

金属杆内疲劳裂纹与振动/超声相互作用 及其定量表征^{*}

刘 斌¹ 刚 铁¹ 万楚豪¹ 罗志伟¹ 栾亦琳²

(1 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室 哈尔滨 150001)

(2 黑龙江科技大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150022)

2014 年 12 月 8 日收到

2015 年 4 月 8 日定稿

摘要 根据同步解调的原理, 考察振动声调制检测输出信号中的调制成分, 对金属杆内振动/超声在裂纹面上的相互作用进行了分析。制作了含有不同尺寸裂纹的铝杆试样, 以扫频激励的方式得到合适的高频激励参数, 分析输出信号中的调制信息, 发现工件中的高频超声可分为两部分: 一部分声波通过裂纹面, 受到低频振动信号的调制, 另一部分则保持不变。在此基础上对非线性调制模型进行了修正, 并提出了一种用于裂纹检测的定量方法。与超声 C 扫描检测结果对比表明, 此定量方法可用于估计金属杆中疲劳裂纹尺寸。

PACS 数: 43.25

Interaction of fatigue crack with vibration and ultrasound in metallic rod and its use for quantitative characterization

LIU Bin¹ GANG Tie¹ WAN Chuhao¹ LUO Zhiwei¹ LUAN Yilin²

(1 State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology Harbin 150001)

(2 School of Materials Science and Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology Harbin 150022)

Received Dec. 8, 2014

Revised Apr. 8, 2015

Abstract According to the principle of synchronous demodulation, the modulation information in the output signal of vibro-acoustic modulation test was investigated and the nonlinear interaction of sound and vibration on the crack interface in a metallic rod was analyzed. A swept signal excitation was used to obtain a proper high frequency parameter in the test of aluminum rod samples with different size of crack, and the modulation information in the output signal was analyzed. It was found that the ultrasound wave in the structure can be separated into two parts. One is the wave which passes through the crack interface modulated by the low frequency vibration, and other wave has no any changes. The nonlinear modulation model was modified and a quantitative method for crack detection was proposed. It is demonstrated by comparing with the ultrasonic C-scanning that this method can be used to estimate the fatigue crack size in the metallic rod.

引言

超声检测是一种重要的评价材料内部质量的无

损检验方法, 常规的线性超声检测利用超声在材料中传播产生的反射、透射或散射信号的幅度(或相位)特征评价结构质量, 可对宏观缺陷进行有效检测。但结构中缺陷尺寸较小或存在闭合裂纹等接触性缺陷

^{*} 国家自然科学基金 (51575134, 51175113, 51105033, 51205083) 资助

时,常规超声法往往难以对其进行准确评估,而非线性超声技术对结构中的闭合裂纹等微小缺陷非常敏感,因此,越来越多的研究者考虑将非线性超声技术应用到无损检测领域中^[1-3]。

振动声调制技术 (Vibro-Acoustic Modulation, VAM) 是一种非线性超声无损检测方法,它利用低频振动信号(频率为 f_1) 对高频超声信号(频率为 f_0) 的调制作用,通过监测调制边频 ($f_0 \pm n f_1$) 的幅度,可以对被测结构中的裂纹、分层、脱粘等接触性缺陷进行检测,且不受工件形状和材料的限制^[4-8]。Donskoy 利用此方法对核电管道中的管座角焊缝进行检测,通过分析调制边频的幅度,判断工件中是否存在缺陷^[9-10]。其他研究者也已将此方法应用到有机玻璃、砂岩及汽车发动机连杆的检测中^[6]。

目前,采用此方法对缺陷进行定量评估方面的研究较少,其中一个原因就是振动和超声相互作用的机理尚不明确。Sutin 等提出一个简化模型,认为低频振动引起的裂纹界面开合使通过界面的高频超声幅度产生周期性变化,即出现调制效应^[11],Donskoy 假设杆内裂纹面接触刚度正比于裂纹面应变,得到边频强度与缺陷大小之间的关系^[5]。Zaitsev 提出了基于能量损耗的调制理论,认为裂纹界面上接触区域在低频振动作用下生热,并对实际检测中观测到的较强的高次边频 ($n \geq 2$) 给出了解释^[12]。一些研究者则认为裂纹区域的力学性能既表现出经典非线性,也存在迟滞非线性,高次边频的出现是这两种非线性综合作用的结果^[4,13-14]。国内的胡海峰利用希尔伯特-黄变换对输出信号的瞬时特征进行分析,认为其中同时存在幅度调制和频率调制两种作用模式^[15]。

另外一个原因则是调制效应强度对高频激励频率的变化非常敏感,因此需要用多次测量的方法获取不同高频激励频率下的调制强度,以得到稳定可靠的检测结果^[5]。Duffour 认为要得到最佳激励频率,高频选取需覆盖较大范围^[16]。为提高检测效率,Yoder 提出了一种扫频激励方法,以线性扫频信号作为高频激励,利用时频分析方法对接收信号进行处理,此方法可对整个高频扫查范围内的调制强度进行检测,快速得到调制效应较强时对应的高频激励频率,从而避免了传统激励方式下的多次测量过程^[17]。

本文在前述工作基础上,根据同步解调原理和已有非线性调制模型,分析输出信号的特征,对金属杆内疲劳裂纹与振动/超声之间的非线性相互作用进行研究。制作了含有不同尺寸裂纹的金属铝杆,以扫频方法得到合适的高频激励参数,分析其输出信号中的调制信息,修正了原有的振动/超声在裂纹面

上的相互作用模型,并在此基础上提出了一种定量方法估测裂纹尺寸。

1 实验原理及方法

1.1 实验设置

振动声调制技术需要在工件中激发两列信号:低频振动和高频超声。本文中选用 HEV-20 型电磁激励器进行低频激励,激励幅度通过低频放大器输出电流控制,实验中选用低频激励电流均为 1 A。高频激励一般采用频率为几十至几百 kHz 的连续超声,本文采用 PZT 压电晶片激励,晶片直径为 15 mm,厚 4 mm,通过粘接方式耦合到工件上。高频激励信号由 Rigol DG3061A 信号发生器产生,直接驱动晶片工作,本文中激励电压均选择 20 V_{pp}。采用 Rigol DS1102E 示波器接收并实时观测信号,检测平台示意图如图 1。

制作了 4 个杆状试样,其材料为 2024 铝合金,直径为 20 mm,长 200 mm。1# 试样为参考试样,不含人工缺陷。2#~4# 为缺陷试样,分别利用三点弯曲疲劳方法在其中心制作了尺寸不等的疲劳裂纹。

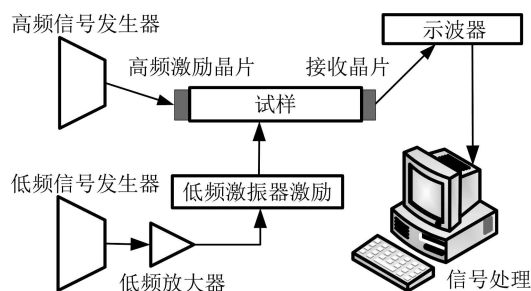


图 1 实验设置

1.2 信号激励与接收

调制效应受低频和高频激励频率的影响较大,要观测到明显的调制效应,应选择合适的低频及高频激励频率。研究表明,低频频率的选择与结构的低频振动模态有关,当低频激励频率接近于结构某一模态共振频率时,调制效应较强^[5]。实验中铝杆自由放置,激励器固定在铝杆端部,低频激励方向与铝杆轴向垂直。在 0~3 kHz 范围内,当低频激励频率在 1.5 kHz 和 1.8 kHz 附近时,结构响应出现较强峰值。而选择 1.5 kHz 时,接收信号中调制效应较强,因此本文中低频激励频率选择 1.5 kHz。

调制效应受高频激励频率的影响更显著,但其原因目前还未有一致的观点,其选择多依赖于先验结果,取调制效应最强时对应的高频频率为激励频率。为提高检测效率,本文中采用 Yoder 提出的扫频激励方式,信号发生器产生扫频范围为 50~150 kHz,

扫频时间为 1 s, 驱动电压为 20 V_{pp} 的扫频信号, 直接施加到高频晶片上。此激励下输出信号由一个 LabVIEW 程序进行处理。首先, 在不施加低频激励的情况下, 得到系统在 50~150 kHz 范围内的高频频响曲线。然后施加低频振动, 对接收到的信号进行高通滤波, 将其中的高频部分分离出来, 再利用同步解调法从中提取调制信息^[18]。由于调制强度与通过工件的高频信号幅度成正比, 因此提取过程中需要利用高频频响曲线对输出信号进行归一化处理^[6]。最后, 对归一化之后的调制信息进行短时傅里叶变换, 即可对检测结果进行分析, 从而快速得到合适的高频激励频率。

2 非线性调制作用模型

Donskoy 提出了含裂纹固体杆内的非线性调制模型^[5], 如图 2 所示, 其中 L 为杆长, H 为杆件等效直径, x 为杆件轴向, z 为杆件径向。此模型中, 低频振动信号可表示为:

$$u(t) = U \cos \Omega t, \quad (1)$$

高频超声信号为:

$$v(t) = V \cos \omega t, \quad (2)$$

其中 U 为低频振动幅度, V 为高频超声幅度, $\Omega = 2\pi f_1$, $\omega = 2\pi f_0$ 。

Donskoy 认为裂纹面接触刚度 K 正比于裂纹面应变 ξ :

$$K = K_0 + \alpha \xi, \quad (3)$$

其中 K_0 为裂纹面初始接触刚度, α 为非线性系数, 且 $\alpha \xi \ll K_0$ 。受低频振动的影响, 此刚度随时间呈周期性变化, 从而使杆内超声整体受到调制。根据以上假设, Donskoy 推导出一次边频幅度的表达式为:

$$U_3 \propto s \alpha D^2 UV, \quad (4)$$

其中 U_3 为一次边频幅度, s 为裂纹面积, D 为等效裂纹厚度。

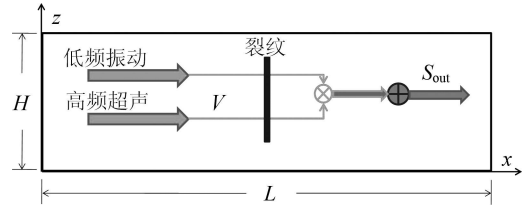


图 2 含裂纹杆调制模型^[5]

本文以此调制模型为基础, 从输出信号角度研究振动/超声在杆内的相互作用。实际检测发现, 当试样中存在缺陷时, 输出信号频谱中有较强的高次边频出现, 这表明其中不仅仅存在幅度调制作用。

胡海峰等利用希尔伯特-黄变换对输出信号进行解调分析发现, 低频振动与高频超声之间不仅存在幅度调制, 也存在频率调制^[15], 因此输出信号可表示为:

$$S_{\text{out}} = V_0(1 + m_a \cos \Omega t) \cos(\omega t + m_f \sin \Omega t) + U' \cos \Omega t \dots \quad (5)$$

其中 V_0 为接收信号中受调制高频幅度, m_a , m_f 分别为幅度和频率调制指数。显然调制信息包含在高频部分 $V_0(1 + m_a \cos \Omega t) \cos(\omega t + m_f \sin \Omega t)$ 中, 对其进行同步解调, 即乘以参考信号 $\cos \omega t$ 可得:

$$\begin{aligned} & V_0(1 + m_a \cos \Omega t) \cos(\omega t + m_f \sin \Omega t) \cos \omega t = \\ & V_0 \cos(\omega t + m_f \sin \Omega t) \cos \omega t + V_0 m_a \cos \Omega t \cos(\omega t + m_f \sin \Omega t) \cos \omega t = \\ & V_0 \cos^2 \omega t \cos(m_f \sin \Omega t) - V_0 \cos \omega t \sin \omega t \sin(m_f \sin \Omega t) + \\ & m_a V_0 \cos^2 \omega t \cos(m_f \sin \Omega t) \cos \Omega t - V_0 m_a \cos \omega t \cos \Omega t \sin \omega t \sin(m_f \sin \Omega t) = \\ & \frac{V_0}{2} \cos(m_f \sin \Omega t) + \frac{V_0}{2} m_a \cos \Omega t \cos(m_f \sin \Omega t) + \\ & \frac{V_0}{2} \cos 2\omega t \cos(m_f \sin \Omega t) + \frac{V_0}{2} m_a \cos 2\omega t \cos \Omega t \cos(m_f \sin \Omega t) - \\ & \frac{V_0}{2} \sin 2\omega t \sin(m_f \sin \Omega t) - \frac{V_0}{2} m_a \cos \Omega t \sin 2\omega t \sin(m_f \sin \Omega t) + \dots \end{aligned} \quad (6)$$

此时调制信息被解调到低频, 对其进行低通滤波可得调制信息 S_{SD} , 即式 (6) 中的前 2 项:

$$\begin{aligned}
S_{SD} = & \frac{V_0}{2} \cos(m_f \sin \Omega t) + \frac{V_0}{2} m_a \cos \Omega t \cos(m_f \sin \Omega t) = \\
& \frac{V_0}{2} J_0(m_f) + \frac{V_0}{2} m_a [J_0(m_f) + J_2(m_f)] \cos \Omega t + V_0 J_2(m_f) \cos 2\Omega t + \\
& \frac{V_0}{2} m_a [J_2(m_f) + J_4(m_f)] \cos 3\Omega t + V_0 J_4(m_f) \cos 4\Omega t + \dots,
\end{aligned} \quad (7)$$

其中 $J_i(m_f)$ 为第一类贝塞尔函数 ($i = 1, 2, 3, \dots$), 用于对式 (7) 中的嵌套三角函数进行展开^[19]。此时调制信息表现为低频振动及其各次谐波频率上的信号成分 (即第 2 项及其之后的部分), 将其分别定义为 $S_{D1}, S_{D2}, S_{D3}, S_{D4}, \dots$ 。而直流分量 (第 1 项) 则被定义为 S_{D0} 。

观察式 (7) 可以发现, 调制指数 m_a 和 m_f 可通过 $S_{Dj} (j = 1, 2, 3, \dots)$ 得到:

$$m_a = \frac{2S_{D3}}{S_{D2} + S_{D4}}, \quad (8)$$

$$\frac{J_0(m_f)}{J_2(m_f)} = \frac{2S_{D1} - m_a S_{D2}}{2S_{D3} - m_a S_{D4}}, \quad (9)$$

$$V_0 = \frac{2S_{D1}}{m_a [J_0(m_f) + J_2(m_f)]}. \quad (10)$$

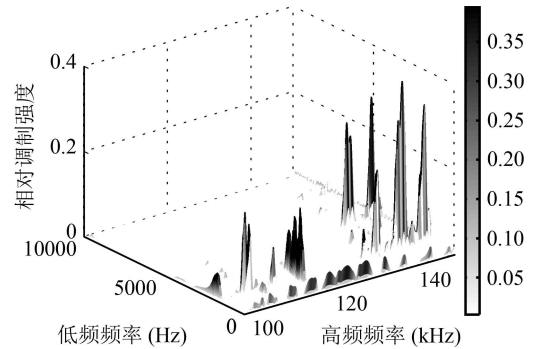
根据式 (8) — 式 (10) 计算得到调制指数 m_a 和 m_f , 即可对结构内振动与超声相互作用进行更准确的分析, 并在此基础上对其内部质量进行定量评价。

3 实验结果与讨论

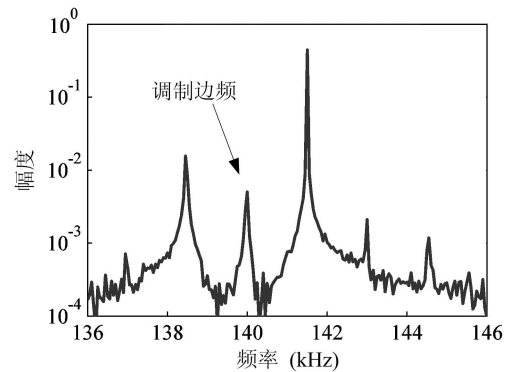
3.1 高频激励频率的选择

本文以 2# 试样为例, 说明高频超声激励频率的选择过程。图 3(a) 为 2# 试样在扫频激励下检测结果, 以时频图的形式表示, 此时调制效应表现为时频图中对应高频 (x 轴) 和低频 (y 轴) 坐标处的能量强弱 (z 轴)。由于检测中低频激励频率保持不变, 因此调制信息分布应与横轴平行。调制效应受激励高频影响, 表现为调制能量强度沿高频分布不均匀, 要得到显著的调制效果, 激励频率应选择较高调制能量强度对应的高频频率。本文中 2# 试样选择的高频激励频率为 141.5 kHz, 图 3(b) 为 2# 试样在此高频激励下的接收信号频谱。根据此方法, 1#, 3# 和 4#

铝杆试样所选择的高频频率分别为 116 kHz, 94 kHz 和 112 kHz。



(a) 高频扫频激励



(b) 高频单频激励 ($f_0 = 141.5$ kHz)

图 3 铝杆 2# 试样 VAM 检测结果

3.2 检测结果分析

图 4 为铝杆试样在各自最佳激励频率下输出信号同步解调结果, 同步解调前先对输出信号进行高通滤波以去除低频振动的影响, 依次测量其 $S_{D0} \sim S_{D4}$ 幅值并计算调制指数 m_a 和 m_f 。

由图 4 测得的 $S_{D0} \sim S_{D4}$ 幅值及由此计算得到的原高频声波幅度 V_0 如表 1 所示, 其中 $S_{D00} = J_0(m_f)V_0/2$ 。由表可知, $S_{D00} < S_{D0}$, 即 S_{D0} 中不仅仅只包括受调制的高频声波 V_0 相关信息。

表 1 同步解调信号测量及调制指数计算结果

试样	S_{D0}	S_{D1}	S_{D2}	S_{D3}	S_{D4}	m_a	m_f	V_0	S_{D00}
1#	4.673	0.03659	0.001782	0.0004582	0.0004839	0.4044	0.28	0.1827	0.0896
2#	0.09182	0.0008884	0.003371	0.0003112	0.0002629	0.1713	1.527	0.0141	0.0035
3#	3.583	0.05246	0.01312	0.0008418	0.00478	0.0941	0.306	1.1287	0.5512
4#	0.3939	0.06706	0.02104	0.003788	0.01069	0.2388	0.544	0.583	0.2703

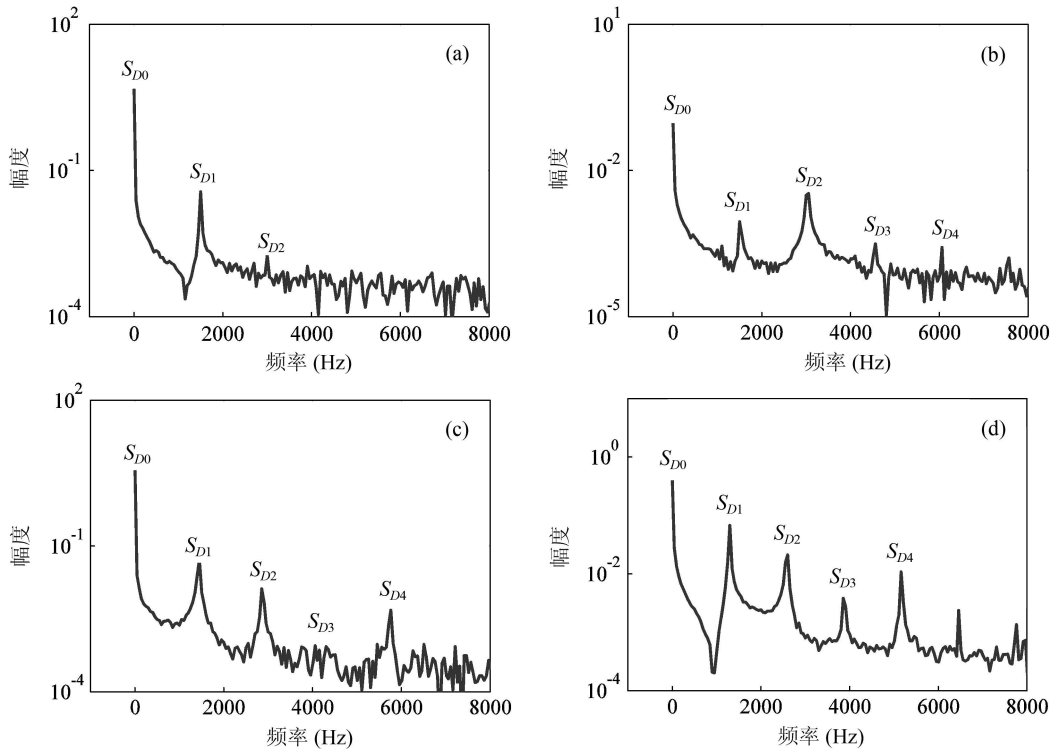


图 4 铝杆试样接收信号同步解调结果 ((a) #1; (b) #2; (c) #3; (d) #4)

4 调制模型修正及缺陷定量研究

4.1 裂纹杆的修正调制模型

由于本实验在同步解调处理前已将接收信号中的低频振动信号去除, 根据同步解调原理, S_{D0} 中的能量只能来自于接收信号中频率为 $\omega = 2\pi f_0$ 的高频项。根据式 (6) — 式 (10), 金属杆中参与调制的高频声幅应等于表 1 中计算得到的 V_0 , 若通过杆中的高频声波均参与调制, 则随后计算得到的直流分量 S_{D00} 应与实际所测 S_{D0} 相等, 而表 1 中, 对所有试样均有 $S_{D00} < S_{D0}$, 即接收信号中的频率为 $\omega = 2\pi f_0$ 的高频项不仅包含参与调制的声波信息 (V_0)。综上推断, 金属杆中的高频声波分为两部分: 一部分通过缺陷区域与低频振动相互作用 (V_0), 另一部分则不受低频调制 (V_1), 两部分信号均通过接收晶片输出, 如图 5 所示。

根据图 5 所示模型, 接收信号应表示为:

$$S'_{out} = V_0(1 + m_a \cos \Omega t) \cos(\omega t + m_f \sin \Omega t) + V_1 \cos \omega t + U' \cos \Omega t \dots \quad (11)$$

对其高频项同步解调, 其直流分量为:

$$S'_{D0} = \frac{V_0}{2} J_0(m_f) + \frac{V_1}{2} \quad (12)$$

由式 (12) 可知, 直流分量 S'_{D0} 中包含受调制高频 V_0 和未调制高频 V_1 信息。

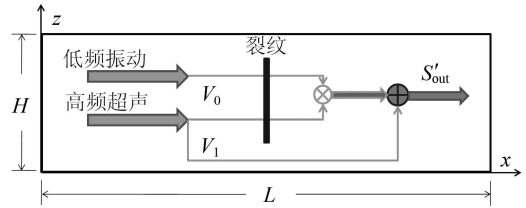
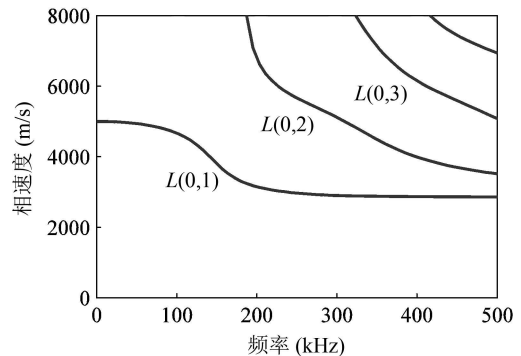


图 5 含裂纹杆修正调制模型

4.2 杆中高频声场分析

本实验中缺陷均为单个疲劳裂纹, 因此杆中裂纹面积越大, 受调制声波 (V_0) 占杆中声波 (约为 $V_0 + V_1$) 比例越大, 在此情况下, 结合高频超声在铝杆横截面上的能量分布, 即可对缺陷尺寸进行定量估计。本实验中铝杆直径为 20 mm, 由其频散曲线 (图 6) 可知, 在本文所选择的高频频率范围内, 声波在铝杆中以 $L(0,1)$ 导波形式传播, 此时声波波长大于杆件直径, 推测超声能量在铝杆横截面上近似均匀分布。

图 6 $\Phi 20$ mm 铝杆相速度频散曲线 (纵向模式)

为进一步确定高频声波能量在铝杆横截面上的分布情况,本实验中利用 LS-DYNA 软件模拟铝杆中高频超声的传播行为,图 7 为其仿真结果。其中激励信号在端面激励,方向沿杆轴向,采用连续单频

正弦波激励,频率为 120 kHz,仿真时间为 10 ms,如图 7(a)。观察声波在铝杆中的传播过程,如图 7(b),可发现超声能量在杆中以近似平面波的形式向前传播。在对侧端面中心至边缘分别取 3 个观测点,依次为 A、B 和 C,接收其轴向位移信号,如图 7(c),可知经过很短一段时间(约 1 ms)后,此 3 点位移信号即达到一定幅值并不再变化,因此可认为在实际检测过程中,高频声场不随时间变化。图 7(d)为声场稳定后各点的输出信号(取 4.92~5.00 ms),可以发现中心位置振幅最高,边缘处最低,但均在同一数量级内,且差别小于两倍;同时此 3 点所得信号在相位上同步。因此认为高频声波能量在铝杆横截面上可近似为均匀分布,从而简化定量计算过程。

4.3 定量检测研究

在上述分析基础上,本文提出一种对缺陷进行定量计算的方法。在修正后的模型中,声波能量在铝杆横截面上近似均匀分布,因此裂纹面积与铝杆横截面积之比可认为是通过缺陷区域的声波幅度(V_0)与杆中声波总幅度(约为 $V_0 + V_1$)之比:

$$DI = \frac{S_0}{S} \approx \frac{V_0}{V_0 + V_1}, \tag{13}$$

其中 S_0 为裂纹面积, S 为铝杆横截面面积,式中未调制高频幅度 V_1 由下式得到:

$$V_1 = 2S'D_0 - V_0J_0(m_f). \tag{14}$$

由此计算得到 V_0 , V_1 及 DI 如表 2 所示。

表 2 铝杆试样 VAM 定量结果

试样	V_0	V_1	DI
1#	0.1827	9.1688	1.95%
2#	0.0141	0.1766	7.39%
3#	1.1287	6.0636	15.69%
4#	0.583	0.2471	70.23%

为验证此方法准确性,将铝杆试样在靠近裂纹处截断,利用超声 C 扫描方法检测裂纹大小。实验中采用的仪器是美国物理声学公司的水浸聚焦超声 C 扫描检测系统,探头中心频率为 20 MHz,检测图像如图 8 所示。利用 MATLAB 计算回波幅度较高区域面积与铝杆横截面积之比,可得铝杆试样内部裂纹面积占总截面积之比依次约为 0%, 5%, 19% 和 70%,与表 2 结果对比表明,本文提出的定量方法可较准确地估计结构内部裂纹尺寸,也进一步证实了修正模型的准确性。

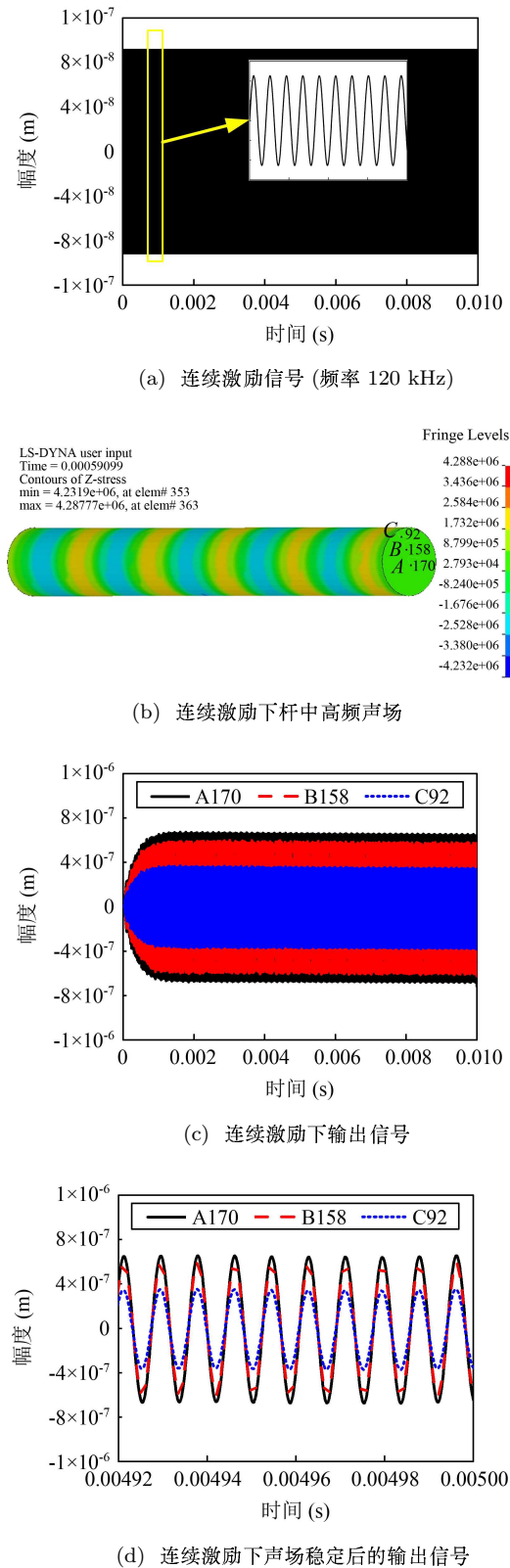


图 7 连续激励下杆中高频声场模拟

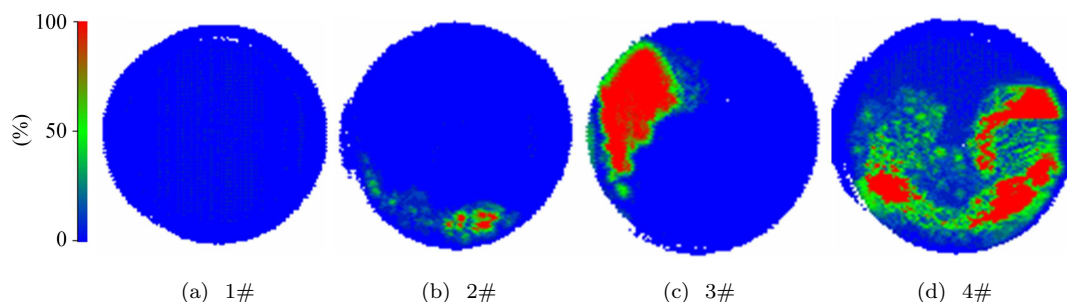


图 8 铝杆试样超声 C 扫描检测图像

5 结论

(1) 根据同步解调原理, 分析了振动声调制检测中低频振动与高频超声信号在裂纹界面上的相互作用。考察实际检测时接收信号中的调制信息, 发现通过工件的高频超声可分为两部分, 其中一部分在裂纹界面上与低频振动信号相互作用, 另一部分则不参与调制作用, 并在此基础上修正了原有的调制模型。

(2) 根据修正的调制模型, 提出一种新的裂纹尺寸定量方法, 即在高频超声能量近似均匀分布的条件下, 裂纹面积与铝杆横截面积之比可认为是通过缺陷区域的声波幅度 (V_0) 与杆中声波总幅度 (约为 $V_0 + V_1$) 之比。与超声 C 扫描结果对比表明, 此方法可较准确地估计结构内部裂纹尺寸, 也进一步证实了修正模型的准确性。

(3) 此定量方法目前仅适用于简单形状构件 (杆件等), 对复杂结构内部缺陷定量还需要进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Jhang K Y. Nonlinear ultrasonic techniques for non-destructive assessment of micro damage in material: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009; **10**(1): 123—135
- 2 吴斌, 颜丙生, 李佳锐等. 镁合金疲劳早期非线性超声在线检测实验研究. *声学学报*, 2011; **36**(5): 527—533
- 3 陈振华, 史耀武, 赵海燕等. 微小缺陷的非线性超声检测及其成像技术. *声学学报*, 2010; **35**(1): 9—13
- 4 Van Den Abeele K E, Sutin A, Carmeliet J *et al.* Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS). *NDT & E International*, 2001; **34**(4): 239—248
- 5 Donskoy D, Sutin A, Ekimov A. Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing. *NDT & E International*, 2001; **34**(4): 231—238
- 6 Van Den Abeele K E, Johnson P A, Sutin A. Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, part I: Nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS). *Research in Nondestructive Evaluation*, 2000; **12**(1): 17—30
- 7 焦敬品, 何存富, 吴斌等. 接触缺陷的振动调制超声导波检测技术研究. *声学学报*, 2009; **34**(3): 242—248
- 8 焦敬品, 孙俊俊, 吴斌, 等. 结构微裂纹混频非线性超声检测方法研究. *声学学报*, 2013; **38**(6): 648—656
- 9 Zagari A, Donskoy D, Lottiaux J L. N-Scan[®]: New vibro-modulation system for crack detection, monitoring and characterization. In: Thompson, DO, Chimenti DE ed. *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*, 30th Annual review of progress in quantitative non-destructive evaluation, Green Bay, WI, 2003, NY USA: AMER INST PHYSICS, 2004: 1414—1421
- 10 Donskoy D, Ekimov A, Luzzato E *et al.* N-Scan[®]: New vibro-modulation system for detection and monitoring of cracks and other contact-type defects. In: Liu, SC ed. *Proceedings of the society of photo-optical instrumentation engineers (SPIE), Smart Structures and Materials 2003 Conference*, SAN DIEGO, CA, 2003, WA USA: SPIE-INT SOC OPTICAL ENGINEERING, 2003: 400—409
- 11 Sutin A M, Johnson P A. Nonlinear elastic wave NDE II: Nonlinear wave modulation spectroscopy and nonlinear time reversed acoustics. *AIP Conference Proceedings*, 2005; **760**(1): 385—392
- 12 Zaitsev V, Sas P. Nonlinear response of a weakly damaged metal sample: A dissipative modulation mechanism of vibro-acoustic interaction. *Journal of Vibration and Control*, 2000; **6**(6): 803—822
- 13 Meo M, Polimeno U, Zumpano G. Detecting damage in composite material using nonlinear elastic wave spectroscopy methods. *Applied Composite Materials*, 2008; **15**(3): 115—126
- 14 Kober J, Prevorsevsky Z. Theoretical investigation of nonlinear ultrasonic wave modulation spectroscopy at crack interface. *NDT & E International*, 2014; **61**: 10—15
- 15 Hu H F, Staszewski W J, Hu N Q *et al.* Crack detection using nonlinear acoustics and piezoceramic transducers—instantaneous amplitude and frequency analysis. *Smart Materials & Structures*, 2010; **19**(6): 1—10
- 16 Duffour P, Morbidini M, Cawley P. A study of the vibro-acoustic modulation technique for the detection of cracks in metals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006; **119**(3): 1463—1475
- 17 Yoder N C, Adams D E. Vibro-acoustic modulation utilizing a swept probing signal for robust crack detection. *Structural Health Monitoring*, 2010; **9**(3): 257—267

18 Sohn H, Lim H J, DeSimio M P *et al.* Nonlinear ultrasonic wave modulation for online fatigue crack detection. *Journal of Sound and Vibration*, 2014; **333**(5): 1473—1484

19 林为干. 贝塞尔函数的近似计算在调频制中的应用. *物理学报*, 1955; **11**(5): 411—419

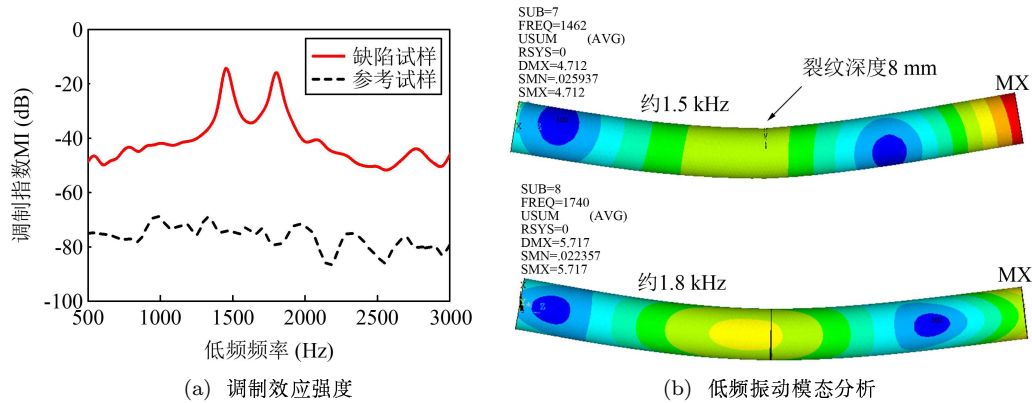
附录：关于低频激励频率的选择

不同低频激励频率下调制效应强度变化如附录图 1(a)所示，测试试件为 Φ20 mm 铝杆，长 200 mm，缺陷试样铝杆中间有一预制疲劳裂纹，深约 8 mm，参考试样不含裂纹。实验中低频放大器电流均为 1 A，高频采用单频正弦波连续激励，频率为 112 kHz，激励电压 20 Vpp。图中调制效应强度 (MI) 定义为调制边频 ($f_0 \pm f_1$) 与主频 (f_0) 幅度之比：

$$MI = 20 \lg \frac{A_{m-n} + A_{m+n}}{2A_m},$$

其中 A_m 为高频信号 (f_0) 幅度， $A_{m \pm n}$ 为调制边频 ($f_0 \pm f_1$) 幅度。实线表示含裂纹试样测试结果，由图可知，低频激励频率在 1.5 kHz 和 1.8 kHz 附近时，调制效应显著增强。

对此状态下含裂纹铝杆利用 ANSYS 进行低频模态分析，激励器连接在铝杆左端，为简化分析，此时以 0.1 kg (激励器可动部件 0.06 kg+ 夹具 0.04 kg) 的集中质量表示，而铝杆中部的疲劳裂纹则以深 8 mm，宽 0.2 mm 的切槽表示。模拟结果如附录图 1(b) 所示，1.5 kHz 和 1.8 kHz 均为铝杆在此状态下的一阶弯曲模态频率，而激励频率在 1.5 kHz 附近时，其振动方向能使裂纹面充分开合，调制效应更明显。因此本文中选取此频率为低频激励频率。



附录图 1 不同低频激励频率下调制效应强度变化