

子波关联维分析在缺陷振动检测中的应用

曹茂森¹,任青文¹,王 平²

(1. 河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2. 山东农业大学农学院,山东 泰安 271000)

摘要 基于小波强局部分析能力和分形强非线性处理能力的优势联合,提出了缺陷振动检测的子波关联维分析法.该方法首先采用 UDWT 对振动波形进行分频,并确定含缺陷信息的关键频段,再对有效子波实施关联维分析,在敏感尺度区间内设立关联维阈值判据,进行缺陷检测.数值模型试验验证表明,该技术具有弱缺陷特征检测能力强、参数化和高效率等特点以及较好的应用潜力.

关键词 冗余小波变换;关联维;关键频段;敏感尺度区间;缺陷振动检测

中图分类号 :TV32+2 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2004)02-0209-04

在缺陷无损检测领域,将振动波形作为状态参量对工程对象进行检测是广泛使用的一种方法.但由于缺陷及环境复杂性等多因素的存在,使实测波形具有高度非线性,这与缺陷检测的高精度要求产生了矛盾.当缺陷特征较弱时,该矛盾尤为突出.这给傅氏变换基础上的数据处理技术,包括短时傅氏变换和时频分析等,提出了挑战.近年来,小波变换与分形理论凭借其独特的非线性处理能力在工程应用中显示出很强的生机,但这两种新的理论与实际应用的结合还不够完善.在无损检测领域,小波变换的强局部化能力用于振动波形奇异性分析优势突出,但由于其呈现的最终结果往往是振幅谱或能量谱的图文件,而缺陷存在与否需靠人的经验判断给出,这会引入人为误差且效率不高,从而限制了其在工程中的广泛应用.分形理论的强非线性分析能力用于振动波形的分形维特征提取及模式识别,其可行性已得到多个工程实例的证明,但当信号中存在大量噪声时,分形维计算精度易受其影响,这使其有效应用受到限制.受文献[1]的启发,笔者将小波强局部分析能力与分形强非线性分析能力相结合,首先利用冗余小波变换 UDWT(Undecimated Discrete Wavelet Transform)对振动波形进行分频,根据检测目的选取包含有效缺陷信息的关键频段,然后利用关联维 D_c (correlation dimension)对关键频段上子波的分形动力机制进行捕获.从工程实际出发,确立简单合理的关联维阈值,建立缺陷检测判据并进行缺陷检测.数值试验验证表明,该方法检测弱缺陷特征的能力较强,并具有参数化和高效率的特点.

1 关联维计算

分形理论的基本概念是分维数.在诸多分形维中,关联维是基于相空间重构,直接用相点来计算相关函数,进而由相关函数产生的一种分维数.其中相关函数表示了相空间中距离小于 r 的点对占所有点对的比例.关联维对时间序列内部的分形动力机制反应敏感,在缺陷及故障诊断、油气勘探等领域的应用获得了成功.

1.1 关联维改进 G-P 算法

关联维常用的计算方法是 G-P(Grassberger-Procaccia)算法.设时间序列为 $x_0(t)$,嵌入维数为 m ,时间延迟数为 p , $p = \tau/\Delta t$, τ 是抽取时间间隔,为采样时间间隔 Δt 的整数倍.对其进行相空间重构得到相轨线 Y ,现已证明,只要 $m \geq 2D + 1$ (D 为吸引子的拓扑维数),重构的 m 维空间能够表征原系统的动力特性.由式(1)可知,相轨线 Y 由相点矢量序列组成,其数量 $N_m = n - (m - 1)p$, n 是原序列点数.

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &: x_0(1), x_0(1+p), \dots, x_0(1+(m-1)p) \\ Y_2 &: x_0(2), x_0(2+p), \dots, x_0(2+(m-1)p) \\ &\vdots \\ Y_{N_m} &: x_0(N_m), x_0(N_m+p), \dots, x_0(n) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

相关函数记为 $C_m(r)$,对于任意给定的 r ,有

$$C_m(r) = \frac{1}{N_m(N_m - 1)} \sum_{i,j=1 \atop i \neq j}^N \alpha(r - \lambda_{ij}) \quad \alpha(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中 λ_{ij} ——相点矢量 Y_i, Y_j 之间的距离 α ——Heaviside 函数. $C_m(r)$ 也称为系统吸引子的关联积分. 在一定区间中存在 $C_m(r) \propto r^{d(m)}$,当 $d(m)$ 不随维数的升高而变化时,关联维 $D_2 = \lim_{m \rightarrow \infty} d(m)$.

工程中记录的振动波形往往数据量较少,文献[2]给出了在较少数据条件下,精度较高的关联维计算的改进 G-P 算法. 其技术关键是用

$$C_m(r) = \frac{2}{(N_m - W + 1)(N_m - W)} \sum_{n=W}^{N_m} \sum_{i=1}^{N_m-k} \alpha(r - |Y_{i+k} - Y_i|) \tag{3}$$

替换式(2). 其中 Y_i, Y_{i+k} 为相点矢量, $W \geq \tau |2/N_m|^{2/m}$, τ 为时间延迟.

笔者用 Matlab 计算机语言对该方法进行了程序实施. 该程序可快捷地计算关联积分、关联维计算曲线.

1.2 噪声对关联维的影响

数学上对关联维计算影响因素的研究已不少,如嵌入维数、时间延迟的最优选取等,而工程应用上,最突出的问题是从实验室或现场采集的数据会不可避免地受到噪声的干扰. 一般认为,关联维对噪声是比较敏感的,要想获取可靠的关联维,必须对实测信号进行降噪处理.

比如, Lorenz 系统的关联维理论值为 2.06,相应关联积分应具有斜率一致性. 但当噪声水平为 8% 时,无标度区减小约 3/5,关联维为 2.348,如图 1 所示. 可见,随着噪声的增加,无标度区明显缩小且由其斜率所计算的关联维误差增大.

用小波理论对含噪信号进行多分辨分析,提取包含有效信息的频段子波,计算出该子波的关联维并以此作为信号特征量,这实质上就是降噪预处理下的关联维分析.

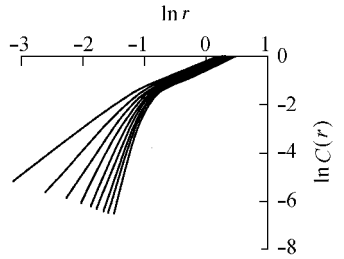


图 1 噪声对关联维的影响
Fig.1 Noise influence to D_2

2 UDWT 方法

Mallat 著名的快速离散正交小波变换(DWT)算法在小波发展中起到了重要作用,其基本操作是不同尺度上卷积基础上的隔值采样. UDWT 是以 DWT 为基础发展起来的一种广义的离散小波变换形式,先后由多个学者独立提出,并冠以不同的名称,如 SIWT(Shift Invariant Wavelet Transform),SWT(Stationary Wavelet Transform),RWT(Redundant Wavelet Transform)等^[3]. 设离散信号为 $x[n] (n = 1, 2, \dots, N)$,则其 UDWT 算法描述为

$$C_{j,k} = \text{DWT}\{x[n] 2^j, k\} = \sum_{n=1}^N x[n] g_j^*[n-k] \quad (j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, N) \tag{4}$$

式中 j ——小波分解层数 k ——平移因子 g_j^* —— g_j 的共轭, g_j 为具有紧支撑的正交小波基,满足

$$g[n] = g[n] \quad g_{j+1}[n] = \sum_k g[k] h[n-2k] \tag{5}$$

式中 $g[n], h[n]$ 为高通和带通滤波器.

值得注意的是,式(4)中平移因子为 k ,而非 DWT 中的 $2^j k$,因此 UDWT 的技术核心是取消了 DWT 中的降采样. UDWT 算法具有冗余、平移不变及比 DWT 更能近似地描述连续小波变换的特性. 本文利用其无降采样的多分辨率分析特性发展缺陷检测技术. 由于为无降采样,因此在每个尺度上的采样率均与 $x[n]$ 一致,避免了抽值采样引起的信息缺失,从而保持了最大量的有效信息. 每个尺度上的重构子波成为 $x[n]$ 的一个频段子像,子波的动力机制只是频段的函数,这适应于子波关联维分析的要求.

3 子波关联维弱分析弱缺陷特征检测

3.1 基本方法

振动检测中的实测信号,在缺陷程度较小或噪声水平较高的情况下,缺陷特征信息往往较弱,这给传统分析方法带来很大困难. 子波关联维分析缺陷检测分为 2 个步骤:关键频段确立、利用关联维判据进行缺陷

检测.由于噪声具有全局性,其能量平均分布在每个频带上,而缺陷信息具有局部性,能量集中于某一个或几个关键频段中,因此对信号实施 UDWT,采用谱分析法或相关分析法确立关键频段,据其提取的子波可以凸现缺陷信息;另一方面,由于正常和含缺陷信号的关键频段内子波具有不同的动力机制,而关联维对其反应敏感,因此可设立一维数阈值,建立关联维缺陷检测判据.

由于检测信号属于无规分形,数据量小,且无标度区难以准确确定等因素,本文对关联维计算过程中的两个关键环节——关联积分和关联维计算曲线进行分析并确定敏感尺度区间,从而在敏感尺度区间内设立阈值进行缺陷检测.该方法比单一分维数更有效.

3.2 模型试验

3.2.1 高次谐波弱缺陷检测

用关联维对机械转子中期缺陷进行检测的基本依据是正常状态下转子盘心振动波形为规则的周期形状,关联维近似为 1;发生磨损或裂纹等缺陷时,将在正常波形上产生高次谐波,关联维会明显变大,可依此设立关联维阈值进行缺陷检测.但在缺陷诱发初期,波形变化细小,加上无标度区确定上的误差,使得关联维变化微小,难以以其为特征量建立缺陷检测判据.本文用子波关联维分析法对弱缺陷进行检测.模拟信号

$$A:y_1=10\sin(\omega t+\varphi_1)+0.6\sin(a\omega t+\varphi_2) \quad B:y_2=10\sin(\omega t+\varphi_1)+n \quad (6)$$

式中 n 为白噪声, $a>3$, B 中白噪声与 A 中高次谐波具有相同的平均幅值.

A 、 B 差异很小,从时域上无法区分两信号,而频域的能量谱也几乎没有差别.按中期缺陷检测方法,对 A 、 B 进行关联维分析,其结果如图 2(a)(b)所示.可见,两者的关联积分和关联维计算曲线在无标度区内一致性较强,关联维均接近于 1,难以建立关联维判据.这是由于缺陷诱发初期,基频谐波占绝对优势,从而决定了系统具有基本相同的动力机制.对信号 A 、 B 实施 UDWT 后,再对子波进行谱分析,发现第 1 层小波系数的重构子波 a^* 、 b^* 的振幅谱有明显差别,其中 a^* 的振幅谱中高次谐波成分突出,说明缺陷存在,因此将该频段确立为关键频段.对 a^* 、 b^* 进行关联维分析,其结果如图 2(c)、(d)所示.可见,无论是关联积分还是关联维计算曲线,两子波均有截然不同的表现.这是由于子波 a^* 中高次谐波占优,动力机制相对简单,致使关联维仍显示出谐波特征,无标度区明显,关联维在 1 附近;而子波 b^* 中几乎完全为噪声,系统动力机制的复杂程度高,其无标度区难以确定,关联维计算曲线数值比子波 a^* 大很多.从图 2(d)中容易确定特定敏感尺度区间,并建立阈值判据,实现参数化缺陷检测.

3.2.2 高噪声水平缺陷检测

土木工程的健康诊断越来越受到人们的关注,其中地下结构的无损检测难度很大.在地下结构无损检测中,振动反射波法的应用最为广泛.由于记录反射波是缺陷反射波、直达波、多次反射波及背景干扰噪声等信号在某一时间段内线性和非线性的叠加,记录波形复杂,从而会使得在滤波基础上提取有效信息的传统方法容易造成缺陷的漏判和错判,且对于混凝土地下连续墙等几何、材料特征相对一致、规模较大的连续体进行检测时,其效率也很低.本文对子波关联维分析方法在地下连续墙含缺陷反射波检测中的应用进行数值试验.

图 3 为地下连续墙缺陷振动检测的数值模拟结果.图 3(a)(b)表示 2 个介质模型.图 3(a)中有 4 处存在介质突变缺陷,而图 3(b)为均质,无缺陷.相应于图 3(a)和(b),图 3(c)和(d)波形为模拟实测振动反射波,分别记为 M 、 N ,它们是在雷克子波(Ricker)合成的理想反射波上叠加噪声得到的. M 、 N 具有相同的平均幅值, M 的信噪比为 -10.8374 ,有效信息已被完全淹没.采用传统的信号处理方法,从时频域已完全没有能力将 M 、 N 区分开

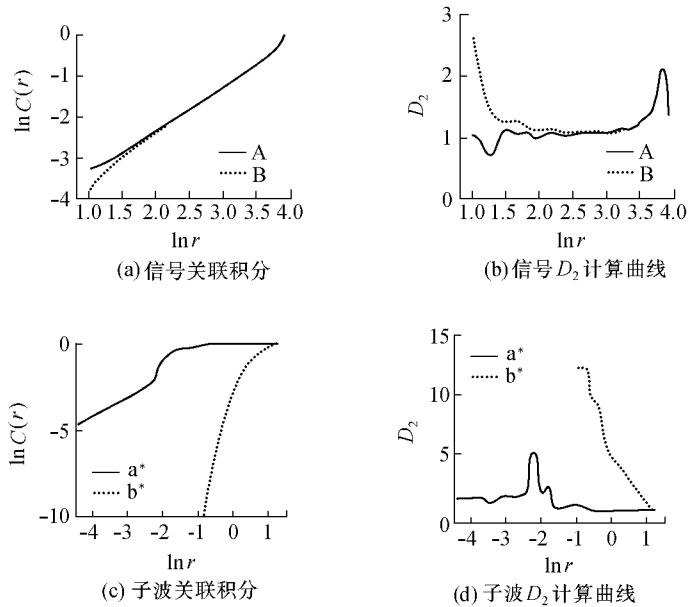


图 2 信号 A 、 B 及子波 a^* 、 b^* 关联维分析

Fig.2 D_2 analysis of signal A and B and sub-wave a^* and b^*

来,直接对M、N进行关联维分析,结果如图4(a)、(b)所示,其特征相似,故无法判断含缺陷的反射波.

这里,对M和N实施UDWT,分解层数为10,通过子波谱分析,将振幅谱差别最大的第6层细节作为关键频段,相应的子波为 m^* 、 n^* .对子波进行关联维分析,结果如图4(c)、(d)所示.可见, m^* 和 n^* 的关联积分和关联维计算曲线已被较好地分离开来,说明关联维显著地反映了缺陷信息与噪声动力机制的不同.图4(d)容易确定敏感尺度区间并建立关联维缺陷检测判据,从而进行参数化检测.

上述方法在混凝土地下连续墙的缺陷普查及质量一致性评价中有较大应用潜力.

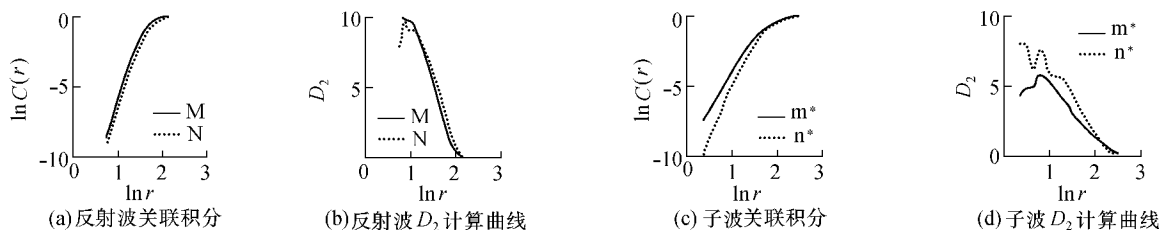


图 4 反射波 M 和 N 及子波 m^* 和 n^* 关联维分析

Fig.4 D_2 analysis of reflected wave M and N and sub-wave m^* and n^*

4 结 论

- 在无损检测领域提出了小波与分形优势联合进行缺陷振动检测的子波关联维分析法;
- 数值模型试验验证了子波关联维分析法的可行性和有效性,说明该方法具有优于目前其他方法的一些特点,应用潜力较强.

参考文献:

- [1] 秦卫阳,孟光.采用小波方法计算关联维数[J].振动工程学报,2000,19(6):925—926.
- [2] THEILER J. Spurious dimension from correlation algorithms applied to limited time series data[J]. Phys Rev, 1986, A34: 2427—2432.
- [3] HAITAO G, BURRUS C. Convolution using the undecimated discrete wavelet transform[D]. Texas: Rice University, 1994.

Application of sub-wave correlation dimension analysis to fault vibration detection

CAO Mao-sen¹, REN Qing-wen¹, WANG Ping²

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. College of Agronomy, Shandong Agriculture University, Taian 271000, China)

Abstract: Based on the effective combination of the high ability of wavelet in local signal analysis with the powerful nonlinear treatment capability of fractal, a sub-wave correlation dimension analysis method is proposed for fault vibration detection. Firstly, the UDWT is adopted for signal frequency analysis to determine the key frequency bands containing fault information; then, correlation dimension analysis of effective sub-waves is performed, and the correlation dimension threshold criterion is set up in sensitive scale interval for fault detection. The verification of the numerical model by experiments shows that the technique is of high efficiency in parameterized detection of weak fault characteristics, hence the method is well promising.

Key words: UDWT(undecimated discrete wavelet transform); correlation dimension; key frequency band; sensitive scale interval; fault vibration detection