

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209674

# 电磁超声非线性效应表征的 Lyapunov 指数分析方法<sup>\*</sup>

蔡智超<sup>1,2,3</sup>, 李 豪<sup>2</sup>, 倪惠发<sup>2</sup>, 张 磊<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室 南昌 330013; 2. 华东交通大学电气与自动化工程学院 南昌 330013; 3. 无损检测技术福建省高校重点实验室 福清 350300)

**摘 要:**针对金属疲劳损伤非线性效应非接触式检测需求及其低信噪比问题,提出电磁超声方案对非线性效应进行信号拾取,并采用 Duffing 混沌系统实现对金属疲劳程度定量评估,进而依据相轨图和 Lyapunov 指数表征材料疲劳演变非线性特性。采用有限元方法分析铝合金疲劳损伤演变过程,基于材料 Murnaghan 模型和微裂纹等效弹簧模型,研究疲劳损伤演变过程中相对非线性系数变化规律;进而探究 Duffing 混沌系统对于非线性效应特征提取的抗噪能力,当信噪比在 20 dB 时,相对非线性系数误差为 132.12%,而 Lyapunov 指数误差为 8.82%,因而 Lyapunov 指数较非线性系数而言有显著的抗噪能力;此外,基于对铝合金疲劳检测进行实验研究,验证了电磁超声非线性效应 Lyapunov 指数表征分析方法的可行性及准确性。研究结果表明, Lyapunov 指数能够有效应对电磁超声非线性检测过程中低信噪比问题,从而提升非线性特征拾取的灵敏度和可重复性,进一步增强电磁超声等非接触式超声检测方法在疲劳在线检测演变的工程应用的贡献。

**关键词:**非线性电磁超声; Lyapunov 指数; 疲劳损伤; 混沌系统

**中图分类号:** TH878 TB551 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.20

## Electromagnetic ultrasonic nonlinear effects for the characterization of Lyapunov exponential analytical method

Cai Zhichao<sup>1,2,3</sup>, Li Hao<sup>2</sup>, Ni Huifa<sup>2</sup>, Zhang Lei<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Fujian Polytechnic Normal University, Fuqing 350300, China)

**Abstract:** Aiming at the non-contact detection needs of nonlinear effects of metal fatigue damage and its low signal-to-noise ratio, an electromagnetic ultrasonic scheme is proposed to collect signals for nonlinear effect. The Duffing chaotic system is used to quantitatively assess the fatigue degree of metal. Then, the nonlinear characteristics of material fatigue evolution are characterized according to the phase trajectory diagram and the Lyapunov index. In this article, the evolution process of fatigue damage of aluminum alloy is analyzed by the finite element method, and the relative nonlinear coefficient change law during the evolution of fatigue damage is studied based on the material Murnaghan model and the micro-crack equivalent spring model. In addition, the noise immunity of the Duffing chaotic system for the extraction of nonlinear effect features is investigated. When the signal-to-noise ratio is 20 dB, the relative nonlinearity coefficient error is 132.12%, while the Lyapunov index error is 8.82%. Therefore, the Lyapunov index has significant noise immunity compared with the nonlinear coefficient. In addition, based on the experimental study of fatigue detection of aluminum alloy, the feasibility and accuracy of the Lyapunov index characterization and analysis method of nonlinear effect of electromagnetic ultrasound are evaluated. Results show that the Lyapunov index can effectively address the problem of low signal-to-noise ratio in the process of electromagnetic ultrasonic nonlinear detection. In this way, the sensitivity and repeatability of nonlinear feature picking are improved, and the contribution of non-contact ultrasonic detection methods is further enhanced, such as electromagnetic ultrasonic in the evolution of fatigue online detection.

**Keywords:** nonlinear electromagnetic ultrasound; Lyapunov index; fatigue damage; chaotic systems

收稿日期: 2022-04-23 Received Date: 2022-04-23

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51807065)、无损检测技术福建省高校重点实验室(S2-KF2007)项目资助

## 0 引 言

为了努力实现碳中和,各种工业设备正朝着高效、服役寿命长和安全的趋势发展,这将明显地提高能源的利用率。在航空航天、船舶、核电、电气自动化等重要工程领域,有些重要的部件在长期服役的过程中,受到温度、压强、外载等综合因素作用,如核电站随着服役年限的增加,管道以及阀门所采用的 304 不锈钢材料受到高温高压的环境下,逐步形成微裂纹,降低疲劳寿命。尽管现代科学技术不断创新,但在生产过程中难免存在微小缺陷。起初表现为位错、滑移带和微裂纹,加上受到载荷过大、温度过高及严重腐蚀等影响,会在服役部件内部结构、表面或近表面发生裂纹萌生进而不断扩展形成宏观裂纹<sup>[1]</sup>。研究表明,在宏观裂纹产生之前的早期疲劳损伤、裂纹萌生以及扩展阶段占整个寿命周期的 85% 左右,然而金属材料内部一旦产生宏观裂纹,金属材料将会立即失效。因此,疲劳损伤各阶段的寿命预测,将对金属材料的工程应用具有非常重要的指导价值<sup>[2]</sup>。

传统的线性超声对于金属结构中的不连续体具有较高的灵敏性,其主要是利用超声波传播过程中的衰减差异、声速变化、方向改变等线性特性进行损伤检测。然而早期疲劳损伤主要体现在微裂纹的萌生以及材料早期塑性形变上,其裂纹尺度为微米级别,根据线性超声对裂纹尺度检测需超过半波长原理,需采用几十兆甚至上百兆超声波频率进行检测,由于高频超声衰减极快因而上述方案在经济上、可行性上均难以实现。对于微米级别裂纹及材料早期塑性形变,有研究表明,其与超声波相互作用会引起强烈的非线性响应<sup>[3]</sup>,进而产生高次谐波<sup>[4]</sup>、次谐波<sup>[5]</sup>、直流分量和混频信号等现象<sup>[6-7]</sup>。因此,非线性超声检测方法可以有效克服线性超声对疲劳损伤不敏感的缺点。前人研究表明,非线性超声检测对于金属材料的早期疲劳损伤有良好的检测效果<sup>[8]</sup>,如铝合金板材疲劳损伤检测<sup>[9]</sup>、2024 铝/环氧树脂胶黏界面性能劣化检测<sup>[10]</sup>、35CrMoA 钢材料疲劳检测<sup>[11]</sup>等,并获得较好的检测效果。

值得关注的是,传统的非线性超声会存在一系列的实际应用困难,如耦合剂将引入额外的非线性、被测试件表面需相对平整、不宜在线进行非线性测量等<sup>[12-13]</sup>。以上限制的主要原因,来源于传统的压电超声为接触式超声,需通过耦合剂在平整被测试件表面贴合并进行非线性超声检测。现今,非接触式超声也逐步进入非线性超声的应用领域,如激光超声<sup>[14]</sup>、电磁超声<sup>[15]</sup>、空气耦合超声<sup>[16]</sup>等。与传统的超声检测技术相比,非线性电磁超声具有精度高、不需要耦合剂、非接触、适于高温检测以及

容易激发各种超声波形等。然而电磁超声在非线性超声应用中最大的问题在于其换能效率。需采用较压电超声换能器更强的激励才能激发有效的超声波幅值,此外,电磁超声换能器作为接收端也更难采集到非线性超声信号,极易淹没在噪声信号中。

对于已有的非线性超声信号处理方法,常见的有 3 种类型:第 1 种是先利用信号处理方法对接收的声波信号进行消噪,如希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform) 去噪<sup>[17-18]</sup>、集合经验模态分解 (ensemble empirical mode decomposition, EEMD) 去噪<sup>[19]</sup>、变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 去噪<sup>[20]</sup>等,而后再基于快速傅里叶变化,求解出对应的谐波幅值;第 2 种是采用变换的方式以提升谐波特征,如时间反转方法<sup>[21]</sup>;第 3 种是采用其他的特征量参数进行非线性效应的表征,如动态小波指纹方法<sup>[22]</sup>、脉冲反转法<sup>[23]</sup>、铁素体不锈钢晶粒度法<sup>[24]</sup>等。针对非接触式超声拾取的声波信号过于微弱,抗噪能力不强,上述方案并不能有效实现非线性超声信号的有效提取分离,因而对于非接触式超声检测的声波信号处理也将更具有挑战。

综合前人的研究,本文有两个创新点。1) 验证了 Halbach 阵列电磁超声换能器对于非线性纵波的接收可行性。2) 基于混沌分形理论,采用 Lyapunov 指数定量表征 7075 铝合金材料疲劳程度,进一步改善微弱非线性信号特征提取问题。

## 1 基于 Lyapunov 指数的非线性效应表征方法

### 1.1 非线性效应介绍

金属在循环外力作用下,会产生疲劳损伤。金属早期疲劳损伤从完好状态会经历:塑性变形、微裂纹萌生、裂纹扩展 3 个阶段。由早期疲劳损伤阶段可知,金属疲劳损伤的非线性效应主要来源于材料非线性和裂纹非线性。

金属在塑性变形阶段,非线性效应主要为材料非线性,因材料发生不可逆形变,材料内部位错、滑移与晶孪增多,局部区域表现出明显的非线性应力应变,使得该区域的超声波产生明显的非线性扰动,产生高次谐波<sup>[25]</sup>。

由非线性胡克定律:

$$\sigma = E\varepsilon(1 + \beta\varepsilon + \dots) \quad (1)$$

式中: $\beta$  为二阶非线性系数, $E$  为弹性模量, $\sigma$  为应力; $\varepsilon$  为应变。

根据微扰动原理,设:

$$u(d, t) = u_1(d, t) + \beta u_2(d, t) \quad (2)$$

式中: $u_1(d, t)$  为线性位移分量; $u_2(d, t)$  为非线性位移分量; $t$  为声波传播时间; $d$  为声波传播距离。

联立上式,忽略  $\beta$  的高阶项,波动方程的近似解:

$$u(d,t)=A_1\cos(kd-\omega t)-\frac{\beta k^2 A_1^2 d}{8}\cos(2kd-2\omega t)$$

(3)

式中:  $A_1$  为基波幅值;  $k$  为波数。

在微裂纹萌生与扩展阶段,非线性效应主要来源于闭合裂纹。Drinkwater<sup>[26]</sup>将闭合裂纹模型简化为二次方程,并验证了闭合裂纹的非线性效应。因裂纹的开合引起刚度变化,可采用双线性弹簧模型对闭合裂纹进行模拟。

当闭合裂纹存在时,声波的传播关系可表示为:

$$y(t)=\alpha\sin(\omega t+\phi)+\delta\sin^2(\omega t+\phi)+q(t)$$

(4)

式中:  $\sin(\omega t+\phi)$  为声波输入信号,  $y(t)$  为输出信号;  $\alpha$  与  $\delta$  为声波信号系数;  $\omega$ 、 $\phi$  为声波的角频率、初相位;  $q(t)$  为噪声,当输入信号较强时,噪声可忽略。

通过上分析可知,声波在传播过程中,随着材料损伤与微裂纹的产生,二次谐波分量逐渐积累,损伤程度越大,二次谐波含量越高。故二次谐波幅值也可有效地反映材料损伤程度。

1.2 Lyapunov 指数分析方法

针对微弱信号的 Lyapunov 指数分析,需要经过构建系统、矩阵与正交化计算,最终求得 Lyapunov 指数。

检测信号输入 Duffing 混沌系统中可表示为:

$$\ddot{x}+c\dot{x}-x^3+x^5=F\cos(\omega t)+A\sin(\omega t)+e(t)$$

(5)

式中:  $x$  为位移;  $v$  为速度;  $t$  为时间;  $c$  是系统的阻尼比;  $(-x^3+x^5)$  是非线性恢复项;  $F$  为策动力幅值;  $\omega$  为角频率,  $A$  为待测信号幅值,  $e(t)$  为噪声<sup>[27]</sup>。

由式(5)可知,当待测信号频率与 Duffing 振子方程频率相同时,相当于增大了  $F$  值,由于系统对初值较为敏感,选择适当的  $F$  值,可使系统状态发生改变。Lyapunov 指数是混沌系统的重要指标,可用于对待测信号的定量分析。求解 Lyapunov 指数时,需将 Duffing 振子方程构建为三维自治系统:

$$\begin{cases} \dot{x}=v \\ \dot{v}=-cv+x^3-x^5+F\cos(\omega t)+A\sin(\omega t)+e(t) \\ \dot{t}=1 \end{cases}$$

(6)

对于两个相邻的无限接近的轨道,用  $\Delta x_i(t)=x_{i\alpha}(t)-x_{i\beta}(t)$  表示两条轨道的分离值,  $\Delta x_i(0)$  为初值时在  $i$  维方向上的分离值,以此构建一个  $n$  维的球体空间,随着时间的变化,轨道演变,使球体逐渐变形为以  $\Delta x_i(t)$  为主轴长的椭圆球体。对于  $n$  维的混沌系统,可计算得到  $n$  维系

统在  $i$  方向上的 Lyapunov 指数:

$$L_i=\lim_{t\rightarrow\infty}\frac{1}{t}\ln\frac{\|\Delta x_i(t)\|}{\|\Delta x_i(0)\|}$$

(7)

式中:  $\|\cdot\|$  为欧几里得范数。对于连续系统,相邻轨道的分离量可以表示在其切空间中,通过 Jacobian 迭代算法进行求解,由于各个向量的演化过程都会向最大 Lyapunov 指数方向靠拢,还需进行 Schmidt 正交化对新向量一直进行置换改变 (Gram-Schmidt renormalization, GSR),最终求得 Lyapunov 指数。

由于构建的混沌系统为三维,由式(7)可知,系统求解可得 3 个 Lyapunov 指数,分别为  $L_x$ 、 $L_y$ 、 $L_z$ 。由于 GSR 对  $L_x$  没有影响,此方向代表着增长速度最大,变化更明显。故根据  $L_x$  的数值变化对系统进行有效的定量判别,  $L_x$  的符号可表示混沌系统状态,即  $L_x<0$ ,系统为周期态,反之为混沌态。

2 Lyapunov 指数非线性特征提取影响参数研究

2.1 数值仿真模型和结果分析

在拉伸载荷的循环外力作用下,金属疲劳损伤首先是塑性形变,进而在此基础上有少量微裂纹萌生,随着微细裂纹的增加并形成宏观裂纹,从而突发性的扩展与失效。其中裂纹萌生的位置存在不确定性,且微观裂纹的产生不一定在试件表面,试件的内部同样产生微观裂纹。为了有效的检测早期疲劳损伤,采用超声纵波模型对金属疲劳损伤进行仿真分析。为了更好地模拟疲劳损伤,文章引入超弹性材料中 Murnaghan 模型模拟金属的塑性变形,其弹性常数如表 1 所示;采用闭合裂纹等效弹簧模型模拟金属疲劳损伤过程中微裂纹的萌生与扩展<sup>[28]</sup>,等效弹簧模型参数如表 2 所示。图 1 为仿真模型接收端及其局部放大网格细化剖分。

表 1 试件弹性常数

| Table 1 Specimen elastic constant |           |       |      |      | GPa  |
|-----------------------------------|-----------|-------|------|------|------|
| 材料                                | $\lambda$ | $\mu$ | $l$  | $m$  | $n$  |
| 铝合金                               | 51        | 26    | -250 | -330 | -350 |

表 2 等效弹簧参数

| Table 2 Equivalent spring parameters |     |     |       |       |         |
|--------------------------------------|-----|-----|-------|-------|---------|
| 参数                                   | $a$ | $b$ | $K_1$ | $K_2$ | $\zeta$ |
| 数值                                   | 4   | 5   | -250  | -330  | $10^6$  |

仿真模型中试件尺寸为  $70\times 30\text{ mm}$ ; 永磁铁按照 Halbach 阵列排列,剩余磁通密度为 1 T;线圈为回形线



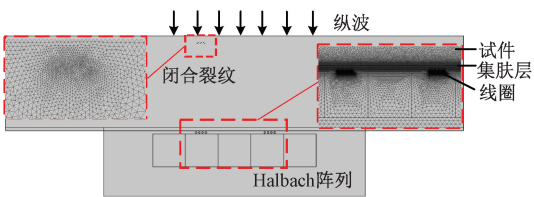


图 1 非线性电磁超声模型

Fig. 1 Nonlinear electromagnetic ultrasound model

圈;激励电流为汉宁窗调制的正弦电流,其电流幅值为 20 A,中心频率为 2.25 MHz,周期为 5。仿真模型中的闭合裂纹是由装配体设置模拟,裂纹长 2 mm,在固体力学中将裂纹界面设置为接触弹簧模型,使其受力时实现透射与反射。在完成模型几何部分后,需对几何模型材料赋予与网格剖分,网格剖分需尽量保持小尺寸与均匀,为了保障模型求解精度与速度,一般将最大网格单元设置

为超声波波长的 1/5。本模型激励电流频率为 2.25 MHz,纵波在铝合金中的传播速度为 6 300 m/s,故最大网格单元的尺寸小于 0.56 mm。为了避免仿真结果在传播过程中被试件边界的反射波影响,须在试件的左右边缘添加低反射边界。

本模型中含有材料非线性与裂纹非线性,声波受材料与裂纹的影响发生畸变,声波在试件中的传播过程如图 2 所示。可以看出,声波到达裂纹时,裂纹对声波产生反射与透射作用,声波与反射波产生叠加,使得裂纹上端声波幅值明显上升。而声波传播至 4  $\mu$ s 时,经过裂纹后的声波幅值明显比右侧声波幅值低,声波在裂纹处产生明显的衰减。而在裂纹处,由于裂纹之间存在相互反射,使得声波远离裂纹后,裂纹周围仍存在反射波。虽然裂纹会影响到声波幅值,但声波整体的传播方向以及波形不发生变化。

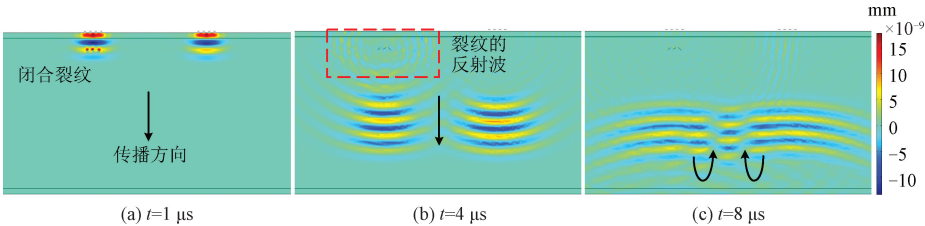


图 2 纵波声波传播

Fig. 2 Longitudinal wave propagation

2.2 不同阶段的疲劳损伤非线性超声信号分析结果

为了更好地实现对早期疲劳损伤模拟,根据金属早期疲劳损伤的发展阶段,分别建立不同的仿真模型,模型 1~4 分别对应表示金属疲劳早期损伤的累积渐变过程,其模型中各参数的设置如表 3 所示。模型 2 模拟塑性损伤阶段,此阶段为材料内部位错大量积累阶段,非线性效应主要来源于材料非线性,可通过改变 Murnaghan 弹性常数来模拟;模型 3 模拟裂纹的萌生,此阶段材料内部位错仍然累积,但有微裂纹的产生,通过同时改变 Murnaghan 弹性常数和闭合裂纹的数量与长度进行模拟;模型 4 为裂纹扩展阶段,此时非线性效应主要来源于裂纹,材料内部位错变化几乎不对其产生影响。

表 3 不同损伤阶段仿真中参数变化

Table 3 Parameter variation in simulation at different damage stages

| 名称   | 损伤阶段           | $l, m, n/\text{GPa}$ | 裂纹数 |
|------|----------------|----------------------|-----|
| 模型 1 | 无损伤            | 0、0、0                | -   |
| 模型 2 | 塑性损伤           | -250、-330、-350       | -   |
| 模型 3 | 塑性损伤加剧,微裂纹少量萌生 | -500、-600、-700       | 3   |
| 模型 4 | 微裂纹大量萌生        | -500、-600、-700       | 6   |

分别对不同疲劳损伤阶段的仿真模型进行求解,为了避免建模过程中产生误差,需保持各模型的尺寸与其他设置完全相同。对接收线圈中的接收电压进行分析,各仿真模型的接收信号如图 3 所示;并对各模型进行相对非线性系数的计算,结果如图 4 所示。

由图 3 可知,随着仿真模型中模拟损伤程度的加深,接收信号频率幅值产生明显变化。其中基波频率幅值逐渐降低,二次谐波频率幅值逐渐上升。由图 4 可知,相对非线性系数随着疲劳损伤的加剧呈现单调上升的趋势。图 3(a)中,模型不含任何非线性效应,声波信号中仅含有 2.25 MHz 频率;图 3(b)中,模型仅含有材料非线性,受三阶弹性常数的影响,声波在传播过程中产生二次谐波并累积,使得时频图中 4.5 MHz 频率处也有微弱幅值。由图 3(a)、(b)相比可知,试件早期疲劳损伤前期,试件中的非线性源主要来自材料非线性,使得二次谐波产生累积。由图 3(c)、(d)相比可知,材料非线性不变的情况下,扩展与增多裂纹,使得声波中的二次谐波幅值增加,基波持续减弱。表明试件早期疲劳损伤后期,由裂纹非线性占据非线性超声的主导地位。不同损伤阶段的仿真结果表明:随着疲劳损伤程度的加深,材料非线性与裂纹非线性呈现出渐变过程,使得相对非线性系数呈上升趋势。

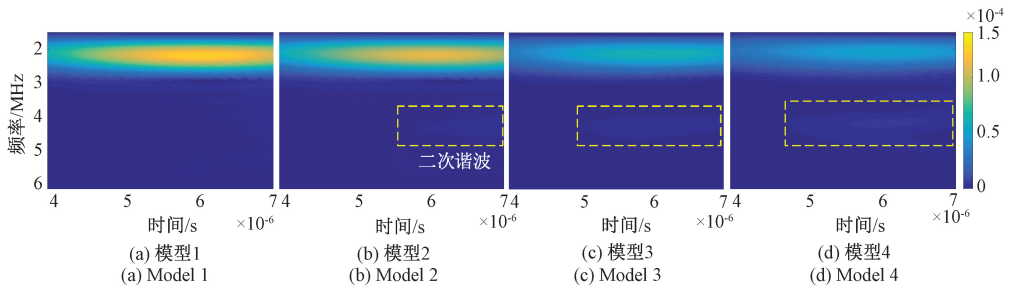


图 3 各模型接收电压的时域分析

Fig. 3 Time-frequency analysis of received voltage of each model

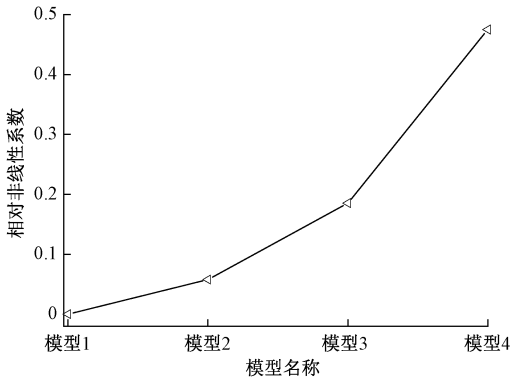


图 4 各模型接收电压的时域分析

Fig. 4 Time-frequency analysis of received voltage of each model

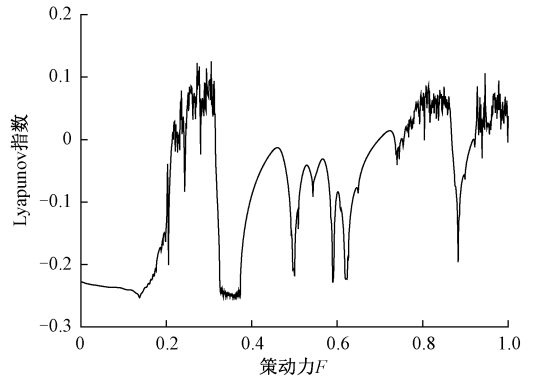


图 5 策动力与 Lyapunov 指数的关系

Fig. 5 The relationship between the driving force and the Lyapunov exponent

### 2.3 Lyapunov 指数分析

将仿真模型中的接收信号输入 Duffing 混沌系统中,由式(5)可知,混沌系统的输出结果仅与输入信号中含有混沌系统相同频率的幅值大小有关,故将混沌系统的固有频率设置为 4.5 MHz。在对声波信号正式处理之前,需对系统策动力进行筛选以及对声波信号进行放大与缩小。由于声波幅值存在太小或者过大问题,与系统策动力的取值范围不符,故对声波信号进行调节。基于无损损伤状态的仿真信号,作出系统 Lyapunov 指数随策动力  $F$  增大的变化曲线,选取合适的策动力  $F$ ,使系统处于混沌态向周期态转变的临界状态,而 Lyapunov 指数将随着二次谐波幅值的增大而呈现单调变化。Lyapunov 指数与策动力之间的关系如图 5 所示。

图 5 中,当 Lyapunov 指数为 0 时,分别对应着不同的策动力  $F$ ,选取 Lyapunov 指数随策动力变化最明显的区段,取  $F=0.31$ 。确定策动力  $F$  后,不再改变混沌系统中的任何参数,分别对接收信号进行处理,求得 Lyapunov 指数,各模型接收信号的 Lyapunov 指数,如图 6 所示。可以观测到,随着疲劳损伤的增加 Lyapunov 指数也呈现出单调递增的趋势,与相对非线性系数的趋势一致。

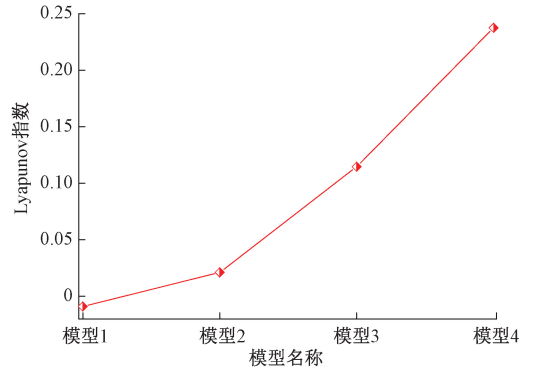


图 6 各模型接收信号的 Lyapunov 指数

Fig. 6 Lyapunov exponents of received signals of each model

### 2.4 噪声影响下的非线性效应提取

仿真模型中的结果更趋于理想化,在实际的检测中,受环境以及非线性电磁超声换能效率低的影响,接收信号中包含大量的噪声,使得检测结果极易产生误差。通过对仿真信号添加随机噪声,分析 Duffing 混沌系统 Lyapunov 指数对噪声的免疫能力。选取模型 2 中的接收信号,分别在声波信号中,添加不同水平的随机噪声。通过对不同信噪比下的信号进行频谱分析,计算相对非线性

性系数,并与 Lyapunov 指数进行对比分析。其 Lyapunov 指数的求解过程如图 7 所示。

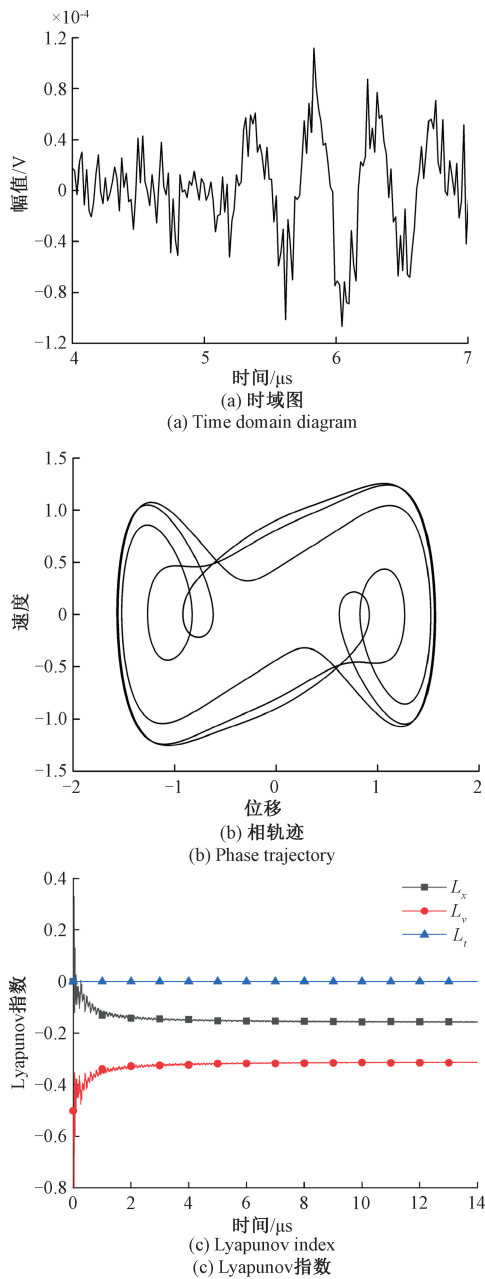


图 7 SNR=0.5 的信号处理  
Fig. 7 Signal processing with SNR=0.5

信噪比不同时的计算结果如表 4 所示。由表 4 可知,随机噪声的增加对超声信号的影响越来越明显,相对非线性系数与 Duffing 混沌系统 Lyapunov 指数方法对损伤信息的表征误差也越来越大。比较相同信噪比下两种表征方法的误差, Lyapunov 指数的误差明显小于相对非线性系数的误差。两种误差比较的结果表明,相较于非线性系数分析,随机噪声对 Duffing 混沌系统的影响程度较小, Duffing 混沌系统对于一定程度的混入噪声有较强

的免疫能力,也表明 Duffing 混沌系统的 Lyapunov 指数对微弱信号的表征能力较强。但随着信噪比的逐渐降低,系统对非线性超声中的二次谐波的识别能力也会逐渐减弱。

表 4 特征值误差分析  
Table 4 Eigenvalue error analysis

| 信噪比 | 相对非线性系数 | 误差/%   | Lyapunov 指数 | 误差/%  |
|-----|---------|--------|-------------|-------|
| INF | 0.057 7 | —      | -0.102 1    | —     |
| 40  | 0.057 9 | 0.17   | -0.103 7    | 0.15  |
| 30  | 0.060 4 | 4.55   | -0.101 4    | 0.68  |
| 20  | 0.134 1 | 132.12 | -0.093 1    | 8.82  |
| 10  | 0.170 9 | 195.89 | -0.086 9    | 14.88 |
| 5   | 0.263 7 | 356.60 | -0.135 6    | 32.81 |
| 0.5 | 0.442 8 | 666.63 | -0.154 0    | 50.83 |

综上所述, Duffing 混沌系统的 Lyapunov 指数可以有效对金属疲劳损伤进行表征,同时 Lyapunov 指数具有较强的噪声免疫能力。信噪比在 20 dB 以内时,噪声对 Lyapunov 指数的误差基本上不受影响,能够达到实际需求。

### 3 Lyapunov 指数在非线性电磁超声检测中的应用研究

#### 3.1 非线性电磁超声检测试验系统

本文研究的对象为航空材料 7075 铝合金。首先将 7075 铝板在 SXL-1200C 马弗炉中进行热处理,炉温  $470^{\circ}\text{C}$ ,加热 2.5 h,加热完成后进行水冷,实现对 7075 铝合金的热处理。随后对铝板按照图 8(a)中的试件尺寸大小进行切割。最后利用高频疲劳试验机对试件进行拉伸疲劳试验。通过材料的屈服强度与最小受力面积计算试件所能承受的最大应力。依据高周疲劳试验的要求,材料受力要小于极限值,故取 12 kN 的力作为试验加载应力,试验加载载荷为正弦波,加载频率为 80 Hz。

试件个数共有 8 个,对其进行依次编号,如表 5 所示。其中 1#试件为完好试件,不进行疲劳试验;2#试件为完全断裂试件,其疲劳断裂周期数为 50 多万次。依据疲劳断裂试件周期数,选取疲劳周期 8 万次以内为早期疲劳;以此制备不同早期疲劳损伤的试件,以备非线性电磁超声检测。

非线性电磁超声主要利用声波经过疲劳损伤后,接收的反射波与透射波内含有试件内部损伤信息,通过对声波特性分析对疲劳损伤进行表征。非线性电磁超声检测试验采用一发一收的形式,主要包含激励端(PZT)、接



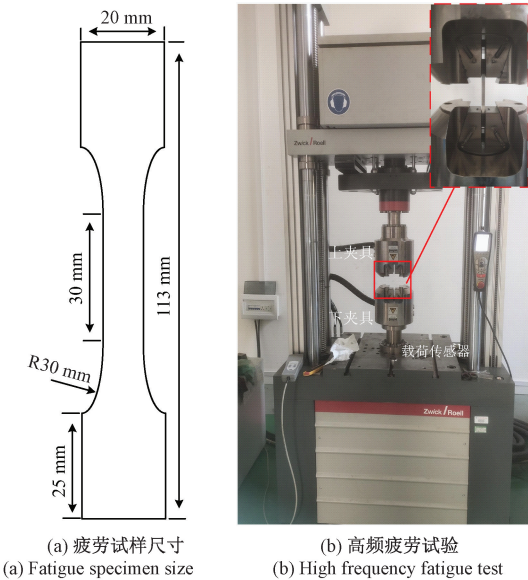


图 8 试件制备

Fig. 8 Specimen preparation

表 5 疲劳试样参数

Table 5 Fatigue specimen parameters

| 试件编号    | 1# | 2#    | 3#   | 4#   | 5#   | 6#   | 7#   | 8#   |
|---------|----|-------|------|------|------|------|------|------|
| 疲劳周期/万次 | -  | 50.68 | 0.50 | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 8.00 |

收端 (EMAT)、SNAP-5000 系统、阻抗匹配器、双工器、4.5 MHz 的带通滤波器、数字示波器、计算机终端与被测试件。如图 9 所示。线圈激励电流为中心频率为 2.25 MHz 的正弦信号,接收端 EMAT 为 Halbach 阵列的纵波探头。

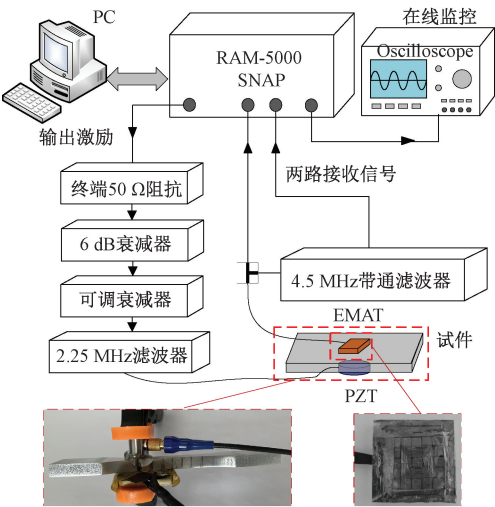


图 9 试验平台示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the test platform

3.2 谐波检测试验及结果分析

分别对 3#~8#号试件进行检测,由于拉伸疲劳试验过程中,疲劳损伤在应力集中部分随机产生,而检测探头尺寸有限,故检测试验中需将试件应力集中部分进行区域划分,使得检测结果更加精确。应力集中区域长 30 mm,每 2 mm 间隔设置一个检测点,每个检测点重复检测 5 次,使得到的试验数据更加精确,每检测点记录 3 次结果,并对试验结果取平均值。将接收到的检测信号进行频谱分析,分别记录每组试验频谱图中的基波幅值与二次谐波幅值,并以此对相对非线性系数进行求解。检测时域信号的频谱分析如图 10 所示。

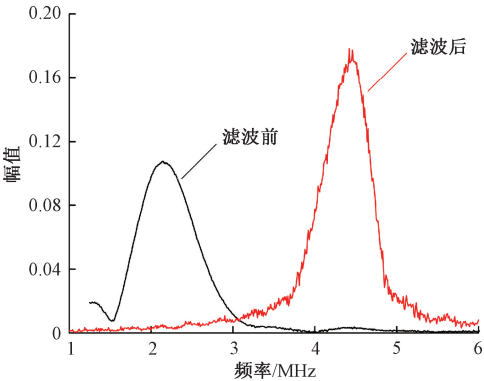


图 10 频谱幅值

Fig. 10 Spectral magnitude

图 10 中,滤波前的接收信号中二次谐波幅值很微弱,同时受噪声的影响,使得谐波幅值的记录存在较大的误差,故另外在接收端分出一路经过 4.5 MHz 带通滤波器的信号,并对信号进行了 40 dB 的放大。滤波后,信号中不存在基波幅值,仅含有二次谐波。

为了验证非线性电磁超声对早期疲劳损伤检测的准确性,同时采用非线性压电超声试验对各疲劳试件进行检测,并使各试件的检测点与非线性电磁超声保持一致。基于滤波后的二次谐波幅值与滤波前基波幅值的平方,计算相对非线性系数。将每个试件中各检测点的相对非线性系数汇总求平均值,得到每个试件与相对非线性系数的关系,由于两种方法的倍数大小不一,分别对两种结果进行归一化处理,结果如图 11 所示。

图 11 中,相对非线性系数在 4#试件与 5#试件之间,有明显的下降趋势。可能在试件的制备过程中,影响到了试件的性能,使得 5#试件的疲劳损伤程度变化不明显。但两种检测方法的相对非线性系数的变化趋势保持一致,同增同减。且非线性压电超声试验的相对非线性系数比非线性电磁超声大,原因在于压电检测中耦合剂本身存在非线性,而非线性电磁超声检测则不存在此影响。通过试验对比分析可知,非线性电磁超声可有效的检测早期疲劳损伤。

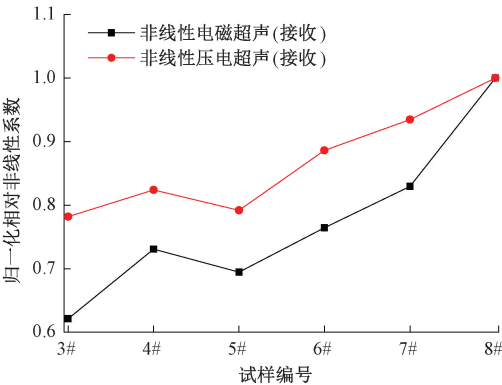


图 11 不同试样的相对非线性系数

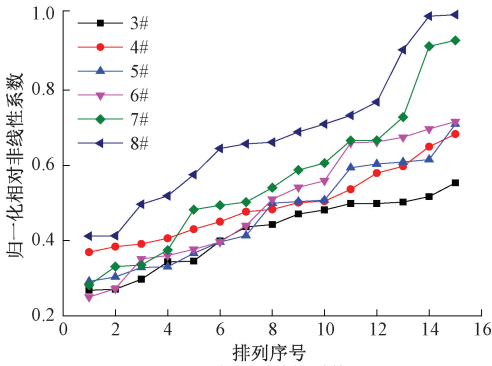
Fig. 11 Relative nonlinear coefficients of different samples

3.3 Lyapunov 指数对于疲劳损伤的表征比对

为了提高二次谐波幅值,非线性电磁超声试验中对接收信号进行了滤波与放大,这也是对信号处理的一种方法,但是这种方法不仅增加工作量还存在效率低等问题。而 Duffing 混沌系统针对微弱信号有较强的识别能力,且免疫噪声能力较好。同时实验过程中无需对信号的二次谐波进行滤波与放大,可直接对接收的时域信号进行处理分析,使信号处理更加方便准确。

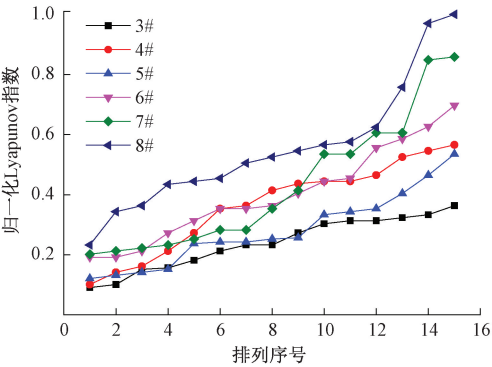
将非线性电磁超声检测试验得到滤波前的检测信号,输入到 Duffing 混沌系统当中,计算各试件每个检测点的 Lyapunov 指数。对信号处理之前,需将完好试件的检测信号输入 Duffing 混沌系统进行最优策动力  $F$  的选取,使得 Duffing 混沌系统处于周期态与混沌态的临界状态,通过分析选取策动力  $F=0.561$ 。由于每个检测点有 5 组数据,对信号处理后,剔除 5 组数据中 Lyapunov 指数的最大值与最小值,并取平均值。由于疲劳损伤发生位置的随机性,故将每个试件不同检测点求得的数值进行升序排列。因为相对非线性系数与 Lyapunov 指数的单位与数值不统一,分别对其进行归一化处理,其结果如图 12 所示。

通过对不同疲劳周期试件的检测波形进行 Duffing 混沌系统处理,并对比相对非线性系数变化趋势。从图 12 中可知,各疲劳试件检测点的结果具有一致性,通过归一化对比发现,两者的变化趋势均呈现出单调递增,且 Lyapunov 指数的变化率更高,是相对非线性系数的两倍。在 7#与 8#试件检测结果中,可明显看出特征值在趋势末端产生明显上升,说明在 7#与 8#试件中,有相较于其他试件更严重的疲劳损伤产生,使得检测结果产生跃变。对各疲劳试件所有检测点进行平均求值,可得特征值随疲劳周期变化的整体趋势。对相对非线性系数与 Lyapunov 指数进行对比分析,其变化曲线如图 13 所示。



(a) 相对非线性系数

(a) Relative nonlinear coefficient



(b) Lyapunov指数

(b) Lyapunov index

图 12 不同试件各检测点的特征值

Fig. 12 The eigenvalues of each detection point of different specimens

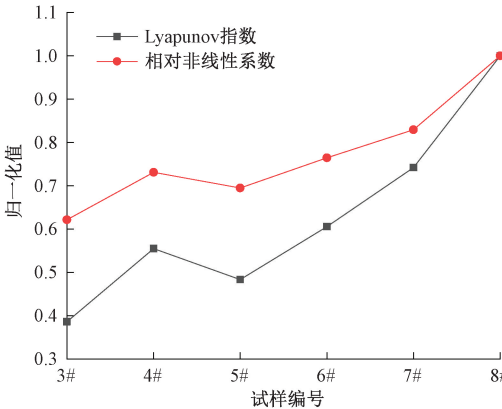


图 13 不同试件的归一化特征值

Fig. 13 Normalized eigenvalues of different specimens

由图 13 可知,随着疲劳周期的增加,相对非线性系数与 Lyapunov 指数变化趋势一致。特征值的上升趋势表明,不同疲劳周期试件的应力集中区域整体的早期损伤在持续增加,且 Lyapunov 指数的变化率明显高于相对非线性系数。因此, Lyapunov 指数可以有效的表征试件在疲劳试验过程中的疲劳损伤变化情况,同时也有效的



表征金属疲劳损伤中的非线性特性。试验结果表明:与常用的相对非线性系数表征疲劳损伤程度相比, Lyapunov 指数有更好的识别效果以及免疫噪声的能力。

## 4 结 论

本文基于非线性电磁超声纵波方法对 7075 铝合金的早期疲劳损伤进行了仿真与实验分析,并重点研究了 Duffing 混沌系统中 Lyapunov 指数对早期疲劳损伤表征的可行性,得出如下结论:

1) 通过对不同疲劳周期的 7075 铝合金进行了非线性电磁超声纵波检测仿真与实验分析,其仿真分析与实验结果保持一致性,相对非线性系数随着疲劳周期的增加而上升。通过与非线性压电超声检测实验对比分析,实验结果表明:两种检测结果也具有 consistency,且非线性电磁超声检测可消除接收端耦合剂引入的非线性效应,非线性电磁超声纵波检测可有效的检测金属早期疲劳损伤。

2) 针对非线性电磁超声仿真接收信号进行了加噪处理。对不同加噪处理的信号进行相对非线性系数与 Lyapunov 指数求解,当信噪比在 20 dB 以内时, Lyapunov 指数基本不受噪声的影响,而随着噪声的增加,相对非线性系数的误差将近是 Lyapunov 指数的百倍,结果表明,混沌系统中 Lyapunov 指数具有较强的免疫噪声的能力。

3) 通过对非线性电磁超声检测结果进行 Lyapunov 指数求解分析,并与传统的非线性电磁超声检测的相对非线性系数进行对比。实验结果表明,随着金属材料疲劳周期的增加, Lyapunov 指数与相对非线性系数的变化趋势保持较好,且 Lyapunov 指数对疲劳损伤的识别具有较高的灵敏度,可有效识别金属材料早期疲劳损伤。

## 参考文献

[1] 谭季波,王翔,吴欣强,等. 316LN 不锈钢管状试样高温高压水的腐蚀疲劳行为[J]. 金属学报, 2021, 57(3): 309-316.

TAN J B, WANG X, WU X Q, et al. Corrosion fatigue behavior of 316LN stainless steel hollow specimen in High-Temperature pressurized water [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(3): 309-316.

[2] 龚梦辉,周华西,周光长,等. 极限载荷工况下滚珠丝杠副疲劳弹性寿命研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 37-47.

GONG M H, ZHOU H X, ZHOU CH G, et al. Study on fatigue elastic life of ball screw pair under ultimate load condition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 37-47.

[3] BLANLOEUIL B, ROSE L R F, VEIDT M, et al.

Nonlinear mixing of non-collinear guided waves at a contact interface[J]. Ultrasonics, 2020, 110: 106222.

[4] 焦敬品,李立,高翔,等. 金属板疲劳损伤非线性兰姆波混频检测[J]. 声学学报, 2022, 47(2): 256-265.

JIAO J P, LI L, GAO X, et al. Fatigue detection in metal plate using nonlinear Lamb wave mixing method[J]. Acta Acustica, 2022, 47(2): 256-265.

[5] SOLEIMANPOUR R, NG C T. Scattering analysis of nonlinear Lamb waves at delaminations in composite laminates[J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(11-12): 1311-1323.

[6] YUAN F, YU Y T, LI L F, et al. Investigation of DC electromagnetic-based motion induced eddy current on NDT for crack detection [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7449-7457.

[7] ARENA A, LACARBONARA W. Piezoelectrically induced nonlinear resonances for dynamic morphing of lightweight panels[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 498: 115951.

[8] 门平,董世运,康学良,等. 材料早期损伤的非线性超声诊断[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1101-1118.

MEN P, DONG SH Y, KANG X L, et al. Material early damage diagnosis with nonlinear ultrasound[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1101-1118.

[9] 高立,陈振华,李承庚,等. 铝合金板材疲劳损伤的非线性导波检测[J]. 无损检测, 2020, 42(7): 61-65.

GAO L, CHEN ZH H, LI CH G, et al. Nonlinear guided wave detection of fatigue damage of aluminum alloy plate[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(7): 61-65.

[10] 李立,焦敬品,高翔,等. 黏接界面性能劣化的非线性超声检测研究进展[J]. 科学通报, 2022, 67(7): 621-629.

LI L, JIAO J P, GAO X, et al. A review on nondestructive testing of bonding interface using nonlinear ultrasonic technique [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(7): 621-629.

[11] 于淑敏,朱晨,黄志强. 35CrMoA 钢塑性损伤非线性超声响应有限元模拟[J]. 应用声学, 2021, 40(4): 588-593.

YU SH M, ZHU CH, HUANG ZH Q. Finite element simulation of nonlinear ultrasonic response of plastically deformed 35CrMoA steel [J]. Journal of Applied Acoustics, 2021, 40(4): 588-593.

[12] ANDREADES C, FIERRO G P M, MEO M. A nonlinear

- ultrasonic SHM method for impact damage localisation in composite panels using a sparse array of piezoelectric PZT transducers [J]. *Ultrasonics*, 2020, 108: 106181.
- [13] HUYNH T, HAUGEN G U, EGGEN T, et al. Nonlinearity in a medical ultrasound probe under high excitation voltage[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2020, 68(3): 784-795.
- [14] KOU X, PEI C, CHEN Z, et al. Fully noncontact inspection of closed surface crack with nonlinear laser ultrasonic testing method[J]. *Ultrasonics*, 2021, 114: 106426.
- [15] WANG J J, WEN Z X, PEI H Q, et al. Ultrasonic nonlinear evaluation of tensile plastic damage in Nickel based single crystal superalloy [J]. *NDT & E International*, 2022, 129(1): 102648.
- [16] TORELLO D, THIELE S, MATLACK K H, et al. Diffraction, attenuation, and source corrections for nonlinear rayleigh wave ultrasonic measurements [J]. *Ultrasonics*, 2015, 56: 417-426.
- [17] 孔宪仁, 熊怀, 李海勤, 等. 一种 Hilbert 变换法在非线形系统分析中的应用[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(19): 95-101.
- KONG X R, XIONG H, LI H Q, et al. The modified method of Hilbert transform and application in nonlinear vibration analysis [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(19): 95-101.
- [18] VIEIRA V, COELHO R, DE ASSIS F M. Hilbert-Huang-Hurst-based non-linear acoustic feature vector for emotion classification with stochastic models and learning systems[J]. *IET Signal Processing*, 2020, 14(8): 522-532.
- [19] NIE Z C, WANG K, ZHAO M J. Feature extraction of wood-hole defects using empirical mode decomposition of ultrasonic signals[J]. *NDT and E International*, 2020, 114(1): 102282.
- [20] WANG K, LIU M L, SU Z Q, et al. Analytical insight into “breathing” crack-induced acoustic nonlinearity with an application to quantitative evaluation of contact cracks[J]. *Ultrasonics*, 2018, 88: 157-167.
- [21] SMAGIN N, TRIFONOV A, MATAR O B, et al. Local damage detection by nonlinear coda wave interferometry combined with time reversal [J]. *Ultrasonics*, 2020, 108: 106226.
- [22] 焦敬品, 吕洪涛, 孟祥吉, 等. 超声非线性效应表征的动态小波指纹分析方法[J]. *声学学报*, 2017, 42(5): 560-570.
- JIAO J P, LYU H T, MENG X J, et al. Identification of nonlinear ultrasonic effects using method of dynamic wavelet fingerprint[J]. *Acta Acustica*, 2017, 42(5): 560-570.
- [23] BLANLOEUIL P, ROSE L, VEIDT M, et al. Time reversal invariance for a nonlinear scatterer exhibiting contact acoustic nonlinearity[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 417: 413-431.
- [24] 陈军, 刘国彩, 林莉, 等. 铁素体不锈钢晶粒度的非线性超声表征[J]. *无损检测*, 2018, 40(7): 15-18, 8.
- CHEN J, LIU G C, LIN L, et al. Nonlinear ultrasonic characterization of grain size of ferritic stainless steel[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2018, 40(7): 15-18, 8.
- [25] MASSAAD J, NEER P, WILLIGEN D, et al. Exploiting nonlinear wave propagation to improve the precision of ultrasonic flow meters[J]. *Ultrasonics*, 2021, 116(6): 106476.
- [26] 张闯, 曹晓琳, 刘素贞, 等. 基于累积效应的铝材塑性损伤电磁超声非线性检测[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(19): 3961-3967.
- ZHANG CH, CAO X L, LIU S ZH, et al. Electromagnetic ultrasonic nonlinear detection of aluminum with plastic damage based on cumulative effect[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(19): 3961-3967.
- [27] WU J, YANG F, JING L, et al. Defect detection in pipes using Van der Pol systems based on ultrasonic guided wave [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, 195(1): 104577.
- [28] DELRUE S, ALESHIN V, TRUYAERT K, et al. Two dimensional modeling of elastic wave propagation in solids containing cracks with rough surfaces and friction-Part II: Numerical implementation [J]. *Ultrasonics*, 2018, 82: 19-30.

## 作者简介



蔡智超(通信作者), 2010 年于华东交通大学获得学士学位, 2016 年于河北工业大学获得博士学位, 现为华东交通大学副教授, 主要研究方向为电磁传感器、电磁超声。

E-mail: czchebut@foxmail.com

**Cai Zhichao** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from East China Jiaotong University in 2010 and received his Ph.D. degree from Hebei University of Technology in 2016. He is currently an associate professor at East China Jiaotong University. His main research interests include electromagnetic sensors, and electromagnetic ultrasonic.