

基于振动声调制的金属微裂纹定位方法研究*

郑慧峰, 呼刘晨, 方漂漂, 王月兵, 蒋 剑

(中国计量大学 精密测试与控制研究所 杭州 310018)

摘要:针对传统线性超声检测无法检测闭合微裂纹的问题,搭建了铝板的微裂纹振动声调制(VAM)检测系统,提取检测信号中的一阶旁瓣非线性信号和只滤除基波的全部非线性信号并对其时域反转,在ABAQUS有限元软件下,将其加载在铝板的无损模型上实现时间反转聚焦,获取铝板模型能量分布云图和各质点的位移信息,以此对微裂纹进行定位。结果表明,在时反信号的聚焦时刻原裂纹位置处有较强能量聚焦,只滤除基波的全部非线性信号聚焦效果优于一阶旁瓣非线性信号,振动声调制技术与时间反转方法结合能够实现对微裂纹的检测和定位。

关键词: 振动声调制技术;非线性超声;有限元仿真;时间反转

中图分类号: TH87 TB523 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Metal micro-crack location method based on vibro-acoustic modulation

Zheng Huifeng, Hu Liuchen, Fang Piaopiao, Wang Yuebing, Jiang Jian

(Institute of Precision Measurement and Control, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Traditional linear ultrasonic testing method is unable to detect the closed micro-crack. Thus, the vibro-acoustic modulation (VAM) detection system is established and used to perform VAM experiments on the first order side-band and whole nonlinear signals are extracted from detection signals on aluminum plate contained micro cracks, and reversed in the time domain. Then, the pre-processed signals are loaded into a finite element model built by ABAQUS. The cloud image and particle displacement are obtained and can provide the location information of micro cracks. The simulated results show that there is a stronger energy focusing around the original crack location at focusing time of the reversal signals. The whole nonlinear signals has better focusing performance than the signal only contain first order side-band. The combination of VAM and time reversal (TR) method can realize the detection and localization of micro crack.

Keywords: vibro-acoustic modulation (VAM); nonlinear ultrasonic; finite element simulation; time reversal

1 引言

振动声调制技术对早期结构的塑性变形和闭合裂纹灵敏度高,且受系统非线性影响小,与传统线性超声相比具有明显优势^[1]。但目前对振动声调制技术的研究还局限于调制信号的影响因素,损伤的定量表征等方面^[2-3],较少涉及损伤的定位研究。

振动声调制技术是利用低频(ω_1)和高频信号(ω_2)在损伤处相互调制,产生旁瓣($\omega_2 \pm n\omega_1$)非线性

信号来检测损伤的存在^[4,5]。根据惠更斯原理,损伤处即为非线性信号的声源,因此可以采用具有自聚焦特性的时间反转法使得振动声调制检测信号中的非线性信号聚焦于损伤位置。

Sutni A. M. 等人^[6]利用非线性声波时间反转聚焦原理对有缺陷的玻璃体进行试验研究,发现高次谐波的时间反转信号聚焦于裂纹位置处;Ulrich T. J. 等人^[7]和 Bas P. Y. J. 等人^[8]对一块含有裂纹的试件进行振动声调制时反试验,用压电陶瓷片激励和接收声波,激光测振仪获取时间反转声波在试件表面的分布情况,结果发现时反

声波能量最集中的位置与实际损伤位置一致; Dos S. S. 等人^[9]用非线性信号时间反转聚焦的方法对牙齿进行检测和成像处理,成功分辨出了牙齿中的牙釉质界面和内部裂纹。

上述的裂纹定位方法需要利用激光测振仪对试件表面进行扫描来判断声波能量的分布,这种方法成本较高,并不实用。因此,本文选择把实验和仿真相结合对闭合裂纹^[10]进行检测和定位研究。首先用振动声调制技术检测铝板中微裂纹,提取检测信号中的非线性信号并时域反转;然后用有限元仿真软件建立与被测体相同材料、结构和尺寸的模型,在原信号接收点上施加相应的时反信号并进行仿真;最后根据仿真结果中模型上质点位移信息和能量分布云图,确定信号的聚焦时刻和聚焦位置,实现裂纹的检测和定位。

2 基本原理

振动声调制时间反转法的示意图如图1所示,向有裂纹的试件内分别射入频率为 ω_1 和 ω_2 的激励声波,当声波经过裂纹时发生调制,产生以频率 $\omega_2 \pm \omega_1$ 为主的非线性信号,激励声波夹杂着非线性信号通过不同路径到达各个接收传感器。由于路径不同所以声波到达接收传感器的时间也不同,鉴于振动声调制信号中的非线性信号是由裂纹与声波作用产生的,可以视裂纹为非线性信号的声源。提取检测信号中的非线性信号,对其进行时域反转后重新加载到原接收传感器上,非线性时间反转信号便会在裂纹位置处聚焦。

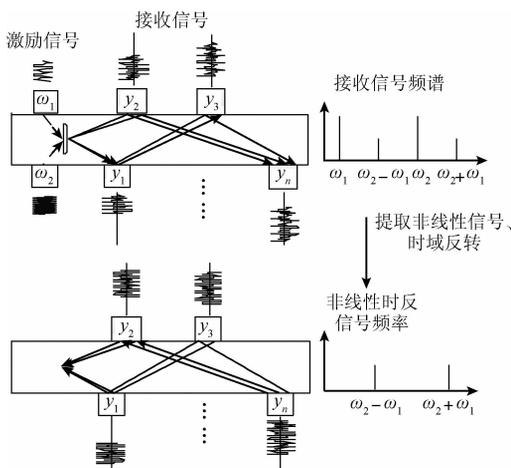


图1 振动声调制时间反转法示意图

Fig.1 Schematic diagram of VAM

将振动声调制技术与时间反转法的结合用下述公式进行推导解释,在一维条件下的各向同性体中,波动方程为^[11]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c^2 \beta \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: c 为波速, β 为非线性系数, u 为质点振动位移, x 为传播距离。

利用微扰近似理论,得到方程的近似解为:

$$u(x, t) = u^{(0)} + \beta u^{(1)} \quad (2)$$

式中: $u^{(0)}$ 为线性位移, $u^{(1)}$ 为非线性位移。暂不考虑衰减则振动声调制信号的线性位移为:

$$u^{(0)}(x, t) = A_1 \cos(\omega_1 \tau) + A_2 \cos(\omega_2 \tau) \quad (3)$$

式中: A_1, A_2 分别为低频和高速声波幅值, ω_1, ω_2 分别为低频和高速声波频率, $\tau = t - x/c$ 。

假设非线性位移为:

$$u^{(1)} = xh(\tau) \quad (4)$$

式中: $h(\tau)$ 为待定函数。

先将式(3)、(4)代入式(2),再代入式(1)中,最后得到:

$$u(x, t) = u^{(0)} + \beta u^{(1)} = A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t) + \beta x \left[-\frac{A_1^2 k_1^2}{8} \cos(2\omega_1 t) - \frac{A_2^2 k_2^2}{8} \cos(2\omega_2 t) \right] + \beta x \left\{ \frac{A_1 A_2 k_1 k_2}{4} [\cos(\omega_1 - \omega_2)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t] \right\} \quad (5)$$

式中: $k_1 = \omega_1/c, k_2 = \omega_2/c$ 。

从式(5)可以看出,两种信号与微缺陷相互作用产生了二次谐波信号和旁瓣信号,提取旁瓣信号作为时间反转信号,设:

$$f(t) = \cos(\omega_1 - \omega_2)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t \quad (6)$$

则传感器接收的总信号为^[12-13]:

$$u_j(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i f(t - t_i) \quad (7)$$

式中: j 为传感器编号, i 为传播路径编号, A_i 为声波幅值, t_i 为相应时间延迟。

将传感器接收到的信号进行时域上的反转,由于反转后的时间为负,在实际中不可实现,故在负的时间自变量上加时间 T (其中 $T > t$), 则时反信号为:

$$u_j(T - t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i f(T - t - t_i) \quad (8)$$

将时反信号幅值归一化处理并重新加载到接收传感器上:

$$f_j^{\text{TR}}(t) = \frac{1}{A_i^*} u_j(T - t) = \frac{A_i}{A_i^*} \sum_{i=1}^{\infty} f(T - t - t_i) \quad (9)$$

式中: A_i^* 为式(8)中的最大幅值。

该传感器在声源处产生的声场为:

$$u_j^{\text{TR}}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i f_j^{\text{TR}}(t - t_i) = \frac{A_i A_i}{A_i^*} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} f(T - (t - t_i) - t_i) = \frac{A_i A_i}{A_i^*} \left[\sum_{i=1}^{\infty} f(T - t) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} f(T - t + t_i - t_i) \right] \quad (10)$$

将各个传感器同时激励相应的时反信号,则声源处的声场为:

$$u^{TR}(t) = \sum_{j=1}^N u_j^{TR}(t) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{\infty} A_i f_j^{TR}(t - t_i) = \frac{A_i A_i}{A_i^*} \sum_{j=1}^N \left[\sum_{i=1}^{\infty} f(T - t) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{i \neq i'} f(T - t + t_i - t_{i'}) \right] \quad (11)$$

把式(6)代入式(11),得:

$$u^{TR}(t) = \frac{A_i A_i}{A_i^*} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{\infty} [\cos(\omega_1 - \omega_2)(T - t) - \cos(\omega_1 + \omega_2)(T - t)] + \frac{A_i A_i}{A_i^*} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{i \neq i'} \cos(\omega_1 - \omega_2)(T - t + t_i - t_{i'}) - \frac{A_i A_i}{A_i^*} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{i \neq i'} \cos(\omega_1 + \omega_2)(T - t + t_i - t_{i'}) \quad (12)$$

式(12)中右边第1项为旁瓣非线性信号经由不同传感器和不同路径同时同相到达声源处的信号,相互叠加形成主峰波;第2、3项表示旁瓣非线性信号经由不同传感器和不同路径没有同时同相到达声源处的信号,不能相互叠加故幅值较小,存在于主峰波两侧,旁瓣信号时间反转聚焦后频率不变。可见裂纹处产生的非线性信号被不同传感器接收并时间反转激励后,能同时同相地到达原裂纹位置,实现非线性时间反传信号^[14]的聚焦和裂纹定位。

3 微裂纹检测

3.1 振动声调制实验

如图2所示是振动声调制检测实验系统,主要仪器包括信号发生器、示波器、低功率放大器、中功率放大器、减震垫、铝板等。

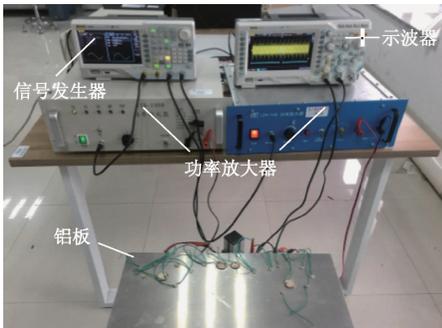


图2 振动声调制检测系统

Fig. 2 Detection system of VAM

本文振动声调制检测微裂纹的实验方案为:利用信号发生器产生一路低频信号和一路高频信号,低频信号通过功率放大器放大后连接压电陶瓷片产生低频超声波,高频信号则分为两路分别连接示波器和压电陶瓷片产生同步信号以及高频超声波。再由其他压电陶瓷片

别连接示波器接收与铝板中微裂纹相互作用后的振动声调制信号,最后由示波器显示并储存。

其中同步信号起参考零点的作用,多通道时间反转信号聚焦的关键就在于声源到达各个信号接收位置具有时间差,所以要保证各个位置的压电陶瓷片在同一时刻开始记录数据,但这在实际操作中难以实现,所以把最终接收到的振动声调制信号按照同步信号重新确定零时刻。

以铝板为研究对象用振动声调制技术检测其中的微裂纹。实验所用铝板的尺寸为 500 mm × 250 mm × 2 mm,在铝板上切出 30 mm 长的切槽,并沿着切槽方向用激光切割机在铝板表明刻印一道线用来引导微裂纹的扩展方向,然后在铝板上施加循环力,扩展出的微裂纹如图3中所示,其长度为 18.4 mm,距离铝板右边界 249.7 mm。

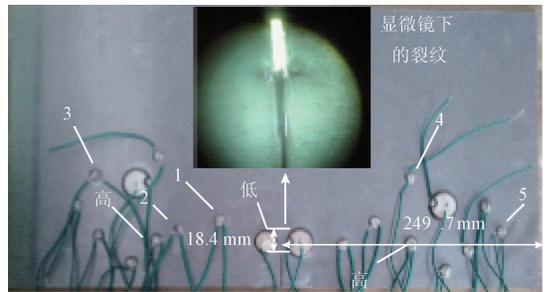


图3 铝板实物

Fig. 3 Aluminum plate image

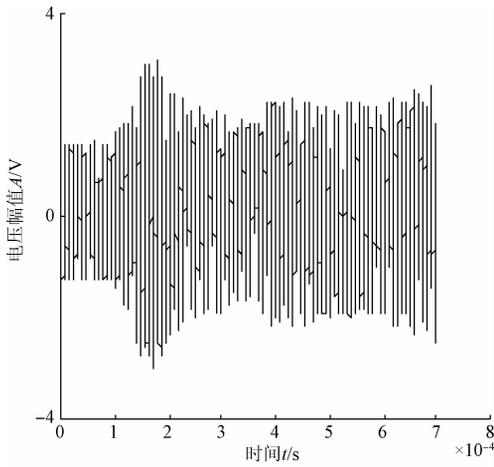
从式(5)可知一阶旁瓣非线性信号幅值正比于两个激励信号的幅值,提高低、高频激励信号的振幅均可有效增加旁瓣幅值。受压电材料线性响应范围和发射电路功率的限制,超声压电片产生的信号幅值不可能很大,通常的做法是合理选择激励频率来获得更好的激励效果。比如使激励频率等于被测试件的某一固有频率,或者采用压电陶瓷片的谐振频率^[15]。通过对本文的实验系统分别采用上述两种方法进行振动声调制实验。铝板模式频率的获得是利用信号发生器产生一组 1 ~ 6 kHz、持续时间为 2 s 的正弦扫频信号,以 20 V 的峰-峰值电压驱动压电陶瓷片进行振动,模态相应信号由示波器采集,得到铝板的模式频率为 2.5 kHz,将其作为低频激励信号来进行振动声调制实验。对比上述两种方法实验结果,发现激励信号频率为陶瓷片谐振频率时调制效果更佳,因此本文选择压电陶瓷片的谐振频率作为激励频率。

对于振动声调制技术其低频激励信号频率最好低于 100 kHz,这样激励声波会包含较大的能量从而更容易使裂纹面产生张开和闭合现象。使用 LCR 测试仪测量对发射低频超声的压电陶瓷片在 100 kHz 内的固有频率进行扫描,可以读出陶瓷片固有频率的大小。因此铝板振

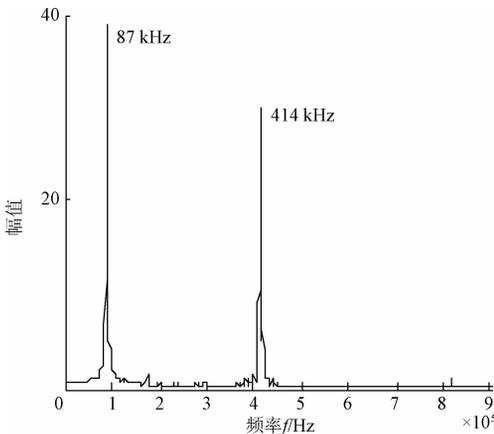
动声调制实验的低频激励信号选择 87.27 kHz,使用相同的方法选择的高频激励信号频率为 414 kHz。

3.2 振动声调制检测信号分析

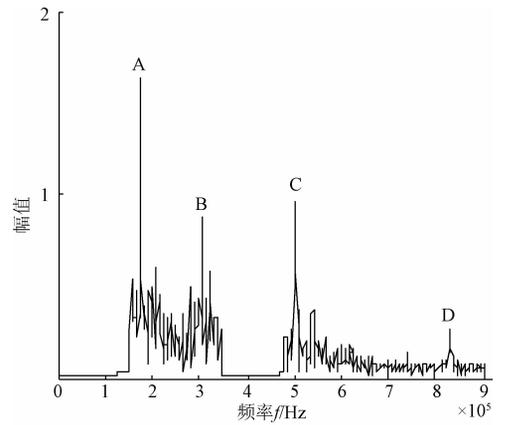
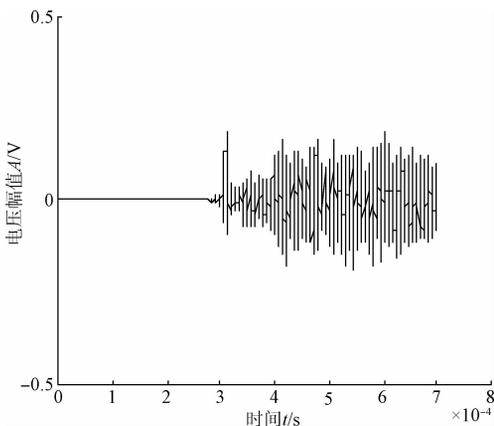
图4所示为铝板上—压电陶瓷片的接收信号,由于实验系统的振动声调制效果较差,难以在频域上直观地观察到各频率的非线性信号,因此用滤波器滤除幅值较大的激励信号。



(a) 振动声调制信号时域图
(a) The time domain figure of VAM



(b) 振动声调制信号频域图
(b) The frequency domain figure of VAM



(d) 非线性信号频域图
(d) The frequency domain figure of nonlinear signal

图4 铝板振动声调制检测信号
Fig. 4 VAM signal of aluminum plate

图4(d)所示为滤除激励声波后得到的非线性信号频谱图,其中 A(175.7 kHz)是低频激励声波的二次谐波;B(305.7 kHz)、C(502.9 kHz)是高频激励声波与低频激励声波的一阶差频与和频;D(829.6 kHz)是高频激励声波的二次谐波。图4(c)中的非线性信号时域图在 0.3 ms 前信号的幅值为 0,这是由于所用的滤波器阶数太高导致滤波后的信号有较大延时。

从上文振动声调制的公式推导结果可知,振动声调制检测信号中的高次谐波、旁瓣分量等非线性信号幅值都是与激励声波的幅值成正比的。但在实验过程中发现低频激励信号、高频激励信号电压的变化对实验结果影响程度不同。低频、高频激励信号频率分别为 87、414 kHz时,其中一列信号电压保持 1.2 V 不变,另一列以 0.2 V 为步长从 0.4 V 递增到 1.2 V 的振动声调制检测信号中一阶旁瓣的幅值变化如图5所示。

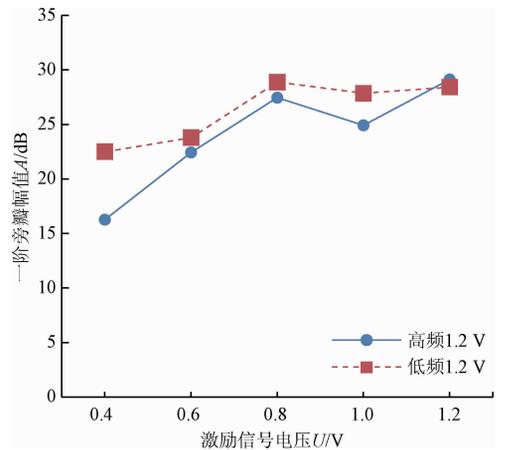


图5 激励信号电压与一阶旁瓣幅值关系
Fig. 5 Relationship of excitation signal voltage and first order side-band amplitude

从图5中可以发现激励信号电压与一阶旁瓣是成正比关系的,一阶旁瓣幅值对低频激励信号电压的变化更加敏感。但在激励信号电压高于0.8 V后,随着激励电压增加,旁瓣幅值的增加变缓。由于激励信号电压太大会带来较大的仪器非线性等系统误差,因此选择0.6~0.8 V的激励电压能够得到较好的振动声调制效果同时又保证较高的信噪比。

在实验过程中发现,低频、高频激励信号的相对加载位置也会对检测结果产生较大影响。把低频激励信号加载在铝板裂纹左侧的压电陶瓷片上,高频激励信号则分别加载于距离裂纹左侧120 mm和右侧120 mm的压电陶瓷片上,铝板上5个陶瓷片在两种情况下接收信号中一阶旁瓣幅值情况如图6所示。可以发现当高频、低频激励信号分别在裂纹两侧加载时,检测信号中一阶旁瓣非线性信号幅值更高。关于接收点3和5出现的异侧幅值大于同侧的情况,分析其原因可能是因为当处于异侧时,接收点与高频激励点的距离相对较远,所以导致幅值较同侧时偏低。

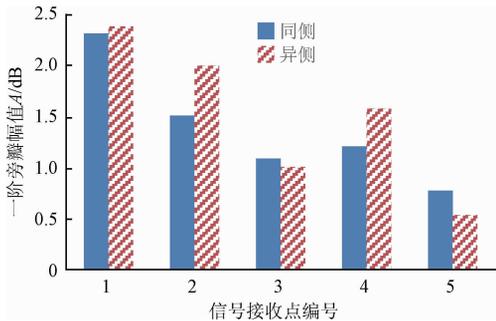


图6 激励信号相对位置与一阶旁瓣幅值关系

Fig. 6 Relationship of excitation signal relative position and the first-order side-band amplitude

3.3 非线性信号提取

由图4可知实验得到的振动声调制检测信号中包含由裂纹与激励声波相互作用产生的一阶旁瓣、谐波等多种非线性信号,以及激励声波和各种噪声。其中非线性信号非常微弱,如果直接对其进行时反研究,那么最终裂纹处的聚焦信号可能被激励声源处的聚焦信号淹没。本文采用有限长冲激响应(finite impulse response, FIR)滤波器提取检测信号中的非线性信号用于时间反转聚焦仿真。

FIR滤波器具有精确线性相位特性,但由于阶数高所以时延比较大,其延迟时间为^[16]:

$$\tau = \frac{N-1}{2} \cdot f_c \quad (13)$$

式中: N 为滤波器阶数, f_c 为采样频率。

为分析不同非线性信号的聚焦效果,分别使用带

通一带阻滤波器组合提取一阶旁瓣非线性信号,该信号的特点是信号构成简单,所含的噪声种类较少;用高通一带阻滤波器组合提取只滤除激励声波的全部非线性信号,该信号囊括了裂纹与声波作用产生的所有频率的非线性信号,但同时也包含了大部分实验中产生的噪声;两组滤波器的延时都是0.29 ms。

把铝板不同位置压电陶瓷片接收的振动声调制信号按照同步信号中正弦信号的起始时刻对调制信号进行调零。用相应的滤波器获得一阶旁瓣非线性信号和全部非线性信号,并把得到的非线性信号中 $T = [0, 0.5]$ ms时刻内的数据进行时域反转,并把各个时间反转信号幅值归一化处理,用于时间反转聚焦仿真。

4 微裂纹定位

研究表明,时间反转法不需要传播介质和换能器阵列的先验知识就能实现声波能量的自适应聚焦。把结构中的裂纹看作被动声源,通过合理选择接收信号时反发射,声波便会在裂纹位置聚焦,通过被测试件中时反声波能量的空间分布定位微裂纹。

常用的获取声波能量分布的手段是用激光测振仪扫描试件表面,获得试件上不同区域在一段时间内的声波能量平均值,并以此合成能量图像,图像中能量最强处即为裂纹位置。但这种方法难以对大型和结构复杂试件进行扫描,而且对试件的区域划分以及声波能量的平均处理还会降低检测结果的精度。

因此,本文采用有限元仿真的方法模拟非线性时间反转信号在试件中的聚焦过程。用ABAQUS有限元软件建立与实际被测体相同材料、结构和尺寸的无裂纹模型,在原信号接收点处加载时间反转信号并进行聚焦仿真。

4.1 有限元仿真设置

为避免声波在模型的边界处来回反射影响其在裂纹位置处的聚焦效果,把模型边界网格设置为CIN3D8无限单元类型。由于选取的非线性时间反转信号长度为0.5 ms,其中前0.29 ms是滤波器的延时,理论上信号会在0.21 ms时刻附近聚焦。因此仿真总体步长设为0.4 ms,分析步时间增量为 1×10^{-9} s,历程变量输出设置为10个增量步输出一个采样值,打开数据库(OBD)动画设为0.001 ms/帧。仿真完成后在ABAQUS的后处理模块观察铝板模型的云图以及模型的局部质点位移信息。

在铝板下方有一条长30 mm,宽2 mm为扩展微裂纹而制作的切槽,理论上时间反转模型应是没有微裂纹,其余结构、尺寸、材料与被测试件完全相同。但在研究中发现加载的时反信号会在切槽处发生反射、绕射等现象,在铝板云图上表现为切槽处的声波能量加强,其结果与时

反信号的聚焦效果类似。在铝板上时反加载点处加载正弦连续波后的铝板云图如图7所示,发现在切槽的尖端声波能量较大。为避免切槽的存在干扰对铝板时间反聚焦效果的判断,在铝板仿真模型上去除该切槽。

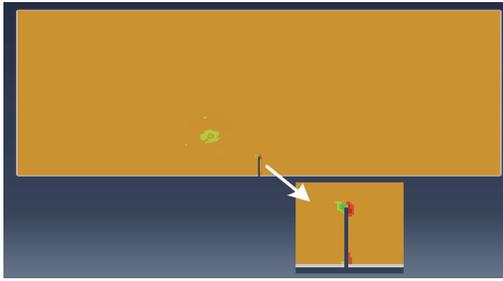


图7 有切槽铝板云图
Fig. 7 Cloud image of aluminum plate

4.2 一阶旁瓣非线性信号聚焦结果

根据文献[7,17],时反信号会在时间反转窗右边界处聚焦。但上述文献中的激励信号是窄脉冲波,可以准确确定聚焦时刻。而本实验中的激励信号持续时间较长,所以只能大致估计信号聚焦时刻。另外所用的滤波器具有0.29 ms的延时,所以时反信号应在0.21 ms时刻左右聚焦。

查看加载一阶旁瓣非线性时间反转信号的铝板云图,寻找0.21 ms时刻信号能量聚焦较为明显的位置,查询该聚焦处的质点位移信息,如图8所示。发现时反信号在 $T = [0.21, 0.23]$ ms时间段内幅值最大,信号发生了聚焦。查找这段时间里能量聚焦最深的铝板云图,如图9所示。

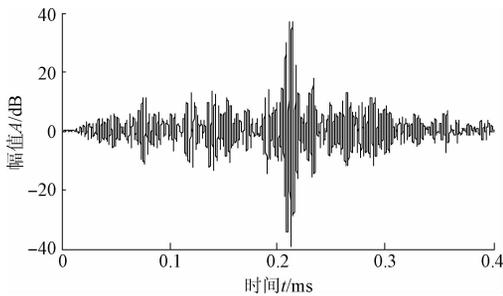


图8 一阶旁瓣非线性信号聚焦
Fig. 8 The focusing of the first order side-band nonlinear signal

从图9中可以发现时反声波在2.176 ms时刻在原铝板裂纹附近发生了聚焦,用ABAQUS的距离查询工具获得云图中聚焦像的长度为46.8 mm,距离铝板右边界260.9 mm,其误差分别为154.3%和4.5%。由于裂纹尺寸误差很大,而裂纹长度方向的位置和裂纹尺寸相关,因此本文中不讨论裂纹长度方向的位置误差。

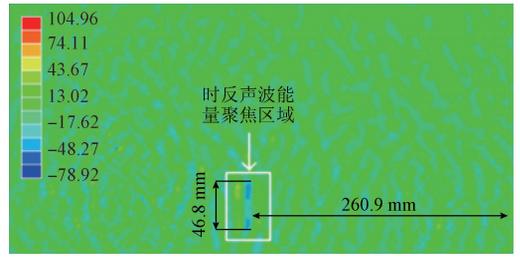


图9 一阶旁瓣非线性信号聚焦云图
Fig. 9 Cloud image of the first order side-band nonlinear signal

4.3 全部非线性信号聚焦结果

图10所示为加载全部非线性时间反转信号的铝板在0.21 ms时刻能量聚焦最深处位置处的质点位移信息,时反信号在 $T = [0.23, 0.25]$ ms时间段内幅值最大。这段时间内裂纹聚焦像能量最强的铝板云图如图11所示,图中聚焦像的长度为28.4 mm,距离铝板右边界246.4 mm,其尺寸误差和位置误差分别为54.3%和1.3%。

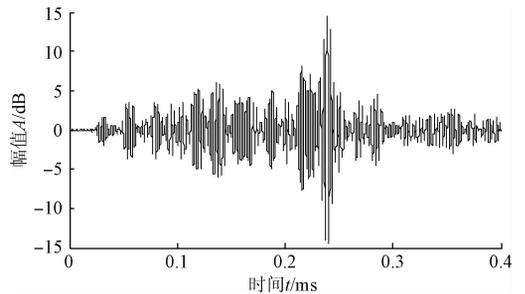


图10 全部非线性信号聚焦
Fig. 10 The focusing of all the nonlinear signal

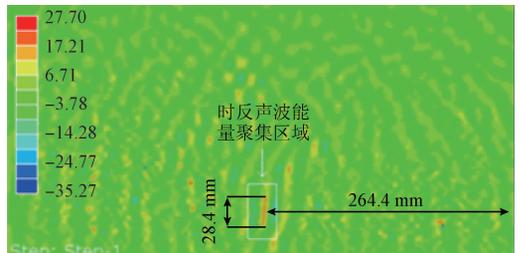


图11 全部非线性信号聚焦云图
Fig. 11 Cloud image of all the nonlinear signal

4.4 结果分析

表1所示为检测数据中的一阶旁瓣非线性信号和只滤除基波的全部非线性信号时间反转聚焦所得的聚焦像尺寸与位置结果,由表1可知:

1) 用有限元软件对非线性信号进行时间反转聚焦仿

真,所得的聚焦像的位置误差都低于5%,实现了对试件中闭合微裂纹的准确定位。

2)全部非线性信号的时间反转聚焦效果优于一阶旁瓣非线性信号。说明虽然一阶旁瓣非线性信号构成简单,所含的噪声种类较少,但由于其中的非线性信号幅值低,导致信号整体上信噪比低,因此信号时间反转聚焦后的误差要更大。

3)铝板振动声调制非线性时反信号的聚焦像尺寸远大于实际裂纹长度,分析其原因应是切槽与裂纹的连接部分截面大小变化突然,发生了应力集中,出现局部塑性区。从而产生了材料非线性,这将导致非线性时反声波在切槽端口处也发生聚焦,导致所得的裂纹聚焦像尺寸偏大。

表1 裂纹聚焦像尺寸与位置

Table 1 Size and location of the crack image

时反信号类型	裂纹参数	仿真值/mm	实际值/mm	相对误差/%
一阶旁瓣 非线性信号	尺寸	46.8	18.4	154.3
	位置	260.9	249.7	4.5
全部非线性 信号	尺寸	28.4	18.4	54.3
	位置	246.4	249.7	1.3

5 结 论

理论上分析了振动声调制技术结合时间反转法的有效性,说明振动声调制信号中的旁瓣非线性信号在时间反转后能够在裂纹位置处发生聚焦。

把实验和仿真相结合对铝板中的闭合裂纹进行检测和定位研究,发现振动声调制检测信号中出现了一阶旁瓣、谐波等多种非线性信号。分别把检测信号中的一阶旁瓣非线性信号和全部非线性信号用于时间反转聚焦仿真,发现时反信号都能在原裂纹位置附近聚焦,铝板云图上出现了裂纹聚焦像,实现了闭合微裂纹的检测和定位。

由于本文振动声调制检测信号中包含的非线性信号太微弱,导致所成的聚焦像不能与周围的杂波做明显区分。如何提高振动声调制检测效果,获得高能量的聚焦像还需进一步研究。

参考文献

[1] 周正干,刘斯明.非线性无损检测技术的研究、应用和发展[J].机械工程学报,2011,47(8):2-11.
ZHOU ZH G, LIU S M. Nonlinear ultrasonic techniques used in nondestructive testing: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 2-11.

[2] 郑慧峰,喻桑桑,王月兵,等.基于经验模态分解和奇异值分解的振动声调制信号分析方法研究[J].计量

学报,2016,37(4):398-401.

ZHENG H F, YU S S, WANG Y B, et al. Research on the analysis method of vibro-acoustic modulation signal based on EMD and SVD[J]. Acta Metrologica Sinica, 2016, 37(4):398-401.

[3] SOHN H, LIM H J, DESIMIO M P, et al. Nonlinear ultrasonic wave modulation for online fatigue crack detection[J]. Journal of Sound & Vibration, 2014, 333(5):1473-1484.

[4] 方飘飘,郑慧峰,喻桑桑,等.基于振动声调制的金属微裂纹检测方法[J].中国机械工程,2016,27(11):1497-1501.

FANG P P, ZHENG H F, YU S S, et al. Metal Micro Crack Detection Based on Vibro-acoustic Modulation Method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 27(11):1497-1501.

[5] KOBER J, PREVOROVSKY Z. Theoretical investigation of nonlinear ultrasonic wave modulation spectroscopy at crack interface[J]. Ndt & E International, 2014, 61(1):10-15.

[6] SUTIN A M, OHNSON P A. On linear elastic wave NDE II. On linear wave modulation pectroscopy and nonlinear time reversed acoustics [C]. AIP Conference Proceedings, 2005, 760(1):385-392.

[7] ULRICH T J, SUTIN A M, GUYER R A, et al. Time reversal and non-linear elastic wave spectroscopy (TR NEWS) techniques[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2008, 43(3):209-216.

[8] BAS P Y L, ULRICH T J, ANDERSON B E, et al. A high amplitude, time reversal acoustic non-contact excitation (trance)[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(1):52-6.

[9] DOS S S, PREVOROVSKY Z. Imaging of human tooth using ultrasound based chirp-coded nonlinear time reversal acoustics. [J]. Ultrasonics, 2011, 51(6):667-674.

[10] 王向红,罗智敏,毛汉领,等.裂纹长度和位置影响下声发射信号传播特性[J].仪器仪表学报,2015,36(12):2867-2873.

WANG X H, LUO ZH M, MAO H L, et al. Propagation characteristic of acoustic emission signal affected by the length and the position of cracks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12):2867-2873.

[11] 胡海峰.板状金属结构健康监测的非线性超声理论与关键技术研究[D].长沙:国防科技大学,2011:8-9.

HU H F. Research on theory and key technologies of nonlinear ultrasonics for health monitoring of plate-like metallic structures[D]. Changsha: National University of

Defense Technology, 2011:8-9.

- [12] 陈妍. 材料缺陷的超声波时间反转定位方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2009:7-13.
CHEN Y. Study on the positioning method of damaged materials with ultrasonic time reversal Techniques [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009:7-13.
- [13] 张碧星, 陆铭慧. 用时间反转法在水下波导介质中实现自适应聚焦的研究[J]. 声学学报, 2002, 27(6): 541-548.
ZHANG B X, LU M H. Study of self-focusing in underwater waveguide by time reversal method[J]. Acta Acustica, 2002, 27(6): 541-548.
- [14] 李昕, 罗更生, 李秋锋, 等. 钢板声发射时间反转聚焦增强定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1792-1799.
LI X, LUO G SH, LI Q F, et al. Location method of acoustic emission by time reversal focusing and enhancing for steelplate[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1792-1799.
- [15] 王慧军. 超声波磁流变复合抛光关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007:61.
WANG H J. Research on the key technologies of ultrasonic magnetorheological compound finishing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007:61.
- [16] 张庆杰, 袁海文. 配永磁机构的真空断路器同步分合闸控制系统设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(3): 98-103.
ZHANG Q J, YUAN H W. Design and implementation of

synchronous switching control system for vacuum breaker with permanent magnetism actuator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 98-103.

- [17] 徐庆龙. 基于时间反转 Lamb 波的典型结构检测技术研究[D]. 北京:北京工业大学, 2014:34-37
XU Q L. Reserch on typiocal structure detection technology based on time-reversal lamb waves [D]. Beijing :Beijing University of Technology, 2014:34-37.

作者简介



郑慧峰(通讯作者), 分别在 2003 年和 2009 年于浙江大学获得学士学位和博士学位, 现为中国计量大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为超声波无损检测和机器视觉检测技术。

E-mail: zjufighter@163.com

Zheng Huifeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Zhejiang University in 2003 and 2009, respectively. Now he is an associate professor and graduate supervisor in China Jiliang University. His main research interests include ultrasonic nondestructive testing and machine vision inspection.



呼刘晨, 2016 年于中国计量大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为超声波无损检测。

E-mail: 714282915@qq.com

Hu Liuchen received his B. Sc. degree in 2016 from China Jiliang University. Now he is a master student in China Jiliang University. His main research interest is ultrasonic nondestructive testing.