

基于 Duffing 振子与传统方法结合的导波检测方法研究*

RESEARCH ON GUIDED WAVE DETECTION METHOD BASED ON Duffing OSCILLATOR AND THE TRADITIONAL METHOD

马延鋆^{**1} 武 静^{***2} 王 岩² 沈宇驰³

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 广州 510000)

(2. 东莞理工学院 机械工程学院, 东莞 523808)

(3. 青海大学 土木水利学院, 西宁 810016)

MA YanJun¹ WU Jing² WANG Yan² SHEN YuChi³

(1. China Railway Design Corporation, Guangzhou 510000, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

(3. School of Civil and Water Resources, Qinghai University, Xining 810016, China)

摘要 超声导波无损检测技术因其检测耗时少、检测范围广等优点,近年来已经成为长距离管线检测领域的一项重要技术。为进一步提高识别精度,提出了利用传统的互相关、小波变换等理论与 Duffing 振子系统相混合的检测新方法。即将采集信号先利用互相关、小波变换进行预处理,然后输入 Duffing 系统进行检测。数值仿真结果表明,基于传统方法与 Duffing 振子结合的混合测量方法,可使检测信噪比下降至 -38.4 dB,低于单独使用 Duffing 振子检测时的检测结果 -23.9 dB,极大地提高了缺陷检测精度和灵敏度。研究结果对于实际工程中延长超声导波的检测范围,提高小缺陷的检测灵敏度具有重要意义。

关键词 无损检测 管道 超声导波 Duffing 振子

中图分类号 TG115.28

Abstract In recent years, ultrasonic guided wave technology has been widely used in nondestructive detection of long distance pipelines due to its advantages of short detection time and wide detection range. In order to further improve the recognition accuracy, a new detection method that combines the theory of cross correlation and wavelet transform with Duffing oscillator system was proposed. The collected signal was pretreated by cross-correlation and wavelet transform, and then input into Duffing system for detection. The results of numerical simulation show that the hybrid measurement method based on the combination of traditional method and Duffing oscillator, can reduce the detection signal-to-noise ratio to -38.4 dB, which is lower than the detection result when Duffing vibrator is used alone -23.9 dB, greatly improving the defect detection accuracy and sensitivity. The research results are of great significance for extending the detection range of an ultrasonic guided wave and improving the detection sensitivity of small defects in practical engineering.

Key words Nondestructive detection; Pipeline; Ultrasonic guided wave; Duffing oscillator

Corresponding author: WU Jing, E-mail: jingjinglulie@163.com

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 12202103), the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2020A1515110666, 2022A1515011324), the Science and Technology Commissioner of Dongguan City (No. 20201800500632), and the Special Projects in Key Fields of Ordinary Universities in Guangdong Province (No. 2022ZDZX3032).

Manuscript received 20230228, in revised form 20230508.

0 引言

近年来,输油气管道在长距离野外和城市内已得

到了广泛应用,尤其是在易燃易爆的石油、天然气等化工类液体物质的运输方面发挥着巨大的作用^[1-2]。在管道损伤检测方面^[3],超声导波在传播过程中存在

*20230228 收到初稿, 20230508 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (12202103), 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2020A1515110666, 2022A1515011324), 东莞市科技特派员项目 (20201800500632), 广东省普通高校重点领域专项 (2022ZDZX3032) 资助。

**马延鋆, 男, 1991 年生, 山西太原人, 汉族, 中国铁路设计集团有限公司工程师, 硕士, 主要研究方向为无损检测。

***武 静 (通信作者), 女, 1988 年生, 山东济宁人, 汉族, 东莞理工学院讲师, 博士, 主要研究方向为故障诊断、信号处理。

的频散性、多模态性和衰减性等复杂特性,使得接收到的缺陷回波信号表现为强噪声下的微弱信号特征,缺陷的精确识别与定位变得越来越困难,在现有的检测设备条件下严重影响了管道超声导波检测效率。基于已有研究^[4-6],为了进一步识别管道中的微弱超声导波信号,主要开展了传统方法和非线性方法的弱导波信号识别研究。传统方法主要指基于相关系数法和小波变换法。非线性方法主要指的是基于 Duffing 系统的混沌检测方法。

基于相关函数进行损伤识别的原理是:当待测导波信号的频率已知时,构造频率与之相同的参考信号,将参考信号与混有噪声的待测信号进行相关计算,经过相关系数^[7]计算后,噪声能得到一定的抑制,周期信号有所增强。信号的相关性运算是针对两个信号序列的一种操作,用于衡量信号之间的相关度并由此提取信号信息。相关函数是在噪声背景下提取有用信息的重要方法,也称为相关滤波,能在混有周期信号的成分中提取特定的频率成分。但该方法对信噪比有一定的要求,在小缺陷检测中效果较差。相关系数与回波信号中导波信号的幅值关系密切,在管道检测方面,当管道中缺陷比较小时,缺陷回波中的导波信号比较微弱,与参考信号计算得到的相关系数较小,明显小于入射波、端面回波计算后的结果。目前用于超声导波信号特征分析处理的方法主要是时频分析,此方法可以将信号同时在时域和频域上展开,提取和激发信号相同部分的导波信号可达到信号消噪的目的。小波变换^[8-10]是一种时频局部化分析方法,可以将信号映射到由一个母小波伸缩、平移而成的一组基函数上去,小波变换的基波相当于一组带通滤波器,可以实现信号在不同频带、不同时刻的合理分离。小波变换和随后发展起来的小波包分解法因其在检测信号突变或瞬态特征方面的优势,被用来进行信号的消噪和缺陷特征提取,并取得了一定的效果。ROSTAMI J 等^[11]结合经验模态分解和小波变换,提出了一种对称经验模态分解方法,并利用该方法进行了覆盖有混凝土层的管道的有效识别,识别出了管道中隐藏的腐蚀特征。张伟伟^[12]³⁷⁻⁵⁴基于小波变换提出了一种适用于管道检测的新方法,并利用小波变换消除噪声的影响,结果表明,该方法可有效定位和评估小噪声下的损伤。虽然离散小波变换具有良好的时频特性,但缺乏方向性和时移不变性,该问题在处理瞬变现象的回波信号时会变得尤为突出。

随着非线性学科不断发展,基于非线性特性的弱信号检测方法不断涌现,如混沌理论和随机共振等。自从 BIRX D L 等^[13]1992 年率先开展了 Duffing 阵

子检测弱正弦信号的试验后,越来越多的学者对这一问题进行了深入研究。姜万录等^[14-15]基于 Duffing 系统间歇混沌特性提出了一种基于最大 Lyapunov 指数分析的微弱信号检测新方法,并将这一方法应用于机械故障诊断中。目前, Duffing 混沌系统检测简单正、余弦信号的有效性已被有效验证^[16]。YANG F 等^[17]利用 Duffing 系统的定性特征相轨迹对弱导波信号进行了有效识别。为了降低待测信号初相位的影响,并进一步确定缺陷位置, WU J 等^[18]¹³⁰⁻¹⁴⁷提出了基于分维数的时移 Duffing 系统检测方法,构造出时移窗函数扫描待测信号分段输入 Duffing 系统,计算系统的分维数随待测信号中心时刻变化的曲线,通过观察曲线上的突变范围来确定缺陷回波信号中微弱导波信号存在的时刻,结合导波传播速度,精确定位缺陷位置。本文在上述研究基础上,进一步将 Duffing 振子与相关性分析、小波变换相结合得到混合测量方法,该方法可有效降低待测混合信号的信噪比,提高缺陷检测精度和效率。

1 时移 Duffing 振子检测弱信号原理

通过构造窗函数^[18]¹³⁰⁻¹⁴⁷,发展了基于移动窗扫描的 Duffing 振子检测方法,利用该方法可判断损伤有无、定位损伤位置,同时首次将 Duffing 系统分别和互相关分析、小波变换进行结合,进一步降低待测混合信号的信噪比,提高了检测精度。利用时移 Duffing 系统进行损伤识别的流程如图 1 所示。其中, ω 为频率; h 为步长; F 为 Duffing 系统策动力幅值; D 为分维数; L_E 为 Lyapunov 指数。

为此,构造时移矩形窗函数。矩形窗函数^[18]¹³⁰⁻¹⁴⁷定义为

$$S^* = g(t - n\tau)S \quad (1)$$

$$\begin{cases} g(t - r\tau) = \begin{cases} 1, & t \in (r\tau - \delta, r\tau + \delta) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ r = \frac{\delta}{s}, \frac{\delta + s}{s}, \dots, \frac{N - \delta}{s} \end{cases} \quad (2)$$

式中, S 为待测时域信号; S^* 为被窗函数截取后的信号; N 为待测时域信号长度; 2δ 为窗长度; s 为窗函数平均移动的时间间隔; $r\tau$ 为窗函数的中心时刻,通过变化 r 对 S 进行扫描。利用移动窗扫描待测时域信号时,移动窗函数的窗长度和移动间隔是两个关键参数。

直观来说,当移动间隔比较小时,所需计算次数比较多,计算效率比较低,但识别精度比较高;反之,则计算效率比较高。根据文献^[18]¹³⁰⁻¹⁴⁷的结论,本文兼顾效率和精度选择合适的移动间隔, $r = 10 \mu s$,并以此为例进行方法的验证。并且可以检测到此时高斯

白噪声背景下混合信号的信噪比为-23.7 dB, 色噪声背景下混合信号的信噪比为-22 dB, 该识别效果明显优于参考文献[19]⁵²⁶⁻⁵³⁰、文献[20]¹⁹⁵⁻¹⁹⁹、文献[21]²¹⁻²⁴里描述的可识别混合信号的最低信噪比门限-10 dB。

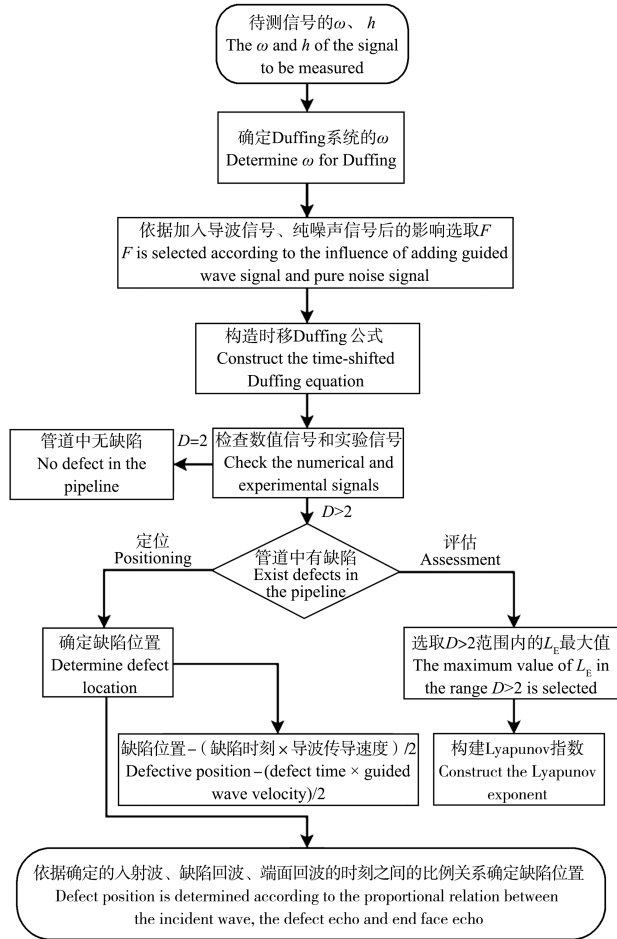


图 1 时移 Duffing 振子检测损伤管道的流程图

Fig. 1 Flow chart of the time-shifted Duffing oscillator to detect damaged pipes

然而, 实际检测中获得的信号十分微弱, Duffing 系统可实现较低信噪比的混合信号的检测。本文拟将混沌振子与传统的检测方法(相关系数法、小波变换法)结合, 进一步降低检测门限。其中, 时移 Duffing 检测系统检测待测信号的主要原理是: 利用移动窗扫描待测缺陷回波信号, 将每一段信号分别输入 Duffing 系统后计算该信号对应的分维数, 绘制分维数随信号中心时刻变化的 $D-t$ 曲线, 通过观察 $D-t$ 曲线上的突变时刻, 即可找到缺陷回波中微弱导波存在的时刻。进一步地, 利用超声导波的传播速度或者入射波、缺陷回波、端面回波三者时刻之间的比例关系就可以确定管道中缺陷的实际位置。利用时移 Duffing 系统检测方法, 不仅可以降低待测信号的检测门限, 即识别信噪比更低的混合信号, 还可以确定管道中缺陷的位置。

2 基于互相关与混沌结合的混合测量

当待测导波信号的频率已知时, 可以构造中心频率与之相同的参考信号, 将参考信号与混有噪声的待测信号进行相关性计算, 得到互相关函数和互相关系数。

设待测信号仍然是上述混有噪声的超声导波混合模型, 其表达式为

$$S(t) = as(t) + \sigma e(t) \quad (3)$$

则参考信号可以设为

$$S_2(t) = s_2(t) \quad (4)$$

式中, $s_2(t)$ 取与上述调制的导波信号同频的正弦信号。则互相关函数为

$$\begin{aligned} R_{S_1 S_2}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T S_1(t) S_2(t - \tau) dt = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2T} \int_{-T}^T as(t) S_2(t - \tau) dt + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \sigma e(t) S_2(t - \tau) dt \right] = \\ &= R_{SS_2}(\tau) + R_{eS_2}(\tau) \end{aligned} \quad (5)$$

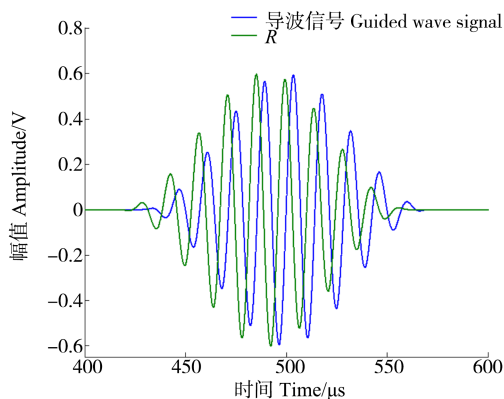
式中, $R_{SS_2}(\tau)$ 为导波信号 $as(t)$ 与同频的参考信号 $s_2(t)$ 的互相关函数; $R_{eS_2}(\tau)$ 为高斯白噪声 $\sigma e(t)$ 与参考信号 $s_2(t)$ 的互相关函数。由于参考信号 $s_2(t)$ 与待测信号中混有的高斯白噪声是互不相关的, 且高斯白噪声的均值设为 0, 因此, $R_{eS_2}(\tau)$ 理论上应该为 0。必须说明的是, 只有在积分时间 $2T$ 比较长时, $R_{eS_2}(\tau)$ 才趋近于 0, 实际计算中, T 不可能无限长。从理想条件上讲, 当 $\tau \rightarrow \infty$ 时, 计算 $R_{SS_2}(\tau)$ 得到:

$$R_{SS_2}(\tau) = \frac{a}{4} [1 - \cos \frac{\omega \tau}{n}] \cos(\omega \tau) \quad (6)$$

可见, 互相关函数仍然是一个调制的余弦信号, 且与导波信号具有相同的频率和调制周期, 只是自变量由原来的时间 t 变成现在的 τ 。将互相关函数简记为 R 。

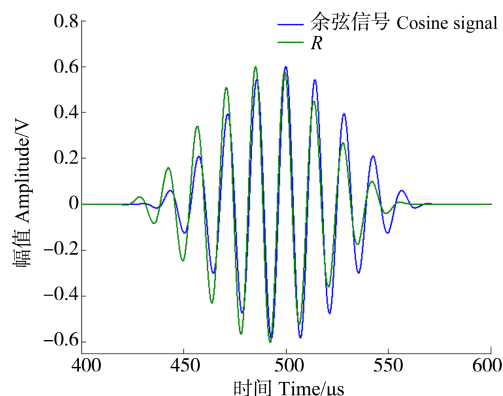
进一步利用仿真对比计算中心频率为 0.07 Hz 的数值模拟信号与同频的正弦信号做互相关后得到的互相关系数, 结果如图 2 所示。由图 2 可以看出, 两者计算得到的互相关系数与原始信号只是初始相位有所不同, 与利用理论公式表述的结果相同。这说明了导波信号与同频的正弦信号计算互相关系数, 得到的结果还是同频的周期信号。而且其结果可以看成是原导波信号向左移动一个相位。

通过上面的研究可以发现, 互相关器同样具有降噪的作用。同时, 由于积分时间不可能无限长, 所以, 互相关后计算得到的结果中还有噪声的存在。但是,



(a) 导波信号与互相关函数

(a) Guided wave signal and the cross-correlation function



(b) 余弦信号与互相关函数

(b) Cosine signal and the cross-correlation function

图2 互相关系数与特征信号的关系

Fig. 2 Relation between the cross correlation coefficient and the feature signal

经过互相关计算后,噪声得到了一定的抑制,周期信号有所增强。此时,将输出的仍然含有噪声的互相关系数,经过合理放缩后,输入到上述 Duffing 振子系统中检测,利用 Duffing 振子对周期信号敏感、对噪声免疫的特性,可以通过计算输入互相关系数后的 Duffing 系统的分维数,来判断初始输入的周期信号。因此,将互相关和混沌振子相结合,进行导波信号的检测,主要是为了充分利用互相关的降噪作用,将降噪后的信号再输入 Duffing 系统进行检测。基于互相关方法与混沌方法构成的混合测量方法,其检测方案如图 3 所示。

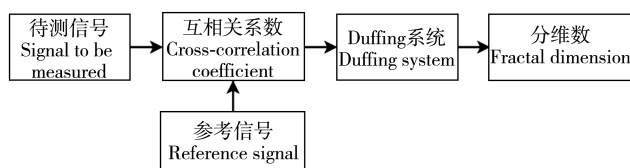


图3 互相关与混沌检测结合的主要步骤

Fig. 3 Main steps of the combination of the cross-correlation and the chaos detection

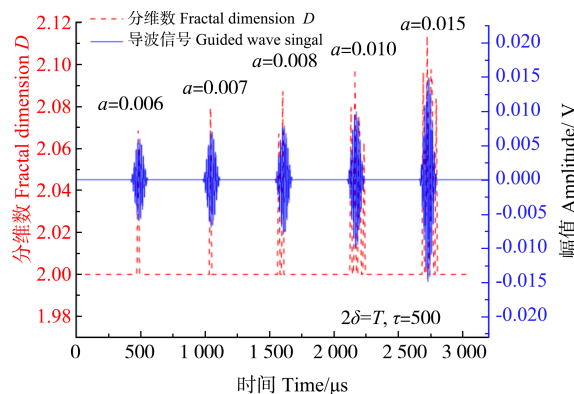
基于互相关与 Duffing 振子相结合的方法的具体步骤主要包括:

1) 计算混合信号与相同中心频率的参考导波信号的互相关系数,得到互相关系数随时间变化的曲线。

2) 对计算得到的互相关系数进行归一化和放缩变换,将待测互相关系数调节到合理范围,并输入到时移 Duffing 检测系统的范围。

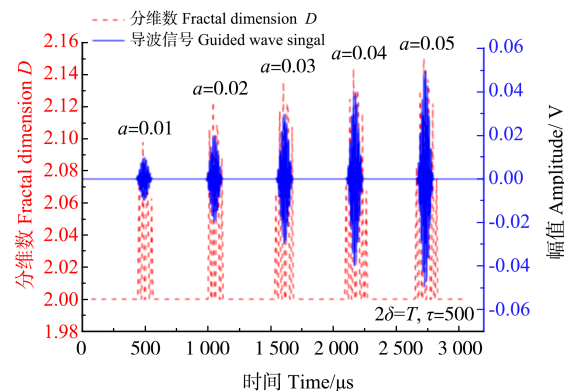
3) 将放缩后的互相关系数输入到时移 Duffing 检测系统,利用 Duffing 检测系统对互相关系数移动扫描,并计算其对应的分维数,绘制 $D-t$ 曲线。

为了验证基于互相关分析和混沌振子结合的混合测量方法的有效性,作为对比,首先构造了不同幅值的导波信号,如图 4 所示。其中,信号幅值(量纲为 1)分别为 0.006、0.007、0.008、0.010、0.015 的导波信号,如图 4(a)实线所示;信号幅值(量纲为 1)分别为 0.01、0.02、0.03、0.04、0.05 的导波信号,如图 4(b)实线所示。利用时移 Duffing 系统计算其分维数如图 4 虚线所示。由图 4 可以看出,在导波信号所在的位置,分维数是大于 2 的分数。这是由于弱导波信号的影响产生的,即弱导波信号的周期性使得 Duffing 系统进入混



(a) 信号模型 1

(a) Signal model 1



(b) 信号模型 2

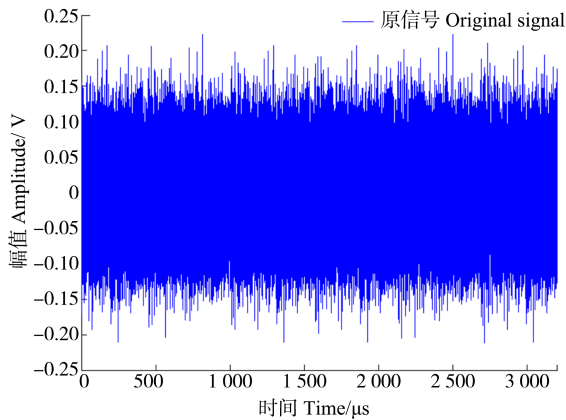
(b) Signal model 2

图4 不同信号幅值的超声导波信号与分维数

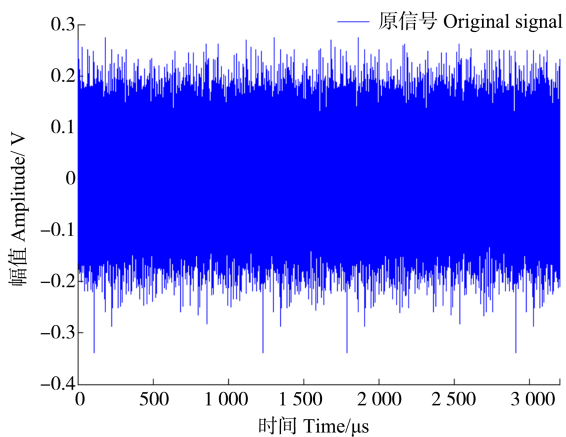
Fig. 4 Ultrasonic guided wave signals with different signal amplitudes and fractal dimensions

沌状态,从而输出大于 2 的分维数。

为了验证上述方法对噪声的免疫强度,构造不同信噪比的导波-噪声混合信号,如图 5 所示。图 5 所示混合信号的构造方法为每一条信号构造 5 个不同幅值的导波信号,如图 5(a)所示导波信号的幅值(量纲为 1)自左向右分别为 0.02、0.03、0.04、0.05、0.06,同时加入噪声强度为 0.3 V 的高斯白噪声,从而得到信噪比分别为 -30.9、-27.4、-24.9、-21.4 dB 的混合信号。同理,按照上述构造方法,进一步分别构造了 -33.4、-27.4、-23.9、-21.4、-19.4 dB 的混合信号,如图 5(b)所示。从图 5 可以看出,导波信号完全淹没在噪声中,无法通过时域信号,判断出信号所在的位置。



(a) 噪声模型 1
(a) Noise model 1



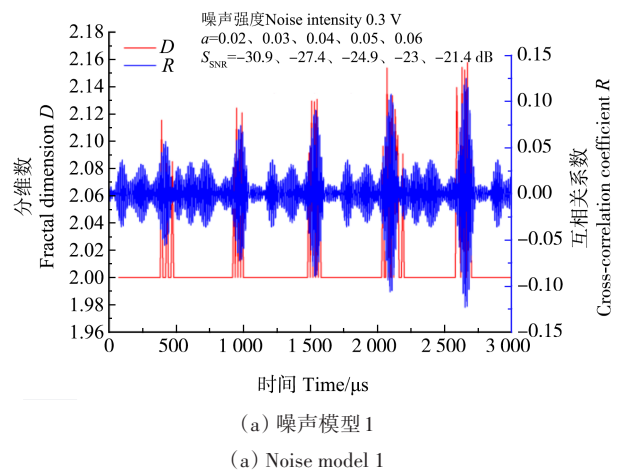
(b) 噪声模型 2
(b) Noise model 2

图 5 导波-噪声混合信号

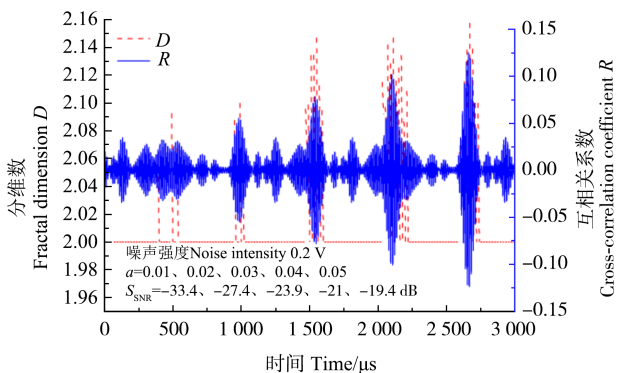
Fig. 5 Guided wave-noise mixed signals

为此,将利用上述方法获得的不同信噪比的混合信号分别进行互相关系数计算,结果如图 6 实线所示。由图 6 可以看出,当信号幅值比较弱时,互相关系数不明显,无法看出明显的导波信号。当信号幅值比较大

时,则可以看到明显的导波信号。图 6 中实线代表将原始混合信号求解互相关后得到的互相关系数,虚线代表将得到的互相关系数通过合理的放缩输入到 Duffing 系统,利用移动窗扫描计算对应的分维数,并绘制 $D-t$ 曲线。由图 6 可以看出, $D-t$ 曲线上有 5 个 $D>2$ 的范围,分别代表 5 个微弱的导波信号,加入噪声后被淹没在噪声中,直接观察混合后的时域信号无法分辨。通过将互相关和混沌振子结合计算 $D-t$ 曲线,可以明显看出 5 个微弱导波信号所存在的时刻,与实线表示的直接观察互相关系数得到的导波信号的时刻一致。但是分维数的表现形式更加直观。通过大量数值仿真,利用时移 Duffing 检测系统检测模拟不同信噪比的混合信号,得出利用互相关与 Duffing 振子结合的混合测量,可有效降低待测信号信噪比。其中,高斯白噪声背景下可低至 -38.5 dB,色噪声背景下可低至 -35.1 dB。它优于文献[18]¹³⁰⁻¹⁴⁷中提到的可以检测到的高斯白噪声背景下的信噪比 -23.7 dB,色噪声背景下的信噪比 -22 dB,且明显优于参考文献[19]⁵²⁶⁻⁵³⁰、文献[20]¹⁹⁵⁻¹⁹⁹、文献[21]²¹⁻²⁴里描述的可识别的混合信号的最低信噪比门槛值 -10 dB。



(a) 噪声模型 1
(a) Noise model 1



(b) 噪声模型 2
(b) Noise model 2

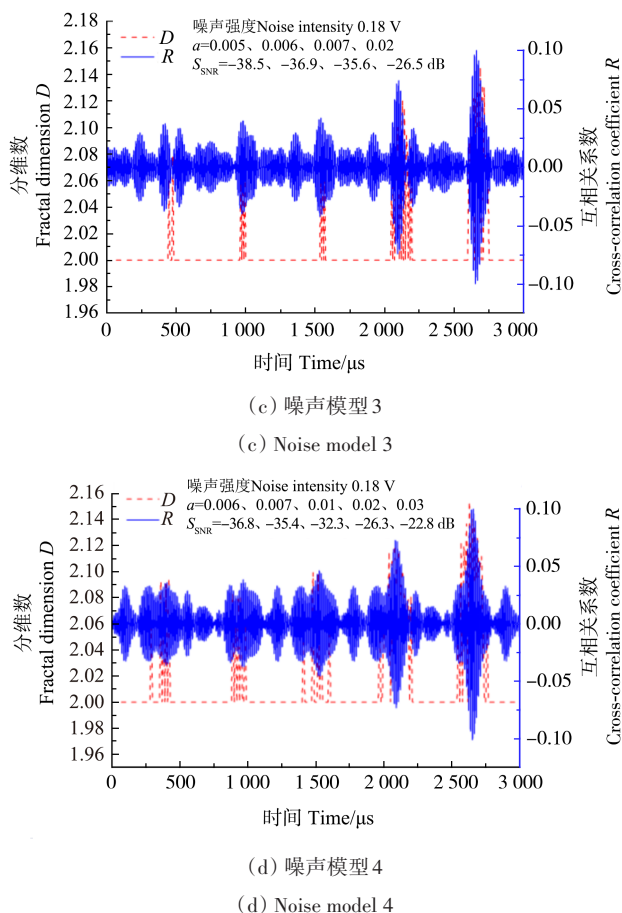


图6 不同信噪比下混合信号的互相关与混沌结合检测法

Fig. 6 Cross-correlation and chaos detection method for mixed signals under different signal-to-noise ratio

综上,将待测混合信号先进行互相关系数计算,后将计算得到的互相关系数输入到 Duffing 系统计算分维数,这样检测的混合信号的信噪比明显低

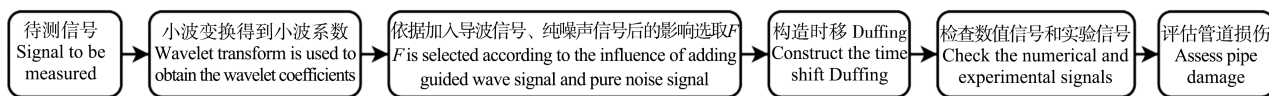


图7 小波变换与 Duffing 系统结合

Fig. 7 Wavelet transform is combined with Duffing system

作为对比,计算小波滤波后的信号与正弦信号的互相关系数,如图 8(b)所示,无法观察到第 1 个导波信号存在的时刻。将上述进行小波变换后的系数经过合理变化,输入到时移 Duffing 系统进行检测,即求解其分维数,结果如图 8(c)所示,从中可以看出 5 个明显的突变范围,其所对应的 5 个时刻就是导波信号存在的时刻。因此,将无法通过互相关、小波变换识别的混合信号经过小波变换初步变换后,输入到时移 Duffing 系统进行检测,可以检测到淹没在噪声中的微弱导波信号。

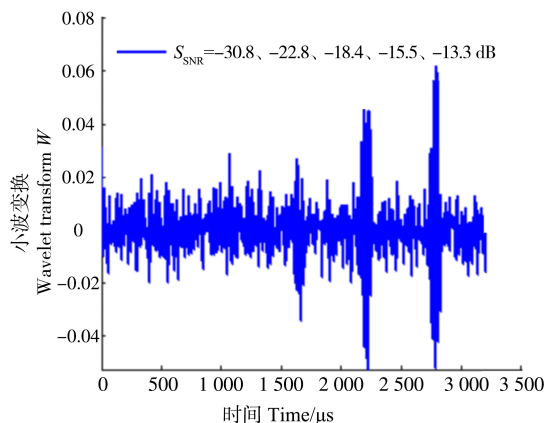
于单独使用互相关系数或 Duffing 检测系统检测时得到的信噪比。

3 基于小波变换与混沌结合的混合测量

小波变换是一种典型的时频局部化分析方法,可以将信号映射到由一个母小波伸缩(变换频率)、平移(刻画时间)而成的一组基函数。小波变换的基波相当于一组带通滤波器,可以实现信号在不同频带、不同时刻的合理分离。本文利用文献[12]³⁷⁻⁵⁴中提到的最佳尺度和小波基对待测信号进行滤波,并与本文所提出的混沌检测形成对比和结合,一方面说明本文所提方法的有效性和实用性,另一方面通过两种方法的结合,提高混沌检测的精度。

同理,将小波变换与混沌检测结合,首先对待测信号进行小波变换滤波处理,然后将得到的小波系数输入时移 Duffing 系统计算分维数,绘制曲线。小波变换与 Duffing 系统结合方法如图 7 所示。

同理,利用上述噪声模型,构造不同噪声背景下不同信噪比的混合信号(为了保证可靠性,在相同的信噪比下进行大量计算,本文仅给出了 2 次计算结果),混合信号中在不同时刻同样含有 5 个不同幅值的导波信号,由于信噪比很低,导波信号被噪声淹没。对不同噪声背景下的混合信号进行小波变换,得到的结果如图 8(a)所示。由图 8(a)可以看出,已经无法分辨出信噪比较低的前 2 个导波信号。



(a) 小波变换

(a) Wavelet transformation

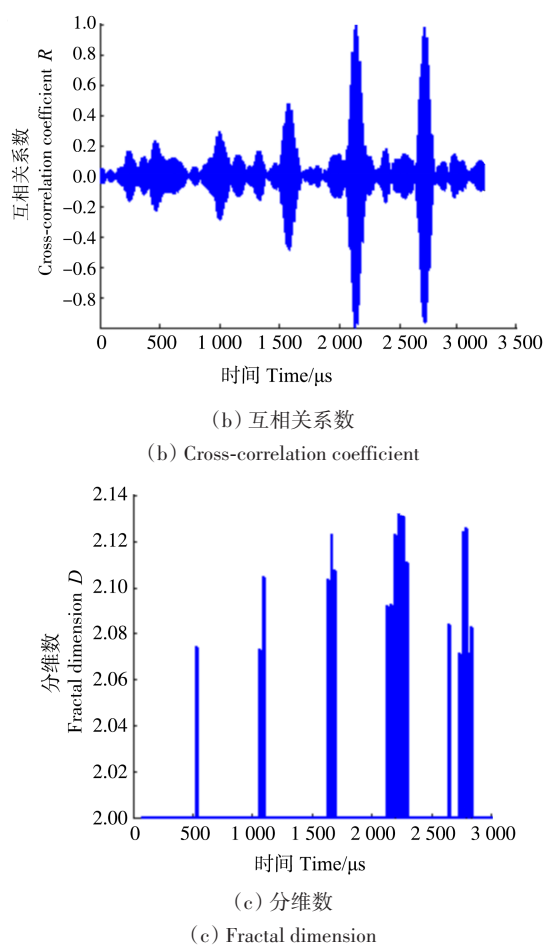


图 8 基于高斯白噪声背景的小波变换与混沌检测结合

Fig. 8 Combination of wavelet transform and chaos detection based on Gaussian white noise background

通过将小波变换与时移 Duffing 系统结合,识别效果优于单独使用小波变换或者时移 Duffing 系统,可以识别的混合信号的信噪比更低。通过进一步研究,基于小波变换与 Duffing 检测系统相结合的混合测量方法,在高斯白噪声背景下可以检测到的混合信号的信噪比低至 -30.8 dB。

4 结论

利用移动窗扫描待测信号计算 Duffing 系统的分维数的方法可以有效提高弱导波信号的识别精度,为了进一步提高弱信号检测精度,降低待测信号的信噪比,本文创新性地提出了传统的检测方法和时移 Duffing 系统相结合的方法,并得到以下主要结论:

1) 首先分别利用互相关和小波变换对待测混合信号进行降噪,再将降噪后的相关系数或者小波变换系数经过合理的幅值调节输入到 Duffing 系统计算其分维数,通过观察计算得到的分维数特征,识别有无弱导波信号。

2) 通过大量的数值仿真,模拟不同信噪比的混合

信号进行检测,可以得到将传统的检测方法与混沌检测方法相结合的混合测量方法,进一步降低信噪比。

3) 数值仿真结果表明,将信号经过互相关器计算与参考导波信号的互相关系数后,再输入 Duffing 系统计算得到的信噪比可低至 -38.5 dB。利用小波重构后再输入到 Duffing 系统,则可以实现信噪比低至 -30.8 dB,都低于单独使用 Duffing 系统检测时的检测结果 -29.9 dB。

综上,本文所提出的利用传统检测方法与非线性系统 Duffing 系统相结合的方法,可极大地提高缺陷检测精度和灵敏度。

参考文献 (References)

- [1] 马贵利, 刘海峰, 彭磊, 等. 长输油气管道智慧化管理的应用及发展趋势[J]. 天然气技术与经济, 2022, 16(5): 45-49.
MA GuiLi, LIU HaiFeng, PENG Lei, et al. Application and development trend of intelligent management for long-distance oil and gas pipelines[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2022, 16(5): 45-49 (In Chinese).
- [2] 杨建喜, 梁焕华, 李晨, 等. 输水管道瞬态泄漏检测数值方法与试验研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(1): 116-119.
YANG JianXi, LIANG HuanHua, LI Chen, et al. Study on transient leakage detection method and experiment for water supply pipelines[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(1): 116-119 (In Chinese).
- [3] 温宇立, 武静, 林荣, 等. 基于 Lorenz 系统 Lyapunov 指数的管道超声导波检测[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11): 264-270.
WEN YuLi, WU Jing, LIN Rong, et al. Ultrasonic guided wave detection in a pipeline based on Lyapunov exponent of Lorenz system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(11): 264-270 (In Chinese).
- [4] WU J, HAO H, LI J, et al. Defect detection in pipe structures using stochastic resonance of Duffing oscillator and ultrasonic guided waves[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020, 187: 104168.
- [5] 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: 104577.
- [6] 梁灏然, 武静, 刘锋, 等. 聚脲防腐管道中超声导波的缺陷检测研究[J]. 机械强度, 2023, 45(2): 296-304.
LIANG HaoRan, WU Jing, LIU Feng, et al. Research of detecting defects in polyurea anti-corrosive pipes by using ultrasonic guided waves[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(2): 296-304 (In Chinese).
- [7] 武静, 饶子玉, 沈宇驰, 等. 利用分形维数和 BP 神经网络实现超声导波缺陷分类的实验研究[J]. 机械强度, 2024, 46(2): 328-338.
WU Jing, RAO ZiYu, SHEN YuChi, et al. Experimental research on ultrasonic guided waves defect classification based on fractional

- dimension and bp neural network [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2024, 46(2): 328-338 (In Chinese).
- [8] 周 恺, 张睿哲, 叶 宽, 等. 基于同步压缩小波变换的接地扁钢缺陷电磁超声 SH 导波检测方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(12): 2013-2020.
- ZHOU Kai, ZHANG RuiZhe, YE Kuan, et al. Electromagnetic ultrasonic SH guided wave detection method for grounded flat steel defects based on synchrosqueezed wavelet transforms [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(12): 2013-2020 (In Chinese).
- [9] 戴 波, 孙雅静, 唐 建. 基于小波变换的超声导波管道腐蚀 C 扫描[J]. *化工学报*, 2013, 64(12): 4599-4607.
- DAI Bo, SUN YaJing, TANG Jian. C-scan of pipeline corrosion defect with ultrasonic guided-waves based on wavelet transform [J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(12): 4599-4607 (In Chinese).
- [10] 方 杨. 铝板中的兰姆波检测技术和非线性时频小波变换时频分析方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 25-31.
- FANG Yang. The investigations on lamb wave testing technique in aluminum plate and nonlinear chirplet transform time-frequency analysis method [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012: 25-31 (In Chinese).
- [11] ROSTAMI J, CHEN J, TSE P W. A signal processing approach with a smooth empirical mode decomposition to reveal hidden trace of corrosion in highly contaminated guided wave signals for concrete-covered pipes [J]. *Sensors (Basel)*, 2017, 17(2): E302.
- [12] 张伟伟. 基于模态分析和应力波技术的结构裂纹识别方法研究[D]. 广州: 暨南大学, 2010: 37-54.
- ZHANG WeiWei. Research on structural crack identification method based on modal analysis and stress wave technology [D]. Guangzhou: Jinan University, 2010: 37-54 (In Chinese).
- [13] BIRX D L, PIPENBERG S J. Chaotic oscillators and complex mapping feed forward networks (CMFFNs) for signal detection in noisy environments [C]// *International Joint Conference on Neural Networks*. New York: IEEE, 1992: 881-888.
- [14] 姜万录, 张焰明, 王海军. 基于 Lyapunov 指数分析的液压泵故障诊断方法研究[J]. *机床与液压*, 2008, 36(3): 183-184.
- JIANG WanLu, ZHANG YanMing, WANG HaiJun. Hydraulic pump fault diagnosis method based on Lyapunov exponent analysis [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008, 36(3): 183-184 (In Chinese).
- [15] 张焰明. 基于 Lyapunov 指数分析的液压泵故障诊断及实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2007: 34-48.
- ZHANG YanMing. Fault diagnosis method and experimental study of hydraulic pump based on Lyapunov exponent analysis [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2007: 34-48 (In Chinese).
- [16] 武 静, 张伟伟, 马宏伟. 利用 Lyapunov 指数实现超声导波检测的实验研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(24): 82-87.
- WU Jing, ZHANG WeiWei, MA HongWei. Tests for ultrasonic guided wave inspection using Lyapunov exponents [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(24): 82-87 (In Chinese).
- [17] YANG F, JING L, ZHANG W W, et al. Experimental and numerical studies of the oblique defects in the pipes using a chaotic oscillator based on ultrasonic guided waves [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 347: 218-231.
- [18] WU J, WANG Y, ZHANG W W, et al. Defect detection of pipes using Lyapunov dimension of Duffing oscillator based on ultrasonic guided waves [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 82: 130-147.
- [19] 李 月, 杨宝俊, 石要武. 色噪声背景下微弱正弦信号的混沌检测[J]. *物理学报*, 2003, 52(3): 526-530.
- LI Yue, YANG BaoJun, SHI YaoWu. Chaos-based weak sinusoidal signal detection approach under colored noise background [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(3): 526-530 (In Chinese).
- [20] 李 月, 杨宝俊, 杜立志, 等. 色噪声背景下微弱周期脉冲信号的混沌检测方法[J]. *电子与信息学报*, 2003, 25(2): 195-199.
- LI Yue, YANG BaoJun, DU LiZhi, et al. Chaos-based weak periodic pulse signal detection approach under colored noise background [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(2): 195-199 (In Chinese).
- [21] 张轩硕, 王建斌, 王军阵. 基于模糊小波包的超声导波检测信号降噪研究[J]. *国外电子测量技术*, 2011, 30(9): 21-24.
- ZHANG XuanShuo, WANG JianBin, WANG JunZhen. Study on noise reduction for ultrasonic guided wave detection signal based on fuzzy wavelet packet [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2011, 30(9): 21-24 (In Chinese).