

文章编号:1000-8055(2011)10-2207-07

基于声发射波束形成法的转静子碰摩故障定位

何 田¹, 刘耀光¹, 陈亚农², 刘献栋¹

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 提出了一种利用声发射信号进行旋转机械转静子碰摩故障定位的方法. 首先利用板波理论进行声发射信号传播特性研究, 证明波束形成法在声发射信号处理中的可行性, 并建立近场声发射波束形成法; 之后, 在旋转机械碰摩故障模拟实验台的机匣上进行断铅实验, 利用近场声发射波束形成法进行定位测试, 验证所提出方法的有效性; 最后, 将提出的方法用于转静子碰摩故障的定位, 并成功地识别出碰摩故障的位置.

关 键 词: 波束形成; 声发射; 定位; 碰摩; 故障诊断

中图分类号: TH212; TH213.3

文献标志码: A

Method for locating rub fault of rotor-stator based on acoustic emission beamforming

HE Tian¹, LIU Yao-guang¹, CHEN Ya-nong², LIU Xian-dong¹

(1. School of Transportation Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. China Aviation Power Plant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: A method for locating rub fault in rotating machinery based on the beamforming of acoustic emission signals was presented. Firstly, the propagation characteristics were obtained by using plate wave theory. On the basis of these results, the feasibility of locating rotating machinery rub fault by the beamforming of acoustic emission signals was confirmed, and the acoustic emission beamforming method was presented. Then, by breaking a mechanical pencil lead on the surface of the stator, the artificial acoustic emission was implemented to verify the presented method. Finally, the present method was used to diagnose the rotor-stator rub fault on the fault experimental device, and the results were analyzed, showing that the acoustic emission beamforming method can identify rub position efficiently.

Key words: beamforming; acoustic emission; locating; rub; fault diagnosis

旋转机械转静子碰摩是一种能导致严重破坏的故障形式, 在航空发动机中常见. 转静子碰摩时的振动响应具有明显的非线性特征, 并与碰摩条件密切相关, 从振动的角度对碰摩进行定位诊断尚无一种行之有效的方法^[1]. 目前, 有学者将声发

射(acoustic emission, 简称 AE)技术用于碰摩故障的诊断, 例如褚福磊、何永勇等^[2-3]对基于声发射的碰摩故障诊断方法进行了研究, 他们利用特征参数、波形分析技术研究了碰摩故障的特征提取, 并发展了基于声发射的碰摩定位方法.

收稿日期: 2010-10-18; 修订日期: 2011-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(50875010)

作者简介: 何田(1979—), 男, 四川广安人, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机故障诊断与持续适航方面研究.

Hall 和 Mba^[4-5] 利用声发射的 Kolmogorov-Smirnov (KS) 统计来提取汽轮机轴封摩擦特征. DENG 等^[6] 研究了旋转机械碰摩声发射信号的降噪, 从而提高了定位精度. 金志浩等^[7] 对旋转机械碰摩故障声发射信号的特征进行识别研究, 得到了碰摩声发射信号特征频率的分布. 这些研究成果表明声发射技术不仅可以检测转静子碰摩故障的发生, 还可通过定位分析找到声发射源, 在碰摩故障定位诊断领域展现出了良好的应用前景. 但目前碰摩的定位方法主要侧重线定位, 这在小型的转子实验台和发动机机匣上是可行的. 对于大中型的旋转机械而言, 其定位精度就明显降低, 因为大型转子系统结构的复杂性, 定位问题十分复杂. 传统上在声发射定位中通过同源信号到达不同传感器的时间差来计算 AE 源位置的时差定位法, 不但定位精度受到碰摩产生的 AE 信号多模态的影响, 还在传播过程中受频散效应、能量衰减等多方面影响^[8], 而且对传感器的布置要求高, 需要在大范围内布置传感器. 针对这些情况, 本文提出了近场波束形成声发射源定位的新方法, 并应用到碰摩声发射信号的处理, 为实现转静子碰摩的定位提供一种简便、可行的方法.

波束形成法是基于传声器阵列测量的一种阵列信号处理方法, 在通讯、声纳、噪声源识别、雷达和地震勘探等领域应用广泛. 波束形成法在通讯、噪声等目标源定位方面相对于时差定位法具有较大的优势, 例如传感器布置方便, 受信道衰减量的影响不大, 可以同时有多声源定位等. 但是, 波束形成法在声发射信号处理领域的应用研究却很少, 根本原因在于相对于空气中的声波信号, 固体结构中的声发射波具有多模态和频散效应等情况.

McLaskey 等^[9] 针对土木工程中大型结构的损伤进行了基于声发射波束形成法的无损检测研究, 开创了波束形成法在声发射源定位中的应用. 他们的研究表明, 波束形成法相对于传统方法而言, 便于传感器布置、减少传感器使用数量、降低各通道对到达时间同步要求以及可采用较低的采样率, 从而更加经济实用. 然而, 该论文针对的是大型土木建筑结构, 对于旋转机械机匣而言, 无论是材料还是结构都显著不同, 声发射信号传播的模式也不同. 因此, 需要通过板波理论分析波束形成法在薄板声发射源定位中的应用可能性. 另外, 碰摩声发射信号机匣中沿四周传播, 相对于接收点来说属于点声源而非线声源, 此时, 该文献

中的远场波束形成法不能适用, 需要研究近场波束形成法进行碰摩定位.

本文将波束形成阵列信号处理方法引入到转静子碰摩故障定位, 首先基于板波理论分析板中声发射信号的规律、声发射信号在板中的波型及波束形成法的适用性, 利用断铅实验研究聚焦波束形成法对机匣中声发射源的定位效果, 最后使用转静子碰摩实验进行验证.

1 波束形成法

波束形成法分为远场波束形成法和近场波束形成法两种, 以声源与阵列距离来划分. 根据 Mailloux^[10] 的经验公式, 当点声源与阵列原点之间的距离 r_a 满足 $r_a \leq 2L^2/\lambda$ 时声源属于近场声源, 上式中 L 为阵列的最大尺寸, λ 为声源的波长. 此时声源的传播规律应按球面波传播进行分析. 如 $r_a \geq 2L^2/\lambda$ 则声源属于远场, 传播规律可按平面波传播规律进行分析. 实际中声源与阵列的距离对于以上两种情况都会存在. 根据机匣尺寸与传感器布置尺寸的关系, 碰摩声发射源定位应该使用近场波束形成法.

近场波束形成法也叫聚焦波束形成法, 既可以远近方向定位, 也可以左右方向定位, 理论上可以确定近场三维空间上任意点声源位置.

当阵列聚焦到有限距离处的点声源时, 入射声波为球面波, 如图 1 所示.

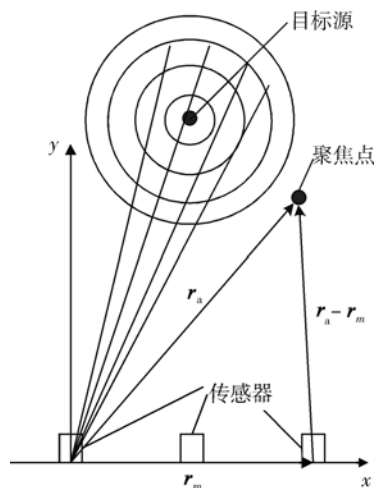


图1 近场聚焦波束形成法原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of near field focused beamforming method

阵列输出

$$b(r_a, t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m x_m(t - \Delta_m(r_a)) \quad (1)$$

其中 r_a 为参考点到聚焦点位移, M 是传感器的个数, ω_m 是第 m 个传感器通道的加权系数, $x_m(t)$ 是第 m 个传感器测得的信号. $\Delta_m(r_a)$ 为当聚焦到某个重建点时, 第 m 个传感器相对于参考点的时延. 对于目标源来说, 信号在相加之前, $\Delta_m(r_a)$ 会使信号调整到同一波前, 而聚焦到其他点时信号不会调整到同一波前. 由图 1 中几何关系可得

$$\Delta_m(r_a) = \frac{|r_a| - |r_a - r_m|}{c} \quad (2)$$

式中 r_m 是参考点到第 m 个传感器的位移, $|r_a| - |r_a - r_m|$ 是参考点到聚焦点的距离与第 m 个传感器到聚焦点距离差, c 是声波传播速度.

然而, 直接将波束形成法应用于声发射信号的处理有困难: 模态 AE 信号中各模态的传播速度不同, 同一模态还存在频散现象等问题, 因此为了解决这些问题, 必须对声发射信号中的波型和传播特性进行理论分析.

2 板中声发射信号波型及截止频率

2.1 板中声发射信号波型

对于上下均为自由表面的均质各向同性板, 板波理论认为板内传播的波有三种类型, 分别是对称波(也叫扩展波, 即 S 波), 反对称波(也叫弯曲波, 即 A 波), 水平剪切波(即 SH 波). 在建立模型时, 一般有平面应变假设和轴对称两种形式. 平面应变假设适合大型结构的声发射传播特性研究, 在现有的时差定位法中应用也最为广泛. 但对于碰摩引起的声发射信号在机匣中的传播而言, 碰摩激发的 AE 信号发生在某个局部区域, 然后向四周传播, 因此用平面应变和单分量位移场假设不再成立, 而采用轴对称假设更为合理.

轴对称假设几何模型如图 2 所示. 在板中建立圆柱坐标系, 板的厚度为 $2h$, r 为波的传播方向, z 为板的法线方向, 在轴对称问题中, 波关于 z 轴对称分布, 因而角度方向的位移分量为零.

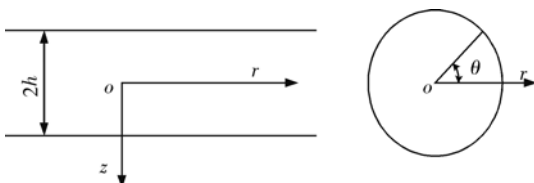


图 2 轴对称板波的几何模型

Fig. 2 Geometry wave modeling of the axial symmetric plate

轴对称问题中波的传播可用下式描述^[11]:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi(r, z, t) = \ddot{\varphi}/c_l^2 \\ \nabla^2 \boldsymbol{\eta}(r, z, t) = \ddot{\boldsymbol{\eta}}/c_t^2 \end{cases} \quad (3)$$

其中 φ 为标量势函数, $\boldsymbol{\eta}$ 为矢量势函数. $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$. c_l, c_t 分别为纵波与横波在无界或半无界媒质中的传播速度.

在轴对称情况下, 自由板的边界条件有: 在 $z = \pm h$ 两表面处的法向应力 σ_z 为零, 径向切应力 σ_{rz} 为零, 即

$$\begin{cases} \sigma_z(r, \pm h, t) = 0 \\ \sigma_{rz}(r, \pm h, t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

得轴对称问题对称模态下的频率方程为^[11]

$$\frac{\tan(q \cdot h)}{\tan(p \cdot h)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (5)$$

式中

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_l^2} - k^2; \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_t^2} - k^2;$$

k ——沿板水平方向的波数;

h ——板厚度的一半;

ω ——角频率;

c_l ——纵波声速;

c_t ——横波声速.

该频率方程与平面应变假设下对称模态的频率方程相同^[12]. 平面应变假设下, 波只沿一个方向传播; 轴对称假设下, 波轴对称传播. 两假设下波的传播规律不同, 但是它们的波数与相速度之间的规律相同.

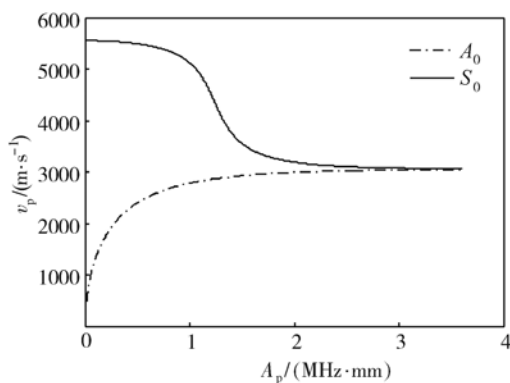
同样, 轴对称问题反对称模态下的频率方程与平面应变假设下反对称模态的频率方程也相同, 为

$$\frac{\tan(q \cdot h)}{\tan(p \cdot h)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad (6)$$

在给定厚度 $d = h/2 = 1.5 \text{ mm}$, 材料为合金钢, 体纵波声速 $c_l = 6100 \text{ m/s}$, 体横波声速 $c_t = 3300 \text{ m/s}$ 的情况下, 由式(5)、式(6)得到的最低阶扩展波 S_0 (图中位于上方的实线) 和最低阶弯曲波 A_0 (图中位于下方的点画线) 的频散曲线如图 3 所示, 横轴为频厚积 A_p (频率 f 与厚度 d 的乘积), 纵轴为相速度 v_p . 可见, 扩展波和弯曲波都存在相速度随频率变化的现象, 即频散现象.

2.2 截止频率

当阶次高于 S_0, A_0 时, 在特定的频厚积 A_p 会出现截止频率^[13]. 在这些点, 相速度趋于无穷大, 而群速度趋于零.

图3 S_0 , A_0 波频散曲线Fig. 3 Frequency dispersion curves of S_0 and A_0 waves

截止频率值可以通过考察 $k \rightarrow 0$ 时的极限条件来计算. 对于对称模式

$$\lim_{k \rightarrow 0} \frac{\tan(q \cdot h)}{\tan(p \cdot h)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (7)$$

由式(7)可得在截止频率处的 A_p 值为

$$A_p = \begin{cases} [c_1, 2c_1, 3c_1, \dots] \\ [c_1/2, 3c_1/2, 5c_1/2, \dots] \end{cases} \quad (8)$$

同理, 可得反对称模式在截止频率处的 A_p 值为

$$A_p = \begin{cases} [c_1/2, 3c_1/2, 5c_1/2, \dots] \\ [c_1, 2c_1, 3c_1, \dots] \end{cases} \quad (9)$$

通过截止频率和声发射信号的频谱范围, 可以判断板内声发射信号的模态成分. 对于 2.1 节所述的板, 在频厚积小于 $3.05 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 时, 板内的扩展波只存在当模态阶次最低的 S_0 ; 当频厚积小于 $1.65 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 时, 板内的弯曲波只存在当模态阶次最低的 A_0 , 此时, 板内只有 S_0 , A_0 存在.

3 声发射波束形成法

从第二部分可以看出, 由于薄板中的声发射主要存在两种速度不同的模态, 而且两种模态都存在频散现象. 因此, 波束形成法在声发射源定位方面的使用方法将与其在噪声源定位应用有明显不同. 在使用波束形成法确定碰摩位置时, 需要对有限边界、多模态和频散现象进行分析.

1) 有限边界的影响

由于实际测试件并非无限大, 当波传到边界时会有反射、波型转换等, 因此声发射波在衰减到很小时会在有限板中来回传播, 引起两种波型的叠加, 并有可能产生其他模态成分. 鉴于此, 在利

用波束形成法进行定位时, 需要避免反射波的影响. 在本文采取的措施是: 传感器不布置在边界附近; 波束形成法采用的数据不宜过长, 文中采用前期到达的不超过 100 个采样点 (采样频率 2.5 MHz) 的数据, 排除反射波的影响.

2) 多模态的影响

如果用于波束形成的数据是 A_0 到达前的数据即只有 S_0 成分, 或声发射信号中 S_0 在传播过程中被衰减, 用于波束形成的数据只包含 A_0 的成分, 则使用波束形成法将只识别出一个真实的声发射源.

如果用于波束行程处理的声发射信号包含 S_0 和 A_0 的信息, 由于 S_0 波的速度明显大于 A_0 波的速度, 在实际的波速标定中, 易于测量出的是两者中的较大速度, 即 S_0 的速度. 这种情况下, 由于两种模态 S_0 和 A_0 传播速度不一致, 若在波束形成法中使用 S_0 的速度会识别出两个声发射源. 由于 A_0 波比 S_0 波晚到传感器, 因此使用波束形成法识别声发射源时, A_0 波导致的声发射源识别位置偏离, 属于伪声发射源.

因此, 如果使用波束形成法只识别出一个声发射源, 则属于真实声发射源, 如果形成两个声发射源, 则需要利用理论上 A_0 , S_0 速度分别进行定位识别, 两次识别结果中都将包含了真实声发射源位置, 因此位置不动的识别声发射源为真实声发射源.

3) 频散效应的影响

如果没有频散效应, 波束形成法得到的识别图之主瓣将是椭圆形, 声发射源的位置在主瓣中心. 存在频散现象时, 以 S_0 波为例, 其不同频率成分的传播速度不同, 波束形成法得到的识别图之主瓣为一系列远近不同的椭圆形叠加, 从而其外轮廓形似带状. 由于用于波束形成法的波传播速度来自实验前的标定测量, 是各种频率的 S_0 、各种频率的 A_0 波中的最快传播速度, 因此真实声发射源不在主瓣的中心, 通常位于主瓣离传感器较近的位置.

综上所述, 使用声发射波束形成法进行定位时需考虑有限边界、多模态和频散效应的影响.

4 基于声发射波束形成法的转静子碰摩定位实验

4.1 断铅实验

碰摩引起的声发射信号属于突发型信号. 突发型声发射实验一般采用断铅信号模拟声发射源

进行声发射信号传播速度测试和定位验证^[14],它是声发射检测技术中最常用的模拟声发射源,具有广泛的代表性.具体过程是:在被测物体上以规格为 $25\text{ mm} \times \phi 0.5\text{ mm}$ 的铅心与材料平面成一定的角度,铅心折断发出的信号即为模拟声发射信号.

转静子碰摩故障模拟实验台如图 4 所示,7 个声发射传感器布置在模拟机匣的一端,为一弧线阵列.断铅的位置如图 5(a)所示.当选择声发射波形到达时刻后的一段数据,使得该段数据时间范围内每个传感器接收到的声发射信号是第一次到达的数据,即可保证未计入边界反射波的影响.此时,上述板波理论可以应用于圆筒.圆筒展开后断铅位置如图 5(b)所示,坐标原点位于最上

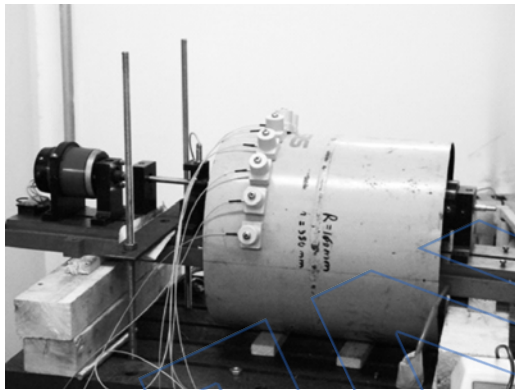
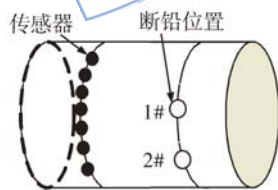
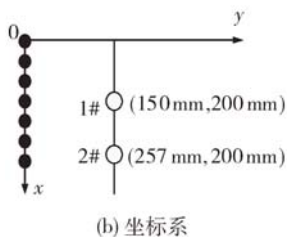


图 4 碰摩故障模拟实验台

Fig. 4 Experimental setup of the rotor-to-stator rubbing test



(a) 传感器布局

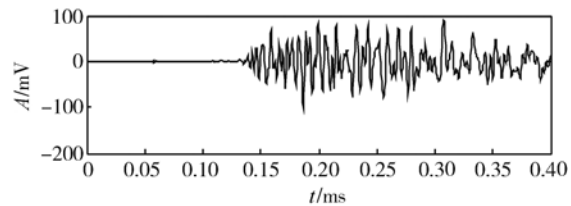


(b) 坐标系

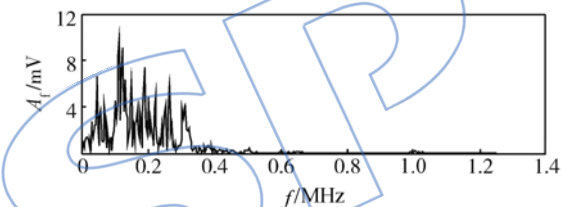
图 5 机匣几何模型示意图

Fig. 5 Geometry modeling of the case

端传感器中心,各传感器间隔为 47.3 mm .选择两个具有代表性的点 1# (位于阵列中心垂线上)、2# (位于阵列边侧垂线上)为断铅位置,坐标见图 5(b).断铅信号的时域波形和频谱图如图 6 所示.由图中可以看出,信号的能量主要集中于 $f \leq 0.4\text{ MHz}$ 频率段,频厚积 $A_p \leq 1.2\text{ MHz} \cdot \text{mm}$,根据第二部分的分析可以得出:在模拟机匣中传播信号为主要为 A_0, S_0 .



(a) 时域波形



(b) 幅值谱

图 6 断铅信号

Fig. 6 AE signals acquired by pencil lead break tests

当断铅在模拟机匣表面进行角度较小的断铅时,筒壁中 S_0, A_0 同时存在^[15].利用传感器测试声发射信号传播速度,在 $150 \sim 300\text{ mm}$ 距离上,测试得到的传播速度约为 2800 m/s ,通过板波理论分析并由图 3 可看出,此时测试到的是 A_0 波的速度,离面位移(垂直于传播方向的位移)较小的 S_0 波在传播过程中(包含通过模拟机匣中间焊缝)被衰减到了与噪声同级别的量.

本文在 1# 点 ($150\text{ mm}, 200\text{ mm}$), 2# 点 ($257\text{ mm}, 200\text{ mm}$) 进行断铅实验,如图 5 所示.图 7~图 8 为 1#, 2# 两个位置上断铅角度为 30° 时的识别结果(阵列输出进行了归一化处理,下同).两图中只有一个类似椭圆的主瓣,这是由于用于波束形成的数据只包含 A_0 的成分,此时波束形成只识别出一个声发射源.这与理论分析相一致.由于 A_0 存在频散现象,其包含的频率成分波速不一样,用于波束形成法处理的波速是测试到的信号最大速度,但该速度下的频率成分又在能量上不是最优.因此,主瓣下角离真实声发射源较近,且不是最高峰.

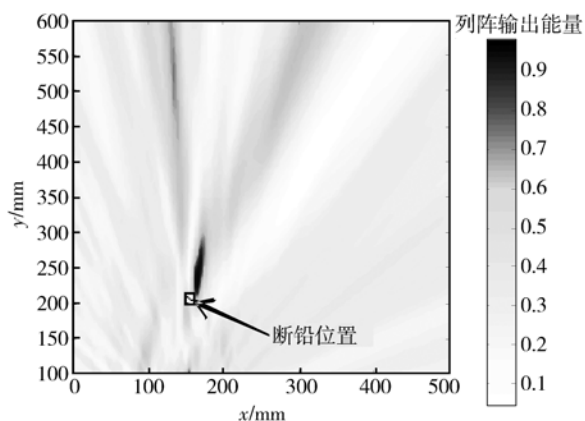


图7 位置1#断铅实验识别结果

Fig. 7 Comparison between identified and real AE source of 1#

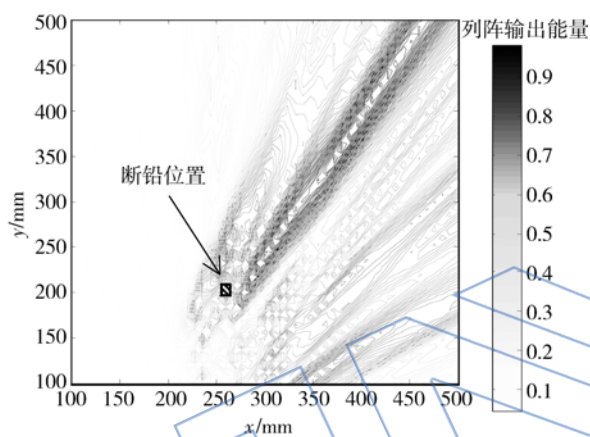


图8 位置2#断铅实验识别结果

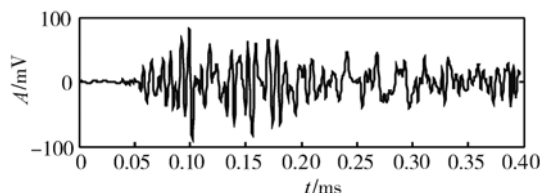
Fig. 8 Comparison between identified and real AE source of 2#

从分析可知,声发射波束形成法对断铅位置的识别与理论分析一致,能有效定位声发射源。

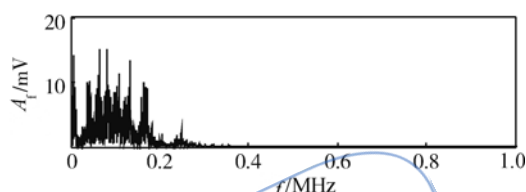
4.2 转静子碰摩实验

在模拟实验台上,通过调整转盘与模拟机匣的对中性,使转盘上的叶片与机匣碰摩,通过测量模拟机匣上的痕迹可知碰摩区域位于 $x: 160 \sim 170 \text{ mm}$, $y: 205 \sim 220 \text{ mm}$ 区域内。利用图4所示的阵列传感器测取声发射信号,其中通道一的信号如图9所示。从图9中可以看出,信号的能量主要集中在 $f \leq 0.3 \text{ MHz}$ 频率段,频厚积 $A_p \leq 0.9 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$,根据第二部分的分析可以得出在模拟机匣中传播信号为主要为 A_0, S_0 。使用波束形成法进行声发射源识别,得到图10。图10中的矩形区域表示实际的碰摩位置。可以看出,图中只有一个类似带状的主瓣,这是由于用于波束形成的数据只包含 A_0 的成分,此时波束形成只识别出一

个声发射源。按照前述分析碰摩位置应在主瓣的下角尖部,可以看出该位置与实际碰摩区域非常接近,这说明声发射波束形成法可有效地对碰摩位置进行定位。



(a) 时域波形



(b) 幅值谱

图9 碰摩声发射信号

Fig. 9 Signals resulting from rub

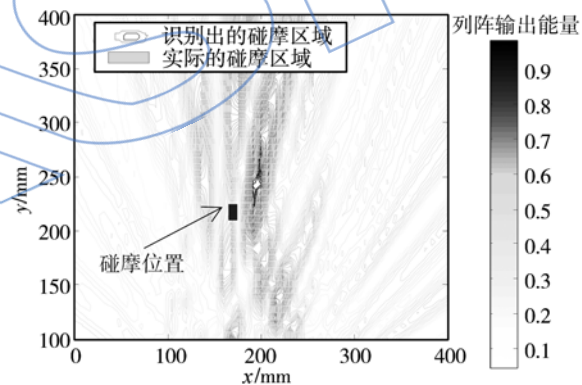


图10 碰摩实验识别结果

Fig. 10 Comparison between real AE source location of rubbing and identified result

5 结论

本文利用板波理论研究了声发射信号传播特性,提出了近场声发射波束形成法,并用于碰摩故障的定位,得出以下结论:

1) 将波束形成法用于固体中,特别是板中的声发射源定位是可行的。在基于板波理论分析出声发射信号模态成分的基础上,声发射源的定位精确能够得到保证。

2) 多模态声发射信号对于波束形成法的识别效果有影响。基于同一传播速度对不同传播速度的波利用波束形成法进行声发射源识别,将产

生多个识别声发射源,需要根据测试速度和板波理论分辨声发射源的真伪性;基于传感器触发时间可以测试到用于波束形成法的声发射波最快速度,因此可以通过主瓣离传感器最近的位置来确定声发射源的位置。

3) 声发射波束形成法能够有效地定位转静子的碰摩位置。

参考文献:

- [1] 邓艾东,包永强,赵力. 转子碰摩声发射源定位中的广义互相关时延估计研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 86-92.
DENG Aidong, BAO Yongqiang, ZHAO Li. Research on time delay estimation algorithm based on generalized cross correlation in acoustic emission source location[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(14): 86-92. (in Chinese)
- [2] 褚福磊,王庆禹,卢文秀. 用声发射技术与小波包分解确定转子系统的碰摩位置[J]. 机械工程学报, 2002, 38(3): 139-143.
CHU Fulei, WANG Qingyu, LU Wenxiu. Detection of the rub location in a rotor system with AE sensors and wavelet analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(3): 139-143. (in Chinese)
- [3] 何永勇,印欣运,褚福磊. 基于小波尺度谱的转子系统碰摩声发射特性[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 149-153.
HE Yongyong, YIN Xinyun, CHU Fulei. Acoustic emission characteristics of rub-impact for rotor-bearing system based on wavelet scalogram[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 149-153. (in Chinese)
- [4] Hall L D, Mba D. Acoustic emissions diagnosis of rotor-stator rubs using the KS statistic[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(4): 849-868.
- [5] Hall L D, Mba D. Diagnosis of continuous rotor-stator rubbing in large scale turbine units using acoustic emissions[J]. Ultrasonic, 2004, 41(9): 765-773.
- [6] DENG Aidong, GAO Wei, BAO Yongqiang, et al. Research of acoustic emission signal enhancement based on discrete fractional cosine transform[C]// IEEE Proc of 7th WCI-CA. Chongqing: IEEE, 2008: 5852-5857.
- [7] 金志浩,刘俊焯,金文,等. 旋转机械碰摩故障声发射信号的特征识别研究[J]. 沈阳化工学院学报, 2008, 22(2): 153-156.
JIN Zhihao, LIU Junxuan, JIN Wen, et al. Study on the feature recognition of acoustic emission signals from the rubbing fault of rotor[J]. Journal of Shenyang Institute of Chemical Technology, 2008, 22(2): 153-156. (in Chinese)
- [8] Majid A, Mehrdad S B. Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to acoustic emission signals[J]. Applied Acoustics, 2010, 71(7): 634-639.
- [9] 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.
- [10] Mailloux R J. Phased array antenna handbook[M]. Norwood: Artech House Publishers, 2005.
- [11] Miklowitz J. Elastic waves and waveguides[M]. New York: North-Holland Publishing Company, 1978.
- [12] Graff K F. Wave motion in elastic solids[M]. Columbus: Ohio State University Press, 1975.
- [13] Rose J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. London: Cambridge University Press, 2004.
- [14] 张虹. 管道腐蚀及泄漏的声发射检测技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
ZHANG Hong. Study on pipeline corrosion and leak detection based on acoustic emission[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [15] Michael R G. Plate wave acoustic emission[J]. Acoustical Society of America, 1991, 90(1): 358-364.