

频率分辨率对超声非线性系数的影响及修正方法

颜丙生¹, 赵俊杰¹, 汤宝平², 刘自然¹

(1. 河南工业大学机电工程学院, 郑州 450001; 2. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

摘要: 针对较低的频率分辨率会使超声非线性系数产生一定的计算误差的问题, 通过对离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 计算过程进行理论分析以及在考虑超声信号不同截断长度、波形端点幅值等因素对计算超声非线性系数的影响的基础上, 提出基于激励信号特征数据长度和端点数据特征的超声非线性系数计算方法. 分别利用仿真信号和实测信号对上述方法进行验证, 可将实测信号相对超声非线性系数与标准值的偏差降到标准值的 10% 以内. 结果表明该方法能有效降低由信号截断以及频率分辨率不足引起的超声非线性系数的计算误差.

关键词: 超声非线性系数; 信号截断; 端点幅值; 频谱校正

中图分类号: TG 115. 285

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2018)05 - 0783 - 06

doi: 10. 11936/bjtxb2017090013

Influence of Spectral Resolution on Ultrasonic Nonlinear Parameter and Its Correction Method

YAN Bingsheng¹, ZHAO Junjie¹, TANG Baoping², LIU Ziran¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To resolve the problem that the low frequency resolution can cause calculation error of ultrasonic nonlinear coefficient, based on the theoretical analysis of the discrete Fourier transform (DFT) calculation process and the influence of the factors such as the length of the truncated length and the amplitude of the waveform on the calculation of the ultrasonic nonlinear parameter, the characteristics of the characteristic data of the excitation signal and the characteristics of the endpoint data calculation method of ultrasonic nonlinear parameter were proposed. The simulation results show that this method can effectively reduce the error of β caused by signal truncation and low frequency resolution, so that the relative ultrasonic nonlinearity parameter of measured signal can be reduced to less than 10% of the standard value.

Key words: ultrasonic nonlinear parameter; signal-cutting; endpoint value; spectrum correction

机械零部件在工作状态下受各外力作用, 内部会产生位错、微裂纹、滑移带等微损伤, 常规超声方法由于其局限性, 不能对上述微损伤进行有效检测.

非线性超声检测技术通过分析超声信号的频域特征可量化上述材料内部微损伤程度^[1-3], 并通过时间反转技术^[4]对损伤位置进行定位, 其中超声非线性系

收稿日期: 2017-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1604134); 河南省科技厅自然科学基金资助项目(152300410201)

作者简介: 颜丙生(1978—), 男, 讲师, 主要从事机械故障诊断、超声无损检测技术方面的研究, E-mail: yanbingsheng@163.com

数 β 是表征材料中微损伤程度的重要参数^[5].

使用 β 表征微缺陷的大小时, β 由超声信号的基波与二次谐波幅值决定^[6]. 由于超声信号二次谐波幅值较小,容易受到各种软硬件干扰,故如何提高 β 的准确性是目前的研究热点. Thiele等^[7]使用空气耦合传感器来降低检测中对被测件表面粗糙度的要求;高鹏等^[8]设计和开发了非线性超声相控阵无损检测系统用于提高检测结果的分辨率;张荣繁等^[9]研究了非线性声波衰减系数对非线性超声检测结果的影响.

除了硬件系统的影响外,对超声信号进行处理时,考虑到被测件的尺寸以及衰减等因素,发射的超声激励信号是一系列的脉冲串,而且由于采样率的限制,采集的可用于进行超声非线性系数计算的数据长度非常有限,导致超声信号频谱分析结果中,其频率分辨率较低. 由于超声在传播过程中出现了波形畸变,使得截断后的时域波形周期数与数据点数不协调,同时由于较低频率分辨率,最终超声信号频谱分析结果中特征频率成分处可能不存在谱线^[10]或引入较大的计算非线性,加窗虽能在一定程度上抑制信号边缘部分的非线性因素,但不能完全去除,同时加窗也会使得信号整体幅值谱幅值降低,后续需要进行一些幅值修正处理.

本文在通过对离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)进行理论分析以及考虑超声信号不同截断长度、波形传播过程中的畸变等因素对超声非线性系数计算的影响的基础上,提出基于激励信号特征数据长度和端点数据特征的超声非线性系数计算方法,结果表明该方法能有效降低 β 的计算误差.

1 截断及较低频率分辨率对 β 的影响

1.1 超声非线性系数

为了量化固体中非线性超声传播规律,表征被测物体中的微缺陷,Breazeale等^[11]从连续介质出发建立了固体介质一维纵波非线性波动方程,利用逐级近似微扰法,略去高次项,得到超声非线性系数 β 的表达式^[11]

$$\beta = \frac{8}{k^2 x} \frac{A_2}{A_1^2} \quad (1)$$

式中: k 为波数; x 为波传播的距离; A_1 、 A_2 分别为基波与二次谐波的幅值. 在实验中, k 和 x 为固定的常数, β 值由 A_1 和 A_2 决定,所以常使用 A_2/A_1^2 来代替 β 值. 为了得到准确的 β 值,需要精确测量 A_1 和 A_2 的

值. 一般使用透射法对被测件进行非线性超声检测,然后对接收到的信号进行幅值谱分析,得到 A_1 和 A_2 的值.

1.2 存在的问题

图1所示的非线性超声检测系统中,对施加227 MPa拉伸应力的镁合金试件采用透射法,根据试件尺寸($60 \times \phi 13$ mm),确定发射信号频率为5 MHz,周期数为51,信号峰峰值为300 mV,类型为单频正弦脉冲串激励信号. 信号发生器产生的激励信号经功率放大器放大1 000倍达到300 V,使用高能低通滤波器滤除高阶谐波分量后,驱动发射传感器,向试件输入超声波. 超声波被接收传感器接收,并被示波器采集. 示波器采集到的原始信号如图2所示.

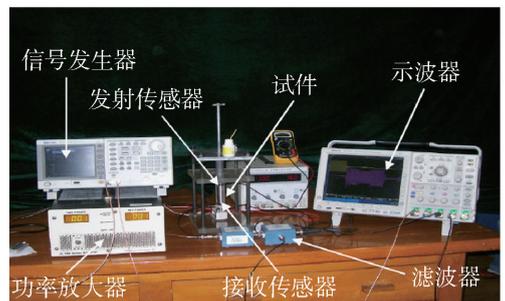


图1 超声非线性系数测量系统及试件

Fig. 1 Ultrasonic nonlinear parameter measurement system and specimen

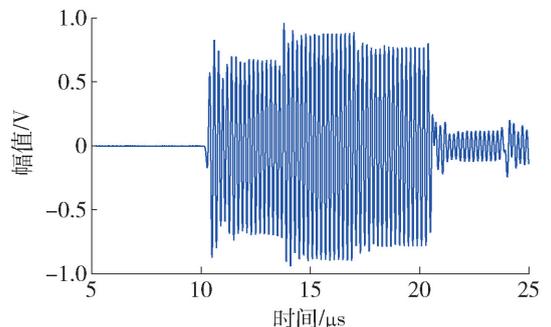


图2 原始超声信号

Fig. 2 Original ultrasonic signal

从原始信号时域图形可看出,中间幅值较高部分的波形幅值明显产生了畸变,后边幅值较低部分为回波信号,利用Matlab对采集到的时域波形进行分析,实际采样率为500 MHz,采样点数为10 000点. 在进行频谱分析时,截取幅值较高部分的51个完整周期(图3所示波形实际数据点数为5 118点). 对图3所示信号进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)并求幅值谱,得到图4所示幅值谱图.

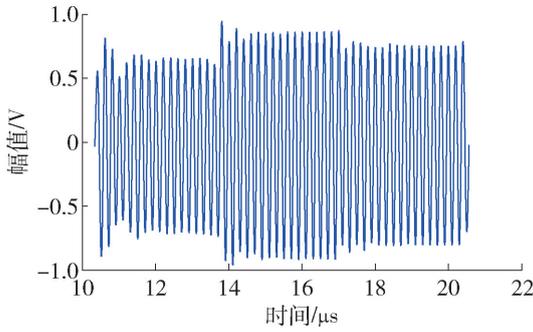


图3 一般截断信号

Fig.3 Truncation signal in general

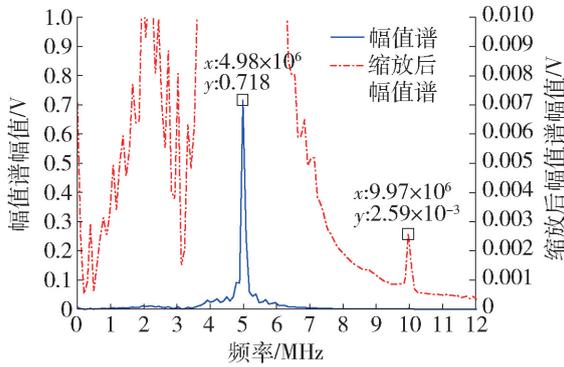


图4 一般截断信号幅值谱

Fig.4 Amplitude spectrum of truncation signal in general

从图4中可以发现,基波频率5 MHz附近的峰值点坐标为 $x: 4.98 \times 10^6, y: 0.718$ (均保留3位有效数字);二次谐波频率10 MHz附近的峰值点坐标为 $x: 9.97 \times 10^6, y: 2.59 \times 10^{-3}$ 。

上述5 MHz峰值点右侧频谱谱线的频率值为 4.89×10^6 ,10 MHz峰值点右侧频谱谱线的频率值为 1.01×10^7 ,由此看出,按照完整周期数进行波形截取时,由于示波器采样率较高,而实际有效数据段长度较短,造成信号幅值谱实际频率分辨率较低,5 MHz与10 MHz处不存在谱线,信号幅值谱分析中已经不包含基波与二次谐波的准确幅值。

为了计算 β 值,一般使用最靠近5 MHz与10 MHz处的峰值点幅值代替基波与二次谐波幅值,由此得到的 β 值与实际 β 值之间存在一定的误差。根据以上两峰值点幅值,计算得到的 β 值为0.005 05。

2 理论分析与解决方法

2.1 DFT分析

DFT的公式定义为

$$Y(k) = \sum_{j=1}^n X(j) W_n^{(j-1)(k-1)} \quad (2)$$

式中: $X(j)$ 为时域信号幅值数组; $Y(k)$ 为时域信号

的DFT计算结果; $W_n = e^{(-2\pi i)/n}$, n 为时域信号幅值数组的长度, $i=1,2,\dots,n;j,k=1,2,3,\dots,n$ 。

信号段幅值谱的频率轴位置计算公式为

$$f_x(i) = iF_s/n \quad (3)$$

式中: $f_x(i)$ 为幅值谱第 i 点的频率值; F_s 为采样率; n 为输入的时域信号幅值数组长度。

当时域信号采样率 F_s 和基波频率 f_1 为某一固定值时,从式(3)可以看出时域信号幅值数组长度 n 的大小将直接决定超声时域信号幅值谱的频率分辨率,不合适的时域信号幅值数组长度 n 将会导致没有幅值谱谱线会落在基波频率 f_1 与二次谐波频率 f_2 处。

将图3中的数据段实际点数5 118代入式(3),当 i 分别等于51、52、102、103时,对应的 $f_x(i)$ 分别等于 4.98×10^6 、 5.08×10^6 、 9.97×10^6 、 1.01×10^7 Hz,与图4中得到的结果一致,因此,在图4幅值谱图中,不存在频率成分刚好等于5 MHz与10 MHz的幅值谱谱线。

2.2 超声信号截断方法

通过对DFT算法以及信号时域波形特征的分析,提出以下超声信号截断方法:

1) 按照激励信号周期数,在接收信号中幅值最高部分截取相同周期数的完整波形,要求首尾幅值一致且大小接近零。

2) 用采样率与基波频率的比值乘以激励信号周期数得到理想信号长度,将1)中实际截取的信号长度与理想信号长度进行比较,若实际截取信号的长度小于理想信号长度,则对实际信号两端进行对称补零以达到理想信号长度;若实际截取信号的长度大于理想信号长度,则对激励信号周期数加一再乘以采样率与基波频率的比值,从而得到次优的理想信号长度,然后对实际截取信号两端进行对称补零达到次优理想信号的长度。

3 实验研究

分别采用仿真信号和实测信号来验证超声时域信号长度对超声非线性系数的影响以及上述时域波形截断规则。

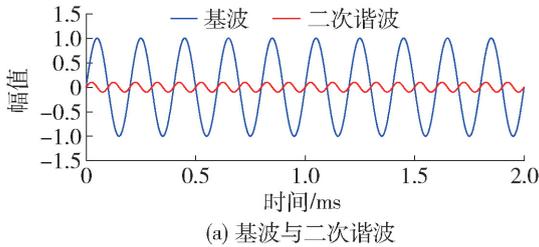
3.1 仿真信号

由式(1)可知,超声非线性系数的计算主要与基波和二次谐波有关,因此,在建立理想超声信号时可只考虑基波和二次谐波,将其他无关的信号分量忽略掉。根据实际实验参数,将仿真信号的基波频率 f_1 设置为5 MHz,幅值为1,周期 n_1 为10,二次谐波频率 f_2 设置为10 MHz,幅值为0.1,周期 n_2 为

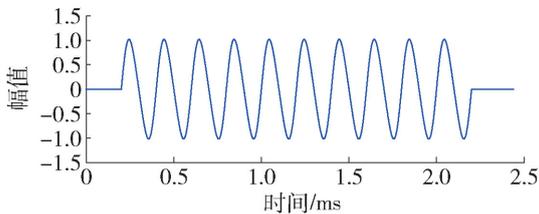
20, 采样率 F_s 设置为 500 MHz. 利用正弦函数分别生成基波和二次谐波幅值数组 (相位均为 0), 然后将二者幅值叠加生成叠加信号.

由于非线性超声检测中, 实际发射的是一系列脉冲串, 为了尽可能模拟真实数据, 将上述叠加后的幅值数组前后分别补 100 个零点. 由 $(F_s/f_1)n_1$ 可知, 最终生成的正弦波形幅值数组长度为 1 000 点, 加上两侧一共补的 200 个零点, 图 5 中最终生成的超声仿真信号幅值数组的长度为 1 200 点.

最终生成的超声信号仿真波形如图 5 所示.



(a) 基波与二次谐波



(b) 基波与二次谐波的叠加

图 5 仿真信号

Fig. 5 Simulation signal

针对图 5 中的超声仿真信号, 图 6 给出了仿真信号幅值数组在 1 080、1 040、1 000、960、920 点 5 种长度时的幅值谱图. 在以上述点数对信号进行截断时, 以 1 080 点为例, 先用信号总长 (1 200 点 - 1 080 点 = 120 点) 得到总共应该被去除的数据点数, 然后在仿真时域信号两端各减去 60 个数据点, 取中间剩余部分为被分析信号.

对比图 6 中 1 080、1 040、1 000、960、920 点 5 组信号分别在 5 MHz 与 10 MHz 处的谱线可以发现, 数据长度为 1 000 点时, 5 MHz 与 10 MHz 处频谱谱线与频率轴上 5 MHz 与 10 MHz 处的偏离最少. 其他 4 组信号的频谱分析结果在 5 MHz 与 10 MHz 处均发生不同程度偏离.

为了进一步验证信号截断对超声非线性系数的影响, 依次对上述仿真超声波信号两侧的数据进行删除, 每次两侧各删除 10 个点 (单次共计删除 20 个点), 考察信号幅值数组长度从 1 200 点降到 800 点的情况, 对应的超声非线性系数有 21 组. 超声非线性系数随信号段长度的变化情况如图 7 所示, 其中

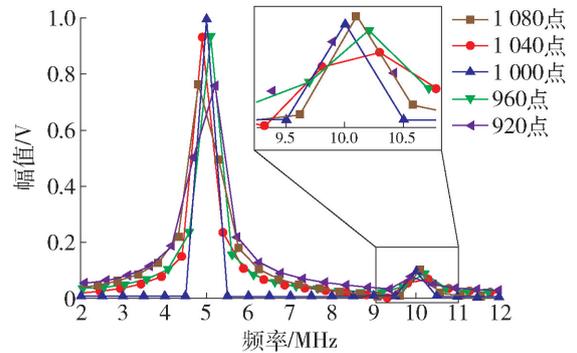


图 6 不同截断点数的仿真信号频谱

Fig. 6 Spectrum of the simulation signal for different truncated points

实际值是由仿真超声信号截断后做 FFT (不加窗), 根据 FFT 结果, 计算 A_2/A_1^2 得到. 其中标准值是由基波与二次谐波的初始设置参数直接计算得出的, 标准值为一固定值, 用于衡量实际值的偏差情况.

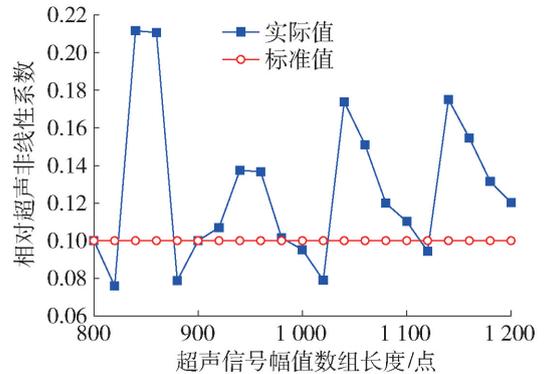


图 7 不同截断点数下超声非线性系数的计算结果

Fig. 7 Calculation results of ultrasonic nonlinear coefficients at different cutoff points

由图 7 可以看出, 超声信号幅值数组的长度为 800 ~ 1 000 点, 幅值数组的长度刚好为 100 的整数倍时, 超声非线性系数的实际值与标准值的偏差较小, 当幅值数组的长度由 $k \times 100$ ($k = 8, 9, 10$) 点逐渐变成 $(k \times 100 + 50)$ 点且 $k = 8, 9$ 时, 超声非线性系数实际值会逐渐偏离标准值, 且实际值与标准值的偏差在幅值数组的长度为 $(k \times 100 + 50)$ 点且 $k = 8, 9$ 时达到最大.

超声信号幅值数组的长度为 1 000 ~ 1 200 点时, 幅值数组的长度等于 $k \times 100$ ($k = 8, 9, 10$) 点处的实际值最接近标准值. 但是考察点数在 1 000、1 100、1 200 点三处的实际超声非线性系数可以发现, 实际值与标准值的偏差逐渐增加.

根据仿真信号的处理结果来看, 主要有以下结论:

1) 当被处理信号的幅值数组长度与激励脉冲串信号中正弦波形幅值数组长度接近, 且实际被处理数组长度 n 基本为 F_s/f_1 的整数倍时, 超声非线性系数的计算结果比较准确。

2) 当实际被处理数组长度 n 为 F_s/f_1 的整数倍, 但是长度超出激励脉冲串信号中正弦波形幅值数组长度时, 超声非线性系数的计算结果呈增大趋势。

3.2 实测信号

针对图 2 中的原始超声信号, 在图 3 所示的截断信号基础上进行进一步分析, 给出了超声信号幅值数组为 5 140、5 120、5 100、5 080、5 060 点 5 种长度时如图 8 与图 9 所示的幅值谱图形。

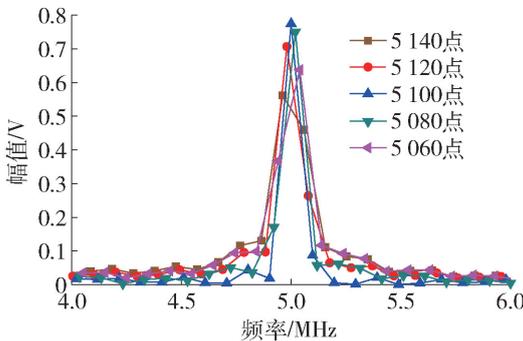


图 8 超声信号 5 MHz 处幅值谱

Fig. 8 Amplitude spectrum of the ultrasonic signal at 5 MHz

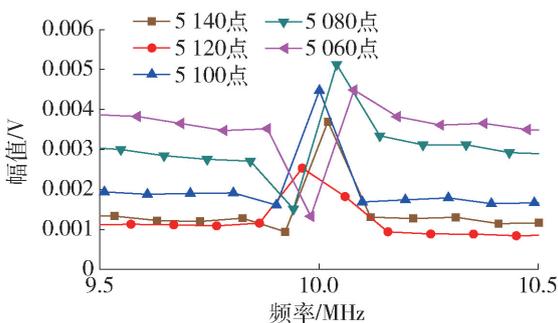


图 9 超声信号 10 MHz 处幅值谱

Fig. 9 Amplitude spectrum of the ultrasonic signal at 10 MHz

由图 9、10 可以发现, 当超声信号幅值数组长度等于 5 100 点时, 5 MHz 与 10 MHz 频率成分的谱线基本落在 5 MHz 与 10 MHz 处, 而当仿真信号幅值数组长度为 5 140、5 120、5 080、5 060 点时, 幅值谱在 5 MHz 与 10 MHz 频率成分处均发生了偏离。

对采集到的信号依次进行截断, 做频谱, 求超声非线性系数, 最终得到如图 10 所示的超声非线性系数随实验数据长度变化曲线。其中超声非线性系数标准值 ($\beta = 0.005 05$) 是由图 4 中频谱分析结果计

算得出的, 在此仅用于评价实际值的偏差情况。

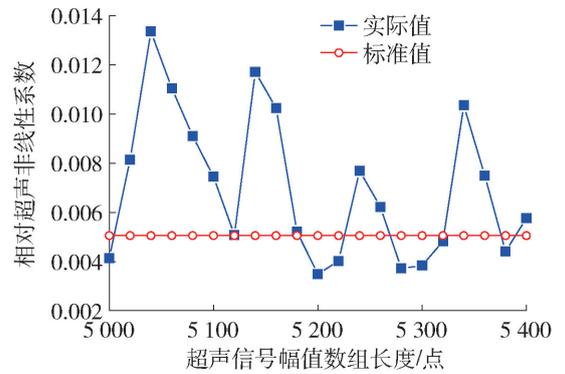


图 10 超声非线性系数随实验数据长度变化

Fig. 10 Variation of ultrasonic nonlinear parameter with experimental data length

由图 10 可以发现, 实际值与标准值在信号幅值数组长度为 $k \times 100$ 且 $k = 50, 51, 52, 53, 54$ 处的偏差值与信号幅值数组长度为 $k \times 100 + 50$ 且 $k = 50, 51, 52, 53$ 处的偏差值相比, 后者的偏差明显比前者大。图 10 中实验信号实际超声非线性系数的变化规律与仿真信号实际超声非线性系数的变化规律基本一致。

由于回波等其他因素的影响, 用于计算标准值的超声信号的实际长度为 5 118 点, 与实验中 $F_s/f_1 \approx 100$ 的整数倍依然有一定的偏差。为了得到较准确的幅值谱结果, 以截取的 5 118 点数据为基础, 分为 2 种情况对其进行进一步处理。

1) 在后端减去 18 点得到 5 100 点数据, 对 5 100 点数据进行分析得到其在 5 MHz 处的频谱谱线的坐标为 $(x: 5.00 \times 10^6 \ y: 0.775)$, 10 MHz 处频谱谱线坐标为 $(x: 1.00 \times 10^7 \ y: 0.004)$, 以此为基础的超声非线性系数计算结果为 0.007 20。

2) 在两端补 83 个零点得到 5 200 点数据, 对 5 200 点数据进行分析, 得到其在 5 MHz 处的频谱谱线的坐标为 $(x: 5.00 \times 10^6 \ y: 0.761)$, 10 MHz 处频谱谱线坐标为 $(x: 1.00 \times 10^7 \ y: 0.003)$, 以此为基础的超声非线性系数计算结果为 0.005 50。

将以上 2 种情况得到的超声非线性系数与图 10 中标准值 ($\beta = 0.005 05$) 进行比较, 得到各自的相对偏差分别为 42.57% 和 8.91%, 由此可以判断通过补零得到 5 200 点数据时, 最终得到的超声非线性系数与标准值的偏差更小。

3.3 实验分析

从仿真信号不同截断程度下的超声非线性系数来看, 当对信号的截断不满足 2.2 节的要求时, 计算

得到的超声非线性系数最大约为标准值的 200% ; 当满足要求时, 实际计算得到的超声非线性系数与标准值之间的误差最多不超过标准值的 5% , 由此可以看出, 2.2 节提出的截断方法能有效降低仿真信号中超声非线性系数的计算误差。

实测信号中, 当对信号的截断不满足 2.2 节的要求时, 实际超声非线性系数与标准值的偏差最大为标准值的 260% ; 通过 2.2 节的方法对时域信号进行处理后, 实际超声非线性系数与标准值的偏差最多不超过标准值的 10% .

4 结论

1) 结合仿真信号和实验信号的分析结果, 在对超声信号进行截断处理时, 根据激励信号周期数, 在接收信号中幅值最高部分截取相同周期数的完整波形, 可保证超声信号基波与二次谐波幅值的准确性。

2) 通过补零, 使得时域信号数据点数为采样率与基波比值的整数倍, 可以保证基波与二次谐波的谱线不会偏离, 同时, 可以使信号边缘部分引入的计算非线性较小。

参考文献:

- [1] 张剑锋, 轩福贞, 项延训. 材料损伤的非线性超声评价研究进展[J]. 科学通报, 2016, 61(14): 1536-1550.
ZHANG J F, XUAN F Z, XIANG Y X. Evaluation of material damage using nonlinear ultrasonic wave [J]. Science China Press, 2016, 61(14): 1536-1550. (in Chinese)
- [2] 吴斌, 李佳锐, 颜丙生, 等. LY12 铝合金早期性能退化下超声非线性系数测量和金相观察[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(1): 22-27.
WU B, LI J R, YAN B S, et al. Ultrasonic nonlinear coefficient measurement and optical observation of LY12 aluminum alloy at early degradation stages[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(1): 22-27. (in Chinese)
- [3] YAN B S, TANG B P. Simulation and testing of a nonlinear ultrasonic system for testing the debonding of the adhesive layers of magnesium alloys [C] // 2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2016: 26-30.

- [4] 张望, 吴维亮, 肖黎, 等. 闭合型裂纹时间反转损伤识别[J]. 振动与冲击, 2015, 34(9): 95-101.
ZHANG W, WU W L, XIAO L, et al. Time reversal based damage detection for closed crack [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(9): 95-101. (in Chinese)
- [5] CANTRELL J H. Quantitative assessment of fatigue damage accumulation in wavy slip metals from acoustic harmonic generation [J]. Philos Mag, 2006, 86(11): 1539-1554.
- [6] WU B, YAN B S, HE C F. Nonlinear ultrasonic characterizing online fatigue damage and microscopic observation in situ [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(12): 2597-2604.
- [7] THIELE S, KIM J Y, QU J M, et al. Air-coupled detection of nonlinear Rayleigh surface waves to assess material nonlinearity [J]. Ultrasonics, 2014, 54(4): 1470-1475.
- [8] 高鹏, 李法新. 非线性超声相控阵无损检测系统及实验研究[J]. 实验力学, 2014, 9(1): 1-11.
GAO P, LI F X. Nonlinear ultrasonic phased array nondestructive testing: system and performance study [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 9(1): 1-11. (in Chinese)
- [9] 张荣繁, 李雄兵, 张书增, 等. 材料非线性衰减系数的二次谐波测量方法研究[J]. 声学学报, 2017, 42(2): 223-229.
ZHANG R F, LI X B, ZHANG S Z, et al. Research on nonlinear acoustic attenuation coefficients of material based on second harmonic measurement [J]. Acta Acustica, 2017, 42(2): 223-229. (in Chinese)
- [10] 温和, 滕召胜, 王永, 等. 改进加窗插值 FFT 动态谐波分析算法及应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 270-277.
WEN H, TENG Z S, WANG Y, et al. Improved windowed interpolation FFT algorithm and application for power harmonic analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 270-277. (in Chinese)
- [11] BREAZEALE M A, PHILIP J. Determination of third order elastic constants from ultrasonic harmonic generation measurements [C] // Physical Acoustics: Principles and Methods. Orlando: Academic Press, Inc., 1984: 1-60.

(责任编辑 梁洁)