

# 声波透射法桩基检测中声测管弯斜小波分析\*

张献民<sup>1,2</sup>, 吕耀志<sup>3</sup>

(1. 中国民航大学机场学院 天津, 300300) (2. 南京航空航天大学民航学院 南京, 210016)

(3. 天津市市政工程设计研究院岩土勘察分院 天津, 300201)

**摘要** 为消除声测管弯斜对桩基检测结果准确性的影响,根据一维小波分析原理,在深入分析声波透射法测管弯斜时检测信号特点的基础上,运用一维小波分析原理通过计算机模拟得到了弯斜识别效果最优的小波函数。建立了声测管弯斜修正模型,利用修正模型对实际工程中某桥梁桩基声测管发生弯斜的检测数据予以修正,修正后的数据不仅能够消除声测管弯斜对检测数据的影响,且保留了检测信号中有用的高频信息,取得了较好的修正效果。

**关键词** 桩基检测; 声波透射法; 小波分析; 声测管; 弯斜修正

**中图分类号** TU473.16

## 引言

桩基础埋于地下属于隐蔽性工程,在施工、检测中稍有不慎极易造成工程质量隐患。声波透射检测法检测精度高,不受桩长、桩径限制,具有检测信号易采集和分析等优势,在灌注桩和地下连续墙的检测中得到广泛应用。虽然声波透射法在桩基检测中拥有众多优点,但预埋声测管管距变化(弯斜)问题却一直困扰着检测人员。由于检测时是将外漏于桩顶部的声测管间的距离当作桩身各处测管间的距离,因此声波透射法检测规程<sup>[1-3]</sup>中明确要求声测管应保持平行,即两声测管管距为一定值。实际的桩基础施工中往往做不到这一点,尤其是在没有放置钢筋笼的灌注桩中,声测管弯斜常会发生,影响检测的准确性,甚至造成误判、漏判,给工程质量带来隐患。可见,在桩身完整性判断前对声测管是否弯斜进行检测并对管距进行修正是十分必要的。相关学者在声波透射法检测桩基缺陷方面已经做了大量的研究工作,对声测管的弯斜判断和修正也做过很多研究,取得了一定效果<sup>[4-7]</sup>。目前,工程中主要依靠拟合的方法来减小声测管弯斜对检测结果的影响,拟合时函数的选取具有很大的的人为因素,且拟合的办法并不能自动识别出声测管是否弯斜、在何处弯斜。

笔者在分析声测管弯斜原因和特点的基础上,提出将小波分析理论用于声测管弯斜的识别与修

正,通过计算机模拟以及工程实例的检验,证实了该理论的可行性,在声测管弯斜修正方面取得了较好的效果。

## 1 声测管的布设及弯斜原因

### 1.1 声测管的布设

声测管作为声波透射法测桩的径向换能器的通道,埋设数量决定了每根桩中检测剖面的个数和检测精度。为了保证检测精度同时又不造成检测成本过高,规范对声测管的埋设做了具体规定:当桩径 $D \leq 800$  mm时,设置2根管;桩径 $800 < D \leq 2000$  mm,设置不少于3根管;当 $D > 2000$  mm时,设置不少于4根管,布置图如图1所示。检测时,沿箭头所指方向开始将声测管按顺时针方向编号。图中1检测剖面的编号分别为:1-2;1-2,1-3,2-3;1-2,1-3,1-4,2-3,2-4,3-4。当声测管的根数为 $n$ 时,每根桩的检测剖面就有 $C_n^2$ 个。

### 1.2 声测管的弯斜

在灌注桩的施工中易造成声测管的弯斜,且由于声测管埋于桩内,一旦发生弯斜很难被发现。造成声测管弯斜的原因有很多,主要有以下几个方面:a. 在钻孔后安放钢筋笼的过程中钢筋笼的底部会在地面拖动,如果声测管固定不牢,很容易发生弯曲变

\* 河北省交通科学基金资助项目(编号:2010112);中国民航大学科技立项资助项目(编号:111A07003)

收稿日期:2010-12-01;修改稿收到日期:2011-04-06

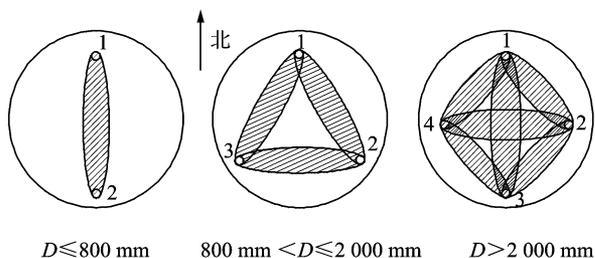


图1 声测管布设示意图

形;b. 声测管与钢筋笼焊接不牢固或绑扎间距过大时,在浇筑混凝土时声测管受混凝土挤压发生弯曲变形;c. 当钢筋笼横截面上固定声测管的多边形或不是相等且平行的多边形,会导致固定在相应定点上的声测管在节点间不能保持平行。

声波透射法检测桩基缺陷时得到的检测数据是在桩身内不同深度处的声时-波幅信号,根据在桩顶部测得的声测管之间的距离,可以计算得到桩身内不同深度处的波速和波幅。波速计算公式为

$$v = D/T \quad (1)$$

其中: $v$  为波速; $D$  为桩顶测得的管距; $T$  为声时。

由式(1)可知,当管距变化10%时声速也会变化10%,所以必须对从弯斜声测管中测得的检测数据予以修正。

## 2 修正方法及其优缺点

目前,提出的对声测管弯斜的修正主要有“投影法”、“多项式拟合法”和“神经网络法”等<sup>[4-7]</sup>,这些方法在声测管的弯斜修正方面取得了较好的效果,然而在解决声测管弯斜的识别与修正问题时,大都需要人工凭经验来判断,具有局限性。下面简要分析几种方法的特点:

1) 投影法:理论上清晰明确,但只能处理个别简单的弯曲情况,若有两根以上的声测管产生弯曲,此法就无能为力了。由于其适用范围的局限性,此法没有推广。

2) 多项式或三角函数拟合:由于声测管弯曲变化的多样性和难以预测性,且最小二乘法拟合建模需先给定建模函数形式,人为所选取的模型函数具有主观性,且对修正结果具有很大影响,使该方法的应用有一定的局限性;但因其理论简单、实用性强,目前工程中主要采用此方法。

3) 神经网络法:理论先进,但过于复杂,不易被工程界所接受,目前只停留在研究中,没有大规模工

程应用。

## 3 基于小波分析的声测管弯斜识别与修正原理

### 3.1 声测管弯曲异常时检测数据的特点

声测管一般为35~50 mm的钢管、钢质波纹管或塑料管,为了达到一定的刚度,目前许多大直径灌注桩大都采用较贵的钢管作为声测管。固定在钢筋笼上的测管发生弯曲时曲率半径较大,其弯斜长度通常为10~30 m甚至更长,为幅值较高的渐变异常。桩身缺陷产生的异常一般是幅值视缺陷而定的、突变性的窄范围异常<sup>[6]</sup>。从频域的角度来看,前者可视为低频信号,后者可视为高频信号。这样就可以尝试分离这两种特点不同的信号,实现对检测数据的修正。图2和图3分别为相同强度和长度的正常桩检测信号和声测管发生弯斜时的检测信号。

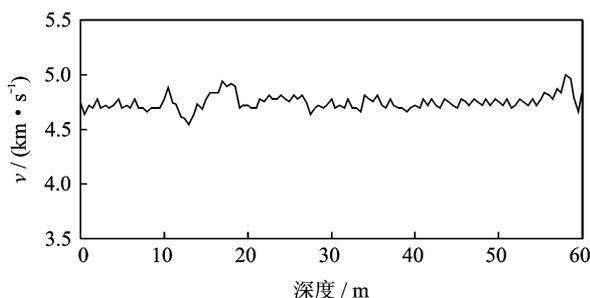


图2 声测管正常时的数据

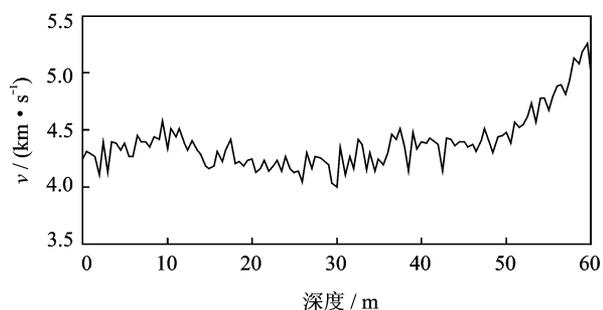


图3 声测管在桩底发生弯曲时的数据

### 3.2 离散信号小波变换

小波变换的实质是将信号展开成为一族小波基函数的加权和,这族基函数由一个带通函数平移和伸缩组成<sup>[8]</sup>。在离散信号的处理中,常用离散正交(或双正交)紧支集的二进小波变换<sup>[9-10]</sup>。设小波函数为

$$\phi_{j,k}(x) = 2^{-j/2}\phi(2^{-j}x - k) \quad (j, k \in Z) \quad (2)$$

设函数  $\phi_{j,k}(x) \in L^2(IR)$ , 对于任何平方和积函数  $f \in L^2(IR)$ , 二进小波变换定义为函数序列  $\{W_{2^j}f(k)\}_{k \in Z}$ , 其中

$$W_{2^j}f(k) = [f(x), \phi_{2^j,j}(k)] = \frac{1}{2^j} \int_R f(x) \phi^*(2^{-j}x - k) dx \quad (3)$$

小波变换系数  $W_{2^j}f(k)$  给出了  $f(x)$  的尺度  $2^j$  位置  $k$  处的逼近。相反, 函数  $f(x)$  由所有尺度下任何位置处的  $W_{2^j}f(k)$  来精确重构, 即小波变换保留信息, 重构公式为相应的逆变换<sup>[11]</sup>

$$f(x) = \sum_{j \in Z} W_{2^j}f(k) \phi_{2^j}(x) = \sum_{j \in Z} \int W_{2^j}f(k) \left\{ \frac{1}{2^j} \phi(2^{-j}x - k) \right\} dk \quad (4)$$

### 3.3 弯斜的识别与修正原理

#### 3.3.1 波速计算原理

灌注桩的声波透射法检测中分析的主要声学参数是声速、波幅和主频, 同时对实测波形进行观察和记录。其中, 波速为最主要的判别参考参数, 计算公式为

$$t_{ci} = t_i - t_0 - t' \quad (5)$$

$$v_i = l/t_{ci} \quad (6)$$

其中:  $t_{ci}, t_i$  分别为第  $i$  测点的声时和声时测试值 ( $\mu s$ );  $t_0$  为测试系统延时 ( $\mu s$ );  $t'$  为几何因素声时修正值 ( $\mu s$ );  $t^* = t_w + t_p, t_w, t_p$  分别为在耦合介质(水)中的延迟传播时间和声测管壁延时;  $l$  为每个检测剖面相应两声测管外壁间的静距离 (mm);  $v_i$  为第  $i$  测点声速 (km/s)。

超声透射法测桩的检测数据在波速随深度的变化包含了很多信息: 波速本身的随机波动、桩身缺陷信息和声测管弯斜对信号的影响等。采用不同小波系对采集的超声信号进行一维离散小波 (Wavelet 1-D) 分解, 由于一般的缺陷信号和噪声信号的频率相对声测管弯斜信号的频率很高, 所以通过多层小波分解留下的低频信号可以反映声测管的弯斜情况。这样就可以找出声测管发生弯斜的区段以及弯斜的程度, 对其进行修正。由于桩基缺陷对波速的影响是高频的, 所以滤出信号中频率足够低的信号不会对信号的有用信息产生影响, 与一般降噪不同的是滤去的“噪声”是低频的。

#### 3.3.2 弯斜修正模型

用小波函数对图3所示桩的弯斜声测管检测数

据进行  $n$  阶分解, 设测得的波速曲线为  $V(z)$ ,  $z$  为测点深度, 其定义域为 0 到桩长  $l$ 。对  $V(z)$  小波分解

$$V(z) = \sum_{j \in Z} W_{2^j}V(k) \phi_{2^j}(z) = \sum_{j \in Z} \int W_{2^j}V(k) \left\{ \frac{1}{2^j} \phi(2^{-j}x - k) \right\} dk \quad (7)$$

$V(z)$  根据频率特性分解为

$$V(z) = \sum V_0(z) + V_1(z) + V_2(z) + V_3(z) + \dots = \sum_{n=0}^n V_n(z) \quad (8)$$

当  $n$  为恰当值时,  $V_0(z)$  为  $V(z)$  中除去高频信号后频率最低的成分, 即包含了声测管的弯斜信息。

$V_0(z)$  可以表示成分段函数的形式为

$$V_0 = \begin{cases} V_0'(z) & (z \notin B^*) \\ V_0''(z) & (z \in B^*) \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $B^*$  表示声测管发生弯斜的区段;  $V_0'(z)$  为声测管正常区段范围内的波速;  $V_0''(z)$  为声测管弯斜区段内的波速。

取  $V_0'$  的平均值  $\bar{V}'_0 = \frac{1}{m} \sum_{z=0}^m V_0'(z)$ ,  $m$  为声测管没有发生弯斜区段内的测点数目。声测管弯斜时产生的误差为

$$\Delta V = V''_0(z) - \bar{V}'_0(z) = V''_0(z) - \frac{1}{m} \sum_{z=0}^m V_0'(z) \quad (10)$$

修正后的波速为

$$\tilde{V}(z) = V(z) - \Delta V(z) = V(z) - \left[ V''_0(z) - \frac{1}{m} \sum_{z=0}^m V_0'(z) \right] \quad (11)$$

在整个桩长范围内真实波速  $c(z)$  的表达式为

$$c(z) = \begin{cases} V(z) & (z \notin B^*) \\ \tilde{V}(z) & (z \in B^*) \end{cases} \quad (12)$$

## 4 计算机模拟

### 4.1 仿真实验分析

在建立的基于一维小波分析理论的修正模型中关键问题是如何选取小波基函数。针对这一问题, 决定选取 Harr, Daubechies, Sym, Coiflet, Bior 5 类共 37 种常见的小波函数结合修正模型对常见的桩底声测管发生弯斜的情况进行计算机模拟识别与修正, 修正效果最好的小波函数即为模型最终采纳的小波基函数。

为了评价对声测管修正与识别的效果, 采用以下 5 个参数来比较分析。

1) 弯斜点识别绝对误差:识别出的弯斜点起始点与模拟条件事先给出的弯斜起始点的距离,单位为m;

2) 弯斜点识别相对误差:弯斜点识别相对误差与桩长的百分比,单位为%;

3) 非弯斜段平均误差:在声测管非弯斜段各测点处的波速与小波变换后相应点处波速的平均差值,单位为m;

4) 非弯斜段相对误差:非弯斜段平均误差与非弯斜段平均波速的百分比,单位为%;

5) 弯斜段相关系数:修正模型识别出一组弯斜段数据与模拟条件给出的弯斜段数据的相关系数。

## 4.2 模拟环境

根据工程经验确定的具体模拟环境为:管距  $d=0.8\text{ m}$ ,平均波度  $\bar{v}=4.3\text{ km/s}$ ,忽略在耦合水和钢管壁中的传播时间,声时平均值应为  $t=0.8/4\ 300=186.05\text{ ms}$ ,假设在后  $20\text{ m}$  处产生  $0.8\%$  的线性倾斜,测管底部相距  $0.64\text{ m}$ ,声时应为  $t=148.84\text{ ms}$ 。为了寻找合适的小波函数及阶数,选取5类37种不同的小波基函数在不同阶数下用 Matlab 进行计算机模拟。

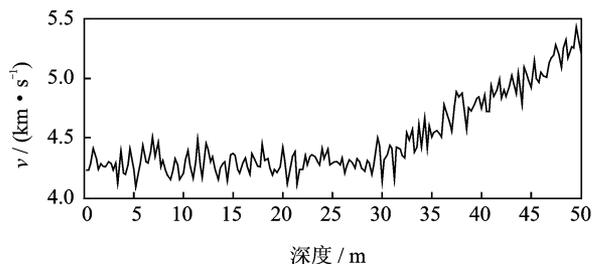


图4 原始模拟信号

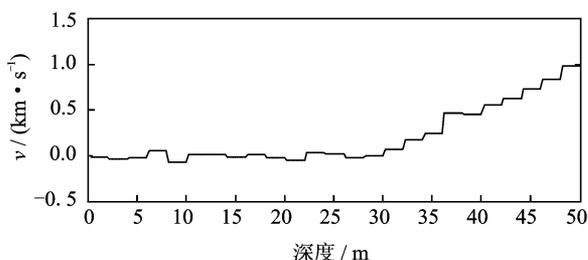


图5 Harr 对声测管弯斜的识别

## 4.3 模拟结果分析

根据弯斜起始点的识别精度和弯斜段的修正平均误差,根据选取的5个参数在选取的5类小波中选

取每类修正效果最好的小波进行对比分析,图5~图9为不同小波对弯斜的识别情况。

从表1可以发现,从弯斜点识别的准确度来看,最好的是  $\text{Harr}_3$  小波在3阶分解时得到的,其次是  $\text{Db}_6$  小波在6阶分解时得到的,其相对桩长的误差只有  $2.5\%$  和  $4\%$ 。从整体修正情况来看,不论是非弯斜段的相对误差还是弯斜段的线性相关系数,均显示  $\text{Db}_6$  小波在数据的修正中明显的优越性,其非弯斜段的相对误差仅为  $0.43\%$ ,而弯斜段的相关系数达到了  $0.995$  以上。模拟结果显示,在选取常用的5类小波函数中,  $\text{Db}_6$  小波在处理声测管弯斜问题时是最适合的。

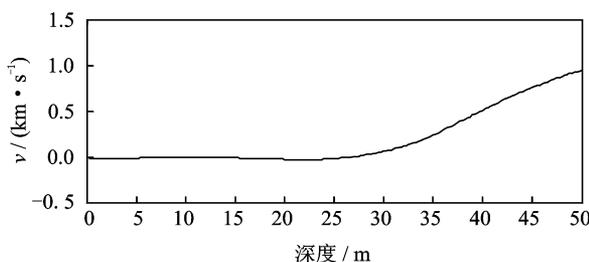


图6  $\text{Db}_6$  对声测管弯斜的识别

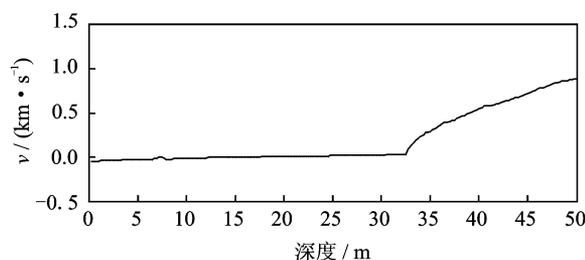


图7  $\text{Sym}_2$  对声测管弯斜的识别

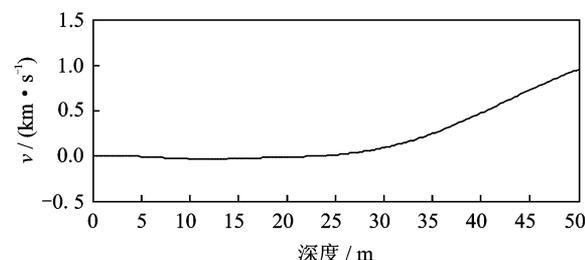


图8 Coiflet 对声测管弯斜的识别

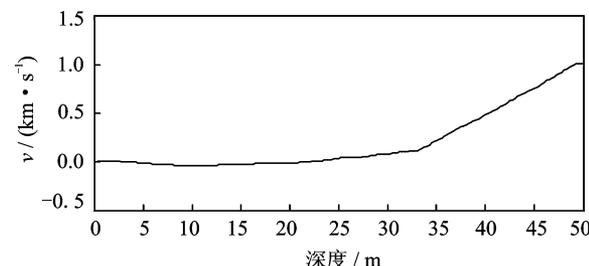


图9  $\text{Bior}_{4.4}$  对声测管弯斜的识别

表1 Matlab模拟修正结果参数对比

小波函数	阶数	弯斜点识别绝对误差/m	弯斜点识别相对误差/%	非弯斜段平均误差/(m·s <sup>-1</sup> )	非弯斜段相对误差/%	弯斜段相关系数
Harr	3	1.25	2.5	26.6	0.62	0.474
Db <sub>6</sub>	6	2.00	4.0	14.4	0.33	0.995
Sym <sub>2</sub>	7	12.5	25.0	20.1	0.47	0.949
Coiflet <sub>3</sub>	6	4.50	9.0	20.2	0.47	0.988
Bior <sub>4.4</sub>	6	-6.75	13.5	22.2	0.52	0.967

## 5 工程实例

某公路分离式立交桥13-4#桩为钻孔灌注桩,桩径为120 cm,测试深度为62.0 m,每根桩布置了3根声测管。从检测结果发现,剖面2~3从47 m开始波速开始缓慢增大,到桩底波速已增大到5.4 km以上时为明显异常。怀疑桩底部分声测管发生弯斜,故对其进行修正,如图3所示。

对检测数据用Db<sub>6</sub>小波进行弯斜点识别并对弯斜段进行修正,修正前、后的数据如图10所示。用传统多项式拟合的方法对数据进行了修正,对比结果如图11所示。从图10可以看出,桩底声测管弯斜情况得到了修正,修正没有影响检测信号局部信息的传递,几乎保留了全部有用的高频信息,达到了很好的修正效果。从图11中发现,拟合虽然能够使底部声测管弯斜得到修正,但改变了部分高频信息且在非弯斜段对数据产生了影响,干扰了有用信息。可见,新的修正方法使超声透射法检测桩基的稳定性和准确性得以提高,能够减少错判和漏判的发生。

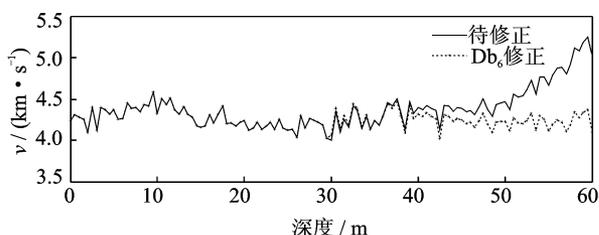
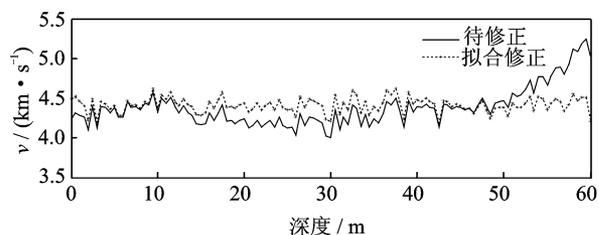
图10 用Db<sub>6</sub>小波进行弯斜修正前、后对比图

图11 用传统多项式方法进行弯斜修正前、后对比图

## 6 结束语

基于信号处理中的小波分析理论,为声测管发生弯斜时检测数据的修正提供了新的思路及合理的理论修正模型。运用一维小波分析理论和计算机仿真模拟,得到了识别弯斜和修正数据的最佳小波基函数Db<sub>6</sub>。模拟结果显示,弯斜点的识别误差<4%,修正误差小于0.33%,弯斜段线性识别的相关系数达到0.995以上。在对某桥梁桩基声测管弯斜数据修正中屏蔽了测管误差影响,保留了有用信息,取得了较好的修正效果。

### 参 考 文 献

- [1] GB50007-2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] JTG/T F81-01-2004 公路工程基桩动测技术规程[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [3] 中国工程建设标准化协会. CECS21:2000 超声法检测混凝土缺陷技术规程[S]. 2000.
- [4] 金元,童寿兴. 灌注桩声波透射检测中声测管管距修正研究[J]. 建筑材料学报,1999, 2(4): 349-352.  
Jin Yuan, Tong Shouxing. A new method for amending the time-interval in ultrasonic test for pile[J]. Journal of Building Materials, 1999, 2(4): 349-352. (in Chinese)
- [5] 范晨光,郑国勇,高芳清. 超声法检测桩基中判别斜管与管距修正的投影法[J]. 路基工程,2004(6): 6-8.  
Fan Chenguang, Zheng Guoyong, Gao Fangqing. Projection method for amending the time-interval in ultrasonic test for pile[J]. Subgrade Engineering, 2004(6): 6-8. (in Chinese)
- [6] 周文斌,胡二中,黎超群. 检测管不平行对超声透射法检测数据的影响和校正方法[J]. 湖南大学学报, 2008(11): 136-140.  
Zhou Wenbin, Hu Erzong, Li Chaoqun. Influence on ultrasonic transmission detecting data by unparallelism of detected pipeline and correcting approach

- [J]. Journal of Hunan University, 2008(11): 136-140. (in Chinese)
- [7] 关爱军,唐新建,王耀辉. 基桩声波透射法检测中弯管的神经网络处理方法[J]. 土工基础, 2002, 16(4): 66-69.  
Guan Aijun, Tang Jianxin, Wang Yaohui. Modification for the bend of pipes using the neural network technique in acoustic penetrating test of pile foundation[J]. Soil Engineering and Foundation, 2002, 16(4):66-69. (in Chinese)
- [8] 钟佑明. 小波包时频分析及其特性[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(1):51-54.  
Zhong Youming. Wavelet packet time-frequency analysis and its property[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(1): 51-54. (in Chinese)
- [9] 赵淳生,沈寿林. 基于小波变换的超声电机启动和关断特性的测试与分析[J]. 数据采集与处理, 2004, 19(4):377-379.  
Zhao Chunsheng, Shen Shoulin. Test and analysis of starting-up and stopping response characteristics of ultrasonic motor using wavelet transformation[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2004, 19(4):377-379. (in Chinese)
- [10] 沈松,应怀樵,刘进明. 小波变换在振动信号分析中的工程解释与应用[J]. 振动、测试与诊断, 2000, 20(4): 259-263.  
Shen Song, Ying Huaiqiao, Liu Jinming. An engineering in terpretation to wavelet transform and its applications to the analysis of vibration signals[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2000, 20(4):259-263. (in Chinese)
- [11] Daubechies I. Ten lectures on wavelets[M]. [S.l.]: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992: 101-106.



**第一作者简介:**张献民,男,1959年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为岩土工程及其无损检测理论与应用、桥梁结构健康状况诊断技术等。曾发表《基桩缺陷量化低应变动测研究》(《岩土工程学报》2003年第1期)等论文。  
E-mail:cauczxm@126.com

## 第五届全国振动利用工程学术会议暨第四次全国超声电机技术研讨会 联合征文通知

为促进振动利用工程、超声电机技术及其相关研究方向的进一步发展,第五届全国振动利用工程学术会议暨第四次全国超声电机技术研讨会将于2012年10月13—15日在南京召开。

本次会议是由中国振动工程学会振动利用与控制专业委员会和南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室联合主办、国家自然科学基金委员会支持、南京航空航天大学精密驱动研究所承办。欢迎全国各高等院校、科研院所、工矿企业、国防军工、仪器仪表等从事振动领域工作和超声电机技术及其应用的专家、学者和工程师们踊跃投稿,积极参加这次学术交流盛会,共同探讨振动学科和超声电机技术发展、交流研究成果和心得体会。本次会议期间同时举办振动测量仪器、振动利用装置、超声电机及其相关仪器设备展览会。欢迎研制或生产上述仪器设备的单位前来参展!

**重要日期:**2012年6月1日前提交摘要(500字);2012年7月1日前发摘要接收通知;2012年9月1日前全文提交。摘要及全文提交邮箱:CV5\_WU4@nuaa.edu.cn。

**会议秘书处:**南京市御道街29号南京航空航天大学359信箱,南京航空航天大学精密驱动研究所,邮编:210016,电话:025-84891812,025-84896661,电传:025-84893075,电子邮箱:CV5\_WU4@nuaa.edu.cn,联系人:杨淋博士13601457730,彭瀚旻博士13851654791。