DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905119

基于同步压缩变换的临界折射纵波波速精确测量*

张 闯[1,2],王 标[1,2],刘素贞[1,2],杨庆新[1]
(1. 河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300130;
2. 河北工业大学 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室 天津 300130)

摘 要:基于声弹性效应,采用临界折射纵波检测金属材料的残余应力有较为广泛的应用前景。然而临界折射纵波速对应力的声弹性效应较弱,这很大程度上影响了材料应力检测的分辨率。为了提高临界折射纵波波速检测精度,提出一种非线性分解技术(同步压缩变换)对临界折射纵波进行波形变换与重构,精确计算超声到达时刻。以 1 060 铝板为研究对象,基于有限元仿真软件分析了铝板中临界折射纵波的波形特性,以此为依据调节实验中的超声波信号从而提高实验中临界折射纵波的波形准确性。实验精确测量临界折射纵波在 1 060 铝板中的传播时间,并计算了铝板中的波速,误差不超过 0.05%。实验结果验证了提出的临界折射纵波波速精确计算方法的有效性。

关键词: 临界折射纵波;超声波波速;同步压缩变换;有限元仿真
中图分类号: TB553 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 470.40

Accurate measurement of critical refracting longitudinal wave velocity based on wavelet synchrosqueezed transform

Zhang Chuang[1,2], Wang Biao[1,2], Liu Suzhen[1,2], Yang Qingxin[1]
(*1.State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2.Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China*)

Abstract: Based on the acoustic elastic effect, the utilization of critical refracting longitudinal waves to detect the residual stress of metal materials has a wide application prospect. However, the critical refracting longitudinal wave velocity has a weak acoustic elastic effect on stress, which greatly affects the resolution of material stress detection. To improve the detection accuracy of the critical refracting longitudinal wave velocity, a nonlinear decomposition technique (wavelet synchrosqueezed transform) is proposed to transform and reconstruct the critical refracting longitudinal wave. In this way, the ultrasonic arrival time can be calculated accurately. Taking the 1 060 aluminum plate as the research object, the waveform features of critical refracting longitudinal wave are analyzed based on the finite element simulation software. Based on these features, the ultrasonic signals in the experiment are adjusted to improve the waveform accuracy of the critical refracting longitudinal wave. Experimental results show that the propagation time of the critically refracted longitudinal wave in the 1 060 aluminum plate can be accurately measured, and the wave velocity is calculated with an error of no more than 0.05%. The validity of the accurate calculation method of critical refracting longitudinal wave velocity is verified.

Keywords: critical refracting longitudinal wave; ultrasonic wave velocity; wavelet synchrosqueezed transform; finite element simulation

0 引 言

金属材料在各种工程结构中应用十分广泛,研究和检测金属材料内的应力对生产和科学试验都有非常重要的意义[1-3]。残余应力的存在不仅会降低工件静强度和疲劳强度,使其在制造和使用时产生变形和开裂等工艺缺陷,而且在制造后的自然释放过程中使材料的抗腐蚀

收稿日期:2019-05-10 Received Date:2019-05-10
* 基金项目:国家自然科学基金(51777052)、河北省自然科学基金(E2017202055)、天津市自然科学基金 (16JCYBJC19000)、河北省高校科研重点项目(ZD2018214)资助。

能力受到影响[4-5]，因此在役金属结构的力学行为特性及历史演化规律是材料服役状态和寿命评估的重要依据，研究金属应力在役表征方法，是国内外无损评估与结构健康监测领域的主要发展方向之一。

残余应力的无损检测技术发展较为迅速。其中超声应力检测是基于声弹性效应，通过检测被测样件中超声波的波速并根据应力与波速的对应关系来计算试件中的残余应力，该检测方法由于其适用范围广、经济高效以及透射深度大而得到广泛关注[6]。在超声应力无损检测技术中，采用临界折射纵波（critical refracting longitudinal wave，L_{CR}）检测残余应力目前最受欢迎，原因在于与其他超声波比较，临界折射纵波随应力的变化其波速变化最为灵敏[7-8]。尽管如此，超声波对应力的声弹性效应依然很小，研究表明对于铝合金 100 MPa 的应力引起超声波传播速度变化约为 0.1%，对于钢，100 MPa 应力引起的声速变化甚至只有 0.001%[9]。Bray 等[10]也发现当应力值波动范围不超过 26 MPa 时，L_{CR} 波的波速或者传播时间的变化不明显。因此，对 L_{CR} 波波速的精确测量将有利于提高超声应力检测的分辨率。

如前所述，L_{CR} 波的波速精确测量将决定材料应力检测的精度。L_{CR} 波波速主要是通过检测不同传播距离的声时差间接计算波速，所以对接收到的 L_{CR} 信号做时延估计非常关键。传统的时延估计方法主要有动态阈值法[11]、互相关函数法[12]以及倒谱域时延估计法[13]等。动态阈值法把超声信号幅值超过预设幅值后第 1 个过 0 点所对应的时间作为超声到达时刻。实际中被测材料内部应力分布不均匀，L_{CR} 波波形信号不仅幅值会发生变化而且波形信号特征也会发生变化[14]，因此动态阈值法不适用 L_{CR} 波声时差的精确计算。互相关函数法适用于固定距离下 L_{CR} 波传播时间随被测材料内部应力变化的声时差的计算，适合材料声弹性系数标定时测量波速的变化量。对于 L_{CR} 波波速值的测量，由于 L_{CR} 波在压电探头内的传播时间一般难以测量，因此通常采用挪动压电探头的间距，测量不同间距下的 L_{CR} 波的传播时间差值，从而计算其波速，不同间距下 L_{CR} 波的波形特征可能会发生变化，这必然会给互相关算法计算结果造成误差。倒谱域时延估计方法适用于低信噪比信号，对于高信噪比信号的处理则较为复杂，而一般 L_{CR} 波的波形信号特征比较明显，信噪比高。近年来，针对超声信号波在传播介质中受到介质内部结构的影响使得回波信号与其他波形信号无法区分的问题，无损检测技术也常采用波形分解技术来检测超声到达时刻，例如传统的正交调节技术、合成孔径聚焦技术、经验模态分解技术以及多个技术的组合方法等[15-16]。为了能够精确提取 L_{CR} 波的超声到达时刻，本文提出使用同步压缩变换（wavelet synchrosqueezed transform，SST）对 L_{CR} 波信号进行波形变换并进行重排。同步压缩变换是一种非线性分解技术，充分利用了经验模态分解技术的原理和优点，但是其比 EMD 技术更具鲁棒性[17]。同步压缩变化基本不受 L_{CR} 波波形特征变化的影响，能够精确地检测 L_{CR} 波的传播时间。

本文根据 Snell 定理调节压电探头的超声波入射角度和接收角度，从而发射和接收 L_{CR} 波，因此为了保证压电探头发射的 L_{CR} 波波形正确，本文利用有限元仿真软件仿真分析了 L_{CR} 波的波形特征，将其作为实验中判断 L_{CR} 波形正确性的参考信号图。其次，以 1 060 铝板为研究样本，采用可调角度的压电探头发射和接收在被测铝板中传播的 L_{CR} 波，利用 SST 计算不同探头间距的 L_{CR} 波的超声到达时刻，从而精确计算 L_{CR} 波在被测铝板中的传播速度。

1 L_{CR} 波传播特性的有限元仿真

如图 1 所示，超声纵波从一种介质入射至另一种介质时，将会在另一种介质中出现折射纵波与横波。根据 Snell 定理[18]有：

$$\frac{\sin\alpha}{c_1}=\frac{\sin\beta}{c_2}=\frac{\sin\beta_1}{c_3} \tag{1}$$

式中：α 为入射角；β 为纵波折射角；β_1 为横波折射角；c_1 为入射波在第一介质中的传播速度；c_2 为纵波在第二介质中传播速度；c_3 为横波在第二介质中传播速度。当介质 A 中纵波波速 c_1 小于介质 B 中的纵波波速 c_2，根据式（1）得折射纵波的折射角 β 大于入射纵波的入射角 α，当 α 增大时 β 也跟随着增大。当 α 达到某一角度时 β 正好为 90°，此时在介质中传播的波为临界折射纵波即 L_{CR} 波，α 叫做第一临界角。第一临界角 α 为：

$$\alpha=\sin^{-1}\left(\frac{c_1}{c_2}\right) \tag{2}$$

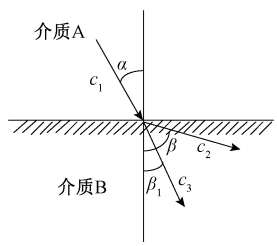


图 1 波在不同介质传播过程中发生折射

Fig.1 Refraction of waves during propagation in different media

基于 Snell 定理，利用有限元仿真软件模拟 L_{CR} 波的传播过程，二维仿真模型如图 2 所示。有机玻璃材料中的纵波波速为 3 032.4 m/s，铝板中的纵波波速为 6 458.4 m/s，因此为了能够在铝板中产生 L_{CR} 波，将压电片倾斜角 γ 设置为 27.6°。考虑到实验所用铝板较薄，来

自铝板底部的反射波较多,不利于观察 L_{CR} 波的传播过程,所以将铝板厚度值设置较大(可视为半无限大空间)从而避免来自铝板底部的反射波与 L_{CR} 波混合,这样便于辨识 L_{CR} 波。对压电片施加激励使其振动从而在有机玻璃材料中激发出纵波,该激励函数为:

$$\begin{cases} f(t) = 1\,000 \times \sin(2\pi \times 2.5 \times 10^6 \times t) \\ \qquad 0 \leqslant t \leqslant 0.4\ \mu s \\ f(t) = 0 \qquad 0.4\ \mu s < t \end{cases} \tag{3}$$

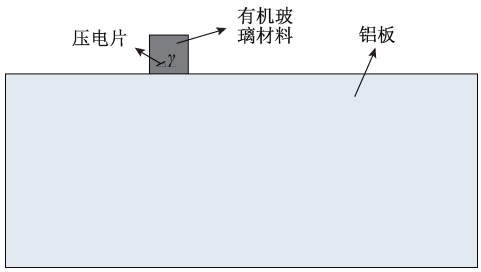
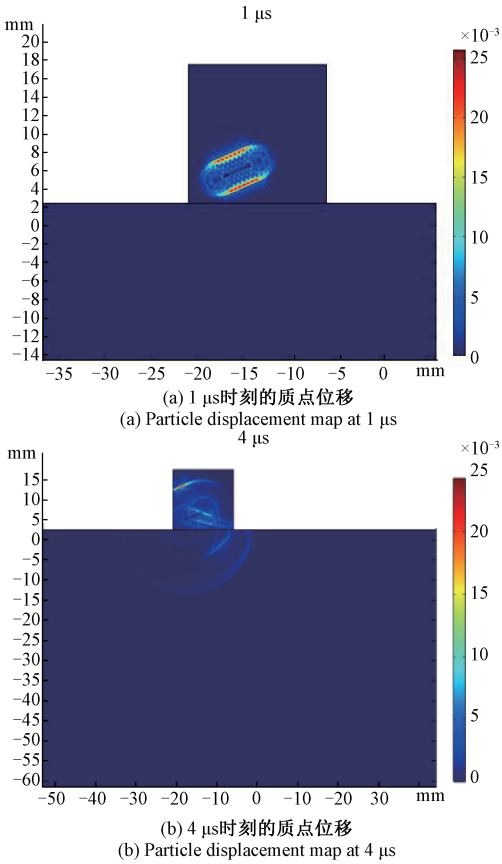


图 2　L_{CR} 波仿真模型

Fig.2　Simulation model of L_{CR} wave

如图 3 所示,分别为 1、4、6 和 7 μs 4 个时刻仿真模型的质点位移,颜色越亮表示质点振动幅值越大,图 3(d)对铝板中 L_{CR} 波、头波、体纵波、体横波以及表面波等波形进行了辨识[19]。仿真结果验证了仿真模型的可行性。



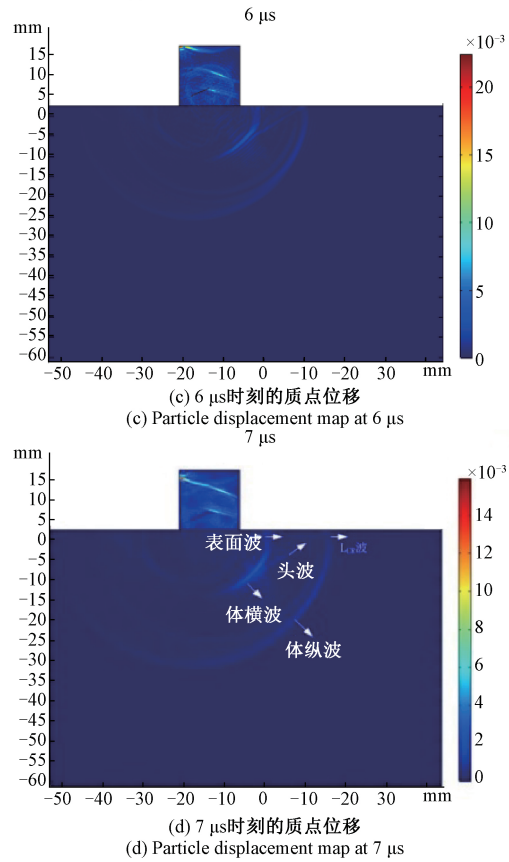


图 3　不同时刻质点位移

Fig.3　Particle displacement at different times

基于上述的仿真模型,为了获取实验所用规格铝板中的 L_{CR} 波的波形信号特征,修改仿真模型中铝板的尺寸为实验所用规格 600×10 mm^2,面外厚度设置为 100 mm,如图 4 所示。选取接收探头压电片上的一点,绘制该质点的振动位移图,如图 5(a)所示,将该图的波形信号特征作为 L_{CR} 波信号特征用于与实验中接收到的波形信号图作对比。从仿真信号图 5(a)可以看出,接收探头接收到的信号中 L_{CR} 波由于其波速最快,波包容易被识别,其他波形信号则与来自铝板底部的反射波混合在一起而无法分辨,L_{CR} 波之后的波形信号特征与铝板厚度有关,其波形信号特征较为复杂。当只改变仿真模型铝板厚度为 100 mm 时,其 L_{CR} 波信号仿真结果如图 5(b)所示,比较图 5(a)与(b)可以发现,2 个信号图首个回波信号(L_{CR} 波)之后的波形信号特征差异较大,但首个回波的到达时刻基本一致,因此对 L_{CR} 波波包之后的信号特征进行分析,于本文提出的超声波到达时刻计算方法的讨论意义不大。

2　SST

传统的时频分析方法有短时傅里叶变换(STFT)、Wigner-Ville 时频分布、伪平滑 Wigner-Ville 时频分布以及

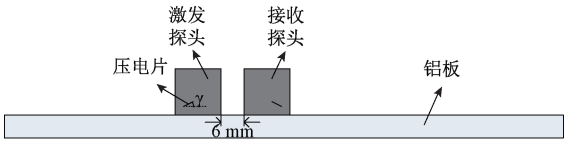


图 4 实验所用规格铝板中 L_{CR} 波仿真模型

Fig.4 Simulation model of L_{CR} wave in the specification aluminum plate used in the experiment

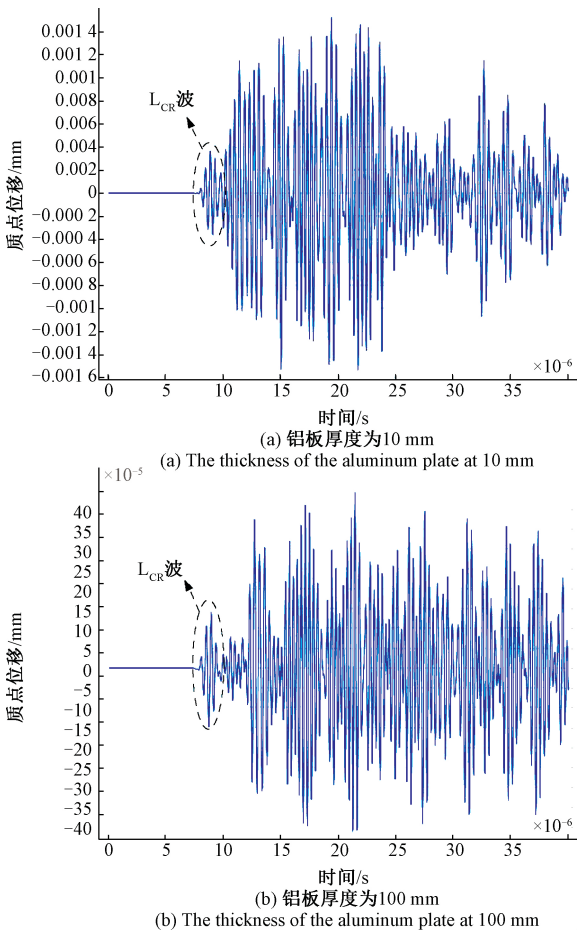


图 5 L_{CR} 波波形信号仿真

Fig.5 Simulation of L_{CR} waveform signal

小波变换等[20]。短时傅里叶变换窗函数的时域窗口越宽，时频分布的频率分辨率越高；时域窗口越窄，时频分布的时间分辨率越高，但是根据不确定性原理，一个信号不可能在时间和频率上同时具有高分辨率，因此短时傅里叶变换对于窗函数的选择要求较高。Wigner-Ville 时频分布存在交叉项干扰的问题，伪平滑 Wigner-Ville 时频分布虽然解决了交叉项干扰的问题，但是其以牺牲时频聚集性为代价，这不利于超声波的到达时刻的分析。为了同时兼顾时频分布的分辨率以及时频聚集性，SST 在小波变换的基础上，对时频分布函数进行压缩重构[21]。

SST 的原理如下。给定任意一个实信号 $s(t)$，对它进行连续小波变换(CWT)：

$$W_s(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{\infty}s(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中：$\Psi^*(t)$ 是母波 $\Psi(t)$ 的共轭函数；a 是尺度因子；b 是时间平移因子。连续小波变换可以看作是实信号 $s(t)$ 与时移压缩母波 $\Psi^*[(t-b)/a]$ 之间的互相关函数。这个函数值表示实信号 $s(t)$ 与时移压缩母波 $\Psi^*[(t-b)/a]$ 之间的相似性。然而，小波系数 $W_s(a,b)$ 在尺度因子 a 上的频率是发散的，其在时域上的分辨率不高。即便如此，无论 a 取何值，小波系数在 b 上的振荡特性均指向初始频率 ω。因此下一步将时间-尺度函数转化为时间-频率函数，如式(5)所示。

$$\omega_s(a,b)=\frac{1}{2\pi}\times\frac{\partial}{\partial b}\arg[W_s(a,b)] \tag{5}$$

式中：arg[·]表示小波系数的相位。式(5)通过对小波系数的相位函数进行求导得到瞬时频率。这里将小波系数转化为瞬时频率可以多种不同的计算表达式，本文只选择了其中的一种。当系数 $\omega_s(a,b)$ 被确定了之后，就可以选择确定的中心频率 ω_i，并确定频率间隔[$\omega_i-\Delta\omega/2$, $\omega_i+\Delta\omega/2$]，其中 $\Delta\omega=\omega_i-\omega_{i-1}$。然后以 ω_i 为中心频率的频率范围内进行 *SST* 得 $T_s(\omega_i,b)$，计算方程如式(6)所示：

$$T_s(\omega_i,b)=\frac{1}{C_{\psi}}\sum_{a_j:\,|\omega(a_j,b)-\omega_i|\leqslant\Delta\omega/2}W_s(a_j,b)\times a_j^{-3/2}\times\Delta a_j \tag{6}$$

式中：$C_{\psi}\equiv\frac{1}{2}\int_0^{\infty}\hat{\psi}(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\varepsilon}$，$\hat{\psi}(\varepsilon)$ 表示母波函数的傅里叶变换，Δa_j 表示相邻 2 个尺度因子之间的差值。式(6)表明 SST 将时间-尺度平面的能量进行重分配并转化为时间-频率平面[22]。

SST 是可逆的，通过式(7)原始信号可以被重构。

$$s(t)=\mathrm{Re}\sum_i T_s(\omega_i,b)=\left|\sum_i T_s(\omega_i,b)\right|\cos\left(\arg\sum_i T_s(\omega_i,b)\right) \tag{7}$$

本文则主要是利用 SST 的可逆性，通过对 L_{CR} 波信号 SST 的各个频带进行反变换得到时域信号，选取能量最高的信号波形起振点(信号波形有明显振动的起点)作为超声到达时刻。换句话说，能量最高的信号波形起振点最能代表临界折射纵波信号的到达时刻，这很大程度上避免了例如阈值法、互相关函数法等计算方法的精度受到波形变化影响的问题。

3 L_{CR} 波波速精确计算

3.1 波速计算原理

以 1 060 铝板为研究对象，根据 Snell 定理，可以使用

压电探头发射和接收 L_{CR} 波。考虑到纵波在探头内部也有一定的传播距离,而纵波在该距离中的传播时间测量较为困难。因此,实验中采用移动压电探头的间距,通过测量不同间距下的 L_{CR} 波的传播时间的差值,进而计算 L_{CR} 波的波速。如图 6 所示,当 2 探头的间距为 0 mm 时,L_{CR} 波的传播时间为 t_a;当 2 探头间距为 L 时 L_{CR} 的传播时间为 t_b,那么 L_{CR} 波的波速为 $L/(t_a-t_b)$。

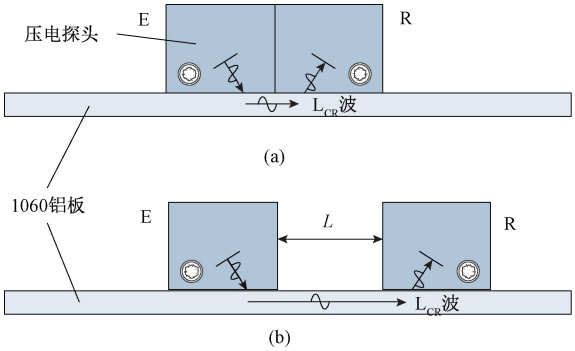


图 6　压电探头间距不同时 L_{CR} 波传播路径

Fig.6　Propagation path of L_{CR} wave at different space of the piezoelectric probes

采用 SST 计算铝板中 L_{CR} 波的波速流程如图 7 所示。首先将 2 个压电探头间距设置为 0 mm,采集 L_{CR} 波信号。为了提高波形的准确性,在调节压电探头的入射角度时同时参考 L_{CR} 波的仿真结果。其次,由于 L_{CR} 波的波速最快,因此提取信号图中第 1 个波包作为 L_{CR} 波并研究该波形的到达时刻。然后对提取的 L_{CR} 波包进行 SST,观察时频分布图中该波包的频带。最后,根据 L_{CR} 波的频带选取主要的几个频段进行 SST,比较各个频段的反变换信号的能量值,选择能量值最高的重构信号的波形起振点作为 L_{CR} 波的到达时刻。之后设置 2 探头间距为 L,重复上述步骤。基于上述 2 个压电探头不同间距下测得的超声到达时刻差值就可以计算出 L_{CR} 波的波速。

3.2　实验与结果分析

为了激励和接收 L_{CR} 波,本文首先搭建了如图 8 所示的实验平台。采用 RITEC RAM-5 000 作为信号激励源,激励源的激发频率为 2.5 MHz;纵波在铝板中的波速约为 6 458.4 m/s,在有机玻璃中的传播速度约为 3 032.4 m/s,根据 Snell 定理将压电探头中超声波的入射角度设置为 27.6°,压电探头的中心频率为 2.5 MHz;为了保证移动探头间距时 2 个探头在同一轴线上以降低实验误差,本文设计了一个可变距离的高分子材料模具用于固定压电探头;采用 Tektronix 示波器接收 L_{CR} 波信号;被测样本是自由状态下的 1 060 铝板,即铝板中的应力近似为 0 MPa。

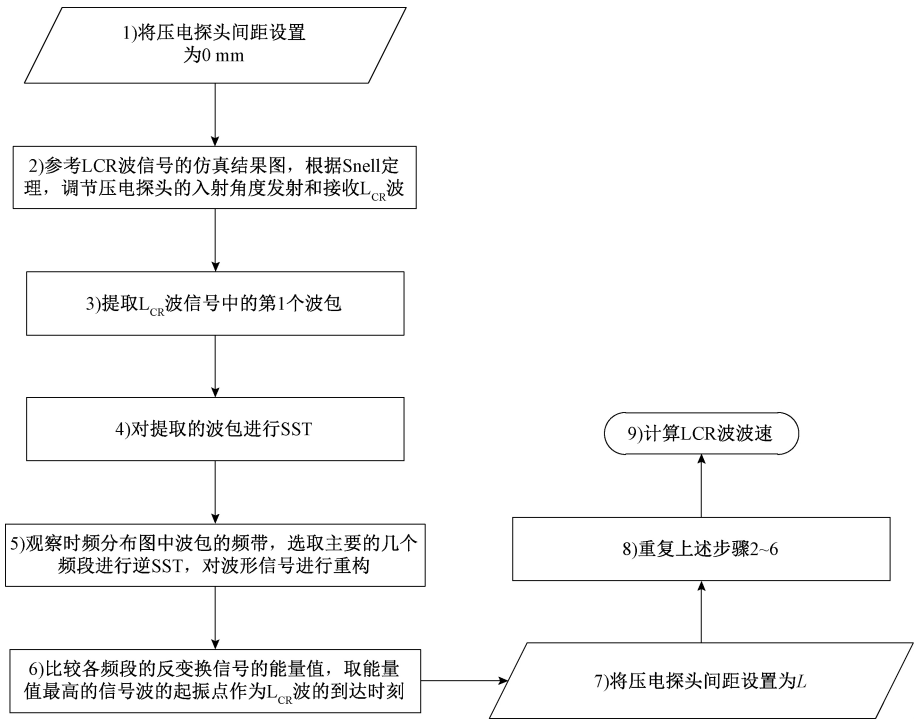


图 7　L_{CR} 波波速计算流程

Fig.7　L_{CR} wave velocity calculation

图 8 实验平台

Fig.8 Experiment platform

根据图 7 所示的流程,首先将 2 个探头间距设置为 0 mm,采集 L_{CR}波信号如图 9 所示,提取信号图中第一个波包数据,并对其进行同步压缩变换。如图 10 所示,比较小波变换和 SST 的时频分布图可以看出,SST 分辨率以及时频聚集性均比小波变换要高。此外,如图 10(a)所示,信号频率尖峰时刻代表接收探头采集到了不同波形信号,但是小波变换时频图分辨率不高导致无法精确确定 L_{CR}波的到达时刻[15]。从 SST 图 10(b)可以看出,该波包的频带宽度大约在 1~7 MHz,从图 10(a)可以看出频率低于 1 MHz 的信号分量也存在,因此选择 0.15~1 MHz、1~2 MHz、2~3 MHz、3~4 MHz 以及 4~7 MHz 5 个频段进行逆 SST,对原波形信号进行重构,其中也对每个重构信号的能量值进行了计算。重构信号的能量值则是计算波形幅值的平方和。如图 11 所示为上述各个频段的逆 SST 的时域信号,图中重构信号横轴是采样点的序号,重构信号的时间轴的时间与原信号一致。此外,各频段重构信号的能量值也在每个重构信号图的标题中标明了。从能量角度上考虑,原信号的能量值为 $9.506\,6\times10^{-4}$,0.15~7MHz 频段重构信号的总能量值为 $8.549\,2\times10^{-4}$,所以本文选取的频率段的重构信号能够反映原信号,未被包含的频率段信号主要是原信号中由于实验仪器造成的直流分量以及少量的更高频率信号,这些信号不在 L_{CR}波的频带之内,因此可以对这些信号不予考虑。比较图 11 中各频段重构信号的能量值可以发现,2~3 MHz频率段的重构信号的能量值最大,且激励信号的中心频率为 2.5 MHz,因此本文选用该重构信号的起振点时刻 20.535 μs 作为 L_{CR}波的到达时刻。观察图 10(a)能够发现大约在 20.65 μs 附近出现了信号频率尖峰,说明接收探头在这个时刻收到了一个波形信号,这个时刻与用 SST 测得的时刻 20.535 μs 相当接近。

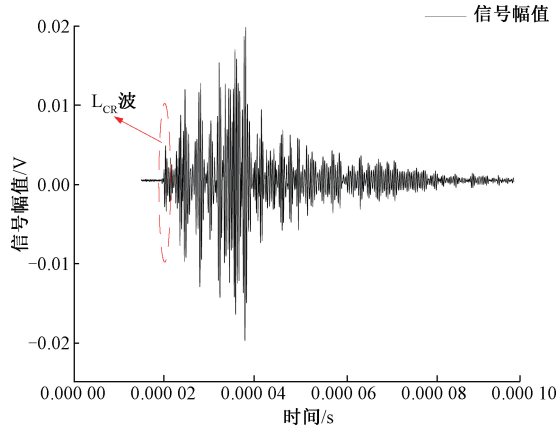


图 9 实验采集的信号波形

Fig.9 Signal waveform acquired by experiment

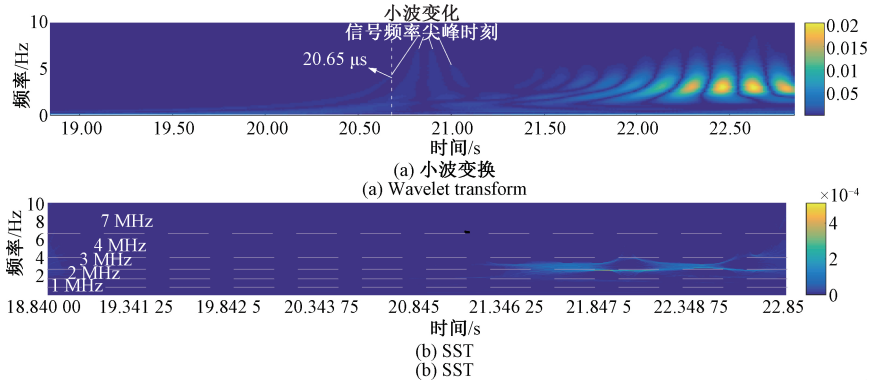


图 10 小波变换以及 SST 时频分布

Fig.10 Wavelet transform and SST time-frequency distribution map

将压电探头间距 L 调整为 76.67 mm,重复上述步骤,采用 SST 方法对 L_{CR}波信号进行压缩重构,测得的 L_{CR}波的到达时刻为 32.410 μs。压电探头间距为 0 和 76.67 mm 的到达时刻的差值为 11.875 μs,因此可以计算出 L_{CR}波的波速为 6 456.421 053 m/s。由于本文所用的实验样本是自由状态下的 1 060 铝板,L_{CR}波在该铝板中的波速大约为 6 458.4 m/s,因此采用本文提出的 SST 方法测得的 L_{CR}波波速的误差约为 0.03%。1 060 铝板的声弹性系数大约为 $1.083\,9\times10^{-4}\,MPa^{-1}$,那么采用本文提出的方法最低可以检测 1 060 铝板中 10 MPa 的应力变

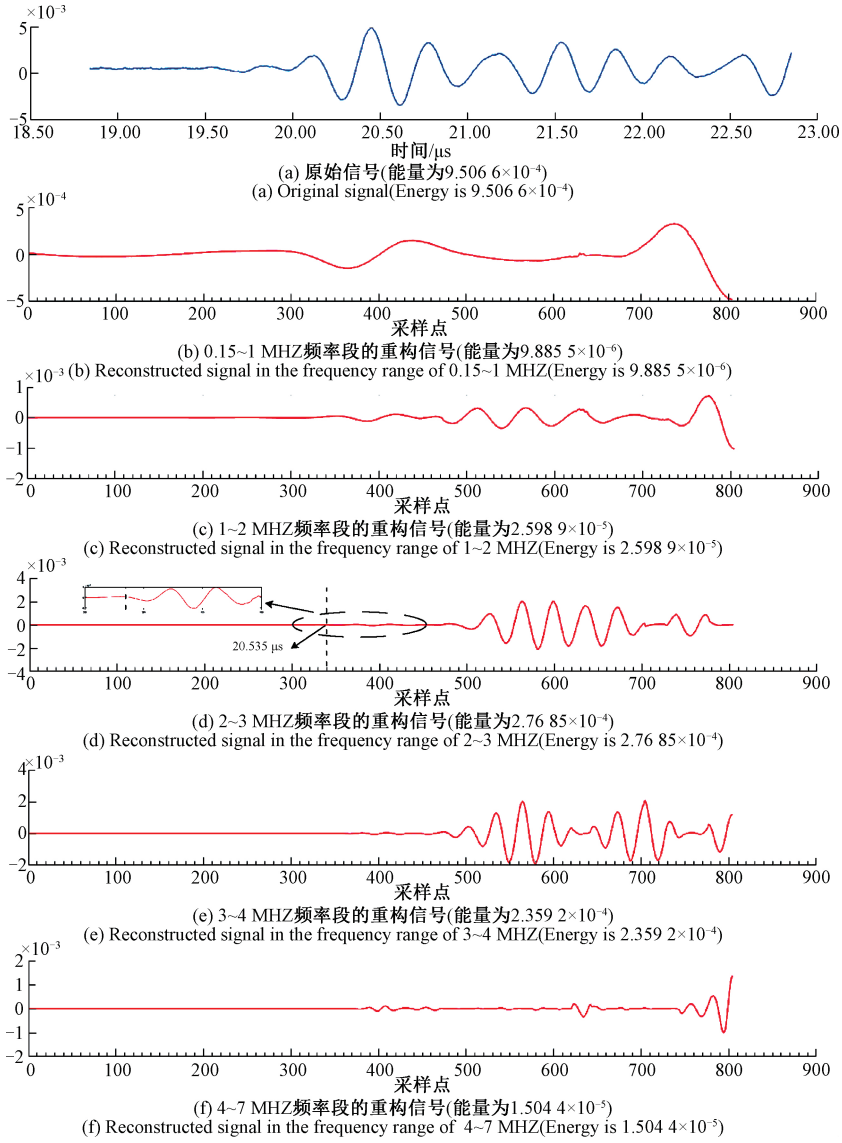


图 11　逆 SST

Fig.11　Inverse SST

化量。此外,本文还采用动态阈值法和互相关函数法分别测量 L_{CR} 波波速,3 种方法的测量结果及误差分析如表 1 所示。其中互相关函数法仅用作声时差的测量。从表 1 数据可知,采用(SST)方法测量 L_{CR} 波波速精度最高。

表 1　3 种方法的测量结果

Table 1　The measurement results of three methods

	L=0 mm 波形到达时刻/μs	L=76.67 mm 波形到达时刻/μs	声时差 Δt/μs	测量波速 $v'=\Delta L/\Delta t$/(m·s^{-1})	误差 (Δv|/·v^{-1})/%
SST	20.535	32.410	11.875	6 456.4210 53	0.03
动态阈值法	20.209	32.343	12.134	6 319.025 484	2.16
互相关函数法	–	–	11.160	6870.071 685	6.38

4 结 论

针对目前基于临界折射纵波的超声应力检测中超声波波速检测精度不高的问题,本文提出采用 SST 方法对临界折射纵波进行压缩变换以及信号重构。

为了提高实验中使用压电探头发射和接收 L_{CR} 波波形的准确性,本文利用有限元仿真软件对 L_{CR} 波进行了仿真分析并为实验中判断 L_{CR} 波形正确与否提供参考。通过观察 L_{CR} 波 SST 时频分布中的频带,选取主要的几个频段且对各个频段进行逆 SST 并计算各个重构信号的能量值,比较各个重构信号的能量值选取能量值最高的信号起振点作为 L_{CR} 波的到达时刻。考虑到纵波在压电探头内部的传播时间测量较为困难,本文通过移动压电探头测量不同间距下 L_{CR} 波的超声到达时刻差值,进而计算 L_{CR} 波波速。实验结果验证了本文提出的 L_{CR} 波波速精确计算方法的可行性,这将有利于提高材料的应力检测精度和材料应力分布的分辨率,进而促进材料结构健康检测水平的提升。

参考文献

[1] 王晓媛,赵丰鹏,王杰,等.金属有机框架材料力学、电学及其应变调控特性的第一原理研究[J]. 物理学报, 2016,65(17):359-366.
WANG X Y, ZHAO F P, WANG J, et al. First-principle studies of mechanical electronic properties and strain engineering of metal-organic framework [J]. Acta Phys. Sin.,2016,65(17):359-366.

[2] KR ÁLIK M, JERZ V. The measurement of residual stresses in the surface layers of the materials after machining[J]. Materials Science Forum, 2018, 919: 345-353.

[3] 龚灯, 韩刚.基于磁记忆方法的管道应力检测设备的开发[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(2):94-100.
GONG D, HAN G. Development of pipeline stress detection equipment based on magnetic memory method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2019, 33(2): 94-100.

[4] 宋文涛.残余应力超声无损检测与调控技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.
SONG W T. Study on technology of ultrasonic nondestructive testing and regulation of residual stress[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2016.

[5] 张闯,刘成立,刘素贞,等.基于电磁加载的铝板应力超声检测[J]. 仪器仪表学报, 2018,39(8):169-177.
ZHANG CH, LIU CH L, LIU S ZH, et al. Ultrasonic detection of aluminum stress based on electromagnetic loading [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8):169-177.

[6] HU H W, ZOU ZH CH, JIANG Y B, et al. Finite element simulation and experimental study of residual stress testing using nonlinear ultrasonic surface wave technique [J]. Applied Acoustics, 2019, 154 (11): 11-17.

[7] WANG W, XU CH H, ZHANG Y M, et al. An improved ultrasonic method for plane stress measurement using critically refracted longitudinal waves [J]. NDT & E International, 2018, 99:117-122.

[8] SONG W, XU CH G, PAN Q X, et al. Nondestructive testing and characterization of residual stress field using an ultrasonic method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2):365-371.

[9] 刘彬, 董世运. 基于临界折射纵波无损评价激光熔覆层应力[J]. 焊接学报, 2014, 35(9):53-56.
LIU B, DONG SH Y. Stress measurement of laser cladding coating with critically refracted longitudinal wave method [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(9):53-56.

[10] BRAY D E. Ultrasonic stress measurement and material characterization in pressure vessels, piping, and welds[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2002, 124(3):326-335.

[11] 陈建, 孙晓颖, 林琳, 等. 一种高精度超声波到达时刻的检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2422-2428.
CHEN J, SUN X Y, LIN L, et al. Method to precisely measure arrival time of ultrasonic[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2012, 33(11):2422-2428.

[12] COSTA-JÚNIOR J F S, CORTELA G A, MAGGI L E, et al. Measuring uncertainty of ultrasonic longitudinal phase velocity estimation using different time-delay estimation methods based on cross-correlation: Computational simulation and experiments [J]. Measurement, 2018, 122:45-46.

[13] 余文晶, 何琳, 徐荣武, 等. 典型瞬态声信号倒谱域时延估计方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2018, 46(4): 68-73.
YU W J, HE L, XU R W, et al. Time delay estimation method in cepstrum domain for typical transient signals[J]. Journal of Huazhong University of Science

and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(4): 68-73.

[14] 朱其猛. 临界折射纵波(L_{CR})应力测试修正方法与机理研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
ZHU Q M. Research on correction methods and mechanism of longitudinal critical wave refraction (L_{CR}) stress measuring technology [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[15] AVANESIANS P, MOMAYEZ M. Wave separation: Application for arrival time detection in ultrasonic signals[J]. Ultrasonics, 2015, 55:15-25.

[16] 张利军, 张民, 刘勍, 等. 基于混和时频分析方法的 ISAR 成像研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4):563-568.
ZHANG L J, ZHANG M, LIU Q, et al. Research of ISAR imaging based on hybridized time-frequency analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4):563-568.

[17] JIANG Q T, SUTER B W. Instantaneous frequency estimation based on synchrosqueezing wavelet transform[J]. Signal Processing, 2017, 138:167-181.

[18] 张玉华. 超声非线性技术检测金属零件应力和疲劳损伤的方法研究[D]. 南宁:广西大学, 2018.
ZHANG Y H. Research on ultrasonic nonlinear detection the stress and fatigue damage of metallic parts[D]. Nanning: Guangxi University, 2018.

[19] CHAKI S, KE W, DEMOUVEAU H. Numerical and experimental analysis of the critically refracted longitudinal beam[J]. Ultrasonics, 2013, 53(1):65-69.

[20] 刘诣, 谢雄杰, 罗晓庆, 等. 计及信号传输特性的变压器套管末屏高频局部放电信号时频分析方法[J/OL]. 高电压技术, 2018: 1-9. http://kns.cnki.net/KCMS/detail/42.1239.TM.20181206.1703.026.html
LIU Y, XIE X J, LUO X Q, et al. A time-frequency analysis method on the partial discharge HF signal from power transformer bushing tap considering signal propagation characteristics [J/OL]. High Voltage Engineering, 2018: 1-9. http://kns.cnki.net/KCMS/detail/42.1239.TM.20181206.1703.026.html

[21] DAUBECHIES I, LU J F, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2):243-261.

[22] MIHALEC M, SLAVIČ J, BOLTEŽAR M. Synchrosqueezed wavelet transform for damping identification [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 80:324-334.

作者简介

张闯,分别在 2003 年、2006 年和 2010 年于河北工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为河北工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为电工装备无损检测与评估。
E-mail: czhang@hebut.edu.cn

Zhang Chuang received his B. Sc. M. Sc., and Ph. D. degrees all from Hebei University of Technology in 2003, 2006 and 2010, respectively. He is currently a professor and doctoral supervisor at Hebei University of Technology. His main research interests include non-destructive testing and evaluation of electrical equipment.

王标,2017 年于华北科技学院获得学士学位,现为河北工业大学硕士研究生,主要研究方向为超声应力检测技术及相关理论。
E-mail: 1552970543@qq.com

Wang Biao received his B. Sc. degree from North China Institute of Science and Technology in 2017. He is currently a graduate student at Hebei University of Technology. His main research interests include ultrasonic stress testing technology and related theories.