

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311591

针对不连续带洞结构的声发射源定位方法研究*

张宇,刘嘉成,冯舒,芮小博,徐立鑫

(精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072)

摘要:由于兰姆波在舷窗等带孔结构表面的传播路径不再是线性路径,传统方法难以解决撞击的声源定位问题。本文针对该问题,提出了一种基于声发射的网格映射概率成像定位方法。该方法通过建立网格映射模型解决了信号传播的非线性路径难题,并通过对网格节点的信号最快传播路径计算得到相应的理论时间差值。之后利用自适应能量阈值方法与AIC方法计算信号的实际到达时间差,通过比较理论值与实际值的偏差构建概率图像以实现定位解算。通过有限元模拟分析了带洞结构对兰姆波传播路径的影响,给出信号传播路径的确定依据。通过对32个撞击点的定位实验验证了定位方法的可行性,平均绝对误差为1.15 cm。

关键词:声发射源定位;网格映射;到达时间差

中图分类号: TB553 TB771 TH17 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Research on acoustic emission source localization method for discontinuous structure with holes

Zhang Yu, Liu Jiacheng, Feng Shu, Rui Xiaobo, Xu Lixin

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: It is difficult to solve the acoustic source localization problem of impact with the traditional methods since the propagation path of Lamb waves on the surface of porthole structure is no longer a linear path. To address this problem, a grid mapping probabilistic imaging localization method based on acoustic emission is proposed in this study. This method solves the nonlinear path problem of signal propagation by establishing a grid mapping model, and the corresponding theoretical time difference is obtained by calculating the fastest propagation path of signal at the grid nodes. Then the actual arrival time difference of signal is calculated by using the adaptive energy threshold method and the AIC method, and the probabilistic image is constructed by comparing the deviation of theoretical value with actual value to obtain the localization solution. The influence of band-hole structure on the propagation path of Lamb waves is analyzed by finite element simulation, and the basis of determining the signal propagation path is given. The feasibility of localization method is also verified by the localization experiments on 32 impact points, which provides an average absolute error of 1.15 cm.

Keywords: acoustic emission localization; grid mapping; time difference of arrival

0 引 言

随着各国航天事业的蓬勃发展,人类航天活动的数量与日增加,由空间物体碰撞、航天任务抛弃等原因产生的空间碎片也随之增加。目前,地球轨道上现存的直径大于10 cm的大碎片的数量大约有34 000个,尺寸在1~

10 cm的厘米级碎片的数量大约为 1×10^6 个^[1],这两类碎片对航天器和航天员都有很大的威胁。据美国国家航空航天局(NASA)预测,地球轨道上已编目直径大于10 cm碎片数量在2200年将超过70 000个^[2]。碎片与航天器发生的撞击极易使舱壁破损及压力失衡,造成航天器结构损坏甚至解体,对在轨航天器的安全运行造成严重威胁。2022年12月15日,对接在国际空间站上的

收稿日期:2023-06-25 Received Date: 2023-06-25

*基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3404705)、国家自然科学基金(52272432)、省部共建动态测试技术国家重点实验室开放研究基金(2022-SYSJJ-09)项目资助

联盟 MS-22 飞船发生规模相当大的冷却剂泄漏,这导致俄罗斯航天局发射备用飞船以营救 3 名被困宇航员,导致该事故的发生原因初步认定为微陨石或太空碎片撞击。鉴于碰撞对航天任务的潜在危险,《美国航空航天局航天技术路线图与优先发展技术》中将长时间开展结构健康监测,确保结构的可持续性作为一项顶级技术挑战^[3]。

目前通用的结构撞击源定位检测技术主要分为红外成像法、光纤光栅法、电阻薄膜法、声学检测法等。红外成像法^[4]是通过热成像测量结构冲击变形引起的红外热信号的局部差异进行碰撞定位,这需要复杂而昂贵的仪器进行在线检测,在实际应用中很难完成长期的监测任务。光纤光栅法^[5]是通过分布式光纤传感器,检测固定在结构上的光纤的变形来判断冲击位置,其定位精度与光纤传感器的分布密度有直接关系,需要布置大量光纤传感器^[6],系统结构复杂。电阻薄膜法^[7]通过在检测预先铺设电阻薄膜的电阻分布改变来确定碰撞点的位置,该方法需要大面积铺设电阻薄膜,环境适应性和系统集成性较差。声学检测法^[8]利用撞击的局部应力释放产生的声发射信号进行分析以获取碰撞信息,该方法不需要借助其他辅助测量设备,仅通过合适的传感器阵列就可以完成大范围的碰撞检测。综合来看,声学检测法在系统复杂度、环境适用性等方面具有明显优势,该方法具备在线检测能力,对于航天器结构的碎片撞击检测具有良好的应用前景^[9]。

撞击产生的能量将以机械波的形式在材料中传播,利用传感器将这机械波表面位移转化为电信号进行分析处理可以得到定位结果^[10]。针对连续航天器结构,声达时间差法(time difference of arrival, TDOA)在各向同性材料中应用较广。根据布设在不同位置的分布式传感器阵列的位置信息,TDOA 方法利用各对传感器之间捕获信号的时间差进行定位解算。在该原理的基础上有众多学者开展了进一步研究。中南大学团队提出了利用时差测量联合波速的约束总最小二乘法进行定位计算,根据传感器坐标和到达时间建立每个传感器的控制方程,通过取平方控制方程的平均值来建立平均参考方程并进一步获得线性方程组,估计其残差以获得其权重^[11-12]。该方法无需像传统 TDOA 方法预先确定波速,而是利用约束总最小二乘原理结合牛顿迭代法计算得到速度解,减小了预设波速不准确导致的计算误差。Salari 等^[13]将压缩传感技术与 TDOA 相结合从而减小信号重建过程中的计算量,该方法可以直接在压缩测量域中提取时差信息,在一定程度上弥补传感器之间的低数据速率链路和定位网络容量限制,减小了系统的计算负担。针对环境噪声较强的低信噪比应用场合,Marxin 等^[14]提出了经验模式分解最大似然时延估计方法,使用经验模式分解去噪技术从噪声混响信号中估计声学声音信号和噪声,从而更好地

估计复杂环境中的时差信息。TDOA 方法在具有线性传播路径的连续各向同性结构中具备良好的定位能力,但是其无法解决不连续结构的碰撞定位问题。

对于包含舷窗等结构的非线性路径定位问题,本文提出了一种网格映射概率成像定位方法。该方法针对包含非线性路径的不连续结构定位问题进行分析计算,具有轻量化易集成的航天适用性。本文通过有限元仿真,对包含不连续形状的板结构中兰姆波的传播特性进行研究,确定信号传播路径,并结合矢量路径分析方法确定不同位置的声信号传播轨迹。之后在网格表面建立网格映射节点并计算各节点的理论路径差,再利用自适应的 Akaike 信息准则(Akaike information criterion, AIC)方法确定信号到达时刻以计算传感器阵列的实际时间差,以实现对撞击的快速精确定位。最后根据理论时间差与实际时间差的偏离程度进行概率成像以完成定位计算。

1 工作原理

1.1 算法流程

本文所研究的网格映射概率成像定位方法的流程示意图如图 1 所示。定位方法的第 1 步是根据定位要求在目标结构表面建立不同密度的网格映射,得到各节点的位置信息。通过区域划分计算声学信号的传播轨迹,从而计算各节点到已知位置的传感器的传播路径以计算理论路径差。之后利用波速与理论路径差计算各节点到传感器阵列的理论时间差值。第 2 步是对采集到的信号进

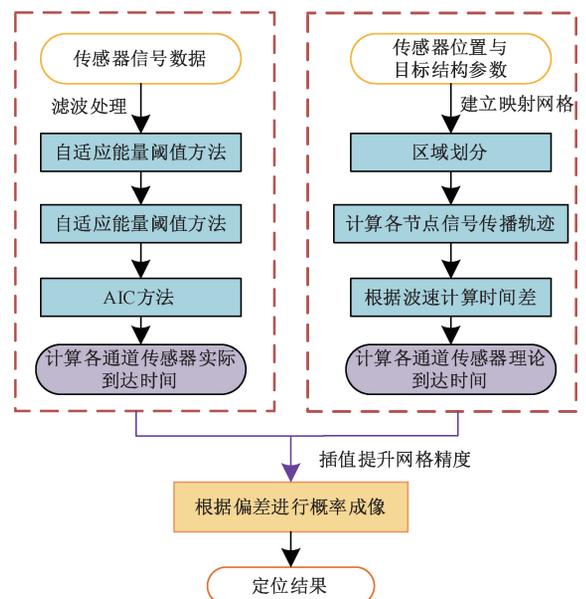


图 1 网格映射概率成像定位方法

Fig. 1 Probabilistic imaging based grid mapping localization method

行滤波处理以获得无噪声的声学信号。为了计算不同传感器接收信号的实际到达时间差值,通过 AIC 信息阈值方法和自适应能量阈值确定到达时间。最后,通过比较各节点到理论时间差与实际时间差之间的偏差程度来计算各节点的碰撞发射概率,利用插值方法来提升网格密度并构建概率图像以实现定位。

1.2 模态分析与波速计算

声发射理论指出,声信号在板状结构中的传播形式是兰姆波。瑞利-兰姆色散方程表达了兰姆波的频厚积与波速之间的关系,它经常被用来分析各向同性的均质板的多模态特性^[15]。根据波在介质中的运动状态,兰姆波被分为对称和反对称模式,分别用 S_i 和 A_i 表示,其中 S_0 模式和 A_0 模式是两种模式中传播速度最快的,也被称为基础阶模态。根据航天试件参数(如表 1),通过瑞利-兰姆方程计算得到目标结构中兰姆波波速与频厚积的关系,如图 2 所示,图中实线和点划线分别表示为 S_0 和 A_0 模态兰姆波。

表 1 模型基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of the model

材料	密度	弹性模量	泊松比
5A06 铝合金	2 640 kg/m ³	71 000 MPa	0.32

在低频区域内,基础阶模态的频散现象不明显,传播速度变化速度慢且该频段不存在其他模态,信号不会被其他模态干扰。因此,应优先选择低频区域内的基础阶模态进行分析,并且从图 2 可以看出, S_0 模态的速度变化率更小,传播速度接近常数。因此,本文选用低频区域内的 S_0 模态信号进行碰撞定位研究。

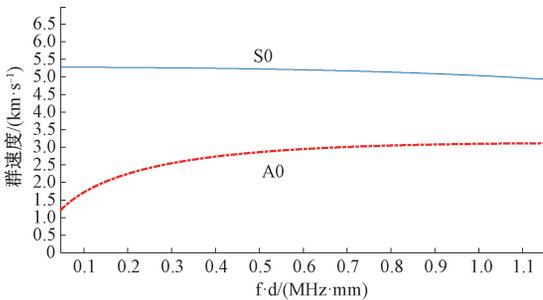


图 2 5A06 镁铝合金基础阶兰姆波模态群速度频散曲线

Fig. 2 5A06 magnesium aluminum alloy group velocity dispersion curve of basic order Lamb wave

S_0 模式兰姆波的速度在低频段比较稳定,但其波速在 5 000 m/s 到 5 200 m/s 范围内变化。因此使用如图 3 所示的 4 个超声波压电传感器在水平方向与竖直方向进行多次波速测量。传感器间距 $d = 10$ cm,传感器与碰撞源的距离 $L = 10$ cm,多次实验得到的速度平均值为 5 159 m/s。

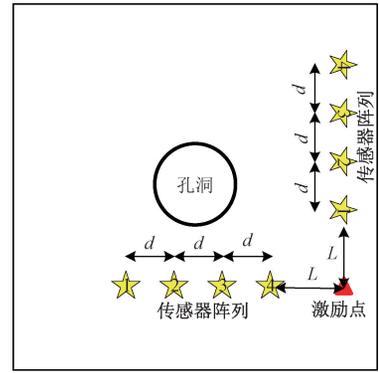


图 3 波速测量实验

Fig. 3 Wave speed measurement experiment.

1.3 网格节点建立与路径分析

在本文中一个分布式压电传感器阵列被用于定位分析,4 个超声波压电传感器排列在不同的象限。对本文中讨论目标结构建立网格映射关系,确定各节点坐标,如图 4 所示。

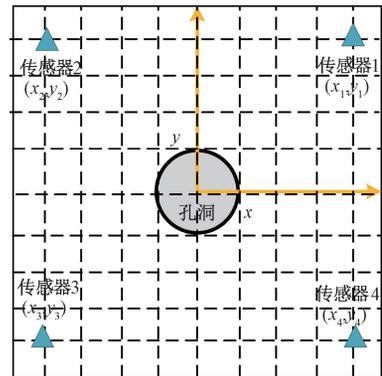


图 4 网格节点与传感器位置示意

Fig. 4 Schematic diagram of grid nodes and sensor locations

在对平板进行网格划分后,计算每一个节点相对于 4 个传感器的理论路径。路径分析将以第二象限传感器为例进行说明。图 5(a) 中画出了第二象限传感器与孔的切线,切线点为 a 和 b,结构表面被传感器的切线分为 6 个区域。很明显,当碰撞源 O 位于区域 A、D、E 或 F 时,传感器接收信号的轨道 d_2 是一条直线。

$$d_2 = |\vec{SO}| = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \quad (1)$$

当碰撞源 O 在 B 区或 C 区时,轨道 d_2 是多段路径之和。当碰撞源 O 位于区域 B 或 C 时,传感器接收信号的最短路径 dd_2^{ac} 或 dd_2^{bd} 如图 5(b) 所示,c 和 d 表示碰撞源与孔的切点,B、C 区域最短传播路径如图 5(b) 所示,计算公式为式(2)~(3)。

$$dd_2^{ac} = |\vec{Sa}| + |\vec{Oc}| + L_{ac} \quad (2)$$

$$dd_2^{bd} = |\vec{Sb}| + |\vec{Od}| + L_{bd} \quad (3)$$

式中: L_{ac} 和 L_{bd} 代表圆孔上两点的弧长。

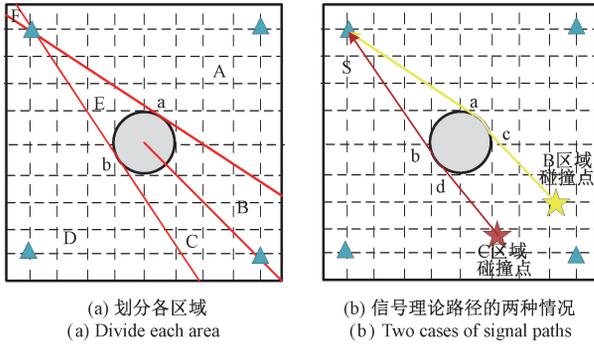


图 5 区域划分
Fig. 5 Division of regions

其他传感器的轨迹也可以用同样的方法得到,碰撞源 O 和不同位置的传感器之间的理论时间之差可以用式(4)计算。

$$\Delta T_{ij} = \frac{\Delta d_{ij}}{v} = \frac{d_i - d_j}{v} \quad (4)$$

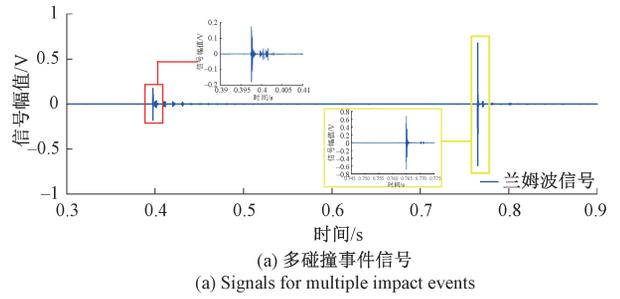
通过计算,可以得到网格每一个节点的相对于 4 个传感器的路径值,进而可以得到网格每一个节点相对于 4 个传感器的 6 组路径差值。在波速已知的情况下,6 组路径差值除以固定的波速值得 6 组时间差值。

1.4 信号到达时间计算

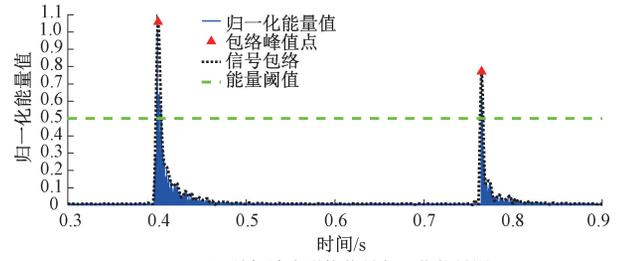
为解决多个撞击事件同时出现的定位问题,首先采用滑动能量窗对各个传感器接收到的信号进行处理以识别兰姆波信号中的单个碰撞事件。信号窗口根据步长沿时间轴移动,并获得窗中信号的能量值作为窗口中信号起点的能量值。建立宽度为 $500 \mu\text{s}$ 的窗口并计算窗口内信号总能量作为起始时间点的能量值,之后滑动能量窗并计算各位置能量值并进行归一化,得到兰姆波信号的归一化时间-能量图,如图 6(a) 所示。

通过在定位能量峰值点,可以得到信号段中不同时刻碰撞的能量峰值时间,从而确定信号范围内的碰撞次数与单次碰撞所在的时间区域。在确定能量峰值点时,引入一个阈值以避免低能量峰值的干扰,即归一化最大能量的 20%。认定归一化后能量峰值大于 0.2 的峰值点为一次碰撞发生,如图 6(b) 所示,图 6 中横虚线表示阈值,实线表示归一化能量曲线,点线表示归一化能量曲线的阈值。将符合条件的能量峰值点之前 $10\,000 \mu\text{s}$ 和之后 $20\,000 \mu\text{s}$ 的信号作为单个碰撞发生事件所在的时间范围,之后对该范围内的碰撞事件的信号到达时刻进行计算,该方法有效解决了多碰撞事件的定位困难。

对信号进行 $150 \sim 250 \text{ kHz}$ 的带通滤波处理后,在噪声信号部分选择了 10 个 1 ms 的信号段,取绝对值后将其电压值按降序排列。为了减少突发干扰,将序列中



(a) Signals for multiple impact events



(b) Normalized-energy map of multi-impact signal for lamb wave

图 6 单个碰撞信号的提取

Fig. 6 The extraction of single-impact event

$1/3 \sim 2/3$ 段点的电压值的平均值作为该段噪声的阈值参考。然后计算 10 个阈值参考的平均值作为通道的阈值参考。计算公式为式(5)~(6)。

$$R_p(j) = \sum_{k=1}^{2m/3} N_j(k) / (m/3) \quad (5)$$

$$R_c(i) = \sum_{j=1}^{10} R_p(j) / 10 \quad (6)$$

式中: $R_p(j)$ 是 J 段噪声信号段的阈值参考, $R_c(i)$ 是第 i 个传感器的阈值参考, N_j 是 J 段噪声段绝对值的降序排列, m 是序列中的总点数, k 是用于计算阈值参考的点的序列号。

$$R(i) = U \times R_c(i) \quad (7)$$

在自适应特性下,阈值 $R(i)$ 是由阈值参考值和阈值放大率的乘积计算出来的,在式(7)中表示为 U 。如果某一时间的电压绝对值大于阈值,并且从现在开始连续 300 个点的电压平均绝对值也大于阈值,那么这个时间前后的 $150 \mu\text{s}$ 被记录为选择范围。

之后对所选范围的信号进行 AIC 计算。在高信噪比的情况下,通过 AIC 方法计算到达时间。通过希尔伯特变换得到所选范围内信号的包络,之后计算 AIC 值的绝对值并乘以一个比例系数以减少噪声信号引起的误差,如式(8)~(9)所示。

$$AIC(t_w) = K | t_w \cdot \ln(\text{var}(T(1, t_w))) + (T_w - t_w - 1) \cdot \ln(\text{var}(T(1 + t_w, T_w))) | \quad (8)$$

$$K = \left| \frac{\max(T(1, T_w))}{\max(\text{pk}(T))} \right| \quad (9)$$

选定的范围用 T 表示,它包含从 1 到 T_w 的点, t_w 表

示只有选定范围内的点参与计算。 var 表示方差函数, $var(T(1, t_w))$ 表示只计算选定范围内序列 $(1, t_w)$ 中的点的方差。此外, $\max(T(1, T_w))$ 表示所选范围内信号的最大值, $\max(pks(T))$ 表示 AIC 曲线的最大峰值, K 表示比例系数。

$$t_i = pks(AIC_i) \quad (10)$$

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j \quad (11)$$

对于第 i 个传感器, 在碰撞事件中接收信号的到达时间为 t_i , 这是对应于第 i 个 AIC 曲线的第一个峰值的时间。第 i 个传感器和第 j 个传感器之间的实际到达时间之差被计算出来, 表示为 Δt_{ij} 。

1.5 网格映射概率成像定位

对于网格的每一个节点, 按照 1.3 节所述的路径计算方法, 可以计算出每个节点的 6 组距离差, 与波速值进行计算以得到 6 组时间差。对于每一次碰撞事件, 按照 1.4 节所述方法将传感器收集到的信号进行处理, 可以得到 6 组时间差。定义传感器信号的 6 组时间差与理论路径计算得到的 6 组时间差之间的差值绝对值的和为每个节点的偏差系数如式 (12) 所示。

$$S = \sum_{i,j=1, i \neq j}^n (\Delta T_{ij} - \Delta t_{ij})^2 \quad (12)$$

式中: Δt 为传感器信号的时间差, ΔT 为理论节点的时间差, n 表示传感器数量。偏差系数越小, 表示这次碰撞事件中传感器接收到信号来自该点的可能性越大, 每个网格节点均可计算得到相应的偏差系数。

为了减小网格密度对定位带来的影响, 使用网格插值方法增加网格密度以提升定位精度。之后根据映射网格节点的偏差系数构建概率图像, 各节点的偏差系数反映了其定位概率, 其可以构建反映各点定位可能性的概率图像, 图像中偏差系数最小的位置则认为是碰撞事件发生的位置。

2 声波在不连续结构中的传播规律研究

本节使用 COMSOL 6.1 软件中的弹性波物理场对带洞板中的声波传播特性进行仿真, 二维仿真模型几何参数为 $1\,000\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$, 孔洞结构位于模型几何中心, 以模型几何中心为圆点, 直径为 200 mm 。模型所用材料为 5A06 铝合金, 材料各项参数如表 1 所示。以板的左下角为原点建立坐标系。本次仿真模型的网格采用自由 4 面体网格, 根据信号波长和频率成分设置 $x-y$ 平面网格最大单元大小为 7.48 mm , 最小单元大小为 0.3 mm , 单元数共 $61\,082$ 个, 平均单元质量为 0.8768 。在 $(-30, -30)$ 位置增加了体载荷。为了清楚地展示信号与孔的相互作用, 板的 4 个边缘设置了吸收域以防止反射。中心频率为 200 kHz 的狄拉克激励被用作体载荷, 其通过

具有时间分量和空间分量的乘积形式的域源来近似模拟碰撞。仿真结果显示在图 7 中。

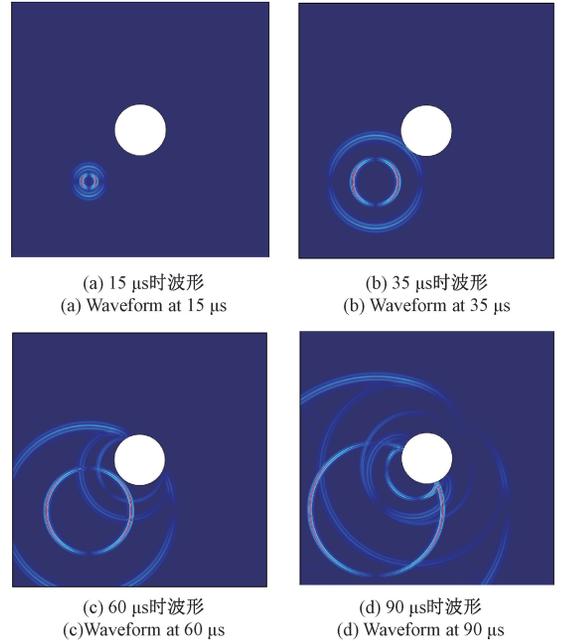


图7 有限元仿真波形示意

Fig.7 Schematic diagram of finite element simulation waveform

仿真结果显示兰姆波在铝合金板上的传播特性为各向同性, 其波形呈同心圆形式 (图 7(a) 所示), 也就是在各方向上波速相同。在传播过程中兰姆波表现出明显的多模态特性, S_0 模态与 A_0 模态因速度差距大而产生分离 (图 7(b) 所示), 且速度更快的 S_0 模态能量相比 A_0 模态更小, 这与图 2 计算的频散曲线是符合的。当兰姆波与孔洞相遇时将产生反射与模态转换现象导致后续模态难以识别 (图 7(c) (d) 所示), 因此选取 S_0 模态进行到达时刻计算更为稳定。分析兰姆波的传播轨迹, 发现其将沿最短路径绕过孔洞, 即传播路径是沿激励点-激励点与孔的切点-传感器与孔洞切点-传感器进行传播, 由两段切线路径和一段圆弧路径组成。波场有限元仿真的结果说明, 信号最快传播路径是绕过孔洞结构向前传播, 即在孔洞结构处的传播路径为弧线, 与仿真分析结论一致, 因此第 1.3 节中的信号最快传播路径选择是可信的。

3 实验平台设计

用以验证本方法的试件是带洞铝板模型件, 尺寸为 $1\,000\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 在板的几何中心存在 1 个孔洞结构, 孔洞以板的几何中心为圆心, 直径为 200 mm 。以板平面侧几何中心为原点, 以 2 条互相垂直的对称轴分别为 x 轴和 y 轴, 向右及向上分别为正方向, 建立笛卡尔坐标系。分布式传感器阵列的 4 个传感器分布的坐标

分别为 $(40, 40)$ 、 $(40, -40)$ 、 $(-40, 40)$ 和 $(-40, -40)$ 。实验采用的接收传感器为 PAC-Nano30 声发射传感器, 使用耦合剂保证传感器与板表面相接触。

实验中采用软岛时代公司生产的声发射前置放大器, 频带范围为 $20 \sim 1\,500$ kHz, 实验中选取信号增益为 40 dB 增益。利用 NI 公司生产的型号 USB-6366 的数据采集进行信号采集。

4 实验结果分析

4.1 断铅实验定位计算

本文将结合实验需求以及实验条件, 使用断铅方式来模拟碰撞信号的产生, 人工断铅激励信号是在声发射检测中常用一种碰撞冲击模拟源。铅笔芯断裂产生的瞬态弹性波可用于模拟结构件材料发生冲击时产生的弹性波, 该方法具有模拟信号质量好、材料便宜、可重复性好等优点, 被普遍地用于工程检测和科学研究。按照 1.4 节所述方法对采集到的断铅信号进行滤波处理, 再进行到达时刻的计算, 起始时刻的计算如图 8 所示, 图中实线表示兰姆波信号, 点线是信号包络, 虚线是 AIC 曲线, 点划线表示信号的到达时间。通过 AIC 方法计算所有传感器的到达时间差值。

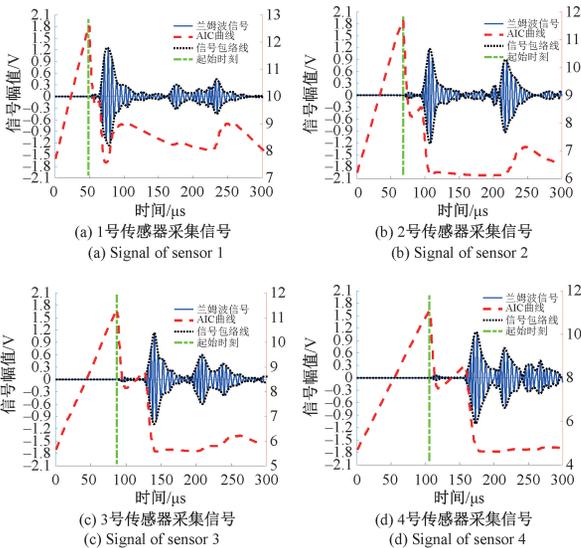


图 8 信号到达时刻示意图

Fig. 8 Signal arrival time diagram

以实际断铅碰撞点坐标为 $(-35, 25)$ 处的实验数据为例, 按照 1.5 节所述网格映射概率成像定位的方法, 在网格密度为 0.1 cm 的基础上使用插值方法对网格进行细化, 计算每一个网格节点的偏差系数, 绘制生成的偏差系数图如图 9 所示, 图中偏差系数最小的位置为 $(-34.14, 25.04)$, 定位误差为 0.86 cm。

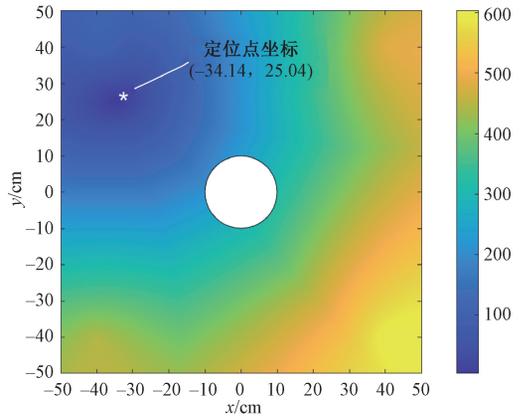


图 9 定位结果

Fig. 9 Localization results

4.2 不同网格密度对定位结果的影响

建立大小为 0.5 cm 的网格, 计算各节点到不同传感器的理论时间差, 利用网格映射定位法对采集到的断铅信号进行定位计算, 0.5 cm 网格映射计算结果如图 10(a) 所示, 图中的三角形代表实际位置坐标, 菱形代表定位得到的结果, 两点之间用直线表示定位结果的偏差程度。该方法的最大误差为 3.32 cm, 最小误差为 0.21 cm, 平均误差为 1.61 cm。图 10(b) 所示的定位误差热点图反映了待测结构表面不同位置的定位误差分布情况, 该图显示靠近结构边界位置的定位结果误差较内部区域大, 这主要是因为兰姆波与边界发射反射和模态转换导致信号到达时刻出现误差。

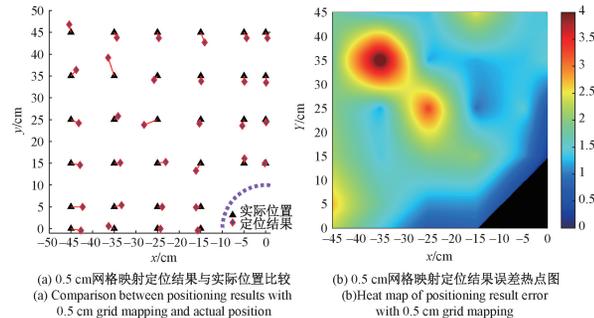


图 10 0.5 cm 网格映射定位结果

Fig. 10 0.5 cm grid mapping positioning result

使用大小为 0.1 cm 的网格进行定位计算, 计算结果如图 11(a) 所示。从图 11 中可看出, 该方法的平均误差较 0.5 cm 网格更小, 最大误差为 2.18 cm, 最小误差为 0.16 cm, 平均误差为 1.15 cm。图 11(b) 所示的定位误差热点图也说明网格密度越小, 定位误差越小。

AIC 方法与能量阈值方法定位误差对比如图 12 所示, 图中从左至右的定位误差中位数分别为 1.24 、 1.50 、 1.41 和 1.85 cm, 能量阈值方法在 0.1 cm 网格密度和

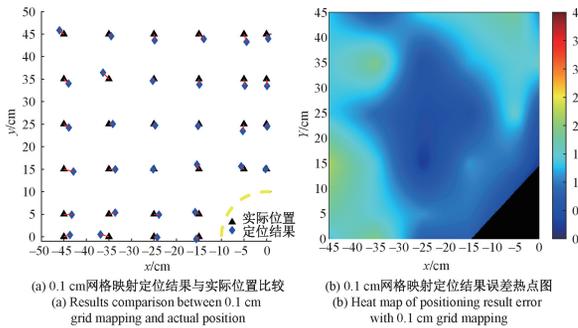


图 11 0.1 cm 网格映射定位结果

Fig. 11 0.1 cm grid mapping positioning result

0.5 cm 网格密度的平均定位误差分别为 1.39 cm 和 2.02 cm。在相同的网格密度情况下,使用 AIC 方法的定位精度与能量阈值方法相比上升约 20%。

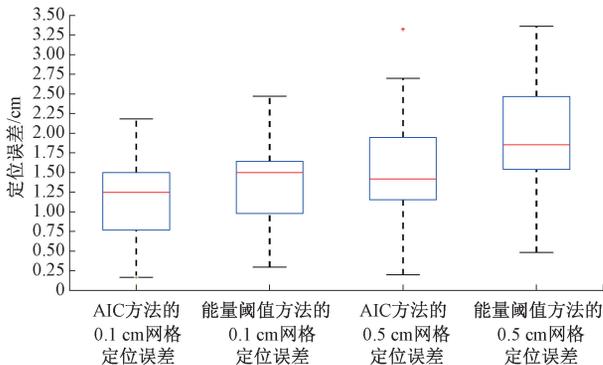


图 12 AIC 方法与能量阈值方法定位误差比较

Fig. 12 Comparison of localization errors between the AIC method and energy threshold method

5 结 论

本文针对包含非线性路径的不连续结构,提出了一种基于声发射的网格映射概率成像定位算法,旨在解决航天器舷窗结构的撞击声源定位问题。该定位方法首先通过分析网格节点的信号传播路径来计算信号理论传播时间差,从而建立了网格映射关系。结合自适应能量阈值方法与 AIC 方法对采集到的信号进行处理得到信号的实际传播时间差,之后建立了整个结构对声源的概率映射图像以实现定位解算。通过有限元仿真分析了含孔不连续结构对兰姆波的传播路径影响,结果证明了信号传播路径计算的正确性。最后,通过 32 组断铅实验验证了该定位方法的可行性。该研究为舷窗结构的突发碰撞定位提供了可行的解决方案,对保障航天器安全作业具有重要意义。

参考文献

- [1] 龚自正, 赵秋艳, 李明, 等. 空间碎片防护研究前沿问题与展望[J]. 空间碎片研究, 2019, 19(3): 2-13. GONG Z ZH, ZHAO Q Y, LI M, et al. Frontier issues and prospects of space debris protection research [J]. Space Debris Research, 2019, 19(3): 2-13.
- [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] 唐绍锋, 吴晗玲, 万舒晨. 《美国航空航天局航天技术路线图与优先发展技术》分析——以材料、结构、机械系统与制造领域为例[J]. 中国航天, 2022(5): 40-46. TANG SH F, WU H L, WAN SH C. Analysis of NASA's space technology roadmap and priority technologies-materials, structures, mechanical systems and manufacturing as an example [J]. China Aerospace, 2022(5): 40-46.
- [4] FRANCESCO C, POOYA M, FULVIO P, et al. Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components[J]. Sensors, 2018, 18(2): 609.
- [5] 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.
- [6] 王威, 陶传义, 朱悦青, 等. 光纤光栅传感器阵列在撞击定位监测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 76-82. WANG W, TAO CH Y, ZHU Y Q, et al. Application of fiber Bragg grating sensor array in impact location monitoring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 76-82.
- [7] 孔凡金, 王建民, 刘武刚, 等. PVDF 薄膜在空间碎片撞击监测中的应用研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020, 449(6): 12-15. KONG F J, WANG J M, LIU W G, et al. Application of PVDF film in space debris impact monitoring [J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2020, 449(6): 12-15.
- [8] 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. Leak location method of spacecraft sealed structure using amplitude spectrum index method [J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28(1): 55-59.
- [9] 王奕首, 王明华, 刘德博, 等. 声发射在复合材料贮箱上的应用研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(4): 1-17.
- WANG Y SH, WANG M H, LIU D B, et al. Research progress on the application of acoustic emission to composite tanks [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(4): 1-17.
- [10] 蒋帅, 沈意平, 王送来, 等. 基于压电纤维传感器应力波方向检测的结构冲击定位研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(1): 27-37.
- JIANG SH, SHEN Y P, WANG S L, et al. Research on structural impact source location based on sensing of stress wave direction by the piezoelectric fiber sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(1): 27-37.
- [11] ZHOU Z, RUI Y, CAI X, et al. Constrained total least squares method using TDOA measurements for jointly estimating acoustic emission source and wave velocity[J]. *Measurement*, 2021: 109758.
- [12] ZHOU Z, RUI Y, CAI X, et al. A weighted linear least squares location method of an acoustic emission source without measuring wave velocity [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(11): 17.
- [13] SALARI S, CHAN F, CHAN Y T, et al. TDOA estimation with compressive sensing measurements and hadamard matrix [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 99:1-1.
- [14] MARXIM R, MOHANTY A R. Time delay estimation in reverberant and low SNR environment by EMD based maximum likelihood method [J]. *Measurement*, 2019, 137: 655-663.
- [15] 徐云飞, 孙永顺, 丁晓喜, 等. 基于 Lamb 波的数据传输与缺陷检测同步实现方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(3): 24-31.
- XU Y F, SUN Y SH, DING X X, et al. A synchronous implementation method of data transmission and defect detection based on Lamb waves [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(3): 24-31.

作者简介



张宇, 分别于 2004、2009 年于天津大学获得学士、博士学位, 现为天津大学副教授、博士生导师, 研究方向为结构健康检测技术。
E-mail: zhangyu@tju.edu.cn

Zhang Yu received bachelor's and doctoral degrees from Tianjin University in 2004 and 2009. He is currently an Associate Professor and doctoral supervisor with Tianjin University. His research interest is structural health detection.



芮小博(通信作者), 分别于 2014、2021 年于天津大学获得学士、博士学位, 现为天津大学副研究员、硕士生导师, 研究方向为结构健康检测技术。
E-mail: ruixiaobo@tju.edu.cn

Rui Xiaobo (Corresponding author) received bachelor's and doctoral degrees from Tianjin University in 2014 and 2021. He is currently an Associate Researcher and master supervisor with Tianjin University. His research interest is structural health detection.