

文章编号: 1000-7598 (2010) 08-2541-06

基于多重互相关函数分析剪切波速

何先龙¹, 赵立珍²

(1. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080; 2. 防灾科技学院, 河北 三河 065201)

摘要: 介绍了一种提高单孔法剪切波速测量精度的新方法-多重互相关函数法。考虑到判断场地剪切波到时差的困难, 提出了用多重互相关函数来求得两剪切波的到时差。互相关分析可求取两相似信号的到时差, 但当两信号相似性比较差时, 所求得到时差的误差较大; 自相关函数本身可进行多重自相关分析, 互相关函数结合多重自相关函数后, 也可以进行多重互相关分析来求取两相似信号的到时差。试验表明: 相比互相关函数, 多重互相关函数可改善触发信号和井中三分向探头输出信号的相似性及更好地抑制噪声, 因此能更精确地计算出触发信号和井中三分向探头输出信号的到时差。基于此原理设计了剪切波波速的测试系统, 此系统能自动分析出测点的剪切波速和形成完整的报告。

关键词: 多重互相关函数; 剪切波速; 到时差; 单孔法

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Analysis of shear wave velocity based on multiple cross-correlation functions

HE Xian-long¹, ZHAO Li-zhen²

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Shanhe, Hebei 065201, China)

Abstract: A new wave arrival time difference detection method based on cross-correlation functions for shear wave velocity measurement in single-hole method is introduced. As the difficulty to analyze the arrival time difference of shear wave velocity, the multiple cross-correlation function is used to get the arrival time difference of two similar shearwave velocities. We need do multiple-auto-correlation function to the signal with big noise to get high SNR. Cross-correlation function can get the arrival time difference of two similar signals, but the error is always too big when the nose of signal is big. The auto-correlation function can do multiple auto-correlation analyses; and the cross-correlation also can do multiple cross-correlation analysis with multiple auto-correlation function. The experiments indicate: multiple cross-correlation function can increase the SNR and get the arrival time difference precisely of the signal of shear wave acquainted by trigger and the shear-wave acquainted by probes. Based on this principle, an expert recognition system to calculate shear wave velocity is designed. This system can automatically analyze the shearwave velocity of every measured point and make a complete report.

Key words: multiple cross-correlation functions; shear wave velocity; arrival time difference; single-hole method

1 引言

场地剪切波速对地基土的动力学参数的计算、建筑地基的承载力、地层沉积年代的确定、路基质量检测、饱和砂土的液化判别和场地微振卓越周期的估算都有直接或者间接的意义^[1-7]。目前, 我国工程剪切波速测量方法主要有单孔法、跨孔法和面波法^[1]。实际工程中, 单孔法应用最为广泛, 此方法操作简单, 但由于信号频率的分散性和环境因素等造成的触发传感器和探头输出的波形相似性比较

差, 影响到判断波形初至时间的精度^[4]。

对两相似信号进行互相关分析后, 所得互相关函数的最大峰值偏离时间轴中点的位置反映了两信号的时差, 同时互相关函数保留了两个信号的共同频率分量的频率、幅值^[8,10-11]。因此, 可通过互相关函数来求取两相似信号的到时差。在单孔法测量波速时采用互相关函数来计算场地剪切波速的到时差。此方法相比传统的人工识别法, 其精度有所提高^[4]。但此方法要求触发信号与探头水平信号具有良好的相关性及假设土层为弹塑性连续介质和线性

收稿日期: 2009-04-15

第一作者简介: 何先龙, 男, 1981年生, 博士研究生, 主要从事土木工程测试与信号处理。E-mail: hx14128@163.com

系统^[5], 即互相关函数是建立在线性系统具有频率保持性的基础上的, 而实际上土层介质相比其他介质具有较强的细观颗粒性和结构性^[5], 即土层具有较大的非线性, 因此, 触发信号经过反射、散射、折射后, 探头水平向传感器所获取的信号频率成分往往比触发信号丰富些^[4,9], 如图 1~3 所示, 在触发剪切波里, 基频信号的频率为 14.35 Hz, 探头的两个水平向传感器收到的剪切波的基频为 22.37 Hz (探头里的传感器和触发传感器的性质一样, 频带为 10~250 Hz)。因此, 触发信号里的主要频率成分在探头水平向传感器所获取的信号里不一定是主要频率成分, 进而两信号的相关性比较差。

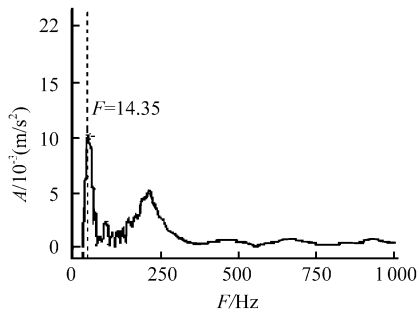


图 1 触发信号的频谱

Fig.1 Spectrum of trigger signal

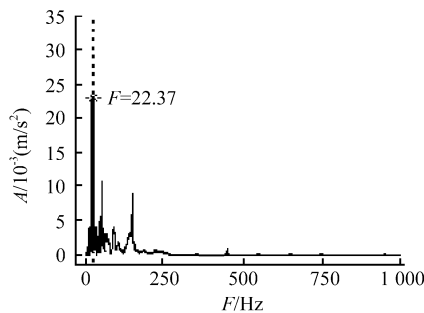


图 2 探头剪切 S 波 1 的频谱

Fig.2 Spectrum of Probe S wave 1

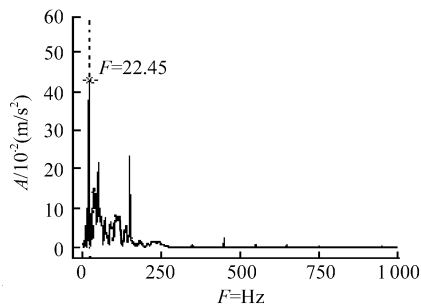


图 3 探头剪切 S 波 2 的频谱

Fig.3 Spectrum of Probe S wave 2

由于土层介质具有较差的频率保持性, 使触发

剪切波与探头收到的剪切波的相似性比较差, 当采用互相关函数分析波速时, 当触发剪切波与探头收到的剪切波的相似性比较差时, 所得波速误差较大^[1]。本文提出, 当触发剪切波与探头收到的剪切波的相似性比较差时, 可对其进行多重互相关函数变换, 来改善触发剪切波与探头收到的剪切波的相似性, 相比单重互相关函数变换, 多重互相关函数变化同时更好地抑制了噪声。

2 多重互相关分析的原理

假定两个信号 $y_{00}(t)$ 和 $y_{01}(t)$ 分别为

$$y_{00}(t) = x_0(t) + n(t) \quad (1)$$

$$y_{01}(t) = x_0(t + t_0) + n(t) \quad (2)$$

式中: $x_0(t)$ 为有用信号; $n(t)$ 为白噪声。在信号处理方面, 经常用自相关法和互相关法来提高信噪比, 而且还可以用互相关法来求两相似信号的相位差或时差。从有用信号的角度来看, $y_{00}(t)$ 和 $y_{01}(t)$ 在时间差上相差 t_0 。设信号采样时间为 T , $y_{00}(t)$ 和 $y_{01}(t)$ 的互相关函数为 $y_{010}(\tau)$, $y_{00}(t)$ 的自相关函数为 $y_{001}(\tau)$ 。

$$\begin{aligned} y_{010}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_{-T}^T y_{00}(t) \cdot y_{01}(t + \tau) d\tau = \\ &= \frac{1}{T} \int_{-T}^T [x_0(t) \cdot x_0(t + t_0 + \tau) + x_0(t) \cdot n(t + \tau) + \\ &\quad x_0(t + t_0 + \tau) \cdot n(t) + n(t) \cdot n(t + \tau)] d\tau \end{aligned} \quad (3)$$

由相关性质可得 $x_0(t)$ 与 $n(t)$ 的互相关系数值为 0; 当 T 趋于无穷大时, $n(t)$ 自相关值为 0。但 T 在现实采样中不可能趋于无穷大, 故 $n(t)$ 自相关值只能是比 $n(t)$ 值更小, 但不为 0, 而是逐渐趋于 0, 因此式 (3) 可写成:

$$y_{010}(t) = x_1(t + t_0) + n_1(t) \quad (4)$$

式中: $x_1(t + t_0)$ 为 $x_0(t)$ 与 $x_0(t + t_0)$ 的互相关函数; $n_1(t)$ 为 $n(t)$ 的自相关函数。

$$\begin{aligned} y_{001}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_{-T}^T y_{00}(t) \cdot y_{00}(t + \tau) d\tau = \\ &= \frac{1}{T} \int_{-T}^T [x_0(t) \cdot x_0(t + \tau) + x_0(t) \cdot n(t + \tau) + \\ &\quad x_0(t + \tau) \cdot n(t) + n(t) \cdot n(t + \tau)] d\tau \end{aligned} \quad (5)$$

同样式 (5) 可写成为

$$y_{001}(t) = x_1(t) + n_1(t) \quad (6)$$

式中: $x_1(t)$ 为 $x_0(t)$ 的自相关函数。

由此可得, 从有用信号角度来看, $y_{001}(t)$ 与 $y_{010}(t)$ 时差为 t_0 。从噪声角度看, $n_1(t)$ 比 $n(t)$ 更小, $y_{001}(t)$ 和 $y_{010}(t)$ 的信噪比比 $y_{00}(t)$ 和 $y_{01}(t)$ 的信噪比高, 更容易看出有用信号的时域特性。

设 $y_{020}(t)$ 为 $y_{001}(t)$ 与 $y_{010}(t)$ 的互相关函数, 则

$$y_{020}(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-2T}^{2T} y_{001}(t) \cdot y_{010}(t + \tau) d\tau \quad (7)$$

设 $y_{002}(t)$ 为 $y_{001}(t)$ 的自相关函数, 则

$$y_{002}(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-2T}^{2T} y_{001}(t) \cdot y_{001}(t + \tau) d\tau \quad (8)$$

因为 $y_{001}(t)$ 与 $y_{010}(t)$ 在时域上相差时间 t_0 , 所以由自相关特性和互相关特性可得 $y_{002}(t)$ 和 $y_{020}(t)$ 也在时域上相差时间 t_0 , 且信噪比有所提高。

设 $y_{0n0}(t)$ 为 $y_{00(n-1)}(t)$ 与 $y_{0(n-1)0}(t)$ 的互相关函数, $y_{00n}(t)$ 为 $y_{00(n-1)}(t)$ 的自相关函数, 则 $y_{0n0}(t)$ 和 $y_{00n}(t)$ 更能清楚地显示 $y_{00}(t)$ 和 $y_{01}(t)$ 的时域特性。因 $y_{0n0}(t)$ 信噪比比 $y_{0(n-1)0}(t)$ 的信噪比更高, 从而更能准确地测量出 $y_{00}(t)$ 与 $y_{01}(t)$ 的时间差 t_0 。而 $y_{00n}(t)$ 更能准确地测量出 $y_{00}(t)$ 信号的有效信号 $x_0(t)$ 的周期。

3 试验验证

设 $x(t) = \sin(20\pi t) + n(t)$, 其中 $n(t)$ 为幅值为 1 的白噪声信号。编写程序模拟得图 4 波形。设

$y(t) = \sin(20\pi t + \frac{p}{3}) + n(t)$, 其中 $n(t)$ 为幅值为 1 的白噪声信号, 编写程序模拟得图 5 所示波形。

图 4、5 无法辨识正弦信号。对两信号进行一重自互相关分析后, 其相关函数的波形如图 6、7 所示。有用信号逐步显现出来, 但还是看不出有用信号的时域特性。对两信号进行二重自互相关后, 其相关函数的波形如图 8、9 所示, 可以辨识出原信号的某些时域特性, 如有用信号为正弦信号和准确的显示正弦信号的周期。试验分析结果见表 1。

表 1 实验分析结果比较

Table 1 Analysis of experimental results

信号	自相关函数最 大值对应时间/s	互相关函数最 大值对应时间/s	绝对时 间差/s	真实绝对 时间差/s	误差%
一重自互 相关函数	0.2	0.188	0.012	0.017	29.4
二重自互 相关函数	0.4	0.382	0.018	0.017	5.9

一重互相关函数变换是对原始信号 X 与 Y 进行

互相关分析, 而二重互相关函数变换是对一重自相关函数变换所得信号与互相关函数变换所得信号进行互相关分析。由图 6~9 可以看出, 一重自相关函数变换所得信号与一重互相关函数变换所得信号的信噪比和相似性明显大于原始信号 X 与 Y 的信噪比和相似性。因此, 由表 1 可得: 通过二重互相关函数变换计算出的到时差的精度明显高于一重互相关函数变换计算出的到时差的精度。

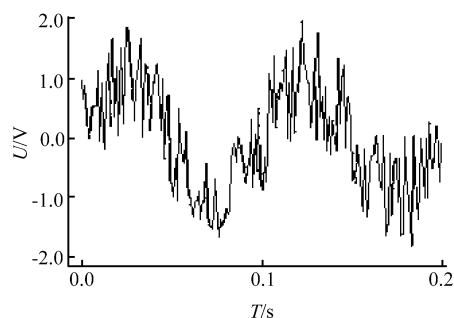


图 4 原始信号 X
Fig.4 Original signal X

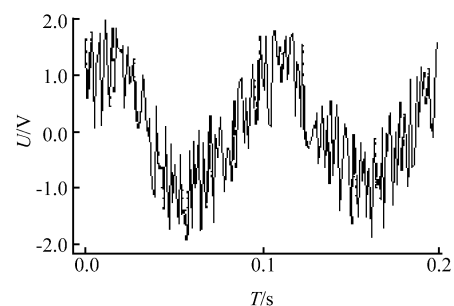


图 5 原始信号 Y
Fig.5 Original signal Y

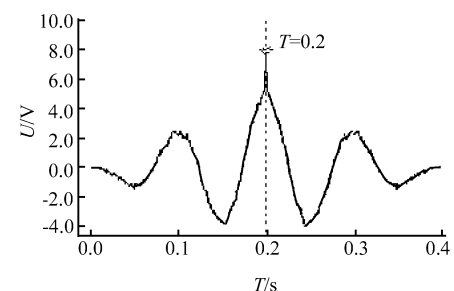


图 6 信号 X 的一重自相关
Fig.6 The one auto-correlation of signal X

4 场地剪切波速测试数据分析

用多重自互相关分析法对辽宁新城市大学城 5 号教学楼场地 2 号孔第 1 个测点的数据来分析触发信号与探头采集的信号的首到时差。此测点深 1 m, 土层为淤泥, 其试验剪切波速为 60~130 m/s^[6]。其

原始波形见图 10、11, 一重相关的波形见图 12、13, 二重相关的波形见图 14、15, 分析结果见表 2。

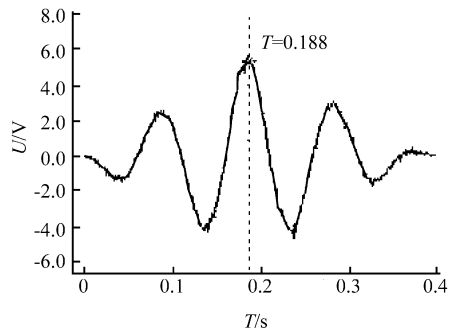


图 7 信号 X 与 Y 的一重互相关
Fig.7 One cross-correlation of signal X and Y

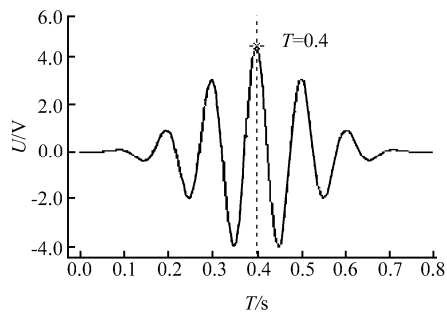


图 8 信号 X 的二重自相关
Fig.8 The two auto-correlation of signal X

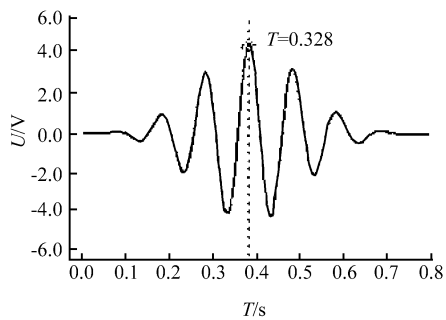


图 9 信号 X 与 Y 的二重互相关
Fig9. The two cross-correlation of signal X and Y

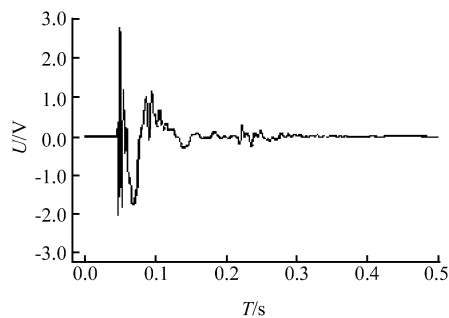


图 10 触发信号 Y
Fig.10 Trigger signal Y

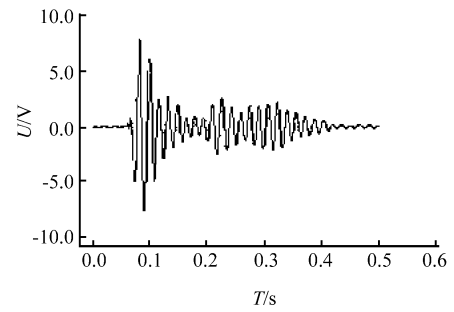


图 11 探头信号 Y
Fig.11 Probe signal Y

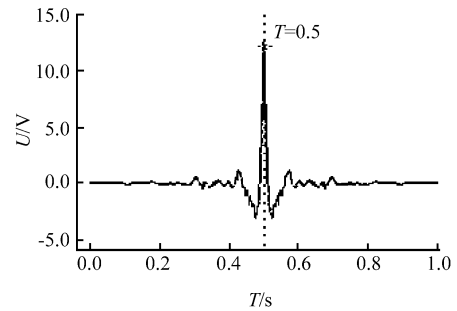


图 12 触发信号 X 的一重自相关
Fig.12 One auto-correlation of trigger signal X

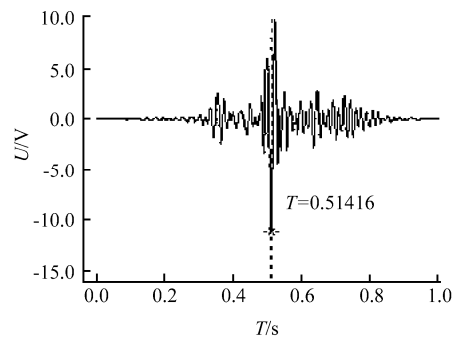


图 13 触发信号 X 和探头信号 Y 的一重互相关
Fig.13 One cross-correlation of trigger signal X and probe signal Y

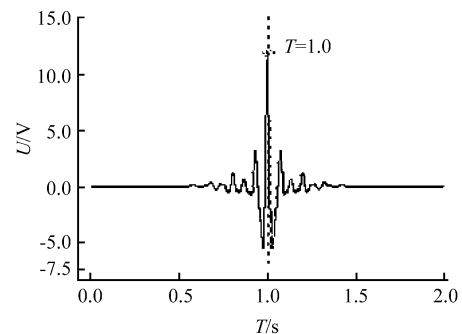


图 14 触发信号 X 的二重自相关
Fig.14 Two auto-correlation of trigger signal X

5 G01 波速测试系统-剪切波速自动识别软件简介

基于以上的思路, 编写了剪切波速自动检测软

件。此软件主要由带通滤波器、波形截取、多重自互相关分析、波速计算、结果优化和形成 Word 形式的标准的剪切波速测试报告等程序块组成。表 3 和表 4 为采用本软件对辽宁新城市美心花园第 23 号孔的剪切波速分析结果。

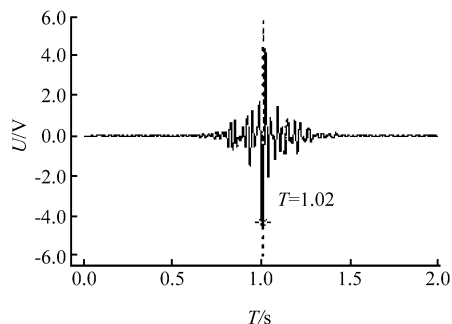


图 15 触发信号 X 和探头信号 Y 的二重互相关
Fig.15 Two cross-correlation of trigger signal X and probe signal Y

表 2 多重互相关分析结果
Table 2 Analysis of multiple correlation results

分析 方法	探头采集 信号初到 时刻/s	触发信号 初到时刻/s	校正后的时间 差/s (校正系数为 0.316)	剪切波 速/m/s
人工寻找 到时	0.053 68	0.061 73	0.002 54	393
互相关 函数	0.5	0.514 16	0.004 478	223
二重互相 关函数	1	1.024 85	0.007 858	127

表 3 23 号孔的 S 波速测试记录表
Table 3 The S-wave velocity test record of hole No.23

测点 序号	测试 深度/m	斜距校 正系数	触发 时刻/s	到达 时刻/s	时间 差/ms	剪切波速 /(m/s)
1	1	0.447	0.899	0.918	18.787	119.020
2	2	0.707	0.750	0.768	18.328	219.390
3	3	0.823	1.099	1.118	18.993	351.710
4	4	0.894	0.899	0.920	20.720	366.350
5	5	0.928	0.800	0.823	23.801	280.470
6	6	0.949	0.999	1.026	26.539	324.830
7	7	0.962	0.949	0.978	28.105	541.390
8	8	0.970	0.949	0.980	30.171	445.120
9	9	0.976	0.949	0.982	32.140	475.190
10	10	0.981	0.800	0.833	33.938	525.320
11	11	0.984	0.949	0.985	35.408	641.770
12	12	0.986	1.399	1.436	36.831	669.620
13	13	0.988	1.849	1.887	38.171	716.040
14	14	0.990	0.999	1.039	39.854	800.970

将表 3 中得到的剪切波速与表 4 进行对比,表明所测得波速准确地反映了此孔的土层分布情况。

表 4 23 号孔的土层分层表 (辽宁新城市勘探研究院提供)

Table 4 The stratification soil case of hole No.23				
土层 编号	岩土 名称	土层 厚度/m	岩土 类别	剪切波速 范围/(m/s)
1	淤泥	0.9	软弱	60~130
2	粉质黏土	1.2	软弱	109~240
3	碎石	1.7	中软	250~370
4	砂质黏性土	1.1	中硬	150~300
5	全风化花岗岩	1.4	中硬	250~400
6	强风化花岗岩	3.6	岩石	350~650
7	中风化花岗岩	3.5	岩石	600~900

5 结 语

由试验数据和实际场地剪切波速测试数据分析可得出下面结论:

(1)两相似信号的多重互相关函数信号与两信号中的任何一个信号的等重自相关函数信号的到时差(相位差)等于两相似信号本身的到时差(相位差)。且多重相关后,相关函数信号只表达出两信号的同频率成分的时域特性;

(2)相比互相关函数,多重互相关函数可以改善触发信号与井下三分向探头输出信号的相似性及更好地抑制噪声,从而更准确地计算出场地剪切波速。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国机械工业部. GB/T50269—97 地基动力特性测试规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] 中国建筑科学研究院. GB5011G—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [3] 林宗元. 岩土工程试验监测手册[M]. 沈阳: 辽宁科学出版社, 1994.
- [4] 侯兴民, 薄景山, 杨学山, 等. 互相关函数在单孔法剪切波速测量中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 60—65.
HOU Xin-min BO Jing-shan YANG Xue-shan et al. Applications of correlation function in shear-velocity measurement of single-hole method[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2004, 24(2): 60—65.
- [5] 赵记生, 陶夏新, 欧进萍, 等. 弹塑性介质内的波速变化[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 524—529.
ZHAO Ji-shen, TAO Xia-xin, OU Jin-pin, et al. Wave velocity variation in elastoplastic media[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 524—529.

- [6] 范云. 填土压实质量检测技术的发展与评析[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 149—154.
FAN Yun. Advance and comment of checking technique on the quality of filled soil compaction[J]. Rock and Soil Mechanic, 2002, 23(4): 149—154.
- [7] 范云, 陈进杰, 王明生. 以波速代替 K30 评价路基压石质量的理论与实践[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 451—455.
FAN Yun, CHEN Jin-jie, WANG Ming-sheng. Theory and practice of subgrade compaction quality testing by surface wave velocity in stead of index K30[J]. **Rock And Soil Mechanics**, 2001, 22(4): 451—455.
- [8] 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1985.
- [9] 陈英杰. 瑞利波法在工程抗震中的应用[J]. 世界地震工程, 2005, 21(1): 97—101.
CHEN Ying-jie. Application of Rayleigh wave method in earthquake engineering [J]. **World Earthquake Engineering**, 2005, 21(1): 97—101.
- [10] 曹会国. 基于 LABVIEW 相关分析的研究[J]. 山东大学自然科学报, 2007, 26(2): 68—81.
CAO Hui-guo. Research on LABVIEW-based correlation Analysis[J]. **Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)**, 2007, 26(2): 68—81.
- [11] 罗映霞, 马君, 朱青松. 基于 MATLAB 的信号相位差的互相关函数求法[J]. 科技情报开发与经济, 2003, 13(7): 28—30.
LUO Ying-xia, MA Jun, ZHU Qing-song. A method for phase difference measurement with correlation function based on matlab[J]. **Sci/Tech Information Development & Economy**, 2003, 13(7): 28—30.