

文章编号:1000-8055(2012)09-2086-07

非均匀温度场下声发射源定位方法

陈亚农¹, 何 田², 肖登红², 刘献栋²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对非均匀温度场下声发射信号传播速度不一致导致时差定位法定位精度下降的问题, 研究基于波束形成法的声发射源定位效果. 首先, 基于板波理论研究声发射信号的传播特性, 分析频散现象等对声发射信号速度测试的影响; 然后通过数值仿真研究声发射波束形成法定位精度对不同重建速度的定位效果, 进而发现在声发射波束形成法在阵列方向具有速度不敏感性. 在加热前后的薄钢板上进行断铅定位实验, 其结果表明声发射波束形成法可以在非均匀温度场中保持较高的定位精度, 在机匣温度不均的航空发动机碰摩定位领域有良好的应用前景.

关 键 词: 定位; 声发射; 波束形成; 板波; 碰摩

中图分类号: V23; TH17

文献标志码: A

Location method of acoustic emission source in non-uniform temperature field

CHEN Ya-nong¹, HE Tian², XIAO Deng-hong², LIU Xian-dong²

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Transportation Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In view of the location accuracy decrease of time division of arriving (TDOA) method in non-uniform temperature field, the location performance of acoustic emission beam-forming was studied. Firstly, the propagation characteristics of acoustic emission signals were obtained by using plate wave theory, and the main factors affecting the accuracy like dispersion phenomenon are analyzed on the basis of the results. Then, the location performance of acoustic emission beam-forming based on uniform linear array was explored by numerical simulation, and show that the positioning accuracy on sensors array direction is stable in certain speed range. The artificial acoustic emission sources which were created by breaking a mechanical pencil lead on the plate surface before and after heating were implemented to verify the simulation. The results were analyzed and show that the acoustic emission beam-forming method has high location accuracy in non-uniform temperature field and good prospect of application for positioning stator-rotor rub of aero-engine in which stator has uneven temperature.

收稿日期: 2011-10-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120921.1251.022.html>

基金项目: 国家自然科学基金(50875010, 51105018); 航空科学基金(2011ZB51039)

作者简介: 陈亚农(1976—), 男, 湖南株洲人, 博士生, 主要从事航空发动机强度和故障诊断方面的研究.

Key words: location; acoustic emission; beam-forming; plate wave; rub

航空发动机在设计中常缩小转静子之间的间隙以提高效率^[1],从而增大了转静子碰摩可能性,导致与碰摩相关的整机振动问题较多^[2].航空发动机有多级叶片,不同位置的碰摩可能导致不同级别的危险.为正确诊断出碰摩的类型和原因,更好地进行维护维修工作,需要能够准确定位碰摩发生位置.与碰摩存在性诊断方面的研究相比,精确诊断碰摩位置方面的研究不多.目前用于碰摩定位的信号媒介主要有两大类,即振动和声发射.振动法主要依据基于模型的诊断方法,通过监测转子系统刚度^[3]、阻尼、碰摩力^[4]等参数的变化来确定碰摩位置.由于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,从振动角度准确定位碰摩尚无有效的方法^[5].另外,采用振动法定位需要建立精确的模型,因此目前其应用主要集中于结构相对简单的小型转子系统中,尚不适合航空发动机这样的复杂系统.

碰摩是一个动态过程,冲击和摩擦接触区应力分布变化会产生瞬间应力波^[6-7],也称为声发射(acoustic emission,简称 AE);AE 信号能描述应力波的特征,从而可以反映冲击和摩擦的性质.相对于振动法的定位局限性,利用声发射法对旋转机械转静子碰摩进行定位更有效.例如褚福磊、王庆禹等^[8]利用特征参数、波形分析技术研究了碰摩声发射信号的特征提取,发展了基于声发射的碰摩定位方法.Deng A 等^[9]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.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故障源,在碰摩故障定位诊断领域具有良好的应用前景.目前采用的碰摩定位方法主要侧重于线定位,多采用通过同源信号到达不同传感器的时间差来计算 AE 源位置,不但定位精度受到碰摩 AE 信号多模态的影响,而且还受传播过程中频散效应、能量衰减等多因素的影响^[10].针对此现状,文献^[11]提出了基于声发射波束形成法的碰摩定位方法,能够有效地定位转静子的碰摩位置,且便于传感器的布置和定位的实施.但上述这些研究都没有考虑到航空发动机机匣温度对定位精度的影响.在航空发动机机匣的不同位置,温度差异很大(最高可达数百摄氏度).由于温度对声发射信号速度的影响,传感器稀疏布置可能导致各传感器测试到的信号经过了差异较大的温度场/温度梯

度,从而对依赖波达时间来定位的时差定位法有较大影响.对于文献^[11]的波束形成法,由于传感器布置在较小区域内,声发射源到各传感器的信道较近,信号受温度场梯度的影响相对较小,因此,声发射波束形成法可能会获得较好的定位效果.为了验证该方法的有效性,本文在数值仿真的基础上研究温度导致的速度误差对声发射波束形成法定位准确度的影响.在加热前后的薄钢板上进行断铅定位实验,研究非均匀温度场下均匀直线阵列声发射波束形成定位性能,为非均匀温度场分布的机匣进行转静子碰摩定位检测提供一种简便、可行的方法.

1 温度对声发射波传播速度的影响

航空发动机机匣是薄壁结构,厚度较小,在其中传播的声发射波是各种类型的板波,且以 Lamb 波为主.Lamb 波是横波和纵波的合成波,其传播速度受温度的影响明显.当不考虑边界影响并将材料看作各向同性介质时,其纵波和横波速度可由密度、弹性模量和泊松比表示^[12]

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\gamma)}{\rho(1+\gamma)(1-2\gamma)}} \quad (1)$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\gamma)}} \quad (2)$$

式中 c_l 为纵波速度; c_t 为横波速度; E 为弹性模量; ρ 为密度; γ 为泊松比.

由式(1)、式(2)可知,固体中的声发射波速度与弹性模量 E 、密度 ρ 、泊松比 γ 相关.随着温度的变化,这些参数都将发生变化,横波和纵波的速度显著变化.由于在非均匀温度场下声发射波束形成法对碰摩声发射源位置定位与恒温状态下的定位情况有所不同,因此进行声发射波束形成法在非均匀温度下的定位效果研究,对提高定位精度是很有意义的.

2 延时-迭加声发射波束形成法

2.1 均匀直线阵列的延时-迭加波束形成算法

波束形成法采用由一组在空间固定位置上分布的传声器组成的阵列对空间声场进行测量,通过对传声器阵列测得的信号进行处理,以获得详细的声源信息,包括位置.在各种波束形成算法中,延时-累加是简单又有效的算法之一,应用最为广泛^[13].考虑到在板中声发射源定位是在二维

空间上进行,因此选用最简单的均匀直线阵列进行研究,但研究方法可以推广到其他阵列形式.

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.

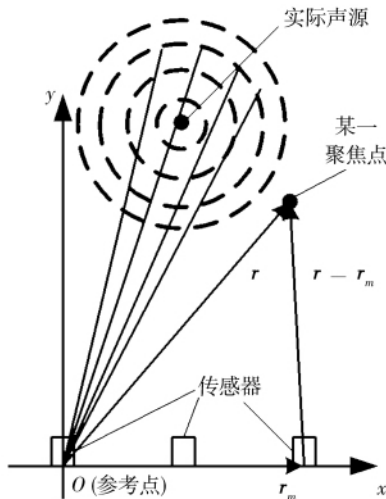


图 1 聚焦波束形成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of focused beam-forming

阵列输出

$$b(r, t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m x_m [t - \Delta_m(r)] \quad (3)$$

其中 r 为参考点到聚焦点位移, M 是传感器的个数, 是第 m 个传感器通道的加权系数, 是第 m 个传感器测得的信号. $\Delta_m(r)$ 为当聚焦到 r 所在点时, 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, $\Delta_m(r)$ 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

$$\Delta_m(r) = \frac{|r| - |r - r_m|}{c} \quad (4)$$

其中 r_m 是参考点到第 m 个传感器的位移, $|r| - |r - r_m|$ 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.

2.2 板中声发射信号传播特性

板中声发射波的频率方程为^[14]

对称模式

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (5)$$

反对称模式

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad (6)$$

式中

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

其中 k 为沿板水平方向的波数; h 为板厚度的一半; ω 为角频率.

理论上, 式(5)和式(6)有无穷多解, 即固体中扩展波和弯曲波有无穷多阶. 但对于实际结构, 受尺寸和形状限制, 其内部传播的弯曲波和扩展波的数量是十分有限的. 对于板而言, 在特定的频厚积处会出现截止频率^[15]. 在这些点, 相速度趋于无穷大, 而群速度趋于零.

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

$$\begin{cases} \frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \\ k \rightarrow 0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可得在截止频率处的 f_d 值为

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

同理, 反对称模式在截止频率处的 f_d 值为

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

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. 针对合金钢板材, 在给定厚度 $d = h/2 = 1.5 \text{ mm}$, 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 2 所示, 其中横轴为频厚积 A_p , 纵轴为相传播速度 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. 当波在板中传递时, 顺传播方向 300 mm 间距布置的传感器阵列测试到的声发射信号如图 3 所示, 传播距离越远, 扩展波和弯曲波分离

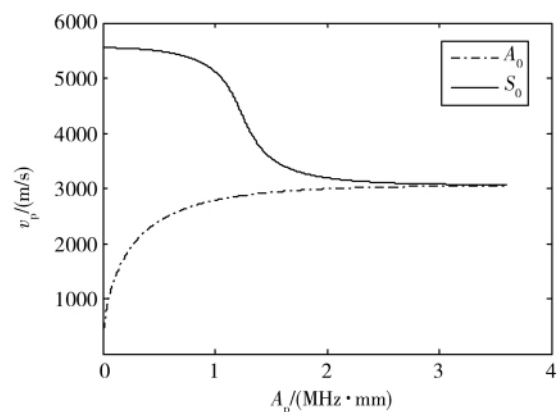


图 2 S_0, A_0 波频散曲线

Fig. 2 Dispersion curves of S_0 and A_0

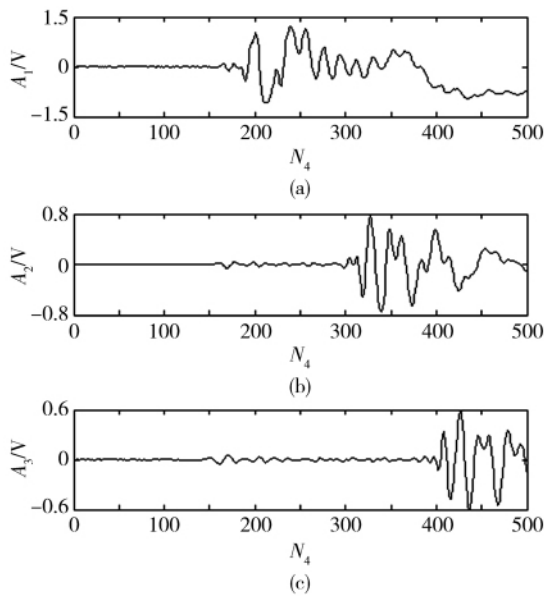
图3 S_0, A_0 波随传播而分离现象

Fig. 3 Separation of S_0 and A_0 in propagation process

就越明显.

在频厚积小于 $3.05 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 时,板内扩展波只存在模式阶次最低的 S_0 ,但弯曲波有 A_0 和 A_1 ;当频厚积小于 $1.65 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 时,板内的弯曲波只存在模式阶次最低的 A_0 ,此时,板内只有 S_0 和 A_0 存在.

可见,在板中传播的声发射信号包含的模式一般不会太多,通常只有 S_0 和 A_0 .

2.3 非均匀温度下中定位精度影响因素分析

从第2.1节至第2.2节可以看出,传播特性主要有模态和频散现象,另外还有第1节所述的温度影响.

2.3.1 多模态

实际工程应用中,由于扩展波和弯曲波的幅值相差较大,通常在板表面测得的弯曲波幅值比扩展波大的多.由于频散现象的存在,扩展波的速度高于弯曲波,达到一定距离后,两者容易分离,多模态可以通过设置门限消除.另外,波束形成法的门限值只是用来确定是否存在声发射波型,而不是用来确定信号的到达时间,因此门限值易于确定,并且对波束形成定位结果影响较小.

2.3.2 频散现象

频散现象可能导致无法精确得到波达时刻和波速,造成时差定位法精度不准.对于声发射波束形成法而言,并不需要获知十分准确的波达时刻,但是声发射信号的测试速度可能对其定位精度有

影响.

2.3.3 温度

温度变化可导致声发射信号的传播速度变化.当温度场非均匀时,声发射信号沿不同的温度梯度传播速度并不一致.如果采用稀疏传感器布置的时差定位法,由于声发射源与不同传感器之间的距离和位置差异较大,受非均匀温度场的影响也随之增大.而声发射波束形成法的传感器阵列布置在局部空间范围内,声源到各传感器的信道较近,受温度场梯度的影响相对较小.因此,声发射波束形成更适合非均匀温度场声发射源的定位.在此,基于数值仿真方法研究声发射波束形成定位精度受速度(温度)的影响,通过实验验证非均匀温度场声发射波束形成定位效果.

3 速度误差对定位的影响

采用均匀直线阵列,布置如图1所示.相邻传感器间距为 3 cm ,传感器数目7个;坐标原点为第一个传感器中心,沿阵列方向为 x 轴,垂直于阵列方向为 y 轴;声源位置为 $(200, 800 \text{ mm})$,声源的频率为 0.25 MHz .模拟声发射源发射频率为 250 kHz 的正弦波信号.

当声发射信号的实际速度为 4800 m/s 时,以不同的速度重构的声源位置的 x 坐标值和 y 坐标值如图4所示.

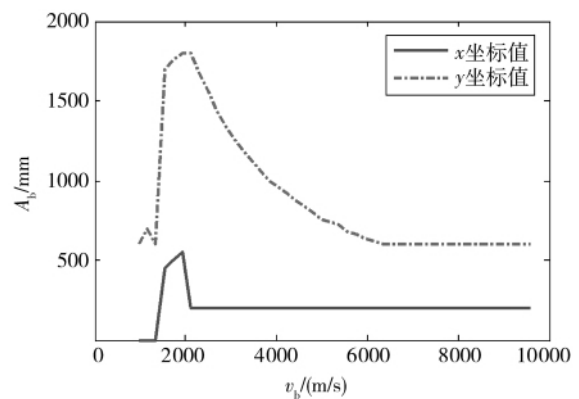


图4 不同定位速度下识别声发射源的 x 和 y 坐标值

Fig. 4 x and y values of identified acoustic emission source with different focus speeds

从图3中可以看出,均匀直线阵列波束形成法对重构速度和真实速度之间的误差有容错能力,但在 x 和 y 方向差异很大.重构速度在 2100

m/s 以上时,声发射波束形成法都能准确地确定声发

射源的 x 坐标. 重构速度在 4600~5000 m/s 范围内时,声发射波束形成能准确确定声发射源的 y 坐标;在该范围之外, y 坐标值则偏离真实声源位置. 可见,均匀直线阵列沿阵列方向有很强的稳定性,而在垂直于阵列方向的定位效果受速度误差影响大.

对于结构损伤或故障定位而言,不同情况下对声发射源 x 和 y 向定位精确度要求是不一样的. 可以根据需要合理布置传感器阵列方向.

4 非均匀温度场对定位性能的影响

在图 5 所示钢板上,采用均匀直线阵列进行声发射源定位,其传感器布置和模拟 AE 源如图 6 所



图 5 测试钢板及传感器布置

Fig. 5 Tested steel plate and sensor arrangement

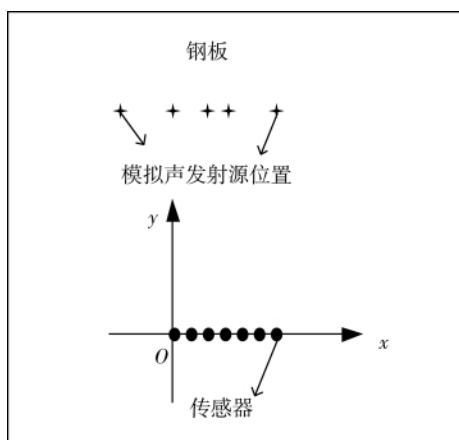


图 6 传感器布置及断铅位置

Fig. 6 Sensor arrangement and pencil lead broken positions

示. 薄钢板的长、宽、厚分别为 1000, 800, 5 mm. 实验采用软岛科技有限公司的 HAESA 全息声发射信号分析仪,采样频率为 3 MHz. 利用断铅模拟 AE 源,断铅位置分别为 #1(-90, 600 mm), #2(0, 600 mm), #3(60, 600 mm), #4(90, 600 mm), #5(180, 600 mm).

利用时差定位法,选取较小的门限值,多次测量获得室温下断铅声发射信号的传播速度为 5400 m/s. 在钢板下方放置电炉,快速、稳定地对钢板进行局部加热,热量在钢板中进行传导,并向外辐射,形成非均匀温度场. 在钢板上绘制网格,利用红外温度测量仪测量网格各点的温度,所得温度场如图 7 所示.

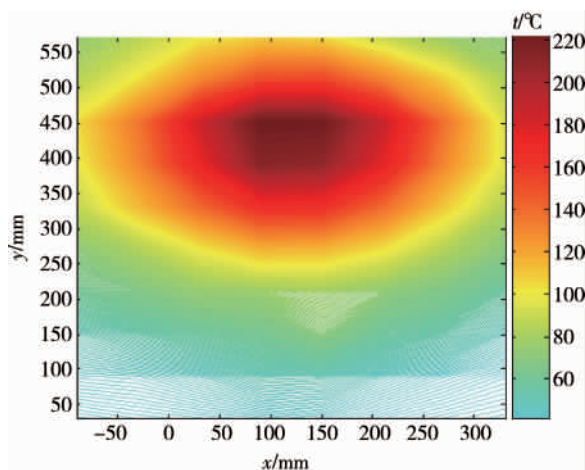


图 7 钢板的温度场

Fig. 7 Temperature field of the steel plate

该温度场下,根据时差定位法,测试点(0, 600 mm)与点(300, 0 mm)之间的波速为 5040 m/s. 在这两点之间,声发射信号历经的温度场梯度变化最大,距离最远,因此测试到的速度应最慢. 当温度场非均匀,温差达 194 °C 时,与室温条件相比,钢板中声发射传播速度差别可达 9%.

在钢板上进行断铅,声发射信号经过非均匀温度场到达各传感器,利用声发射波束形成进行定位,采用的定位速度为测试到的最慢速度 5040 m/s,结果如表 1 所示.

从表 1 的对比可以看出,该非均匀温度场对定位结果影响有限:在 x 轴方向上,位置误差未超过重构网格的一格(即 10 mm). y 轴方向坐标值偏大,原因是利用重构的速度 5040 m/s 偏小,导致 y 值偏离相对较大. 可见,该非均匀温度场下,即使测试速度精确度不够,声发射波束形成法也能够得到满意的精度.

表 1 各 AE 源实际位置和识别位置对比
Table 1 x and y coordinates of real AE source and identified position

		AE 源				
		# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
实际 AE 源位置/mm	x	-90	0	60	90	180
	y	600	600	600	600	600
室温识别 AE 源位置/mm	x	-90	0	60	100	180
	y	571	578	620	634	620
非均匀温度场识别结果/mm	x	-90	0	50	90	170
	y	606	678	739	690	641

5 结 论

本文研究了非均匀温度场下声发射波束形成法的定位效果. 基于板波理论研究了声发射信号的传播特性, 分析了频散现象等对声发射信号速度测试的影响, 基于仿真研究了速度误差对声发射波束形成的定位准确度的影响. 在加热前后的薄钢板上进行断铅定位实验, 得出了以下结论:

- 1) 均匀直线阵列声发射波束形成在沿阵列方向具有一定范围的速度不敏感性, 可以在不精确的速度下精确定位 AE 源沿阵列方向的位置;
- 2) 温度对声发射信号传播的速度有较大影响, 对声发射波束形成定位精度有影响, 但均匀直线阵列声发射波束形成法在 x 方向的鲁棒性强, 依然能够保持较高的精度.

综上所述, 声发射波束形成法在机匣温度不均的航空发动机碰摩定位领域有良好的应用前景.

参考文献:

[1] Sinha S K. Dynamic characteristics of a flexible bladed-rotor with Coulomb damping due to tip-rub[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273(4): 875-919.

[2] 刘书国, 洪杰, 陈萌. 航空发动机叶片-机匣碰摩过程的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(6): 1282-1288.

LIU Shuguo, HONG Jie, CHEN Meng. Numerical simulation of the dynamic process of aero-engine blade-to-case rub-impact[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(6): 1282-1288. (in Chinese)

[3] 卢文秀, 褚福磊, 郭丹. 基于遗传算法的碰摩位置辨识[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(2): 208-211.

LU Wenxiu, CHU Fulei, GUO Dan. Rubbing location identification based on genetic algorithms[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(2): 208-211. (in Chinese)

[4] 于涛, 韩清凯, 孙伟, 等. 基于模态扩展与谐波分解的转子碰摩故障精确诊断[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2006, 27(5): 524-527.

YU Tao, HAN Qingkai, SUN Wei, et al. Precise diagnosis of rotor rubbing fault based on modal expansion and harmonic decomposition[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2006, 27(5): 524-527. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 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.

[7] 金志浩, 刘俊煊, 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] 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, 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)

[9] DENG Aidong, GAO Wei, BAO Yongqiang, et al. Study on recognition characteristics of acoustic emission based on fractal dimension[R]. The 2008 International Conference on Embedded Software and Systems Symposia (ICESS2008): 475-478.

[10] Majid A, Mehrdad S B. Leak detection in water-filled plas-

- tic pipes through the application of tuned wavelet transforms to Acoustic Emission signals[J]. Applied Acoustics, 2010, 71(7): 634-639.
- [11] 何田, 刘耀光, 陈亚农, 等. 基于声发射波束形成法的转静子碰摩故障定位研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(10): 2207-2213.
- HE Tian, LIU Yaoguang, CHEN Yanong, et al. Method for locating rub fault of rotor-stator based on acoustic emission beamforming[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(10): 2207-2213. (in Chinese)
- [12] 梁宏宝, 朱安庆. 高温超声横波波速规律与影响因素研究[J]. 机械设计与制造, 2007(8): 27-29.
- LIANG Hongbao, ZHU Anqing. The study of the law of ultrasonic shear wave velocity and influence factor[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(8): 27-29. (in Chinese)
- [13] Yang J, Gana W, Tan K, Er M. Acoustic beamforming of a parametric speaker comprising ultrasonic transducers[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 125(1): 91-99.
- [14] Miklowitz J. Elastic waves and waveguides [M]. New York: North-Holland Publishing Company, 1978.
- [15] Rose J L. Ultrasonic waves in solid media [M]. London: Cambridge University Press, 1999.