时域和频域中的特征会发生复杂变化。这些变化增加了能量、幅值、阈值及模态等特征的选取与参数的设定的难度,从而增大了撞击源定位的难度,使得平板中的撞击源定位传统方法难以直接应用于加筋板中^[11]。

针对于加筋板等复杂结构的撞击定位问题,Reusser 等^[12]提出了波数域成像算法,可通过二维傅里叶变换在波数域上确定信号的方向,需要在板上加载两个 64 个元素的传感器阵列。传感器阵列中的阵元数量大,且空间傅里叶变换计算复杂度大。Al-Jumaili 等^[13]及芮小博等^[14]针对复杂结构的碰撞定位问题,分别提出了 T 映射法与幅度谱映射法。以上方法通过划分网格并建立时域或频域的特征表,在检测时通过匹配特征值进行定位。以上方法需要进行划分网格并进行预实验,前期工作量过大,对于航天器来说实用性差^[15]。

为了解决航天器舱壁加筋结构的撞击定位问题,本文提出了一种软阈值滤波双曲线算法。该方法基于传统的双曲线定位法,具有轻量化易集成的航天可适性。本文通过有限元仿真对加筋板中兰姆波传播特性的影响进行研究,确定能量通过频段,并结合自适应的软阈值确定方案,获取了加筋板中准确的时间差参数,以实现撞击的快速精确定位。

1 工作原理

1.1 算法流程及关键点分析

本文所研究的软阈值滤波双曲线定位法的流程如图 1 所示。为了使双曲线定位算法适用于航天器加筋结构,适应声波的复杂传播特性,本方法通过对信号的预滤波处理及软阈值的自适应调节以获得更为准确的频段兰姆波信号到达时间,从而实现撞击的定位。

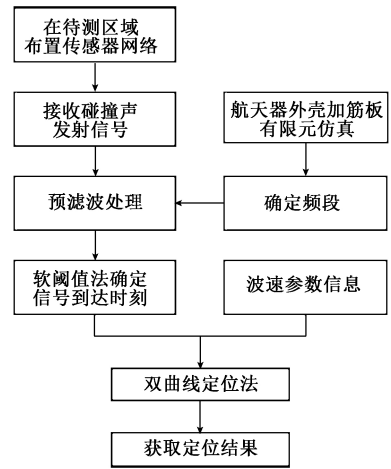


图 1 软阈值滤波双曲线定位法流程

Fig.1 Sketch map of the soft threshold filtering hyperbolic location method

该算法采用 3 个传感器组成三角网络,接收撞击声发射信号,在得到撞击信号到达时间差后,通过双曲线法进行快速定位,定位原理如图 2 所示。

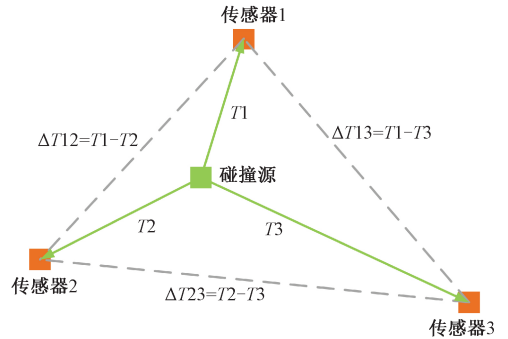


图 2 双曲线定位法原理

Fig.2 The principle of hyperbolic location method

该方法通过获得每两个传感器的到达时间差,可确定一条双曲线。每两只传感器可绘制一条双曲线,由于误差的存在,3 条双曲线交于 3 点,以 3 点构成的三角形重心作为撞击定位点。

基于时差法的定位计算中,最主要的是获得传感器之间的信号时间差。针对于加筋板结构,信号在传播过程中将会发生反射、透射、模态转换等复杂变化。为了使信号能量更加集中,突出最先到达模态的能量,同时去除电磁及环境噪声,该方法首先对信号进行预滤波处理。本文所研究的难点之一在于滤波的频带选择,将在第 2 节中进行介绍。

为了获得信号的到达时间,需要通过阈值进行判断。传统的固定阈值方案对于平板结构具有良好的适应性。而信号在通过不同数量的加强筋时,能量的幅度衰减不同,因此无法用固定阈值方案。本文提出的软阈值法可

根据信号特征进行自适应阈值调整,解决加筋板中的能量衰减问题。

1.2 模态分析

在平板中,声波将以复杂的多模态兰姆波形式传播,且存在着频散现象。在波的传播过程中,波场会产生而分离,这为声源的到达时间差确定噪声了困难。为选取适当的模态用于撞击源定位,根据瑞利-兰姆方程结合航天试件参数,得到 5A06 铝合金材料的群速度的频散曲线如图 3 所示。

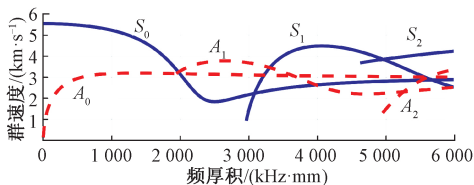


图 3 5A06 材料群速度频散曲线

Fig.3 5A06 material group velocity dispersion curve

对于撞击信号来说,主要以 S_0 模态与 A_0 模态为主,从频散曲线中也可看出其他模态所处的频带较高,衰减相对更为明显。其中 A_0 模态能量占比更大,但 A_0 模态兰姆波的波速比 S_0 模态慢,在 S_0 模态兰姆波之后到达接收点。尤其是在低频段范围内,两个模态的群速度差距非常明显。同时, S_0 模态由于速度最快,在时域中不易受到其他模态的混叠与干扰。

因此,从理论上来说,通过 S_0 模态的到达时间进行定位是一种理想的方案,可以弥补信号频散特性带来的影响。为获得 S_0 模态兰姆波的准确到达时刻,需要确定合理的阈值。

1.3 软阈值计算方法

本文所研究的难点之二在于软阈值的确定方案。首先考虑传感器的耦合、频响及环境噪声等外部因素,在安装完成后进行预实验采集无撞击的噪声信号并进行预滤波。在滤波后,每隔 1 ms 取 0.5 ms 时长的噪声信号,共取 10 段。对每段噪声信号的包络极值点取绝对值后降序排列,去除头尾的 20% 点,取幅值的平均值为该通道的无撞击基准,第 i 个传感器的无撞击基准 T_i 可以表示为:

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^{10} \sum_{k=0.2m}^{0.8m} N_j(k)}{10} \quad (1)$$

式中: m 为每段噪声的信号长度; N_j 为第 j 段信号的排列后数据。对于航天器加筋舱壁来说,更为重点的是加强筋对于信号的衰减,下面引入参考放大系数的概念对阈值进行确定。在传感器获得撞击信号后,将信号的幅值进行降序排列,取第 11~20 个点求平均值,记为通道基准。取 3 个传感器中通道基准最小的通道,将其无撞击

基准放大 25 倍作为最终该通道的软阈值。其余通道的放大倍数按照通道基准的倍数进行放大,再分别与通道的无撞击基准相乘,即可获得 3 个通道的软阈值。以上为软阈值的确定方法,该算法可以根据加筋板中信号能量衰减进行自适应调节,同时考虑了环境噪声等其他因素的影响,以进一步提高撞击定位的精度。

2 航天加筋板波场有限元仿真

2.1 模型建立

针对第 1 节中所提到的滤波频带的关键因素,需要分析加强筋对于波的传播影响,为实验确定滤波频段。为了解决以上问题,本节将以航天器加筋舱壁结构为研究对象,通过有限元仿真的方法对兰姆波的频域特征进行分析。本文基于 ABAQUS 商业有限元仿真软件的 Explicit 分析模块进行仿真。

本文所分析的声源是带有冲击特征的点激励信号,在平板中的传播特性是对称的,可采用效率更高的二维有限元模型。根据航天器加筋舱壁材料与尺寸,选用 5A06 铝镁合金材料,板厚度为 2.5 mm,长度为 2 000 mm,加强筋的筋高为 20 mm,筋宽为 4 mm。为了研究不同加强筋个数对于波束的影响,模型中使用了 4 条加强筋的设置,仿真模型如图 4 所示。

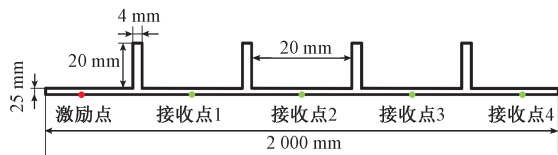


图 4 有限元仿真模型

Fig.4 The finite element simulation model

模型采用四边形单元的网络类型,根据信号的 1 个波长内的网格数量不少于 10 个为标准对模型进行划分,并综合考虑计算精度与计算时长的需求,网格大小设置为 0.5 mm。根据网格方向最小尺寸除以波速要大于时间步长的要求,选取 50 ns 为仿真步长。

2.2 时域特征分析

为了便于分析板中兰姆波的模态特征,首先采用频率为 200 kHz 的单频正弦信号作为激励载荷,仿真中使用了 5 个周期。为减少频带中旁瓣的能量占比,对激励信号叠加汉宁窗预处理,其表达式如下:

$$y(t) = \begin{cases} -\frac{1}{2} \times \sin(2\pi f_c t) \times \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{t_0}\right)\right), & t \in [0, t_0] \\ 0, & t > t_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_c 表示点载荷的中心频率; t_0 表示载荷持续的时间, 其时域及频域曲线如图 5 所示。

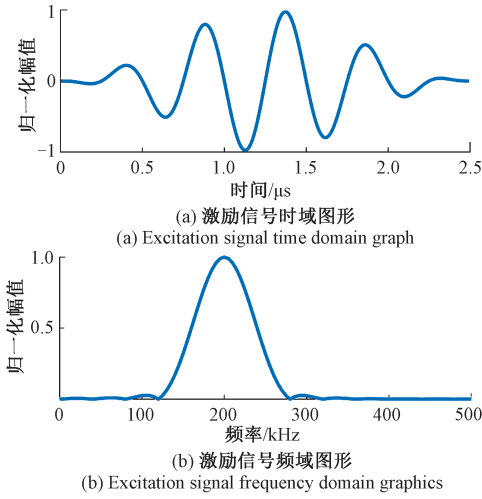


图 5 激励载荷信号特征

Fig.5 Excitation load signal characteristics

在激励点处以集中力的形式沿施加上述载荷, 在接收点处接收垂直于板方向的位移, 接收点 1~4 的时域纵向位移如图 6 所示。

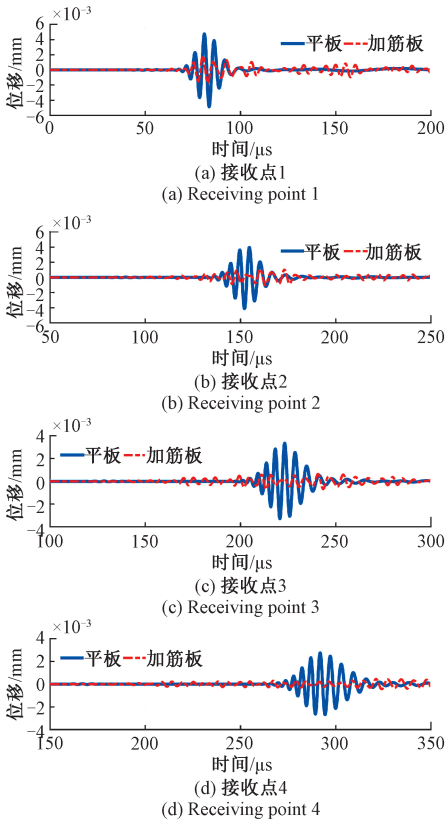


图 6 各接收点位移时域波形

Fig.6 Time domain waveform of each receiving point

从图 6 中可以看出, 随着接收点与激励点的间隔增大, 信号的到达时间滞后。随着传播路径的增长、加强筋数量的增多, 信号的频散现象愈加严重, 这说明了选择最快的 S_0 模式的必要性。信号的幅值整体衰减明显, 进一步说明了使用软阈值法的必要性。

2.3 频域特征分析

为了研究加强筋在频域上的特征, 在激励点处施加扫频信号, 从 50 kHz 递增至 400 kHz, 时长 20 μ s, 表达式为:

$$y(t) = \begin{cases} \sum_{f=50 \text{ kHz}}^{400 \text{ kHz}} \sin(2\pi ft), & t \in [0, t_0] \\ 0, & t > t_0 \end{cases} \quad (3)$$

激励信号的时频图和频域上的特征如图 7 所示, 从图 7 可以看到激励的能量均匀分布在 50~400 kHz 之间。

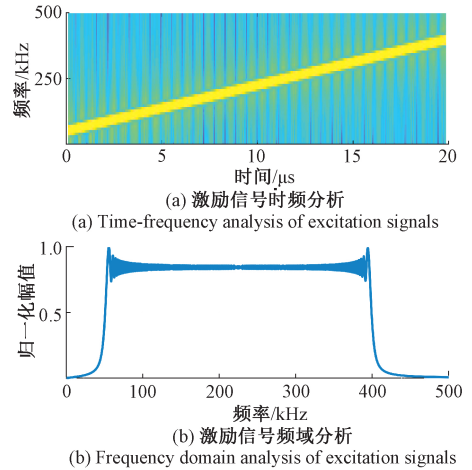


图 7 宽频激励载荷信号特征

Fig.7 Broadband excitation load signal characteristics

根据频散曲线可计算 A_0 模式与 S_0 模式的波速, 根据距离与波速的关系计算可获得到达时刻, 截取 A_0 模式到达之前的 S_0 模式进行分析。

分别对平板及加强板上的截取段进行傅里叶变换, 将加强板的频谱与平板的频谱做比值, 定义为能量比, 以表征加强筋对 S_0 模式兰姆波频域上的影响。接收点 1 和 2 与激励点的间距比较近, 所截取波的时间长度较短, 频率分辨率较低。因此着重通过接收点 3 和接收点 4 的数据进行分析, 其能量比的曲线如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 能量比曲线的幅值大于 1, 说明发生了模式转换现象。能量比曲线具有一定的起伏, 但在 100~200 kHz 频段具有明显的带通滤波器特性。因此, 在下文中将使用该频段进行滤波。

3 实验平台设计

为了验证本文算法的有效性并对其精度进行评估,

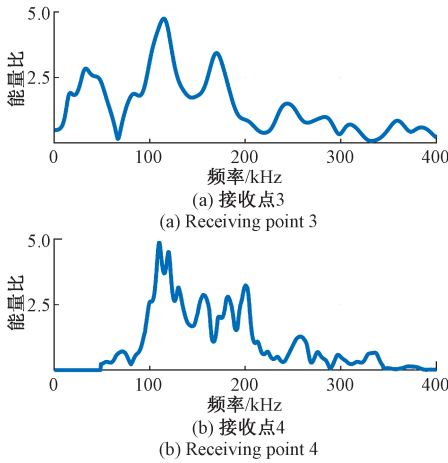


图8 各接收点能量比曲线

Fig.8 Energy ratio curve of each receiving point

搭建了实验平台并进行测试。平台包括1个声发射采集仪,3个信号放大器,3个声发射传感器,1块测试板,1台计算机。实验平台如图9所示。

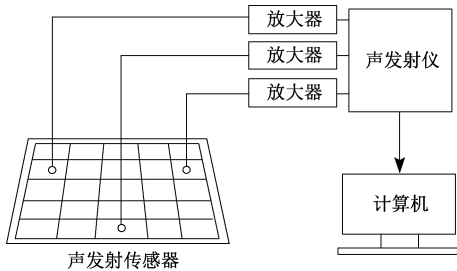


图9 实验平台

Fig.9 Experimental platform

实验中选用的声发射传感器是美国物理声学公司生产的 Nano30 型号超声传感器,其直径为 8 mm,在 100~700 kHz 频段都有很好的响应,可以满足实验需求。撞击信号将被传感器收集,经过 40 dB 放大后被声发射仪转换为数字信号存储,随后通过 MATLAB 软件实现算法,给出定位结果。

实验中使用的测试板是 5A06 铝合金板,其材料常用于航天器结构,板的尺寸为 1 m×1 m,厚度 2.5 mm。测试板上具有横竖正交的 8 条加强筋,筋高 20 mm,厚 4 mm,筋间距 200 mm。测试板的实际结构如图 10(a)所示。

在实验过程中,在无筋一侧布置传感器,在测试板上建立直角坐标系,以左下角为原点,100 mm 为 1 个单位,测试方案如图 10(b)所示。3 个声发射传感器坐标分别为 $P_1(1,7)$ 、 $P_2(9,7)$ 及 $P_3(5,1)$ 。对 20 个点进行测试,每个点的间隔为 0.5 个单位,待测点的坐标如表 1 所示。在实验的过程中,对于每个待测点使用 5 次撞击取平均值对算法的准确性进行评价。

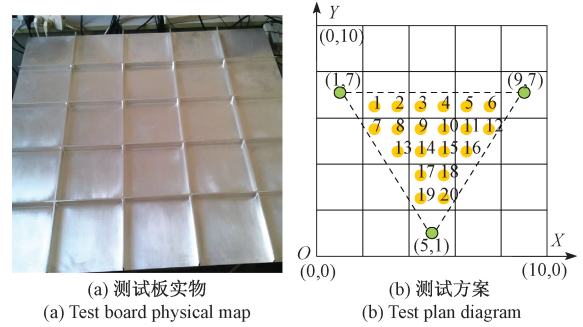


图 10 测试板结构及测试方案

Fig.10 Test board structure and test plan schematic

表 1 待测点坐标

Table 1 Point coordinates to be measured

待测点序号	坐标	待测点序号	坐标
1	(2.5, 6.5)	11	(6.5, 5.5)
2	(3.5, 6.5)	12	(7.5, 5.5)
3	(4.5, 6.5)	13	(3.5, 4.5)
4	(5.5, 6.5)	14	(4.5, 4.5)
5	(6.5, 6.5)	15	(5.5, 4.5)
6	(7.5, 6.5)	16	(6.5, 4.5)
7	(2.5, 5.5)	17	(4.5, 3.5)
8	(3.5, 5.5)	18	(5.5, 3.5)
9	(4.5, 5.5)	19	(4.5, 2.5)
10	(5.5, 5.5)	20	(5.5, 2.5)

4 实验结果分析

4.1 定位结果

首先使用本文所提出的软阈值滤波双曲线定位法结合 100~200 kHz 的滤波频段对实验数据进行定位,平均误差统计如图 11 所示。

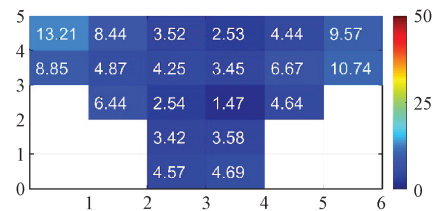


图 11 100~200 kHz 误差分布

Fig.11 Error distribution with 100~200 kHz

从图 11 中可看出,该方法的平均误差较小,最大误差为 13.21 mm,最小误差为 1.47 mm,平均误差为 5.59 mm。从误差的分布来看,距离传感器较近的边缘点误差明显要大于中间点。这是由于边界点对于其他两个传感器来说

距离较远,加强筋的条数较多,信号衰减严重,信噪比降低,对于获取信号到达时间噪声一定的误差。

4.2 不同滤波频段对定位结果的影响

本文所研究的定位方法的关键参数之一为滤波频段,为了分析该参数对定位精度的影响,对不同频段滤波的结果进行对比,结果如图 12 所示,分别展示了不滤波,0~100,200~300 kHz 滤波的定位结果绝对误差分布。

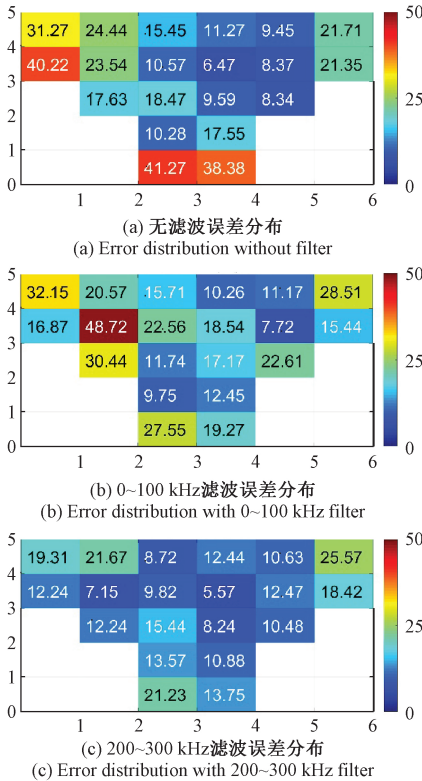


图 12 误差分布示意图

Fig.12 Diagram of absolute error distribution

从图 12 中可以看出,对信号采用其他滤波方案时,定位的误差显著增大,最大误差依然出现在靠近传感器位置附近。对于以上 3 种方案,其平均误差分别为 19.28、19.96、13.49 mm,均明显高于 100~200 kHz 滤波频段的定位效果。

下面将继续深入分析滤波频段对于时域的影响,选取 17 号点与 P_1 传感器作为参考点,对不同滤波的时域波形进行比较,如图 13 所示。绿色实标线为理论信号到达时间,红色虚标线为实际计算出的到达时间。

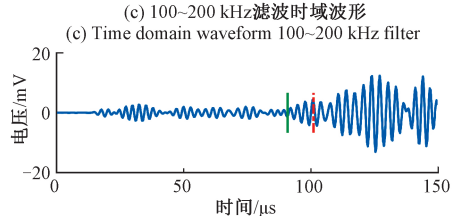
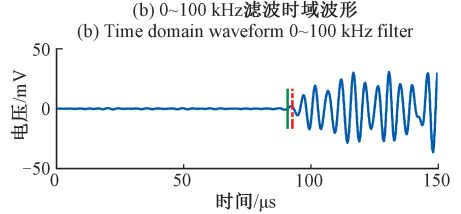
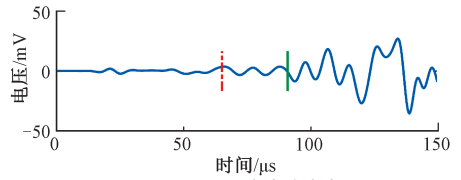
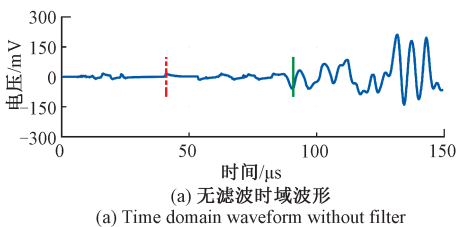


图 13 不同频段的时域波形比较

Fig.13 Comparison of time domain waveforms in different frequency bands

从图 13 中可以看出,对于不滤波信号来说,存在着明显的噪声,在信号到达前易因为噪声产生误判。对于 0~100 kHz 滤波信号,由于 S_0 波段能量未主要集中在该频段内,而噪声在理论上集中于低频段,因此滤除效果较差,同样因为噪声产生误判。对于 200~300 kHz 来说,由于能量通过少,其幅值产生了明显的衰减,难以捕捉波束到达的时刻。而对于最优的 100~200 kHz,可看出在信号到达前波形平稳,说明噪声滤除效果好。由于 S_0 模态的能量通过率较高,其波形得到了较为完整的保留,易于获取准确到达时刻。

综合来看,本文所研究的软阈值双曲线定位法,在合适的滤波频段选取条件下,可克服航天器加强筋板中声波传播的幅度衰减、模态转换、反射等问题,实现对撞击的定位。

5 结 论

本文提出了一种基于声发射的软阈值滤波双曲线算法,旨在解决航天器加强筋舱壁结构的撞击声源定位难题。该算法通过软阈值算法自适应声波在加强筋结构中的衰减,通过滤波凸显波速最快的 S_0 模态的波形特征,实现对到达时间的判断,从而实现撞击的定位。通过有限元仿真研究了加强筋对兰姆波的传播特性影响,结果说明加强筋对于兰姆波具有幅值衰减及模态转换的作用,对于波速最快的 S_0 模态来说,在 100~200 kHz 频段信号的通过能量高。通过 20 个撞击点的实验,证实了在该滤波频段下,软阈值滤

波双曲线算法的定位平均误差可达 5.59 mm。该研究为复杂结构的突发单点声源定位提供了新的思路,为航天器的飞行安全保障工作提供了新技术。

参考文献

- [1] 龚自正, 韩增尧, 庞宝君. 空间碎片防护研究现状与国内发展建议[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(1): 24-31.
GONG Z ZH, HAN Z Y, PANG B J. A review of studies on protection against M/OD[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(1): 24-31.
- [2] 泉浩芳, 张小达, 周玉霞, 等. 空间碎片减缓策略分析及相关政策和标准综述[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(1): 7-14.
QUAN H F, ZHANG X D, ZHOU Y X, et al. Analysis of space debris mitigation strategies and overview of its related policies and standards [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(1): 7-14.
- [3] EWALD R. Is it worth the risk? - An astronaut's approach to risk awareness[J]. Acta Astronautica, 2019, 161: 368-372.
- [4] BETTELLA A, FRANCESCONI A, PAVARIN D, et al. Application of Wavelet Transform to analyze acceleration signals generated by HVI on thin aluminum plates and all-aluminum honeycomb sandwich panels [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(12): 1427-1434.
- [5] SHRESTHA P, KIM J H, PARK Y, et al. Impact localization on composite structure using FBG sensors and novel impact localization technique based on error outliers[J]. Composite Structures, 2016, 142:263-271.
- [6] BRANDON E J, VOZOFF M, KOLAWA E A, et al. Structural health management technologies for inflatable/deployable structures: Integrating sensing and self-healing[J]. Acta Astronautica, 2011, 68(7-8):883-903.
- [7] CHEN C, LI Y, YUAN F G. Impact source identification in finite isotropic plates using a time-reversal method: experimental study[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(10): 105025.
- [8] RICKMAN S L, RICHARDS W L, CHRISTIANSEN E L, et al. Micrometeoroid/Orbital debris (MMOD) impact detection and location using fiber optic bragg grating sensing technology [J]. Procedia Engineering, 2017, 188:233-240.
- [9] 行鸿彦, 杨旭, 张金玉. 基于四元传声器阵列的声源全方位定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11):43-50.
XING H Y, YANG X, ZHANG J Y. Feature identification of acoustic emission signals of multiple propagating crack on wind turbine blade [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11):43-50.
- [10] 董静怡, 庞景月, 彭宇, 等. 集成 LSTM 的航天器遥测数据异常检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(0):22-29.
DONG J Y, PANG J Y, PENG Y, et al. Feature

identification of acoustic emission signals of multiple propagating crack on wind turbine blade [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7):22-29.

- [11] 庞宝君, 刘治东, 唐硕. 基于 HHT 变换的声发射源平面定位方法[J]. 无损检测, 2010, 32(1):1-5.
PANG B J, LIU ZH D, TANG X. Feature identification of acoustic emission signals of multiple propagating crack on wind turbine blade[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(1):1-5.
- [12] REUSSER R S, HOLLAND S D, CHIMENTI D E, et al. Reflection and transmission of guided ultrasonic plate waves by vertical stiffeners [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136(1): 170-182.
- [13] AL-JUMAILI S K, PEARSON M R, HOLFORD K M, et al. Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 72-73:513-524.
- [14] 芮小博, 李一博, 刘圆圆, 等. 采用幅度谱索引法的航天器密封结构泄漏点定位方法[J]. 航天器工程, 2019, 28(1):55-59.
RUI X B, LI Y B, LIU Y Y, et al. Feature identification of acoustic emission signals of multiple propagating crack on wind turbine blade [J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(1):55-59.
- [15] 王永俊, 贾建芳. 航天器自适应滑模变结构姿态控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9):9-15.
WANG Y J, JIA J F. Feature identification of acoustic emission signals of multiple propagating crack on wind turbine blade[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33(9):9-15.

作者简介



范志涵, 2007 年于天津大学获得硕士学位, 现为中国空间技术研究院高级工程师, 主要研究方向为航天器项目研制管理、航天器智能检测技术。

E-mail: vandavid@126.com

Fan Zhihan received his M. Sc. degree from Tianjin University in 2007. He is currently a senior engineer at China Academy of Space Technology. His main research interests include spacecraft project development management and spacecraft intelligent detection technology.



张宇(通信作者), 2009 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学副教授, 主要研究方向为结构健康检测技术。

E-mail: zhangyu@tju.edu.cn

Zhang Yu (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2009. He is currently an associate professor at Tianjin University. His main research interests include structural health detection technology.