

基于相位角变化的桩基缺陷位置识别方法^{*}

刘景良¹, 郑锦仰¹, 林上顺², 黄豪³, 陈鑫¹

(1. 福建农林大学交通与土木工程学院 福州, 350002) (2. 福建工程学院土木工程学院 福州, 350118)

(3. 福建省交通科学技术研究所 福州, 350004)

摘要 传统的低应变反射波信号解读方法具有很大的经验性,因而对桩身的缺陷位置常常作出错误的估计。为合理判断桩身缺陷位置,提出一种新的基于相位角变化的桩基缺陷位置改进识别方法。首先,利用解析模态分解定理和递归希尔伯特变换提取了重点关注频带范围内的反射波纯调频信号;其次,对提取的纯调频信号进行小波变换并通过相位角的变化判别桩身缺陷位置;最后,通过王乾 1 号大桥桩基实测数据验证了所提出方法的有效性。研究结果表明,该方法能够有效判断桩身缺陷疑似位置,为后续的缺陷位置排查提供了便利,但仍需结合其他桩基损伤识别方法和相关工程资料进行验证。

关键词 连续小波变换; 损伤识别; 桩基; 相位角; 时频

中图分类号 TN911.6; TU311.3

引言

传统的低应变测试法是一种基于动力测试的桩基无损检测方法,它根据时域反射波信号的幅值变化直接判断应力波在桩身中的传递情况并由此确定桩基的缺陷位置和缺陷形式^[1]。由于所需设备携带便利且检测速度较快,低应变测试法已经广泛运用于桩的完整性检测中^[2]。如骆英等^[3]利用小波去噪提高了信号的信噪比,从而使反射波的幅值变化更明显。张良均等^[4]根据信号在不同频带内能量分布的差别提出“能量-故障”诊断模式的桩基缺陷识别方法。牟琳琳等^[5]采用动态有限元的方法对桩基信号进行模拟,并通过小波包分解成功提取了反射波时域特征信息。然而,在实际桩基检测过程中,由于埋入土中的桩与土体结合紧密且因缺陷引起的桩截面阻抗变化梯度并不大,锤击时产生的低应变反射波信号通常是调频信号,且常常被噪声淹没,因而在时域中表现为基线零漂而看不到实际的反射波特征波形。因此,直接根据时域信号判断缺陷位置具有很大的主观经验性,甚至有可能得出错误的结论^[6]。

为客观合理地判断桩身缺陷位置,从时频域的角度对桩基反射波信号进行分析处理是十分必要的。如潘东子等^[7]建立了不同缺陷下桩身质点的纵向振动速度时程空间面,并准确判别了单种缺陷形式下桩的缺陷位置,但无法有效分析桩身内多种缺陷共同作用下产生的响应信号。Ni 等^[8]提出了利用连续小波变换系数的相位角变化判别缺陷位置的方法。该方法不仅避免了经验性信号分析带来的错误判断,同时也能找到一般时域信号中难以发现的较小缺陷。但是,冲击锤敲击时产生的入射波能量过大将会掩盖桩头附近的相位变化情况,从而给桩基缺陷判别带来一定的误差。与此同时,锤击后的桩土相互作用会使得实测桩基信号在时频域内表现为多个密集的能量范围,从而在一定程度上使得相位图产生扭曲变形。

为此,笔者针对低应变反射波信号为含噪调频信号的特点提出了一种新的桩基缺陷位置识别方法。首先,通过引入解析模态分解定理(analytical mode decomposition, 简称 AMD)^[9],由低通自适应滤波器从桩基反射波信号中提取感兴趣频带范围内的反射波分量信号,从而有效避免了其他频带范围内的反射波信号能量对相位映射图

^{*} 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51608122);福建省自然科学基金青年科技人才创新资助项目(2016J05111);福建农林大学杰出青年基金资助项目(XJQ201728)

收稿日期:2017-09-21;修回日期:2017-12-12

产生的扭曲变形;其次,在 AMD 定理分离出单分量信号的同时,采用递归希尔伯特变换对信号进行解调,从而实现了幅值函数和调频函数的完全分离,上述解调过程在保留信号完整相位信息的同时,避免了幅值函数过大而掩盖了相位的变化;然后,对解调后的纯调频信号进行连续小波变换,并绘出小波系数相位角在时频面上的映射图;最后,在映射图上找出相应的相位角变化点并由此确定桩身的缺陷位置。为验证该方法的有效性,将其应用于王乾 1 号大桥的桩基损伤检测中,研究表明,新提出的方法能够有效判断桩身缺陷疑似点,为后续的缺陷位置排查提供了便利。值得注意的是,虽然低应变反射波法是一种极为有效的桩身检测方法,但是由于复杂地质环境下的桩土相互作用以及环境噪声的影响,仅仅依靠低应变反射波法得到的结论不能作为判定工程桩是否合格的决定性依据,而应与其他信息如桩的设置过程、地质情况等资料综合考虑,从而进一步完成桩身完整性判别^[6]。

1 基本理论

1.1 低应变反射波法

低应变反射波法是一种基于一维波动理论的桩身完整性检测方法。当桩身细长比 $\lambda \geq 5$,且应力波波长远远大于桩身横截面尺寸时,应力波在桩身中的传递过程可用一维波动方程^[10]表达

$$c^2 \partial^2 U / \partial^2 X = \partial^2 U / \partial^2 t \quad (1)$$

其中: U 和 X 分别为位移和桩长方向的位置量; t 为时间; c 为弹性波波速。

在反射波法测试过程中,桩身存在的缺陷通常通过截面阻抗的变化来表征,其基本原理为:利用冲击锤向桩顶施加瞬态激励后,桩身内会产生初始向下的应力波。当应力波经过缺陷截面时,会在该截面发生反射和折射,两者的能量大小分别和入射波、反射波所在界面的阻抗 Z_1 及 Z_2 有关,其中 Z_1 和 Z_2 可通过式(2)求解

$$\begin{cases} Z_1 = \rho c A_1 = F_i / v_i \\ -Z_2 = -\rho c A_2 = F_r / v_r \end{cases} \quad (2)$$

其中: ρ , c , A 分别为桩身材料密度、应力波平均传播波速和桩身截面面积。

缺陷处应力波的传递公式^[10]可表示为

$$v_i + v_r = v_t \quad (3)$$

$$F_i + F_r = F_t \quad (4)$$

其中: v 和 F 分别为应力波传播速度和截面作用力;下标 i , r , t 分别代表入射波、反射波以及折射波。

将式(2)的波速改写为截面作用力与截面阻抗之商,然后代入式(3)可得

$$F_i / Z_1 + F_r / Z_1 = F_t / Z_2 \quad (5)$$

联立式(4)和式(5)可得缺陷处的反射波速度 v_r 和截面作用力 F_r ,如式(6)所示

$$\begin{cases} F_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} F_i \\ v_r = -\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} v_i \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,无论是反射波速度还是截面作用力,均与截面阻抗 Z 有关。特别是当应力波在传递过程中遇到缺陷时,反射波的幅值和相位就会发生变化。因此,通过分析反射波信号的幅值和相位特征可以判断桩的长度和完整性^[11]。

1.2 解析模态分解定理

AMD 的本质是利用希尔伯特变换将每个具有特定频率成分的分量信号解析地分解出来。因此,通过 AMD 可以分离出重点关注频带范围内的分量信号,以避免桩土相互作用等因素产生的能量对相位角映射图的干扰。

假设原信号 $x(t)$ 由任意 n 个分量信号 $x_i^{(d)}(t)$ ($i=1,2,\dots,n$)组成,其每个分量信号对应的频率范围 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ($\omega_n > 0; i=1,2,\dots,n$)都满足 $(|\omega_1| < \omega_{b1}), (\omega_{b1} < |\omega_2| < \omega_{b2}), \dots, (\omega_{b(n-2)} < |\omega_2| < \omega_{b(n-1)}), (\omega_{b(n-1)} < |\omega_n|)$ 。其中 $\omega_{bi}(t) \in (\omega_i, \omega_{i+1})$ ($i=1,2,\dots,n-1$)为 $n-1$ 个二分截止频率,则原始信号的每个分量信号可以由式(7)、式(8)解析地给出

$$x_i^{(d)} = s_1(t), \dots, x_i^{(d)}(t) = s_i(t) - s_{i-1}(t), \dots, \quad (7)$$

$$s_i(t) = \sin(\omega_{bi}t)H[x(t)\cos(\omega_{bi}t)] - \cos[\omega_{bi}t]H[x(t)\sin(\omega_{bi}t)] \quad (8)$$

其中: $H[\cdot]$ 表示希尔伯特变换算子。

1.3 递归希尔伯特变换

由于响应信号的相位信息只存在于信号的调频部分,而与信号的幅值函数无关,因此有必要对重点关注区域内的反射波调幅调频信号进行解调,从而进一步放大信号相位信息特征。递归希尔伯特变

换^[12]本质上是一个解调过程,它能够很好地实现调频函数和幅值函数的分离,从而有效避免了锤击时产生的能量过大而掩盖由桩头附近缺陷产生的相位信息。对于任意单分量信号 $x_1(t)$,其递归希尔伯特变换过程如下。

首先,对单分量信号 $x_1(t)$ 进行希尔伯特变换并构造解析信号,如式(9)所示

$$z(t) = x_1(t) + iH[x_1(t)] = A_1 e^{-i\phi_1} \quad (9)$$

其中: $H[\cdot]$ 为希尔伯特算子; $A_1 = \sqrt{[x_1(t)]^2 + \{H[x_1(t)]\}^2}$ 和 $\phi_1 = \arctan[H[x_1(t)]/x_1(t)]$ 分别为幅值函数和调频函数。

因此,单分量信号即解析信号的实部可表示幅值函数 A_1 和调频函数 $\cos\phi_1$ 的乘积

$$x_1(t) = A_1 \cos\phi_1 \quad (10)$$

将调频信号 $x_2(t) = \cos\phi_1 = x_1(t)/A_1$ 作为新的信号并继续对其进行希尔伯特变换,将产生新的幅值函数 A_2 和调频函数 $\cos\phi_2$,即

$$x_2(t) = A_2 \cos\phi_2 \quad (11)$$

其中: $A_2 = \sqrt{[x_2(t)]^2 + \{H[x_2(t)]\}^2}$; $\phi_2 = \arctan[H[x_2(t)]/x_2(t)]$ 。

不断重复上述过程,可得如式(12)所示的迭代公式

$$x_n(t) = x_{n-1}(t) / \sqrt{[x_{n-1}(t)]^2 + \{H[x_{n-1}(t)]\}^2} = x_{n-1}(t) / A_{n-1} \quad (12)$$

由于每一次迭代过程均会产生新的调频函数及幅值函数,因此只有当新的幅值函数 A_n 趋近于1时,迭代才会停止。此时得到的调频函数 $x_n(t) = \cos\phi_n$ 即为单分量信号 $x_1(t)$ 的纯调频信号,也可近似为渐进单分量信号。

1.4 连续小波变换

小波变换具有良好的时频局部化特性以及抗噪性,因此十分适合桩基缺陷检测。对于给定的小波母函数 $\psi(t)$,任意渐进单分量信号 $x_n(t)$ 的连续小波变换为

$$W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_n(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (13)$$

其中: a 为伸缩因子; b 为尺度因子; $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 表示小波基函数 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的复数共轭。

根据式(13)得到的小波系数 $W_x(a, b)$,其对应的相位角 $\phi(t)$ 则可表示为

$$\phi(t) = \arctan\left(\frac{W_I(a, b)}{W_R(a, b)}\right) \quad (14)$$

其中: W_I 和 W_R 分别对应小波系数 $W_x(a, b)$ 的虚部与实部。

2 桩的完整性分析

桩的完整性分析主要包括两个方面,即桩长判别和缺陷位置判别。在进行桩长判别时,可以利用小波量图发现时域信号中难以观察到的桩底反射波信号变化^[8]。在进行缺陷位置判别时,受限于低应变方法的检测手段和技术,即使是处理后的数据仍会受到噪声和桩土相互作用的影响。因此,该方法有可能产生非缺陷引起的相位变化点^[8]。对于此种情况,《建筑基桩检测技术规范》指出:在分析测试信号时应分清哪些是因桩身构造、成桩工艺、土层影响造成的类似缺陷信号特征,应仔细对照桩型、地基条件、施工情况并结合当地经验综合分析判断。

2.1 桩长判别

一般来说,应力波在传递过程中碰到阻抗变化截面时产生的反射波能量要远小于桩底反射波能量。因此,在对桩的反射波信号进行连续小波变换后,小波量图中的高亮部分代表此处有能量产生,而桩顶的入射波与桩底的反射波在小波量图上表现为两个能量集中(高亮显示)的峰值。根据应力波的传播速度 c 和小波量图中两个峰之间的时间差 Δt ,采用式(15)可计算得出实际桩长 L

$$L = \frac{1}{2} c \Delta t \quad (15)$$

其具体流程图如图1所示。

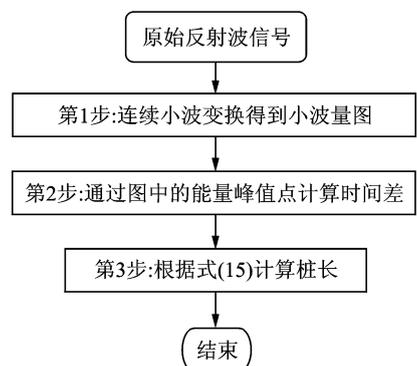


图1 桩长判别流程图

Fig. 1 The flow chart of pile length identification

2.2 缺陷位置判别

一般来说,缺陷引起的反射波幅值变化较小且常被噪声淹没。相对于反射波幅值,相位角对损伤更为敏感,因此可利用小波系数的相位角特性来判别桩基的缺陷位置。然而,小波系数相位角在时频面上的映射图容易受到其他无关能量信号的干扰而发生扭曲变形,从而影响相位角变化点的判断。此外,锤击产生的较大入射波能量也会掩盖桩头附近的相位角变化。由于能否准确判断小波系数相位角变化点是此类方法成功与否的关键因素,因此有必要采用 AMD 定理对反射波信号进行分量信号提取,以避免其他无关能量信号对相位角映射图的干扰。在成功提取重点关注范围内的反射波分量信号的基础上,引入递归希尔伯特变换进行解调。解调过程不但实现了信号调频函数和幅值函数的分离,而且避免了幅值对相位变化角的影响。对解调后的调频信号进行连续小波变换,并根据式(14)求解小波系数相位角 $\phi(t)$ 并将其映射到时频面上。当桩身材质均匀且没有缺陷时,相位角映射图在时频面上表现为间隔相等的直线;但是当桩身存在缺陷时,相位角变化点在映射图上表现为“交叉点”的出现,而只有在“交叉点”对应的能量存在的情况下,此处的“交叉点”才可判定为真正的缺陷点^[13]。在找出“交叉点”之后,绘出“交叉点”处频率所对应的时间-相位角曲线以验证该点的正确性。根据时间-相位角曲线计算相位角变化点到桩头的时差 Δt_n ,再采用 Δt_n 替换式(15)中的 Δt ,可得桩缺陷位置处至桩顶的距离 L_n

$$L_n = \frac{1}{2} c \Delta t_n \quad (16)$$

桩基缺陷位置判别的具体流程图如图 2 所示。

3 实例验证

通过王乾 1 号大桥 2-2 桩基检测实例数据验证基于相位角变化识别桩身缺陷方法的有效性。该测试桩为钻孔灌注桩,桩长为 19.58 m,截面直径为 2 m。为取得该桩损伤位置理论值,笔者以超声透射法测得的损伤位置为理论结果,测得在离桩头 15 m 处存在缺陷。由于桩的长细比 λ 为 $19.58/2=9.79$,满足一维波动理论的应用前提。通过冲击锤对桩顶施加瞬时冲击力,利用放置在

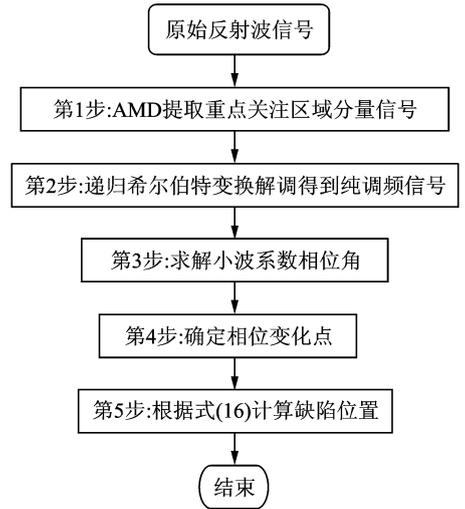


图 2 缺陷位置判别流程图

Fig. 2 The flow chart of pile defects detection

桩顶的顶置式加速度传感器(灵敏度为 20.3 mV/g)采集加速度数据,采集仪为美国 PDI 公司的 PIT 动测仪,设置采样间隔为 22.2 μ s,共采集 1 024 个数据,整个试验装置如图 3 所示。采集的加速度数据经积分处理后得到如图 4 所示的速度曲线,平均波速 c 则根据混凝土强度判定为 3 600 m/s。由图 4 可以看出,1~3 ms 时间段内的速度幅值发生了明显变化,而在其他时间段只能观察到类似于基线的漂移。因此,很难从反射波时域信号直接判别桩长及缺陷位置。



图 3 现场测试装置图

Fig. 3 The setup of pile test

在此次桩基实例验证中,以超声波透射法得到的结果,即损伤位置缺陷位置离桩头 15 m 处为理论对比结果。超声波透射法利用声测管中脉冲发生器和接收器得到的数据判断一定区域内的桩身缺陷^[14],是现有桩基检测方法中较为可靠的一种检测方法,其测管布置横断面与剖面如图 5 所示。值得

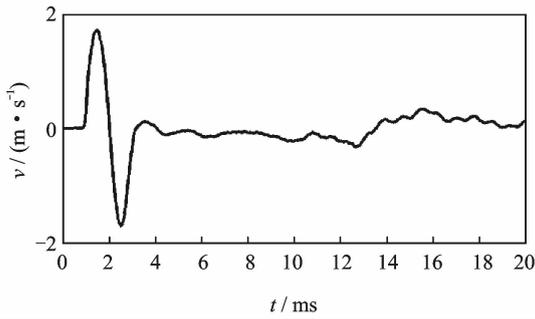


图4 反射波速度曲线

Fig. 4 The velocity of reflected waves

注意的是,即使是超声波透射法也存在漏测的区域,即如图5所示的盲区,故不一定能够完全探测到桩身内存在的所有缺陷^[6]。

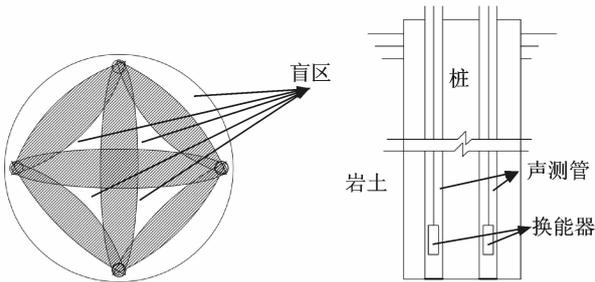


图5 桩内测管布置图

Fig. 5 The arrangement of acoustic pipes in pile

3.1 实际桩长测量

对图4的速度信号进行连续复高斯小波变换,得到如图6所示的小波量图。从频率轴上看,小波量图在0~150 Hz和200~1 000 Hz两个频率区间内都存在高亮部分。但是,200~1 000 Hz区间内的能量相对较大,更符合冲击锤在短时间内产生较大能量的实际情况。因此,将主要的频率分析区间定在200~1 000 Hz区间内。从时间轴上看,小波量图不仅在2 ms附近存在明显的能量变化,同时在12.5 ms往后的区间内也出现了能量变化。其中,2 ms处出现的能量变化是由入射波引起的,而桩底反射波引起的能量变化在12.5 ms处出现。因此,由图6可知,入射波能量最大点与反射波能量最大点之间的时间差 $\Delta t=12.5-2=10.5$ ms。将 Δt 代入式(15)可估算桩长为 $L=\frac{1}{2}c\Delta t=18.9$ m。与桩长理论值相比,计算结果误差约为3.4%,满足工程实际要求。

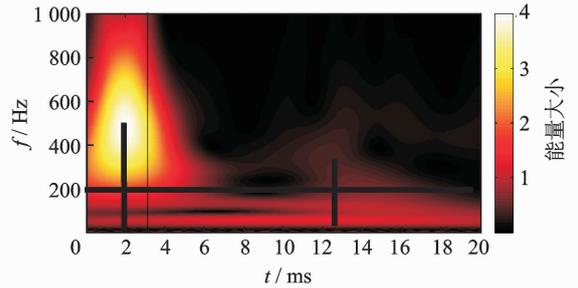


图6 反射波信号小波量图

Fig. 6 Wavelet scalogram of the reflected wave signals

3.2 实际缺陷位置检测

为避免重点关注频带范围外的信号能量对相位角映射图的干扰,利用AMD定理提取重点关注频带内的反射波信号(200~1 000 Hz),得到的反射波信号如图7所示。对提取出的分量信号进行递归希尔伯特变换,得到如图8所示的纯调频信号,然后对图8中的纯调频信号进行连续复高斯小波变换并根据式(14)计算得到相位角。将相位角映射到时频面上,然后进行了灰度处理,如图9所示。其中,白色代表的相位角是 180° (π),而黑色表示相位角为 -180° ($-\pi$)。

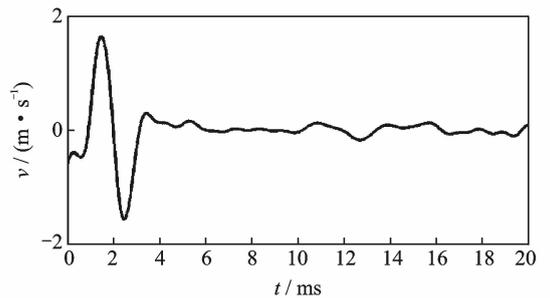


图7 重点关注频带内的反射波信号

Fig. 7 Reflected wave signals in interested frequency band

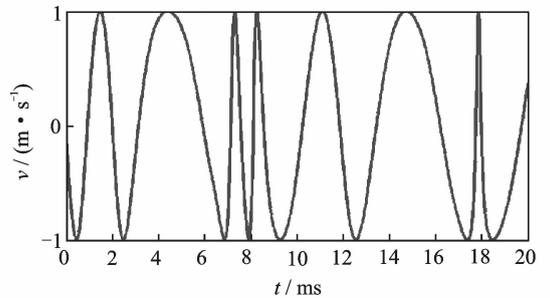


图8 重点关注频带内纯调频信号

Fig. 8 FM part in interested frequency band

根据所确定的频率范围(200~1 000 Hz)和时间范围(2~12.5 ms)可将“交叉点”的搜索范围缩

小至 ABCD 这 4 点围成的区间范围,如图 9 所示。此时,该区间内只存在 1 和 2 两个相位角变化点,其对应的频率均为 835.8 Hz。因此,在图 9 中绘出 1 点和 2 点在 835.8 Hz 频率下的时间-相位角图。由图 10 可知,对应频率下的各点相位角确实发生了变化,且相位变化点 1 和 2 对应的时间点 Δt_1 和 Δt_2 分别为 6.3 ms 和 9.2 ms,然后根据式(16)可计算出相位角变化点分别在 11.34 和 16.56 m 处出现。其中相位角变化点在离桩头 16.56 m 处的结果与超声波透射法识别结果(离桩头 15 m 处)比较吻合,其相对误差在 10.8%左右。由于该处的缺陷位置识别得到两种方法的佐证,可以判定为缺陷位置。对于新方法中 11.34 m 处存在相位角变化点这个结论,可归结于以下两个方面的原因:a. 非缺陷引起的相位变化,如桩土相作用或是噪声等影响因素^[8];b. 缺陷引起的相位角变化,即该点为缺陷位置,但恰好处于超声波透射法探测盲区內。

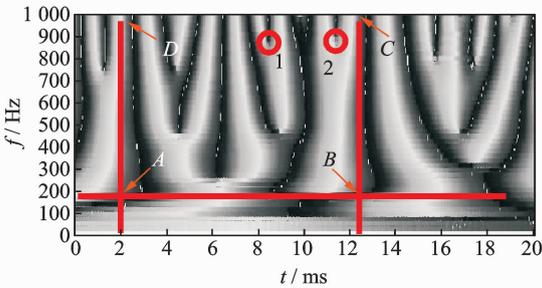


图 9 相位角映射灰度图

Fig. 9 The Grayscale images of phase angles

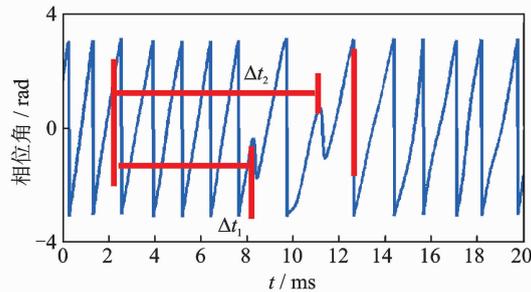


图 10 835.8 Hz 频率下的时间-相位角

Fig. 10 The time-phase angle curve with the frequency of 835.8 Hz

因此,仅仅利用低应变反射波方法只能有效判断桩身缺陷疑似点,但为后续的缺陷位置排查提供了便利。对于此种情况,应与其他桩基检测方法进行相互验证,或者结合其他信息如桩的设置过程、地质情况等资料一起综合考虑,从而进一步完善桩身的缺陷位置判别。

4 结 论

1) AMD 定理能够从桩基反射波信号中提取出重点关注频带范围内的反射波分量信号,从而有效避免了其他频带范围内的反射波信号能量对相位映射图产生的扭曲变形。

2) 通过递归希尔伯特变换得到的纯调频信号小波系数的相位角映射图可以快速准确地定位相位角变化点的位置,从而有效判断桩身缺陷疑似位置,并为后续的缺陷位置排查提供了便利。

3) 仅根据低应变数据很难推断出相位角变化是否由桩基缺陷引起。为正确识别缺陷位置,该方法还应与其他桩基检测方法进行相互佐证,或者与其他工程资料综合考虑,从而得到最终的缺陷判别结果。

参 考 文 献

[1] 张敬一,陈龙珠,宋春霞. 旁孔透射波法与反射波法检测基桩的对比分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(8):99-104.
Zhang Jingyi, Chen Longzhu, Song Chunxia, et al. Comparison of parallel seismic and reflected wave tests for piles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013,45(8):99-104. (in Chinese)

[2] 侯鹏,韩华,陈跃武. 用反射波法进行桩基无损检测[J]. 中国安全科学学报,2003,13(4):38-40.
Hou Peng, Han Hua, Chen Yuewu. Non-destructive inspection of pile foundation by reflection wave method [J]. China Safety Science Journal,2003,13(4): 38-40. (in Chinese)

[3] 骆英,柳祖亭,潘宠平. 小波滤波在基桩完整性测试系统中的应用研究[J]. 实验力学, 2000, 15(4): 460-465.
Luo Ying, Liu Zuting, Pan Chongping. Research on the wavelets filtering method used in integrity testing of foundation piles[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(4): 460-465. (in Chinese)

[4] 张良均,王靖涛,李国成. 小波变换在桩基完整性检测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(11): 1735-1738.
Zhang Liangjun, Wang Jingtao, Li Guocheng. Application of wavelet transform in integrity of piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1735-1738. (in Chinese)

[5] 牟琳琳,李卓球,林佳木. 低应变桩基检测模拟信号的

- 小波分析系统研究[J]. 武汉理工大学学报:信息与工程管理工程版,2008,30(3):368-370.
- Mou Linlin, Li Zhuoqi, Lin Jiamu. On wavelet analysis system of the low strain in pile testing analog[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information and Management Engineering, 2008, 30(3): 368-370. (in Chinese)
- [6] 李德庆,李澄宇,李澄海. 桩基工程质量的诊断技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:204-205.
- [7] 潘冬子,章光,马宝斌. 应力波反射法测混凝土桩完整性的数值模拟及实验研究[J]. 公路交通科技,2004,21(9):64-69.
- Pan Dongzi, Zhang Guang, Ma Baobin. Numerical simulation and experimental study of stress wave reflection method for integrity test of concrete pile[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(9): 64-69. (in Chinese)
- [8] Ni S H, Yang Y Z, Tsai P H, et al. Evaluation of pile defects using complex continuous wavelet transform analysis[J]. Independent Nondestructive Testing and Evaluation, 2017, 87: 50-59.
- [9] 刘景良,郑锦仰,郑文婷,等. 基于改进同步挤压小波变换识别信号瞬时频率[J]. 振动、测试与诊断,2017,37(4):814-821.
- Liu Jingliang, Zheng Jinyang, Zheng Wenting, et al. Instantaneous frequency identification of signal based on improved synchrosqueezing wavelet transform. [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 814-821. (in Chinese)
- [10] Xu Juncai, Ren Qingwen, Shen Zhenzhong. Low strain pile testing based on synchrosqueezing wavelet transformation analysis[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(2): 813-825.
- [11] 罗明璋,王军民,徐菲. 声频应力波实时检测分析仪[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(2):292-295.
- Luo Mingzhang, Wang Junmin, Xu Fei,. Real-time analysis system of audio-frequency stress wave[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2): 292-295. (in Chinese)
- [12] 胡志祥,任伟新. 基于递归希尔伯特变换的振动信号解调和瞬时频率计算方法[J]. 振动与冲击,2016,35(7):39-43.
- Hu Zhixiang, Ren Weixin. Vibration signal demodulation and instantaneous frequency estimation based on recursive Hilbert transformation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(7): 39-43. (in Chinese)
- [13] Boulahbal D, Golnaraghi M F, Ismail F. Amplitude and phase wavelet maps for the detection of cracks in geared systems[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13(3): 423-436.
- [14] 李廷,徐振华,罗俊. 基桩声波透射法检测数据评判体系研究[J]. 岩土力学,2010,31(10):3165-3172.
- Li Ting, Xu Zhenhua, Luo Jun. Study of analysis method for collected data of integrity testing of piles by ultrasonic crosshole testing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3165-3172. (in Chinese)



第一作者简介:刘景良,男,1983年11月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为结构健康监测、桥梁振动与稳定。曾发表《基于同步挤压和时间窗的时变结构损伤识别》(《振动工程学报》2014年第27卷第6期)等论文。
E-mail:liujingliang@fafu.edu.cn

