Journal of Applied Acoustics

Vol. 43, No. 6 Nov., 2024

◊ 研究报告 ◊

# 复合材料结构损伤声发射检测的信息扩充方法\*

# 张 冰<sup>1†</sup> 蔡洋康<sup>2</sup> 张 瑛<sup>1</sup>

(1 中国船舶集团有限公司第七一三研究所 郑州 450015)

(2 西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

摘要:为了研究基于声发射的复合材料结构损伤的定位精度,对经典的三角定位算法进行了研究;在复合材料层合板上布置稀疏传感器阵列,实验研究了全阵元及部分阵元缺失传感阵列的定位精度变化;对不同阵元数的传感阵列的定位结果进行分析,并提出在缺失阵元情况下的边界反射信息补充方案,对阵列进行虚拟扩充后实现损伤定位分析。不同阵元数量的阵列定位实验结果表明:通过混响中边界反射信息的挖掘与补充能够实现缺失阵列在信息不足情况下的精确损伤定位。在总体定位误差中,全阵元阵列的平均定位误差为1.06 cm;缺失单阵元阵列的平均定位误差在1.63~1.93 cm之间;通过边界信息补充后的缺失双阵元阵列的平均定位误差为1.47 cm。该方法实现了在传感阵元数量少于常规定位阵列的情况下的损伤定位,为提高传感器阵列以及定位算法的稳定性提供了思路。

关键词:复合材料;健康监测;声发射;损伤定位;信息扩充

中图法分类号: TH17; TB332 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2024)06-1412-09

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.06.026

# Information expansion methods for acoustic emission detection of damage in composite structures

ZHANG Bing<sup>1</sup> CAI Yangkang<sup>2</sup> ZHANG Ying<sup>1</sup>

 $(1\ \ 713th\ Research\ Institution\ of\ China\ State\ Shipbuilding\ Corporation\ Limited,\ Zhengzhou\ 450015,\ China)$ 

(2 Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to study the damage location accuracy of composite structures based on acoustic emission, the basic triangulation algorithm is researched and compiled, and sparse sensor array is arranged on the surface of the plate. Then, experimentally investigated changes in location accuracy of full-array and partial elements missing sensing array. Finally, the results of array positioning accuracy with different number of receiving elements are analyzed. A supplementary scheme of reverberation boundary reflection information is proposed in the case of missing elements, and the damage location analysis is realized after the array is expanded. The experimental results of array location with different number of elements show that the accurate damage location of missing array can be realized by mining and supplementing the boundary reflection information in reverberation. In the overall positioning error, the average positioning error of the whole array is 1.06 cm. The average positioning error of missing two-element array supplemented by boundary information is 1.47 cm. The proposed method achieves accurate damage location when the number of sensor arrays is less than that of conventional positioning arrays, which provides a way to improve the stability of sensor arrays and positioning algorithms.

Keywords: Composite material; Health monitoring; Acoustic emission; Damage location; Information expansion

2024-03-01 收稿; 2024-08-21 定稿

<sup>\*</sup>河南省水下智能装备重点实验室开放基金资助项目(KL03A1804)

# 0 引言

复合材料具有质量小、比强度及比模量大、低蠕变和强耐腐蚀性等优点<sup>[1]</sup>。基于复合材料多样且优异的材料性能,其已广泛应用于汽车工业、航空航天等领域。但是复合材料在使用过程中由于疲劳载荷、异物和环境条件(温度和湿度)影响,可能发生破坏性损伤。如果这些损伤没有第一时间被发现并修复,可能会发生重大的事故。因此对于复合材料进行有效的早期检测与实时监测是非常重要的<sup>[2-3]</sup>。

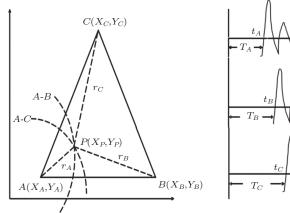
无损检测技术主要分为主动和被动的方式。主动式方法的设备复杂,需要主动激励源,使用成本较高。被动式检测操作简单,成本相对较低,且易实现实时监测,其中最具有代表性的是声发射损伤监测技术。声发射技术通过捕获由材料局部应力能量瞬间释放而引起的瞬态弹性波,获取材料内部特征,实现无损检测。由于其具有运行快、成本低及技术成熟等特点,在铁路、船舶及军事等领域应用广泛。

目前,国内外的学者开展了很多关于声源定位 声发射损伤监测技术的研究。Qiu等<sup>[4]</sup>分别根据波 的到达时间,采用三角声源定位方法定位低速冲击 源的位置。Jang等<sup>[5]</sup>通过使用神经网络训练将三 角测量方法扩展到各向异性板。McLasky等<sup>[6]</sup>介 绍了声发射定位的波束成形技术,需要一个包含 4~8个传感器的小型传感器阵列。He等<sup>[7]</sup>通过波 束成形技术结合奇异值分解,同时完成了两个声发 射源的定位检测。Ciampa等<sup>[8-9]</sup>提出了一种在材 料特性未知的前提下进行各向异性板上声源定位 的方法。Kundu<sup>[10]</sup>提出"L"型传感器簇声源定位技术,在材料参数和速度分布未知的情况下可在各向同性与各向异性的板上完成声源定位,所需要的传感器的数量分别为4个和6个。Sen等<sup>[11]</sup>基于方形传感器簇声源定位技术提高了声源定位精度,一个方形传感器簇可看作由4个L形的传感器簇共同组成,因此,基于一个方形传感器簇可获得声源的4个入射角度,通过平均可减小定位误差。

现阶段的声发射技术主要依赖传感器阵列,通过获取足够的声源信息完成损伤定位。当部分传感器失效导致获取的信息不足时,该技术将会面临误判或者漏判的风险。因此,本文针对基于声发射方式的复合材料结构健康监测过程中部分传感器阵元失效问题,提出从声发射信号中挖掘与损伤相关的边界反射信息来弥补损伤信息不足的方法,虚拟扩充传感阵列,提高结构健康监测系统的可靠性。

# 1 声发射技术声源定位算法

声发射技术声源定位算法主要以三角定位算法 [12-13]、波束成形定位算法 [14-15] 以及其余如学者 Kundu 提出的"L"型传感阵列定位算法等为主。其中三角定位算法是在均质结构中最常使用的经典算法。如图 1 所示,三角定位法所需要的传感器最少为 3 个,分别是 A、B、C,点 P 为待测结构上的声源点,由声源传播至传感器的距离分别为  $r_A$ 、 $r_B$  以及  $r_C$ 。通过传感器接收到的信号如图 1 所示,其中信号到达时刻可以由  $T_A$ 、 $T_B$  以及  $T_C$  表示,但是由于声发射事件的起始时刻并不确定,所以由信号起始点确定的传播时间并没有参考价值,仅能大致



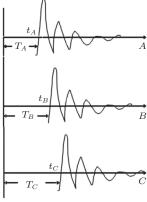


图 1 三角定位方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of triangulation method

判断声源距离传感器的远近。通过计算传感器接收信号的时间差:

$$\Delta t_{AB} = t_B - t_A,\tag{1}$$

$$\Delta t_{AC} = t_C - t_A. \tag{2}$$

假设待测结构为各向同性或者均质结构,传播 波速一般认为在结构各处均相同,通过声源传播至 各个传感器的距离、传播波速以及已知的传感器布 置位置可以获得以下关于声源点的几何关系:

$$\sqrt{(x_p - x_B)^2 + (y_p - y_B)^2} 
- \sqrt{(x_p - x_A)^2 + (y_p - y_A)^2} 
= c(t_B - t_A) = c\Delta t_{AB},$$

$$\sqrt{(x_p - x_C)^2 + (y_p - y_C)^2} 
- \sqrt{(x_p - x_A)^2 + (y_p - y_A)^2} 
= c(t_C - t_A) = c\Delta t_{AC}.$$
(4)

由式(3)~(4)可知该几何关系是以传感器位置 为焦点的双曲线,通过两个传感器组成的一个传感 器对可形成一条几何定位双曲线,然后由两个传感 器对确定的两条双曲线形成的交点即为三角定位 预测的声源点位置。此外,由于以其中一个传感器 作为参考,3个有效传感器获得的独立时间差只有 两个,可形成两条独立的双曲线,这也是三角定位所 需要的传感器数量最少为3个的原因。

该声源定位算法的流程如图2所示。首先通过 接收传感器获取到声发射信号,该信号可能存在多 个干扰频率成分,所以需要进行滤波操作;其次, 滤波后的信号到达特征常表现为波形图中的波包 成分。

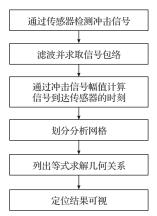


图 2 定位算法信号处理流程图

Fig. 2 Positioning algorithm signal processing flow chart

为了更好地分析波包成分,对信号进行包络处理,信号包络是通过希尔伯特变换 (H[]) 将实数信号 s(t) 转换为复数信号 z(t):

$$z(t) = s(t) + jH[s(t)]. \tag{5}$$

其时域信号包络 A(t) 定义为

$$A(t) = \sqrt{(s(t))^2 + (H[s(t)])^2}.$$
 (6)

获得包络曲线后,需要提取信号到达传感器的时间点。在实际实验中,由于传感器具有一定的尺寸,并且波在传播过程中具有一定的频散效应,所以一般对波包峰值取一定的阈值作为信号到达时间;将相关参数代入几何定位关系式(3)和式(4),对待测区域划分分析网格,求解并显示出预测的声源点位置。

三角定位方法是目前各向同性以及均质结构中最常用的源定位技术。该方法是使用分散式少量传感器阵列进行声源定位,设置较为简单,且定位原理相对直观,编制算法难度较小。因此在后续声发射监测系统传感器阵列可靠性的实验研究中,采用的定位方法为三角定位方法。

### 2 边界反射信息的挖掘与补充

由上述对三角定位算法的分析可知,至少需要 3个及以上的传感器采集声发射信号才能够完成声源的几何定位。而当部分传感器失效,有效传感器数量少于3个时,在待测表面上只会形成一条独立的双曲线,而不会形成交点。就定位算法而言,声源出现在双曲线上的概率是一样的,因此在这种情况下常规的三角定位算法将失效,无法完成声源定位或损伤检测。但是传感器在服役过程中又易发生失效,导致有效传感器数量少于算法对传感阵元的需求。为此,本文提出从有效传感器收集的声发射信号中挖掘与声源相关的额外边界反射信息以弥补部分传感器失效导致信息不足的问题(如图3所示)。

传感器采集的信息中除了直达波信息,还包含 大量与损伤相关的反射信息。当波传播到边界或者 障碍物处会发生反射后再继续传播,其反射的特点 在于反射角等于入射角,反射波的波长、频率和波 速都与入射波相同,如图4(a)所示。当声发射事件 的波经过待测结构的边界反射后,会携带关于声源 点的额外信息,这将会为传感器阵元不足的阵列声 源定位提供可能。通过惠更斯原理可以解释波的反射现象,由惠更斯原理可知:在介质中任意波阵面上的各点,都可以看作是发射子波的波源。在其后的任意时刻,这些子波在波前进方向的包络面就是新的波阵面。

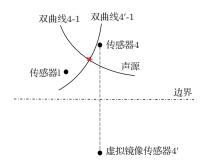


图 3 基于边界反射的双传感器声源定位示意图 Fig. 3 Schematic of dual-sensor sound source localization based on boundary reflection

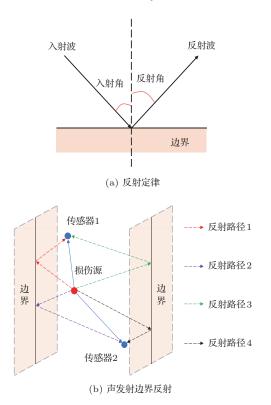


图 4 波的反射效应

Fig. 4 The reflection effect of waves

当波在待测结构中传播时,如图4(b)所示,由 损伤源(即声源)发出的波会形成多条传播路径,最 先到达的波是由损伤源发出波直接传播到传感器 的直达波,形成的路径是图中损伤源与接收传感 器连接的实线路径;此外,还存在由损伤源发出的 波先经过边界反射,然后再传播到传感器的多路径反射波,即图中所示的虚线路径。随着边界的增加,相应的反射路径数量也会逐渐增加,从而接收传感器接收到的损伤信息也会增加,所增加的额外损伤信息将为后续阵元失效的损伤信息补充提供基础。

当波发生反射后,关于声发射事件位置的信息 将会被携带在反射波中,若能发掘并利用该反射信息,将有利于扩充关于声源点的额外信息用于定位, 这就是在缺失阵元情况下的信息补充方案。

# 3 复合材料声发射声源定位实验

#### 3.1 实验设置

为了研究声发射监测系统传感器阵列的可靠性以及在缺失阵元情况下的边界反射信息补充方案的可行性,利用 T300/7901 碳纤维增强复合材料层合板搭建了实验平台并进行实验测试。该样件按 [+45°/-45°/0°/90°]<sub>2s</sub> 的顺序铺丝加工而成(准各向同性),共16层,每一层的厚度为0.125 mm。

首先在500 mm×500 mm复合材料板上按照 九宫格均匀布置16个激励传感器PZT(直径8 mm、 厚度为0.5 mm的圆形)用以模拟该16个位置的声 发射事件,在板上另外分布着4个接收传感器接收 声信号,如图5所示,图中红色点1~16为冲击点,黑 色点S3~S4为传感器布置点。依次激励16个主动 传感器模拟声事件,分析接收传感器的信号完成声 源定位,随后减少有效传感器的数量,观察不同传感 器数量对声源定位精度的影响。

实验中模拟声发射事件所采用的信号为负尖脉冲信号,其具有短时以及突发性的特性,更为符合在实际情况中突发的裂纹等类型的声发射事件情况,其中采用信号的时域图以及频域图如图6所示。本实验中首先由JSR超声脉冲收发仪产生脉冲信号,然后导入安捷伦33220A函数/任意波形发生器中,采用波形发生器作为信号发送装置,再经过输出口输出到功率放大器HSA4012进行信号的放大,在本研究中激励信号的峰值电压被放大到50 V,最后,声信号在板中传播被传感阵元(直径8 mm、厚度为0.5 mm的圆形P-51压电陶瓷)接收后通过泰克DPO5054/B数字示波器采集、显示并储存。

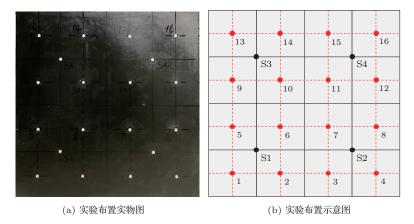


图 5 声发射实验传感器布局

Fig. 5 Acoustic emission experiment sensors layout

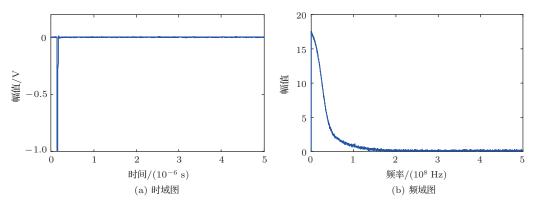


图 6 激励信号时域以及频域图

Fig. 6 Excitation signal time domain and frequency domain diagram

#### 3.2 全阵元定位实验

设置传感阵列中4个传感阵元均为有效状态,利用全阵元阵列进行声源定位实验测试。定位示意图如图7所示。在待测结构上分布着4个接收阵元,形成3条独立的几何定位双曲线,理论上3条双曲线均会交于真实的声源点处。通过依次激励16个传感器模拟冲击,进行3次重复性实验,观察最终的定位结果。其中选取一组接收信号,并对接收信号进行滤波以及包络处理,最终得到的接收信号时域图如图8所示。从图中可以看出直达波包在滤波和包络处理后十分直观。在实验中设置选取第一个波包峰值的26%作为阈值获取直达波到达传感器的时间进行声源定位。

本节全阵元阵列中总共进行了16组实验,图9为全阵元阵列的冲击点实验定位结果。从实验定位结果来看,全阵元阵列的大部分冲击点的定位精度较高,定位误差小于10 mm。其误差随着与阵列中心距离的增加而扩大,在4个角上的定位精度最低,

即在第1、第4、第13、第16组的定位误差达到最大值。上述实验结果的定位精度变化趋势与原三角定位方法的精度变化一致——即当冲击点位置逐渐远离传感器阵列形成的内部区域后,定位精度逐渐下降。

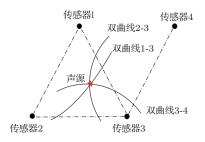


图7 全阵元传感器阵列定位示意图

Fig. 7 Positioning diagram of all-array sensor array

其原因在于当冲击点位于传感阵元对角上时, 传感阵元对形成的双曲线近似于一条直线,此时定 位点可能会在对角线上发生较大偏移,这也就是部 分组定位误差较大的原因。

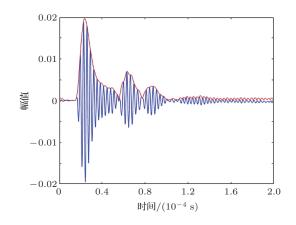


图 8 阵元接收信号时域及包络图

Fig. 8 Time domain envelope diagram of element received signal

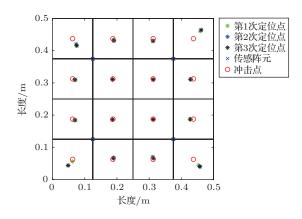


图 9 全阵元阵列冲击点实验定位结果 Fig. 0. Experimental positioning results of inv

Fig. 9 Experimental positioning results of impact point of full array

#### 3.3 缺失单个阵元定位实验

对传感阵元中每一个阵元作失效处理。定位示意图如图10所示。在待测结构上分布着3个接收阵元,形成2条独立的几何定位双曲线。设置与前述全阵元阵列实验一致,通过进行3组重复实验观察定位结果变化。

定位结果如图11所示。从结果可以看出,S123和S234三传感器阵列定位结果在大部分区域相似,且定位精度较高,但在4个角的区域中,即第1、第4、第13、第16冲击点位置,出现了较大的不同,其原因与前述全阵元阵列的误差分析相同。此外,相比于全阵元阵列,缺失单阵元阵列的定位误差有所上升,且在某些特殊点位置上定位误差进一步增大。这是由于全阵元阵列在不同对角路径上均存在传感阵列。

由上述实验结果可知: 当阵列中的有效传感阵

元数量减少为3个后,满足最基本的阵元数量要求, 定位精度相比于全阵元阵列有所降低,但其定位结 果能够满足大多数冲击点检测的基本要求。

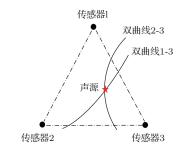


图 10 三传感器阵列定位示意图

Fig. 10 Three-sensor array positioning diagram

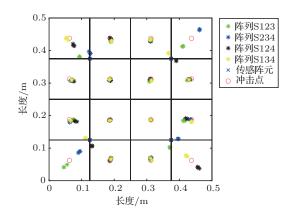


图 11 缺失单阵元阵列冲击点实验定位结果 Fig. 11 Experimental location results of impact

point of missing single element array

# 3.4 缺失双阵元损伤信息扩充与定位实验

当传感阵元失效数量进一步增加时,即传感阵元数量为2个,此时由于有效传感器的数目少于定位算法的最低要求,因此需要采用边界反射信息补充方案,否则将无法对声发射声源进行有效的定位。本节将通过如下实验来验证所提出的在缺失阵元情况下的混响边界反射信息补充方案的可行性。

在本实验中,边界形式做了一定的简化,边界只存在于待测结构的左边以及下方区域,其余两边由于连接着另外一部分的材料区域,此时不考虑该两边的边界反射效应。其声发射信号传播路径示意图如图12所示。首先待测结构上的冲击点产生声发射信号,直达波首先被传感器接收到,接着按照反射规律,冲击信号经过边界1和边界2的反射再依次被传感器收集到。此时该传感器收集到冲击信号包含直达波包和两个边界反射波包,其边界反射波

包相当于是在检测区域之外新增加了镜像虚拟传感器接收声源信号。如果将两个虚拟传感器接受的声源信息都用于冲击定位,则可以将原本的缺失双阵元阵列扩充为四阵元阵列。但由于信号在板内传播衰减等因素,长距离传播的反射成分的幅值较小,不利于反射波包的识别和时间提取,因此,在本研究中最终考虑了距离冲击点较近的边界产生的反射波包(即直达波后第一个反射波包),将原本的双传感器阵列扩充为三传感器阵列,此时传感器数量基本满足定位需求,从而实现损伤定位。

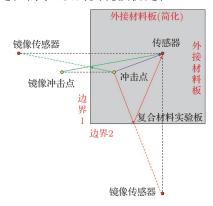


图 12 边界反射传播路径示意图

Fig. 12 Schematic diagram of boundary reflection propagation path

实验设置与前述实验一致,失效阵元数量增加 为两个。在本实验中模拟选取传感阵元1和阵元4 作为有效阵元,阵元2和阵元3作失效处理。阵元1 只利用直达波信息,阵元4按照该传感器阵列的扩充思路,挖掘边界反射信息利用直达波和第一个边界反射波包。选取冲击点8激励,阵元4接收信号进行反射信息分析。对接收信号进行滤波以及包络处理后得到的信号时域图如图13所示,图中黑圈代表直达波包信息,红圈代表下(近)边界反射信息,紫圈代表(左)远边界反射信息。接收信号的直达波与反射波成分清晰可见,并且两者较为分离,方便提取,直达波峰和反射波峰在包络线上十分直观。在本实验中仅对第一个到达反射波包,即近边界反射波包信息进行分析。

整体的定位流程主要包括:提取波包、获取峰值、获取波包宽度、计算反射时间差以及依据时间 差进行声源定位几个部分。

#### 整体流程如下:

(1) 首先根据接收信号识别反射波包,本实验中仅针对边界反射的第一个波包进行识别,该操作

需要判断反射波包是否存在并且是否满足提取的 条件,当反射波包与直达波包的位置较为靠近时就 不满足分离提取的条件:

- (2) 随后进行波包峰值的提取,该峰值的作用 在于后续设置到达时间阈值时进行计算;
- (3) 为了尽可能完全分离出直达波包与反射波包,需要大致计算直达波包的宽度,在判定反射波包到达时间时需要将直达波包宽度范围内所在时间进行排除,尽可能从反射波包的初始状态进行计算,这样获得的反射波包时间才较为准确;
- (4) 接着获取反射波包的时间差,并进行相应 的传感器镜像,获取扩充后的新传感器阵列;
- (5) 最后就是依照与前述多数量传感器阵列定位的流程一致的方法——获取时间差后进行声源定位。

根据相同的定位流程获得的实验结果如图14 所示。同一冲击点3组重复实验的模式,观察定位

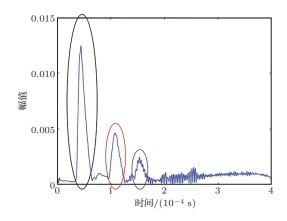


图 13 反射信息分析包络时域图

Fig. 13 Time domain diagram of reflection information analysis envelope

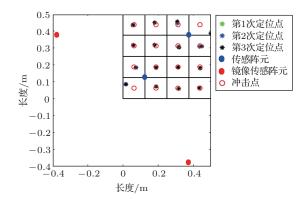


图 14 边界信息挖掘双阵元失效阵列冲击点定位结果 Fig. 14 Location results of impact point of twoelement failure array in boundary information mining

结果的变化。从图中可以看出,由于镜像传感阵元的加入,原来无法定位的双传感阵列,经过信息挖掘补充后扩充为三阵元阵列,实现了较精确的冲击定位。另外由于镜像传感器实际上改变了原有的传感阵元阵列的布局,因此在对角特殊点上的定位误差有所改善。

综上,该边界信息挖掘补充方案利用提取的混响反射信息,在传感阵元数量少于常规定位阵列的情况下完成了损伤定位,对传感器失效的问题进行了一定程度补救,并且最终的定位结果较准确。

#### 3.5 定位结果比较

将不同阵元数量的阵列实验定位结果进行总体对比,误差变化趋势如图15所示,其中由于传感器阵列S123和S234以及S124和S134的精度变化趋势类似,在图中做了简化,只显示其中一组结果。从图中可以看出:

- (1) 在最终的定位结果中,随着失效传感器数量的增加,定位精度呈现逐渐降低的趋势且误差波动范围逐渐增大,稳定性降低,这表明传感器失效问题对整体的结构健康监测是不利的。
- (2) 通过混响中边界反射信息的挖掘与补充 能够实现缺失阵列在信息不足情况下的精确损伤 定位。
- (3) 在总体定位误差中,四阵元阵列最小,三阵元阵列定位误差最大。而对于两阵元阵列,通过从混响挖掘反射信息将传感阵列扩充为三阵元阵列,由于镜像传感器改变原传感器阵列的布局,在对角特殊点的定位优于三阵元、四阵元阵列,总体定位精度介于四阵元与三阵元阵列之间,如表1所示。

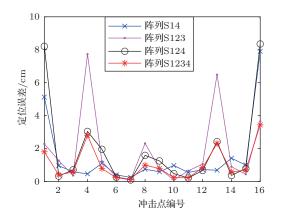


图 15 不同数量传感器阵列定位误差比较

Fig. 15 Comparison of positioning errors of different number of sensor arrays

表 1 不同阵列形式下所有冲击点的定位误差 Table 1 Localization error of all impact points under different array forms

阵列形式	平均定位 误差/cm	均方根定位 误差/cm	标准差定位 误差/cm
S14	1.47	2.47	2.05
S123	1.86	2.88	2.27
S234	1.82	3.09	2.58
S124	1.93	3.19	2.62
S134	1.63	3.07	2.68
S1234	1.06	1.43	1.00

进一步,从图15所示实验定位结果来看,大部分冲击点的定位效果较好,定位误差小于10 mm(全阵元定位)。而第1、第4、第13、第16组的定位结果相对较差,误差值明显增大。上述实验结果的定位精度变化趋势与三角定位算法的精度变化一致——即当冲击点位置逐渐远离传感器阵列形成的内部区域后,定位精度逐渐下降,如图16所示,实验定位结果的误差随着与阵列中心距离的增加而扩大,在4个角上的定位误差达到最大值。以全阵元

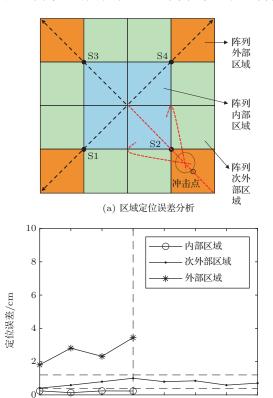


图 16 定位误差与冲击点位置的关系

数据组次

(b) 不同区域定位误差

Fig. 16 Relationship between positioning error and impact region

# 应用声学

定位实验为例(如图16(a)所示),当冲击点位于传感阵元对角上时,传感阵元对形成的双曲线近似于一条直线,此时定位点可能会在对角线上发生较大偏移,这也就是该部分组定位误差较大的原因。

# 4 结论

- (1) 基于声发射技术中声源定位的三角定位方法,在传感阵列中有效传感阵元数量少于三角定位方法所需的最少阵元数量(3个阵元)情况下,提出从有效传感器收集的声发射信号中挖掘与声源相关的额外边界反射信息以弥补部分传感器失效导致信息不足的问题。结果表明:混响中边界反射信息挖掘补充能够在有效阵元不足情况下完成精确损伤定位,且通过边界信息补充后的缺失双阵元阵列改善了原传感阵列在对角区域某些特殊点的定位精度,其平均定位误差为1.47 cm,实现了对损伤的精确定位。
- (2) 当声发射传感阵元均有效时,即在全阵元阵列的情况下,损伤定位误差最小,平均定位误差为1.06 cm;当声发射传感阵列中只有3个阵元有效时,即在缺失单阵元的情况下,损伤定位精度最低,缺失单阵元中的不同阵列平均定位误差在1.63~1.93 cm之间。
- (3) 提出的损伤定位信息扩充方法,避免了当 传感器失效导致信息获取不足时,声发射检测技术 误判或者漏判情况的发生,且该方法可以在增强损 伤检测系统以及算法稳定性方面提供思路。
- (4) 复合材料结构仍然面临着复杂的服役工况, 当传感阵元全部老化或者黏结剂失效后,监测系统 将彻底失效。此时如何确保传感网络的寿命高于或 者等于结构材料寿命是当下结构健康监测技术需 要重点解决的问题。

#### 参考文献

- [1] 陈雪峰, 杨志勃, 田绍华, 等. 复合材料结构损伤识别与健康监测展望 [J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 1–10, 202. Chen Xuefeng, Yang Zhibo, Tian Shaohua, et al. A review of the damage detection and health monitoring for composite structures[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 1–10, 202.
- [2] Yang H, Yang L, Yang Z, et al. Ultrasonic detection methods for mechanical characterization and damage diagnosis of advanced composite materials: a review[J]. Composite Structures, 2023, 324: 117554.

- [3] Ricci F, Monaco E, Boffa N D, et al. Guided waves for structural health monitoring in composites: a review and implementation strategies[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2022, 129: 100790.
- [4] Qiu L, Yuan S, Zhang X, et al. A time reversal focusing based impact imaging method and its evaluation on complex composite structures[J]. Smart Materials & Structures, 2011, 20(10): 105014.
- [5] Jang B, Kim C. Impact localization of composite stiffened panel with triangulation method using normalized magnitudes of fiber optic sensor signals[J]. Composite Structures, 2019, 211: 522–529.
- [6] McLaskey G C, Glaser S D, Grosse C U. Beamforming array techniques for acoustic emission monitoring of large concrete structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(12): 2384–2394.
- [7] He T, Xie Y, Shan Y, et al. Localizing two acoustic emission sources simultaneously using beamforming and singular value decomposition[J]. Ultrasonics, 2018, 85: 3–22.
- [8] Ciampa F, Meo M. A new algorithm for acoustic emission localization and flexural group velocity determination in anisotropic structures[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2010, 41(12): 1777–1786.
- [9] Ciampa F, Meo M, Barbieri E. Impact localization in composite structures of arbitrary cross section[J]. Structural Health Monitoring, 2012, 11(6): 643–655.
- [10] Kundu T. A new technique for acoustic source localization in an anisotropic plate without knowing its material properties[C]. 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, Dresden, Germany, 2012.
- [11] Sen N, Mateusz G, Packo P, et al. Square-shaped sensor clusters for acoustic source localization in anisotropic plates by wave front shape-based approach[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 153: 107489.
- [12] 陈浩, 李磊, 王秀明. 微地震监测技术研究进展——震源成像的相对定位法 [J]. 应用声学, 2018, 37(1): 34-41.
  Chen Hao, Li Lei, Wang Xiuming. Research progress of microseismic monitoring technology: waveform-based relative location methods[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(1): 34-41.
- [13] 张延兵, 宋高峰, 朱峰. 基于时差收敛算法的声发射源定位方法 [J]. 无损检测 2020, 42(4): 60-64.

  Zhang Yanbing, Song Gaofeng, Zhu Feng. A method of acoustic emission source location based on time difference convergence algorithm[J]. Journal of Nondestructive Testing, 2018, 37(1): 34-41.
- [14] 何田, 肖登红, 刘献栋, 等. 基于近场波束形成法的声发射源 定位研究 [J]. 振动工程学报, 2012, 25(2): 199–205.

  He Tian, Xiao Denghong, Liu Xiandong, et al. Research of acoustic emission source location based on near-field beamforming[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(2): 199–205.
- [15] Xiao D, He T, Pan Q, et al. A novel acoustic emission beamforming method with two uniform linear arrays on plate-like structures[J]. Ultrasonics, 2014, 54(2): 737–745.