

基于小波变换的瞬态压应力信号分析

张青哲¹, 杨人凤¹, 戴经梁², 张红梅³

(1 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

3 西安交通大学 生命科学与技术学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 黄土振动压实的压应力信号是一个含噪的非平稳瞬态突变信号. 为了分析信号的联合时频特性, 提出基于小波变换去噪和奇异值检测的信号分析方法. 利用多分辨小波分解, 选择性的提取有用频段信号并抑制某些高频段噪声, 可以有效实现信噪分离. 利用小波变换奇异值分析方法, 通过检测小波高频系数时序信号的 2 种模极大值, 可以获得压应力开始出现时刻、抵达峰值时刻点, 从而可计算出压应力从出现到抵达峰值的历经时间, 这对于进一步研究压应力在土体中的分布和传播规律具有重要意义.

关键词: 压应力; 信号; 小波变换; 去噪; 奇异值检测

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)05-0206-03

Transient Stress Signal Analysis Based on Wavelet Transform

ZHANG Qing-zhe¹, YANG Ren-feng¹, DAI Jing-liang², ZHANG Hong-mei³

(1 Key Laboratory for Highway Construction Technique and Equipment of Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2 Key Laboratory for Special Area Highway

Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3 School of Life Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The stress signal of soil during vibrating compaction is unstable and transient saltation signals accompanied by strong noise. To study the joint time - frequency property of the soil stress signal during vibrating compaction, wavelet transform method for de - noising and detection is proposed. By multiresolution wavelet decomposition, the reconstructed signal keeps useful frequency band but suppress some high frequency band. That separates the noise from the signal efficiently. For singularity analysis, the time of the stress appearance and the time of the stress peak arrival are obtained by detecting two kinds of the modulus maximum of the wavelet transform coefficients. Thus the impaction time from the stress appearance to peak arrival can be calculated. It is of great importance for analyzing the distribution and the propagation law of the stress in the soil.

Key words: stress; signal; wavelet transform; de - noising; singularity detection

1 引言

黄土振动压实的压应力信号通常是一个非平稳瞬态突变信号, 并含有噪声. 常用的压应力分析方法是对信号进行傅里叶变换, 从而分析其频谱特性. 但傅里叶变换无法有效将信号和噪声相互分离. 此外,

傅里叶变换是全局变换, 不具有时间分辨率^[1].

小波变换是近年来新发展的信号分析方法^[2]. 由于小波变换具有可变的局部时频窗, 可以利用不同分辨率的时频窗来“观测”图像, 被誉为“自动变焦”的数学显微镜, 非常适合于对瞬态突变的含噪振动信号进行分析, 并且可以对信号的突变点进行检

测^[3].小波变换广泛应用于各个领域的信号分析中^[3-5],但是小波变换在黄土振动压实压应力信号分析方面的应用国内还未见文献报道.为了有效分析压应力信号的联合时频特性,提出利用小波变换检测压应力开始出现时刻、抵达峰值时刻点,从而可计算出压应力从出现到抵达峰值的历经时间,这对于进一步研究压应力在土体中的分布和传播规律具有重要意义.

2 压应力信号的小波分析

2.1 小波变换信号去噪

信号 $f(t)$ 小波变换定义为:

$$W_f(j, k) = \langle f(t), \Psi_{j,k}(t) \rangle \\ = \frac{1}{2^j} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \Psi(2^{-j}t - k) dt \quad (1)$$

其中, $\Psi(t)$ 为基小波函数.从信号处理的角度来看,尺度参数 j 的变化相当于一个带通滤波器的通频带不断变化.平移参数 k 的变化相当于对信号的不同时段进行带通滤波.通过改变 j ,小波变换可以在低频时利用较宽的时窗即较窄的频窗观察信号,在高频时利用较窄的时窗即较宽的频窗观察信号.这种局部时频特性非常适合对低频变化缓慢而高频信号变化迅速的信号进行分析.

利用小波变换的局部时频特性可以有效实现信噪分离.其基本原理是利用多分辨小波分解将信号分解到不同的频段,通过提取信号所在的有用频带信号,抑制噪声所在的某些高频频段信号,再利用小波重构算法^[2],重构理想信号.

结合压应力信号特性,文中选用 symlets 正交小波 sym8 函数进行分析^[6].由于该工况下压路机的振动频率为 30Hz,因此理论上黄土压应力在 30Hz 左右会出现共振峰值.这个频段范围内的信号是有用信号,应该保留.

根据采样定理,小波变换的分析频率应为信号采样频率的一半,即 0~1000Hz.对原始土压应力信号 $s(t)$ 利用正交小波 sym8 函数进行 5 级小波分解.根据小波分解的频带分离理论,则第 5 级低频信号占有频率为 [0, 31.25]Hz,其信号全部保留,其余各级高频信号占有频带分别为 $[1000/2^k, 1000/2^{k-1}]$ Hz,其中 $k=1, \dots, 5$ 是小波分解的级数.利用最优预测变量阈值选择法,按照启发式阈值选取软阈值,并利用各层估计的噪声调整阈值的方法,对各级高频系数进行处理^[7].根据小波重构方法,利用处理后的各级高频系数和第 5 级低频系数进行信号

重构.

图 1(a)是采集的原始土压应力信号,图 1(b)是利用小波变换去噪后的信号 $sd(t)$.可以看出,利用小波变换去噪后的信号,保留了原始信号的低频特性,同时去除了其它高频频段的噪声,有效改善了信号特性.

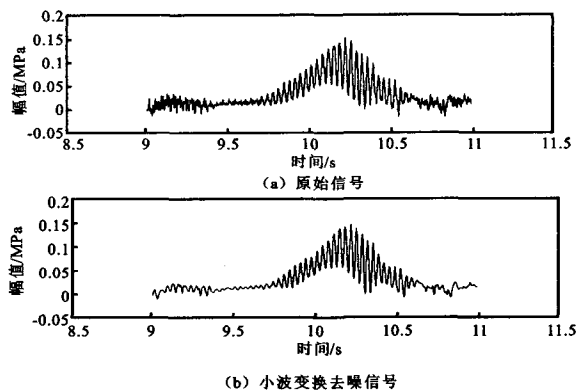


图1 原始压应力信号和小波变换去噪信号

2.2 小波变换奇异值检测

信号的奇异值点通常对应信号幅值或频率的突变点,是信号的特征之一.由于小波变换系数的模极大值在多尺度上的变化表征信号的奇异值点,因此利用小波变换可以检测信号的奇异值点^[2,6,8].其原理是对信号在多分辨空间进行小波分解,在奇异值点处,小波变换的各级高频系数具有模极大值,通过检测模极大值可以确定奇异值点出现的时刻.

根据黄土振动压实试验和压应力信号特点分析可知,在黄土振动压实过程中,土压应力信号的时序图上存在 2 个奇异值.第一个奇异值点是压应力从无到有即压应力开始出现点,对应小波高频系数时序中的第一个模极大值点.第二个奇异值点是由于共振引起的信号幅值突然增大产生的压应力峰值点,对应小波高频系数的模最大值点.

为了准确检测奇异值点,所选择的小波函数必须具有很好的正则性.因此小波函数必须是某一低通函数的一阶或二阶导数.选择正则性较好的 db5 小波进行多分辨分析^[8].根据前面的分析对小波去噪后的信号进行 5 级小波分解,分解后的各级小波系数如图 2 所示.

由于不同尺度下的小波变换相当于用不同频带的滤波器来观测信号,只有在适当尺度下,各突变点引起的小波变换才能避免干扰,因此在实际中需要结合多尺度上的小波高频系数的模极大值点进行奇异值检测.

利用上述方法对黄土碾压过程中的压应力信号

进行分析,分别对上、中、下 3 层土压应力开始出现时刻及抵达峰值时刻进行检测,分析土压应力从开始出现到抵达峰值的历经时间,并以此来研究压应力分布与传播规律.求出碾压时上、中、下各层土压应力出现时刻、抵达峰值时刻及历经时间见表 1.

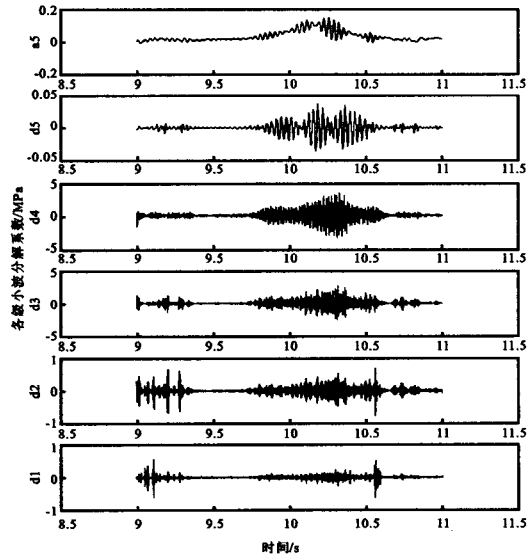


图 2 去噪信号的小波分解

表 1 基于小波奇异值检测的压应力信号历经时间

传感器位置	压应力信号出现时刻	信号抵达峰值时刻	历经时间/s
上层	9.9135	10.2871	0.3736
中层	9.9024	10.3119	0.4095
下层	9.9173	10.3671	0.4498

3 结束语

文中提出了基于小波变换的压应力信号分析方法,对于研究压应力信号的联合时频特性具有重要意义.

(1) 利用多分辨小波分解可以有效实现信噪分离.根据试验作业参数和采样定理,选取小波分解级数.保留原始信号[0,31.25]Hz 频段的低频特性,同时采用最优预测变量阈值选择法,自适应的保留有用高频频段,实现有效去噪.

(2) 利用小波变换奇异值检测方法,通过分析

小波高频系数时序信号的 2 种模极大值点,对土压应力开始出现时刻和抵达峰值时刻进行检测.通过计算压应力从开始出现到抵达峰值的历经时间,可以有效分析土压应力在土内不同深度的分布和传播规律.

(3) 奇异值检测结果分析表明,黄土压应力在土内不同深度处的作用时间不同.上层作用时间最短,能量被上层土体较快的吸收,中层次之,而压应力在下层作用时间最长,能量吸收较慢.这一结论对于进一步分析振动压实机理具有重要意义.

文中的方法可以应用于分析和研究各种非平稳瞬态突变含噪信号的联合时频特性.

参考文献:

[1] Alan V Oppenheim, Alan S Willsky. With s Hamid Nawab. 信号与系统[M]. 2 版. 刘海棠,译. 西安:西安交通大学出版社.

[2] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.

[3] 常云华,李宗伟,尹大娟. 非平稳振动信号的小波分析方法[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(5): 98-101.

[4] 康金钟,康志伟. 基于平移不变的小波变换去噪快速算法[J]. 微电子学与计算机,2005,22(9):24-26.

[5] 张林. 基于小波变换的局放信号检测与提取[J]. 微电子学与计算机,2002,19(5):59-61.

[6] Yu fu, Wen shengli, Guo huaxu. Wavelets and singularities in bearing vibration signals[C]// Proceedings of the Second International Conference on Machme Learning and Cybernetics. Xi'an, 2003:2433-2436.

[7] 胡昌华,张军波,夏军,等. 基于 Matlab 的系统分析与设计-小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2000.

[8] Hwang W L, Mallat S G. Singularities and noise discrimination with wavelets[C]// 1992 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. New York:1992(4):377-380.

作者简介:

张青哲 男,博士研究生,副教授.研究方向为振动信号处理、振动压实机理和工程机械作业质量控制.