

锚杆系统动测信号的特征分析

陈建功, 张永兴

(重庆大学, 重庆 400045)

摘要: 利用实验室锚杆模型试验所测得的信号, 采用现代信号处理技术对信号进行时频分析, 得到具体、精确的信号特征。信号的短时傅立叶变换可在相平面表达信号的强度大小, 并且杆底反射信号比较明显, 但不能反映缺陷处的反射信号。另外, 锚杆缺陷越多, 反射信号的能量也越大。通过 Wigner-Ville 分布计算和分析, 可得到信号的能量在时间和频率中的分布情况, 不同损伤的锚杆的反射能量是不同的。通过与完整锚杆信号相比较可以发现信号变化的大致位置及变化的程度。小波分析提供了更多关于锚杆锚固质量的特征信息, 更适合于处理锚杆系统有损伤情况下动测波形的识别。

关键词: 锚杆; 无损检测; 动力响应; 小波分析

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)07-1051-07

作者简介: 陈建功(1967-), 男, 浙江慈溪人, 博士, 副教授, 主要从事地下工程和岩土工程的研究。E-mail: cjjg77928@126.com。

Analysis on characteristics of dynamic signal for bolt anchorage system

CHEN Jian-gong, ZHANG Yong-xing

(Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Based on the dynamic tests on models of a bolt anchorage system, the time-frequency analysis of dynamic signals for the bolt anchorage system was made, and the accurate signal characteristics were acquired through modern signal processing methods. It was shown that short-term Fourier transform of the signals could indicate the signal intensity in the phase plane and the reflected signal from the bolt bottom was clear but the reflected signal from the bolt impairment could not be identified. With increasing of the quantity of bolt impairment or level of bolts, the energy of the reflected signals increased. The distribution of energy of the signals could be obtained in time and frequency domains by calculating Wigner-Ville distribution. The reflected energy was different among the bolts with various impairments. The approximate position and degree of signal variation could be analyzed and compared with those of the integrity bolts. Wavelet analysis provided more diagnostic information about bolt anchorage quality and was more suitable for the identification of dynamic test signal for bolt anchorage system with impairments.

Key words: bolt; nondestructive test; dynamic response; wavelet analysis

0 引言

目前, 锚杆锚固技术在岩土工程界中正被广泛应用, 而且发展迅速。这是由于锚杆锚固不仅可以合理地调动围岩的自身强度, 而且具有施工简便, 成本低廉, 安全迅速等优点^[1], 但锚杆锚固质量的检测一直没有得到很好的解决。传统的锚杆检测手段主要是拉拔试验, 依据试验测定的抗拔力来评价锚固质量。但拉拔试验不仅费时长, 耗资大, 而且为获得准确的极限承载力需进行破坏性试验, 故检测面小, 仅限于个别抽查^[2]。因此, 对锚杆锚固质量进行无损检测, 弥补以至取代传统的锚固体系检测方法, 以适应大规模工程施工的需要, 这也是目前岩土加固工程急需解决

的技术关键问题。

锚杆系统动力检测基于一维杆件的波动理论通过检测锚杆头动力响应信号来诊断锚杆的锚固质量^[3]。当锚杆头受瞬态力激振后, 引起锚杆头质点振动, 并以应力波的形式向杆底传播。当波在均匀介质中传播时, 波的传播速度、幅度和类型均保持不变; 但当波在不均匀介质中传播时, 它将产生反射、透射或散射现象, 波的强度将发生突变, 导致扰动能量重新分配,

基金项目: 国家自然科学基金国家杰出青年科学基金项目(50625824);
重庆市科技攻关项目(2006AB7003)

收稿日期: 2007-07-16

一部分能量穿过界面向前传播为透射波,而另外一部分能量反射回原介质,称为反射波。在实际工程中透射波不易测得,但反射波可在其传至锚杆顶时由安装于锚杆顶的传感器(加速度计或速度计)测得。由于反射波携带锚杆体内的信息,利用反射波内所含的信息,就可以对锚杆的锚固质量进行分析。

20世纪80年代以来,瑞典、美国等一些国家基于超声波技术开发了各自的锚杆质量检测仪。1978年瑞典的Thurner提出用测超声波能量损耗的原理来检测锚杆的灌注质量,并由Gendynamik AB公司于1980年推出了Boltometer Version 锚杆质量检测仪^[4],但该方法检测结果仍为锚杆的抗拔力,但因存在激发条件苛刻和衰减快等缺点而未得到广泛应用。90年代,美国矿业管理局开发出能检测锚杆应变和长度的超声波仪器^[5-7],但它无法评价锚杆的施工质量。我国也做了大量的研究,20世纪80年代末,铁科院与地矿部技术方法研究所协作研制出声波反射波检测仪并进行了技术鉴定;汪明武等提出了用振幅比及能量衰减系数来衡量锚杆的锚固质量^[8-9];太原理工大学爆破所采用波的时域、频域分析来检测锚杆的锚固质量,提出了表征锚杆锚固质量的6个参数^[10];近年来,重庆大学针对实际工程岩体在锚固状态下处于一定的应力环境,且该应力环境易于发生变化这一现象,提出了锚固岩体在受荷条件下的声学特性研究,在考虑岩石锚固荷载影响的条件下,建立了与锚杆力学特性相关的声学特性理论模型,利用小波分析、神经网络对岩土锚固体系的完整性和承载力问题进行了一系列的理论探讨和实验分析^[11-17]。

依据现代结构动力学及结构探伤理论的观点,损伤的存在必然使系统的结构组合发生变化,相应地影响到结构的动力响应特性,使得各种结构参数(固有频率和模态等)在不同程度上受到影响,进而使结构显示出与正常结构相区别的动态特征。利用现代信号处理技术对锚杆结构系统进行损伤检测与诊断,通过对完整锚杆与损伤锚杆杆头反射波信号的对比分析,以及根据锚杆锚固体系固有特性的变化,可以建立锚杆损伤的识别方法。所以对锚杆杆头反射波信号的处理分析是应力波法锚杆无损检测技术的基础。传统的信号处理分析是将信号的时域描述通过数学处理变换在频域内进行描述,即频谱分析,最常用的频谱分析方法是快速傅立叶变换(FFT)。分析表明,完整锚杆和损伤锚杆的频域曲线所包含的各频率成分是不同的,损伤锚杆的频幅曲线存在明显的多峰现象,频带上能量分散;完整锚杆的功率谱曲线呈单峰,而且随频率增大下降较快,损伤锚杆的功率谱曲线呈多峰,且功率谱的总面积及曲线峰值比完整锚杆要大,而且

损伤越多、损伤程度越大,功率谱的总面积就越大,同时主频率也发生漂移^[18]。传统的分析方法是一种全局变换,要么完全在时域,要么完全在频域,仅适合平稳信号的研究,而无法表述信号的时频局域性质,不能提供有关谱分量的时间局域化的信息,不能有效提取故障信号的时频特征。而实际的诊断信号经常包含非平稳成分,因此,需采用更先进的频谱分析方法,

本文利用实验室锚杆模型试验所得信号,采用现代信号处理技术对信号进行时频分析,得到更具体、更精确的信号特征。

1 锚杆系统动力检测模拟试验

在实验室制作了锚杆系统的简化模型,在外径为200 mm的PVC管内放入钢筋,周围用水泥砂浆灌注固定来模拟全长锚固锚杆,水泥砂浆作为锚固剂其配比为:水泥:细砂=1:2,水灰比为1:0.5。锚杆杆体采用II级精轧螺纹钢,直径为28 mm,长为3 m,为方便安装传感器,锚杆端头预留长度为10 cm的自由段,共制作3个试件(见图1):试件1为完整锚杆;试件2为有一处损伤的试件,即在锚杆中部用细砂填充,在这一段中可认为无砂浆锚固;试件3为有2处损伤的锚杆试件,其中一处损伤是在锚杆中部用石膏腻子,另一处损伤是在杆底段采用低标号的水泥砂浆。

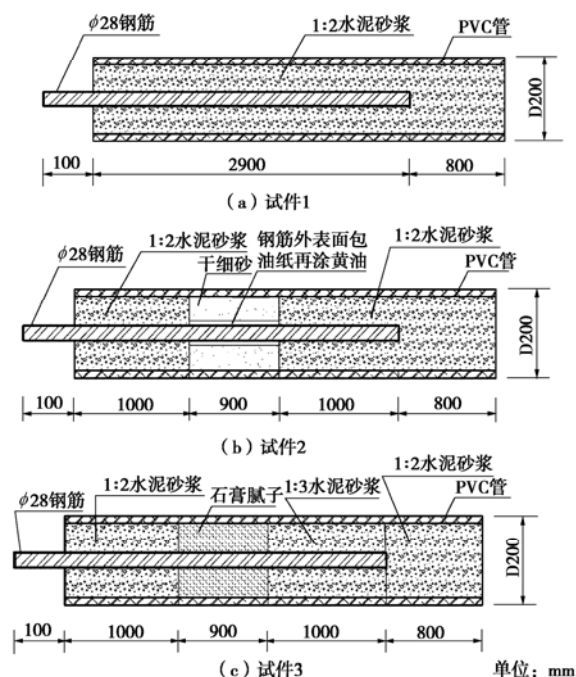


图1 测试试件示意图

Fig. 1 The sketch of testing samples

图2为实验室锚杆模型的照片。测试系统采用联机实时测试分析系统,首先将被检测信号直接由RSM5Y5声波仪接受,经RS-232接口实时传入电脑,然后通过声波检测程序进行计算处理,并将结果绘制

打印出来。采用小锤敲击的方式激发应力波, 用加速度传感器接受信号; 信号的接收及超声波发射传感器的激发由中国科学院武汉岩土研究所研制的 RSMSY5 型非金属声波检测仪完成。图 3 为所测得的时域信号。



图 2 实验室锚杆模型

Fig. 2 The models of bolts in laboratory

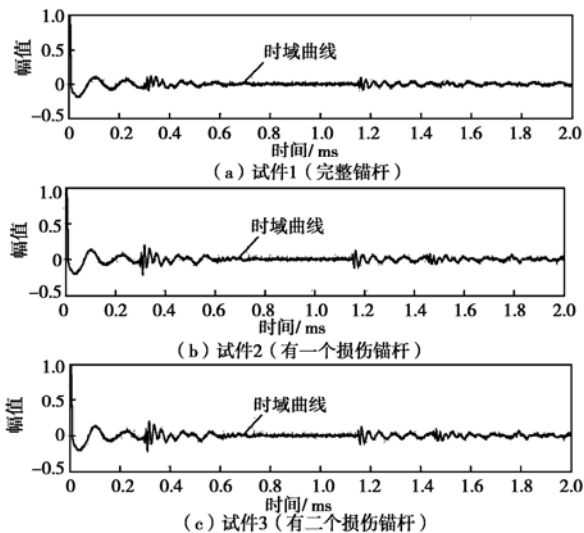


图 3 锚杆的动测信号

Fig. 3 Dynamic signal of bolts

2 锚杆系统动测信号的一般时频分析

描述信号的两个极为重要的参数是时间和频率, 传统的分析方法是利用 Fourier 变换将信号的时域特征和频域特征有机地联系起来, 成为信号分析和处理的有力工具。但它是一种全局变换, 要么完全在时域, 要么完全在频域, 因此仅适合平稳信号的研究, 而无法表述信号的时频局域性质, 不能提供有关谱分量的时间局域化的信息。也即当它处理非平稳信号时, 不能有效提取故障信号的时频特征。而实际的诊断信号经常包含非平稳成分, 因此, 需采用更先进的频谱分析方法, 即时频分析方法。一般的时频分析是指短时傅立叶变换、Gabor 变换、(Wigner - Ville) 分布、Randon - Wigner 变换、分数傅立叶变换、循环统计量理论和调幅 - 调频信号分析等。同样, 在对锚杆系统

动测信号进行时域分析或频谱分析时, 虽然可以对锚杆的锚固状态作定性的评价, 但不能进行定量的评价, 而且不能确定锚固损伤的准确位置和损伤的范围, 不能达到检测的最终目的。要实现锚固状态的准确定位, 就必需借助更精确的分析方法, 把时域分析和频域分析结合起来, 即利用时频分析手段对锚固系统进行分析。信号的时频表示是指使用时间和频率的联合函数表示信号, 其主要任务是描述信号的频谱含量是怎样随时间变化的, 研究并了解时变频谱在数学和物理上的概念和含义, 建立一种分布, 以便能在时间和频率上同时表示信号的能量或强度并对各种信号进行分析处理, 提取所包含的特征信息或综合得到具有期望的时频分布特征的信号。

2.1 锚杆系统动测信号的短时傅立叶变换

短时傅立叶变换 (STFT) 是一种常用的时 - 频域分析方法, 由 Gabor 首先系统地使用, 基本变换公式为

$$X_x(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t-\tau)e^{-j\omega t} dt, \quad (1)$$

时限函数 $g(t)$ 起限时作用, $e^{-j\omega t}$ 起限频的作用。其功率密度谱为

$$P_x(\omega, \tau) = |X_x(\omega, \tau)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t-\tau)e^{-j\omega t} dt \right|^2, \quad (2)$$

式中, 滑动窗函数可采用哈密 (Hamming) 窗、汉宁 (Hanning) 窗、巴特利 (Bartlett) 窗、韦尔奇 (Welch) 窗、矩形 (Boxcar) 窗等。这些窗函数没有本质的区别, 窗的选择主要是在形成尽可能窄的中间峰值区和尽可能快的尾部衰减两者之间进行权衡。图 4 是对实验室锚杆模型动测信号的短时傅立叶变换结果。从图中可看出, 对信号进行短时傅立叶变换可在相平面表达信号出的强度大小, 并且杆低反射信号比较明显, 但不能反映损伤处的反射信号。另外, 锚杆损伤越多, 反射信号的能量也越大。由于短时傅立叶变换是建立在平稳信号分析的基础上, 因此无论是在时域还是在频域加窗, 都要求窗的宽度非常窄, 否则就很难得到某一时刻信号的频谱或某一频率分量所对应的波形的近似值。但根据不确定性原理, 若时窗越窄, 虽然时间分辨率提高了, 但频率分辨率则下降。同理, 频率分辨率的提高是以牺牲时域分辨率为代价的, 所以短时傅立叶变换还不能准确反映谱随时间的变化。

2.2 锚杆系统动测信号的魏格纳 - 维尔分布

在时频能量分布中, 人们最感兴趣的 (Wigner-Ville) 分布 (WVD)。定义 WVD 为

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \frac{\tau}{2})x^*(t - \frac{\tau}{2})e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (3)$$

式 (3) 可以看作是某种能量分布特征函数的傅立叶变换, 是时间和频率的二元函数, 所以是一种时频域描

述信号的表达式。通过 Wigner-Ville 分布计算和分析,在理论上可以得到信号的能量在时间和频率中的分布情况,了解能量可能集中在某些频率和时间的范围,有利于对时变信号的分析,保持信号的时变特性。

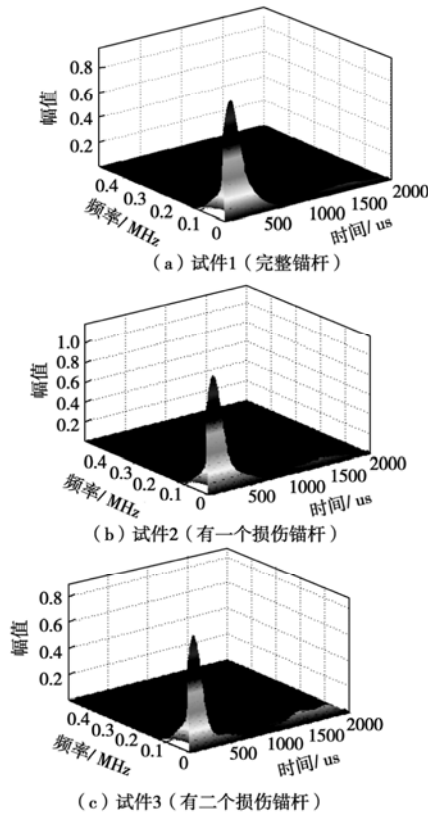


图4 锚杆动测信号 STFT 变换

Fig. 4 STFT of dynamic signal on bolts

进行离散信号的 Wigner-Ville 分布计算时,首先必须先把实际信号通过 Hilbert 变换转变成解析信号,另外由于实际信号都是能量有限信号,有一个有限的区间,因此必须对信号进行加窗处理。图5是对实测信号进行 Wigner-Ville 分析后的结果。从图中看出,不同的时间和频率处,不同损伤锚杆的信号反射能量是不同的。通过与完整锚杆信号相比较可以发现信号变化的大致位置及变化的程度。但由于其与短时傅立叶变换一样,处理时需要在时域加窗,因此有较强的频率泄露及窗效应。而且, Wigner-Ville 变换一样受测不准原理的制约,因而不能够严格实现在任一局部时间内得到信号变化剧烈程度的信息。

3 锚杆系统动测信号的小波分析

一般的时频分析是一种单一分辨率的信号分析方法,只使用一个固定的短时窗函数,因而还是存在着不可逾越的缺陷。目前,小波分析越来越受到人们的重视,得到了迅猛的应用和发展,因为小波分析

主要是着眼于信号频率的时变特征,引入联合时间频率域的概念,使我们能够清晰地看到信号的细微变化。

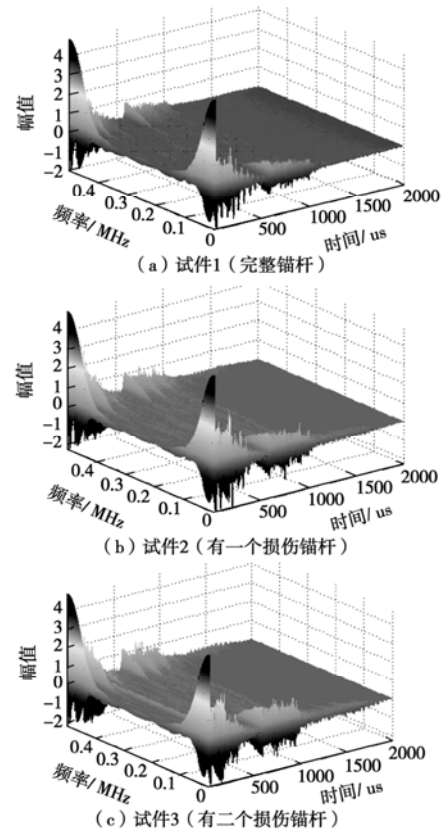


图5 对锚杆动测信号 WVD 变换

Fig. 5 WVD of dynamic signal on bolts

3.1 锚杆系统动测信号的多尺度分析

多尺度分析的基本思想是把信号投影到一组互相正交的小波函数构成的子空间上,形成了信号在不同尺度上的展开,从而提取了信号在不同频带的特征,同时保留了信号在各尺度上的时域特征。

运用多尺度分析方法提取锚杆系统动测信号在频域中的特征向量,输出结果见图6。这里采用了 *coif3* 小波分别对功率谱密度曲线进行三层多尺度分析,其中 *ca3* 表示第三层低频系数(逼近部分), *cd3* 表示第三层高频系数(细节部分), *cd2* 表示第二层高频系数(细节部分), *cd1* 表示第一层高频系数(细节部分)。与完整锚杆相比,损伤锚杆动测信号功率谱的多尺度分解系数出现较明显的变化,尤其是高频系数的显著畸变反映了锚杆的损伤状况。

3.2 锚杆系统动测信号的小波包分析

多尺度分析是一种有效的时频分析方法,但它每次只对信号的低频成分进行分解,高频部分保留不动。小波包对此进行了改进,它同时可在低频和高频部分进行分解,自适应地确定信号在不同频段的分辨率。

当损伤锚杆受到激振力作用时,其输出波形与完整锚杆相比,相同频带内的信号能量会有较大差别,

其中包含着丰富的损伤信息。因此利用小波包分解提取不同频带内能量变化的特征量作为信息输入, 借助于智能方法可对锚杆-围岩结构系统进行故障诊断。

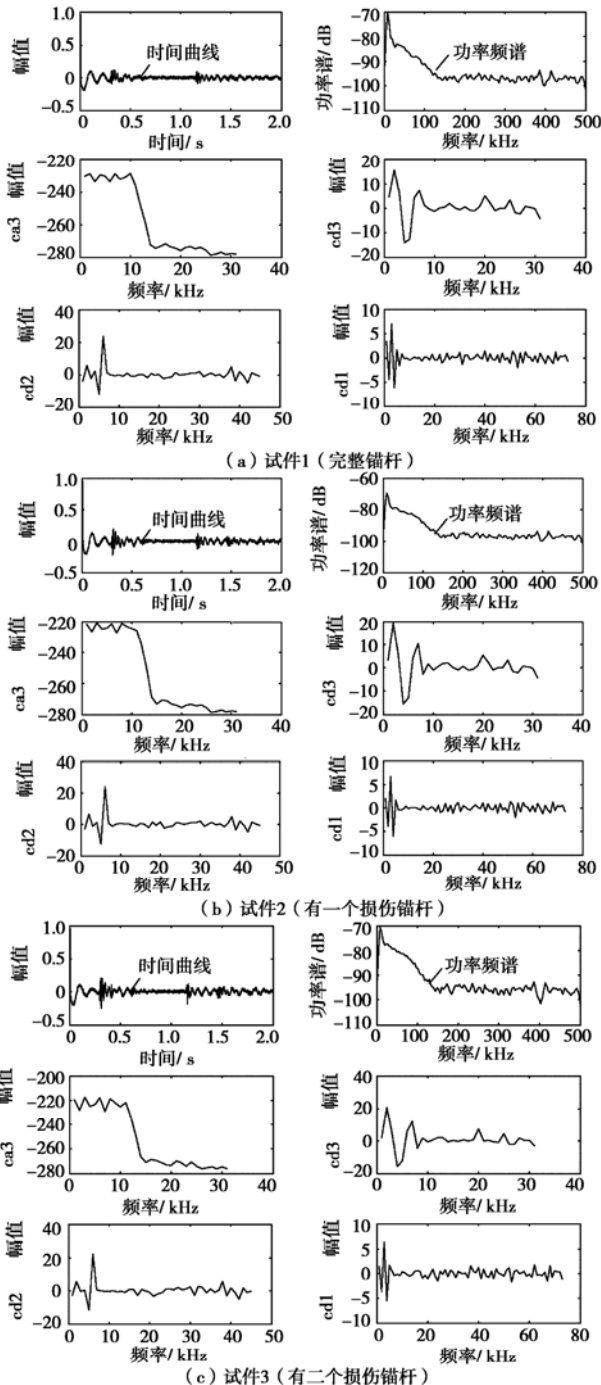


图6 多尺度一维小波分解(coif3小波)

Fig. 6 Multi-scale unidimensional wavelet decomposition (coif3 wavelet)

小波包分析的具体为以下4个步骤。

(1) 步骤一

对信号进行三层小波包分解, 分别提取8个频率成分的信号特征, 其分解结构如图7所示。其中, (0,0)节点代表原始信号 S , (1,0)节点代表第一层低频系数 X_{10} , (1,1)节点代表第一层低频系数 X_{11} , (3,0)

节点代表第三层第0个节点的系数, 其他依此类推。

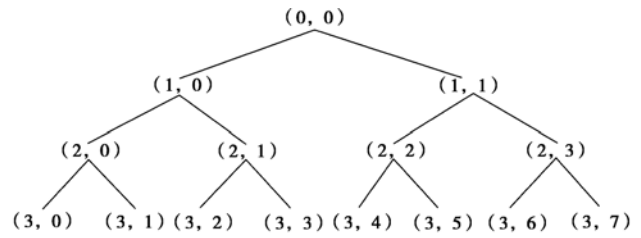


图7 小波包分解树结构

Fig. 7 Decomposition tree of wavelet packet

(2) 步骤二

对小波包分解系数进行重构, 提取各频带范围的信号。 S_{30} 表示 X_{30} 的重构信号, S_{31} 表示 X_{31} 的重构信号, 其他依此类推。在这里, 只对第三层的所有节点进行分析, 则总信号 S 可以表示为

$$S = S_{30} + S_{31} + S_{32} + S_{33} + S_{34} + S_{35} + S_{36} + S_{37} \quad (4)$$

假设原始信号中, 最低频率成分为0, 最高频率成分为1, 则提取的 S_{3j} ($j=0,1,\dots,7$) 8个频率成分所代表的频率范围为 $S_{30}=0.00\sim 0.125$, $S_{31}=0.125\sim 0.25$, $S_{32}=0.25\sim 0.375$, $S_{33}=0.375\sim 0.50$, $S_{34}=0.50\sim 0.625$, $S_{35}=0.625\sim 0.75$, $S_{36}=0.75\sim 0.875$, $S_{37}=0.875\sim 1.00$ 。

(3) 步骤三

求各频带信号的总能量。由于输入信号是一个随机信号, 其输出也是一个随机信号。设 S_{3j} ($j=0,1,\dots,7$) 对应的能量为 E_{3j} ($j=0,1,\dots,7$), 则有:

$$E_{3j} = \int |S_{3j}|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{jk}|^2 \quad (5)$$

其中, x_{jk} ($j=0,1,\dots,7$; $k=1,2,\dots,n$) 表示重构信号 S_{3j} 的离散点的幅值。

(4) 步骤四

构造特征向量。当锚杆系统存在损伤时, 会对各频带内信号的能量有较大的影响, 或增大或减少。因此, 以能量为元素可以构造一个特征向量。特征向量 T 构造如下:

$$T = [E_{30}, E_{31}, E_{32}, E_{33}, E_{34}, E_{35}, E_{36}, E_{37}] \quad (6)$$

当能量较大时, E_{3j} ($j=0,1,\dots,7$) 通常是一个较大的值, 在数据分析上会带来一些不方便的地方。由此, 应对特征向量 T 进行归一化处理, 令向量 T' 为归一化后的向量。

$$E = \left(\sum_{j=0}^7 |E_{3j}|^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

$$T' = \left[\frac{E_{30}}{E}, \frac{E_{31}}{E}, \frac{E_{32}}{E}, \frac{E_{33}}{E}, \frac{E_{34}}{E}, \frac{E_{35}}{E}, \frac{E_{36}}{E}, \frac{E_{37}}{E} \right] \quad (8)$$

图8~10是对完整锚杆和损伤锚杆的小波包分析结果, 其对应的归一化特征向量分别为

$$T' = [0.9887 \ 0.1301 \ 0.0422 \ 0.0578 \ 0.0111 \ 0.0134 \ 0.0070 \ 0.0064], \quad (9)$$

$$T' = [0.9897 \ 0.1264 \ 0.0372 \ 0.0524 \ 0.0096 \ 0.0117 \ 0.0061 \ 0.0058], \quad (10)$$

$$T' = [0.9840 \ 0.1588 \ 0.0468 \ 0.0628 \ 0.0122 \ 0.0145 \ 0.0068 \ 0.0069]. \quad (11)$$

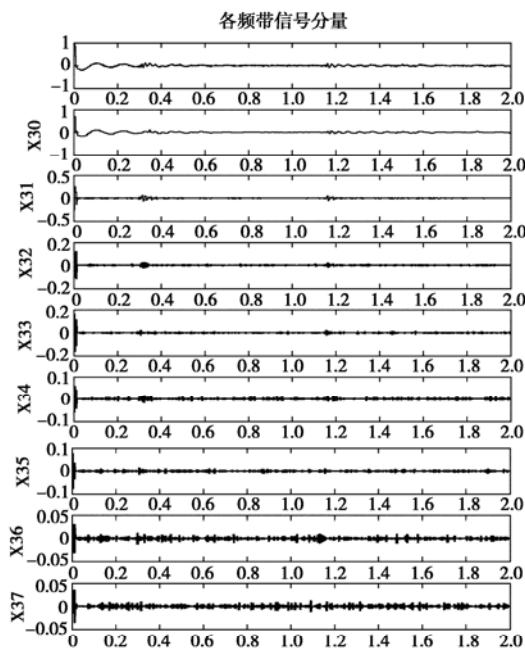


图 8 小波包分析 (完整锚杆)

Fig. 8 Wavelet packet analysis (integrity bolt)

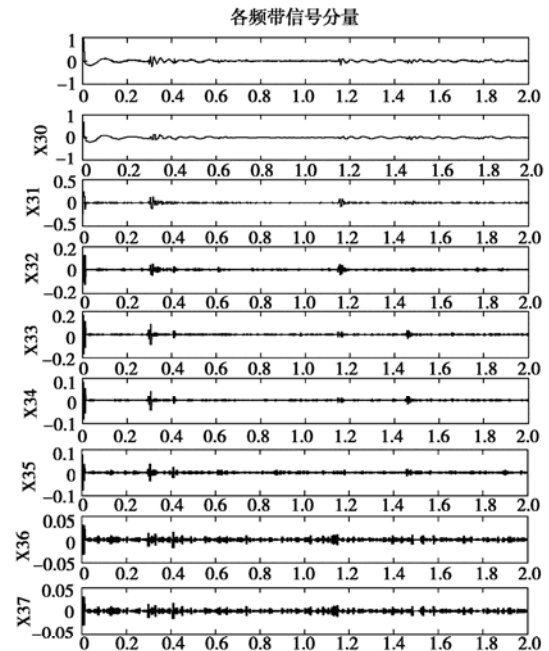


图 10 小波包分析 (有两个损伤锚杆)

Fig. 10 Wavelet packet analysis (bolt with two defects)

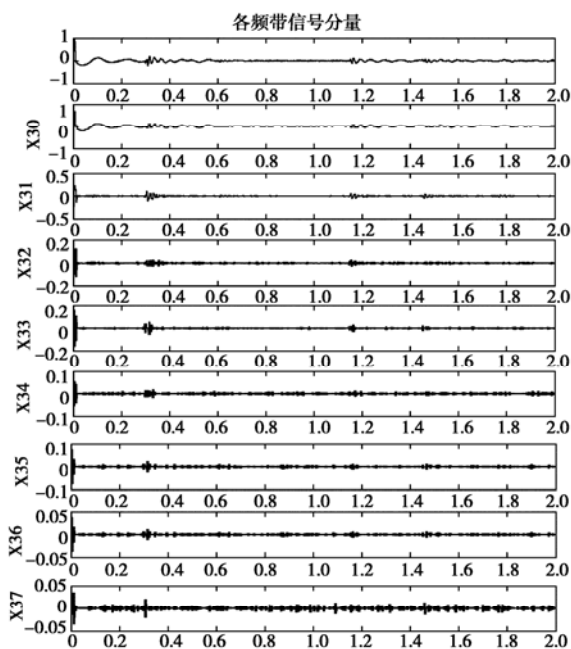


图 9 小波包分析 (有一个损伤锚杆)

Fig. 9 Wavelet packet analysis (bolt with a defect)

4 结 论

(1) 锚杆动测信号的短时傅立叶变换可在相平面表达信号的强度大小, 并且杆底反射信号比较明显, 但不能反映缺陷处的反射信号。另外, 锚杆缺陷越多, 反射信号的能量也越大。

(2) 通过 Wigner-Ville 分布计算和分析, 可以得到信号的能量在时间和频率中的分布情况, 不同损伤锚杆的反射能量是不同的。通过与完整锚杆信号相比较可以发现信号变化的大致位置及变化的程度。了解能量可能集中在某些频率和时间的范围, 有利于对时变信号的分析, 保持信号的时变特性。

(3) 小波分析是一种时频分析, 提供更多关于锚杆锚固质量的特征信息, 更适于处理锚杆系统有损伤情况下动测波形的识别。小波分解的结果是一种时频表示方式, 所提取的信号的特征是由多个特征元素组成的一个向量, 它和锚杆锚固质量之间的对应关系是一种复杂的非线性映射, 可以用人工智能的方法来对锚杆锚固质量进行评价分析。

参考文献:

- [1] 许 明, 张永兴, 阴 可. 砂浆锚杆的锚固及失效机理研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(6): 10 - 15. (XU Ming, ZHANG Yong-xing, YIN Ke. Study on anchorage and failure mechanism of mortar bolt[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2001, 23(6): 10 - 15. (in Chinese))
- [2] 李 义, 刘海峰, 王富春. 锚杆锚固状态参数无损检测及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1741 - 1744. (LI Yi, LIU Hai-feng, WANG Fu-chun. Nondestructive testing parameters of bolt anchoring state and its

- application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(10): 1741 - 1744. (in Chinese))
- [3] STEPHEN C T. Evaluation of ultrasonic measurement systems for bolt load determinations[R]. [S.l.]: Int BU of Mines DGH PA29264, 1990: 1 - 9.
- [4] WEIZ F. Thurner detection of invisible faults on rock-bolts in-situ[C]// International Symposium on Rock Bolting Theory and Application in Mining and Underground Construction. 1983.
- [5] TADOLINI S C. Evaluation of ultrasonic measurement systems for bolt load eterminations[M]. Denver: The U S Bureau of Mines, 1990.
- [6] TADOLINI S C, DYNI R C. Transfer mechanics of full-column resin-grouted roof bolts[M]. Denver: The U S Bureau of Mines, 1990.
- [7] SINGNER S P. Field verification of load-transfer mechanics of fully grouted roof bolts[M]. Denver: The U S Bureau of Mines, 1990.
- [8] 汪明武, 王鹤龄. 锚固体体系无损检测的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(2): 126 - 129. (WANG Ming-wu, WANG He-ling. Nondestructive testing of anchoring quality[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(2): 126 - 129. (in Chinese))
- [9] WANG Ming-wu, WANG He-ling. Nondestructive testing of grouted bolts system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 109 - 113.
- [10] 李 义, 王 成. 应力反射波法检测锚杆锚固质量的试验研究[J]. 煤炭学报, 2000, **25**(2): 160 - 164. (LI Yi, WANG Cheng. Experiment study on bolt bonding integrity with stress reflected wave method[J]. Journal of China Coal Society, 2000, **25**(2): 160 - 164. (in Chinese))
- [11] 许 明, 张永兴, 阴 可. 锚杆极限承载力的人工神经网络预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(5): 755 - 758. (XU Ming, ZHANG Yong-xing, YIN Ke. Prediction of limit bearing capacity of bolt byneural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(5): 755 - 758. (in Chinese))
- [12] 许 明, 张永兴. 锚固系统的质量管理与检测技术研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, **24**(1): 29 - 33. (XU Ming, ZHANG Yong-xing. Study on quality management and inspection technology of anchorage system[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, **24**(1): 29 - 33. (in Chinese))
- [13] 许 明, 张永兴. 锚杆低应变动测的数值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(9): 1538 - 1541. (XU Ming, ZHANG Yong-xing. Numerical study of low strain dynamic test for bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(9): 1538 - 1541. (in Chinese))
- [14] 许 明, 张永兴, 阴 可. 某隧道锚杆完整性的无损检测方法[J]. 土木工程学报, 2004, **37**(5): 78 - 80. (XU Ming, ZHANG Yong-xing, YIN Ke. Study on nondestructive detection of bolts' integrality in a tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, **37**(5): 78 - 80. (in Chinese))
- [15] 陈建功, 张永兴, 李英民. 完整锚杆低应变动力响应问题的半解析解及分析[J]. 世界地震工程, 2004, **20**(3): 56 - 61. (CHEN Jian-gong, ZHANG Yong-xing, LI Ying-ming. Semi-analytical solution to small strain dynamic response of integrate anchor bar and its analysis[J]. World Earthquake Engineering, 2004, **20**(3): 56 - 61. (in Chinese))
- [16] 张永兴, 陈建功. 缺陷锚杆振动问题的数学模型及其求解[J]. 地下空间与工程学报, 2005, **1**(1): 62 - 66. (ZHANG Yong-xing, CHEN Jian-gong. Model for longitudinal vibration of defective anchor bar and its solution[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, **1**(1): 62 - 66. (in Chinese))
- [17] 张永兴, 宋 静, 陈建功. 完整锚杆系统动力参数反演的遗传算法[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(6): 971 - 974. (ZHANG Yong-xing, SONG Jing, CHEN Jian-gong. A genetic algorithm for dynamic parameters reverse deduction of integrated anchorage system[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering. 2006, **2**(6): 971 - 974. (in Chinese))
- [18] 傅 翔, 宋人心, 王五平, 等. 冲击回波法检测预应力预留孔灌浆质量[J]. 施工技术, 2003, **32**(11): 37 - 38. (FU Xiang, SONG Ren-xin, WANG Wu-ping. Testing grouting quality in prestressed duct with impact-echo method[J]. Chinese Journal of Construction Technology, 2003, **32**(11): 37 - 38. (in Chinese))